

티타늄 합금에 대한 레이저 쇼크 피닝에서 컨파인먼트에 따른 피닝 효과 모델링

이우람^a, 김주한^{a*}

Modeling of a Confinement Effect in Laser Shock Peening on Titanium Alloy

Wooram Lee^a, Joohan Kim^{a*}

^a Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea,

ARTICLE INFO

Article history:

Received	20	May	2013
Revised	12	July	2013
Accepted	13	July	2013

Keywords:

Laser shock peening
Confinement
Residual stress
Johnson-Cook model

ABSTRACT

In this study, the effect of laser shock peening on a titanium alloy was modeled using different confinements. Both liquid and solid confinement could be applied to laser shock peening, and solid confinement provided a dry laser shock peening process, which has the advantage of a corrosion-free effect. When a different confinement was applied to laser shock peening, a different peening effect would be expected. In our study, the peening effect was numerically modeled and simulated. The main effect of different confinements was a change in the impedances required to confine a shock wave from a plasma. The impedances were assumed with respect to different materials. Johnson-Cook's plastic deformation modeling was applied to the simulation. The strains and residual stresses were calculated to evaluate the confinement effects. When solid confinement was used, the residual stress increased by 60-85%, compared to the case of liquid confinement. However, the depth of the residual stress was slightly deeper. The simulated results could be applied to estimate the peening effect when a different confinement was used in the laser shock peening process.

1. 서론

레이저 펄스 에너지를 이용한 재료처리는 레이저의 산업적 이용이 제시된 후부터 연구 개발되었다^[1,2]. 레이저 쇼크 피닝은 레이저가 금속표면에 조사되었을 때 발생하는 플라즈마를 통해 충격파 발생을 유도하고 이를 통해 재료의 국부적 소성변형을 일으켜 재료 표면에서 압축잔류응력생성을 목표로 한다. 이렇게 생성된 압축잔류응력은 금속재료에 있어서 피로 수명 및 마찰, 강도의 개선을 예

상할 수 있다^[3,4]. 현재 레이저 쇼크 피닝은 항공 우주 산업의 터빈 부품의 기계강도 및 수명 개선에 사용되고 있다^[5]. 이러한 레이저 적용 공정은 기존의 표면처리 기술인 슛피닝 보다 금속 재료에 압축 잔류 응력이 더 효율적으로 생성시키는 것으로 보고되었다. 또한, 레이저 쇼크 피닝 공정은 재료 표면의 균열의 발생과 성장을 제어, 피로 성능을 향상시키는 것으로 연구되었다^[6].

레이저 쇼크 피닝에 있어 레이저가 조사되었을 때 발생하는 충격파의 효과적인 제어를 위해 구속층으로 액체인 물을 일반적으로 사용

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6314

Fax: +82-2-949-1458

E-mail address: joohnakim@seoultech.ac.kr (Joohan Kim).

