

금속 재료 피로수명 향상을 위한 LSP 유한요소 변수 민감도 해석

김 주 희* · 김 윤 재*†

* 고려대학교 기계공학과

Sensitivity Analyses of Finite Element Parameters of Laser Shock Peening for Improving Fatigue Life of Metallic components

Ju-Hee Kim* and Yun-Jae Kim*†

*† Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received May 7, 2010 ; Revised October 25, 2010 ; Accepted October 26, 2010)

Key Words : FE Analysis(유한요소 해석), LSP(Laser Shock Peening), SP(Shot Peening), Ablative Layer(용융층), Water Tamping Layer(물막층), Transparent Layer(투명층), Plasma(플라즈마), Dynamic Yield Stress(동적항복응력), Infinite Element(무한요소)

초록: 레이저 샷 피닝(LSP)은 금속재료 표면처리를 위한 획기적인 기술로서 금속 부품의 피로성능 개선을 위해 최근에 널리 적용되고 있다. 널리 알려진 바와 같이 금속재료의 피로 균열은 재료의 응력 상태가 인장(Tension)하에서만 발생되고, 압축(Compression)상태에서는 발생하지 않는다. 따라서 피로수명 개선을 위해 전통적인 샷 피닝(SP)과 함께 다양한 분야에 응용되고 있으며, 특히 LSP 는 금속재료의 표면과 깊이방향에 대해 높은 압축잔류응력을 생성시켜 준다. 본 논문에서는 유한요소 해석기법을 이용하여 LSP 에 의해 발생하는 압축잔류응력 생성과정을 모사하고, 압축잔류응력에 영향을 미치는 다양한 변수에 대해 민감도 해석을 수행하였다.

Abstract: Laser shock peening(LSP) is an innovative surface treatment technique, and it has been successfully used to improve the fatigue performance of metallic components. It is widely known, that cracks caused by metal fatigue occur only at the location where the metal is subject to tension, and not at the location where the metal is subjected to compression. Therefore, LSP can be employed to improve fatigue life because it generates a high-magnitude compressive residual stress on the surface and interior of metallic components. In this study, we analyzed the applicability of the LSP method in improving fatigue performance and evaluated the various parameters that influence the compressive residual stress. Further, we analyzed the change in the mechanical properties such as surface dynamic stress and the compressive residual stress on the surface and interior of metallic components.

- 기호설명 -

- α : 압력과 생성효율
- I_0 : 레이저 파워 밀도
- Z : 감소 충격 임피던스
- σ_y^{dyn} : 동적항복응력
- HEL : Hugoniot elastic limit
- $FWHM$: Full Width at Half-Maximum

1. 서 론

전통적인 금속재료 표면처리기술인 SP(Shot peening)은 작은 구슬을 금속표면에 충격시켜 강제

적인 압축잔류응력을 생성시켜준다. 하지만 SP 는 복잡한 형상에 대한 적용이 제한적이며, 피닝 후 생성된 작은 딴플(Dimple)제거를 위한 후처리과정이 필요하다.

이러한 이유로 레이저를 이용한 금속재료 표면처리기술에 관심을 갖게 되었고, 지난 수년간 다양한 분야에서 연구, 활용되고 있다. 특히, LSP(Laser shock peening)는 고온환경에서 잔류응력 해소가 적어 최근에는 피로하중에 의해 파리가 발생하는 원자력 발전소 및 항공기 추진엔진의 수명연장을 위해 적극 활용되고 있다. LSP 는 전통적인 SP 보다 4 배에서 많게는 10 배까지 깊은 압축잔류응력을 생성시켜 주는 장점을 가지고 있으며,⁽¹⁾ 조사되는 레이저의 특성만 잘 활용하면 보다 다양하고 광범위하게 금속재료의 표면처리에 활용할 수 있다. 금속표면의 압축잔류응

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

력은 역학적으로 균열의 생성과 진행을 억제시키고, 금속의 피로 특성과 응력부식균열 성장을 억제시키는 장점이 있다.

하지만 LSP 처리기법은 다양한 요인에 의해 잔류응력 생성 형태와 크기가 다르고, 생성된 잔류응력의 측정을 위해서는 특별한 장비나 기계적인 후처리 과정이 필요한 단점을 지닌다. 따라서 LSP를 적용함에 있어 시간과 비용을 줄이기 위해 잔류응력 생성에 영향을 미치는 변수에 대한 분석으로 최적의 기준이 제시된다면, 산업현장에서 적용성과 경제성을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

이를 위해 본 연구에서는 유한요소 해석기법을 이용하여 LSP를 구현해 보고, 압축잔류응력 생성에 영향을 미치는 다양한 변수에 대해 민감도 해석을 수행하였다.

2. 해석대상 및 LSP 변수

2.1 해석대상

고에너지의 레이저파에 의해 발생하는 충격파를 이용한 LSP 표면처리기술은 금속재료의 표면과 깊이 방향으로 압축잔류응력을 생성시켜 준다.

