Journal of the KIMST, Vol. 20, No. 5, pp. 608-619, 2017
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2017.20.5.608

Research Paper 소재 · 나노 · 공정 부문

수치해석기법을 이용한 초기 인장잔류응력에 대한 레이저 충격 피닝 효과 분석

김주희*,1) · 이종우1) · 유삼현1)

1) 육군사관학교 기계시스템공학과

Analysis of the Effects of Laser Shock Peening under Initial Tensile Residual Stress Using Numerical Analysis Method

Juhee Kim*,1) · Jongwoo Lee1) · Samhyeun Yoo1)

1) *Department of Mechanical and System Engineering, Korea Military Academy, Korea*

(Received 18 April 2017 / Revised 21 July 2017 / Accepted 22 September 2017)

ABSTRACT

In this paper, the effects of parameters related to the residual stress induced due to laser shock peening process to determine mitigation of the initial tensile residual stresses are discussed, such as the maximum pressure, pressure pulse duration, laser spot size and number of laser shots. In order to estimate the influence of the initial tensile residual stresses, which is generated by welding in 35CD4 50HRC steel alloy, the initial condition option was employed in the finite element code. It is found that 2×*HEL* maximum pressure and a certain range of the pressure pulse duration time can produce maximum mitigation effects near the surface and depth, regardless of the magnitudes of tensile residual stess. But plastically affected depth increase with increasing maximum pressure and pressure pulse duration time. For the laser spot size, maximum compressive residual stresses have almost constant values. But LSP is more effective with increasing the magnitudes of tensile residual stress. For the multiple LSP, magnitudes of compressive residual stresses and plastically affected depths are found to increase with increasing number of laser shots, but the effect is less pronounced for more laser shots. And to conclude, even though the initial tensile residual stresses such as weld residual stress field are existed, LSP is enough to make the surface and depth reinforcement effects.

Key Words : Laser Shock Peening(레이저 충격 피닝), Residual Stress(잔류응력), Initial Tensile Residual Stress(초기 인장 잔류응력), Dynamic Yield Stress(동적항복응력)

기 호 설 명

a : Laser efficiency

* Corresponding author, E-mail: kjh6452@gmail.com
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

σ_y^d : Dynamic yield stress
HEL : Hugoniot elastic limit
t_s : Solution time for dynamic analysis
P_{max} : Maximum peak pressure
t_d : Pressure pulse duration
x_p : Laser spot size
n : Number of laser shot
σ_m : Maximum residual stress
L_p : Plastically affected depth

1. 서 론

금속재료 표면강화기술은 전통적인 샷 피닝에서부터 최근에 개발되어 적용되고 있는 레이저 충격 피닝 등 매우 다양하다. 레이저 충격 피닝(LSP)은 강한 레이저 충격파를 이용하여 금속재료의 표면과 깊이방향으로 압축잔류응력을 생성시켜 주는 기술이다. 이를 통해 재료의 마모나 균열발생을 억제하여 피로수명을 향상시킨다[1, 2]. LSP처리 과정에서 생성되는 충격파는 금속 표면과 내부로 전달되면서 재료의 소성변형을 야기시켜 압축잔류응력을 생성시켜준다[1-3]. 이러한 압축응력 하에서는 균열닫힘 현상으로 인해 재료의 파괴가 유발되지 않는 것으로 알려져 있다.

Fig. 1은 LSP 적용 분야를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 높은 반복하중에 노출되어 있는 항공기 및 자동차 분야에 주로 적용되며 최근 용접에 의한 인장잔류응력과 수화학적 환경에서 발생되는 응력부식균열 예방을 위해 원자력분야에서도 적용되고 있다. 자동차 분야에서는 엔진의 흡기 및 배기밸브 스프링과 동력을 전달하는 커넥팅 로드 등에 적용되고 있으며 항공분야에서는 엔진 터빈 블레이드와 랜딩기어 등에 적용되고 있다. 좋은 예로 B-1B 전략폭격기는 터빈 블레이드와 랜딩기어에 적용하여 년간 1억 달러 이상의 엔진정비비용과 5.9억 달러 이상의 엔진 교체비용 및 4억달러 이상의 수명연장효과가 있는 것으로 확인되었다. F/A-22는 전투기 엔진 블레이드 로터에 적용되어 양산되고 있다[4]. 원자력 분야에서는 원자로 하부헤드 관통노즐(BMI : Bottom Mounted Instrumentation) 용접부에서 발생하는 일차수 응력 부식균열을 예방하기 위해 적용되고 있다[5]. 또한 핵폐기물 처리용기의 내구 신뢰성 향상을 위해 폐기물 용기의 용접부에 레이저 피닝 처리하여 응력부식균열을 예방하는데 적용

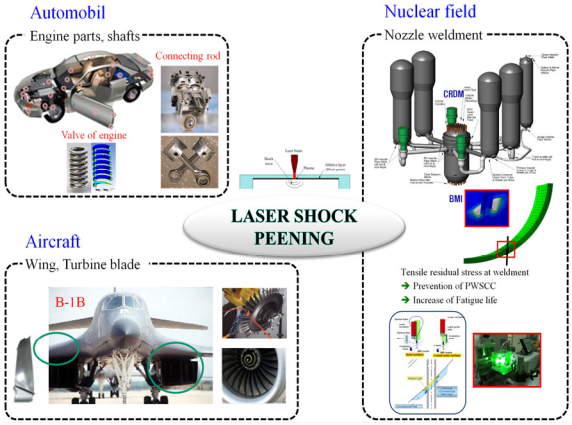


Fig. 1. Application of laser shock peening

되었다[5, 6]. 최근에는 3차원 프린팅 제조과정에서 발생되는 미소결함(Micro-defect)을 제거하여구조물의 질적 수준 향상을 위해 레이저충격피닝이 적용되고 있다.

용접부와 같이 제작과정에서 열적 불평균에 의해 발생되는 인장응력은 재료 파괴의 직접적인 원인이 되므로 이를 제거 또는 완화시키는 것이 무엇보다도 중요하다. 또한 용접부에서 발생하는 잔류응력은 용접환경에 따라 수십 MPa ~ 수백 MPa 범위에서 다양하게 분포한다. 본 연구에서는 유한요소해석기법을 이용하여 레이저 충격 피닝에 의한 초기 인장잔류응력 제거 또는 완화 효과를 확인하고 다양한 범위의 인장잔류응력 크기에 따라 레이저 충격 피닝의 효과를 확인하였다. 이를 위해 레이저 충격 피닝의 주요 변수에 대한 민감도 분석을 통해 잔류응력에 미치는 다양한 원인을 분석하였다.

