

## 무차원 변수 해석을 이용한 LSP 공정변수 영향 분석<sup>§</sup>

김주희<sup>\*†</sup> · 김태양<sup>\*</sup> · 김윤재<sup>\*\*</sup>

\* 육군사관학교, \*\* 고려대학교

### Study on Effect of LSP Process Parameters Using Dimensionless Analysis

Ju Hee Kim<sup>\*†</sup>, Tae Yang Kim<sup>\*</sup> and Yun Jae Kim<sup>\*\*</sup>

\* Korea Military Academy, \*\* Korea Univ.

(Received April 16, 2013 ; Revised May 11, 2013 ; Accepted June 13, 2013)

**Key Words:** FE Analysis(유한요소해석), LSP(Laser Shock Peening), Plasma(플라즈마), Dynamic Yield Strength(동적항복응력), Infinite Element(무한요소), Dimensional Analysis(차원해석)

**초록:** 복잡한 물리적 현상에 대한 수학적 모델을 만들기 위해 적용되는 차원해석은 LSP 공정변수의 영향을 이해하는데 중요한 도구가 된다. 본 연구에서는 버킹엄(Buckingham) Π이론을 이용한 차원해석을 통해 레이저 충격 피닝의 잔류응력 결과에 영향을 미치는 변수를 확인하고, 유한요소법을 이용하여 LSP 공정변수인 최대압력과, 압력과 지속시간, 레이저 샷 크기 및 다중 LSP 에 대한 잔류응력 결과를 확인하였다.

**Abstract:** Dimensional analysis is an important tool for developing mathematical models of physical phenomena in order to understand the effects of laser shock peening(LSP) process parameters. By using the Buckingham Π theorem, we proposed an applicable dimensional analysis method to verify the effects of LSP process parameters on the residual stresses. Furthermore, by using finite element analysis, we proposed a finite element method of LSP and discussed various parameters, such as peak pressure, pressure pulse duration, laser spot size, and multiple LSPs.

#### - 기호설명 -

$A$	: 초기항복응력
$B$	: 변형률 경화상수
$C$	: 변형률속도 경화지수
$N$	: 변형률 경화지수
$\epsilon_{eq}^p$	: 등가 소성 변형률
$T^*$	: 무차원 등가 온도
$I_0$	: 레이저 파워밀도
$L_e$	: 요소길이
$P_{max}$	: 최대 압력과
$t_d$	: 압력과 지속시간
$x_p$	: 레이저 스팟 크기
$n$	: 레이저 샷 횟수
$\sigma_y^d$	: 동적항복응력
$HEL$	: Hugoniot 탄성한계

#### 1. 서론

레이저충격피닝(Laser shock peening; LSP) 기술은 금속 재료의 표면과 깊이방향에 대해 효과적으로 압축잔류응력을 생성시켜 준다.<sup>(1-3)</sup> 이는 작은 구슬(hammer)을 금속표면에 충격시켜 강제적인 압축잔류응력을 생성시켜 주는 전통적인 샷 피닝(Shot peening; SP)에 비해 훨씬 효과적이며, 피닝과정에서 균열(crack)이 발생하지 않는 것으로 알려져 있다.<sup>(3)</sup>

레이저 광학 기술의 발달과 함께 다양한 산업분야에 활용되고 있는 레이저충격피닝 기술은 고온 환경하에서 반복하중을 받는 기계부품의 피로수명 향상을 위해 적용되고 있다. 최근에는 비행기 엔진의 터빈 블레이드와 항공기 랜딩 기어 등에 적용되고 있으며, 원자력 발전소 내의 원자로 관통노즐 용접부 잔류응력 해소를 위한 예방정비기술로 적용을 검토하고 있다. 하지만 LSP 과정은 아주 짧은 시간에 발생하는 고온 고압의 플라즈마로부터 생성되는 압력파에 대한 재료거동을 해석해야 하기 때문에 다양한 매개변수의 영향을 고려해야 한다. 이러

§ 이 논문은 대한기계학회 신뢰성부문 2013년도 춘계학술대회 (2013. 3. 27.-29., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, [kjh6452@kma.ac.kr](mailto:kjh6452@kma.ac.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

한 복잡한 물리적 현상에 대한 수학적 모델을 만들기 위해 적용되는 차원해석은 LSP 공정변수의 영향을 이해하는데 중요한 도구가 된다. 어떤 물리적 현상에 대한 수학적 모델링을 구성하기 위해서는 우선 현상에 영향을 미칠 수 있는 모든 매개변수를 확인하고, 매개변수에 대한 차원해석을 통해 모델화 과정을 단순화하여 결과를 예측할 수 있다. 이를 통해 수학적 모델링 과정에 필요한 실험 횟수를 급격히 줄일 수 있을 뿐만 아니라 단순화된 모델을 통해 공정변수에 대한 최적화 범위도 예측할 수 있다. 본 연구에서는 버킹엄(Buckingham) Π이론을(4) 이용한 차원해석을 통해 레이저 충격 피닝(LSP)의 잔류응력 결과에 영향을 미치는 변수를 확인하고, 유한요소법을 이용하여 이러한 변수에 대한 잔류응력 민감도 해석 결과를 제시하였다.

## 2. 차원해석

### 2.1 LSP 차원해석 과정

LSP 에 의해 발생하는 잔류응력에 대한 물리적 현상을 규명하기 위해서는 많은 매개변수에 대한 이해가 필요하다. 기존 연구에서 확인했듯이 LSP 잔류응력 결과에 영향을 미치는 변수는 레이저에 의해 발생하는 압력파의 크기, 압력파 지속시간, 레이저 스팟 크기 및 형상이 있으며, 주어진 금속재료의 재료물성에 의해서도 결과값이 결정된다.