Fig. 1은 LSP 처리과정을 보여주고 있다. 일정한 레이저 파워밀도의 레이저 빔이 금속표면에 조사되면, 금속표면에서 강한 압력의 플라즈마가 형성되고, 이때 발생한 압력에 의해 금속 내부로 충격파가 전달되면서 금속의 표면과 깊이 방향으로 압축잔류응력을 발생시킨다. 이렇게 발생한 압축잔류응력은 금속표면의 부식은 물론, 피로수명을 향상시켜 준다.

Fig. 1의 LSP 과정을 유한요소모델로 구현하기 위해 Fig. 2와 같이 축대칭(axisymmetric) 요소를 사용하여 시편형상을 ($r_f=6\text{mm}$) 모델링 하였다. 충격파에 의한 경계부 반향효과를 감소시켜주기 위해 무한요소(infinite element)를 혼합 사용하였으며, 레이저 빔의 크기는 $r_p=4\text{mm}$, 모양은 원형으로 가정한다.

유한요소 해석에 적용된 재료는 35CD4 30HRC이며, 탄성-완전 소성재료로 가정하였다. 기타 재료 물성은 Table 1과 같다.

2.2 LSP 변수

본 연구에서는 유한요소(FE) 해석 상용프로그램인 ABAQUS V6.9를 이용하여 LSP 처리과정에 대해 유한요소 해석을 실시하였다.

레이저 피닝 처리에 의해 발생하는 압축잔류응력은 표면과(r) 깊이(z) 방향으로 발생되며, 이 값은 재료의 물성과 충격파를 생성하는 레이저 특성, 그리고 유한요소 해석을 위한 적용방법에 따라 결정된다.

이를 위해 본 연구에서는 레이저 피닝 결과에 영향을 미치는 변수를 1) 유한요소 해석기법 관련

변수와 2) LSP 최적 공정 변수로 구분하였다. 유한요소 해석기법 관련 변수는 다음과 같다.

- Mesh refinement
- Solution time (t_s) for dynamic analysis
- Time increment (Δt_{stable}) for stability
- Bulk viscosity
- Dynamic yield stress

LSP 최적공정 변수는 다음과 같다.

- Peak pressure(Laser power density)
- Pressure duration
- Laser spot size
- Multiple LSP

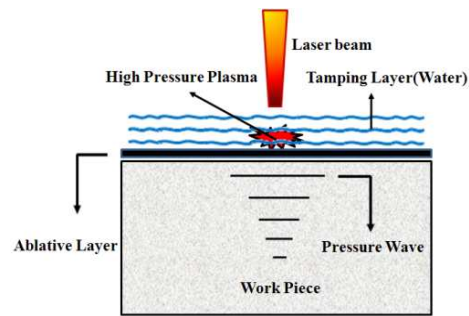


Fig. 1 Schematic of one-sided LSP ⁽⁸⁾

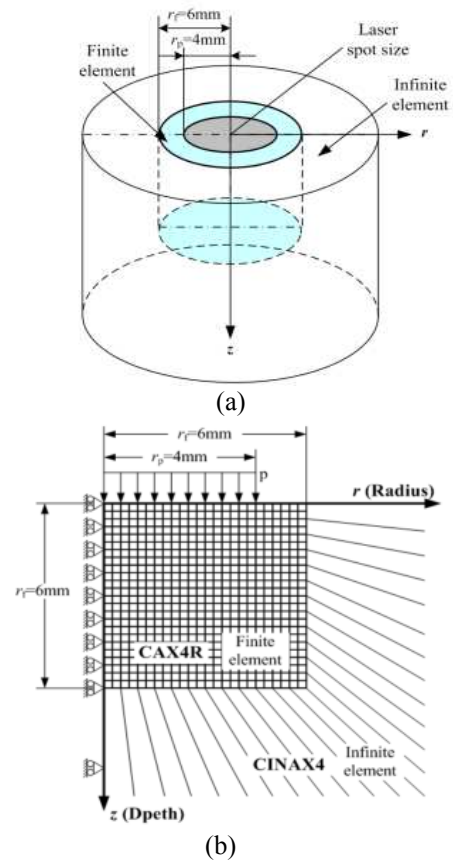


Fig. 2 FE Model of one-sided LSP ((a)-Geometry and (b)-FE Mesh) ⁽¹⁾

Table 1 Material properties(35CD4 30HRC)

| Elastic modulus | Poisson's ratio | Dynamic yield strength |
|-----------------|-----------------|------------------------|
| 210GPa | 0.29 | 0.87 |

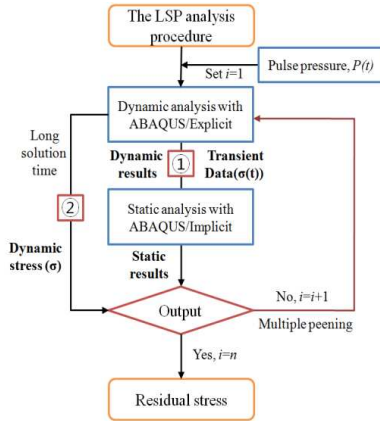


Fig. 3 Procedure of LSP simulation

3. LSP 이론 및 해석절차

3.1 LSP 이론

레이저 빔에 의해 충격파가 생성되어 압축잔류응력을 발생하기 위해서는 높은 압력의 플라즈마가 필수적이다. 이를 위해서 레이저 파의 출력은 GW 급이상의 파워밀도(Power density)를 필요로 한다. 또한, 레이저에 의한 충격파 효과를 극대화시키기 위해서는 금속 표면에 불투명 층(ablative layer)과 물막층(tamping layer)의 전처리 과정이 필요하다.^(1,7)

