

다중충돌 쇼트피닝에서 변형률 속도와 소재 경도가 잔류응력에 미치는 영향에 관한 연구[§]

김태우* · 양조예* · 나두현* · 이영석**

* 중앙대학교 기계공학부

Effect of Strain Rate and Material Hardness on Residual Stress in Multiple Impact Shot Peening

Tae Woo Kim*, Zhao Rui Yang*, Doo Hyun Na* and Youngseog Lee**

* Dept. of Mechanical Engineering, Chung Ang Univ.,

(Received December 14, 2010 ; Revised August 9, 2011 ; Accepted August 11, 2011)

Key Words: Shot Peening(쇼트피닝), Residual Compressive Stress(압축잔류응력), Strain Rate Sensitivity(변형률 속도 민감도), Finite Element Method(유한요소법)

초록: 쇼트피닝 공정은 쇼트볼이 소재에 충돌을 일으킬 때 생기는 압축잔류응력에 의해 소재의 피로 강도를 향상 시키는데 그 목적이 있다. 본 연구는 변형률 속도 민감도 변화가 압축잔류응력에 미치는 영향을 분석하기 위해서 수행되었다. 본 연구자는 변형률 속도 민감도의 영향을 고려한 쇼트피닝 다중 충돌을 ABAQUS 6.9-1 를 사용하여 모사하였다. 사용된 소재는 AISI 4340 강종이다. 본 연구자는 변형률 속도 민감성이 높은 재료와 낮은 재료를 비교하였다. 결과적으로 변형률 속도 민감성이 증가하면 압축 잔류응력은 감소하였다. 또한 경도가 낮은 소재의 압축잔류응력이 경도가 높은 소재보다 더 크게 발생하였다.

Abstract: Shot ball impacts to materials cause residual compressive stress on their surfaces. Improving the fatigue strength of a material that has this residual compress stress is the purpose of the shot peening process. A numerical study was performed to evaluate the effect of the strain rate sensitivity and hardness of the shot ball on the residual compressive stress. We calculated the residual compressive stress due to multiple impact shot peening using ABAQUS 6.9-1. AISI 4340 steel was the material used in this study. We compared the effects of high strain rate sensitivities and low strain rate sensitivities and found that when the material's sensitivity to the strain rate increased, the residual compressive stress decreased. In addition, the residual compressive stress of low-hardness material is higher than that of high-hardness material.

- 기호설명 -

1. 서론

$\dot{\epsilon}$: 변형률 속도
 σ_{yield} : 변형률 속도 변화에 따른 항복강도
 σ_0 : 정적 항복강도
 σ_x : x축 방향 잔류응력
 D, n : 재료 상수

최근 산업기술의 고도화에 따른 기계부품의 고강도화와 경량화의 요구가 증가하고 있다. 따라서 재료에 인성을 부여하여 피로수명 및 강도를 향상시키기 위한 다양한 방법이 사용되고 있다. 이와 같은 방법 중 쇼트피닝(shot peening) 가공은 경량화, 고강도화를 통하여 에너지 절약을 할 수 있는 방법이다. 따라서 청정 기술로 적용될 수 있고 고부가 가치의 산업이다. 쇼트피닝은 주로 자동차, 철도 그리고 항공기의 부품 등에 쓰이고 있다.

쇼트피닝이란 작은 구형의 수많은 금속입자를

[§] 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

[†] Corresponding Author, ysl@cau.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

고속으로 금속표면에 충돌시키는 냉간 단조 공법이다. 쇼트피닝 효과로 인해 압축잔류응력이 금속표면에 잔존하게 된다. 표면부 가까이에 형성된 압축잔류응력은 피로 강도에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 압축잔류응력에 따라 재료의 피로 수명이 결정되기 때문에 압축잔류응력의 분포 연구는 중요하다.

압축잔류응력을 측정하는 방법으로 실험적인 방법이 있다. Menig,⁽²⁾ Wick⁽³⁾ 등은 쇼트피닝 후 X-선 회절법(X-ray diffraction: XRD)으로 압축잔류응력을 측정하였다. 하지만 실험을 통해 압축잔류응력을 측정하는 방법은 많은 시간과 고가의 측정 장비를 필요로 하는 점이 있다. 따라서 유한요소법을 이용한 연구가 활발히 이루어져 왔다.