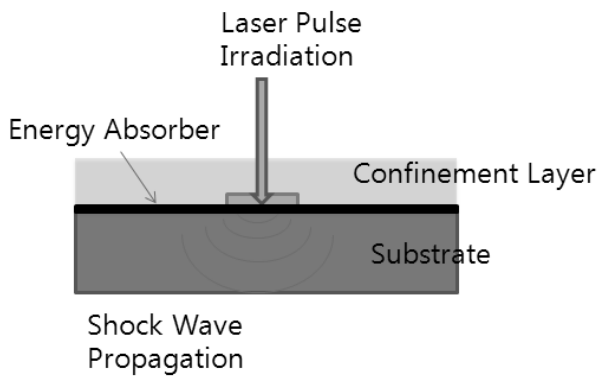


Fig. 1 Schematic of a laser shock peening process

한다(Fig. 1). 이러한 액체층은 최대 피닝 효과를 수배 증가시켜 준다. 물 사용은 경제적인 측면이나 공정의 측면에서 많은 장점이 있다. 하지만 재료표면이 물에 노출된다는 단점으로 인해 물로 인한 부식 또는 피닝 주변 부품 또는 환경에 있어서 수분의 노출된다는 단점으로 인해 물로 인한 부식 또는 피닝 주변 부품 또는 환경에 있어서 수분의 노출 및 오염을 유발하는 단점이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 투명 필름과 같은 건식 구속층을 고려할 수 있으며 이를 통해 일반 습식 레이저 쇼크피닝과 같은 효과를 건식 재료 처리 환경에서 얻을 수 있다. 보호층의 물리적 성질이 바뀌면 실제 레이저 쇼크 피닝에 있어서 잔류응력의 생성에 영향을 미치며 이에 대한 연구가 필요하다. 이는 레이저 쇼크 피닝의 잔류응력의 생성 예측을 위해 수치적 해석으로 수행될 수 있다. 이러한 수치적 모델링 해석은 레이저 빔과 재료의 상호작용에서 발생하는 어블레이션, 플라즈마, 또한 이 플라즈마로부터 나오는 충격파의 전파 등의 다중물리의 해석이 필요하다. 하지만 전체의 공정을 처음의 레이저 빔의 조사로부터 정확히 모델링하는 것은 실제로 비현실적인 일이다. 선행 연구에 있어서 레이저 쇼크 피닝 해석은 고 에너지 밀도에서 파생된 현상을 펄스 압력으로 단순화시켜 재료 소성 변형의 물리적 모델 등으로 연구되었다^[7,8]. 이러한 단순화된 물리적 모델을 통해 공정의 수치적 해석이 가능하다. 이러한 연구결과의 예로 Fabbro 등은 레이저 빔의 특성에 따라 레이저 유도 충격파의 전파 및 유도가 재료의 기계적 성질을 향상시킨다는 것을 수치적 모델을 통해서 증명하였다^[9]. 또한 금속 재료에 기계적 반응에 따른 매개 변수를 설정하였고, 구속층이 레이저 충격파를 극대화시킨다는 것을 검증하였다^[10]. 본 연구에서는 고체층이 충격파의 구속층으로 레이저 쇼크 피닝에 있어 사용될 때 마이크로 충격파에 의해 재료의 피닝효과를 수치적으로 모델링하였고, 다양한 구속층의 임피던스의 관계에서 레이저 유도 충격파에 의한 재료의 변형률과 압축 잔류 응력에 대한 고찰을 수행하여 실제 레이저 쇼크 피닝에 있어서 구속층의 영향을 비교 분석하였다.

2. 유한요소 모델링

레이저 쇼크 피닝 시 압축잔류응력에 대한 효과를 수치적으로 예측하기 위해 레이저 쇼크 피닝의 물리적 현상에 대한 가정과 단순화가 필요하다. 실제 공정에서는 앞선 그림에서 나타나 있듯이 레이저 에너지를 흡수하는 흡수층(Absorber)과 어블레이션에 의한 플라즈마가 발생하여 그 충격파가 나올 때 재료방향으로 효과적인 전달을 위한 충격파 구속층(Confinement layer)으로 나누어져 있다. 이러한 공정단계는 실제 수십 나노초부터 수십 마이크로초까지의 시간 스케일을 가지고 있는 다중물리의 현상이 복합적으로 연결되어 있으며 이를 모델링하기 위해 실제 레이저빔의 조사로부터 재료가 소성변형까지 전체를 해석하는 것은 비효율적이다. 이에 이러한 레이저 쇼크 피닝 시의 수치모델의 연구에서는 최종적인 압축 잔류응력의 생성에 초점이 맞추어진 모델링을 수행한다.