레이저 빔에 의해 발생하는 압력파의 크기는 조사되는 레이저 빔 파워밀도와 관련이 있다. 일정한 레이저 파워 밀도에 의해 결정되는 최대 압력 값은 식 (1)과 같다.

$$P(GPa) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{z(g/(cm^2 \cdot s))} \sqrt{I_0(GW/cm^2)} \quad (1)$$

여기서 $Z(Z_i = \rho_i D_i)$ (ρ_i : 재료 밀도, D_i : 충격파 속도)는 reduced acoustic impedance 로 $2/Z \approx 1/Z_1 + 1/Z_2$ 으로 구해진다. Z_1 은 투명층(물막층) 재료의 임피던스 값이며, Z_2 는 금속재료의 임피던스값이다.⁽⁸⁾ α 는 플라즈마에 의해 발생하는 압력에 대한 효율로 보통 10%(0.1)의 값으로 가정한다.⁽⁴⁾

레이저에 의한 충격파가 재료내부로 전파되면서 표면과 깊이 방향으로 소성변형이 발생한다. 소성변형은 재료의 최대응력이 Hugoniot 탄성한계(Hugoniot Elastic Limit ; HEL)를 초과하는 깊이까지 발생하며, 식 (2)과 같이 재료가 갖는 동적 항복응력(Dynamic yield strength)과 관계가 있다.^(1,6)

$$HEL = \frac{\lambda + 2\mu}{2\mu} \sigma_y^{dyn} = \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} \sigma_y^{dyn} \quad (2)$$

여기서 λ, μ 는 재료의 Lame's constants 이고, ν 는 재료의 푸아송 비이다.

3.2 LSP 해석절차

LSP 는 단충격파에 의한 동역학적 해석으로 ABAQUS Explicit 를 통해 해석이 가능하다. 하지만 수렴하는 최종 결과값 부근에서 고주파의 국부진동 발생으로 인해 정역학적 평형상태에 도달하는 데에는 상당한 해석 시간이 필요하다. Fig. 3 은 유한요소해석 상용 프로그램인 ABAQUS 를 이용한 LSP 해석과정을 보여준다. 충격파의 반사와 교란에 의한 불안정한 응력상태를 안정화하기 위해 1) ABAQUS Explicit/Implicit 를 이용하는 방법과 2) ABAQUS Explicit 에서 보다 많은 해석 시간을 부여해 주는 방법으로 구분된다.

LSP 유한요소해석을 위해 일반적으로 사용되는 방법은 ABAQUS Explicit/ Implicit 를 이용하는 방법이다.^(2,3) 이는 충격파에 의해 불안정한 상태로 변형된 동적 해석 대상물을 ABAQUS Implicit 로 전환(export)하여 보다 빨리 정적 평형상태에 도달시켜 결과값을 도출해 준다. 본 연구에서는 방법 1) 을 사용하여 해석을 수행하였다.

4. 해석 결과 비교

LSP 에 의한 해석 결과 비교는 표면 방향(r)과 깊이 방향(z)의 압축잔류응력을 비교하였다(Fig. 2 참고). 표면방향은 레이저 스팟 중심으로부터 6mm 까지, 깊이방향은 레이저 스팟 중심으로부터 3.5mm 지점에서 깊이방향 1mm 까지 측정하였다.

4.1 유한요소 해석 기법 관련 변수

4.1.1 Mesh refinement

요소크기는 잔류응력 결과와 해석 시간에 관계된 변수이다. 특히, LSP 유한요소해석에서는 잔류응력 결과가 요소크기에 다소 민감하기때문에 보다 정확한 잔류응력을 얻기위해 요소 밀도가 다른 3 가지 모델을 선정하여 결과를 비교하였다 (M_a : coarse, M_b : moderate, M_c : fine). Fig. 4 를 보면 M_c 의 결과와 M_b 결과는 유사하게 나오지만, M_a 결과값은 상당한 차이를 보인다. 따라서 해석의 효율성(computational efficiency)를 위해 M_b 를 선정하여 해석을 수행하였다

유한요소 해석결과의 타당성을 검증하기 위해 기존 논문의 해석 결과값⁽¹⁾과 실험값⁽⁵⁾을 비교해 보았다. Fig. 5 에서 K. Ding 의 결과 및 실험값이 유한요소 해석 결과값과 잘 일치함을 확인하였다.