2. LSP 유한요소해석 접근 방법

LSP에 의해 발생되는 레이저 압력파는 아주 짧은 시간에 발생하기 때문에 충격파 전달을 포함하는 동역학적 해석에 유용한 외연적(explicit) 시간 적분 해석코드를 활용하여 유한요소해석을 수행한다[7].

2.1 LSP 유한요소해석 절차

상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit은 재료 표면에서 발생한 플라즈마의 압력파의 동적응답을 모델링하여 동역학적 해석을 수행하는데 적합하다. 그러나 외연적 해석코드를 이용하여 최종 잔류응력을

얻기 위해서는 충격에 의한 내부진동이 안정화되는 정적평형상태가 되어야 한다.

Fig. 2은 유한요소해석프로그램인 ABAQUS를 이용한 단일(single) LSP 시뮬레이션 해석과정을 보여준다. 압력파에 의한 물리적 현상은 먼저 ABAQUS/Explicit 코드에 의한 동역학적 거동을 확인해야 한다. 금속재료 내부에서 발생하는 충격파 및 경계면에서 반향되어 나오는 반사파는 유체역학적 거동을 유발하기 때문에 해석시간에 따른 결과값의 차이가 발생하게 된다. 이는 재료 내부에서 충분한 소성변형 발생을 유도하기 위해서다.

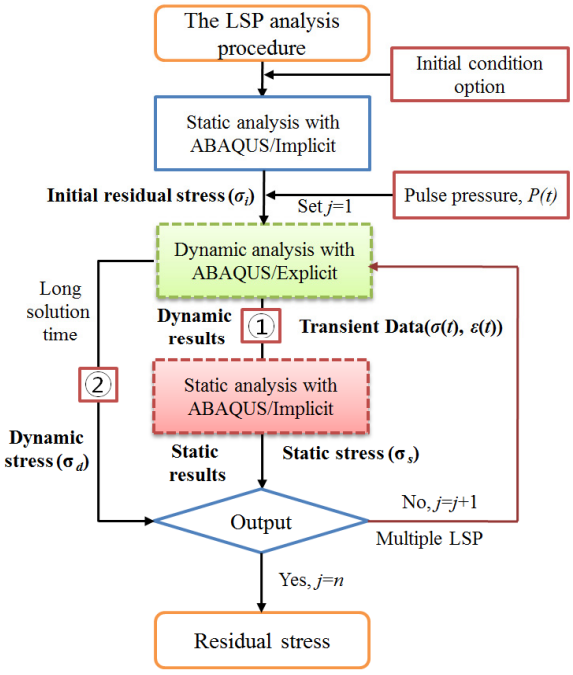


Fig. 2 FEA Procedure for LSP simulation

충격파로 인한 불안정한 응력상태를 안정화하기 위한 해석방법은 Fig. 2와 같이 1) 동적 해석과 정적 해석을 혼합한 ABAQUS Explicit/Implicit를 이용하는 방법과 2) ABAQUS Explicit에서 충분히 긴 해석 시간을 부여해 주는 방법이 있다.

해석방법 2)는 해석 절차는 간단하지만 해석시간이 오래 걸리는 단점이 있어 일반적으로 ABAQUS Explicit/Implicit를 혼합하는 방법이 사용된다. 이는 ABAQUS Explicit의 불안정한 동적해석 결과를 ABAQUS Implicit로 전환(export)하여 보다 빨리 정적 평형상태에 도달시켜 결과값을 도출하는 방법이다. 본 연구에서는 초기인장잔류응력에 대한 효과를 확인하기 위해 초기조건옵션(Initial condition option)을 이용하여 ABAQUS Implicit 정적 해석 추가하였다.

2.2 LSP 하중값 결정

높은 에너지 밀도의 레이저 파가 금속 표면에 조사되면 불투명막층이 연소되면서 고온고압의 플라즈마를 생성하여 압력파가 발생하고, 투명막층에 의해 보호된 압력파는 금속내부로 전달된다. 플라즈마에 의해 발생되는 압력파의 크기는 다음과 같다[8, 9].

$$P_{\max}(\mathrm{GPa}) = 0.01\sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}}\sqrt{Z\left(\mathrm{g\cdot cm^{-2}\cdot s^{-1}}\right)}\sqrt{I_o\left(\mathrm{GW\cdot cm^{-2}}\right)} \quad (1)$$

여기서 a는 레이저 에너지 효율, I_0는 레이저 출력 밀도를 나타낸다. 또한 각 재료의 감소 충격 임피던스(reduced acoustic impedance) Z는 투명막층 재료와 금속 재료로부터 다음과 같이 구해진다[8, 9].

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (2)$$

여기서, Z_i=$\rho_i D_i$ (ρ_i: Material density, D_i: Shock velocity)은 투명층(물막층) 재료와 금속재료의 임피던스 값이다. Table 1은 본 연구에서 사용된 투명 물막층과 두 금속재료의 충격 임피던스 값을 보여준다.

Table 1. Shock impedance of the materials[1, 2]

Material	Shock impedance(g/cm^2·s)
Water	1.65×10^5
35CD4 50HRC	3.6×10^6

일반적으로 물을 이용한 투명막과 검정색테이프를 이용한 불투명 용융층 처리를 WCM(Water Confined Mode)이라고 하며, 식 (1)은 다음과 같이 간략화 될 수 있다[1, 2, 10].

$$P_{\max}(\mathrm{GPa}) = 1.02\sqrt{I_o} \quad (3)$$

레이저에 의해 발생되는 최대 압력파가 결정되면 하

중입력을 위한 압력-시간 이력을 결정해야 한다. Fig. 3은 레이저에 의해 발생되는 압력파의 시간이력을 보여준다. 실제 압력파는 가우시안 펄스(Gaussian pulse) 형태이지만, 압력파 지속시간이 수~수백ns정도로 매우 짧기 때문에 일반적으로 삼각파형 또는 수정된 가우시안 펄스 형태로 가정[1, 2, 11, 12]하여 입력한다.

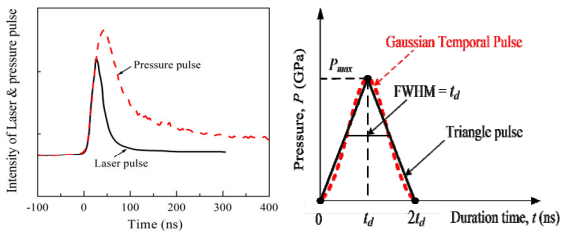


Fig. 3. Pressure – time history of laser shot[1, 2]

2.3 LSP에 의한 소성변형 발생 원리 및 기준

Fig. 4는 LSP에 의한 소성변형 발생 원리를 보여준다. 고온고압의 플라즈마는 레이저가 조사된(irradiated) 영역에서 단축 방향의 압력으로 작용하고, 금속재료의 표면층(surface layer)을 인장방향으로 팽창시킨다. 하지만 레이저 조사영역 이외의 주변 재료는 이러한 변형 거동방향과 반대방향으로 구속하기 때문에 금속 표면과 깊이 방향으로 압축잔류응력을 생성되는 것이다[11-13].

