

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.8.767

유한요소법을 이용한 LSP 표면처리 공정의 잔류응력 예측

방부운[†], 손승길*, 김재민**, 조종두***

(2009년 5월 14일 접수, 2009년 7월 14일 수정, 2009년 7월 17일 심사완료)

Residual Stress Prediction in LSP Surface Treatment by Using FEM

Boowoon Bang, Seungkil Son, Jaemin Kim and Chongdu Cho

Key Words: Laser Shock Peening(LSP, 레이저 속 피닝), Residual Stress(잔류응력) Shock Wave (충격파), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

Laser shock peening(LSP) is proving to be better surface treatment than conventional one such as shot peening. The LSP process has a compressive residual stress into a metal alloy and a significant improvement in fatigue life. Our research is focused on applying finite element method to the prediction of residual stress through the LSP processing in some LSP conditions such as pressure and spot size induced by laser. Two analysis methods are considered to calculating the compressive residual stress. But the explicit solution and the static one after partially explicit solving are almost same. In LSP, because of very high strain rate(10^6s^{-1}), HEL(Hugoniot Elastic Limit) is the most important parameter in material behavior modeling. As the circular laser spot is considered, 2-D axisymmetric elements are used and the infinite elements are applied to boundaries for no reflection. The relations of material properties and the LSP are also important parts in this study.

1. 서론

레이저(laser)가 금속 표면에 조사될 때, 금속표면과 코팅막 사이에서 발생하는 충격파에 의한 소성 변형을 이용한 LSP(laser shock peening)는 금속표면의 내 피로성능이나 내 마모성능을 현저히 향상시키는 표면경화방법으로 여러 연구를 통해 소개되었다.^(1,2)

기존의 표면경화방법인 쇼트피닝(shot peening)

에 비해 LSP에 의해 생긴 압축 잔류응력은 그 크기가 더 클 뿐 아니라 더 깊게 분포함이 실험적으로 증명되었다. 대부분의 LSP실험에서 레이저 시스템은 수 나노초의 펄스 지속 시간을 가지며, 표면에서 수 GW/cm^2 의 레이저 출력밀도(laser power density)를 발생시킨다.⁽³⁾ 표면에 고에너지의 레이저 펄스가 가해지면, 가열된 표면은 증기화 되어, 플라즈마를 형성하며, 이때 온도는 $10,000^\circ C$ 에 이른다.⁽⁴⁾ 급속히 팽창된 플라즈마는 GPa단위의 고압력을 발생시키고, 이러한 고압력은 내부에 소성 변형과 압축응력을 야기하는 충격파를 발생시킨다. 고온의 환경이 만들어짐에 따라 표면이 녹는 것을 방지하기 위해 검은색 페인트 등으로 코팅을 하게 된다. 이러한 코팅은 급작스런 온도변화에 의한 표면의 과도한 열적 변형 문제를 해결해 줄 뿐만 아니라 내부에 더 큰 충격 압력을 전달하는 역할을 한다.^(4,5) 압력의 최대치가 동적항복응력의 2배를 초과할 때 표면

[이 논문은 2009년도 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2009. 5. 14.-15., 한국관광공사 T2아카데미) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 인하대학교 대학원

E-mail : bwbhang@gmail.com

TEL : (032)858-7321 FAX : (032)868-1716

* (주)대우일렉트로닉스

** 인하대학교 대학원

*** 인하대학교 기계공학과

에서는 소성 변형의 포화가 일어나고, 내부에는 압축 잔류응력이 남게 된다.^(4,5)

본 연구에서는 여러 가지 LSP의 조건에 대해 잔류응력의 분포와 그 크기를 상용 유한 요소 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 예측하였고, 재료의 물성치에 대해 LSP에 의한 잔류응력이 어떤 특징을 보이는지 연구하였다.

2. LSP 해석

2.1 해석방법

LSP로 인한 잔류응력 예측을 위해 상용 유한 요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 해석은 두 가지 방법으로 수행되었다.

첫 번째 방법은 ABAQUS/Explicit를 이용하여 초기 과도해석을 하고, 이 결과를 정적 해석 프로그램인 ABAQUS/Standard에 입력하여 응력이 안정화된 상태를 구현하여 잔류응력을 구하는 것이다.