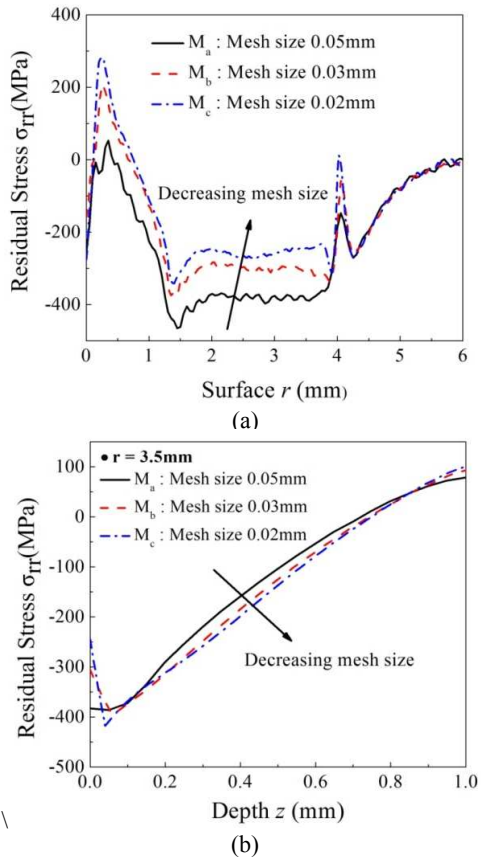


Fig. 4 Residual stress from three FE models ((a)-surface and (b)-depth)

Table 2 는 참고문헌⁽¹⁾의 실험값과 유한요소 해석결과값을 비교한 표이다. 잔류응력의 경향성과 함께 크기도 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 표면방향에서는 약 6%, 깊이방향에서는 약 7% 오차가 발생하였다.

4.1.2 Solution time for dynamic analysis

레이저 압력파에 의한 소성변형은 재료의 변형에 기여하는 내부에너지의 변화로부터 예측할 수 있다. 이중 소성에너지는 재료 내부의 소성변형을 발생시키며, 이 값이 일정한 값에 수렴하면 재료는 더 이상 소성변형이 발생하지 않음을 의미한다. 따라서 소성에너지가 일정하게 유지되는 시간을 확인하여 이보다 충분히 큰 값을 잡아주면 된다. Fig. 6 을 보면 2000ns 이후 소성에너지가 일정하게 수렴함을 확인하였다.

Fig. 7 은 유한요소 해석 시 Solution time 변화시켜 표면과 깊이 방향의 잔류응력을 확인한 그래프이다. 표면에서의 잔류응력은 2000ns 이상 부여했을 경우 충분히 수렴함을 확인하였고 깊이방향은 500ns 이후에 수렴함을 확인하였다. 따라서 두 조건을 모두 만족하는 2000ns 이상 부여해야 동일한 잔류응력 결과를 얻을 수 있다.

Table 2 comparison of experiment and FE results

| 35CD4 30HRC steel | Experiment ^(s) | K. Ding ^(t) | FEM |
|--|---------------------------|------------------------|--------|
| Surface σ_{rr} (MPa) | -360.0 | -383.0 | -337.0 |
| Depth σ_{rr} (MPa) | -450.0 | -390.0 | -418.0 |
| Plastically affected depth, L_p (mm) | 1.0 | 0.81 | 0.81 |

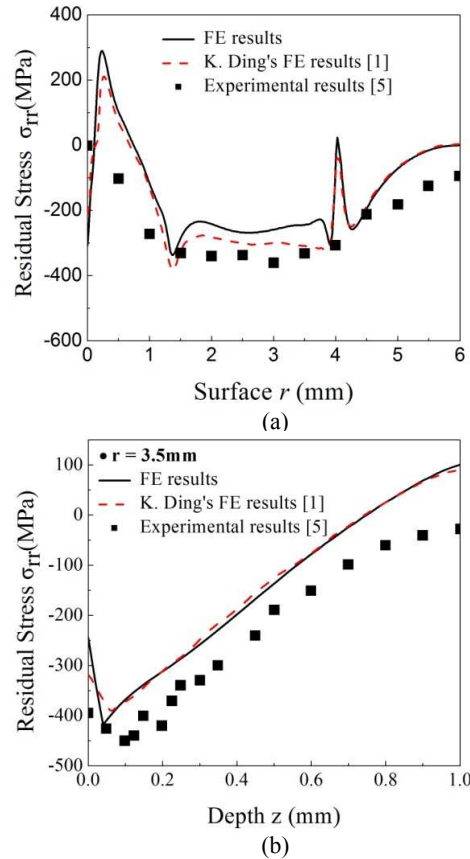


Fig. 5 Comparison of FE results with experimental residual stresses ((a)-surface and (b)-depth)