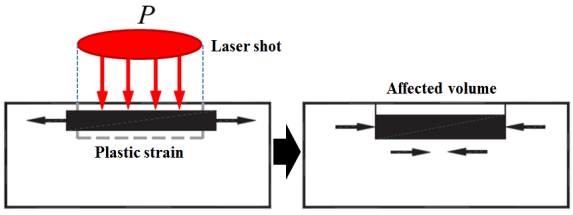


Fig. 4. Generation of compressive residual stresses with LSP

응력파가 재료 내부로 전파될 때 소성변형에 의해 잔류응력이 생성된다. 이를 결정하는 기준이 Hugoniot 탄성 한계(Elastic Limit), *HEL*이다. 재료 내부로 압력파가 전파될 때, 재료의 소성변형은 동적항복응력과 관계된 Hugoniot 탄성한계(elastic limit : *HEL*)를 초과하면 발생한다. 즉, 플라즈마에 의해 생성되는 압력파의 크기(P_{max})가 Hugoniot 탄성한계를 초과하는 범위에서 소성변형이 발생하고 이로 인해 잔류응력이 생성된다. Hugoniot 탄성한계는 식 (4)와 같이 재료의 동적 항복응력과 포아송비로 표현된다[11, 12, 14].

$$HEL = \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)}\sigma_y^d \tag{4}$$

Fig. 5는 최대 압력파와 소성 변형률과의 관계를 나타낸 그림이다. 압력파가 *HEL*~2×*HEL*에서는 선형적으로 증가하고, *P*=2×*HEL*일 때, 표면 소성 변형률은 포화상태에 이른다. *P*=2×*HEL*이상에서는 더 이상 소성 변형률이 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다[1, 2, 13, 15].

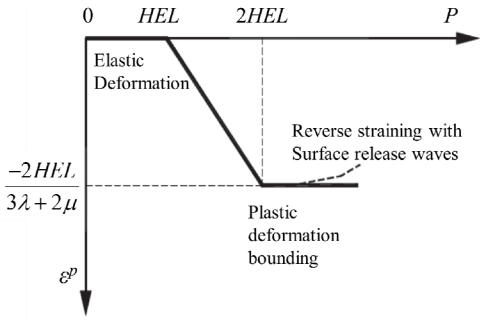


Fig. 5. Plastic strain induced by LSP as a function of peak pressure

일반적으로 깊이가 증가할수록 소성 변형률의 절대값은 감소한다. 표면에서 재료 경화와 점탄성 효과를 무시할 경우, 압력파의 크기변화에 대한 소성 변형률 ε^p는 식 (5)와 같으며, 이 관계가 Fig. 5에 도시되어 있다.

$$\varepsilon^p = \frac{-2HEL}{3\lambda+2\mu}\left(\frac{P}{HEL}-1\right) \tag{5}$$

여기서, *P*는 플라즈마에 의해 발생되는 최대 압력파로 식 (1)로부터 구해지며, λ, μ는 선형 탄성 Lame 상수이다. 또한, 소성변형 발생 깊이 L_P는 압력파의 시간적인 프로파일의 함수로 다음과 같이 정의된다[11, 15].

$$L_P = \left(\frac{C_{el}C_{pl}t_d}{C_{el}-C_{pl}}\right)\left(\frac{P-HEL}{2HEL}\right) \tag{6}$$

여기서, C_{el}, C_{pl}은 각각 탄성파(elastic wave) 및 소성파(plastic wave) 속도를 나타내며, t_d는 압력파 지속시간이다.

3. 유한요소해석

3.1 해석대상 및 FE 모델

LSP 유한요소해석을 위해 Fig. 6과 같이 3차원 1/4 모델로 형상화하였다. 충격파에 의한 경계부 반향효과를 최소화하기 위해 무한평판 경계조건인 무한요소(infinite element)를 사용하였다[1-3, 17]. 유한요소 영역은 레이저 스팟(x_p) 크기의 2배까지 형상화하였으며, 요소형태는 3차원 C3D8R 일차요소를 사용하였다. 무한요소 영역은 유한요소 영역의 2배로 형상화하였으며, 요소형태는 CIN3D8 이다. Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 레이저 스팟 형상은 사각형으로 x_p = 2.5 mm, x_f = 5 mm이며, 요소크기는 문헌 [11, 14]에서 확인된 바와 같이 결과값의 정확성과 신뢰성 보장을 위하여 레이저 스팟 사이즈의 5 % 이내로 모델링[10] 하였다.

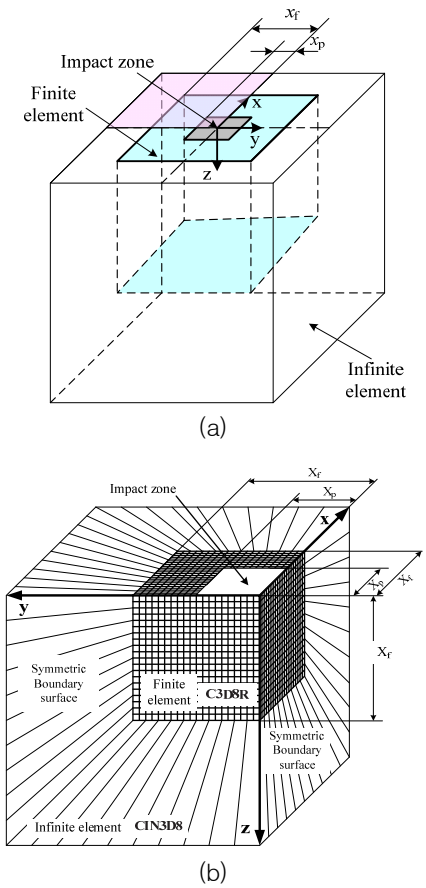


Fig. 6. (a) Geometry of LSP and (b) 3D FE mesh (quarter model)

3.2 재료물성

유한요소해석을 위한 재료 물성은 Table 2와 같다[1, 2]. 사각형 레이저 스팟의 3차원 모델에 적용된 재료는 35CD4 50HRC 금속합금이다. 재료거동은 탄성-완전소성(elastic-perfectly plastic)체로 가정하였으며, 재료의 항복은 von Mises 항복조건에 의해 결정된다. 특히, LSP는 고변형률(high strain rate) 조건하에 거동하므로 정적항복응력(static yield strength)과 구분되는 동적항복응력(dynamic yield strength)을 기준으로 한다.

