

레이저 광원 형상이 레이저 충격 피닝 잔류응력에 미치는 영향[§]

김주희* · 김윤재**† · 김정수***

* 육군사관학교, ** 고려대학교, *** 한국원자력연구원

Effects of Laser Source Geometry on Laser Shock Peening Residual Stress

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

*Korea Military Academy, **Korea University, ***Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI)

(Received December 1, 2011; Revised April 15 2012; Accepted April 17 2012)

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

초록: 레이저 충격 피닝 처리 시 레이저 광원으로부터 금속표면에 조사되는 레이저 빔 형상은 다양하다. 레이저 형상은 표면에서 발생하는 압력파의 특성을 결정하기 때문에 금속 표면과 깊이 방향에 대한 잔류응력 분포에 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 레이저 충격 피닝 처리 시 레이저 광원 형상이 인코넬 alloy 600 합금의 잔류응력에 미치는 영향을 분석하였다. 레이저 광원 형상은 원형, 사각형, 타원형 형상이 고려되었으며, 표면과 깊이 방향에 대한 압축잔류응력 특성을 비교하였다. 표면에서 생성되는 압축잔류응력은 원형 레이저 형상이 최대이지만 중심부에서 인장응력이 발생하고, 깊이 방향에서는 타원형 레이저 형상이 최대 압축잔류응력을 생성한다. 소성변형 발생 깊이는 사각형에 비해 원형과 타원형이 양호하다.

Abstract: In LSP (laser shock peening) treatment, the laser source geometries when the laser beam strikes the metal target area are diverse. The laser spot geometry affects the residual stress field beneath the treated surface of the metallic materials, which determines the characteristics of the pressure pulse. In this paper, detailed finite-element (FE) simulations on laser shock peening have been conducted in order to predict the magnitude and of the residual stresses and the depth affected in Inconel alloy 600 steel. The residual stress results are compared for circular, rectangular, and elliptical laser spot geometries. It is found that a circular spot can produce the maximum compressive residual stresses near the surface but generates tensile residual stresses at the center of the laser spot. In the depth direction, an elliptical laser spot produces the maximum compressive residual stresses. Circular and elliptical spots plastically affect the alloy to higher depths than a rectangular spot.

기호설명

- Z : 감소 충격 임피던스
- I_0 : 레이저 파워밀도
- α : 레이저 효율
- P_{max} : 최대 압력파
- t_d : 압력파 지속시간
- x_p : 레이저 스팟 크기
- n : 레이저 샷 횟수

σ_y^d : 동적항복응력

HEL : 휴고니오틀(Hugoniot) 탄성한계

1. 서론

작은 구슬(hammer)을 금속표면에 충격시켜 강제적인 압축잔류응력을 생성시켜 주는 전통적인 샷 피닝(Shot peening)에 비해 레이저 충격 피닝(Laser shock peening, LSP)은 금속재료의 표면과 깊이 방향에 대해 효과적으로 압축잔류응력을 생성시켜 준다.⁽¹⁻³⁾ LSP는 전통적인 SP보다 4배~10배까지 더 깊은 지점까지 압축잔류응력을 생성시켜 주며, 로봇 공정 시스템을 통해 복잡한 형상에 대한 적

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011.

11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, kimy0308@korea.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

용성이 상대적으로 뛰어나다.⁽³⁾ 특히, 고온환경에서 잔류응력 해소가 적고, 보다 정밀한 표면 조도를 확보할 수 있는 레이저 충격 피닝의 장점으로 인해 최근 원자력 발전소 원자로 하부헤드 BMI 관통노즐 예방 정비 시스템을 위해 적용이 검토되고 있다. 원자력 발전소 소구경 관통노즐에서 발생하는 PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking : 일차수응력부식균열)은 용접에 의한 인장잔류응력과 SCC(Stress Corrosion Cracking)에 취약한 인코넬 alloy 600 계열 재료 및 부식환경에 의해 발생한다.

