

LSP 시뮬레이션 변수가 Inconel 600 합금의 잔류응력에 미치는 영향

김주희* · 김윤재*† · 김정수**

* 고려대학교, ** 한국원자력연구원

Effect of Laser Shock Peening Simulation Parameters on Residual Stress of Inconel Alloy 600 Steel

Ju Hee Kim*, Yun Jae Kim*† and Joung Soo Kim**

* Korea Univ., ** Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI)

(Received July 19, 2011; Revised October 31, 2011; Accepted November 1, 2011)

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

초록: 본 논문은 레이저 샷 피닝(LSP) 유한요소 시뮬레이션 관련 변수들이 인코넬 alloy 600 합금의 잔류응력에 미치는 영향을 분석하였다. 특히, 레이저 피닝 공정 관련 변수인 최대 압력과, 압력과 지속시간, 레이저 스팟 크기 및 다중 레이저 샷의 영향을 확인하였다. 최대 압력과 및 압력과 지속시간은 alloy 600 재료물성에 따라 특정 범위에서 최대 압축잔류응력을 생성시켜 준다. 이 때문에 LSP 공정에서 최대 압력과 및 압력과 지속시간은 중요한 선택 변수가 된다. 일정한 크기 이상의 레이저 스팟은 잔류응력에 특별한 영향을 미치지 않음을 확인하였고, 다중 레이저 샷은 압축잔류응력 크기와 소성변형 발생깊이를 동시에 증가시키지만, 증가량은 레이저 샷 횟수가 증가할수록 감소하였다.

Abstract: The effects of parameters related to the finite element simulation of the laser shock peening(LSP) process on the residual stresses of Inconel alloy 600 steel are discussed. In particular, we focus on the maximum pressure, pressure pulse duration, laser spot size, and number of shots. It is found that certain ranges of the maximum pressure and pulse duration can produce the maximum compressive residual stresses near the surface, and thus proper choices of these parameters are important. The residual stresses are not affected by the laser spot size, provided it is larger than a certain size. The magnitudes of the compressive residual stresses and the plastically affected depths are found to increase with an increasing number of shots, but this effect is less pronounced for more shots.

- 기호설명 -

- Z : 감소 충격 임피던스
- I_0 : 레이저 파워밀도
- α : 레이저 효율
- L_e : 요소길이
- P_{max} : 최대 압력과
- t_d : 압력과 지속시간
- t_p : 해석시간
- x_p : 레이저 스팟 크기

- n : 레이저 샷 횟수
- ρ : 밀도
- σ_y^d : 동적항복응력
- HEL : Hugoniot 탄성한계

1. 서론

LSP(Laser shock peening)는 금속재료의 표면과 깊이방향에 대해 효과적으로 압축잔류응력을 생성시켜주는 표면처리기술이다.⁽¹⁻³⁾ 전통적인 금속재료 표면처리기술인 SP(Shot peening)는 작은 구슬(hammer)을 금속표면에 충격시켜 강제적인 압축잔류응력을 생성시켜준다. 하지만 SP는 복잡한 형상에 대한 적용이 제한적이며, 피닝 후 생성된

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

딤플(Dimple)을 제거해야 하는 단점이 있다.⁽³⁾

최근에는 레이저를 이용한 금속재료 표면처리 기술에 관심을 갖게 되었고, 지난 수년간 다양한 분야에서 연구, 활용되고 있다. 특히, LSP 는 고온환경에서 잔류응력 해소가 적고, 보다 정밀한 표면 조도를 확보할 수 있는 장점을 지닌다. 이러한 이유로 피로하중에 의해 파괴가 발생하는 원자력 발전소 소구경 관통노즐 및 항공기 터빈 블레이드의 피로 내구성능 향상을 위해 활용되고 있다.⁽¹⁾

LSP 는 전통적인 SP 보다 4~10 배까지 깊은 압축잔류응력을 생성시켜 주며, 조사되는 레이저의 특성만 잘 활용하면 보다 다양하고 광범위하게 금속재료의 표면처리에 활용할 수 있다. 금속표면의 압축잔류응력은 역학적으로 균열의 생성과 진행을 억제시켜 금속의 피로 특성을 향상시키고, 응력부식균열(SCC) 성장을 억제시킨다.^(1~5)

본 논문에서는 3 차원 유한요소해석 기법을 이용하여 Inconel alloy 600 합금의 잔류응력 생성에 영향을 미치는 LSP 시뮬레이션 변수의 특성을 확인하였다. LSP 공정변수인 최대 압력과 및 압력과 지속시간은 재료거동 특성에 따라 특정 범위에서 최대 압축잔류응력을 생성시켜 주며, 레이저 스팟은 일정한 크기 이상에서 잔류응력에 특별한 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 다중 레이저 샷은 압축잔류응력 크기와 소성변형 발생깊이를 동시에 증가시키지만, 증가량은 레이저 샷 횟수가 증가할수록 감소하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석과정

높은 에너지의 레이저 파를 이용하는 LSP 표면처리기술은 금속재료의 표면과 깊이 방향으로 소성변형을 발생시켜 압축잔류응력을 생성시켜 준다.

