

레이저 피닝 시뮬레이션을 통한 금속재료의 물성치 예측

여인규*, 임현택*, 임종빈**, 정성호*,✉

*광주과학기술원 기전공학부, **한국항공우주연구원

Prediction of the Constitutive Properties of Metal from Laser Peening Simulation

In Kyu Yeo*, Hyun Taek Lim*, Jong Bin Lim**, Sung Ho Jeong*

*School of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology,

**Korea Aerospace Research Institute

Abstract

For numerical simulation of the deformation and residual stress development in metals during laser peening, the constitutive equations describing material behavior at various strain rates and plastic properties at high strain rate impact conditions are prerequisite. However, these parameters are often unknown for various engineering materials. In this study, the parameters of Johnson-Cook constitutive equation of duplex stainless steel were determined by comparing the residual stress profile predicted by numerical simulation using trial values and the measured residual stress profile with x-ray diffraction.

Keywords: Laser peening(레이저 피닝), Residual stress(잔류응력), Finite element method(유한요소법)

1. 서론

금속 표면에 압축 잔류응력을 생성시킴으로서 재료의 기계적 특성들을 향상시키는 레이저 피닝 기술은 보호층의 종류, 레이저 빔 사이즈, 에너지 밀도 등의 많은 공정 변수들이 영향을 끼친다¹. 그리고 레이저 피닝 현상은 매우 복잡하고 관찰하기 어려운 점이 있어 많은 연구자들이 FEM 해석을 사용하여 현상을 분석하고 결과를 예측한다. 유한요소법을 사용하여 레이저 피닝 공정의 결과를 예측하기 위해서는 플라즈마에 의한 압력 조건, 피닝에 의한 재료의 변형, 및 이때 발생하는 재료 내 응력을 표현할 수 있는 재료의 물성치가 필요하다. 특히 레이저 피닝 공정과 같이 소성변형을 수반하면서 재료 내에 높은 변형 속도를 생성하는 조건을 해석하기 위해서는 다양한 변형 속도에 따른 재료의 물성치가 필요하다. 재료의 탄소성 변형 시 응력을 나타내는 식으로 아래와 같은 존슨 쿡 구성방정식(Johnson-Cook constitutive equation)이 연구자들 사이에서 널리 사용되고 있다^{2,3}.

$$\sigma = [A + B \cdot \epsilon^n][1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}][1 - T'^m]$$

여기에서 A, B, n, C, m은 기준 소성 변형 속도($\dot{\epsilon}_0$)에서의 재료 특성인 상수들이다. 각각 재료의 항복응력(A), 가공경화 계수(B, n), 변형 속도에 따른 민감도(C), 열 풀림 계수(m)을 의미한다⁴. 본 실험에서는 보호층인 알루미늄 테이프를 사용하기 때문에 재료에 열적인 영향은 없다고 볼 수 있으므로, 존슨 쿡 구성방정식의 열적 영향에 관련된 세 번째 항은 무시할 수 있다^{3,5}.

본 연구에서 사용되고 있는 2205 듀플렉스 강은 마모 저항성과 부식 저항성이 뛰어나 해수담수화 펌프 부품 등에 널리 사용되고 있다. 듀플렉스 강에 대한 FEM 해석을 수행하기 위해서는 재료의 탄성 특성과 소성 특성에 대한 정보가 필요한데, 2205 듀플렉스 강의 영 계수, 포아송비와 같은 탄성 특성은 알려져 있지만 존슨 쿡 구성방정식 변수(A, B, n, C)들과 같은 소성 특성은 알려져 있지 않다. 이로 인해 이전 연구자들은 2205 듀플렉스 강과 기계적 특성이 비슷한 AISI 304, AISI 316L과 같은 스테인레스 강의 변수 값들을 사용

투고일 : 2013년 3월15일 심사완료일 : 2013년 3월 20일

계재승인일 : 2013년 3월 25일

교신저자 : 정성호 ✉ shjeong@gist.ac.kr

하여 해석을 수행해 왔다. 그러나 이러한 해석은 2205 듀플렉스 강 본래의 소성 특성을 고려하지 않은 것으로 정확한 해석에 한계가 있다. 존슨쿱 변수들은 홉킨슨 바 테스트(Hopkinson bar test)⁶로 측정이 가능하지만 듀플렉스 강과 같은 고강도의 재료에 고변형률($\sim 10^4 \text{ s}^{-1}$)을 생성해야 하는 매우 힘든 실험으로, 현재까지는 널리 사용되는 몇 가지의 스테인레스 강에 대한 결과는 보고되었지만 2205 듀플렉스 강에 대해서는 아직 보고가 이루어지지 않은 상황이다.