가우시안 형태의 레이저 빔의 스폿을 가정하여 이에 의해 만들어지는 재료표면에서의 충격파의 압력분포를 플랫폼 형태로 가정할 수 있다. 이러한 압력분포는 시간에 따른 함수로 예측할 수 있고 이에 대한 시간적 압력 프로파일로 가정할 수 있다. 여기서 고려해야 할 문제는 실제 레이저 빔의 조사로부터 압력프로파일에 대한 관계를 정의하는 일이다. 레이저 파장, 에너지, 펄스폭 등이 실제 충격파의 압력 프로파일에 대한 함수가 될 수 있다. Fabbro 등^[7]은 처음 레이저 어블레이션에 발생된 충격파의 압력을 정량화하기 위해 레이저 빔에너지 밀도와 충격파의 압력의 연관성에 대한 연구를 수행하였고 다음과 같은 식으로 그 관계를 해석하였다.

$$P = 0.001 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (1)$$

여기서, I_0 는 레이저의 에너지 밀도, α 는 상호작용에 따른 에너지 변환 효율, Z 는 금속 재료와 구속층 사이에 발생된 충격파의 임피던스이다. 임피던스(Z)는 충격파의 매질의 밀도와 상대 속도의 함수로 정의될 수 있다. 이때 그 임피던스에 따라 충격파 압력의 크기가 결정된다. 이는 권파인먼트의 재료 물리적 특성인 밀도 및 상대 변형 속도에 따라 임피던스가 결정된다는 것을 의미한다. 본 관계식에서 레이저빔에 의해 발생되는 충격파의 압력의 크기는 에너지 변환효율이 일정할 때는 구속층사이의 루트층의 임피던스에 비례하는 것을 나타낸다. 이상기체의 가정에서 압력과 충격파의 속도는 비례하며 열역학적 평형에서 임피던스와 비례관계에 있는 내부에너지는 속도의 자승에 비례하기에 임피던스의 루트층은 압력에 비례하는 관계로 해석될 수 있다. 여기서 총합 임피던스(Z)는 두 개의 매질로 둘러싸여 있을 때 다음과 같은 식으로 유추될 수 있다.

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

여기서, Z_1 은 재료방향의 임피던스이며 Z_2 는 주위 환경 방향으로의 임피던스이다. 재료방향의 임피던스 Z_1 의 경우 일반적으로 공정에 있어서 상수로 놓을 수 있으며 Z_2 의 경우는 플라즈마와 충격파를 흡수하는 구속층에 따른 임피던스이다. 이러한 관계에서 Z_2 의 크기에 따라 실제 재료에 적용되는 충격파 압력의 크기가 루트승의 관계에 있음을 알 수 있다. 일반적으로 물을 구속층으로 인한 레이저 에너지 밀도에 대한 공정변수를 가졌을 때 충격파의 변화를 계산하여 그 피닝효과를 예측 분석한 연구는 수행되었으나 물이 아닌 다른 임피던스 값을 가진 다른 구속층을 적용하였을 때의 충격파의 생성 및 이를 통한 피닝효과 예측 및 분석은 수행되지 않았다. 실제 공정에 있어 물은 효과적인 구속층으로 여겨지고 있다. 하지만 다양한 공정에 있어 물 이외의 구속층을 필요로 하는 경우가 있으며 특히 고체 구속층이 적용되었을 때의 본 공정의 효과에 대한 예측 연구가 필요하다. 그 예로 폴리머 필름, 수정판 등을 구속층으로 적용한 공정이 고려가능하다. 이러한 경우를 고체 구속층을 적용한 건식 레이저 쇼크 피닝으로 불리울 수 있으며 이러한 구속층의 변화는 본 공정에 있어 그 구속층의 임피던스(Z) 변화를 예상할 수 있으며 실제 충격파의 압력 및 이를 통한 재료의 소성 변형의 다른 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 다양한 구속층의 임피던스 값을 조건으로 하여 재료의 압축잔류응력 생성효과를 수치적으로 확인하는 연구를 수행하였다.

