

## 쇼트피닝 잔류응력 예측을 위한 유한요소해석

김 철\* · 양원호\*\* · 성기득\*\*\* · 조명래\*\*\*\* · 고명훈\*\*\*\*\*

### The Finite Element Analysis for Prediction of Residual Stresses Induced by Shot Peening

Cheol Kim, Won-Ho Yang Ki-Deug Sung, Myoung-Rae Cho, Myung-Hoon Ko

**Key Words:** Shot Peening(쇼트피닝), Finite Element Analysis(유한요소해석), Residual Stress(잔류응력), Plastic Deformation(소성변형), Dent(압흔)

#### Abstract

The shot peening is largely used for a surface treatment in which small spherical parts called shots are blasted on a surface of a metallic components with velocities up to 100m/s. This treatment leads to an improvement of fatigue behavior due to the developed compressive residual stresses, and so it has gained widespread acceptance in the automobile and aerospace industries. The residual stress profile on surface layer depends on the parameters of shot peening, which are, shot velocity, shot diameter, coverage, impact angle, material properties etc. and the method to confirm this profile is only measurement by X-ray diffractometer. Despite its importance to automobile and aerospace industries, little attention has been devoted to the accurate modelling of the process. In this paper, the simulation technique is applied to predict the magnitude and distribution of the residual stress and plastic deformation caused by shot peening with the help of the finite element analysis.

#### 1. 서론

기계부품의 파손은 대부분 반복적인 인장응력에 의하여 발생하기 때문에 사용 중에 높은 인장응력을 받는 기계부품의 경우에는 표면에 압축잔류응력을 발생시켜서 인장응력을 상쇄시키는 방법으로 부품의 피로수명을 증대시킨다. 이와 같이 기계부품의 표면에 유익한 압축잔류응력을 발생시키기 위한 가장 일반적인 방법은 쇼트피닝(shot peening)으로서 현재 자동차 및 항공기 부품에 폭넓게 적용되고 있다. 쇼트피닝<sup>(1)</sup>은 작은 쇼트볼(shot ball) 입자를 금속표면에 고속으로 충돌

시켜 표면에 국부적인 소성변형을 발생시키고, 변형층 바로 아래의 탄성역에서 늘어난 표면층을 복원시키려는 힘이 작용하게되어 표면에 압축잔류응력을 생성시킨다. 이때 표면에 생성되는 압축잔류응력의 분포는 쇼트볼의 크기, 속도, 충돌각도, 커버리지(coverage) 등의 쇼트피닝 조건에 따라 다르며, 이 압축잔류응력의 분포에 따라 재료의 피로수명이 달라지게 된다. 결과적으로 쇼트피닝 조건에 따라 피로수명이 달라지게 되므로 쇼트피닝 처리를 하기 위해서는 먼저, 쇼트피닝 후 생성되는 잔류응력 분포를 정확히 파악해야한다. 그러나, 쇼트피닝 잔류응력 분포를 정확히 파악하는 것은 쉽지 않으며, 현재는 X-선 회절법 등의 직접 측정하는 방법을 주로 이용하고 있다.

이에 따라, 최근에는 이론적인 방법<sup>(2-5)</sup>이나 유한요소해석<sup>(6-8)</sup>을 통하여 쇼트피닝 잔류응력 분포를 예측하기 위한 노력을 기울이고 있는데, Al-Obaid<sup>(2)</sup>는 Hertzian 접촉이론을 발전시켜 이론