본 연구에서는 실험적으로 2205 듀플렉스 강의 존슨쿱 구성방정식의 변수들을 직접 측정하는 대신 변수들의 값을 변화시켜가면서 레이저피닝 시뮬레이션을 수행하고 이때 시뮬레이션을 통해 얻은 재료내의 잔류응력분포와 실제 동일한 조건에서 레이저 피닝을 실시한 시편에서 측정된 잔류응력 값을 비교함으로써 듀플렉스 강의 존슨쿱 변수를 간접적으로 결정하는 과정에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

2205 듀플렉스 강의 표면에 레이저 피닝 공정을 수행하기 위해 사용된 Nd:YAG 레이저의 사양은 파장 532nm, 최대 펄스 에너지 1.61J, 펄스 반복율 10Hz, 펄스폭 6.5ns 이다.

레이저 빔은 초점거리 $f = 148.8\text{mm}$ 인 집속렌즈에 의해 직경 2.78mm의 크기로 집속되어 재료의 표면에 조사된다(에너지 밀도 $I = 2.87\text{GW/cm}^2$). 시편은 방전가공을 통해 50mm(W) × 50mm(H) × 10mm(T) 크기로 가공한 후 표면을 샌드페이퍼를 사용하여 연마하여 사용하였다. 또 X-Y 모터 스테이지를 사용하여 재료의 표면 중심부에 30mm × 30mm 영역에 걸쳐 레이저빔을 중첩시키면서 피닝을 수행하였다. 빔 중첩도($D_{laser} = 8.80 \text{ pulse/mm}^2$)는 수식 (1)에 의해 구해졌으며 실제 빔의 이동경로는 Fig. 1과 같다.

$$D_{laser} = \frac{R \cdot R}{v_x \cdot y} \times A \tag{1}$$

여기에서 R.R은 펄스 반복율이며 v_x 는 X방향의 빔 이동 속도, y 는 Y방향의 이동 거리, A는 빔의 넓이를 나타낸다. 레이저 어블레이션에 의한 열적인 영향으로부터 재료를 보호하면서 실제 재료에

인가되는 압력을 높이기 위해 약 100 μm 두께의 알루미늄 테이프를 가공표면에 부착하였다. 도식적인 실험 셋업은 Fig. 2과 같다.

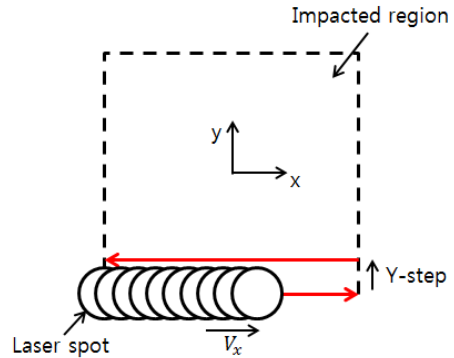


Fig. 1 Scheme of laser irradiation during overlapping laser peening.

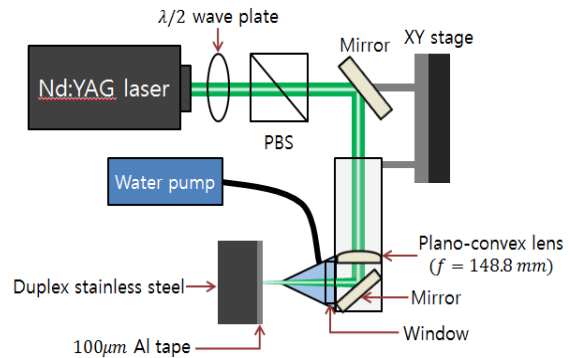


Fig. 2 Schematic diagram of the nozzle type laser peening system.

3. 시뮬레이션 방법

FEM 해석은 상용 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 수행하였다. Fig. 3에서와 같이 레이저 조사 시점부터 압력이 가해지는 상황의 해석은 Explicit 모델을 활용하였으며 동적 거동이 거의 마무리되는 시점에서 재료내의 응력평형을 계산하기 위해서는 Implicit 모델을 사용하여 계산시간을 줄이는 방식을 적용하였다.

시뮬레이션 영역은 압력이 가해지는 부분은 Fig. 4에서와 같이 유한요소로 나누었으며, 경계 부분은 무한요소로 나누어 해석을 수행하였다. 시뮬레이션 영역의 중앙부에는 축대칭 경계조건을 부가하여 해석시간을 단축하였다.

