

유한요소법을 이용한 경사쇼트피닝의 잔류응력 해석

백승[†] · 양원호* · 석창성* · 류명해**

Residual stress Analysis of Inclined Shot Peening Using Finite Element Method

Seung Baek, Won-ho Yang, Chang-Sung Seok, Meong-Hae Ryu

Key Words: Shot peening(쇼트피닝), Inclined shot peening(경사 쇼트피닝)

Abstract : The purpose of this study is to analyze the impact of shot peening angle on residual stress distribution. From the residual stress analysis of perpendicular shot peening, it could be known that the residual stress in the case of high velocity is larger than low velocity, but the amount of shot size has little effect on the magnitude of compressive residual stress. The centroidal residual stress is not greatly affected by the inclined shot peening but mainly related to the unstable conditions of surface residual stress field. Therefore, this tendency may lead to reduce fatigue life of treated material.

1. 서 론

쇼트피닝 가공은 재료표면에 쇼트볼을 분사하여 유효한 압축잔류응력을 생성시키는 냉간가공의 일종으로, 쇼트피닝 파라미터 변화에 따른 가공효과의 예측과 확인이 매우 중요하다. 하지만 X-ray 회절법과 같은 실험적 방법은 시간과 비용이 많이 소요되며 재료의 파괴가 요구되는 등 많은 제한이 있어 수치 해석적인 연구가 활발히 수행되고 있다. 김철⁽¹⁾ 등은 축대칭 모델을 이용하여 속도와 쇼트볼의 지름을 고려한 쇼트피닝의 동적 탄소성 해석을 수행하여 쇼트볼 속도 및 지름이 증가할수록 압축잔류응력층의 깊이와 크기는 증가하지만 동일한 속도에서 지름의 증가는 표면 압축잔류응력의 크기를 감소

시킨다고 보고하였다. Guagliano⁽²⁾, Meguid⁽³⁾ 등도 3차원 1/4모델을 사용한 쇼트피닝의 동적 탄소성 해석을 수행하여 실험값과 비교하였으며, 김철 등의 연구와 유사한 결과를 보고하였다. 기존의 해석적인 연구들은 쇼트볼이 가공 대상의 표면에 수직으로 충돌한다는 이상적인 조건으로 해석을 수행하였다. 하지만 충돌각은 쇼트피닝 처리를 하는 부품의 형상이나 투사방법에 따라 매우 다양하게 변한다. 그러나 경사 쇼트피닝시 충돌각의 증가에 반비례하여 쇼트볼이 재료에 전이시키는 에너지가 감소할 것이라는⁽⁴⁾ 이론만 알려져 있을 뿐 아직까지 충돌각 변화에 따른 잔류응력분포에 대한 수치해석적인 연구와 실험적 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 3차원 완전모델을 구성하여 수직과 경사쇼트피닝의 동적 탄소성 해석을 수행하여 충돌각 변화에 따른 잔류응력의 변화를 분석하고자 한다.

2. 이론

2.1 쇼트볼이 재료에 전이시키는 에너지
쇼트볼의 투사에 의하여 재료에 전이되는 에

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

E-mail : sbaek@mail.skku.ac.kr

TEL : (031) 290-7477 FAX : (031)290-7482

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 회원, 안동정보대 컴퓨터응용자동화과

너지를 Fathallah⁽⁴⁾는 다음과 같이 제안하였다. Fig. 1과 같이 쇼트볼의 투사속도를 v_i , 반발속도를 v_r , 투사각을 α , 반발각을 α' , 반발계수가 e_r 이라면 쇼트볼과 재료에 저장되는 에너지는 식(1)과 같다.

$$\Delta W_a = \frac{1}{2} m v_i^2 [1 - \sin^2 \alpha (e_r^2 + \cot^2 \alpha)] \quad (1)$$