Meo,⁽⁴⁾ Barrios⁽⁵⁾ 등은 2D 축대칭 모델을 이용하여 소재와 단일 쇼트볼간의 충돌 해석을 수행하였다. 하지만, 2D 축대칭 모델은 단일충돌 해석이므로, 단순 충돌 메커니즘을 설명하는데 지나지 않는다. Schiffner⁽⁶⁾ 등은 강구를 소재에 2회 충돌시키는 3D 모델로 해석하였다. Guagliano⁽⁸⁾는 임의의 한 지점에서 다중충돌 3D 모델 해석을 수행하였다. 이들은 쇼트볼을 소성 쇼트볼이 아닌 강구를 사용하여 해석을 수행하여 실험값과 많은 오차가 난다. 이에 김태형⁽¹²⁾ 등은 강구, 탄성 쇼트볼, 소성 쇼트볼 모델들을 고려한 해석모델을 제안하고, 다중충돌이 진전됨에 따른 효과를 살펴보았다. 결과적으로 그들은 소성쇼트볼을 사용한 모델이 실험값에 가장 가깝다는 결론을 내렸다. 따라서 본 연구자는 해석에 3D 축 대칭 모델과 소성 쇼트볼을 사용하였다.

Meguid⁽⁹⁻¹¹⁾ 등은 다수의 쇼트볼이 모델에 균등하게 충돌하는 3D 대칭 셀 모델을 제안하였다. 그들은 변형률 속도를 고려한 모델과 고려하지 않은 모델을 비교하여 압축잔류응력의 거동을 살펴보았다. Bhuvanaraghan⁽⁷⁾는 변형률 속도를 고려하여 단일충돌과 다중충돌을 해석하였다. 또한 쇼트볼의 크기 변화에 따른 압축잔류응력 분포를 해석하였다.

쇼트피닝은 고속의 쇼트볼이 소재에 순간적으로 충돌하므로 변형률 속도 민감도는 반드시 고려되어야 하고 소재의 경도 변화도 중요하다. 따라서 본 연구자는 변형률 속도 민감도를 변화에 따른 압축잔류응력을 유한요소해석을 이용하여 계산하였다. 또한 소재의 경도 변화에 따른 압축잔류응력 분포를 해석하기 위해 소재의 경도를 변경하였다. 본 연구에서는 ABAQUS 6.9-1 유한요소해석프로그램을 사용하였고, 사용된 소재는 항공산업에

많이 사용되는 AISI 4340 강종이다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소 및 경계조건

실제 쇼트피닝은 재료의 전체면적에 쇼트볼을 투사하는 공정이다. 따라서 유한요소해석 모델은 재료의 전체 표면에 쇼트볼의 충돌 모사가 되어야 한다. 또한 쇼트피닝에 의해 생성되는 응력은 x 축과 z 축의 응력이 서로 같은 양축 등가 응력해를 가져야 한다. 양축 등가 응력해라 함은 쇼트볼이 수직으로 소재에 충돌할 때의 방향을 y 축이라고 했을 때, x 축과 z 축의 응력값이 서로 같음을 의미한다. 본 연구자는 Meguid⁽⁹⁾ 등이 제안한 3D 대칭-셀 모델을 사용하였다.

Fig. 1 은 Meguid⁽⁹⁾ 등이 제안한 3-D 대칭-셀 해석 모델 및 쇼트볼의 투사 순서이다. 요소는 3 차원 8 절점 감차적분요소(C3D8R)이다. 총 요소 수는 16000 개이며, 최소 요소 크기는 0.02mm 이다. 대칭-셀 한 변의 크기 S 는 0.4mm 이며, 소재 크기는 0.02mm 이다. 대칭-셀 한 변의 크기 S 는 0.4mm 이며, 소재의 높이 h 는 1.5mm 이다. 쇼트볼도 3 차원 8 절점 감차적분요소로 유한요소 망을 구성하였다. 총 요소 수는 1,280 개이고, 최소 요소 크기는 0.012mm 이다. 쇼트볼의 반지름은 R=0.4mm 이다.