니켈기저합금인 alloy 600 계열 재료는 원자로 관통노즐에 사용되는 금속으로 PWSCC에 취약한 것으로 알려져 있다. 현재 국내 웨스팅하우스형 원자로의 이종금속 용접부는 대부분 alloy 600 금속을 포함하고 있어 용접에 의한 인장잔류응력으로 PWSCC 발생 가능성을 항상 내재하고 있다.

PWSCC 발생을 예방하기 위해서는 용접부에서 발생하는 인장잔류응력 제거 또는 완화시킴으로써 가능하다. 금속표면의 압축잔류응력은 역학적으로 균열의 생성과 진행을 억제시켜 금속의 피로 특성을 향상시키고, 응력부식균열(SCC) 성장을 억제시킨다.^(1~5) 따라서 소구경 관통노즐의 용접잔류응력 완화를 위해 LSP 효과를 수치해석적으로 예측함으로써 PWSCC 예방효과를 확인하고, 효과적인 LSP 정비 시스템 구축을 위한 레이저 공정변수 특성을 분석하는 것이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 3 차원 유한요소해석 기법을 이용하여 레이저 광원의 특성이 LSP 잔류응력 결과에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해 레이저 광원에 의해 결정되는 다양한 레이저 스팟 형상(원형, 사각형 및 타원형)과 레이저 광원 에너지 분포 특성을 고려하였다.

2. 유한요소해석

2.1 해석과정

Fig. 1은 LSP 원리와 플라즈마 생성 및 압력파의 전달과정을 보여준다. 일정한 레이저 파워밀도의 레이저 빔이 금속표면에 조사되면, 금속표면에서 강한 압력의 플라즈마가 형성된다. 이때 발생한 압력파에 의해 금속 내부로 충격파가 전달되면서 소성변형으로 인해 금속의 표면과 깊이 방향으로 압축잔류응력이 생성된다.^(1~6)

Fig. 2는 유한요소해석 상용 프로그램인 ABAQUS⁽⁷⁾를 이용한 LSP 시뮬레이션 해석과정을 보여준다. 일반적으로 단충격파의 동적 해석에 적용되는 1) 동해석과 정해석을 혼합한 ABAQUS Explicit/Implicit를 이용하는 방법과 2) ABAQUS Explicit에서 보다 많은 해석 시간을 부여해 주는 방법이 사용된다.^(8,9)