차원해석은 다중 매개변수를 갖는 문제를 해결하기 위해 널리 사용되는 방법으로 각각의 차원 변수들간에 관계를 적절히 해석하여 물리적 인과 관계를 결정하는 수학적·공학적인 방법이다. 버킹엄 Π이론은 독립변수의 수와 차원의 수에 관계없이 무차원 상관관계식을 유도할 수 있도록 제안된 기법이다.(4,5) 버킹엄 Π이론에서 종속변수  $a$  와 독립변수  $a_1, a_2, \dots, a_n$  와의 관계를 아래 식과 같이 정의할 수 있다.

$$a = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_{k+1}, a_{k+2}, \dots, a_n) \tag{1}$$

만약  $a_1, a_2, \dots, a_k$  에 대하여 독립무차원변수  $k$  가 존재한다면, 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\frac{a}{(a_1^{m_1}, a_2^{m_2}, \dots, a_k^{m_k})} = f(1, 1, \dots, 1, \frac{a_{k+1}}{(a_1^{p_1}, a_2^{p_2}, \dots, a_k^{p_k})}, \frac{a_{k+2}}{(a_1^{q_1}, a_2^{q_2}, \dots, a_k^{q_k})}, \dots, \frac{a_n}{(a_1^{r_1}, a_2^{r_2}, \dots, a_k^{r_k})}) \tag{2}$$

LSP 시스템 공정변수는 압력파의 특성을 결정하는 변수와 재료물성과 관련된 변수로 구분된다. 레이저 압력파와 관련된 변수는 최대 압력파( $P_{max}$ ), 압력파 지속 시간( $t_d$ ), 레이저 스팟 크기( $x_p$ )가 있으

며, 재료물성 관련 변수는 대변형-고변형률 조건에서의 Johnson-Cook 구성 모델과 관련된 변수로 구분할 수 있다.

Fig. 1 에서는 LSP 시스템에 의해 결정되는 레이저 공정 변수인 최대 압력파( $P_{max}$ )와 압력파 지속 시간( $t_p$ )을 보여주고 있다. 일반적으로 압력파 간격 시간은 내부 충격파가 충분히 안정화되는 범위에서 결정되기 때문에 잔류응력 결과에 미치는 영향은 미미하다. 유한요소 해석시간(solution time)과 안정한계시간(stability limit time)은 해석결과의 수렴성과 관련된 변수로 기존 논문에서 제시된 값을 사용하였다.(5) 이들 공정변수와 함께 레이저 스팟 크기( $x_p$ )는 잔류응력 크기 및 분포 특성을 결정하는 중요한 변수가 된다.

재료의 거동에 대한 기계적 정보를 공학설계에 이용하기 위해서는 구성방정식이 필요하게 된다. 이러한 구성방정식은 재료 혹은 구조물의 기계적인 변형거동을 수치해석적으로 해석이 가능하게 하며, 해석의 정확성에도 영향을 미친다. 일반적으로 재료의 동적변형거동을 총체적으로 완전하게 나타내는 것은 불가능하고 실험조건과 결과에 따르는 한계성을 가진 경험적인 구성방정식의 형태로 나타내어진다.

동적변형거동에 대한 구성방정식은 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 일반적으로 변형률, 변형률 속도, 온도, 내부상태변수 등의 함수로 표현된다. 널리 사용되는 Johnson-Cook 구성 모델의 유효응력(effective stress)은 아래 식과 같이 표현된다.

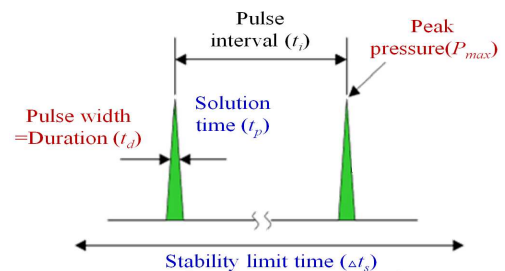


Fig. 1 The laser and FEA related parameters in LSP analysis system

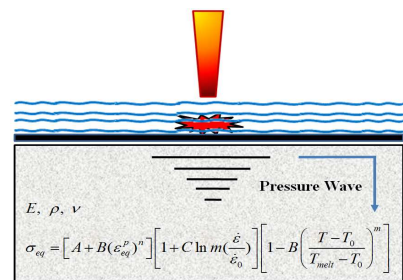


Fig. 2 The material related parameters in LSP analysis system(5)

$$\sigma_{eq} = \left[ A + B(\varepsilon_{eq}^p)^n \right] \left[ 1 + C \ln m \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - B \left( \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

여기서,  $A$ 는 초기항복응력,  $B$ 는 변형률경화상수,  $C$ 는 변형률 속도 경화지수,  $n$ 은 변형률 경화지수,  $\varepsilon_{eq}^p$ 은 등가 소성 변형률,  $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 는 무차원 등가소성 변형률 속도,  $\dot{\varepsilon}$ 는 등가소성 변형률 속도,  $\dot{\varepsilon}_0$ 는 기준 등가소성 변형률 속도(=1.0/sec)이다. 무차원 등가온도인  $T^* = (T - T_0)/(T_{melt} - T_0)$ 에서  $T$ 는 현재온도,  $T_{melt}$ 은 재료의 용융온도,  $T_0$ 은 실온,  $m$ 은 재료의 열 열화지수이다. 일반적으로 실온에서 수행되는 실험에서는 무차원 등가 온도( $T^*$ )가 무시되어 식 (3)은 다음과 같이 단순화된다.