2.2. 압흔의 깊이

Al-Obaid⁽⁵⁾는 Hertz의 접촉 이론식을 이용하여 쇼트피닝시 발생하는 압흔의 깊이 및 크기에 대한 식을 제안하였다. Fig. 2와 같이 쇼트볼이 충돌하여 표면부에 소성변형이 발생하는 경우 압흔의 깊이 Z 와 압흔의 반경 a 는 식 (2)와 같다. 이때 평균접촉압력 \bar{p} 는 근사적으로 가공대상 재료의 항복강도보다 3배정도 크다. 여기에서 ρ 는 쇼트볼의 밀도, v_0 는 쇼트볼의 초기속도이다.

$$Z = R \sqrt{\frac{\rho v_0^2}{3 \bar{p}}}, \quad a = \sqrt{2RZ} \quad (2)$$

Show와 Salvo⁽⁷⁾는 압입자의 반지름 R 과 소성역의 깊이 h_p 의 관계를 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$\frac{h_p}{R} = 3[Z/R]^{1/2} \quad (3)$$

Al-Obaid⁽⁶⁾는 식 (2)와 실험결과를 이용하여 식 (3)을 쇼트볼의 반지름 R 과 압흔의 깊이 Z 의 관계로 식(4)와 같이 제안하였다.

$$\frac{Z}{R} = \left(\frac{2}{3} \right)^{1/2} \left(\rho \frac{v_0^2}{\bar{p}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

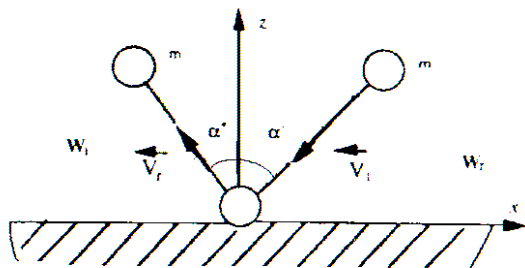


Fig. 1 Schematic diagram of shot ball action during inclined shot peening

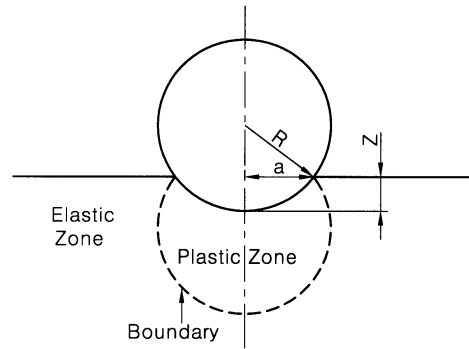


Fig. 2 Schematic diagram of elastic-plastic boundary below the contact zone

3. 유한요소해석

3.1 해석모델 및 방법

해석모델은 Figs. 3~4와 같이 원형평판에 쇼트볼이 충돌각을 가지고 1회 충돌하는 모델을 설정하였다. 해석에 사용된 모델을 Fig. 3에, 유한요소망을 Fig. 4에 나타내었다. 해석에 사용된 요소는 3차원 8절점 솔리드요소로, 28,161개의 요소와 29,926개의 절점으로 구성되어 있다. 쇼트볼은 피닝재료에 비해 강도가 매우 크기 때문에 강제요소를 사용하였고, 중심에 질량요소를 사용하였다. 쇼트볼과 재료표면은 서로 파고들지 않도록 접촉처리를 하였다. 쇼트볼이 재료표면에 충돌시 접촉시간이 수 μsec 로 대단히 짧고, 상대운동이 없다고 가정하여 마찰과 미끄럼은 무시하였다. 원형평판의 재료는 자동차 부품으로 널리 사용되는 SM45C로 인장시험을 통해 구한 물성치를 Table 1에 나타내었다. 해석에는 ABQUS 5.8을 사용하였다.