\* 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

\*\*\* 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*\* 회원, 인덕대학 기계설계과

\*\*\*\*\* 대림대학 산업기술경영과

적인 방법으로 쇼트피닝 조건의 변화에 따른 잔류응력의 분포를 파악하기 위한 기초적인 해석을 수행하였으며, 渡邊吉弘 등<sup>(3)</sup>은 Al-Obaid의 이론식을 수정하여 잔류응력 분포 예측식을 제안하였고, Fathallah<sup>(4)</sup>는 Davies의 강체 충돌이론을 바탕으로 쇼트피닝시 압흔의 크기와 잔류응력 분포를 예측하기 위한 연구를 수행한 바 있다. 또한, 유한요소해석을 이용한 연구로서, Levers<sup>(6)</sup>는 재료의 두께방향으로 열부하를 가하는 방법으로 쇼트피닝 후 잔류응력으로 인한 변형 형태를 해석하였으며, Schiffner<sup>(7)</sup>는 ADINA라는 유한요소해석 프로그램을 이용하여 쇼트피닝시 생성되는 잔류응력을 해석하였는데 실험치에 비하여 40% 정도의 오차가 있었다. 그러나, 쇼트피닝 과정을 해석하기 위해서는 탄소성해석 및 고속 충돌해석을 수행해야하기 때문에 쇼트피닝 잔류응력 분포를 정확히 예측하기 위해서는 아직도 많은 연구가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 쇼트피닝 잔류응력 분포를 예측하기 위한 일차적 연구로서, 쇼트피닝 과정에 대한 유한요소해석을 통하여 쇼트볼의 크기 및 충돌속도가 쇼트피닝시 표면에 발생하는 소성변형층의 크기와 잔류응력 분포에 미치는 영향을 파악하였다.

## 2. 쇼트볼의 압흔

쇼트피닝을 실시하면 재료 표면에는 쇼트볼의 충돌로 인하여 미세한 압흔(dent)이 발생하는데, 압흔이 크면 쇼트피닝 후 표면이 너무 거칠어지기 때문에 쇼트피닝 조건을 적절히 조절해야 한다. 渡邊吉弘 등<sup>(3)</sup>은 쇼트피닝시 발생하는 압흔의 깊이 및 크기에 대한 계산식을 정의하였는데, Fig. 1과 같이 쇼트볼이 충돌하여 표면부에 소성 변형이 발생하는 경우 쇼트볼의 운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M \frac{dv}{dt} = -\pi a^2 \bar{p} \quad (1)$$

식 (1)에서  $\bar{p}$ 는 평균접촉압력(average contact pressure)으로서 근사적으로 재료의 항복강도의 3배와 같다. 또한, 쇼트볼 반경  $R$ , 압흔 깊이  $Z$  및 압흔 반경  $a$  사이에는 식 (2)와 같은 관계가 있으며 고차 미소항을 무시하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

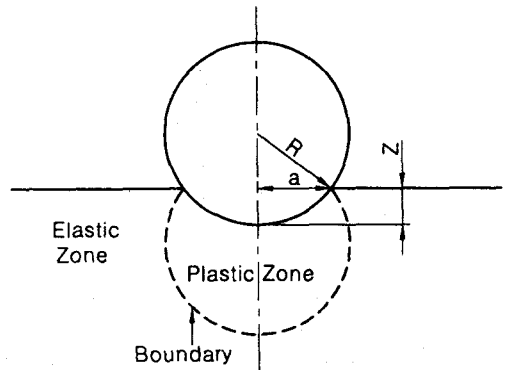


Fig. 1 Schematic of elastic-plastic boundary below the contact zone

$$a^2 + (R - Z)^2 = R^2 \quad (2)$$

$$a^2 = 2RZ \quad (3)$$

쇼트볼이 충돌한 후 최대깊이  $Z$  위치에서는 속도가 0이 되며 이때의 가속도는 쇼트볼의 충돌직전 속도  $v$ 를 써서 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{v^2}{2Z} \quad (4)$$

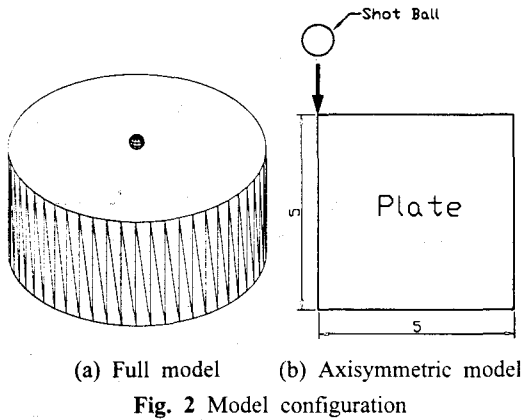
따라서, 식 (3)과 식 (4)를 식 (1)에 대입하여 식 (5)와 같이 쇼트볼 충돌시 소성변형으로 인하여 발생하는 압흔의 깊이를 구할 수 있으며, 이 값을 다시 식 (3)에 대입하여 압흔의 크기를 구할 수 있다.