모델의 타당성을 검증하기 위해 기존에 보고된 레이저 피닝 시뮬레이션 논문⁷의 조건(재료 : 35CD4

50HRC steel alloy, 최대 압력 값 = 3GPa, 압력 지속시간(FWHM) = 50ns, 사각빔의 크기 = 5mm)을 우리의 모델에 적용하여 모델검증을 위한 해석을 수행하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 본 연구에서 개발된 모델의 계산결과가 참고문헌에 보고된 해석 결과 및 보고된 실험결과와⁸ 유사한 결과 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다⁹.

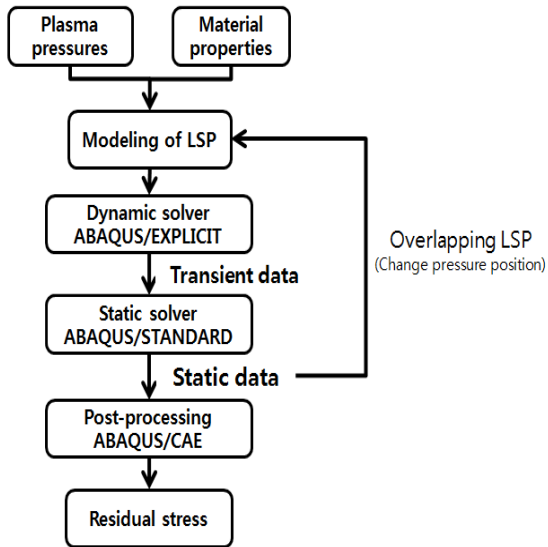


Fig. 3 Flow chart of the simulation.

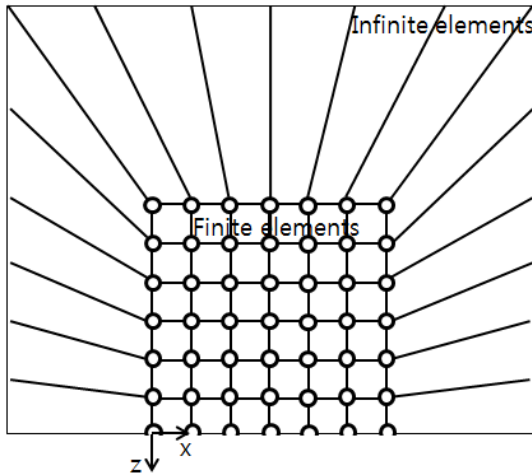


Fig. 4 Top view of simulation model.

Table 1 Comparison of test simulation results with reported data

	Experiment ⁸	FEM ⁷	Our model ⁹
σ_x [MPa]	-355.0	-331.0	-361.9
L_p [mm]	0.80	0.62	0.625

레이저 피닝의 시뮬레이션을 위해 실제로 필요한 레이저 및 소재의 변수들은 Fig. 5와 같으며, 레이저 에너지밀도(I), 펄스폭(τ), 빔 사이즈(Φ) 등의 레이저변수는 소재표면에 작용하는 압력값 결정에 관련되며, 재료의 물성치로는 밀도(ρ), 영 계수(E), 포아송비(ν), 존슨쿱 구성방정식 변수(A, B, n, C)²가 있다.

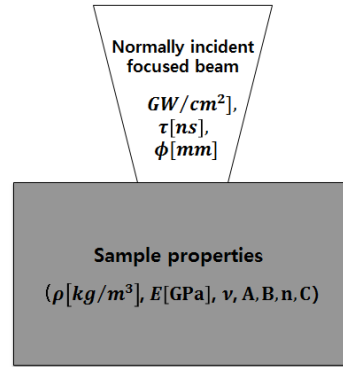


Fig. 5 Laser and material parameters for laser peening simulation.

정확한 시뮬레이션을 위해서는 실제 실험조건에서 소재표면에 작용하는 압력을 측정하여 입력으로 사용하는 것이 가장 바람직하나, 본 연구에서는 이전 논문에 보고된 아래의 실험식을 이용하여 소재표면에서의 압력 값을 결정하였다².

$$P(\text{GPa}) \approx 1.6 \sqrt{I(\text{GW}/\text{cm}^2)} = 2.71 \text{ GPa} \quad (2)$$

위의 실험식은 본 연구에서 사용하는 레이저와 거의 펄스폭이 유사한 10ns 펄스폭의 Nd:YAG 레이저에 의해 생성된 플라즈마 압력을 VISAR 방법을 통해 구한 후 얻어진 식으로 상당히 정확한 것으로 알려져 있고 레이저시뮬레이션에 많이 활용되고 있다. 한편 Fig. 6에서와 같이 시간에 따른 압력펄스의 형상은 본 연구의 실험에서 사용한 펄스폭인 6ns에 맞게 비례하여 축소하였다.