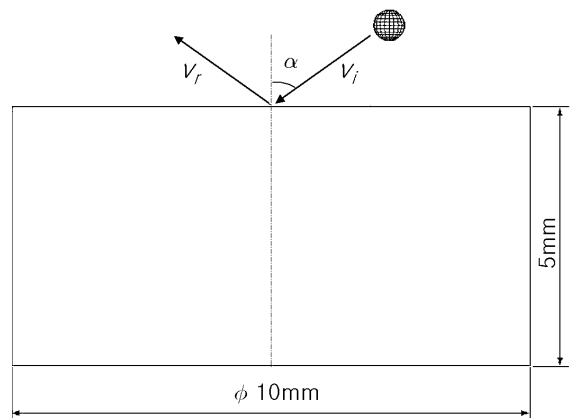


Fig. 3 Model configuration for inclined shot peening

Table 1 Monotonic properties of SM45C

Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio
650	868	205	0.3

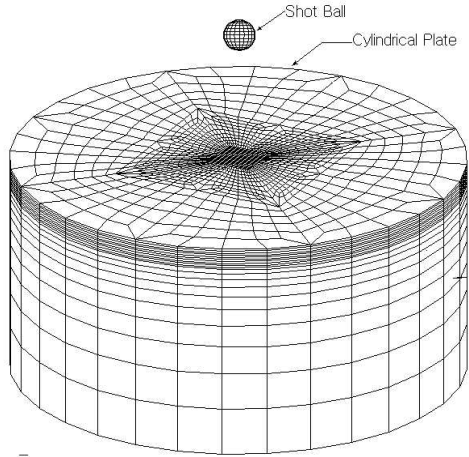


Fig. 4 Finite element mesh for shot peening analysis

3.2 해석모델 검증

쇼트볼 충돌시 발생하는 압흔의 깊이와 크기를 이론과 해석으로 비교하였다. 압흔의 깊이 및 크기의 이론값은 식 (4)를 이용하였고, 식 (2)를 이용하여 압흔의 반경을 계산하였다. Table 2는 쇼트볼의 속도가 50m/s, 쇼트볼의 지름이 0.6mm 일 때 쇼트피닝 후 발생한 압흔의 깊이와 크기를 이론치와 비교하여 나타낸 것이다. 해석 결과로 구한 압흔의 깊이 및 반지름은 이론치보다 유한 요소해석값이 크게 나왔지만 5% 이내로 비교적 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 설정한 모델 및 방법의 타당성을 입증할 수 있다.

Table 2 Comparison between theoretical and analysed results in dent depth Z and dent radius a according to shot peening (shot diameter=0.6mm)

	Dent depth, Z (mm)	Dent radius, a (mm)
Theory	0.0196	0.108
FEM	0.0205	0.11
Error(%)	4.6	1.8

4. 해석결과

4.1 수직 쇼트피닝

Fig. 5는 쇼트볼의 지름이 $\phi 0.6\text{mm}$, 투사각 α 가 0° 이고 쇼트볼의 투사속도가 20m/s, 30m/s, 40m/s, 50m/s, 60m/s일 때의 피닝재료 중심축에서의 깊이방향 잔류응력 분포를 나타낸 것이다. 속도 증가에 따라 압축잔류응력층이 깊어지지만 표면에서의 잔류응력은 오히려 감소함을 보이고 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 표면잔류응력과 최대 압축 잔류응력을 비교하여 나타낸 그림이다. 쇼트 피닝으로 생성되는 최대 압축 잔류응력은 항복강도를 초과하지 않고 항복강도의 0.7~0.8배 정도의 분포를 보이고 있으며 속도변화에 따른 최대 압축잔류응력 증가는 크지 않았다. 표면에서의 압축 잔류응력은 항복강도의 0.4~0.7배로 속도의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 특히 속도가 낮을수록 표면에서의 압축잔류응력과 중심부에서 발생하는 최대 압축 잔류응력의 차이가 크게 나타났다. 그러나 Fig. 5를 보면 쇼트볼의 속도가 감소하는 경우에는 최대 압축잔류응력 발생지점을 표면에 가깝게 위치시키는 장점이 있다. 따라서 깊은 압축 잔류응력분포가 필요한 경우는 속도를 증가시키고 최대 압축잔류응력을 표면에 가깝게 위치시키고 싶을 때는 속도를 낮게 선택하는 등 쇼트피닝의 목적에 따라 속도를 적절하게 조절할 필요성이 있다.