$$\sigma_{eq} = \left[ A + B(\varepsilon_{eq}^p)^n \right] \left[ 1 + C \ln m \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (4)$$

LSP에서 소성변형 발생깊이( $L_p$ )와 최대 압축잔류응력( $\sigma_m$ )은 이러한 변수들에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$L_p = f(P_{max}, t_d, x_p, E, \rho, \nu, A, B, n, c, \overline{\varepsilon^p}) \quad (5)$$

$$\sigma_m = g(P_{max}, t_d, x_p, E, \rho, \nu, A, B, n, c, \overline{\varepsilon^p}) \quad (6)$$

여기서, 재료의 탄소성 거동을 묘사하는 Hugoniot 탄성 한계  $HEL$  과 소성물성  $E'$ 이  $HEL = (1 - \nu) \cdot \sigma_y^d / (1 - 2\nu)$ ,  $E' = d\sigma_y^d / d\varepsilon^p$ 일 때 식 (5), (6)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L_p = f(P_{max}, t_d, x_p, E, E', \rho, HEL) \quad (7)$$

$$\sigma_m = g(P_{max}, t_d, x_p, E, E', \rho, HEL) \quad (8)$$

무차원해석을 이용하면,  $\sqrt{E'/\rho}/\sqrt{E/\rho}$ ,  $P_{max}/HEL$ ,  $HEL/E$  및  $(x_p/\sqrt{E/\rho}) \cdot (1/t_d)$ 과 같은 4개의 무차원 변수를 선정할 수 있다. 재료가 변하지 않는다면 재료와 관련된 무차원 변수인  $\sqrt{E'/\rho}/\sqrt{E/\rho}$ 와  $HEL/E$ 는 해석에서 배제할 수 있다. 결과적으로 다음과 같은 3개의 관계식을 얻을 수 있다.

$$L_p = \sqrt{E/\rho} \cdot t_d \cdot f \left( \frac{P_{max}}{HEL}, \frac{x_p}{\sqrt{E/\rho}} \cdot \frac{1}{t_d} \right) \quad (9)$$

$$L_p = x_p \cdot f' \left( \frac{P_{max}}{HEL}, \frac{x_p}{\sqrt{E/\rho}} \cdot \frac{1}{t_d} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_m = P_{max} \cdot g \left( \frac{P_{max}}{HEL}, \frac{x_p}{\sqrt{E/\rho}} \cdot \frac{1}{t_d} \right) \quad (11)$$

위 식 (9)와 (10)에서 무차원 변수  $(x_p/\sqrt{E/\rho}) \cdot (1/t_d)$ ,

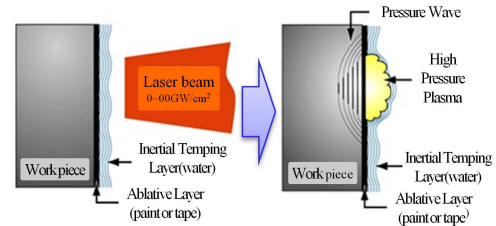


Fig. 3 Schematic of one-sided LSP<sup>(1)</sup>

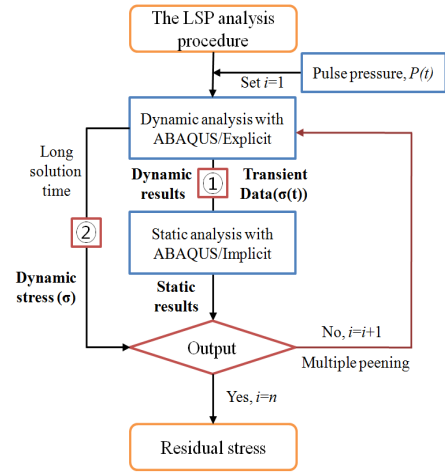


Fig. 4 Procedure of LSP simulation

$P_{max}/HEL$ 이 일정하면 소성변형 발생깊이( $L_p$ )는 압력과 지속시간( $t_d$ )과 레이저 스팟 크기( $x_p$ )에 비례하고, 최대 압축잔류응력( $\sigma_m$ )은 식 (11)과 같이 레이저의 최대 압력크기( $P_{max}$ )에 비례함을 알 수 있다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 해석과정

Fig. 3는 금속재료 표면에 조사되는 레이저에 의한 LSP 원리와 플라즈마 생성 및 압력과의 전달과정을 보여준다. 금속재료 표면은 높은 온도의 플라즈마에 의해 표면 용융을 방지하고 압력과 효율을 높이기 위해 용융층(검정색 테이프) 처리를 하고, 표면에 생성되는 고온고압의 플라즈마의 외부 확산을 방지하기 위해 물막층 처리를 한다. 이는 압력과의 효율을 증대하여 높은 잔류응력을 얻기 위함이다.<sup>(6~8)</sup>

금속표면에 일정한 레이저 파워밀도의 레이저 빔이 조사되면, 높은 온도와 압력의 플라즈마에 의해 압력파가 금속내부로 전파되고, 이때 재료의 소성변형으로 인해 금속의 표면과 깊이 방향으로 압축잔류응력이 생성된다.<sup>(1~5)</sup>

LSP 과정에서 발생하는 압력파는 아주 짧은 시간에 발생하기 때문에 동역학적 해석에 유용한 외연적(explicit) 시간 적분 해석코드를 활용하여 유

한요소해석을 수행해야 한다.<sup>(7-12)</sup> 본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 를 사용하여 잔류응력을 예측하였다.<sup>(12)</sup>