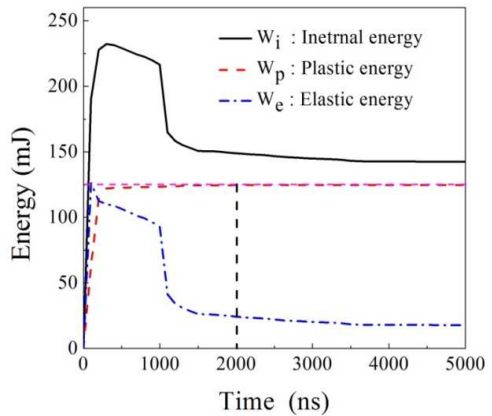


Fig. 6 History of internal, elastically stored and plastically dissipated energy

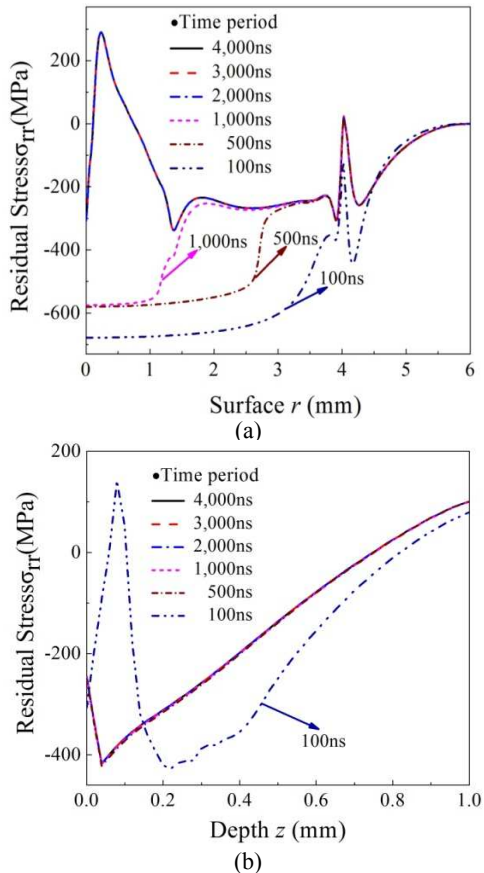


Fig. 7 Residual stress after different periods of solution time ((a)-surface and (b)-depth)

4.1.3 Time increment for stability

ABAQUS/Explicit 에서 해석결과가 안정적으로 수렴하기 위한 최소한의 시간증분은 해석 결과에 큰 영향을 미친다. 요소크기와 재료의 탄성과 속도에 의해 결정되는 안정한계(stability limit) 값은 다음 식 (3)으로 결정한다.

$$\Delta t_{stable} = \frac{L^e}{C_d}, \text{ here, } C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

Fig. 8 은 식 (3)에 의해 결정된 Δt_{stable} 와 $\Delta t_{stable} / 2$ 를 적용하여 얻은 잔류응력 결과값을 나타낸 그래프로, 결과값이 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 요소 크기와 재료의 탄성과(elastic wave) 속도에 의해 결정되는 안정한계보다 작은 시간증분을 사용하면 동일한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

4.1.4 Bulk viscosity

충격 응력파는 소성변형과 점성 소산에너지(viscously dissipated energy) 및 소성 소산에너지(plastically dissipated energy)에 의한 댐핑 효과로 인해 재료내부에서 점차 감소한다. 이러한 재료의

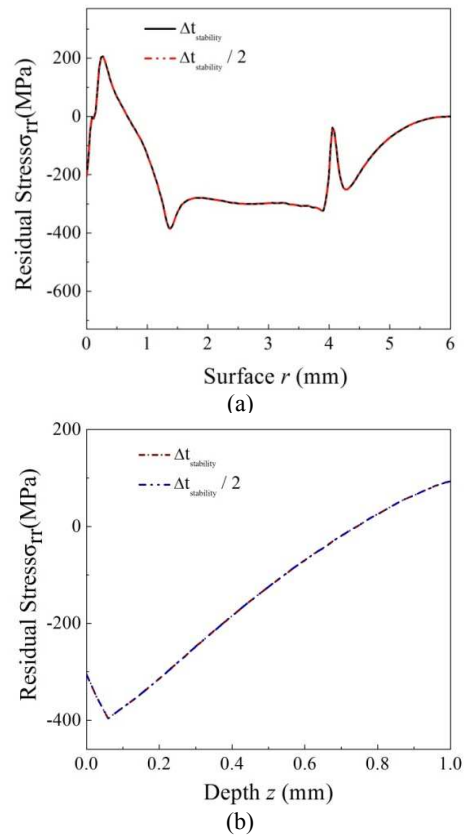


Fig. 8 Residual stresses from two stability limit ((a)-surface and (b)-depth)

특징을 묘사하기 위해 유한요소 해석 시 재료의 점성 댐핑 계수를 결정해야 한다.