Fig. 1 은 LSP 원리와 플라즈마 생성 및 압력파의 전달과정을 보여준다. 일정한 레이저 파워밀도의 레이저 빔이 금속표면에 조사되면, 금속표면에서 강한 압력의 플라즈마가 형성되고, 이때 발생한 압력에 의해 금속 내부로 충격파가 전달되면서 금속의 표면과 깊이 방향으로 압축잔류응력이 생성된다.^(1~5)

LSP 는 아주 짧은 시간에 발생하는 충격파 전달을 포함하는 동역학적 해석을 수반하기 때문에 외연적(explicit) 시간 적분 해석코드를 활용하여 유한요소해석을 수행해야 한다.^(1,2,7,8) 본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 를 사용하였다.⁽⁹⁾

Fig. 2 는 유한요소해석 상용 프로그램인 ABAQUS 를 이용한 LSP 시뮬레이션 해석과정을 보여준다.

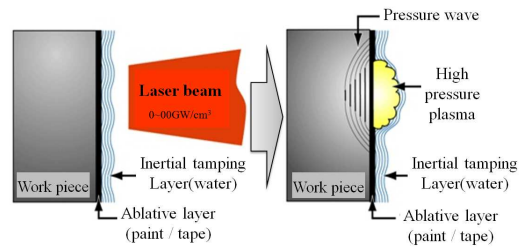


Fig. 1 Schematic of one-sided LSP

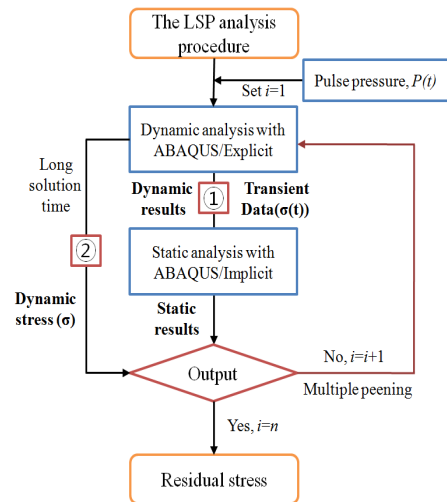


Fig. 2 Procedure of LSP simulation

단충격파에 의한 동역학적 해석은 고주파에 의한 국부 진동 발생으로 정역학적 평형상태에 도달하는데 상당한 해석 시간이 필요하다. 따라서 충격파의 반사와 교란에 의한 불안정한 응력상태를 안정화하기 위해 1)동해석과 정해석을 혼합한 ABAQUS Explicit/Implicit 를 이용하는 방법과 2) ABAQUS Explicit 에서 보다 많은 해석 시간을 부여해 주는 방법이 있다.^(7,8)

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

2.2 최대압력과 결정

레이저에 의해 발생하는 플라즈마는 높은 압력의 충격파로 재료내부로 전파되면서 압축잔류응력을 생성시킨다. 따라서 특정 레이저 시스템으로부터 발생하는 충격파의 최대값은 유한요소해석 시 입력하중으로 중요한 변수가 된다. 레이저에 의해 발생하는 압력파의 크기는 조사되는 레이저 파워밀도와 관련이 있다. 일정한 레이저 파워 밀도에 의해 결정되는 충격파의 최대 압력값은 식 (1)과 같다.^(1,2,4,6-8,10,11)

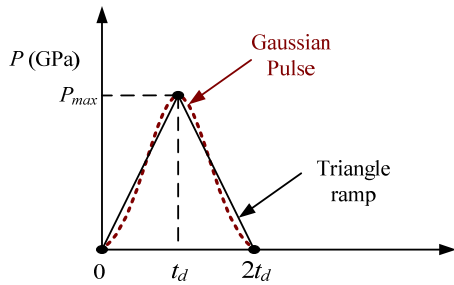


Fig. 3 Pressure-time history for LSP simulations

$$P_{\max}(\text{GPa}) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (1)$$

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

여기서 $Z(Z_i = \rho_i D_i$ (ρ_i : 재료 밀도, D_i : 충격파 속도)는 reduced acoustic impedance 이다. Z_1 은 투명층(물막층) 재료의 임피던스 값이며, Z_2 는 금속재료의 임피던스값이다.⁽⁸⁾ α 는 레이저에 의해 생성되는 압력에 대한 효율로 일반적으로 0.1~0.5 범위의 값으로 가정한다.