쇼트볼과 소재간의 충돌 해석은 외연적 시간 적분법(Explicit Integration)으로 해석되었다. 계산 시간은 쇼트볼이 4 회 충돌 시 20 분내로 소요된다.

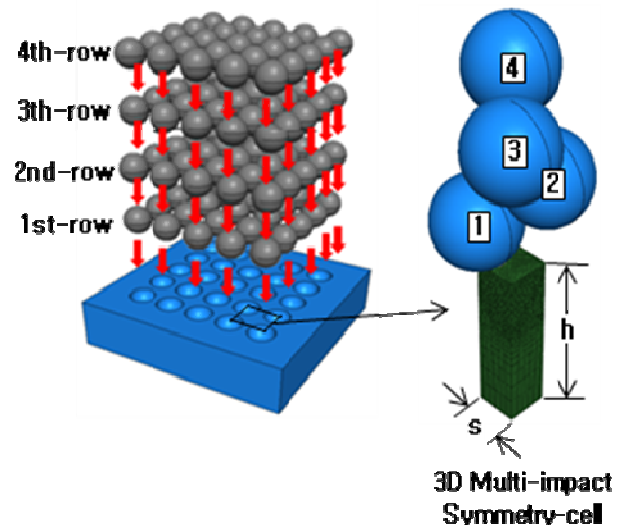


Fig. 1 FE symmetry-cell model for residual stress of shot peening under multi-impacts

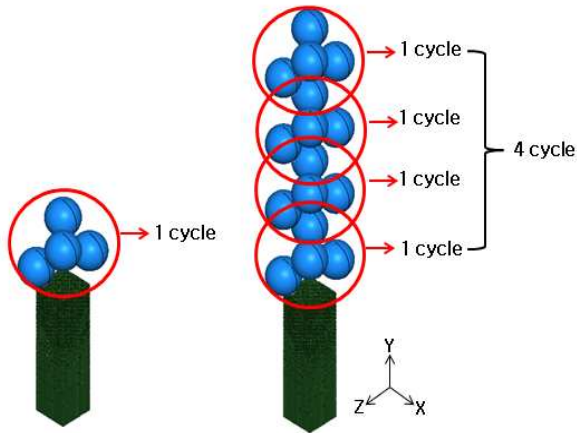


Fig. 2 When the impact was a period of 4 times, each cycle has 4 times impact

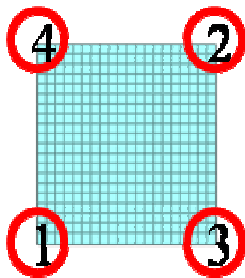


Fig. 3 Impact position and order of shot ball for 1 cycle

대칭-셀의 바닥면은 완전히 구속($U_x=U_y=U_z=0$)되었고, 네 옆면은 각 대칭 축에 대해 대칭(symmetric) 처리($U_x=0, U_z=0$) 되었다. 접촉 조건은 표면과 표면 접촉(Surface to Surface Contact)을 사용하여 쇼트볼과 소재의 충돌을 모사하였다. 쇼트볼의 투사 속도는 김태형⁽¹²⁾ 등이 선행연구에서 결정한 $v=55$ m/s 으로 결정하였다. 또한 Meguid⁽⁹⁾ 등이 선행연구에서 결정된 동적마찰계수 $\mu = 0.2$, 재료 감쇠계수 $\xi = 0.5$ 를 대칭-셀 모델에 사용하였다.