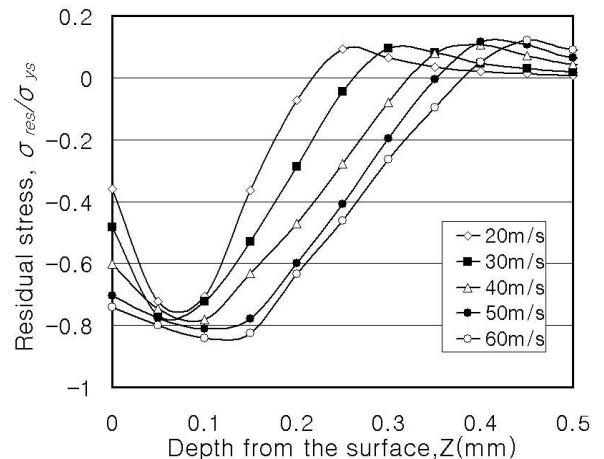


Fig. 5 Residual stress distribution for different shot velocity (shot diameter=0.6mm)

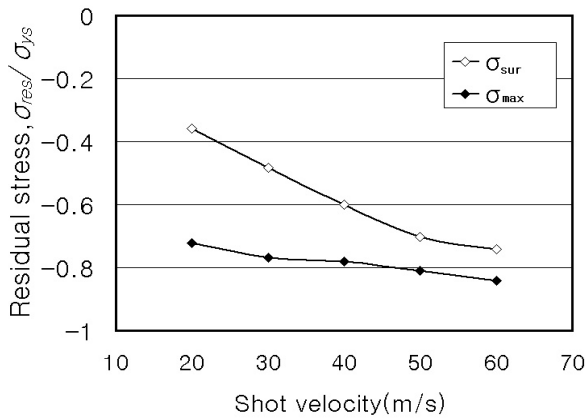


Fig. 6 Surface residual stress and maximum residual stress distributions for different shot velocity (shot diameter=0.6mm)

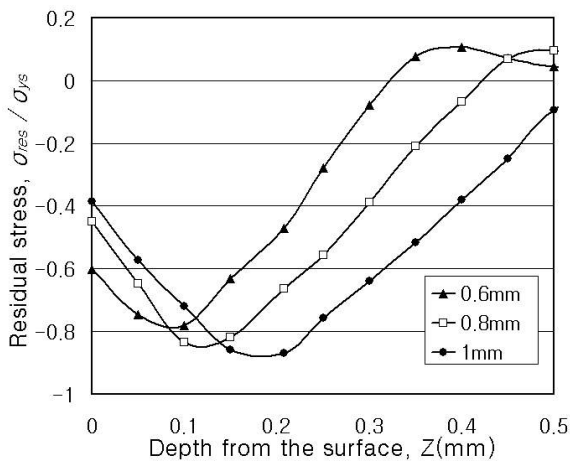


Fig. 7 Residual stress distributions for different shot diameter (shot velocity=40m/s)

Fig. 7은 쇼트볼의 속도가 40m/s이고 지름이 0.6mm, 0.8mm, 1mm로 변화할 때 중심축에서 깊이방향 잔류응력분포를 나타낸 것이다. 지름 증가에 따른 최대 압축잔류응력의 증가는 크지 않고 발생위치가 깊어지며 표면에서의 압축 잔류응력은 감소하고 있다.

Fig. 5와 Fig. 7에서 나타난 것과 같이 속도나 쇼트볼의 직경을 조절하여 투사에너지를 증가시키는 것이 쇼트피닝 공정에서 항상 긍정적이지 않다는 것을 알 수 있으며 공정목적에 따른 선택이 필요함을 알 수 있다.

4.2 경사 쇼트피닝

Fig. 8은 쇼트볼의 지름이 0.6mm이고 쇼트볼의 투사속도가 50m/s일 때 투사각이 0°, 15°, 30°, 45°인 경우로 쇼트볼이 재료표면과 충돌 후 0.4 μ sec가 경과된 후 중심축에서의 깊이방향 잔류응력분포를 나타낸 것이다. 투사각도의 증가에 따라 투사에너지의 감소로 인해 최대 압축잔류응력과 표면에서의 잔류응력이 전체적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 중심축에서 깊이방향 잔류응력분포가 아닌 압흔의 중심축을 기준으로 압흔 표면에서의 잔류응력분포를 Fig. 9에 나타내었다. 충돌각이 0°에서 45°로 증가하면 표면 잔류응력이 감소하고 분포도 불규칙하게 변화됨을 알 수 있다. 특히 충돌각이 30°이상이 되면 표면에서의 잔류응력분포의 비대칭성이 심화되고 압축잔류응력이 급격히 감소하는 부분이 나타나고 있다.