레이저에 의해 발생하는 압력과 효과를 극대화하기 위해서 LSP 적용 시 금속 표면에 불투명층(ablative layer)과 물막층(water tamping layer) 처리를 하는 것이 일반적이다. 이러한 LSP 과정을 WCM(Water Confined Mode)이라고 하며, 식 (1)을 다음과 같이 간략화하여 최대 압력파를 예측한다.^(1,2,10)

$$P_{\max}(\text{GPa}) = 1.02 \sqrt{I_0} \quad (3)$$

Fig. 3 은 레이저에 의해 발생하는 압력파의 시간이력을 보여준다. 실제 압력파는 가우시안 펄스(Gaussian pulse)형태이지만, 압력파 지속시간이 수~수백 ns 정도로 매우 짧기 때문에 삼각 파형으로 가정하여 입력한다.^(1,2,7,8)

2.3 동적 재료거동 모델

레이저에 의해 발생하는 플라즈마는 금속 표면을 고온 고압 상태로 만들고, 아주 짧은 시간에 수 GPa 의 압력파를 생성하게 된다. 이로 인해 금속표면은 고 변형률(high strain rate) 상태가 되어 동적 재료거동을 한다. 금속재료는 일반적으로 변형률이 높아지면 재료의 항복응력도 증가한다.⁽⁷⁾ 이와 같이 동적 재료거동에서 소성변형은 가해지는 압력파의 최대값이 Hugoniot 탄성한계(Hugoniot Elastic Limit ; HEL)를 초과할 때 발생하며, 식 (4)와 같이 재료가 갖는 고유의 재료물성인 동적 항복응력(Dynamic yield strength)과 관계가 있다.^(1,2,4-8)

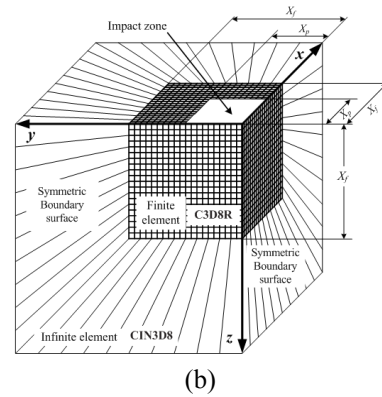
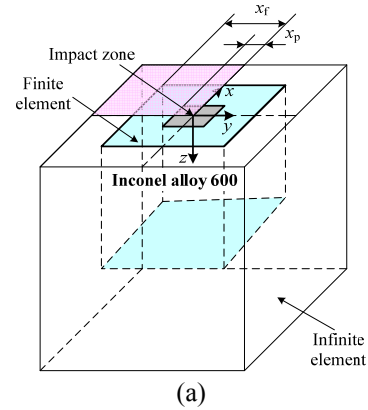


Fig. 4 (a) Geometry of LSP and (b) 3D FE mesh (quarter model)

$$HEL = \frac{\lambda + 2\mu}{2\mu} \sigma_Y^{dyn} = \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} \sigma_Y^{dyn} \quad (4)$$

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

3. LSP 시뮬레이션을 위한 민감도 해석

3.1 형상 및 FE 요소

LSP 과정을 유한요소모델로 구현하기 위해 Fig. 4(a)와 같이 사각형 레이저 스팟(x_p)을 가정하였으며, Fig. 4(b)와 같이 3 차원 1/4 유한요소모델로 형상화하였다. 충격파에 의한 경계부 반향효과를 없애고, 무한평판 경계조건을 구현하기 위해 무한요소(infinite element)를 혼합 사용하였다.^(1,2,7,8) 유한요소 영역은 레이저 스팟(x_p) 길이의 2 배까지 모델링하였으며, 요소형태는 C3D8R 일차 요소를 사용하였다. 무한요소는 유한요소의 2 배로 모델링하였으며, 요소형태는 CIN3D 요소를 사용하였다.