2.2 Cycle 의 개념도입

실제 쇼트피닝은 단순 1 회 충돌이 아닌 수많은 쇼트볼이 소재에 수회 반복 충돌된다. 임의의 위치에서 쇼트볼 충돌 개수를 정하고 반복 충돌이 일어나는 것을 1 주기(1-cycle)이라 한다. 쇼트볼 4 개의 충돌이 일어난다고 가정한다면, n 주기는 4n 회 충돌을 의미한다. Fig. 2 은 4 개의 쇼트볼 충돌을 1 주기로 하고, 4 주기의 충돌하는 경우를 보여준다. 여기서 쇼트볼은 수직으로 충돌하며, 동일한 위치에서 연속적으로 충돌한다고 가정한다. 본 연구자는 김태우⁽¹³⁾ 등이 선행연구에서 사용된 해석

Table 1 Mechanical properties of AISI4340 steel

Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson ratio	Density (Kg/m ³)
1510	1840	210	0.25	7850

Table 2 Mechanical properties of cut wire round shot

Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson ratio	Density (Kg/m ³)
1470	1840	210	0.3	7850

모델 중 하나인 1 주기 당 4 회 충돌모델을 선정하였다. Fig. 3 은 1 주기에 대한 쇼트볼의 충돌 위치 및 순서를 보여준다. 쇼트볼끼리는 접촉 조건이 없기 때문에 서로 충돌하지 않는다.

3. 재료물성

AISI4340 소재는 쇼트피닝 공정에 많이 사용되고 있다. 소재의 해석물성은 Meguid⁽¹¹⁾등을 참고하였다. 쇼트볼은 컷 와이어 라운드 쇼트볼을 모델로 선정하였다. AISI 4304 와 쇼트볼의 물성치는 Table 1, 2 에 나타내었다.

3.1 변형률 속도 민감도에 의한 항복강도 변화

쇼트피닝 시 투사되는 쇼트볼이 재료에 충돌하면 재료는 순간적으로 고속 변형된다. 따라서 쇼트피닝의 해석에서 변형률 속도 민감도에 대한 항복강도의 의존성을 갖는다. 이에 본 연구자는 변형률 속도 민감도를 고려하여 유한요소해석을 수행하였다. 식 (3)은 변형률 속도와 항복강도의 관계식을 보여준다.

$$\dot{\epsilon} = D \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_0} - 1 \right)^n \tag{3}$$

여기서 $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도, σ_y 는 항복강도, σ_0 는 정적 항복강도이고, D 와 n 은 재료 상수상수이다. AISI4340 의 D 와 n 은 재료상수로써, D 는 2.5×10^5 이고, n 은 6 이다.⁽¹⁵⁾ 본 연구자는 이 관계식으로 변형률 속도 민감도에 따른 압축잔류응력의 분포를 계산하였다. 변형률 속도가 $10^3(1/s)$ 에서 변형

를 속도 민감도가 높은 소재의 항복강도비는 최대 1.5 이다. 따라서 본 연구자는 D 값을 1/100 배, n 값은 0.8 배로 결정하였다. 반면에 변형률 속도 민감도가 낮은 소재의 항복강도비는 최소 1.2 이며, 이때 D 값은 100 배, n 값은 1.2 배로 결정하였다⁽¹⁶⁾. Fig. 4 는 변형률 속도에 따른 항복강도 변화율을 보여준다.

4. 결과

압축잔류응력은 면적평균으로 계산하였다⁽¹²⁾. 이는 XRD 실험법에 의한 계산 방법으로, XRD 실험법에 의한 압축잔류응력은 면적단위로 측정한다. 따라서 이 방법과 동일하게 유한요소해석 시 쇼트볼이 충돌하는 소재의 면적에 존재하는 전체 노드 (node) 점들의 응력 평균값을 구하여 압축잔류응력값을 나타내었다.