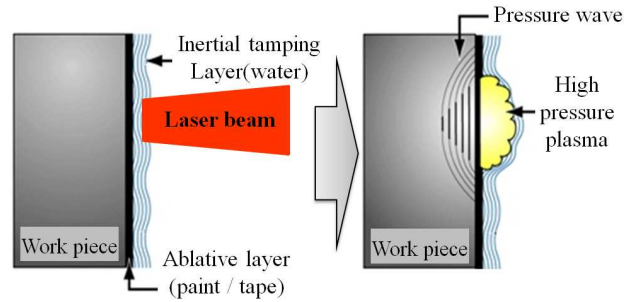


Fig. 1 Schematic of one-sided LSP

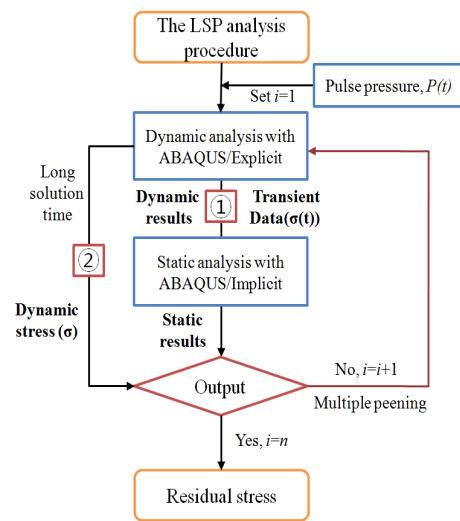


Fig. 2 Procedure of LSP simulation

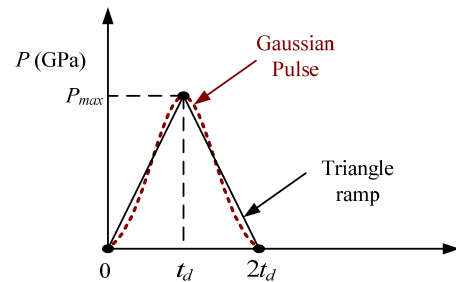
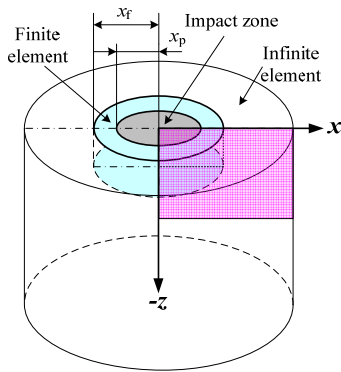
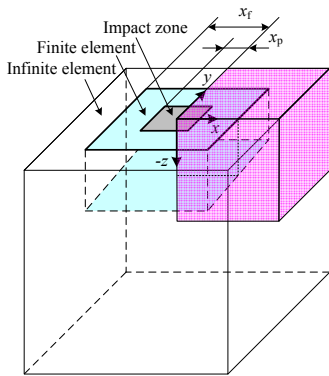


Fig. 3 Pressure-time history for LSP simulations

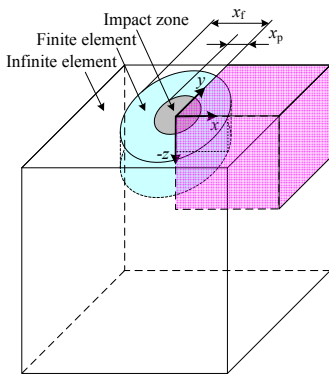
단충격파에 의한 동적 해석은 ABAQUS Explicit를 이용하여 효율적으로 계산할 수 있다. 하지만 동적 해석은 내부 충격파에 의한 국부진동으로 인해 정적 평형상태에 도달하는데 상당한 해석시간이 필요하다. 충격파로 인한 불안정한 응력상태를 안정화하기 위해 동적 해석 결과로 얻어진 과도 응력 변형률 데이터를 ABAQUS Implicit로 전환(export)하여 정적 평형 해석을 수행하여 잔류응력을 구할 수 있다. 이는 충격파에 의해 불안정한 응력상태인 동해석 결과를 ABAQUS Implicit로 전환(export)하여 보다 빨리 정적 평형상태에 도달시켜 결과값을 도출하는 방법으로 가장 일반적으로 사용되고 있다.



(a)



(b)



(c)

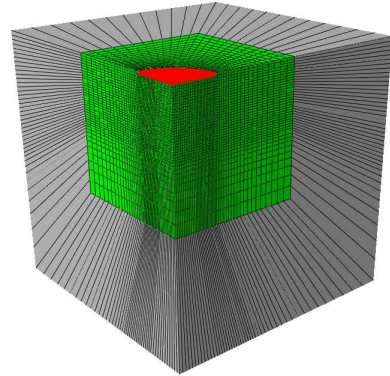
Fig. 4 Geometry of (a) circular laser spot, (b) rectangular laser spot and, (c) elliptical laser spot

2.2 최대압력과 결정

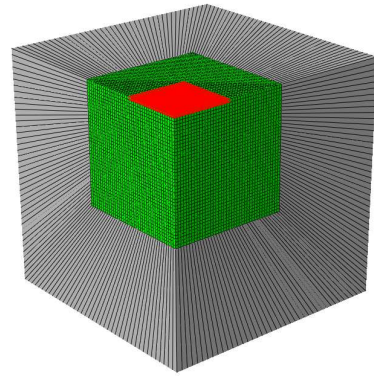
Fig. 3 은 레이저에 의해 발생하는 압력파의 시간이력을 보여준다. 실제 압력파는 가우시안 펄스 (Gaussian pulse) 형태이지만, 압력과 지속시간이 수~수백 ns 정도로 매우 짧기 때문에 삼각 파형으로 가정하여 입력한다.^(1,2,8,9)