Table 2. Mechanical properties of the 35CD4 50HRC steel alloy

Metal	ρ (kg/m^3)	ν	E (GPa)	σ_y^d (GPa)	*HEL*
35CD4 50HRC	7,800	0.290	210	1.240	2.1

3.3 민감도 해석을 위한 변수범위 선정

LSP 잔류응력 결과에 영향을 미치는 주요 변수는 Table 3에 제시되었다. 압력파에 의해 발생되는 압축잔류응력은 재료의 물성과 레이저 공정변수에 의해 결정된다. LSP 공정변수의 해석범위는 표에서 보는 바와 같다.

Table 3. Parameters and their ranges for sensitivity analysis

Parameter	Ref. value	Ranges
Maximum pressure P_{max} (GPa)	**4**	2 ~ 4.5
Pressure pulse duration t_d (ns)	**50**	30 ~ 150
Laser spot size x_p (mm)	**2.5**	0.5 ~ 2.5
Multiple LSP n (shot)	**1** (single)	1 ~ 5

공정변수는 최대 압력파 P_{max}, 압력파 지속시간 t_d, 레이저 스팟 크기 x_p, 레이저 샷 횟수 n으로 구분되며 현장에서 실제 적용 가능한 범위의 변수값에 대해 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 해석 결과는 참조값

(Ref. value)을 기준으로 비교하였으며, 모든 변수는 선정된 범위 내에서 결과를 도출하였다.

3.4 초기 인장잔류응력 결정 및 입력

많은 기계장치들 중 용접부 주변에서 (피로)파괴가 발생하는 경우가 종종 있으며, 이는 용접을 통해 발생되는 인장잔류응력 때문으로 알려져 있다. 용접부 주변에서 발생되는 잔류 응력을 제거 또는 완화하기 레이저 충격 피닝 기술이 적용되고 있으며, 그 효과를 확인하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 용접부에서 발생되는 인장잔류응력을 초기조건옵션(Initial condition option)을 이용하여 초기 인장잔류응력, σ_i = 200, 300, 400 MPa을 입력하였다. 이는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 수치해석을 통해 얻어진 용접잔류응력의 크기를 기준으로 선정되었으며 일반적인 용접잔류응력 크기 범위 내에 있다. Fig. 8은 금속재료 표면과 깊이 방향

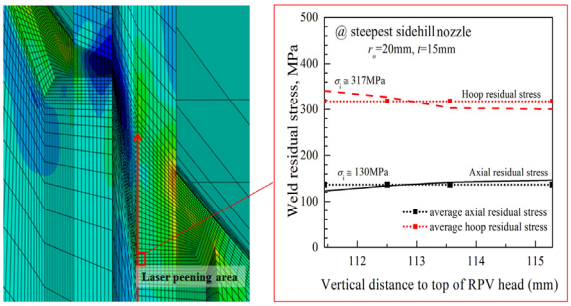


Fig. 7. Weld residual stresses in J-groove weldment of reactor pressure vessel

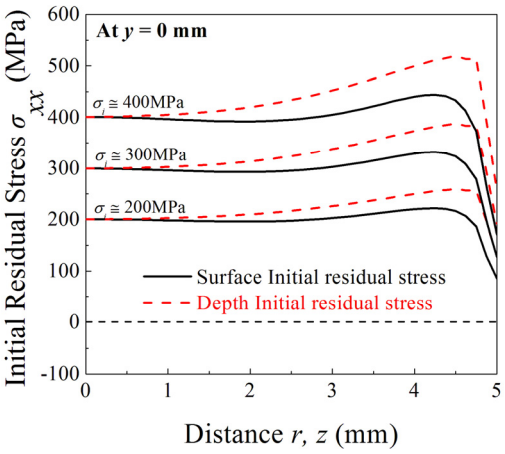


Fig. 8. Distributions of initial tensile residual stresses

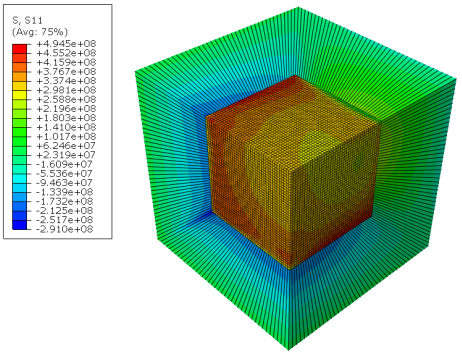


Fig. 9. Distribution of initial residual stress for σ_i = 300 MPa

에 대하여 부여된 초기 인장잔류응력(σ_i)을 보여주고 있으며, Fig. 9는 초기 인장 잔류응력 σ_{xx} = 300 MPa의 인장잔류응력이 부여된 유한요소해석 결과를 보여준다. 이러한 인장잔류응력 크기는 원자로 상부헤드 J-grove 용접부에서 일반적으로 발생하는 응력 범위를 [8, 18, 19] 포함한다.

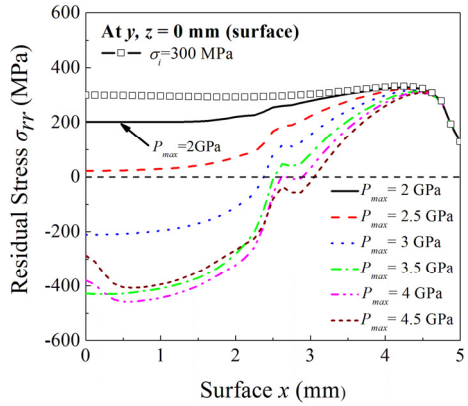
4. LSP 변수 민감도 해석

초기 인장잔류응력이 부여된 상태에서 레이저 공정변수의 민감도 해석은 σ_i = 300 MPa을 기준으로 비교하였으며, 초기 인장잔류응력의 크기 변화에 대한 잔류응력 변화를 확인하였다.