두 번째 방법은 초기 충격파에 의한 응력 과도 상태가 안정될 때까지 ABAQUS/Explicit를 사용하여 해석을 수행하여 잔류응력의 분포를 구하는 것이다.

2.1.1 1차 Explicit 후 2차 Implicit 해석

ABAQUS/Explicit는 짧은 시간동안의 과도해석용 유한요소프로그램이다. 초기 충격파의 전파는 짧은 시간(ns)동안에 일어나고 이는 내부에 소성 변형을 유발한다. 충격파가 진행함에 따라 소성 변형이 생기고, 충격파가 가지고 있던 에너지는 소성 변형에너지로 흡수되어 그 크기가 감소하게 된다. 충격파가 감소하여 더 이상 소성 영역이 존재하지 않을 때까지 Explicit 해석은 계속된다. 이후 과도해석 결과를 ABAQUS/Standard에 입력하여 정적해석을 한다.

2.1.2 Explicit 해석

충격파로 인한 소성 변형상태가 완료되고 소성영역이 사라진 후 시편내의 응력상태는 불안정하고, 시간이 지남에 따라 안정된 값을 갖는다. 충격파의 반사와 교란으로 인한 불안정한 응력상태를 안정화하기 위해서는 소성 변형상태를 완료하기까지 필요한 해석시간보다 긴 해석시간을 필요로 한다.^(5,6)

Table 1 Elements for LSP model

Elements	Application	Remarks
4node axisymmetric	Hole body	continuum, Reduced-integration
infinite	Boundary	no reflection

2.2 해석모델

2.2.1 축대칭 모델

LSP로 인한 잔류응력 예측을 위해 축대칭 모델을 선택하여, 레이저가 원형모양으로 작용한다고 가정하였다. 반경 방향과 축 방향으로 충격파가 진행되는 동안 소성변형이 완료되어 반사파가 잔류응력에 영향을 미치지 않도록 해석모델은 충분히 크다고 가정하였다. 해의 정확성을 위해 해석모델의 크기는 충격파가 소성변형을 일으키고 감소하여 탄성변형을 일으키기 직전의 상태까지 진행하도록 정하였으며, 반경방향과 축방향의 끝에는 경계에서의 충격파의 반사를 무시하고 응력상태를 보다 정확하게 예측하기 위해 무한요소(infinite element)를 사용하였다.

무한요소는 동적해석에서 해석모델이 경계에 의한 영향을 받지 않도록 하며 일반적으로 무한한 경계나 전체모델크기에 비해 해석하고자하는 해석모델의 크기가 작을 때 사용한다.

사용요소는 4절점 2차원 축대칭 요소로써 적분점의 개수를 줄인 형태(reduced integration)로 곱힘에 대한 강성이 부족해지는 에러(hourglassing)가 있을 수 있으나 인공변형에너지(artificial strain energy)를 구한 결과, 이는 무시할 수 있을 정도임을 확인하였다.

2.3 시간증분

Explicit 해석과정에서 해가 안정을 이루기 위한 최소한의 시간 증분 값은 해석결과에 중대한 영향을 미친다. 시간증분이 Δt_{stable} 보다 클 경우에는 수치적인 불안정성이 발생한다.

ABAQUS/Explicit에서 Δt_{stable} 은 다음의 식에 의해 결정된다.⁽¹⁰⁾

$$\Delta t_{stable} = \frac{S}{C_d} \quad (1)$$

$$C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

여기서, C_d 는 웨이브 속도, S 는 요소의 최소크기, E 는 탄성계수, ρ 는 밀도이다.

ABAQUS/Explicit에서는 Δt_{stable} 을 초과하지 않는 범위 내에서 시간증분을 결정한다.