Fig. 9 는 3 가지 경우의 체적 점성계수에 대해 비교한 그래프이다. 큰 차이는 없지만 BV1 과 BV2 의 값이 유사하게 나옴을 확인하였다. 일반적으로 동적거동에 대한 해석 시 Bulk viscosity 의 급격한 증가는 비현실적이면서 인위적인 결과값을 유도하기 때문에 BV1 을 선택하는 것이 바람직하다.^(2,10)

4.1.5 Dynamic yield stress

변형률 속도가 $10^{-6}s^{-1}$ 이하인 LSP 의 경우 소성 변형은 동적 항복 응력에 의해 결정된다. Fig.10 은 기타 해석조건은 동일하게 가정한 상태에서, 동적 항복 응력의 변화에 따른 잔류응력 변화를 보여준다. 동적 항복응력이 증가함에 따라 표면에서의 잔류응력은 증가하는 반면, 깊이방향 잔류응력은 표면을 제외하고 일반적으로 감소함을 확인하였다. 항복응력이 커진다는 것은 재료가 소성변형에 대한 저항성 커진다는 것을 의미한다. 이로 인해 충격파가 안정화되는 시간은 단축되고, 동시에 충격파 영향 범위가 작아 지기 때문에 소성변형 깊이가 감소함을 확인할 수 있었다.⁽⁹⁾

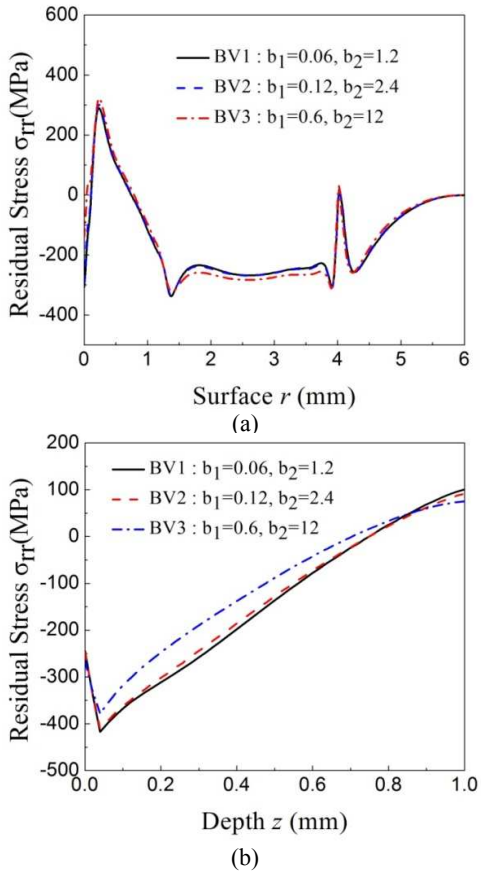


Fig. 9 Residual stresses from three levels of bulk viscosity ((a)-surface and (b)-depth)

4.2 LSP 최적 공정 변수

4.2.1 Peak pressure

금속표면에 가해지는 충격파는 레이저 파워밀도를 조절함으로써 구현할 수 있다. 실제 유한요소 해석에서는 단충격파의 함수로 입력되며 최대 압력의 크기에 따라 잔류응력 결과가 달라진다.

Fig. 11 는 압력과 증가에 따른 표면 및 깊이방향에 대한 잔류응력을 비교한 그래프이다. 표면 잔류응력은 최대 압력이 증가할수록 인장방향으로 증가하였다. 특히, laser spot 중심에서는 강한 인장 잔류응력이 발생함을 확인하였다. 깊이방향 잔류응력은 압축잔류응력 생성 깊이는 증가하지만 크기에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

4.2.2 Pressure duration

압력파의 지속시간과 잔류응력과의 관계를 확인하기 위해 5 가지 경우에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 12 에서 보듯이, 압력과 지속시간이 짧을수록 표면에서의 압축잔류응력이 증가한다. 깊이방향의 잔류응력은 지속시간이 짧을수록 발생깊이는 감소하는 반면 압축잔류응력의 최대값은 증가함을 확인하였다.

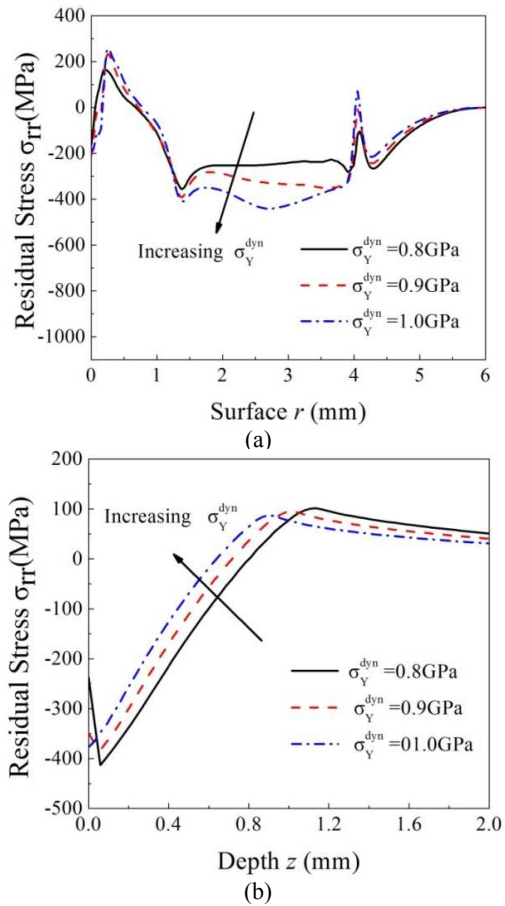


Fig. 10 Residual stresses from three levels of dynamic yield stresses ((a)-surface and (b)-depth)

4.2.3 Laser spot size

레이저 빔 크기에 따른 잔류응력 변화를 확인하기 위해 빔 크기(r_p)를 1mm~4mm 증가시켜 확인하였다. Fig. 13 에서 보는 바와 같이 표면에서의 압축잔류응력은 레이저 스팟 크기가 증가할수록 압축잔류응력 영향 범위가 증가함을 알 수 있다.