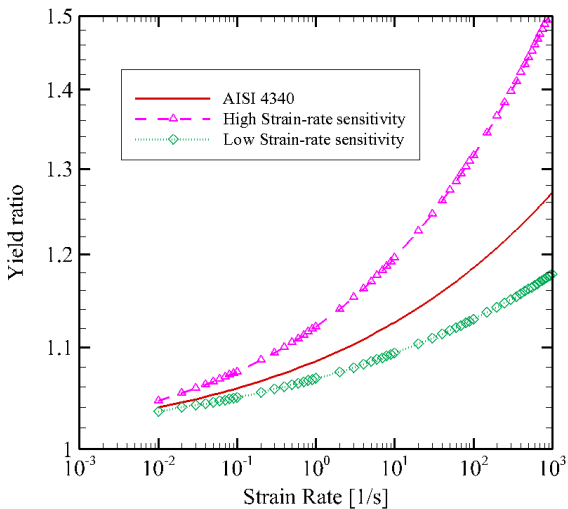


Fig. 4 Effect of strain rate sensitivity on yield ratio

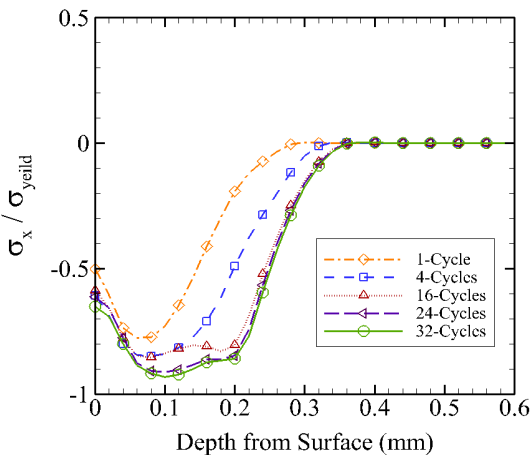


Fig. 5 Residual compressive stress distribution according to increase of cycle

4.1 주기 증가가 압축잔류응력에 미치는 영향

Figure 5 는 1-cycle 당 4 회 충돌하는 모델의 변형률 속도 민감도를 고려하여 해석을 수행한 경우의 압축잔류응력값을 나타낸다. 해석은 32-cycle의 충돌 후 더 이상의 충돌은 없었으며, 탄성파와 소성파가 사라질 때까지 시간이 지난 뒤 잔류응력을 계산하였다. Fig. 5 를 보면 충돌 주기가 증가에 따라 압축잔류응력이 증가하지만 24-cycle 이후에는 압축잔류응력이 수렴함을 알 수 있다. 따라서 본 연구자는 해석 모델의 충돌 주기를 24-cycle 로 결정하였고 24-cycle 에서의 변형률 속도 민감도 변화에 따른 압축잔류응력 분포를 해석하였다.

4.2 변형률 속도 민감도가 압축잔류응력에 미치는 영향

Fig. 6 은 다중 충돌 쇼트피닝 시 변형률 속도 민감도 변화에 따른 압축잔류응력의 분포를 보여준다. Fig. 4 에서 변형률 속도가 10³(1/s)에서 AISI4340 의 소재 항복강도 비는 약 1.27 이다. 높은 변형률 속도 민감도를 가진 소재의 최대 압축잔류응력은 낮은 민감도를 가진 소재보다 소재의 0.22mm 깊이에서 압축잔류응력 값이 55.82% 작아지는 것을 알 수 있다. Fig. 6 은 표면 압축잔류응력, 즉 소재의 0mm 깊이에서는 8.5% 작아졌다. 반면에 낮은 변형률 속도 민감도를 가지는 소재는 민감도를 고려하지 않은 소재와 비교하였을 때 최대 압축잔류응력이 0.91%로 그 차이가 미미하였다. 하지만 표면에서의 압축잔류응력은 11.52% 증가하였다. 이는 변형률 속도 민감도가 높은 소재는 Fig. 3 에서 나타나듯이 높은 항복강도비를 나