3.2 재료물성

유한요소해석을 위한 재료는 Inconel alloy 600 이며, 재료거동은 탄성-완전 소성체(elastic-perfectly plastic)로 가정하였다. 재료의 항복응력은 식 (4)의

Table 1 Mechanical properties of the Inconel alloy 600 steel

ρ (kg/m ³)	ν	E (GPa)	σ_y^d (GPa)	HEL (GPa)
8,470	0.324	214	0.667	1.3

Table 2 Parameters and their ranges for sensitivity analysis

Parameter	Reference	Ranges
Mesh size, L_e (mm)	0.125	0.25-0.1
Solution time for dynamic analysis, t_p (ns)	5,000	200-5,000
Dynamic yield strength, σ_y^d (GPa)	0.67	0.6-0.8
Maximum pressure, P_{max} (GPa)	2xHEL	1.5xHEL ~ 3xHEL
Pressure duration, t_d (ns)	50	10 ~ 50
Laser spot size, x_p (mm)	2.5	0.5 ~ 2.5
Multiple LSP, n (shot)	1(single)	1 ~ 5

동적항복응력을 사용하였다. 기타 재료 물성은 Table 1 과 같다.^(12,13)

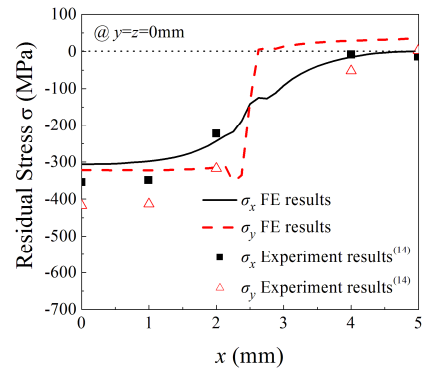
3.3 민감도 해석을 위한 변수 범위

LSP 시뮬레이션 결과에 영향을 미치는 변수는 매우 다양하다. 압력파에 의해 발생하는 압축잔류응력은 유한요소해석 적용기법뿐만 아니라, 재료의 물성과 레이저 공정변수에 의해 결정된다.⁽⁸⁾ 이러한 점을 고려하여, 본 연구에서는 유한요소해석 관련변수(요소크기: L_e , 해석시간: t_p , 동적항복응력: σ_y^d)와 레이저 시스템 관련변수(최대 압력파: P_{max} , 압력과 지속시간: t_d , 레이저 스팟 크기: x_p , 레이저 샷 횟수: n)로 구분하여 Table 2 와 같이 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 해석 결과는 참조값(reference value)을 기준으로 비교하였으며, 모든 변수는 설정된 범위 내에서 결과를 도출하였다.

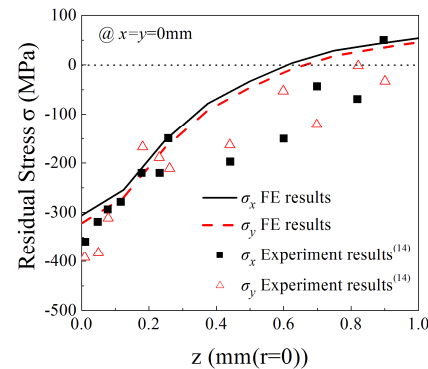
3.4 유한요소해석 검증

LSP 에 의한 유한요소해석 결과는 표면($y=z=0$)과 깊이($x=y=0$) 방향의 잔류응력을 비교하였다(Fig. 4 참고). 표면방향은 레이저 스팟 중심으로부터 x 축을 따라, 깊이방향은 레이저 스팟 중심에서 z 축을 따라 측정하였다.

본 연구에서 제시하는 유한요소해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 기존 문헌에서 제시된 실험값⁽¹⁴⁾을 비교해 보았다. 검증을 위한 LSP 적용 대상 재료는 35CD4 50HRC 합금으로 동적항복응력 $\sigma_y^d=1.24\text{GPa}$ 이며, 사용된 레이저 공정변수는 최대 압력과 $P_{max}=3\text{GPa}$ ($=1.433\text{HEL}$), 압력과 지속시간 $t_d=50\text{ns}$, 레이저 스팟 크기 $x_p=2.5\text{mm}$ 인 사각형 단일 LSP 이다.^(12,14)



(a)



(b)

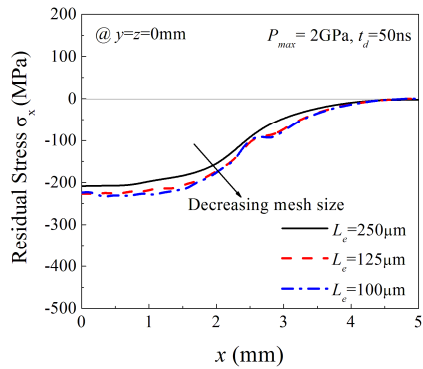
Fig. 5 Comparison of simulated FE residual stress results with experimental data

Fig. 5 는 문헌에서 제시하는 실험결과와 유한요소해석 결과를 비교한 그래프이다. 표면과 깊이방향에 대한 σ_x , σ_y 가 실험결과와 잘 일치한다. 따라서 본 연구에서 적용된 유한요소해석 기법은 일반적인 LSP 특성을 잘 예측하고 있다.