$$Z = R \sqrt{\frac{\rho v^2}{3p}} \quad (5)$$

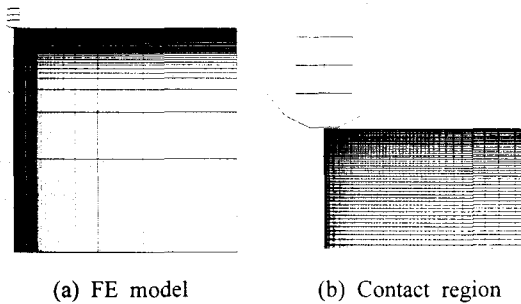
## 3. 유한요소해석

### 3.1 해석모델 및 방법

일반적으로 쇼트피닝은 재료 표면 전체에 대하여 1회 피닝한 경우인 100% 커버리지 조건을 많이 적용한다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 2(a)와 같이 원형 평판에 쇼트볼이 1회 충돌하는 모델을 설정하고, 이와 같은 모델에서 생성된 잔류응력 층이 전 표면에 걸쳐 분포하는 것으로 가정하였다. 여기서 원형 평판은 해석시간을 줄이기 위하여 Fig. 2(b)와 같이 축대칭 모델로 설정하여 유한요소망을 구성하였으며 전체 요소 수는 축대칭 요소(axisymmetric element) 3600개, 절점 수는 3722개이다. 또한, 쇼트볼은 피닝재료에 비하여



(a) Full model (b) Axisymmetric model  
**Fig. 2 Model configuration**



(a) FE model (b) Contact region  
**Fig. 3 Axisymmetric finite element model for shot peening analysis**

강도가 매우 크기 때문에 강체요소(rigid element)를 사용하였으며, 쇼트볼의 무게중심 위치에 볼의 질량과 동일한 질량요소(mass element)를 적용하고, 쇼트볼 무게중심 위치의 절점을 기준절점(reference node)으로 설정하여 이 기준절점의 운동에 따라 강체요소와 질량요소가 함께 운동하도록 하였다. 특히, 쇼트볼과 충돌하는 부분의 요소는 매우 미소하게 요소망을 구성하였으며 쇼트볼이 평판에 파고들지 못하도록 평판의 상면과 쇼트볼 표면은 접촉 처리를 하였다.

한편, 쇼트볼의 충돌은 수  $\mu\text{s}$  정도의 매우 짧은 시간에 발생하기 때문에 쇼트볼과 평판사이의 마찰은 무시하였으며, 두 물체사이의 미끄럼은 없는 것으로 하였다. 이와 같은 상태에서 쇼트볼이 수직으로 충돌한 후 다시 반발하여 올라가는 거동을 일으키도록 하고, 쇼트볼의 직경과 속도를 변화시켜가면서 압흔의 크기 및 잔류응력 분포에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

평판에 사용된 재질은 자동차부품에서 널리 사용되고 있는 SAE1045로서 응력-변형을 선도 관

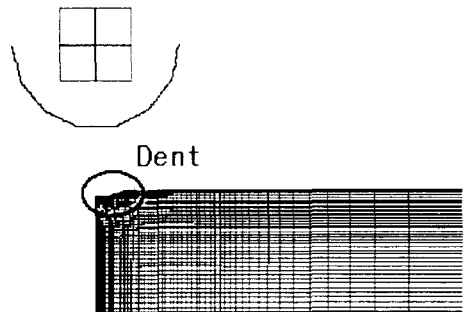
**Table 1** Monotonic properties of SAE1045<sup>(9)</sup>

Yield stress (MPa)	Strain hardening exponent n	Strength coefficient K (MPa)	True fracture stress (MPa)
380	0.23	1185	985

련 물성치는 Table 1에 나타내었으며, 탄성계수(Young's modulus) E는 205GPa, 푸아송 비(Poisson's ratio)  $\nu$ 는 0.3을 적용하였다. Fig. 3(a)는 본 해석에 사용된 전체 유한요소망을 나타낸 것이며, Fig. 3(b)는 쇼트볼 접촉부분을 자세히 보인 것이다. 본 연구에 사용한 프로그램으로는 모델링에 PATRAN Ver. 7.0을, 유한요소해석에 ABAQUS Ver. 5.8을 사용하였다.