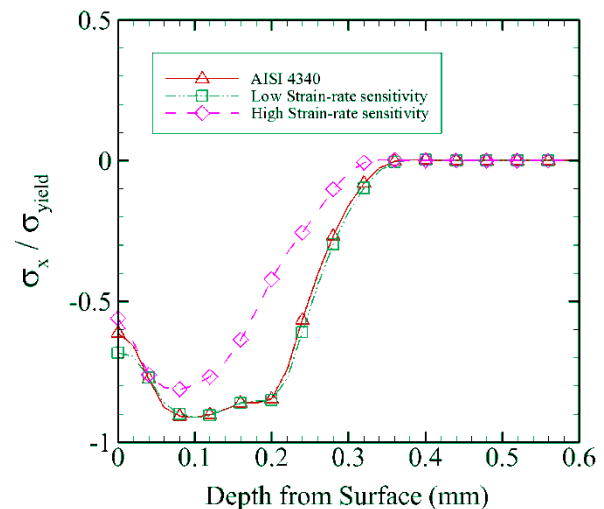
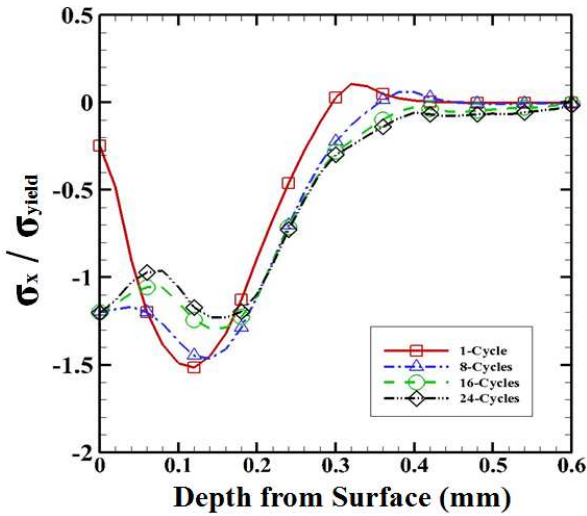
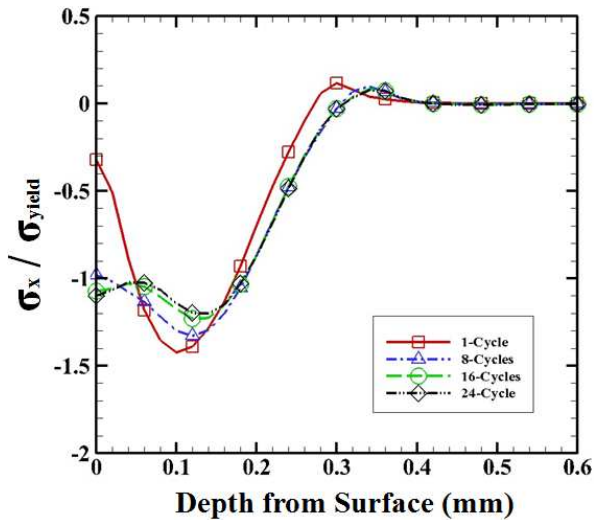


Fig. 6 Residual compressive stress distribution according to change strain rate sensitivity



(a) Material hardness 370HB



(b) Material hardness 530HB

Fig. 7 Residual stress distribution according to increase of cycle

타내기 때문이다. 변형률 속도 민감도가 낮은 소재는 항복강도비가 AISI4340 보다 작기 때문이다. 따라서 변형률 속도 민감도가 높은 소재는 압축잔류응력의 크기가 작아진다. 하지만 변형률 속도 민감도가 낮은 소재는 압축잔류응력 분포에 영향을 미치지 않는다.

4.3 소재 경도가 압축잔류응력에 영향

Fig. 7 은 96 개(24-cycle)의 쇼트볼을 연속적으로 일정 속도(55m/s)로 투사한 후 소재 깊이에 따른 잔류응력 분포를 보여준다. Fig. 7(a)는 소재 경도 370HB 인 경우의 잔류응력 분포 상태이며, (b)는 소재 경도 530HB 인 경우의 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 재료의 표면 압축잔류응력(0.0mm 깊