Fig. 4 는 ABAQUS 를 이용한 유한요소해석 LSP 시뮬레이션 과정을 보여준다. 충격파에 의한 동역학적 해석은 내부로 전달되는 압력파의 진동을 포함한다. 이때문에 안정적인 잔류응력을 얻기 위해서는 충격파가 금속내부에서 흡수되어 안정화되는 시간을 고려해야 한다. 충격파로 인한 불안정한 응력상태를 안정화하기 위해서 일반적으로 Fig. 4 와 같이 동해석과 정해석을 혼합한 ABAQUS Explicit / Implicit 를 이용하는 방법①과 ABAQUS Explicit 에서 안정화를 위해 충분한 해석 시간을 부여해주는 방법 ②가 있다.<sup>(7,8-11)</sup> 본 연구에서는 충격문제에 일반적으로 사용되는 방법 ①을 사용했다. 이는 ABAQUS Explicit 에서 충격파에 의해 불안정한 응력 상태인 동적 해석을 수행한 후 일정 시간 동적 응력 수렴범위에 도달 했을 때 ABAQUS Implicit 으로 전환 (export) 하여 보다 빨리 정적 평형 상태에 도달시켜 잔류응력 결과를 도출하는 방법이다.

3.2 최대압력과 결정

레이저 시스템으로부터 발생하는 압력파의 최대값은 유한요소해석 시 입력하중으로 중요한 변수가 된다. 레이저에 의해 발생하는 압력파의 크기는 조사되는 레이저 파워밀도와 관련이 있다. 일정한 에너지를 갖는 레이저 시스템으로부터 결정되는 충격파의 최대 압력은 식 (12)와 같다.<sup>(1,2,4,6-11)</sup>

$$P_{max}(GPa) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (12)$$

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (13)$$

여기서  $Z(Z_i = \rho_i D_i)$  ( $\rho_i$ : 재료 밀도,  $D_i$ : 충격파 속도)는 reduced acoustic impedance 이다.  $Z_1$  은 투명층(물막층) 재료의 임피던스 값이며,  $Z_2$  는 금속재료의 임피던스 값이다.<sup>(8)</sup>  $\alpha$  는 레이저에 의해 생성되는 압력에 대한 효율로 일반적으로 0.1~0.3 의 값을 가진다.<sup>(1,2,4)</sup>

3.3 동적 재료거동 모델

레이저에 의한 고온고압의 플라즈마는 금속 내부로 높은 압력파를 생성하여 전달한다. 이로 인해 금속표면과 내부는 고 변형률(high strain rate) 상태가 되어 동적 재료거동을 한다. 금속재료는 일반적으로 변형률이 높아지면 재료의 항복응력도 증가하는 특징을 갖는다.<sup>(7)</sup>

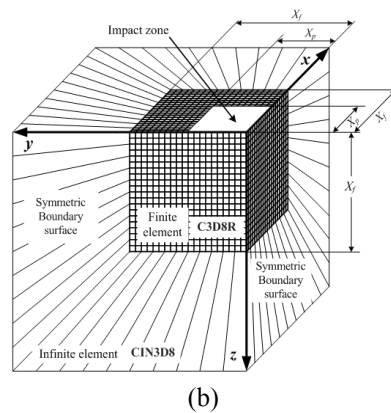
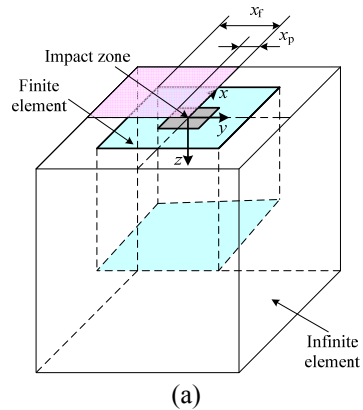


Fig. 5 (a) Geometry of LSP and (b) 3D FE mesh (quarter model)

동적 재료 거동에서 발생하는 소성변형은 가해지는 압력파의 최대값이 Hugoniot 탄성한계(Hugoniot Elastic Limit ; HEL)를 초과할 때 발생하며, 식 (14)와 같이 재료가 갖는 고유의 재료물성인 동적 항복응력(Dynamic yield strength)과 관계가 있다.<sup>(1,2,4-8)</sup>

$$HEL = \frac{\lambda + 2\mu}{2\mu} \sigma_Y^{dyn} = \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)} \sigma_Y^{dyn} \quad (14)$$

여기서  $\lambda, \mu$  는 재료의 Lame's constants 이고,  $\nu$  는 푸아송 비이다.

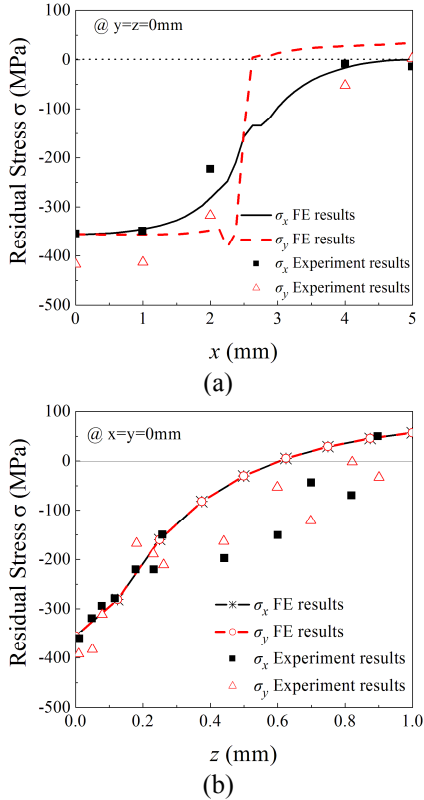
일반적으로 금속재료의 LSP 에 대한 거동은  $P_{max} < HEL$  에서는 탄성 거동,  $HEL < P_{max} < 2 \times HEL$  에서는 탄소성 거동,  $P_{max} > 2 \times HEL$  에서는 순수 소성 거동을 하는 것으로 알려져 있다.<sup>(1,2,10,13-16)</sup>