### 3.2 해석모델 검증

본 해석에서 사용한 유한요소망의 타당성을 검증하기 위하여 쇼트볼 충돌시 소성변형으로 인해 재료 표면에 발생하는 압흔의 깊이 및 크기를 이론치와 비교하였다. 압흔의 깊이 및 크기의 이론치는 먼저, 식 (5)에 쇼트볼의 밀도, 속도, 반경 및 평판재료의 항복강도를 대입하여 압흔 깊이를 구하고, 식 (3)을 이용하여 압흔의 크기를 계산하였다. Fig. 4는 직경이 0.6mm, 속도가 45m/s인 쇼트볼의 충돌이 일어나고 24.5 $\mu\text{s}$ 가 경과된 후의 해석결과로서 쇼트볼 충돌시 재료 표면에서 극부적으로 항복을 초과하는 소성변형이 발생하여 쇼트볼이 반발한 이후에도 잔존하는 압흔이 생긴 것을 알 수 있다. 이 압흔의 크기와 깊이를 쇼트볼의 충돌속도의 변화에 따라 나타낸 것이 Fig. 5와 Fig. 6이다. Figs. 5~6에서 압흔의 깊이와 크기는 쇼트볼의 충돌속도에 비례하여 증



**Fig. 4** Dent after shot ball impact (shot diameter=0.6mm, shot velocity=45m/s)

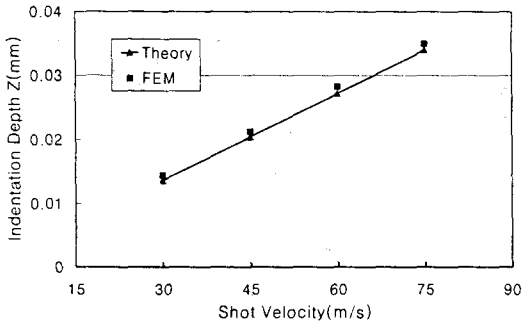


Fig. 5 Comparison between theoretical and analysed results in dent depth Z according to shot velocity (shot diameter=0.6mm)

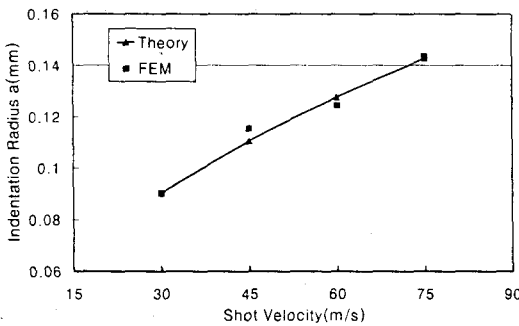


Fig. 6 Comparison between theoretical and analysed results in dent radius a according to shot velocity (shot diameter=0.6mm)

가하며, 압흔의 반경은 깊이보다 4~5배정도 크게 발생하였다. 또한 해석결과를 이론치와 비교하였을 때 오차가 5% 이내로 비교적 잘 일치하였다.