레이저에 의해 발생하는 압력파의 크기는 조사되는 레이저 파워 밀도와 관련이 있다. 일정한 레이저 파워 밀도에 의해 결정되는 충격파의 최대 압력값은 식 (1)과 같다.^(1,2,4,6,8~11)

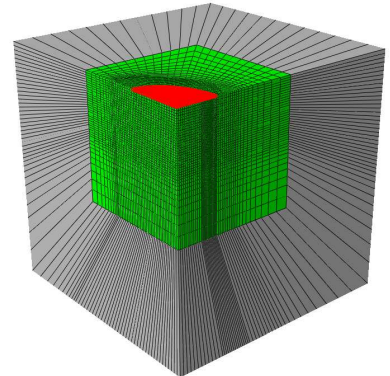
$$P_{\max} (\text{GPa}) = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (1)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 FE mesh of (a) circular laser spot, (b) rectangular laser spot and, (c) elliptical laser spot

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

여기서 $Z (Z_i = \rho_i D_i, \rho_i$: 밀도, D_i : 충격파 속도)는 reduced acoustic impedance 이다. Z_1 과 Z_2 는 각각 투명층(물막층)재료와 금속재료의 임피던스 값이다.⁽⁹⁾ α 는 레이저에 의해 생성되는 압력에 대한 효율로 일반적으로 0.1~0.3 의 값을 가진다.^(1,2,4)

레이저에 의해 발생하는 플라즈마의 압력과 효율을 최대화하기 위해 LSP 처리 전, 금속 표면에

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

Laser parameter	Value
Solution time for dynamic analysis, t_p (ns)	5,000
Maximum pressure, P_{max} (GPa)	2×HEL
Pressure duration, t_d (ns)	6/5.24/5 (○/□/○)
Laser spot size, x_p (mm)	0.3/0.265/0.25 (○/□/○)
Number of shot, n (shot)	1(single)

물 또는 유리 등으로 투명막층(transparent overlay) 처리를 하고 플라즈마의 높은 온도와 압력으로부터 금속표면을 보호하기 위해 검정색 페인트나 테이프로 불투명 용융막층(ablative layer) 처리를 하는 것이 일반적이다. 이러한 LSP 과정을 WCM (water confined mode) 이라고 하며, 식 (1)을 식 (3)과 같이 간략화하여 최대 압력파를 예측한다.^(1,2,10) 이때, $\alpha=0.1$, 물막층과 금속재료의 충격파에 대한 임피던스 값은 각각 $Z_I=3.63 \times 10^6$ (g/cm²s⁻¹), $Z_2=0.1653 \times 10^6$ (g/cm²s⁻¹)이다.

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

2.3 동적 재료거동 모델

일반적으로 금속재료는 변형률 속도가 높아지면 항복응력이 증가하는 것으로 알려져 있다.⁽⁷⁾ 이와 같이 고 변형률 속도에서 소성변형 발생 기준으로 동적항복응력이 사용된다. 하지만 LSP의 경우, 플라즈마에 의한 고온 고압의 압력과 특성으로 인해 Hugoniot 탄성한계(Hugoniot elastic limit : HEL)를 초과하는 범위에서 소성변형이 발생한다. 하지만 일반적으로 LSP 유한요소 시뮬레이션에서는 레이저 조사영역의 국부 용융에 대한 모사는 적용하지 않는다. 그 이유는 투명막층과 불투명 용융층이 레이저에 의해 발생하는 플라즈마의 높은 열을 차단하여 금속표면과 내부로 전달되지 못하도록 하기 때문에 큰 영향이 없는 것으로 알려져 있다.⁽⁷⁾

따라서 레이저에 의한 소성변형은 압력파의 크기만 적용하는 것이 일반적이며, 가해지는 압력파 크기가 HEL 보다 커야 잔류응력이 생성된다. 이러한 HEL은 식 (4)와 같이 재료가 갖는 고유 물성인 동적항복응력(dynamic yield strength)으로 결정된다.^(1,2,4-10)