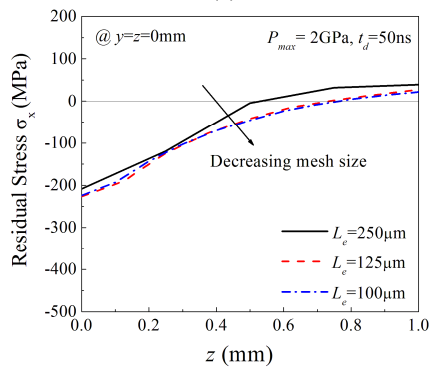
4. 민감도 해석 결과

4.1 요소크기 결정

LSP 에 대한 유한요소해석 시 요소크기는 레이저 스팟 크기(x_p)의 약 5% 이내일 때 큰 영향이 없는 것으로 알려져 있다.^(1,15) 이를 검증하기 위해, 요소 크기가 다른 3 가지 모델을 선정하여 결과를 비교하였다. 인코넬 alloy 600 합금에 대하여 $P_{max}=2\text{GPa}$, $t_d=50\text{ns}$ 를 적용하였으며, Fig. 6 을 보면 $L_e=125\mu\text{m}$, $L_e=100\mu\text{m}$ 의 결과는 유사하게 나오지만, $L_e=250\mu\text{m}$ 결과값은 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 충격파에 의한 동적 해석 시 결과값 수렴을 위해 많은 해석 시간이 필요하며, 특히, 요소수가 많아지면 기하급수적인 해석시간이 요구된다. 따라서 해석의 효율성을 위해 $L_e=125\mu\text{m}$ 의 요소크기를 선정하여 해석을 수행하였다.

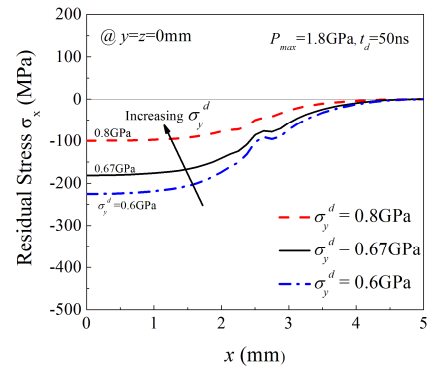


(a)

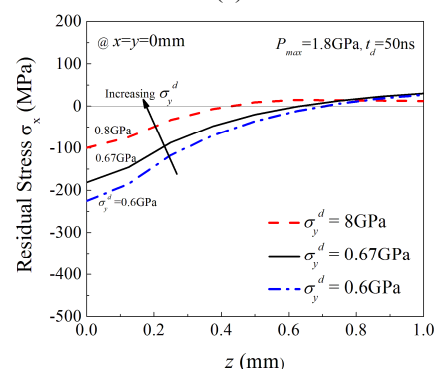


(b)

Fig. 6 Effect of the mesh size on simulated residual stress profiles

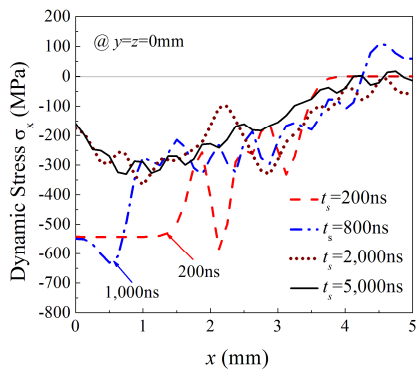


(a)

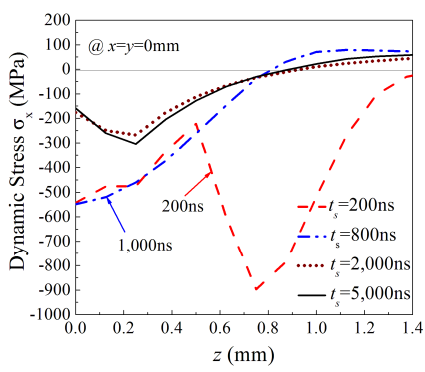


(b)

Fig. 8 Effect of the dynamic yield strength on simulated residual stress profiles



(a)



(b)

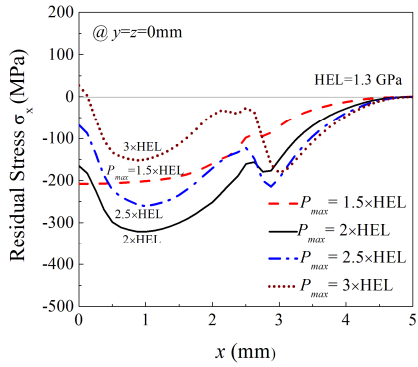
Fig. 7 Effect of the solution time for dynamic analysis on simulated dynamic stress profiles