수치적 해석 시뮬레이션을 위해 상용충돌해석프로그램인 LS-Dyna를 사용하였다. 격자모델링의 경우 하이퍼메쉬를 이용하여 Fig. 2와 같은 격자를 생성하고 해석에 사용하였다. 레이저 충격파의 크기는 재료방향으로 1 mm의 직경을 가진 것으로 가정하였고 10 × 10 × 1 mm의 티타늄합금(Ti-6Al-4V)에 있어 25,000 개의 격자를 가진 것으로 모델링하였다. 시뮬레이션에 적용된 레이저는 5 ns의 펄스폭을 가진 1064 nm 파장의 Nd:Yag레이저로 가정하

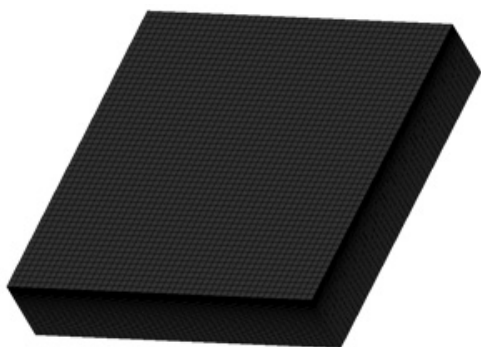


Fig. 2 Finite element mesh design for the simulation

였고 흡수되는 레이저빔의 최대 순간 출력은 1 GW/cm²으로 적용하였다. 또한 레이저 반복률은 1 Hz로 결정하였고 레이저 빔의 직경은 1 mm, 빔의 흡수율은 0.5, 싱글펄스에 의해 중첩율을 0으로 적용하였다. 표면에서의 격자는 정확한 예측을 위해 표면에서 깊이 방향보다 밀도 있게 설계하였다. 경계조건으로 바닥면을 고정하였다.

본 연구에 있어서 구속층의 임피던스 변화에 따른 시간에 대한 압력분포 변화가 고려사항이며 이를 적용하기 위해 구속층의 다양한 임피던스의 값을 가정하였고 이것들은 Table 1과 같다. Case 1-3의 경우는 일반적으로 물을 사용할 때의 임피던스이며 Case 4, 5의 경우는 고체 구속층인 폴리머 필름을 적용할 때의 임피던스이다. 이를 통해 충격파의 압력 분포를 구할 수 있으며 실제 시뮬레이션에 있어서는 2.3 - 5.4 GPa의 최대 순간압력에 대한 입력 모델을 고려하였다. 시간에 따른 압력분포는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

모델에 대상이 되는 재료는 Ti-6Al-4V이다. 실제 터빈 블레이드 등에 많이 사용되며 강성 등이 높은 재료이다. 레이저 플라즈마에 의해 유도된 충격파는 재료 표면에서 소성변형을 일으키며 이는 재료 표면으로부터 근접한 내부에 잔류응력을 만들 수 있다. 이러한 외부 충격을 통한 재료 소성 변형 모델은 여러 충격 모델이 제시

Table 1 Input impedances of a confinement layer

Case	Z (g/m ² s)
Case 1	100.0
Case 2	160.0
Case 3	240.0
Case 4	360.0
Case 5	540.0

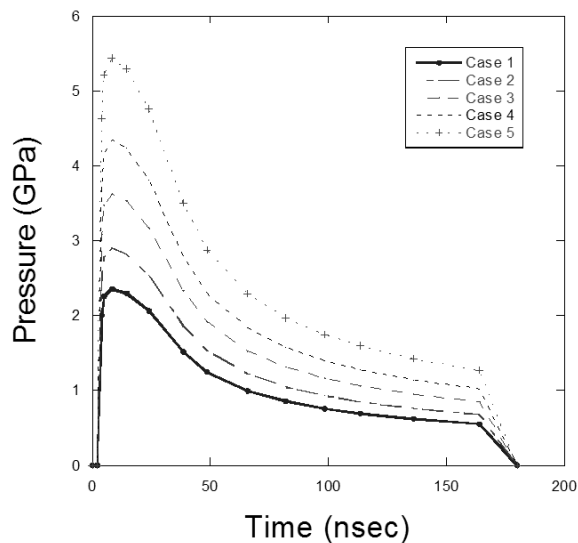


Fig. 3 Pressure profile with respect to time

Table 2 Johnson-cook parameters of Ti-6Al-4V

a (MPa)	1098.0
b (MPa)	1092.0
c	0.014
T ^m (K)	1878
n	0.93

되어 왔으며 이중 존슨쿡 소성 변형 모델(Johnson-Cook Model)을 적용하여 본 레이저 쇼크 피닝을 이용한 재료 처리 해석을 수행하였다^[11]. 재료의 응력변화는 소성스트레인, 스트레인 변화율 및 온도에 대한 영향으로 계산되어 질 수 있으며 이는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = (a + b\epsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (3)$$