#### 4. 해석결과 및 고찰

##### 4.1 쇼트볼의 운동

쇼트볼이 재료 표면에 고속으로 충돌하는 동안 쇼트볼의 운동과 잔류응력의 생성 과정에 대하여 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7은 쇼트볼이 충돌을 시작하면서부터 다시 반발하여 올라갈 때까지 쇼트볼 속도의 변화를 나타낸 것이다. 충돌시작 속도는 45m/s이며 충돌이 진행되면서 점차 속도가 감소하여 0.8 $\mu$ s에 속도가 0이 된다. 따라서, 쇼트볼은 충돌 후 0.8 $\mu$ s부터 반발하여 올라가기 시작

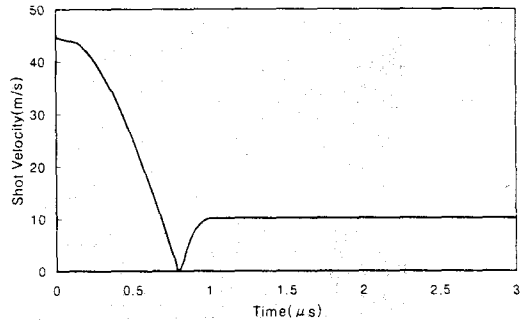


Fig. 7 The time history of the shot velocity (shot diameter=0.6mm, shot velocity=45m/s)

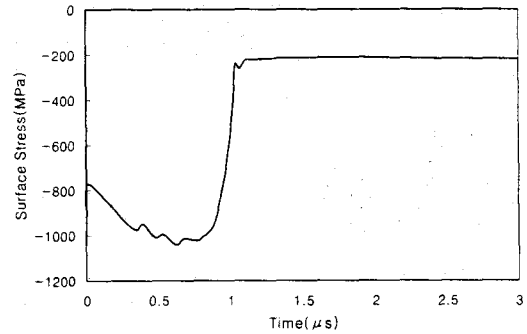


Fig. 8 The time history of the surface stress at the central point on the dent surface (shot diameter=0.6mm, shot velocity=45m/s)

하며, 반발 후 1.06 $\mu$ s에는 쇼트볼이 재료표면에서 완전히 이탈하여 10.21m/s의 일정속도를 유지한다. 여기서 쇼트볼의 운동에너지는 속도의 제곱에 비례하기 때문에 충돌전 속도인 45m/s와 충돌 후 반발 속도인 10.21m/s로부터 운동에너지를 비교해보면 쇼트볼의 총 운동에너지의 약 80%가 소성변형을 발생시키는데 사용되었음을 알 수 있다.

Fig. 8은 쇼트볼 충돌 과정 중에 압흔의 중심점 위치에서의 표면응력을 시간 변화에 따라 나타낸 것이다. 표면에서의 응력은 쇼트볼이 충돌하는 동안 순간적으로 항복강도보다 2.7배 정도 큰 응력이 발생하며, 쇼트볼이 반발되어 올라간 후에 표면에는 항복강도의 50% 정도 되는 일정한 크기의 압축잔류응력이 남아 있음을 알 수 있다.

##### 4.2 잔류응력 분포

본 연구에서는 쇼트피닝 파라미터중 쇼트볼 속

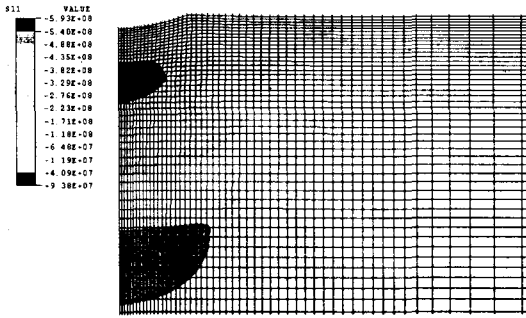


Fig. 9 Stress contour distribution after shot peening (shot diameter=0.6mm, v=45m/s)

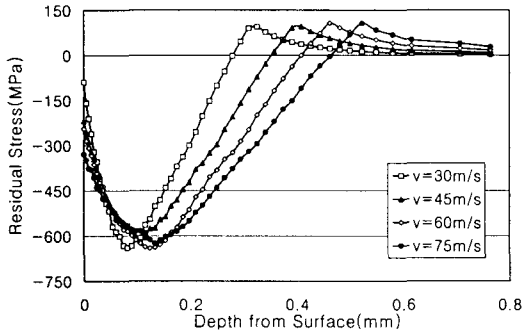


Fig. 10 Residual stress distribution for different shot velocity (shot diameter=0.6mm)