3.4 형상 및 FE 메쉬

LSP 과정을 유한요소모델로 구현하기 위해 Fig. 5(a)와 같이 사각형 레이저 스팟( $x_p$ )을 가정하였으며, Fig. 5(b)와 같이 3 차원 1/4 유한요소모델로 형상화하였다. 충격파에 의한 경계부 반향효과를 없애고, 무한평판 경계조건을 구현하기 위해 무한요소(infinite element)를 혼합 사용하였다.<sup>(1,2,7,8)</sup> 유한요소 영역은 레이저 스팟( $x_p$ ) 길이의 2 배까지 모델링하

**Table 1** Mechanical properties of the 35CD4 50HRC steel alloy

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$	$E$ (GPa)	$\sigma_y^d$ (GPa)	HEL (GPa)
7,800	0.29	210	1.24	2.1

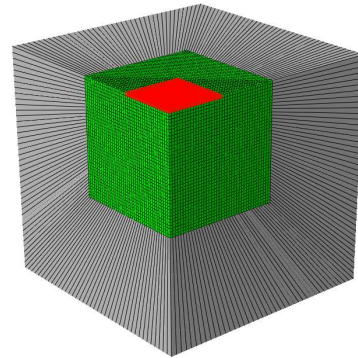


**Fig. 6** Comparison of simulated FE residual stress results with experimental data<sup>(13,17)</sup>

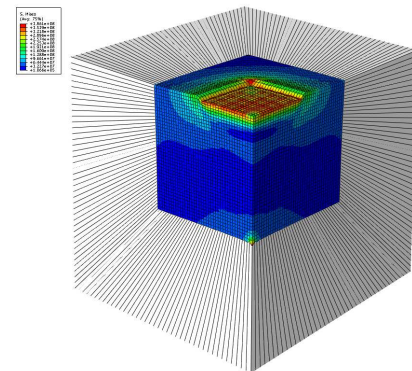
였으며, 요소형태는 C3D8R 일차 요소를 사용하였다. 무한요소는 유한요소의 2 배로 모델링하였으며, 요소 형태는 CIN3D 요소를 사용하였다. 요소크기는 레이저 스팟 크기( $x_p$ )의 약 5%로 모델링 하였다.<sup>(1,11)</sup>

3.5 유한요소해석 검증

무차원 변수 해석을 통해 확인된 LSP 공정변수의 영향을 유한요소해석을 통해 확인하기 위해 유한요소해석의 유용성을 검증하였다. 상용 유한요소 해석 코드인 ABAQUS 를 이용하여 Fig. 4 의 해석절차에 따라 해석을 수행하였으며, 표면( $y=z=0$ )은 레이저 스팟 중심으로부터  $x$  축을 따라, 깊이( $x=y=0$ ) 방향은  $z$  축을 따라 잔류응력을 측정하였다(Fig. 5 참고). 유한요소해석 결과의 타당성은 기존 문헌에서 제시된 실험결과<sup>(13,17)</sup>와 해석 결과를 비교함으로써 검증이 가능하다. 그림에 나타난 바와 같이 사각형 레이저 스팟의 경우 경계부의 2차 충격파에 의한 반향효과로  $x$  축에서 측정된  $\sigma_{xx}$



**Fig. 7** FE mesh of rectangular laser spot



**Fig. 8** FE results of rectangular laser spot(Von. Mises)

와  $y$  축을 따라 측정된  $\sigma_{yy}$  의 크기가 다르게 나타남을 알 수 있다.

검증을 위한 LSP 적용 대상 재료는 35CD4 50HRC 합금으로 재료물성은 Table 1 과 같다. 실험에서 사용된 레이저 물성은 최대 압력과  $P_{max}=3\text{GPa}$ , 압력과 지속시간  $t_d=50\text{ns}$ , 레이저 스팟 크기  $x_p=2.5\text{mm}$  인 사각형 단일 LSP 이다.<sup>(1,2,13,15-17)</sup> Fig. 6 은 문헌에서 제시하는 실험결과와 유한요소해석 결과를 비교한 그래프이다. 표면과 깊이방향에 대한  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  가 실험결과와 경향성이 잘 일치하고, 특히, 중심부에서 최대 압축잔류응력 크기를 잘 예측하고 있다. 따라서 본 연구에서 적용된 유한요소해석 기법은 일반적인 LSP 특성을 잘 반영한다고 할 수 있다.

4. 결과분석

앞에서 우리는 무차원 변수 해석을 통해 LSP 공정변수가 금속재료의 잔류응력 결과에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 이에 따르면 압축잔류응력 크기 및 발생깊이는 LSP 공정변수인 최대 압력과 크기( $P_{max}$ ), 압력과 지속시간( $t_d$ ) 및 레이저 스팟 크기( $x_p$ )에 비례하여 증가하는 것으로 확인되었다. 더불어 일반적인 LSP 공정은 동일한 지점에 레이저 샷의 중첩(overlapping)된 공정을 통해

표면처리작업이 진행된다. 따라서 다중 레이저 샷에 의한 잔류응력 변화도 반드시 고려되어야 하는 공정변수 중 하나이다.