여기서, **a**는 항복응력, **b**는 경화율, **c**는 스트레인 변형율 계수, ϵ_p 는 소성변형, $\dot{\epsilon}$ 는 변형율, **T**는 온도이다. **n**은 존슨쿡 소성 변형 모델의 티타늄합금에 대한 실험 보정 상수를 사용하였다^[11]. 실제 시뮬레이션에서 적용된 티타늄합금의 물성치는 Table 2에 주어져 있다.

3. 결과 및 토의

스트레인의 변화에 대한 시뮬레이션의 결과는 Fig. 4(a), (b)와 같이 나타났다. 레이저빔에 의해 유도된 충격파의 영향으로 소성변형이 일어났고 이에 대한 재료의 스트레인의 변화를 얻을 수 있었다. 레이저 빔이 조사된 부분을 중심으로 스트레인의 변화가 표면에서 가장 크게 나타났다(Fig. 4(a)). 이러한 최대스트레인의 변화는 시간이 지나감에 따라 재료 내부쪽으로 이동하나 바닥에 도달한 충격파가 다시 반사되어 나오면서 윗쪽방향의 충격파와 상쇄되는 효과를 보여 주었다(Fig. 4(b)). 이를 통해 최대 스트레인의 변화가 재료 윗부분에서 깊이방향으로 이동한 후 최종적으로는 표면 수십 마이크로 깊이에서 최대스트레인이 생성되고 있음을 알 수 있다. 이는 탄성 스트레인의 결과와 소성 스트레인의 중첩에 의한 결과로 해석될 수 있다. 레이저 충격파에 의해 발생된 소성 스트레인은 표면에 압축잔류응력을 생성하게 된다. 이러한 스트레인은 중심방향에서 원주방향으로 압축에서 인장으로 바뀌게 되며 이는 깊이 방향으로 유사한 경향을 보여준다. 시뮬레이션의 결과 깊이방향으로 600 - 800 μm의 압축잔류응력의 분포를 얻을 수 있었다.

Fig. 5는 시뮬레이션의 결과에서 잔류응력분포를 나타낸 그림이며 표면에서의 레이저 쇼크 피닝에 의한 잔류응력분포와 깊이방향

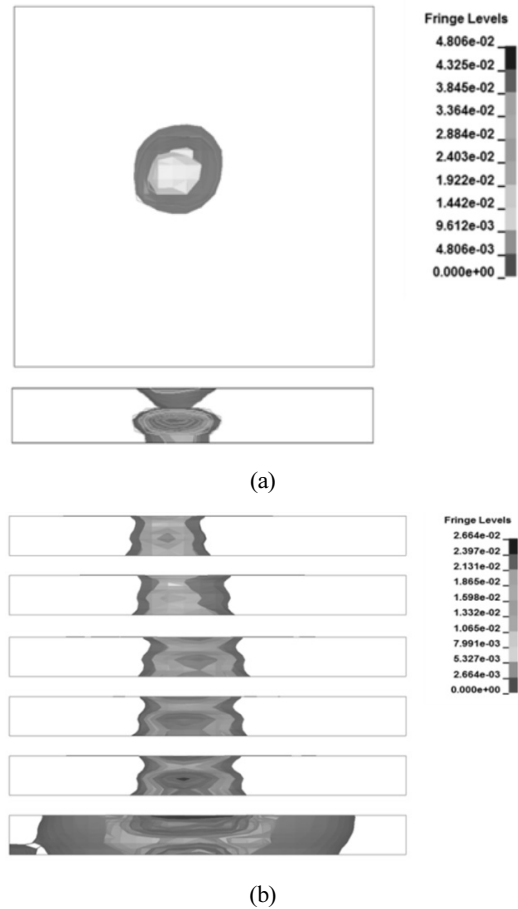


Fig. 4 Distribution of plastic strain: (a) top view and cross section; (b) stain propagation (cross section) from 1 - 90 μsec