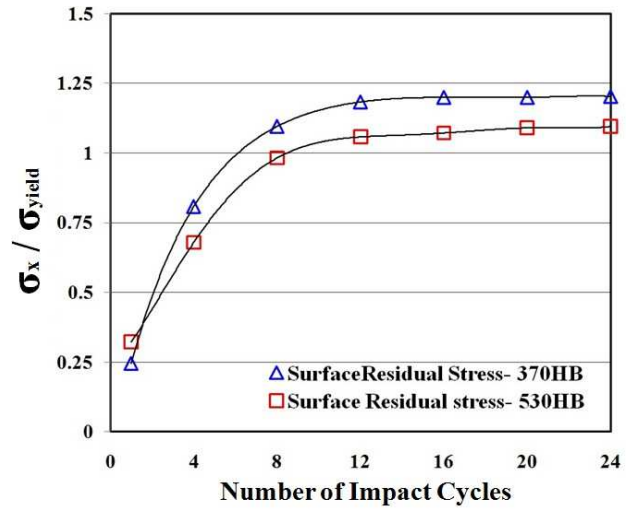


Fig. 8 Surface residual stress for material hardness 370HB and 530HB

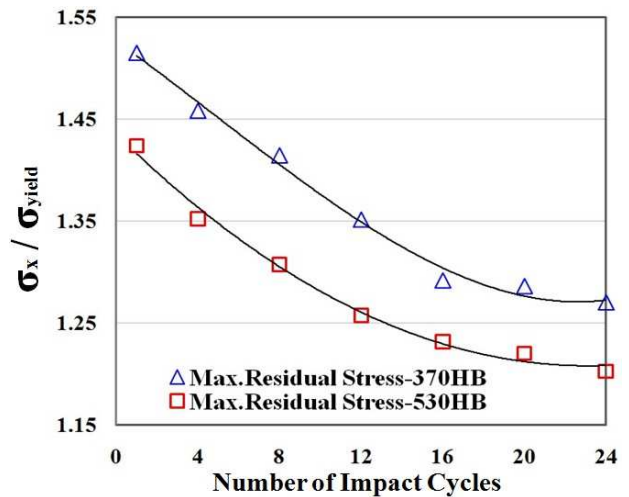


Fig. 9 Maximum residual stress for material hardness 370HB and 530HB

이)은 투사 사이클이 증가할수록 증가하지만 최대 압축잔류응력(약 0.12mm 깊이)은 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 경도 높은 소재보다 낮은 소재의 경우가 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 결과적으로 투사 사이클이 증가할수록 최대 압축잔류응력은 감소하지만 수렴성이 더 좋아진다.

Fig. 8 은 경도가 다른 두 가지 소재에 대해 사이클 증가에 따른 표면 압축잔류응력 변화를 보여준다. 투사 사이클은 4 회씩 증가하여 24-cycle 까지 해석하였다. 경도가 높은 소재에 비해 낮은 소재의 표면압축잔류응력이 충돌 횟수 증가에 따라 더욱 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 1-cycle 을 제외한 나머지 구간은 경도가 낮은 소재의 표면 압축잔류응력이 높은 소재보다 더 큰 영향을

보였다.

Fig. 9 는 370, 530HB 경도의 소재에 대해 최대 압축잔류응력 변화를 보여준다. 최대 압축잔류응력은 소재의 약 0.12mm 깊이에서의 값이다. 소재의 최대압축잔류응력은 경도에 상관없이 투사 사이클이 증가할수록 감소된다. 결과적으로 경도값이 큰 소재의 최대압축잔류응력이 작은 소재보다 계속 크게 나타났다. 따라서 경도가 작은 소재가 압축잔류응력이 더 크다는 것을 확인하였다. 경도가 낮은 소재의 표면 압축잔류응력과 최대 압축잔류응력이 더 높게 나타난 이유는 항복강도가 낮기 때문이다. 따라서 쇼트피닝 가공에서 경도가 낮은 소재가 소성변형이 쉽게 일어나기 때문이다.

5. 결론

본 연구자는 유한요소법을 이용하여 다중 충돌 쇼트피닝을 해석하였다. 변형률 속도 민감도와 소재의 경도를 고려하여 주기 증가에 따른 압축잔류응력을 분석하였다. 본 연구에서의 결론은 다음과 같다.

(1) 다중 충돌 해석 시, 변형률 속도 민감성을 고려한 경우 24 주기 이후에 압축잔류응력은 수렴함을 보였다. 따라서 24 주기 이후의 쇼트피닝은 압축잔류응력에 거의 영향을 미치지 않는다.

(2) 변형률 속도 민감도가 높으면 압축잔류응력의 크기는 작아진다. 그 이유는 변형률 속도가 높아지면 상대적으로 항복응력이 증가하기 때문이다.