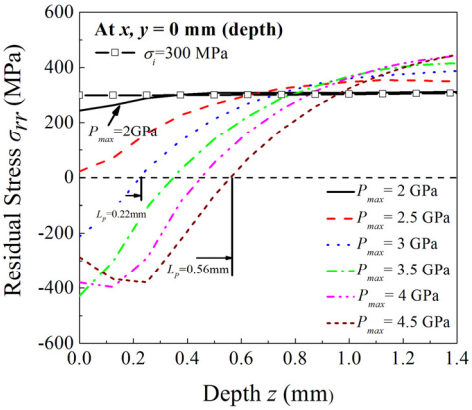
4.1 최대 압력파(P_{max}) 효과

플라즈마에 의해 생성되는 레이저 최대 압력파는 식 (1)에서 보는 바와 같이 레이저 에너지 밀도에 의해 결정된다. 입력된 하중이 Hugoniot 탄성한계(*HEL*)를 초과하는 범위에서 소성변형이 발생한다. Fig. 5에서 언급된 바와 같이 P_{max} < *HEL*범위에서는 소성변형이 발생하지 않으며, *HEL* < P_{max} < 2×*HEL* 범위에서는 소성변형이 선형적으로 증가하고, P_{max} > 2×*HEL* 범위에서는 소성변형이 포화상태 가 되어 때로는 역전현상이[1, 2, 11] 발생한다.

Fig. 10은 초기 인장잔류응력 존재하는 경우 표면과 깊이 방향의 2 GPa < P_{max} < 4.5 GPa 범위에 대한 LSP잔류응력 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 P_{max}가 *HEL*보다 낮은 2 GPa에서는 잔류응력 개선의 거의 없으며, 2배의 *HEL*인 4 GPa에서 표면방향에서 최대



(a)



(b)

Fig. 10. Effect of the peak pressure on simulated residual stress profiles

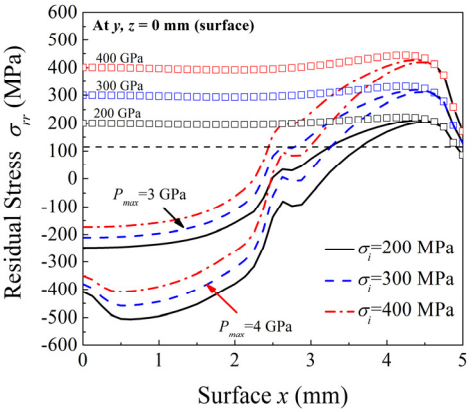
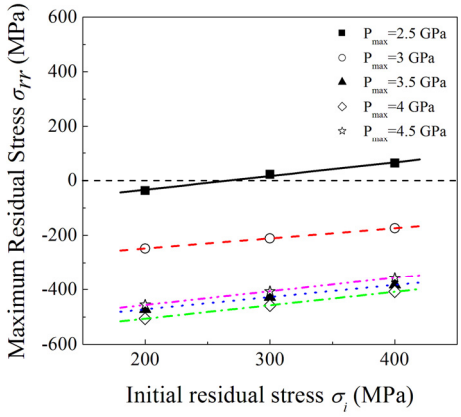


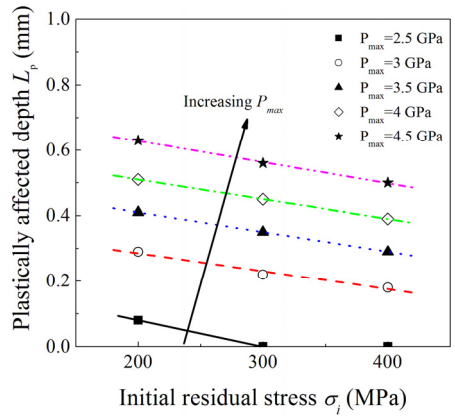
Fig. 11. Distribution of residual stress(σ_m) for σ_i = 200, 300, 400 MPa(P_{max} = 3 and 4 GPa)

압축잔류응력이 생성되는 것을 확인하였다. 깊이방향의 압축잔류응력에서도 마찬가지로 *HEL*의 약 2배 부근에서 양호한 잔류응력이 생성됨을 알 수 있다. 하지만 *HEL*의 2배를 초과한 4.5 GPa에서는 압축응력 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 여기서 *HEL*보다 작은 범위에서의 미소하게 잔류응력이 발생하는 원인은 초기 인장잔류응력 때문으로 판단된다(σ_i = 0 MPa 일 때 σ_{rr} = 0 MPa 이다).

Fig. 11은 초기 인장잔류응력 σ_i = 200, 300, 400 MPa, P_{max} = 3, 4 GPa에 대한 LSP 잔류응력 결과의 변화를 비교하였다. σ_i = 200 MPa, P_{max} = 4 GPa 일 때 잔류응력은 -504 MPa, σ_i = 300 MPa 일 때 잔류응



(a)



(b)

Fig. 12. Variations of (a) maximum residual stress(σ_m) and (b) plastically affected depth(L_p) on different initial tensile residual stresses and maximum pressures

력은 -458 MPa, σ_i = 400 MPa 일 때 잔류응력은 -408 MPa로 초기 인장잔류응력에 차이(각각 100 MPa)에 비해 절반 정도(약 50 MPa)의 차이만 보인다. 이는 초기 인장잔류응력이 없을 때 보다 용접부와 같이 초기 인장잔류응력이 존재하는 곳에서 LSP가 더 효과가 있다는 것을 의미한다.

Fig. 12(a), (b)는 각 초기 인장잔류응력에 대한 최대 압력파 크기 변화에 대한 잔류응력 민감도 해석 결과를 보여준다. 앞서 밝혀진 바와 같이 초기 인장잔류응력이 존재하는 영역에서도 LSP 효과는 두드러지게 나타나며 초기 인장잔류응력 크기에 반비례하여 잔류응력은 감소한다. 하지만 이전 연구[17]에서도 밝혀진 바와 같이 잔류응력 크기는 P_{max} = 2×HEL 부근에서 최대값을 갖고 그 이상에서는 역전현상이 발생하며 압축잔류응력 발생깊이는 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

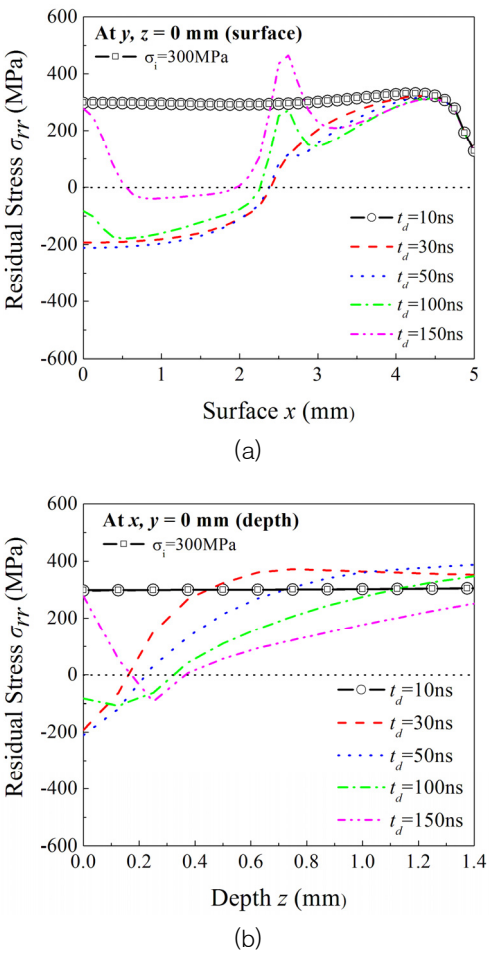


Fig. 13. Effect of the pressure duration times on simulated residual stress profiles