의 응력분포를 각각 나타내고 있다. 스트레인의 변화가 압축인 경우 응력의 부호가 음수로 나타나며 이는 압축잔류응력으로 해석될 수 있다. Fig. 5(a)에서 나타난 것처럼 표면으로부터는 압축잔류응력이 레이저가 조사된 위치를 중심으로 생성되어 있다. 타겟에 있어서의 압축 잔류응력의 생성은 레이저 스폿에서 멀어질수록 감소되어 중심으로 평면 방향으로 일정거리가 넘어서면 표면에는 인장잔류응력이 생성되는 것으로 나타났다. 이는 스트레인 생성의 변화에 따른 것으로 알 수 있다. 깊이방향의 응력분포에 있어서도 약 두께 방향의 40%까지는 압축잔류응력이 적절히 생성되나 중심부에서 멀어질수록 다시 인장잔류응력이 생성될 수 있음을 알 수 있다. 시뮬레이션 상으로 재료의 바닥부분에 다시 압축잔류응력이 생성되는 것으로 나타나 있다. 이것은 스트레인의 결과와 유사하게 바닥의 경계조건에 의해 충격파의 반사 및 상쇄에 의해 영향을 받는 부분으로 생각될 수 있다. Fig. 5(b)의 경우 시간 경과에 따른 내부 응력 분포의 변화를 보여주고 있다. 피닝초기에는 표면에는 압축잔류응력 깊이방향에서는 인장잔류응력 또는 압축잔류응력의 분포가 나타나다가 시간이 경과함에 따라 재료의 표면에서 압축잔

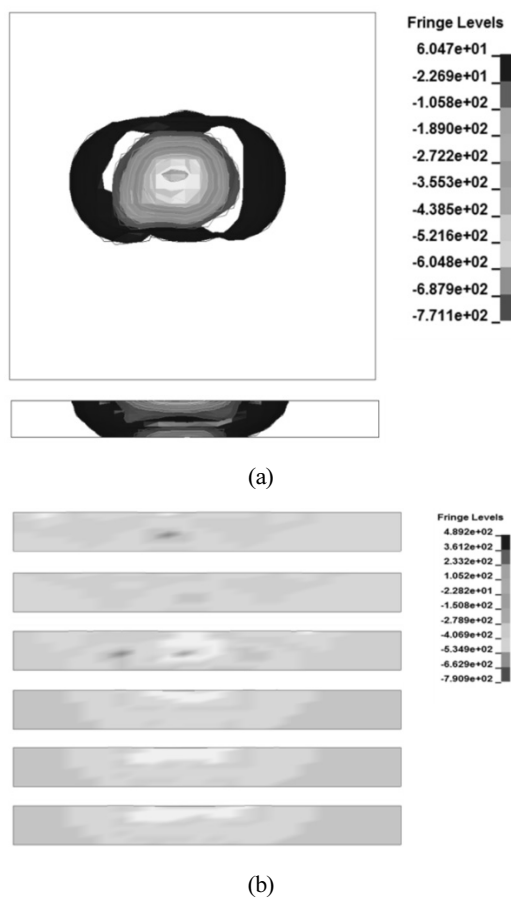


Fig. 5 Distribution of residual stress: (a) top view and cross section; (b) stress propagation (cross section) at 1 - 90 μ sec