시뮬레이션에 필요한 재료의 소성 물성치인 존슨쿱 구성방정식 변수들의 시험 값을 선택하기 위해 다음과 같은 두 가지 방법을 채택하였다. 첫째로, 2205 듀플렉스 강과 기계적 특성이 유사한 물질의 존슨쿱 변수를 사용하였다. AISI 4340 스테인레스 강의 기계적 특성이 듀플렉스 스테인레스 강과 가장 유사하므로 AISI 4340의 존슨쿱 변수¹⁰를 Table 2의 Set 1과 같이 시험 값으로 선택하였

다. 둘째로, 참고문헌²⁾을 바탕으로 기준 변형율($\dot{\epsilon}_0$)을 $0.01s^{-1}$ (준정적인 상태)일 때의 값으로 선정할 경우 존슨쿱 구성방정식의 변수 A, B는 각각 재료의 항복응력 값 및 인장강도 값으로 대체할 수 있다는 이론에 근거하여 n 및 C를 변화시켜가면서 각각의 다른 조합에 대해 계산을 수행하였다. (Table 2, Set 2-6). 이중에서 Set 3의 경우 B값이 변할 때의 영향을 관찰하기 위해 다른 값을 사용하였다.

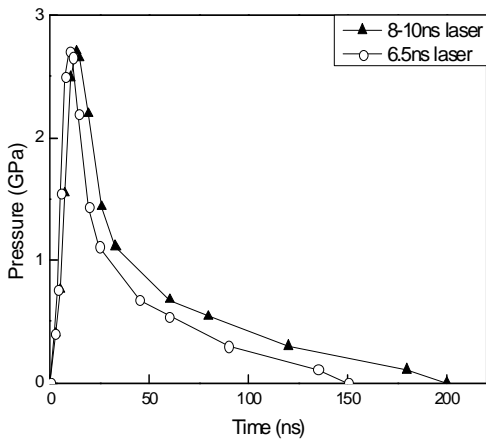


Fig. 6 Temporal profile of surface pressure on a laser irradiated target.

Table 2 Selected Johnson-Cook model parameter sets

Set	$\dot{\epsilon}_0$ [s^{-1}]	A [MPa]	B [MPa]	n	C
1	1.00	712	452	0.26	0.014
2	0.01	460	680	0.30	0.045
3		460	770	0.30	0.045
4		460	680	0.20	0.045
5		460	680	0.30	0.035
6		460	680	0.20	0.035

4. 결과 및 토론

4.1 실험 결과

레이저 피닝 가공이 이루어진 2205 듀플렉스 강 표면에 생성된 잔류응력 분포는 캐나다의 Proto Mfg.에 의뢰하여 XRD 측정장비를 사용하여 얻어졌으며 Fig. 7과 같다. 표면잔류응력(σ_x)은 -248.4 MPa로 재료에 압축잔류응력이 생성되었음을 확인할 수 있으며, 압축잔류응력이 존재하는 깊이(L_p)는 0.75mm이다.

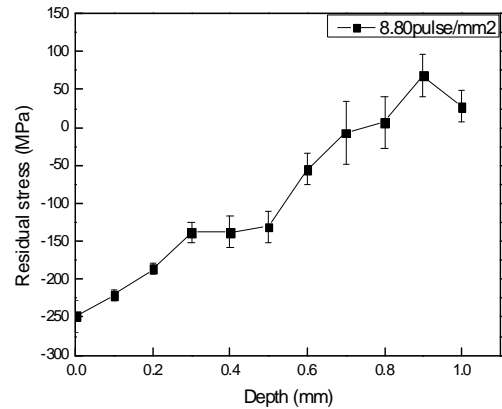


Fig. 7 Measured residual stress of the laser peened sample.