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

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

3. LSP 유한요소 해석

3.1 형상 및 FE 메쉬

금속표면에 레이저가 조사될 때 입사각에 따라 레이저 형상은 원형에서 타원형으로 변화하며, 입사렌즈의 가장자리 여백처리를 통해 사각형 형상으로도 조사가 가능하다. 이처럼 레이저 광원 형상이 잔류응력에 미치는 영향을 확인하기 위해 다양한 레이저 스팟 형상을 고려하였다. Fig. 4는 LSP에 적용되는 일반적인 레이저 형상으로 원형, 사각형 및 타원형 레이저 스팟(x_p)에 대한 형상을 보여준다. Fig. 5는 각각의 형상에 대한 유한요소모델로 모두 3차원 1/4 유한요소 모델로 형상화하였다.

플라즈마에 의한 열적 영향은 용융층과 투명막층에 의해 최소화되므로 일반적으로 고려하지 않는다.^(1,2,5,6) 본 연구에서도 국부 용융 및 온도변화에 대한 영향을 고려하지 않았다.

레이저에 의한 발생하는 충격파에 의한 경계부 반향효과를 없애고, 무한평판 경계조건을 구현하기 위해 무한요소(infinite element)를 혼합 사용하였다.^(1,2,8,9)

3.2 재료물성

LSP 처리를 위해 적용된 재료는 Inconel alloy 600 합금으로 재료 물성은 Table 1과 같다.^(13, 14) 재료 거동은 탄성-완전 소성체(elastic-perfectly plastic)로 가정하였으며, 재료의 항복을 결정하는 Hugoniot 탄성한계 $HEL=1.3$ GPa이다.

3.3 레이저 공정변수

유한요소 해석 결과를 정량적으로 비교하기 위해 적용된 레이저 공정변수를 Table 2와 같이 부여하였다. 동적 해석의 안정화를 위해 충분한 해석 시간을 부여하였으며, 입력하중 P_{max} 는 Hugoniot 탄성한계의 2배를 입력하였다. 주요 비교 변수인 레이저 스팟 형상은 원형, 사각형, 타원형으로 레이저 스팟 크기는 입력되는 레이저 에너지를 일정하게 유지하기 위해 동일한 면적(약 0.28mm²)으로 모델링 하였다. 타원형 레이저 스팟의 경우 문헌을⁽¹⁵⁾ 통해 장축과 단축의 비가 1.4:1을 적용하였다. 동일한 레이저 시스템에서는 레이저 스팟 크기가 증가하면 압력과 지속 시간도 비례하여 증가한다. 이러한 점을 반영하기 위해 압력과 지속시간도 레이저 스팟 크기에 따라 각각 다르게 부여하였다.

3.4 유한요소해석 검증

본 연구에서 제시하는 유한요소해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 기존 문헌에서 제시된 실험 결과⁽¹⁶⁾와 유한요소 해석 결과를 비교해 보았다. 검증을 위한 LSP 적용 대상 재료는 35CD4 30HRC(원형 레이저)와 50HRC(사각형 레이저) 합금으로 재료물성은 문헌을^(1,16) 참고하였다. 두 실험

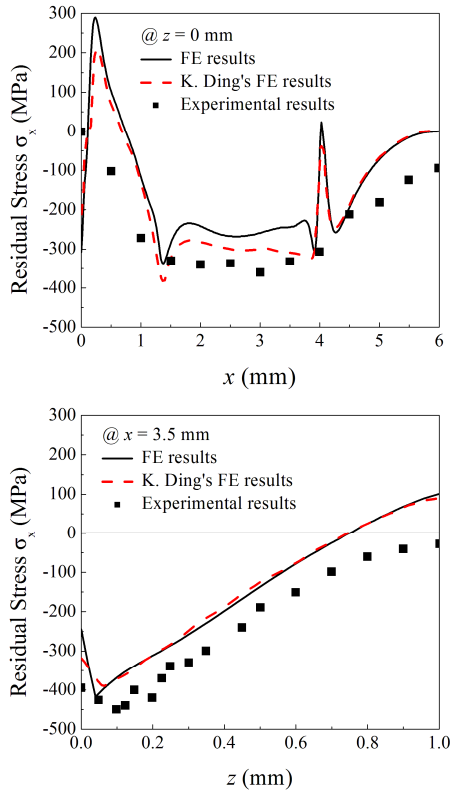


Fig. 6 Comparison of simulated FE residual stress results with experimental data[1] for circular laser spot