류응력이 깊이방향으로 일정하게 생성됨을 알 수 있다. 이러한 시뮬레이션 기준으로 레이저 쇼크 피닝에 있어 구속층의 변화에 따라 깊이방향으로의 스트레인과 압축잔류응력의 변화를 확인하였다(Fig. 6, 7). 스트레인의 경우 표면에서 가장 큰 값을 보여주고 있으며 깊이방향으로 갈수록 그 값이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 감소는 700 μ m의 지점에서 최소를 보여주고 있으며 그 이후 다시 어느 정도 상승하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 바닥면의 구속조건에 의한 충격파의 반사 및 흡수의 영향으로 설명되어 질 수 있다. 액체 구속층의 경우로 볼 수 있는 Case 1 - 3과 고체 구속층으로 볼 수 있는 Case 4, 5의 경우를 비교하여보았을 때 기본적으로 60 - 85%의 압축잔류응력의 상승을 확인할 수 있었다. 이는 같은 레이저 쇼크 피닝 조건으로 재료처리를 했을 때 고체 구속층을 적용한 경우에 재료에 있어서 더 높은 압축잔류응력의 크기를 얻을 수 있는 것으로 판단되었다. 이와 같은 결과는 유사한 공정변수를 적용 후 기초검증 실험결과와 비교했을 때 유사한 경향을 보여주었다. 하지만 실제 실험에 있어서는 그 상승이 10 - 20%로 나타났는데 이는 이상적 충격파와 실제 충격파의 차이에