2.4 경계조건

2.4.1 하중조건

레이저 에너지는 표면 코팅 막을 통과하여 시편과 코팅 막의 경계에서 플라즈마를 형성한다. 플라즈마가 레이저 펄스에 의해 가열되고, 증기화 됨에 따라 플라즈마는 팽창한다. 레이저가 꺼진 상태에서도 플라즈마는 단열냉각과정을 거치면서 감소하면서 압력을 시편에 전달한다.^(7,8) 플라즈마 팽창속도는 플라즈마 압력과 재료의 충격파 임피던스(shock wave impedance)와 관련 있다. 압력의 최대치는 레이저 펄스의 지속시간이나 레이저의 파장 길이와는 무관하지만, 레이저 펄스 세기의 루트 값에 비례한다.⁽⁵⁾

$$P(GPa) \approx 1.6 \sqrt{I(GW \cdot cm^{-2})} \quad (3)$$

여기서 I 는 레이저 펄스 세기이다.

본 연구에서는 매우 짧은 시간동안 압력 펄스가 지속되므로 압력의 파형을 삼각 파형으로 적용하였다.

2.4.2 무한경계조건

일반적인 LSP에서 레이저의 펄스 주기는 잔류응력이 안정화되는 시간에 비해 충분히 길다. 따라서 본 연구에서는 두 번째 레이저 펄스가 첫 번째 레이저 펄스에 영향을 주지 않는다고 가정하였고, 사용된 모델은 반경방향과 축 방향으로 무한하다고 가정하였다. 따라서 초기 표면에 작용한 충격파는 반경방향과 축 방향으로 무한 진행하게 되며 잔류응력분포에 영향을 미치지 못한다. 이를 위해 무한요소(infinite element)를 사용하였다.

2.5 재료

레이저에 의해 발생한 플라즈마로 인해 금속 표면은 고온 고압의 상태에 놓이게 되고 이로 인해 변형률(strain rate)이 매우 높은 상태에 있게 된다. 일반적으로 변형률이 높아짐에 따라 항복

Table 2 Material

Properties	Value	Unit
Density	7800	kg m ⁻³
Elastic Modulus	210	GPa
Poisson ratio	0.29	

응력도 증가한다.⁽⁶⁾ 충격파가 진행하는 방향의 탄성한계응력은 Hugoniot 탄성한계(HEL)로 정의된다.⁽⁶⁾ 즉, 적용된 압력이 HEL보다 작으면 소성변형이 일어나지 않는다. LSP상태에서의 변형률은 106s-1에 이른다고 알려져 있고, 이때 압력의 최대값이 HEL값에 도달한다고 하면, 단축 응력조건에서 동적항복응력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.^(6,9)

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

여기서, ν 는 푸아송 비이다.

본 연구에서는 재료의 거동을 완전탄소성체(elastic-perfectly plastic)로 가정하고, 항복응력을 위 식 (4)의 동적항복응력으로 가정하였다. 본 연구에서 사용된 재료의 물성치는 Table 2와 같다.

3. 해석결과

적용된 모델의 크기는 가로 세로 각각 6mm이고, 요소는 40,000개다. 레이저 스폿 크기는 반경 4mm로 했고, 압력 최대값은 2.8GPa, 압력 지속시간은 총 100ns로 초기 50ns는 선형증가, 나중 50ns는 선형감소의 삼각 형태로 하였다. 해석 방법, 항복응력의 영향, 레이저 스폿 크기, 표면 압력 지속시간에 따라 각각 비교하였다. 깊이방향의 잔류응력계산 지점은 반경의 1/2지점으로 하였다.

본 연구에 사용된 요소는 4절점 2차원 축대칭 요소로써 적분점을 감소시킨 형태이다. 이러한 종류의 요소를 사용할 때에는 굽힘에 대한 강성이 부족해지는 에러(hourglassing)가 발생하고, 전체 해에 대한 영향력은 인공변형에너지(artificial strain energy)로 측정할 수 있다. Fig. 1에서 나타난 바와 같이 총 내부에너지(total internal energy)에 대한 인공변형에너지는 약 0.03%이고, 잔류응력분포에 영향을 미치지 못한다.