(3) 경도가 낮은 소재의 표면압축잔류응력은 높은 소재보다 전반적으로 크게 나타났다. 최대 압축잔류응력도 동일한 경향을 보였다. 따라서 경도가 낮은 소재일수록 압축잔류응력이 높게 나타나며 재료 내부의 압축잔류응력 분포도 깊게 나타났다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Park, K.-D. and Jin, Y.-B., 2004, "The Effect of Compressive Residual Stress on Fatigue Fracture of the Spring steel," *Trans. of the KSME*, Vol. 3, No. 3, pp. 79~85.

- (2) Menig, R., Pintschovius, L., Schulze, V. and Vöhringer, O., 2001, "Depth Profiles of Macro Residual Stress in Thin Shot Peened Plates Determined by X-ray and Neutron Diffraction," *Scr. Mater.*, Vol. 45, pp. 977~983.
- (3) Wick, A., Schulze, V. and Vöhringer, O., 2000, "Effects of Warm Peening on Fatigue Life and Relaxation Behavior of Residual Stresses in AISI 4140 Steel," *Mater. Sci. Eng., A*, Vol. 293, pp. 191 ~ 197.
- (4) Meo, M., and Vignjevic, R., 2003, "Finite Element Analysis of Residual Stress Induced by Shot Peening Process," *Adv. Eng. Softw.*, Vol. 34, pp. 569~575.
- (5) Barrios, D. B., Angelo, E. and Goncalves, E., 2005, "Finite Element Shot Peening Simulation for Residual Stress. Analysis and Comparison with Experimental Results," *Mech. Computational.*, Vol. 14, pp. 113~121.
- (6) Schiffner, K., Drostegen, C. and Helling, 1999, "Simulation of Residual Stresses by Shot Peening," *Comput. Struct.*, Vol. 72, pp. 329~340.
- (7) Bhuvaraghan, B., Srinivasan, S. M., Maffeo, B. and Prakash, O., 2010, "Analytical Solution for Single and Multiple Impacts with Strain-rate Effects for Shot Peening," *CMES*, Vol. 1550, No.1, pp.1-22.
- (8) Guagliano, M., 2001, "Relating Almen Intensity to Residual Stresses Induced by Shot Peening: A numerical Approach," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 110, pp. 277~286.
- (9) Meguid, S.A., Shagal, G. and Stranart, J.C., 2002, "3D FE Analysis of Peening of Strain-Rate Sensitive Materials Using Multiple Impingement Model," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 27, pp.119~134.
- (10) Meguid, S.A., Shagal, G., Stranart, J.C. and Daly, J., 1999, "Three-Dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Shot-Peening Induced Residual Stresses," *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 31, pp.179~191.
- (11) Meguid, S.A., Shagal, G. and Stranart, J.C., 1999, "Finite Element Modeling of Shot-Peening Residual Stresses," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 92-93, pp. 401~404.
- (12) Kim, T., Lee, J. H., Lee, H. and Cheong, S.-k., 2010, "An Area-Average Approach to Peening Residual Stress Under Multi-Impacts Using a Three-Dimensional Symmetry-Cell Finite Element Model with Plastic Shots," *Mater. Des.*, Vol. 31, pp. 50~59.
- (13) Kim, T., Lee, W.-B., Oh, Y. T. and Lee, Y., 2009, "The Effect of Shot Peening Cycle on Residual Stress Distribution," *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, pp. 52~56.
- (14) Kim, T. and Lee, H., 2008, "A 3D FEA Model with Plastic Shots for Evaluation of Peening Residual Stress due to Multi-Impact," *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 32, No. 8, pp. 642~653.

- (15) Premack, T. and Douglas, A. S., 1995, "Three-Dimensional Analysis of The Impact Fracture of 4340 Steel," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 32, No. 17-18, pp. 2793~2812.
- (16) Wall, O., 2002, "Numerical Modeling of Fracture Initiation in Large Steel Specimens at Impact," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 69, pp. 851~863.