4.2 압력파 지속시간(t_d) 효과

LSP 공정변수 중 최대 압력파 크기와 함께 주요한 변수는 레이저 압력파 지속시간이다. Fig. 13은 초기 인장잔류응력 σ_i = 300 MPa이 존재하는 금속재료에서 압력파 지속시간에 대한 민감도 해석 결과를 보여준다 (P_{max} = 4 GPa).

표면에서의 잔류응력 결과를 보면 t_d = 10 ns에서는

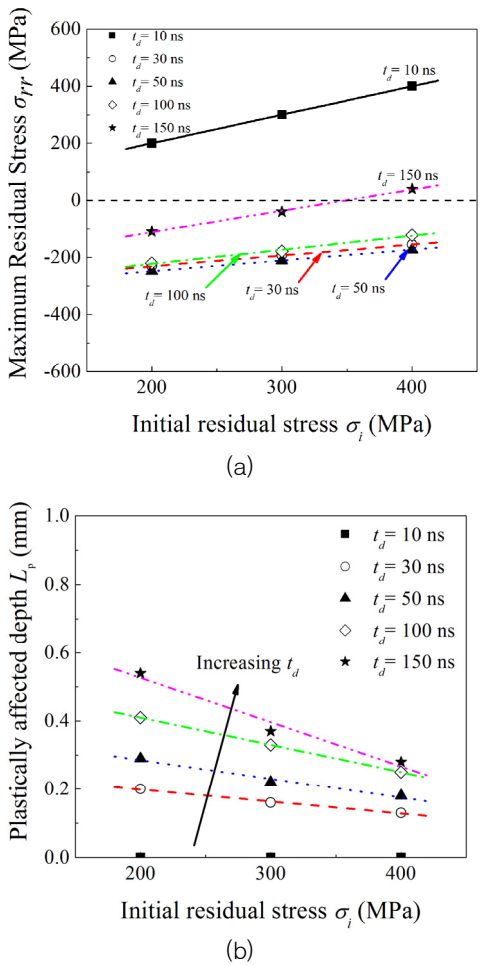


Fig. 14. Variations of (a) maximum residual stress(σ_m) and (b) plastically affected depth(L_p) on different initial tensile residual stresses and pressure duration times

잔류응력 변화가 거의 식별되지 않는다(실제 약간의 변화는 있음). 이는 레이저에 의한 충격파가 충분히 생성되지 않기 때문으로 판단된다. t_d = 50 ns에서는 최대 압축잔류응력 크기를 생성한다. 하지만 t_d = 100 ns에서는 중심부와 가장자리에서 응력 역전으로 낮은 압축응력과 인장응력이 발생한다. 깊이 방향에서도 동일하게 t_d = 50 ns에서 최대 압축잔류응력이 생성된다. 하지만 소성변형 발생깊이는 압력파 지속시간에 비례하여 증가한다. 마찬가지로 적정 범위의 압력파 지속시간 이상에서는 표면과 깊이 방향에 대한 잔류응력 개선율이 떨어지는 현상을 확인 할 수 있다.

Fig. 14는 초기 인장잔류응력에 대한 압력파 지속시간에 따른 최대 압축잔류응력과 소성변형 발생깊이 변화를 보여준다. 최대 압력파와 마찬가지로 적정 범위에서 최대 압축잔류응력을 생성하며(t_d = 50 ns), 소성변형 발생깊이는 압력파 지속시간에 비례하여 증가하지만 초기 인장잔류응력이 클수록 LSP 효과는 점점 감소하는 것을 확인하였다. 이는 레이저 압력파 효과가 인장잔류응력을 저감키는데 소진되어 상대적으로 깊은 곳까지 영향을 미치지 못하기 때문으로 판단된다.

4.3 레이저 스팟 크기(x_p) 효과

레이저 스팟 크기에 대한 잔류응력 변화를 확인하기 위하여 P_{max} = 2×*HEL*, t_d = 50 ns에서 x_p = 0.5 mm ~ 2.5 mm에 대한 민감도 해석을 수행하였다. Fig. 15(a)의 표면 잔류응력 결과를 보면 r_p = 1.5 mm 이상에서는 압축잔류응력이 거의 동일하게 생성되는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 깊이 방향에 대한 잔류응력도 동일한 결과를 얻는다. 이는 레이저 스팟 크기는 잔류응력에 미치는 영향이 작다는 것을 보여준다.

기존 연구[12, 16, 20]에서 Fabbro는 동일한 레이저 충격 시스템에서는 레이저 파워 밀도 I는 $J/(t_d x_p^2)$에 비례하며, 압력파의 크기 P는 $I^{1/2}$에 비례한다는 것을 밝혔다. 따라서 압력파의 크기 P는 $J^{1/2}/(t_d^{1/2} x_p)$에 비례하게 되므로, 동일한 레이저 시스템일 경우 레이저 압력파는 $t_d^{1/2}$와 x_p에 반비례 관계에 있다. 따라서 본 연구에서 레이저 스팟 크기에 따라 잔류응력이 차이가 나는 것은 압력파 지속시간과 레이저 스팟 크기의 비 (t_d /x_p)가 일정하게 유지되지 않았기 때문이다.

Fig. 16은 초기 인장잔류응력 크기에 따른 최대 압축잔류응력 변화와 소성변형 발생깊이를 보여준다. 그림으로부터 레이저 스팟 크기가 증가할수록 두 값은 증가하지만 x_p = 1.5 mm 이상에서는 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다.