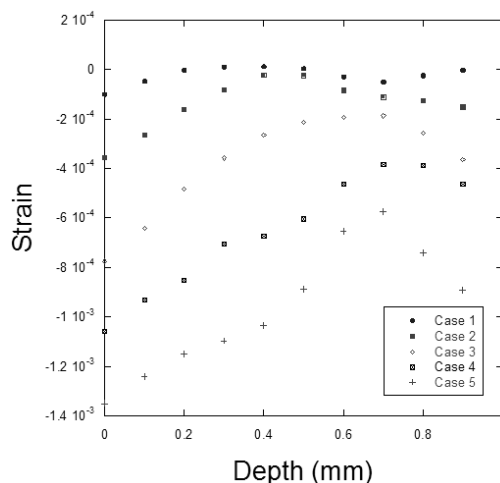


Fig. 6 Strain profile (z) with respect to depth

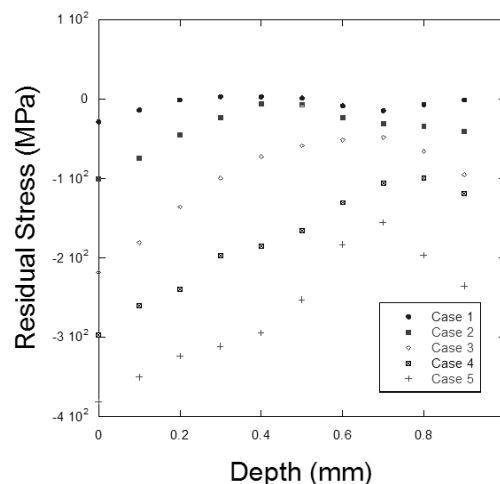


Fig. 7 Residual stress profile (z) with respect to depth

서 나타나는 오차라고 판단된다. 특히 이러한 오차는 레이저에 의한 플라즈마 발생시 투과율 감소, 어블레이션에 의한 고체층의 부착의 저하에 의한 임피던스 감소 등의 원인으로 판단할 수 있으며 추후 관련 실험적 접근 해석이 필요하다. 깊이방향의 최대압축잔류응력생성 깊이는 고체 구속층으로 시뮬레이션 했을 때에 물을 사용했을 때보다 다르게 나타나지 않았다. 이러한 결과는 충격파가 반사되어 나오는 판재의 경우 그 압축잔류응력의 생성효과가 깊이방향으로는 최대 압축잔류응력의 크기의 변화와는 다르게 유사한 분포를 나타냄을 알 수 있다. 구속층의 임피던스가 작은 경우(Case 1)에서는 실제 잔류압축응력의 크기가 표면 100 μ m에서만 나타났으며 이보다 더 작은 경우에는 소용 변형이 작게 일어나서 실제 전 영역에 걸쳐 인장잔류응력의 분포를 갖는 결과를 나타냈으며 이는 실제 레이저 쇼크 피닝에 있어서 임계 레이저 파워 밀도의 고려가 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 레이저 쇼크 피닝에서 다양한 구속층의 변화에 따른 Ti-6Al-4V의 압축잔류응력 생성 및 분포에 대한 연구를 위해 존슨 쿡 소성변형모델이 본 시뮬레이션이 적용되었으며 레이저쇼크피닝에 있어서의 다중 물리 현상은 레이저빔의 에너지 밀도와 구속층의 임피던스와 상관계에 의해 충격과 압력으로 변환되어 초기값으로 적용하였다. (1)시뮬레이션의 결과로 도메인상의 스트레인과 응력의 분포를 구할 수 있었다. 1 GW/cm^2 의 순간 최대 레이저출력을 가진 레이저 펄스는 $600 \sim 800 \mu\text{m}$ 의 깊이까지 압축잔류응력을 생성시켰으며 이 밖의 범위에서는 인장응력의 분포가 나타났다. (2)레이저 쇼크 피닝시 구속층에 의해 초기 충격과 압력의 크기가 증가하게 되면 재료의 스트레인과 응력도 그 크기가 증가함을 알 수 있었다. (3)액체 구속층과 비교하여 보았을 때 고체 구속층의 사용에 있어서 압축잔류응력이 $60 \sim 85\%$ 의 상승을 예측할 수 있었다. 또한 소성변형을 위한 구속층의 임피던스의 임계값을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 구속층의 변화에 따라 같은 조건에서 효율적인 레이저 쇼크 피닝의 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 2012 서울과학기술대학교 해외 파견 연구 교수 지원으로 수행 되었습니다.

References

- [1] Lee, K.R., Yang, Y. S., Hwang, C. Y., Yoo, Y. T., 2012, Characteristics of Surface Hardening of Nd:YAG Laser According to Temperature Changes of SM45C, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 21:6 988-997.
- [2] Yang, S. Y., Choi, S. D., Jun, J. M., Gong, B. C., 2010, Improving the residual stress characteristics of the metal surface by Nd:YAG laser shock peening, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 19:4 539-547.
- [3] Lavender, C. A., Hong, S. T., Smith, M. T., Johnson, R. T., Lahrman, D., 2008, The effect of laser shock peening on the life and failure mode of a cold pilger die, Journal of Materials Processing Technology, 204 486-491.
- [4] Sánchez-Santana, U., Rubio-González, C., Gomez-Rosas, G., Ocaña, J. L., Molpeceres, C., Porro, J., Morales, M., 2006, Wear and friction of 6061-T6 aluminum alloy treated by laser shock processing, Wear, 260:7-8 847-854.
- [5] Golden, P. J., Hutson, A., Sundaram, V., Arps, J. H., 2007, Effect of surface treatments on fretting fatigue of Ti-6Al-4V, International Journal of Fatigue, 29:7 1302-1310.
- [6] Hatamleh, O., Lyons, J., Forman, R., 2007, Laser and shot peening effects on fatigue crack growth in friction stir welded 7075-T7351 aluminum alloy joints, International Journal of Fatigue, 29:3 421-434.
- [7] Fabbro, R., Fournier, J., Ballard, P., Devaux, D., Virmont, J., 1990, Physical study of laser-produced plasma in confined geometry, Journal of Applied Physics, 68, 775-784.
- [8] Fairand, B. P., Clauer, A. H., 1977, Use of laser generated shocks to improve the properties of metals and alloys, Industrial applications of high power laser technology, 86, 112-119.
- [9] Fabbro, R., Peyre, P., Berthe, L., Scherpereel, X., 1998, Physics and applications of laser-shock processing, Journal of Laser Applications, 10, 265-279.
- [10] Montross, C. S., Wei, T., Ye, L., Clark, G., Mai, Y. W., 2002, Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review, International Journal of Fatigue, 24:10, 1021-1036.
- [11] Johnson, G. R., Cook, W. H., 1985, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Engineering Fracture Mechanics, 21:1, 31-48.