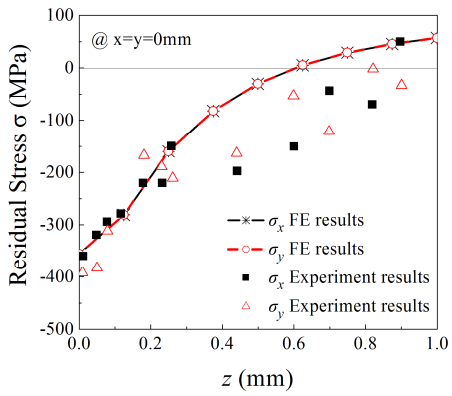
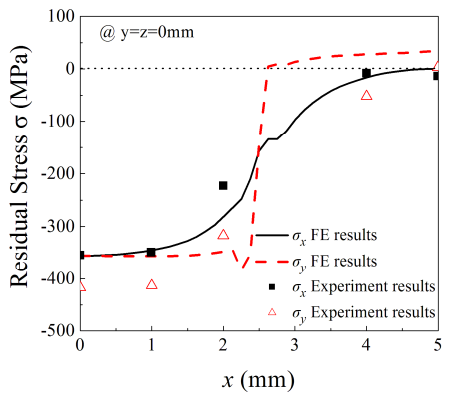
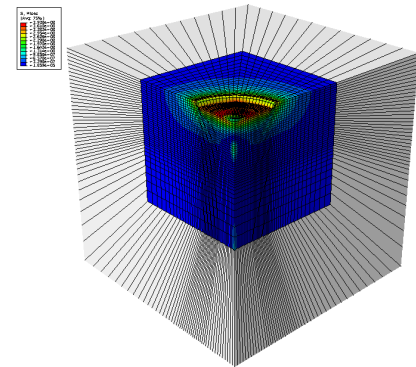
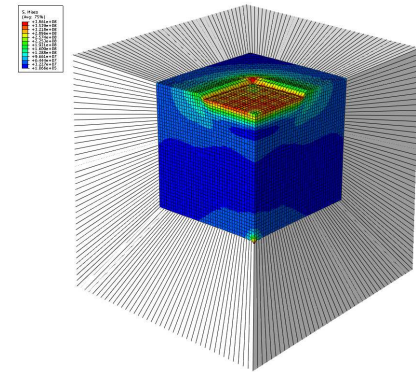


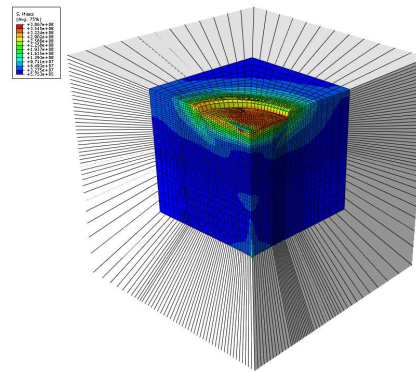
Fig. 7 Comparison of simulated FE results with experimental data[14] for rectangular spot



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 FE results of (a) circular laser spot, (b) rectangular laser spot, (c) elliptical laser spot for von Mises stresses

은 모두 물막 용융층(water confining mode: WCM) 처리된 상태에서 수행되었으며, 잔류응력 측정은 X-ray 회절법을 사용하였다. Fig. 6 과 7 은 실험값과 해석결과를 비교한 그래프이다. 원형 레이저 스팟의 경우(Fig. 4(a) 참고), 최대 압력과 $P_{max}=2.8\text{GPa}$, 압력과 지속시간 $t_d=50\text{ns}$, 레이저 스팟 크기 $x_p=4\text{mm}$ 에 대한 실험결과이며,^(1,2,16) 사각형 레이저 스팟의 경우(Fig. 4(b) 참고), 최대 압력과 $P_{max}=3\text{GPa}$, 압력과 지속시간 $t_d=50\text{ns}$, 레이저 스팟 크기 $x_p=2.5\text{mm}$ 를 실험값이다.^(1,16)