따라서 중심축에서 동일한 깊이방향 잔류응력 분포도 압흔의 중심축을 기준으로 Fig. 9와 같은 방법으로 평가한다면 충돌각도의 증가에 따라 표면에서의 잔류응력분포처럼 비대칭성이 심화될 것이라는 추론이 가능하다. 재료의 표면과 내부의 잔류응력장이 급격하고 불균일하게 분포하는 경우가 균일한 경우보다 재료의 피로강도에 불리하게 작용될 수 있을 것이다.

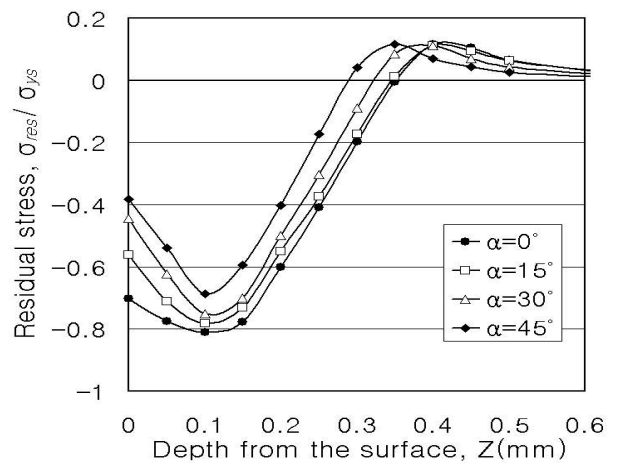


Fig. 8 Residual stress distribution for different impact angle (shot velocity=50m/s, shot diameter=0.6mm)