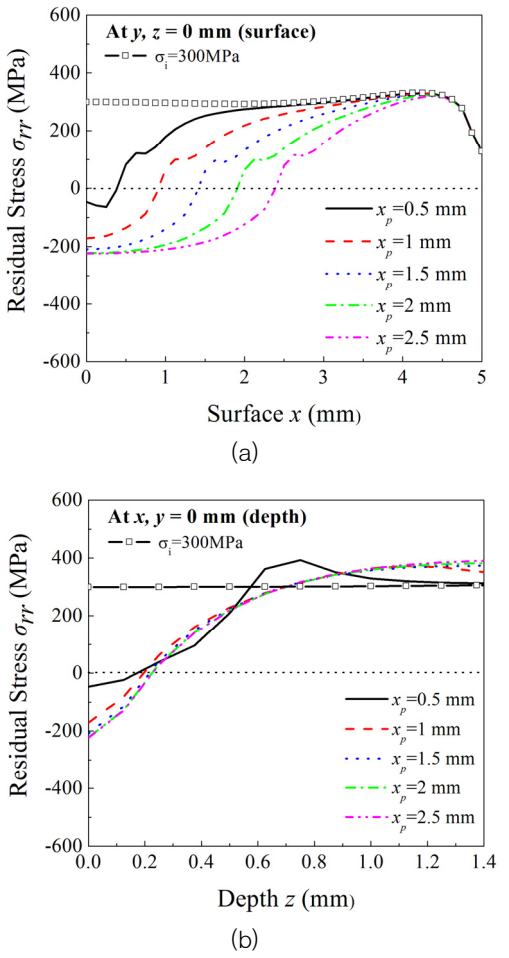
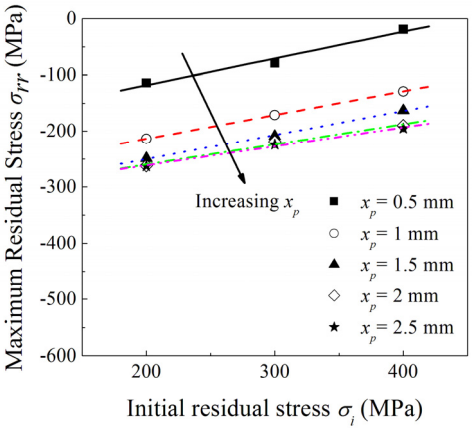


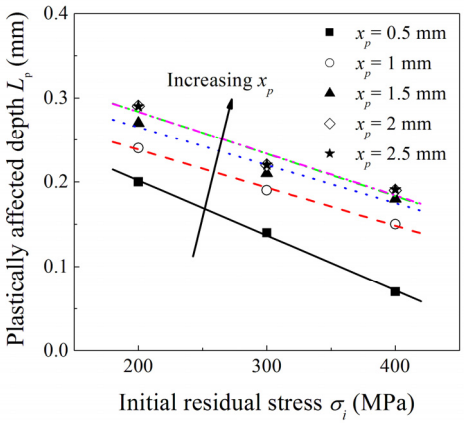
Fig. 15. Effect of the laser spot size on simulated residual stress profiles

4.4 다중 레이저 스팟(n) 효과

산업현장에서 적용되는 LSP 공정은 대부분 레이저 중첩(overlapping) 또는 다중(multiple) LSP 형태로 적용된다. 본 연구에서는 P_{max} = 2×*HEL*, t_d = 50 ns, x_p = 2.5 mm에 대한 다중 레이저 스팟에 대한 효과를 확인하였다. Fig. 17은 초기 인장잔류응력 300 MPa 하에서 표면과 깊이 방향에 대한 다중 LSP결과를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 레이저 스팟 횟수가 증가될수록 잔류응력 크기는 증가하지만 그 증가량은 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 즉, 3회 이상의 다중 LSP에서의 결과는 거의 동일하다.

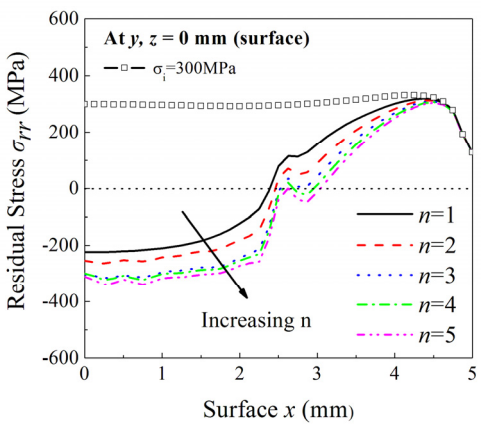


(a)

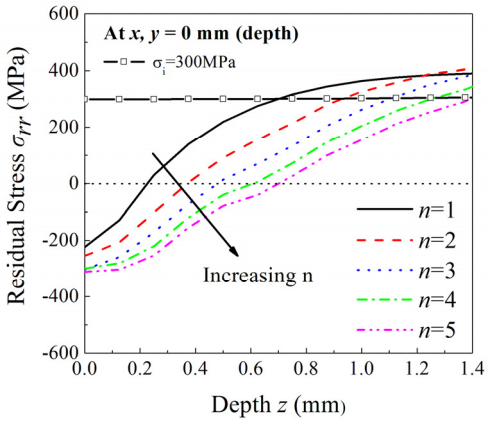


(b)

Fig. 16. Variations of (a) maximum residual stress(σ_m) and (b) plastically affected depth(L_p) on different initial tensile residual stresses and laser spot sizes



(a)



(b)

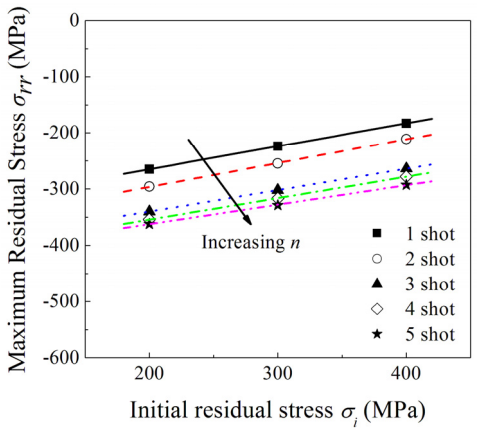
Fig. 17. Effect of the multiple laser impacts on simulated residual stress profiles

Fig. 18은 초기 인장잔류응력 변화에 대한 최대 압축잔류응력 및 소성변형 발생깊이를 보여준다. 초기 인장잔류응력 증가에 따라 압축잔류응력 크기 및 소성변형 발생깊이는 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 최대 압축잔류응력 크기는 증가량이 급격히 감소하면서 일정한 값에 수렴하지만 소성변형 발생깊이는 계속 증가한다. 또한 소성변형 발생깊이는 초기 인장잔류응력 크기가 클수록 미소하게 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 압축잔류응력 발생깊이를 증가시키기 위해서는 다중 LSP를 활용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