표면 방향 잔류응력은 Fig. 4에서 x 축을 따라 측정하였으며, 깊이 방향 잔류응력은 원형 레이저 스팟의 경우 레이저 스팟 중심으로부터 3.5mm 떨어진 지점에서, 사각형 스팟의 경우 레이저 스팟 중심에서 깊이 방향으로 잔류응력을 측정하여 비교한 결과이다. 표면과 깊이 방향에 대한 유한요소해석 결과는 실험결과와 비교적 경향성이 잘 일치한다. 단, 원형 레이저 스팟(Fig. 6)의 경우 표면중심에서 높은 인장응력이 발생하는데 이는 레이저 스팟 가장자리에서 발생하는 2차 충격파의 레이저 스팟 중심부 집중(focusing)현상 때문으로 알려져 있다. 특히, 축 대칭 모델은 해석적으로 완벽한 원형을 모사하므로 실제보다 과도한 응력과 집중현상이 발생하여 높은 응력분포를 보여준다.^(1,16-18)

따라서 본 연구에서 적용된 유한요소해석 기법은 일반적인 LSP 특성을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

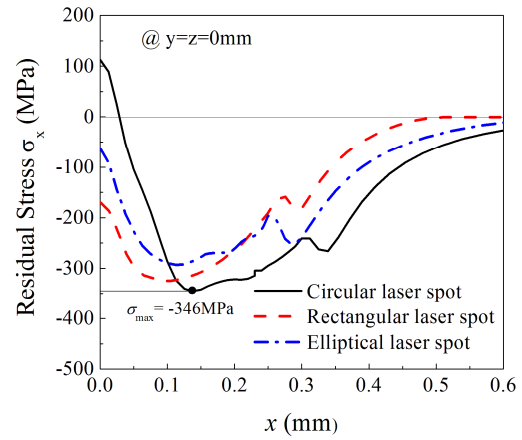
4. 결과분석

본 연구에서 적용된 레이저 공정변수는 원자로 하부헤드 관통노즐 용접잔류응력 완화를 위해 고려중인 레이저 시스템을 참고하였다.⁽¹⁵⁾ 관통노즐 내부에 대한 피닝공정을 위해 적용된 레이저의 반경은 Table 1과 같이 매우 작다. 이러한 레이저 공정변수를 만족하는 범위내에서 레이저 광원 형상에 따른 유한요소해석 결과는 표면과 깊이 방향의 잔류응력을 비교하였다(Fig. 4 참고). 표면방향은 레이저 스팟 중심으로부터 x 축을 따라, 깊이 방향은 레이저 스팟 중심에서 z 축을 따라 측정하였다. 동적해석에 대한 해석결과의 정확성과 수렴성을 확인하기 위해 안정한계시간(stability time limit)과 요소크기는 기존연구를 통해 확인하였으며 각각 만족하는 범위내에서 해석조건을 설정하였다.⁽⁹⁾

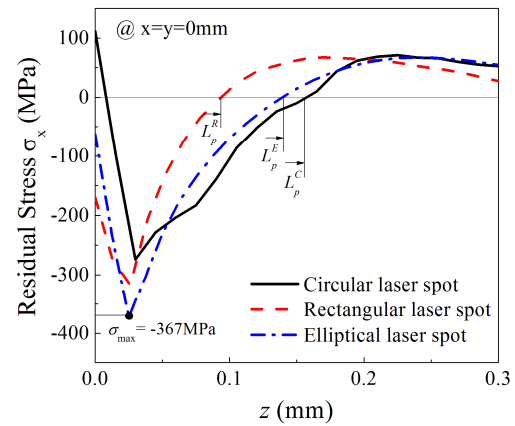
Fig. 8은 각각의 레이저 스팟 형상에 대한 유한요소 해석 결과를 보여준다. 레이저 스팟 형상에 따른 변형 특성을 보다 정확하게 볼 수 있도록 변형 축적 비율(deformation scale factor)을 100 배로 확대한 응력 상태(von Mises)를 보여주고 있다.