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 표면과 깊이 방향에 대한 잔류응력 결과를 확인하였다. 일반적으로 표면에서의 잔류응력은 높은 온도와 압력의 플라즈마에 의해 열적, 기계적 변형을 수반하기 때문에 응력 변화가 매우 복잡한 메커니즘을 가진다. 따라서 과도하게 높은 압력과 또는 지속시간에 대해서는 응력 과포화상태에 도달하여 최적화된 잔류응력 결과를 얻기 어렵다. 이는 기존 연구를 통해 잘 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 깊이 방향에 대한 잔류응력을 중점적으로 다루고자 한다.<sup>(11,13,17)</sup>

Fig. 7-8 은 유한요소해석을 위해 적용된 유한요소 형상과 해석 결과를 보여준다. 그림과 같이 해석대상 재료의 경계면에서 발생하는 충격과 반향효과를 없애기 위해 무한요소를 사용하였으며, 입력하중은 사각형 단충격과의 동하중으로 가해졌다.

4.1 압력과 크기에 따른 잔류응력 분포

레이저에 의해 생성되는 압력파의 크기는 레이저 파워 밀도함수로 식 (12)와 같이 정의되며, LSP 에 의해 생성되는 압축잔류응력 크기는 압력과 크기에 비례한다. Fig. 9 의 (a)와 (b)는 표면과 깊이방향에 대한 잔류응력 분포를 각각 보여주고 있다.

표면에서의 잔류응력은 재료의 2HEL 에서 최대이며, 그 이상의 압력파에서는 잔류응력 크기가 역전현상이 발생함을 알 수 있다. 이는 기존 연구에서 얻은 결과와 일치하였다.<sup>(13,17)</sup> 깊이방향 잔류응력은 압력과 크기가 증가함에 따라 최대 압력과 크기가 비례적으로 증가함을 알 수 있다.  $P_{max}=2.5\text{GPa}$  에서는  $\sigma_m=153\text{MPa}$  의 잔류응력이,  $P_{max}=4\text{GPa}$  에서는  $\sigma_m=600\text{MPa}$  로 약 290% 증가함을 확인하였다. 비록 압축잔류응력 발생깊이도 증가하지만 이는 잔류응력 크기 증가량에 비해 작음을 알 수 있다.

4.2 압력과 지속시간에 따른 잔류응력 분포

압력과 지속시간은 레이저 파의 조사 시간에 의해 결정된다. 무차원 변수해석 결과인 식 (9)를 보면 압축잔류응력 발생깊이는 압력과 지속시간에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 유한요소해석 결과로부터 확인된다.  $t_d=30\text{ns}$  에서  $L_p=0.32\text{mm}$  인 잔류응력이  $t_d=100\text{ns}$  에서  $L_p=0.89\text{mm}$  로 약 180% 증가함을 알 수 있다. 하지만 압력과 지속시간이 과도하게 길게 되면 마찬가지로 표면에서 잔류응력 역전현상이 발생한다(Fig. 10 에서

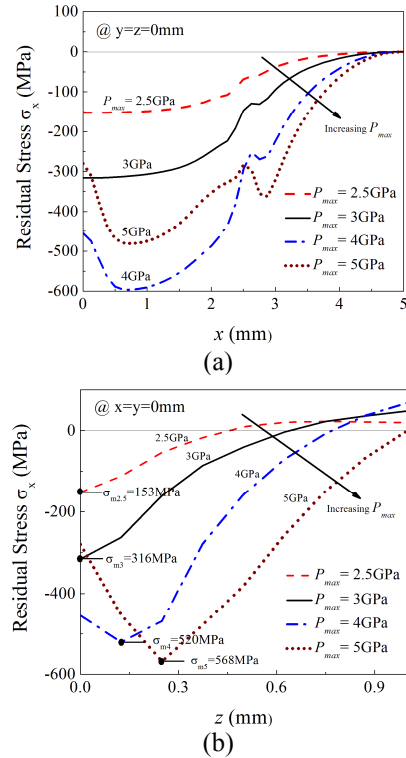


Fig. 9 Distribution of residual stresses with respect to different peak pressure for single LSP. (a) on the surface, (b) in depth

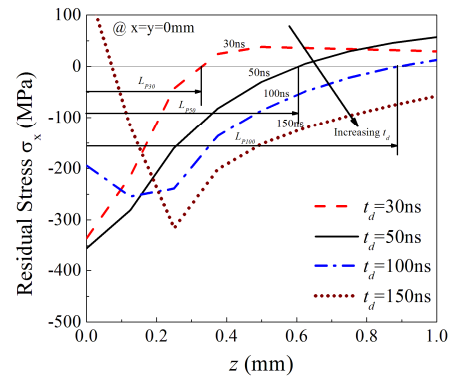


Fig. 10 Distribution of residual stresses with respect to different laser duration time for single LSP

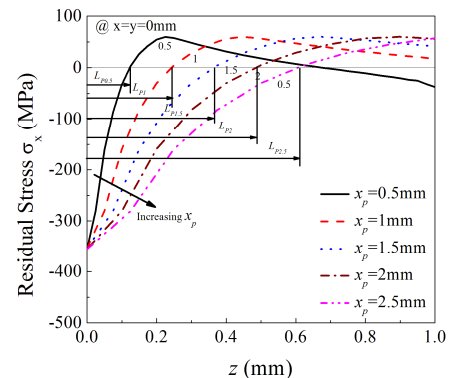


Fig. 11 Distribution of residual stresses with respect to different laser spot size for single LSP

$z=0\text{mm}$  지점). 따라서 과도하게 긴 압력과 지속시간은 표면잔류응력 분포 특성을 나쁘게 하기 때문에 적절한 범위 선정이 필요하다.