하지만 압축잔류응력의 최대값은 빔의 크기와 상관없이 일정함을 확인하였다.

깊이방향 압축잔류응력은 약간의 차이는 발생하지만 레이저 스팟의 크기와 무관함을 확인하였다. 그림에서 알 수 있듯이 압축잔류응력의 최대값 및 발생깊이는 거의 일정하다.

4.2.4 Multiple LSP

다중 LSP 에 의한 압축잔류응력 경향을 확인하기 위해 동일한 지점에 1~4 회까지 LSP 처리 결과를 비교해 보았다.

Fig. 14 를 보면, 표면에서의 압축잔류 응력은 레이저 빔의 조사 횟수에 비례하여 증가하지만, 그 증가량은 크지 않음을 확인하였다(약 15%정도 향상). 반면, 레이저 빔 중앙에서는 오히려 인장잔류응력이 발생하였다.

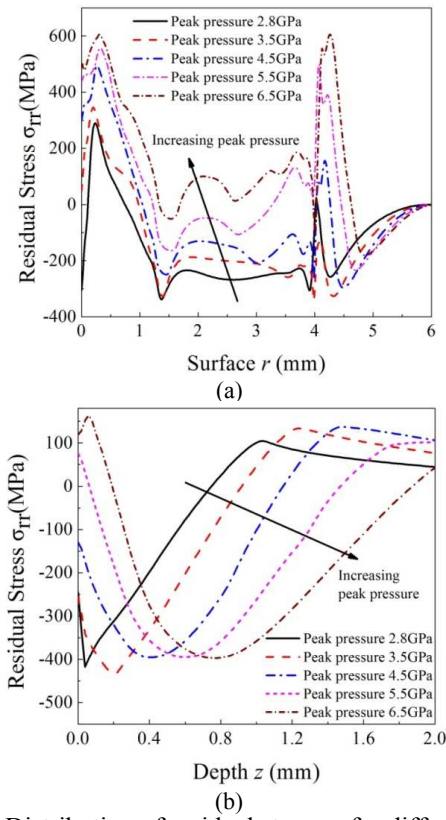


Fig. 11 Distribution of residual stresses for different peak pressures stresses ((a)-surface and (b)-depth)

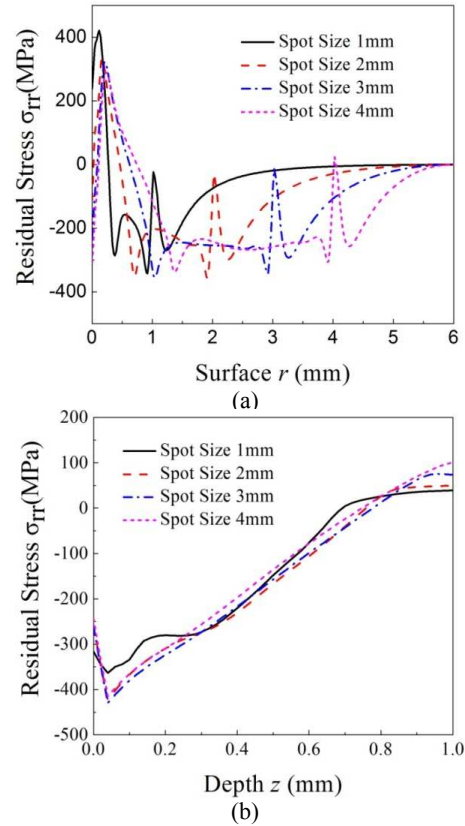


Fig. 13 Distribution of residual stresses for different laser spot size (depth)

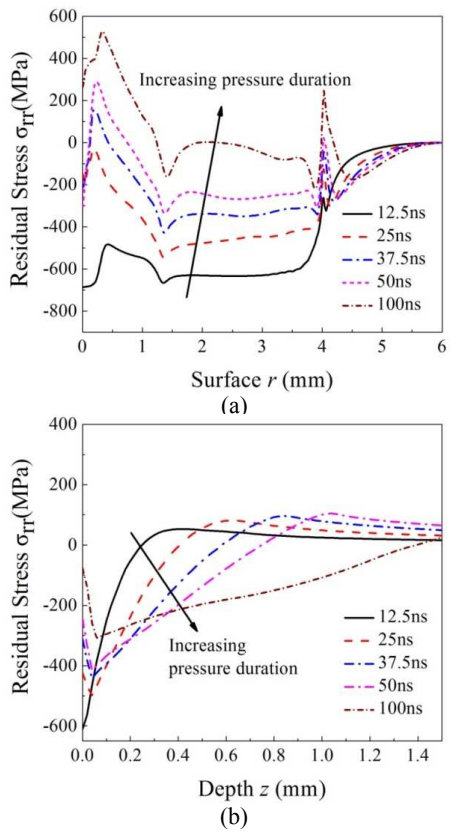


Fig. 12 Distribution of residual stresses for different pressure durations ((a)-surface and (b)-depth)