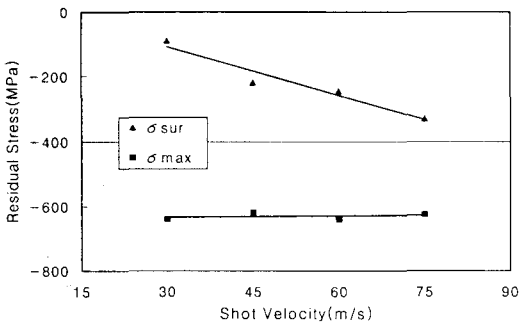


Fig. 11 Surface residual stress and maximum residual stress distributions for different shot velocity (shot diameter=0.6mm)

도와 직경의 변화에 따른 잔류응력 분포에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 9는 쇼트피닝 후 쇼트볼이 충돌한 바로 아래 부분의 잔류응력 분포를 나타낸 것으로서 잔류응력은 표면에서부터 압축잔류응력이 분포하며 표면 바로 아래에서 최대 압축잔류응력이 나타나고, 크기가 점점 줄어들어 인장잔류응력으로 변하고 있다. 일반

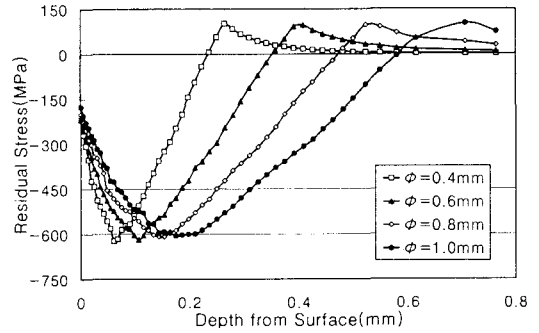


Fig. 12 Residual stress distribution for different shot diameter (shot velocity=45m/s)

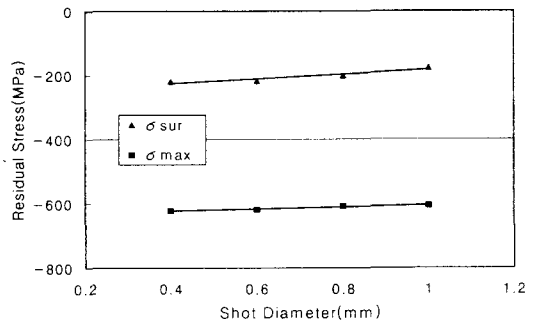


Fig. 13 Surface residual stress and maximum residual stress distributions for different shot diameter (shot velocity=45m/s)

적으로 쇼트피닝 처리한 재료는 표면 잔류응력과 최대 압축잔류응력이 크며, 압축잔류응력층이 깊고 최대 압축잔류응력의 위치가 표면에 가까울수록 피로수명이 증대된다.<sup>(10)</sup> 따라서, Fig. 9와 같은 잔류응력 분포에서 잔류응력의 크기와 위치를 파악하면서 쇼트피닝 파라미터를 조절하여 최적의 쇼트피닝 조건을 결정할 수 있다.

Fig. 10은 쇼트볼의 속도 변화에 따른 잔류응력 분포를 나타낸 것이며, Fig. 11은 Fig. 10에서 표면 잔류응력  $\sigma_{sur}$ 와 최대 압축잔류응력  $\sigma_{max}$ 를 쇼트볼 속도에 따라 나타낸 것이다. Fig. 10에서 쇼트볼의 속도가 증가할수록 압축잔류응력층이 더 깊어지며, Fig. 11에서 표면 잔류응력은 쇼트볼의 속도에 비례하여 증가하는 반면, 최대 압축잔류응력은 쇼트볼의 속도가 증가하여도 거의 변하지 않고 그 위치만 변한다. 따라서, 쇼트볼의 속도는 표면 잔류응력의 크기에는 크게 영향을 미치지 않지만 최대 압축잔류응력의 크기에는 거의 영

향을 미치지 않음을 알 수 있으며, 이와 같은 결과는 渡邊吉弘 등<sup>(3)</sup>의 연구결과와도 일치하는 것이다.