4.3 레이저 스팟 크기에 따른 잔류응력 분포

동일한 에너지와 파장(wavelength)가진 레이저 시스템에서는 레이저 스팟 크기와 압력과 지속시간이 변화되면 레이저 압력과의 크기도 변하게 된다. 일반적으로 레이저 스팟 크기가 증가하면 압력과 지속시간도 동시에 비례하여 증가한다. 이는 Fabbro 의 식<sup>(13,14,17)</sup>  $P=0.01(\alpha/2 \alpha+3)^{1/2} Z^{1/2} I^{1/2}$  에서 동일한 레이저 충격 시스템에서는 레이저 파워 밀도  $I \propto J/(t_d x_p^2)$ 이며, 압력과의 크기  $P \propto I^{1/2}$  에 비례한다. 따라서 압력과의 크기  $P \propto J^{1/2}/(t_d^{1/2} x_p)$ 이므로 레이저 시스템의 에너지가 동일할 경우 레이저 압력과는  $t_d^{1/2}$  와  $x_p$  에 반비례 관계에 있다. 이를 확인하기 위해 압력과 지속시간과 레이저 스팟크기의 비( $t_d / x_p$ ) 일정하게 유지하면서  $x_p$  를 증가시켜 잔류응력 결과를 확인하였다. Fig. 11 은 레이저 스팟 크기 증가에 따른 잔류응력 크기 변화를 보여준다. 압축잔류응력 크기는 중심에서 항상 일정한 크기를 가지면서 잔류응력 깊이는 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 무차원 변수 해석 결과인 식 (10)에 대한 관계와 일치함을 보여준다.

4.4 다중 LSP 에 따른 잔류응력 분포

레이저 공정에서 레이저 샷의 중첩은 인위적으로 조정 가능하다. 일반적으로 일정한 중첩비를 가지도록 표면처리가 이루어 지지만 필요에 따라 높은 잔류응력을 얻기위해 중첩비 100%의 공정이 이루어 지는 경우가 있다. 본 연구에서는 이러한 중첩비 100%에 해당하는 다중 LSP 결과를 확인하였다. Fig. 12 은 동일지점에 대한 레이저 샷의 중첩 결과를 보여준다.  $n=1\sim 4$  회까지 레이저 샷에 대한 해석결과로서 표면을 제외하고 모든 영역에서 잔류응력의 크기 및 발생깊이가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만  $n=4$  에서는 표면에서의 잔류응력이  $n=3$  과 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 동일한 지점에 대한 레이저 샷 중첩도 적절한 범위에서 선정되어야 피닝공정에 소요되는 시간과 비용을 최소화 할 수 있을 것으로 판단한다.

4.5 초기잔류응력에 대한 LSP 영향

이상에서의 결과들은 금속재료 표면에 초기 잔류응력이 없는 것을 가정하였다. 하지만 표면처리가 요구되는 곳은 대부분 인장잔류응력이 존재하는 부분으로 초기잔류응력에 대한 LSP 영향이

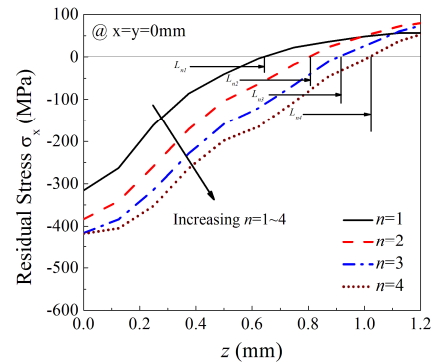


Fig. 12 Distribution of residual stresses with respect to multiple LSP

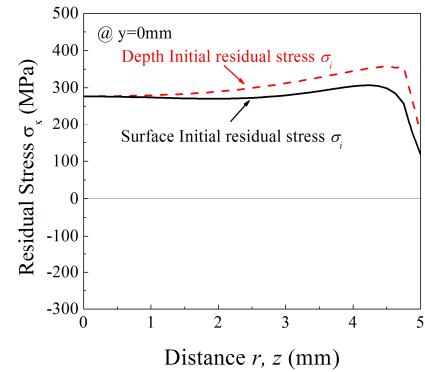


Fig. 13 Distribution of initial residual stresses with respect to single LSP

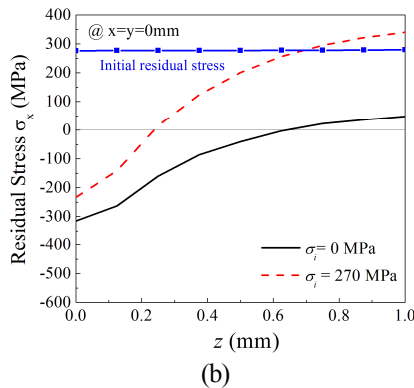
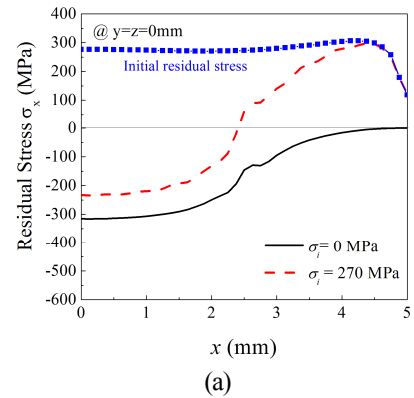


Fig. 14 Effects for initial residual stresses with respect to single LSP. (a) on the surface, (b) in depth