Fig. 9는 레이저 스팟 형상에 따른 표면과 깊이 방향 잔류응력 결과를 비교한 그래프이다. 일반적으로 LSP에 의한 잔류응력 특성을 비교할 때 중요한 비교 기준은 표면과 깊이 방향 최대 압축잔류응력(σ_{max})과 소성변형 발생 깊이(L_p)다.

먼저 Fig. 9(a)의 표면 방향 잔류응력 분포를 비교해 볼 때 최대 압축잔류응력은 원형($R=0.25mm, t_d=5ns$)>사각형($R=0.26mm, t_d=5.24ns$)>타원($R=0.3mm, t_d=6ns$) 레이저 스팟 순으로 높게 생성되었다. 하지만 원형의 경우 중심부에서 높은 인장잔류응력 특성을 보임을 알 수 있다. 상대적으로 사각형과 타원형 스팟은 큰 차이가 없음을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 9 Comparison of the laser spot geometry: (a) surface residual stress, (b) depth residual stress

Fig. 9(b)의 깊이 방향 잔류응력 분포를 비교해 볼 때 표면과는 달리 최대 압축잔류응력은 타원형>사각형>원형 순으로 양호한 결과를 나타내고 있으며, 소성변형 발생 깊이는 원형(L_p^C)>타원형(L_p^E)>사각형(L_p^R) 순으로 양호한 결과를 보여준다. 하지만 원형과 타원형의 소성변형 발생 깊이는 크게 차이가 없는 것을 알 수 있다.

일반적으로 LSP에 의한 금속재료 표면처리는 중첩에 의한 공정으로 이루어진다. 이러한 중첩 효과는 깊이 방향보다 표면 방향 잔류응력 특성을 양호하게 개선시킨다. 이러한 점을 고려해 볼 때 깊이 방향에 대해 우수한 잔류응력 특성을 보여주는 타원형 레이저 스팟을 적용하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 유한요소해석법을 이용하여 레이저 스팟 형상이 잔류응력 결과에 미치는 영향을 확인하였다. 동일한 충격부 면적을 갖는 서로 다

른 형상의 레이저 스팟을 이용하여 표면과 깊이 방향 잔류응력 분포를 비교하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 표면에서의 최대 압축잔류응력은 원형>사각형>타원형 순으로 높은 잔류응력을 생성한다.
- 표면 잔류응력은 타원형과 사각형 레이저 스팟의 경우 큰 차이가 없으며, 원형 레이저 스팟의 경우 중심부에서 강한 인장잔류응력이 발생한다.
- 표면에서의 잔류응력 경향과는 달리 깊이 방향 잔류응력은 타원형>사각형>원형 순으로 높은 압축잔류응력을 생성시킨다.
- 소성변형 발생 깊이는 원형과 타원형은 큰 차이가 없으며, 사각형 레이저 스팟의 경우 가장 작다.

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) 2008, ABAQUS Version 6.9, User's manual, Dassault Systemes.
- (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," *KSME-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," *KSME-A*, Vol. 34, No.12, pp. 1821~1828.
- (10) 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.
- (10) 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.
- (11) 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. 33-8, pp. 776~772.
- (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) KAERI & Korea Uni., 2011, *Simulation for Set-up of Laser Shock Peening Process Condition*, Korea University, Korea, p. 65.
- (15) 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.
- (16) Braisted, W., and Brockman, R., 1999, "Finite Element Simulation of Laser Shock Peening," *Int. J. of Fatigue*, Vol. 21, pp. 719~724.
- (17) Masse, J. E. and Barreau, G., 1995, "Laser Generation of Stress Waves in Metal," *Surface and Coating Technology*, Vol. 70, pp. 231~234.