Fig. 12와 Fig. 13은 쇼트볼의 크기가 잔류응력 분포에 미치는 영향을 파악하기 위한 것으로서, Fig. 12는 쇼트볼 직경 변화에 따른 잔류응력 분포를 나타낸 것이며, Fig. 13은 Fig. 12에서 표면 잔류응력  $\sigma_{sur}$ 와 최대 압축잔류응력  $\sigma_{max}$ 를 쇼트볼 직경에 따라 나타낸 것이다. Fig. 12에서 쇼트볼 직경이 커질수록 인장잔류응력이 나타나기 시작하는 위치와 최대 압축잔류응력의 위치가 더 깊어지며, Fig. 13에서 쇼트볼 직경이 증가함에 따라 표면 잔류응력은 오히려 감소하는 경향이 나타나고 있다. 또한, 최대 압축잔류응력의 크기도 쇼트볼 직경이 증가함에 따라 약간씩 감소하는 경향이 나타나고 있다.

결과적으로 쇼트볼의 속도와 크기는 표면 잔류응력의 크기 및 압축잔류응력층의 깊이에는 크게 영향을 미치지 않지만, 최대 압축잔류응력에 미치는 영향은 미약하며 단지 그 위치만을 변화시킨다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 쇼트볼의 속도 및 크기가 변하는 경우 잔류응력 분포를 예측하기 위하여 유한요소해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 쇼트볼의 속도 및 직경이 증가할수록 압축 잔류응력층의 깊이가 증가하며, 최대 압축잔류응력도 더 깊은 위치에서 발생한다.
- (2) 쇼트볼의 속도가 증가함에 따라 표면에서의 압축잔류응력의 크기는 증가하며, 최대 압축잔류응력의 크기는 거의 변하지 않는다.
- (3) 쇼트볼의 직경이 커질수록 표면에서의 압축 잔류응력의 크기는 감소하며, 최대 압축잔류응력의 크기도 약간 감소한다.
- (4) 축대칭 모델을 이용한 본 연구의 해석방법 및 결과는 다만 쇼트피닝이나 파쇄된 쇼트볼에 의한 잔류응력 분포의 예측에도 유사하게 적용시킬 수 있을 것이다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Meguid, S. A., 1990, *Surface Engineering*, Elsevier Applied Science, London and New York, pp. 371~442.
- (2) Al-Obaid, Y. F., 1990, "A Rudimentary Analysis of Improving Fatigue Life of Metals by Shot-Peening," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, pp. 307~312.
- (3) 渡邊吉弘, 長谷川典彦, 松村義和, 1995, "ショットピーニングによる残留應力分布のシミュレーション," *材料*, 44巻, 496号, pp. 110~115.
- (4) Fathallah R., Inglebert, G., Castex, L., 1998, "Prediction of Plastic Deformation and Residual Stresses induced in Metallic Parts by Shot Peening," *Materials Science and Technology*, Vol 14, pp. 631~639.
- (5) 이종규, 김정규, 1997, "피로강도 및 수명에 미치는 Shot Peening에 의한 잔류응력의 영향," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제9호, pp. 1498 ~1506.
- (6) Levers, A., 1998, "Finite Element Analysis of Shot Peening," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 304~308.
- (7) Schiffner, K., Droste gen. Helling, C., 1999, "Simulation of Residual Stresses by Shot Peening," *Computers and Structures*, Vol 72, pp. 329~340.
- (8) Muguide, S. A., Shagal G., Stranart J. C., 1999, *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 401~404.
- (9) Leese, G. E., Socie, D., 1989, *Multiaxial Fatigue : Analysis and Experiments*, SAE Inc., Warrendale, pp. 16~17.
- (10) 三林雅彦, 宮田隆司, 相原秀雄, 1995, "ショットピーニング材の疲労強度推定と最適處理條件の検討," *日本機械學會論文集(A編)*, 61巻, 586号, pp. 1172~1178.