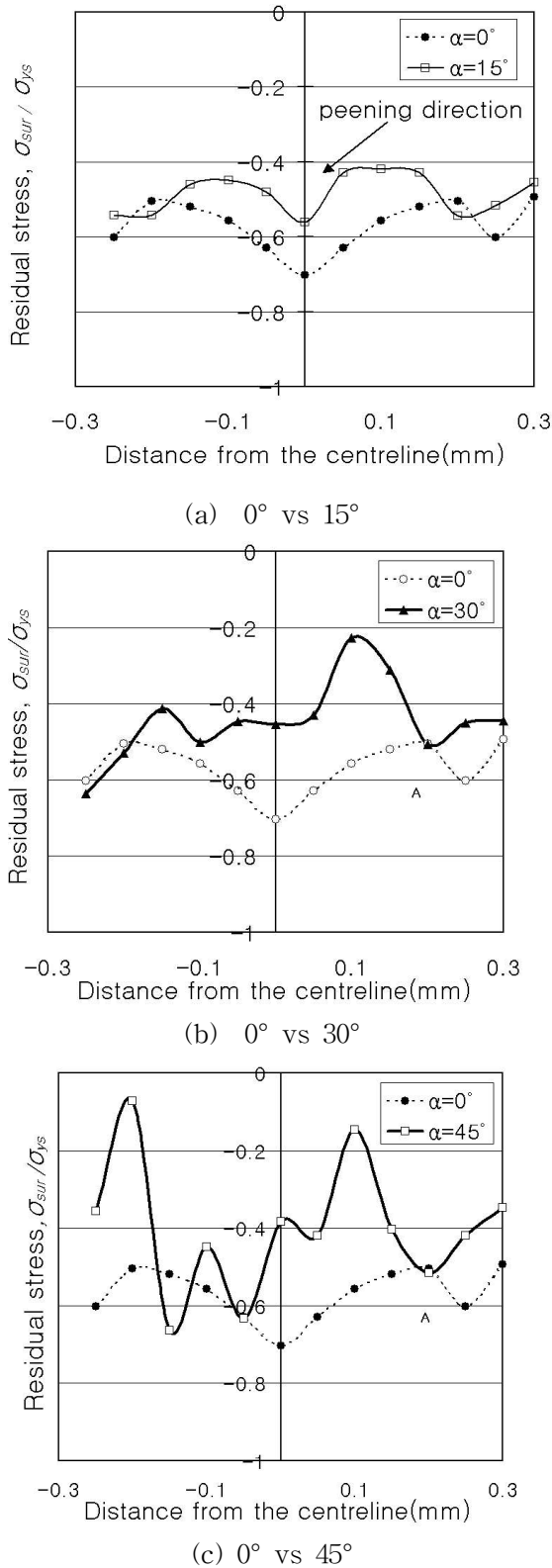


Fig. 9 Effect of the shot angles upon the surface residual stress distribution

잔류응력분포의 정밀한 제어가 필요한 부품을 가공하는 경우에는 충돌각을 0°로 유지하여야 하지만 현실적으로 매우 어려운 일이다. 본 연구 결과로 판단하는 경우 충돌각은 15° 이내로 유지하되 최대 30°를 초과하지 않아야 잔류응력장 분포의 급격한 변화와 불균일한 잔류응력발생을 방지할 수 있을 것이다.

4. 결 론

- (1) 쇼트볼의 속도, 지름변화를 통한 투사에너지의 증가는 최대 압축잔류응력의 변화보다 표면의 압축잔류응력변화에 큰 영향을 미친다.
- (2) 투사에너지가 증가하면 압축잔류응력층이 증가하고, 투사에너지가 감소하면 압축잔류응력층이 감소하지만 최대 압축잔류응력은 표면에 가까운 곳에 발생된다.
- (3) 투사된 쇼트볼과 재료표면이 이루는 충돌각의 변화는 재료 표면의 잔류응력 변화에 지배적인 영향을 미친다. 충돌각이 증가하면 재료전체에 걸쳐 압축잔류응력이 감소하며, 특히 표면의 압축 잔류응력 감소가 크다.
- (4) 충돌각의 증가에 따라 재료 표면과 내부의 잔류응력 분포는 비대칭성이 심화되며, 특히 충돌각이 30°이상인 경우 잔류응력장의 비대칭성이 증가하고 재료전체에 걸쳐 잔류응력의 감소가 크게 나타난다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로 수행된 결과로서, 이에 관계자 여러분들에게 감사드립니다.

참고문헌

(1) Kim, C., Yang, W.H., Sung, K.D., Ko, M.H., 2001, "Finite Element Analysis for Prediction of Residual Stress Induced by Shot Peening", Trans. of the KSAE, Vol. 9, No. 1, pp, 198~204

- (2) Guagliano, M., 2001, "Relating Almen Intensity to Residual Stress Induced by Shot Peening : A Numerical Approach", J. of Materials Processing Technology, Vol. 110, pp. 277~286
- (3) Meguid, S. A., 1999, "Finite Element Modeling of Shot Peening Residual Stress", J. of Materials Processing Technology, Vol. 92~93, pp. 401~404
- (4) Fathallah, R., Inglebert, G., and Castex, L., 1998, "Prediction of Plastic Deformation and Residual Stresses Induced in Metallic Parts by Shot Peening", Material Science and Technology, Vol. 14, pp. 631~639
- (5) Al-Obaid, Y.F., 1990, "A Rudimentary Analysis of Improving Fatigue Life of Metals by Shot Peening", J. of Applied Mechanics
- (6) Al-Obaid, Y.F., 1995, " Shot Peening Mechanics : Experimental and Theoretical Analysis", Mechanics of Materials, Vol. 19, pp. 251~260
- (7) Shaw. M. C., De Salvo, G., 1970, "On the Plastic Flow Beneath a Blunt Axisymmetric Indenter, ", Trans. ASME, J. Eng. Industry 92, pp. 480~49.