4.1 동적해석을 위한 해석 시간 결정

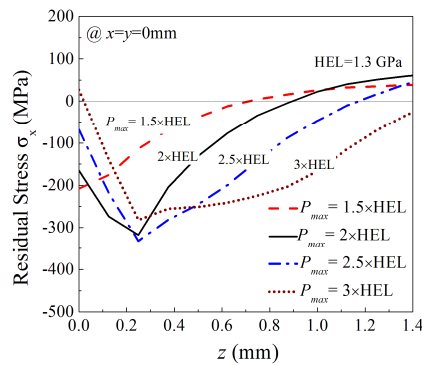
LSP 유한요소해석은 ABAQUS explicit 을 통해 과도 응력 및 변형률 정보를 ABAQUS implicit 으로 전달하여 정적해석으로 얻어진다. 하지만 ABAQUS explicit 의 동적해석이 충분하지 못하면 정확한 잔류응력을 도출할 수 없다.⁽⁸⁾ 따라서 충격과에 의한 소성변형이 충분히 수렴하는 구간까지 해석을 수행해야 한다. 이는 전체적인 해석시간과도 밀접한 관련이 있으며, 동적해석시간 t_p 를 통해 확인할 수 있다. Fig. 7 은 동적해석시간 t_p 를 변화시켜 표면과 깊이 방향의 잔류응력을 확인한 그래프이다. 표면에서의 잔류응력은 2,000ns 에서 다소 불안정함을 알 수 있고, 깊이방향 잔류응력은 충분히 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 두 조건을 모두 만족하는 동적해석시간 $t_p=5,000ns$ 를 설정하여 해석을 수행하면 동일한 잔류응력 결과를 얻을 수 있다.

4.2 동적항복응력 영향

변형률 속도가 10^6s^{-1} 에 이르는 LSP 의 경우 충격과가 재료내부로 전달되면서 HEL 을 초과하는 범위까지 소성변형 발생된다. Fig. 8 은 $P_{max}=1.8GPa$, $t_d=50ns$ 를 적용한 경우, 인코넬 alloy 600 합금의 동



(a)



(b)

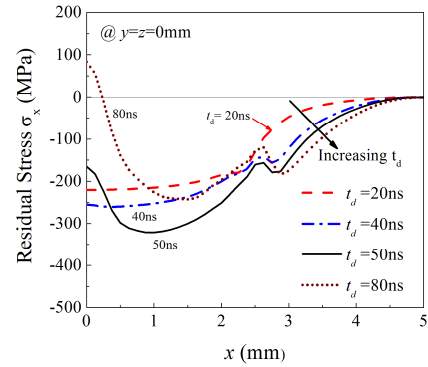
Fig. 9 Effect of the peak pressure on simulated residual stress profiles

적 항복 응력(σ_y^d) 변화에 따른 잔류응력 변화를 보여준다. 동적 항복응력이 증가함에 따라 표면과 깊이방향 잔류응력은 감소하고, 소성변형 발생깊이도 감소한다. 이는 재료의 강성이 증가하기 때문에 외력에 대한 저항성이 커지고, 충격파가 안정화되는데 소요되는 시간이 단축되기 때문이다. 따라서 충격파가 영향을 미치는 범위도 작아진다.^(7,8)

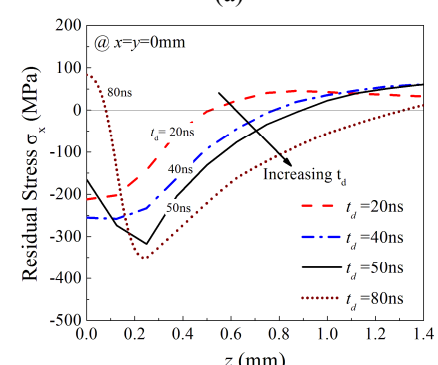
4.1 최대 압력과 영향

금속표면에 가해지는 압력파 크기는 레이저 파워 밀도에 의해 결정된다. 실제 유한요소해석에서는 단충격파의 함수로 입력되며, 최대 압력파의 크기에 따라 잔류응력 결과가 달라진다.