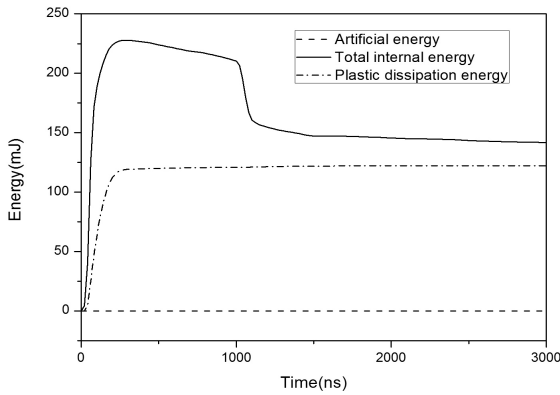


Fig. 1 Comparison of internal, artificial, plastic dissipation energy

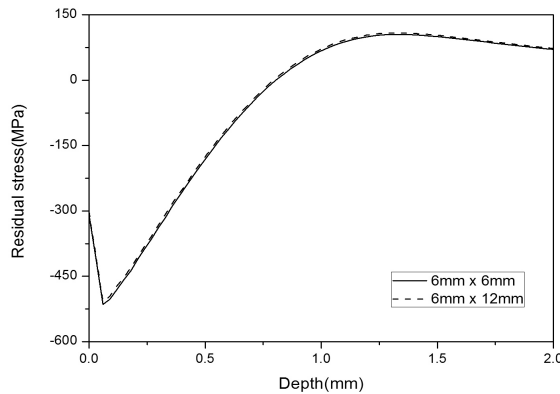


Fig. 2 Comparison of residual stresses of in-depth in model size

반경 방향과 축 방향 경계에 사용한 무한요소와 해석모델의 크기가 적당한지 시험해 보았다. 가로 세로 각각 6mm인 모델과 가로 6mm, 세로 12mm인 모델의 해석 후 잔류응력을 비교한 결과 Fig. 2에서와 같이 거의 일치함을 보였다. 따라서 본 연구에서 적용한 가로 세로 각각 6mm인 해석 모델은 적당하다고 볼 수 있다.

3.1 해석방법 비교

앞 선 연구들에서 LSP에 의한 잔류응력 예측에 사용된 해석방법들의 차이점을 비교해 보았다. 해석방법에는 두 가지가 있는데, 첫 번째 방법은 충격파에 의한 소성변형이 완료되어 모델내에 더 이상 소성변형이 없을 때까지 explicit 해석을 한 후 그 결과를 입력 값으로 정적해석을 수행하여 잔류응력을 구하는 것이고, 두 번째 방

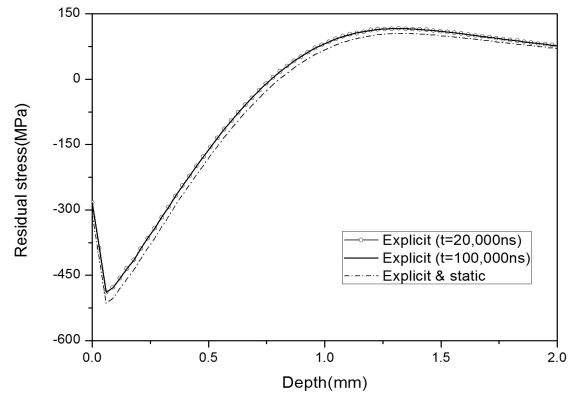


Fig. 3 Comparison of residual stresses of in-depth in analysis method

법은 초기 충격파에 의해 발생한 응력의 분포가 안정될 때까지 explicit 해석을 수행하여 잔류응력을 구하는 것이다.⁽¹⁾

첫 번째 해석방법의 경우 explicit 해석시간은 소성소산에너지(plastic dissipation energy)곡선이 포화되어 더 이상 소성변형이 일어나지 않는 시간까지로 정하였고, Fig. 1에 의하면 2020ns후부터는 소성소산에너지 값이 120mJ로 더 이상 증감이 없이 포화상태가 됨을 알 수 있다.

두 번째 해석방법은 explicit해석으로 20,000ns, 100,000ns후에 응력상태를 비교하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 20,000ns와 100,000ns 후의 응력상태가 일치함을 알 수 있다. 즉, 20,000ns후에는 응력상태의 변화가 없으므로 이 때의 응력을 잔류응력으로 볼 수 있다.

두 가지 해석방법에 의해 깊이 방향의 잔류응력을 계산한 결과 Fig. 2에서와 같이 결과 값은 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 본 논문의 해석에서는 explicit해석을 한 후 정적해석을 하는 방법을 적용하였다.