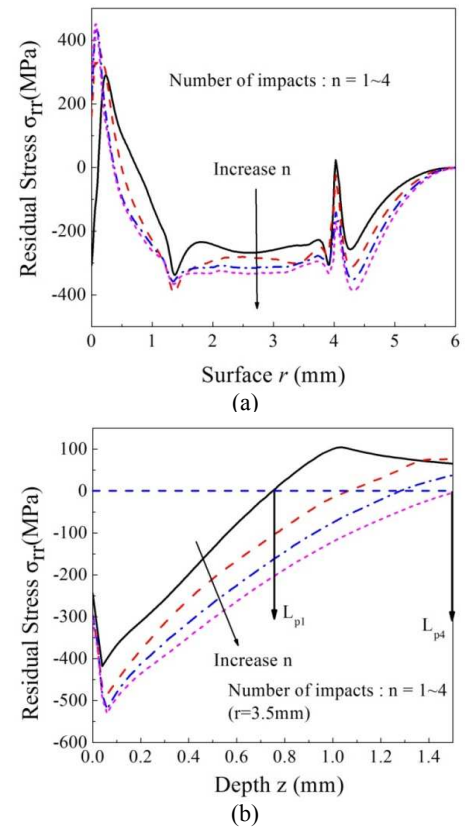


Fig. 14 Distribution of residual stresses for multiple laser impacts ((a)-surface and (b)-depth)

깊이방향의 압축잔류응력은 조사 횟수 증가에 따라 증가하며, 증가량은 표면보다 민감하게 반응하였다. 특히, 소성변형의 깊이는 약 2 배 정도 향상됨을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 LSP 의 물리적 개념과 레이저 충격과에 의해 발생하는 압축잔류응력을 유한요소 해석 기법을 이용하여 예측하였다. 유한요소 해석을 위해 잔류응력에 미치는 영향 변수를 유한요소 해석기법 관련 변수와 LSP 최적 공정 변수로 구분하여, 각 변수에 대한 민감도 해석을 통해 적절한 변수값의 범위를 제시하였다.

유한요소 해석기법 관련 변수는 요소 크기 (Mesh refinement), 해석시간(Solution time), 안정한계(Stability limit), 체적 점성계수(Bulk viscosity), 동적 항복응력(Dynamic yield stress)으로 구분하여 결과값을 비교하였으며, LSP 최적 공정 변수는 최대 압력과(Peak pressure(Laser power density)), 압력과 지속시간(Pressure duration), 레이저 스팟 크기(Laser spot size), 다중 레이저(Multiple laser)로 구분하였다. 유한요소 해석결과 LSP 는 금속 표면과 깊이방향으로 충분한 압축잔류응력을 생성시켰으며, 이로 인해 피로성능이 효과적으로 개선될 수 있을 것으로 판단한다.

참고문헌

- (1) Ding, K. and Ye, L., 2006, *Laser Shock Peening Performance and Process Simulation*, CRC Press, pp. 47~98.
- (2) Braisted, W., Brockman, R., 1999, "Finite Element Simulation of Laser Shock Peening," *International Journal of Fatigue*, 21, pp. 719~724.
- (3) Ling, X., Peng, W. and Ma, G., 2008, "Influence of Laser Peening Parameters on Residual Stress Field of 304 Stainless Steel," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 130, pp. 021201-1~8.
- (4) Ding, K. and Ye, L., 2006, "Simulation of Multiple Laser Shock Peening of a 35CD4 Steel Alloy," *Journal of Materials Processing Technology* 178, pp. 162~169.
- (5) Ballard, P., Fournier, J., Fabbro, R. and Frelat, J., "Residual Stresses Induced by Laser-Shocks," *Journal de Physique IV*, C3, 1991, pp. 487~581.
- (6) Peyre, P. and Fabbro, R., 1995, "Laser Shock Processing : A Review of the Physics and Applications," *Optical and Quantum Electronics* 27, pp. 1213~1229.
- (7) Masse, J.-E. and Barreau, G., 1995, "Laser Generation of Stress Waves in Metal," *Surface and Coating Technology* 70, pp. 231~234.
- (8) Yang, C., Hodgson, P. D., Qianchu and Ye, L., 2008, "Geometrical Effects on Residual Stresses in 7050-T7451 Aluminum Alloy Rods Subject to Laser Shock Peening," *Journal of Material Processing Technology* 201, pp. 303~309.
- (9) Bang, B., Son, S., Kim, J. and Cho, C., 2009, "Residual Stress Prediction in LSP Surface Treatment by Using FEM," *Trans. Of the KSME, A*, pp. 776~772.
- (10) 2008, ABAQUS Version 6.7, User's manual, Dassault Systemes,

(1) Ding, K. and Ye, L., 2006, *Laser Shock Peening Performance and Process Simulation*, CRC Press, pp.