4.2 시뮬레이션 결과

실험으로 측정된 재료내 응력분포와 시뮬레이션을 통해 얻어진 응력분포를 비교하여 가장 실험결과에 어떤 변수조합에서 실험결과에 가장 가까운 응력분포가 얻어지는 지를 분석하였다. Table 3에서 확인할 수 있듯이 각각의 변수조합에 대한 FEM 시뮬레이션을 통해 얻은 표면에서의 압축응력 값을 실험 결과와 비교해보면 Set 6의 변수 값에서 가장 근접한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 Set 6의 변수들을 사용하여 계산된 응력분포가 실험결과와 완벽히 일치한다고 볼 수는 없지만 전체적인 경향성은 상당히 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8에서 압축잔류응력이 존재하는 깊이(L_p) 역시 실험 결과와 유사한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

시뮬레이션을 통해 존슨쿱 구성방정식에 사용되는 변수 값들(Set 2-6) 중에서 변수 B, n은 표면 잔류응력 값에 영향을 주며, C는 표면잔류응력과 압축잔류응력이 존재하는 깊이 모두에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3 Comparison of the surface residual stresses obtained by experiment and simulations

	σ_x [MPa]	L_p [mm]
Experiment	-248.4	0.75
Set 1	-236.1	0.56
Set 2	-227.7	0.67
Set 3	-234.0	0.65
Set 4	-216.8	0.67
Set 5	-267.5	0.76
Set 6	-248.9	0.76

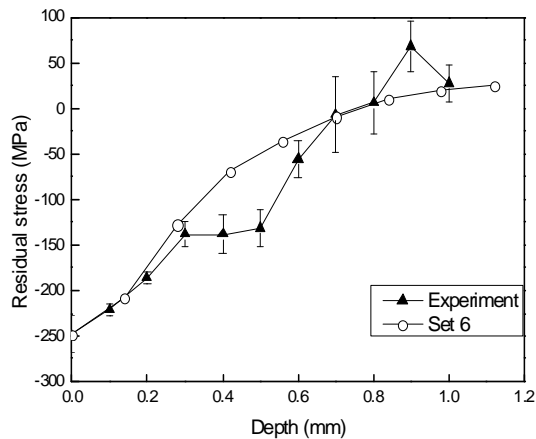


Fig. 8 Comparison of the residual stress distribution obtained by experiment and simulation.

5. 결론

레이저 피닝의 FEM 시뮬레이션 결과와 실험 결과와의 비교를 통해 2205 듀플렉스 스테인레스 강의 시뮬레이션을 위해 필요한 존슨쿱 구성방정식의 변수 값들을 결정하였다. 제안된 방식을 통해 물성치가 알려져 있지 않은 재료의 고변형률에 관련된 구성방정식에 적용 가능한 변수조합을 효과적으로 찾아낼 수 있음을 확인하였으며 존슨쿱 구성방정식에서 A, B값은 각각 재료의 항복응력 값과 인장강도 값을 대입해도 된다는 것을 확인하였다. 재료표면에서의 압력구배를 실험적으로 측정된 값을 사용함으로써 시뮬레이션으로 결정된 변수의 정확도를 보다 높일 수 있을 것으로 판단된다.

References

- 1) H.T. Lim, H.M. Jeong, P.K. Kim, S.H. Jeong, "Improvement of surface hardness of 2205 duplex stainless steel by laser shock peening and observations of surface changes," *Journal of Korean Society of Laser Processing*, 14, pp. 19-24, 2011.
- 2) P. Peyre, I. Chaieb, C. Braham, "FEM calculation of residual stress induced by laser shock processing in stainless steels," *Modelling Simul. Mater. Eng.* 15, pp. 205-221, 2007.
- 3) Yongxiang Hu, Zhenqiang Yao, "Numerical simulation and experimentation of overlapping laser shock processing with symmetry cell,"

International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, pp. 152-162, 2008.

- 4) D. Umbrello, R. M'Saoubi, J.C. Outeiro, "The influence of Johnson-Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel," *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47, pp. 462-470, 2007.
- 5) Yunfeng Cao, Yung C. Shin, Benxin Wu, "Parametric Study on Single Shot and Overlapping Laser Shock Peening on Various Metals via Modeling and Experiments," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 132, 061010, 2010.
- 6) M. Sasso, G. Newaz, D. Amodio, "Material characterization at high strain rate by Hopkinson bar tests and finite element optimization," *Materials Science and Engineering A* 487, pp. 289-300, 2008.
- 7) K. Ding, L. Ye, "Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes," *Surface Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 351-358, 2003.
- 8) P. Ballard, J. Fournier, R. Fabbro, J. Frelat, "Residual stresses induced by laser-shocks," *J. Phys. IV*, Vol. 01, No. C3, pp. C3 487-494, 1991.
- 9) Hyuntaek Lim, "Enhancement of surface properties of duplex stainless steel by laser shock peening, Dissertation for Doctor of Philosophy, Gwangju Institute of Science and Technology, 2012.
- 10) PARAG KONDE, "Finite element analysis of shear-localization in high-speed machining of AISI 4340 steel," Bachelor of Engineering, University of Pune, 2000.