Fig. 9는 압력과 증가에 따른 표면 및 깊이 방향에 대한 잔류응력 결과이다. 표면 잔류응력은 최대 압력과 $P_{max}=2xHEL$ 에서 최대 압축잔류응력이 생성되며, $2xHEL$ 을 초과할 경우 잔류응력은 다시 감소한다. 이는 과도한 압력파에 의한 국부적인 역전소성변형(reverse plastic strain)과 레이저 스팟 가장자리에서 발생한 2차 충격파에 의한 중심부 응력 집중현상 때문이다.^(1,11,16) 깊이방향 잔류응력은 $2xHEL$, $2.5xHEL$ 에서 최대 압축잔류응력이 발생한다. 이는 문헌의 내용⁽¹¹⁾과 일치하지만,



(a)



(b)

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

$2xHEL$ 이후 중심부에서 압축잔류응력의 약화현상은 두드러지게 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 레이저 공정간 최적의 압력파는 $2xHEL$ 을 설정하는 것이 바람직하다.

4.2 압력파 지속시간 영향

압력파 지속시간과 잔류응력과의 관계를 확인하기 위해 $t_d=20ns\sim 80ns$ 의 결과를 비교하였다. Fig. 10에서 보듯이, 표면과 깊이방향 잔류응력은 레이저 스팟 중심부에서 압력파 지속시간 $t_d=20ns\sim 40ns$ 까지는 압축잔류응력이 증가하고, $t_d=50ns$ 이후에는 감소한다. 최대 압축잔류응력은 표면에서 $t_d=50ns$, 깊이방향에 대해서는 $t_d=80ns$ 에서 생성되지만, 중심부에서 인장잔류응력이 발생한다. 따라서 레이저 스팟 크기 2.5mm에 대한 압력파 지속시간은 50ns에서 최적의 압축잔류응력이 생성됨을 확인하였다.

4.3 레이저 스팟 크기 영향

레이저 스팟 크기에 따른 잔류응력 변화를 확인하기 위해 $x_p=1mm\sim 2.5mm$ 의 해석결과를 비교하였다. Fig. 11에서 보는 바와 같이, 표면에서의

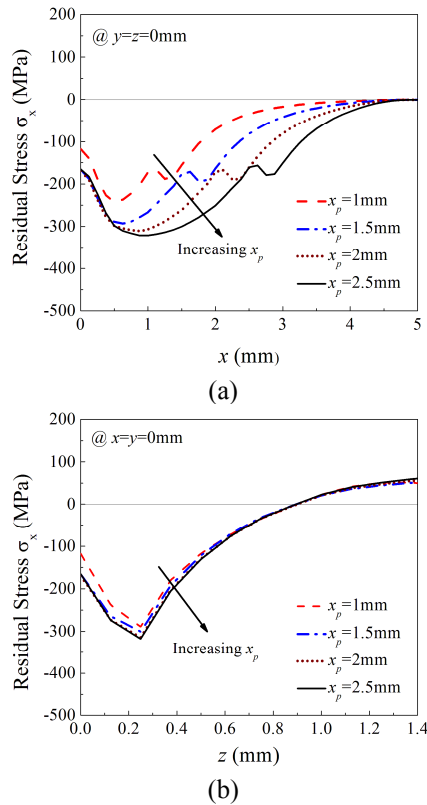


Fig. 11 Effect of the laser spot size on simulated residual stress profiles

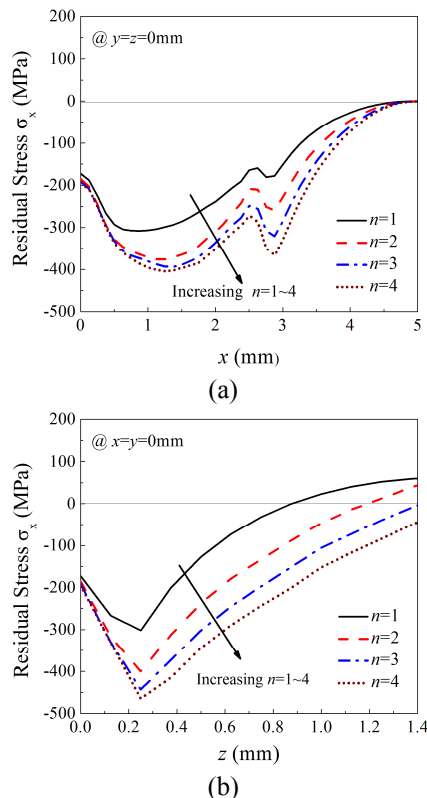


Fig. 12 Effect of the multiple laser impacts on simulated residual stress profiles

압축잔류응력은 레이저 스팟 크기가 증가할수록 압축잔류응력 영향 범위는 증가한다. 하지만 중심부에서의 잔류응력 크기는 일정하며 최대 압축잔류응력 크기도 큰 변화가 없다.