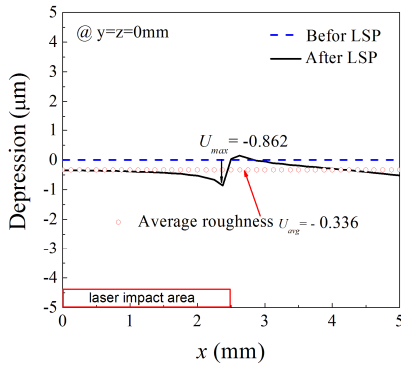


Fig. 15 Surface roughness after LSP treatment

확인되어야 한다. 특히 용접에 의한 인장잔류응력은 금속재료의 피로성능을 저하시키는 원인이 되기 때문에 최근 용접부 주위에 발생하는 인장잔류응력 해소를 위해 다양하게 적용되고 있다. 일반적으로 용접에 의한 잔류응력은 약 200~300MPa 정도로 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 따라서 본 연구에서는 이러한 용접잔류응력에 대한 레이저 피닝효과를 확인하기 위해 초기 잔류응력을 부여하여 유한요소 해석 결과를 확인하였다. Fig. 13 는 비례적분조정법<sup>(12,19)</sup> 을 이용하여 해석대상 표면과 깊이 방향에 대하여 입력된 초기잔류응력을 보여준다. 표면과 깊이 방향에 약 270MPa 정도의 초기잔류응력을 입력하였다. Fig. 14 은 초기잔류응력에 대한 LSP 결과를 보여준다. (이하  $P_{max}=4\text{GPa}$ ,  $t_d=50\text{ns}$ ,  $x_p=2.5\text{mm}$  사용) 그림에서 보는 바와 같이 표면과 깊이 방향에 대하여 효과적으로 잔류응력이 개선됨을 알 수 있다. 초기 잔류응력이 없는 경우와 비교하더라도 충분한 압축잔류응력이 생성됨을 확인할 수 있다. 이는 LSP 가 초기잔류응력이 존재하는 용접부 등에서 보다 효과적으로 표면처리가 된다는 것을 말해주는 것이다.

#### 4.6 LSP에 의한 표면조도(Surface quality) 특성 분석

LSP 에 의한 표면처리방법은 전통적인 SP 보다높은 표면조도 특성을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>(20)</sup> Fig. 15 는 단일 레이저 샷에 의한 표면 변형을 보여준다. LSP 이전의 표면 조도는 0 으로 가정하였으며, 피닝 처리 후 평균 표면조도  $U_{avg}=0.336\ \mu\text{m}$ , 레이저 스팟 가장자리에서 최대 표면조도  $U_{max}=0.862\ \mu\text{m}$  가 발생하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 무차원 변수 해석을 통해 LSP 잔류응력 결과에 영향을 미치는 다양한 변수들의 특성을 확인하고 유한요소해석을 통해 잔류응력 경향을 예측하였다. 압력과 지속시간( $t_p$ )과 레이저

스팟크기( $x_p$ )가 증가할수록 소성변형 발생깊이( $L_p$ )는 증가하였고, 레이저의 최대 압력과( $P_{max}$ )가 증가함에 따라 최대 압축잔류응력( $\sigma_m$ )은 비례적으로 증가함을 확인하였다. 다중 LSP 의 경우 2~3 회의 중첩으로 충분한 잔류응력 개선효과가 있는 것을 확인하였으며, 용접부와 같은 초기잔류응력이 존재하는 부위에 대한 LSP 효과도 충분히 있음을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 무차원 변수 해석을 통해 LSP 잔류응력에 대한 경향을 미리 예측할 수 있었고, 유한요소해석을 통해 검증함으로써 실제 레이저 공정 피닝에 적용이 유용할 것으로 판단한다.

## 후 기

본 논문은 육군사관학교 화랑대연구소의 2013 년도[13-군학-17] 연구활동비 지원을 받아 연구되었음.

## 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) Anderson, T. L., 2005, "Fracture Mechanics" Taylor & Francis, 3-rd Edition, pp. 18~21.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) Bang, B. W., Son, S. K., Kim, J. M. and Cho, C. D., 2009, "Residual Stress Prediction in LSP Surface Treatment by Using FEM," *Trans. Korean Soc. Mech.*



- Eng. A*, Vol. 33, No. 8, pp. 776~772.
- (9) 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," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No.12, pp. 1821~1828.
- (10) Kim, J. H., Kim, Y. J. and Kim, J. S., 2012, "Effects of Laser Shock Peening Simulation Parameters on Residual Stress of Inconel Alloy 600 Steel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 1, pp. 43~50.
- (11) Kim, J. H., Kim, Y. J., Bae, H. Y., Oh, C. Y., Kim, J. S. and Kim, J. S., 2011, "A Study on Effect of Time Parameters of LSP on Residual Stresses using FE Simulation," *KSME11F We17D008*, pp. 147.
- (12) 2008, ABAQUS Version 6.9, User' s manual, Dassault Systemes.
- (13) Peyre, P., Fabbro, R. and Lieurade, P., 1996, "Laser Shock Processing of Aluminum Alloys. Application to High Cycle Fatigue Behaviour," *Materials Science and Engineering*, Vol. A210, pp. 102~113.
- (14) 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.
- (15) Special metals, 2008, *Inconel alloy 600*, Special metals Corporation publication, No. SMC-207, September.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) Braisted, W., and Brockman, R., 1999, "Finite Element Simulation of Laser Shock Peening," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 21, pp. 719~724.
- (19) Lei, Y., O'Dowd, N. P. and Webster, G. A., 2000, "Fracture Mechanics Analysis of a Crack in a Residual Stress Field," *J. of Fracture*, Vol. 106, pp. 195~216.
- (20) Masse, J. E. and Barreau, G., 1995, "Laser Generation of Stress Waves in Metal," *Surface and Coating Technology*, Vol. 70, pp. 231~234.