3.2 항복응력의 영향

본 연구에서 적용된 재료는 완전탄소성체 (elastic-perfectly plastic)로 가정하였고, 변형률이약 10⁶s⁻¹인 LSP의 경우에 항복응력은 재료의 HEL과 푸아송비에 의해 결정된다. 다른 물성치가 일정하다고 가정하면, 항복응력이 증가함에 따라 깊이 방향의 잔류응력의 크기와 그 깊이가 Fig. 4와 같이 감소함을 보인다. 그 이유는 항복응력이

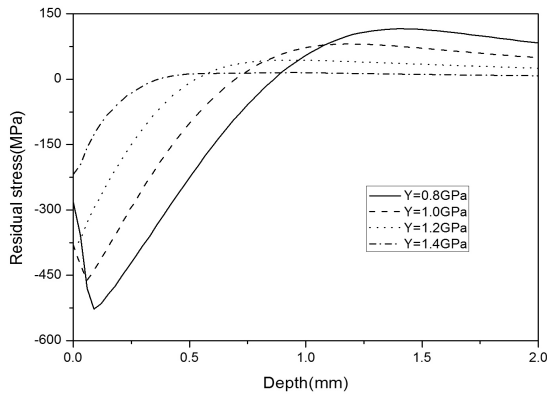


Fig. 4 Influence of yielding stress on the generation of in-depth residual stresses

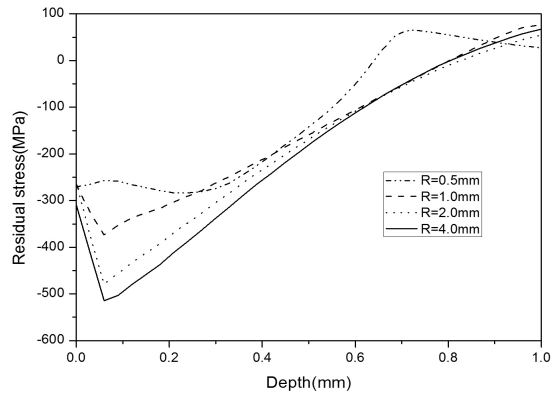


Fig. 6 Influence of spot size on the generation of in-depth residual stresses

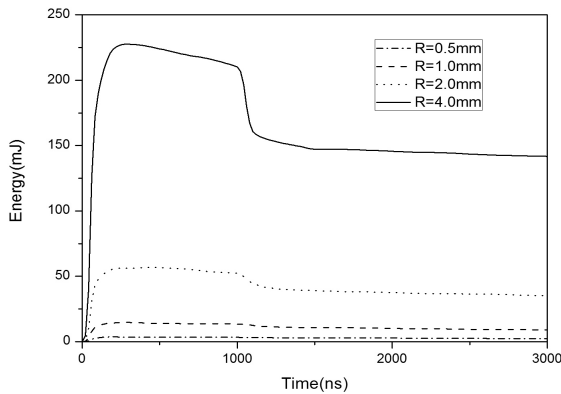


Fig. 5 Comparison of total internal energy for various spot size (R=0.5, 1.0, 2.0, 4.0mm)

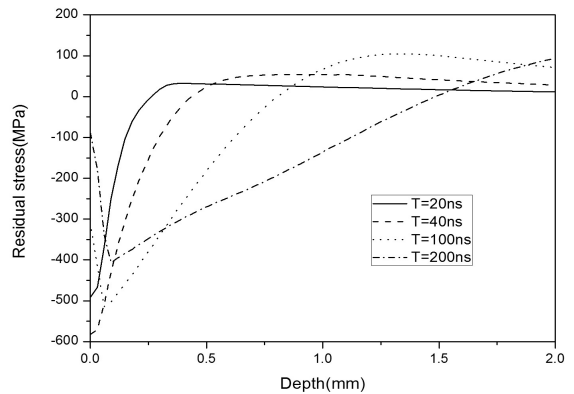


Fig. 7 Influence of pressure duration on the generation of in-depth residual stresses

크면, 소성변형에 대한 저항이 커지게 되고, 응력이 안정화되는 시간도 단축되어, 잔류응력의 크기와 충격파가 영향을 미치는 범위를 감소시키는 것으로 보인다.