깊이방향 압축잔류응력도 약간의 차이는 있지만 레이저 스팟의 크기와 무관함을 알 수 있다. 마찬가지로 소성변형 발생깊이도 항상 일정하다. 따라서 레이저 스팟 크기는 압축잔류응력의 크기와 생성 깊이와는 무관하며, LSP 처리영역에만 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4.4 다중 레이저 샷 영향

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

Fig. 12 를 보면, 표면에서의 압축잔류응력은 레이저 빔의 조사 횟수에 비례하여 증가하지만, 잔류응력 증가량은 서서히 감소한다.

깊이방향 압축잔류응력도 조사 횟수 증가에 따라 증가하며, 마찬가지로 증가량은 조사횟수가 증가할수록 감소한다.

5. 결론

본 연구에서는 LSP 시뮬레이션 변수가 Inconel alloy 600 합금의 잔류응력에 미치는 영향을 유한요소해석 기법을 이용하여 평가하였다. 유한요소 해석을 위해 잔류응력에 미치는 영향 변수를 유한요소 해석기법 관련 변수와 LSP 최적 공정 변수로 구분하였으며, 민감도 해석을 통해 적절한 변수값의 범위를 제시하였다.

유한요소 해석기법 관련 변수는 요소 크기 (Mesh refinement), 해석시간 (Solution time), 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. 최대 압력은 HEL 의 2 배 정도의 크기에서 최대 압축잔류응력이 생성되며, 압력과 지속시간은 약 50ns 에서 최적의 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국원자력연구원 (KAERI)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (R1100161)

참고문헌

- (1) Ding, K. and Ye, L., 2006, "Laser Shock Peening Performance and Process Simulation," CRC Press, pp. 47~118.
- (2) Ding, K. and Ye, L., 2006, "Simulation of Multiple Laser Shock Peening of a 35CD4 Steel Alloy," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 178, pp. 162~169.
- (3) Yang, S. Y., Choi, S. D., Jun, J. M. and Gong, B.C., 2010, "Improving the Residual Stress Characteristics of the Metal Surface by ND: YAG Laser Shock Peening," *J. of the Korean Society of Machine Tool Engineering*, Vol. 19, pp. 539~547.
- (4) Wu, S., Huang, C., Wang, X. and Song, H., 2011, "A New Effective Method to Estimate the Effect of Laser Shock Peening," *Int. J. of Impact Engineering*, Vol. 38, pp. 322~329.
- (5) Ling, X., Peng, W. and Ma, G., 2008, "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.
- (6) Yang, C., Hodgson, D., Liu, Q. and Ye, L., 2008, "Geometrical Effects on Residual Stresses in 7075-T7451 Aluminum Alloy Rods Subject to Laser Shock Peening," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 201, pp. 303~309.
- (7) Bang, B. W., Son, S. K., Kim, J. M. and Cho, C. D., 2009, "Residual Stress Prediction in LSP Surface Treatment by Using FEM," *KSME-A*, Vol. 33, No. 8, pp. 776~772.
- (8) Kim, J. H. and Kim, Y. J., 2010, "Sensitivity Analyses of the Finite Element Parameters of Laser Shock Peening for Improving Fatigue Life of Metallic Components," *KSME-A*, Vol. 34, No.12, pp. 1821~1828.
- (9) 2008, ABAQUS Version 6.9, User's manual, Dassault Systemes.
- (10) Peyre, P., Fabbro, R. Merrien, P. and Lieurade, P., 1996, "Laser Shock Processing of Aluminium Alloys. Application to High Cycle Fatigue Behaviour," *Materials Science and Engineering*, Vol. A210, pp. 102~113.
- (11) Peyre, P. and Fabbro, R., 1995, "Laser Shock Processing: A Review of the Physics and Applications," *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 27, pp. 1213~1229.
- (12) Bugayev, A., Gupta, M. and Payne, R., 2006, "Laser Processing of Inconel 600 and Surface Structure," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, pp. 102~111.
- (13) Special metals, 2008, *Inconel Alloy 600*, Special Metals Corporation Publication, No. SMC-207, September.
- (14) Ballard, P., Fournier, J., Fabbro, R. and Frelat J., 1991, "Residual Stresses Induced by Laser-Shocks," *J. de Physique IV*, Vol. 1, pp. 487~581.
- (15) Braisted, W., and Brockman, R., 1999, "Finite Element Simulation of Laser Shock Peening," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 21, pp. 719~724.
- (16) Masse, J. E. and Barreau, G., 1995, "Laser Generation of Stress Waves in Metal," *Surface and Coating Technology*, Vol. 70, pp. 231~234.