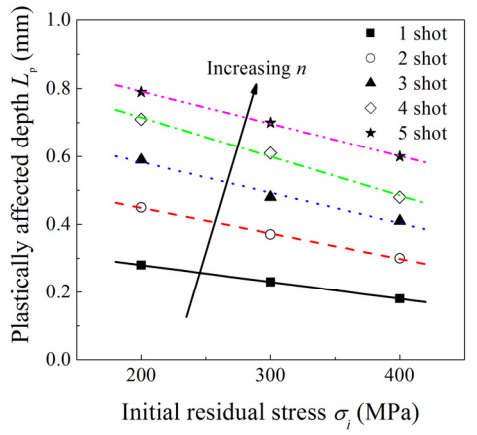
5. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석법을 이용하여 용접부위와 같은 초기 인장잔류응력이 존재하는 35CD4 50HRC 금속재료를 대상으로 레이저 충격 피닝 주요 변수에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 레이저 충격 피닝 시뮬레이션 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 초기 인장잔류응력 하에서도 LSP에 의한 효과는 초기 잔류응력이 없는 상태와 동일한 경향을 갖는다.
- 최대 압력파(P_{max}) 증가에 따라 압축잔류응력 크기는 증가하지만 P_{max} > 2.5×HEL 이상에서는 압축잔류응력이 감소한다. 반면, 압축잔류응력 발생깊이는 증



(a)



(b)

Fig. 18. Variations of (a) maximum residual stress(σ_m) and (b) plastically affected depth(L_p) on different initial tensile residual stresses and multiple LSP

가하지만 증가량은 미소하게 감소한다.

- 압력파 지속시간(t_d)은 특정 범위에서 최적의 압축잔류응력을 생성하지만 그 이상에서는 응력역전 현상이 발생된다. 하지만 소성변형 발생깊이는 계속적으로 증가하는 것을 확인하였다. 특히, 초기인장잔류응력이 클수록 소성변형 발생깊이 증가량은 현격하게 감소하는 것을 확인하였다.
- 레이저 스팟 크기(x_p) 증가에 따라 압축잔류응력은 증가하지만 1.5 mm 이상에서는 최대 압축잔류응력 및 소성변형 발생깊이가 일정하다.
- 레이저 조사 횟수(n) 증가에 따라 최대 압축잔류응력은 증가하지만 3회 이상부터 증가량은 급격히 감소한다. 반면 소성변형 발생깊이는 n 증가에 따라 계속 증가하지만 초기인장잔류응력이 클수록 미소하게 감소하는 것을 확인하였다.

후 기

본 논문은 육군사관학교 화랑대연구소의 연구활동 지원에 의해 연구되었음.

References

[1] K. Ding and L. Ye, “Laser Shock Peening Performance and Process Simulation,” CRC Press, pp. 47-118, 2006.

[2] K. Ding, and L. Ye, “Simulation of Multiple Laser Shock Peening of a 35CD4 Steel Alloy,” J. of Materials Processing Technology, Vol. 178, pp. 162-169, 2006.

[3] J. E. Masse and G. Barreau, “Laser Generation of Stress Waves in Metal,” Surface and Coating Technology, Vol. 70, pp. 231-234, 1995.

[4] LSP Technologies, Inc., “http://www.lsptechnologies.com/tag/f110-engine/,” Laser Processing Services and Equipment Design, 2014

[5] J. D, Kim, M. KUTSUNA and Y. SANO, “Laser Peening Process and Its Application Technique,” Journal of Welding and Joining, Vol. 33, No. 4, pp. 1-6, 2015.

[6] A. Lloyd, “Hacke 1 : Proc. of SAIL,” June 2-4, Williamsburg, US, Paper #sec6-05, 2003.

[7] ABAQUS Version 6.13, User’s Manual, Dassault Systemes, 2008.

[8] X. Ling, W. Peng, and G. Ma, “Influence of Laser Peening Parameters on Residual Stress Field of 304 Stainless Steel,” J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 130, No. 021120, pp. 1-8, 2008.

[9] B. W. Bang, S. K. Son, J. M. Kim and C. D. Cho, “Residual Stress Prediction in LSP Surface Treatment by Using FEM,” KSME-A, Vol. 33, No. 8, pp. 776-772, 2009.

[10] W. Braisted and R. Brockman, “Finite Element Simulation of Laser Shock Peening,” Int. J. of Fatigue, Vol. 21, pp. 719-724, 1999.

[11] P. Peyre and R. Fabbro, “Laser Shock Processing: A Review of the Physics and Applications,” Optical and Quantum Electronics, Vol. 27, pp. 1213-1229, 1995.

[12] P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien and H. P. Lieurade, “Laser Shock Processing of Aluminium Alloys, Application to High Cycle Fatigue Behaviour,” Mater. Sci. Eng., A 210, pp. 102-113, 1996.

[13] C. Yang, P. D. Hodgso, Q. Liu and L. Ye, “Geometrical Effects on Residual Stresses in 7050-T7451 Aluminum Alloy Rods Subject to Laser Shock Peening,” J. of Material Processing Technology, Vol. 201, pp. 303-309, 2008.

[14] R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard and D. Devaux, “Physical Study of Laser Produced Plasma in Confined Geometry,” Journal of Applied Physics, Vol. 68, No. 2, pp. 775-784, 1999.

[15] Y. Hu, Z. Yao and J. Hu, “3-D FEM Simulation of Laser Shock Processing,” Surface & Coating Technology, Vol. 201, pp. 1426-1435, 2006.

[16] P. Ballard, J. Fournier, R. Fabbro and J. Frelat, “Residual Stresses Induced by Laser-Shocks,” J. de Physique IV, Vol. 1, pp. 487-581, 1991.

[17] J. H. Kim, Y. J. Kim, J. S. Kim, “Effects of Simulation Parameters on Residual Stresses for Laser Shock Peening Finite Element Analysis,” J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 27, pp. 2025-2034, 2013.

[18] K. Ogawa, D. Deng, S. Kiyoshima, N. Yanagida and K. Saito, “Influences of Heat Source Model on Welding Residual Stress and Distortion in a Multi-Pass J-Groove Joint,” J. of Computation Materials Science, Vol. 46, pp. 987-995, 2009.

[19] D. Rudland, Y. Chen, T. Zhang, G. Wilkowski, J. Broussard and G. White, “Comparison of Welding Residual Stress Solutions for Control Rod Drive Mechanism Nozzles,” ASME PVP, 2007-26045, pp. 1-15, 2007.

[20] S. Wu, C. Huang, X. Wang and H. Song, “A New Effective Method to Estimate the Effect of Laser Shock Peening,” Int. J. of Impact Engineering, Vol. 38, pp. 322-329, 2011.