3.3 레이저 스폿(spot) 크기의 영향

레이저 스폿 크기는 잔류응력의 크기뿐만 아니라 그 분포에도 영향을 미친다. 스폿 크기는 해석모델로 유입되는 총 에너지의 크기와 관련 있고, 따라서 스폿의 크기가 크면 에너지의 크기가 커지므로 압축 잔류응력의 크기가 커지고 깊이도 깊어진다. 스폿 크기에 따른 내부에너지의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 본 해석에서는 Fig. 6에서와 같이 스폿 반경 4mm인 경우 압축 잔류응력 깊이는 약 0.8mm, 표면에서의 압축 잔류응력은 300MPa, 최대 압축 잔류응력은 약 520MPa인 것으로 계산되었다.

3.4 표면압력 지속시간의 영향

레이저로 인한 플라즈마로 인해 발생한 압력의 지속시간이 길수록 압축 잔류응력의 영향을 받는 깊이가 깊어진다. 상대적으로 지속시간이 짧으면, 표면에서 국부적인 빠른 소성변형이 일어나고, 깊이 방향으로 충격파의 전달이 용이하지 않음으로 인해 급격한 충격파의 감소현상으로 압축잔류응력의 깊이가 깊지 않은 것으로 해석된다. 본 해석에서는 Fig. 7에서와 같이 표면압력 지속시간이 20ns인 경우 압축 잔류응력의 깊이는 약 0.3mm인 것으로 계산되었고, 표면압력 지속시간이 200ns인 경우 압축 잔류응력의 깊이는 약 1.6mm인 것으로 계산되었다.

4. 결론

레이저가 금속표면에 조사될 때 발생하는 충

격파에 의한 잔류응력을 유한요소법을 사용하여 예측하였다. 잔류응력은 레이저의 조사 조건이나 재료의 물성치에 따라 그 크기와 깊이가 다르게 계산되었다. 플라즈마로 인한 압력의 지속시간, 레이저 스폿의 크기, 고 변형률 하에서 재료의 동적 항복응력 등이 LSP에 의한 잔류응력 예측에 영향을 주었으며, 위의 변수들을 조절함에 따라 LSP에 의한 최적의 표면경화 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Anderholm, N.C., 1970, "Laser-Generated Stress Wave," *Applied physics letters*, Vol. 16, No. 3, pp. 113~114.
- (2) Peyre, P., Berthe, L., Scherpereel, X. Fabbro, R. and Bartnicki, E., 1998, "Experimental Study of Laser-Driven Shock Waves in Stainless Steels," *Journal of applied physics*, Vol. 84, No. 11, pp. 5985~5992.
- (3) Kan D., Lin Y., 2006, "Simulation of Multiple Laser Shock Peening of a 35Cd4 Steel Alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 178, pp. 162~169.
- (4) Masse J.E., Barreau G., 1995, "Laser Generation of Stress Waves in Metal," *Surface and Coating Technology*, Vol. 70, pp. 231~234.
- (5) Peyre P., Chaieb I. and Braham C., 2007, "FEM Calculation of Residual Stresses Induced by Laser Shock Processing in Strain Steels," *Modelling and simulation in materials science and engineering*, Vol. 15, pp. 205~221.
- (6) Braisted W., Brockman R., 1999, "Finite Element Simulation of Laser Shock Peening," *International Journal of Fatigue* 21, pp. 719~724.
- (7) Peyre P., Fabbro R., 1995, "Laser Shock Processing: a Review of the Physics and Applications," *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 27, pp. 1213~1229.
- (8) Fabbro R., Peyre P., Berthe L., Scherpereel X., 1998, "Physics and Applications of Laser-Shock Processing," *Journal of Laser Applications*, Vol. 10, No. 6, pp. 265~279.
- (9) Peyre P., Berthe L., Scherpereel X. Fabbro R., 1998, "Laser-Shock Processing of Aluminium-Coated 55Cr Steel in Water-Confinement Regime, Characterization and Application to High-Cycle Fatigue Behavior," *Journal of Materials Science*, Vol. 33, pp. 1421~1429.
- (10) ABAQUS user's manual version 6.8, Pawtucket(RI): Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., 2008.