

## 다중 충돌의 영향을 고려한 쇼트피닝의 유한요소해석

김태준\* · 김낙수\* · 박순철\*\* · 정원욱\*\*  
(2002년 5월 27일 접수, 2002년 10월 21일 심사완료)

### Finite Element Analysis of Shot Peening Effected by Multiple Impacts

Taejoon Kim, Naksoo Kim, Soon Cheol Park and Won Wook Jeong

**Key Words:** Shot Peening(쇼트피닝), Residual Stress(잔류응력), Finite Element Method(유한요소법), Multiple Impacts(다중 충돌)

#### Abstract

Multiple impact models to examine the effect of stress interference are proposed and investigated. The single shot model analysis, which used various shot ball conditions, was carried out to compare with multiple impacts analysis. Then the multiple impact analysis were performed to predict the effect of the shot ball distances. The results showed that the stress interference in the multiple impact model significantly reduced the maximum value of the compressive residual stresses. The residual stress profiles were strongly effected by the shot ball distances. The multiple impact model can simulate a realistic shot peening process rather than a single shot model does. It is concluded that the proposed model predicts the real process more accurately.

#### 1. 서론

쇼트피닝 가공은 기계 부품의 피로 수명 개선을 위하여 폭넓게 사용되고 있는 방법이다. 쇼트피닝은 대상의 표면에 작은 쇼트볼을 충돌, 소성변형에 의한 압축 잔류응력 분포를 생성하여 반복적으로 가해지는 인장응력을 상쇄시켜 피로수명을 증대시킬 수 있다. 그렇기 때문에 쇼트피닝 조건들이 바뀌었을 때 쇼트피닝된 부품의 압축잔류응력 분포 변화를 예측하는 것은 매우 중요하다. 지금까지는 Al-Obaid<sup>(7)</sup>의 이론적인 방법이나,

Murakami<sup>(2)</sup> 등의 실험적인 방법들이 많이 연구되어 왔다. 그러나 이러한 압축잔류응력 분포를 예측하기 위해서 사용되고 있는 X선 회절법, 중성자법 같은 실험적 방법들은 많은 비용과 시간이 소요된다는 문제점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 극복하기 위하여 최근에는 유한요소법을 이용한 해석이 많이 수행되고 있다. Meguid,<sup>(3)</sup> 김철,<sup>(4)</sup> Schiffner<sup>(5)</sup> 등은 쇼트볼 1개와 소재간의 충돌의 탄소성 동적 해석을 실시하였고, Levers<sup>(6)</sup> 등은 열부하를 가하는 방법으로 쇼트피닝에 의한 잔류응력 형태를 해석에 반영하였다. 또한 Guagliano<sup>(7)</sup>의 경우 쇼트볼과 소재간의 충돌 해석 결과를 알멘 강도(Almen Intensity)로 정량화하였다. 일반적인 쇼트피닝은 피닝재료 전체에 대해 1회만 피닝한 100% 커버리지가 많이 사용되기 때문에 대부분의 유한요소해석 연구가 하나의 쇼트볼이 피닝재료에 충돌하는 경우를 해석하였으나, 이는 다중 충돌에 의한 응력 변화

---

\* 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과  
E-mail : nskim@ccs.sogang.ac.kr  
TEL : (02)705-8635 FAX : (02)712-0799  
\* 서강대학교 대학원 기계공학과  
\*\* (주)현대자동차

현상을 고려하지 못하고 있다. Murakami<sup>(2)</sup> 등은 이러한 부분에 주목하여 실험적으로 강철구를 판재에 떨어뜨리며 잔류응력 분포의 변화를 관찰하였다. 그러나 이 방법은 실제의 쇼트피닝에 적용이 불가능하며 단지 경향만을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 여러 개의 쇼트볼을 이용한 유한요소 다중 충돌 모델을 제시하여 보다 정확한 쇼트피닝 해석결과를 예측하고자 하였다.

### 2. 유한요소모델링

유한요소망은 I-DEAS 7.0를 이용하여 모델링되었으며, 원통의 면대칭형(plane symmetry) 절반 모델(half model)로 Fig. 1과 같고 요소수는 47,538개, 절점수는 51,252개이다. 본 연구에서는 다중 충돌 시의 쇼트볼의 위치를 조절하기 위하여 축대칭 모델이 아닌 면대칭 모델을 사용하였다. 적절한 계산 시간을 유지하면서 경계조건으로부터의 간섭을 피하고 정확성과 안정성을 높이기 위하여 2방향의 최하단부 요소는 무한요소(Infinite element)를 사용하였다. 무한요소는 유한요소모델의 경계조건을 정숙하게(quiet)하고, 유한요소모델로의 에너지 반사를 최소화해준다. 여기에서는 ABAQUS에서 제공하는 CIN3D8 요소를 사용하였다. 쇼트볼은 피닝재료에 비해 변형이 거의 없기 때문에 강체 요소를 사용하였다. 그리고 쇼트볼과 피닝재료와의 마찰계수는 0.1과 0.0의 두 가지 값을 상황에 따라 사용하였다. 또한 쇼트볼이 피닝재료를 파고들지 못하도록 접촉처리를 하였다.

해석에 사용된 피닝재료는 자동차용 판형 스프링의 재료인 SUP9이며, 인장시험을 통해 얻은 응력-변형률 곡선(Fig. 2)을 이용하여 재료의 소성 거동을 해석에 반영하였다. 재료의 탄성계수(Elastic Modulus)는 Fig. 2의 탄성역에서 구한 232GPa을, 포아송비는 0.3을 사용하였다. 재료의 물성치는 Table 1에 정리하였다.

### 3. 유한요소 해석 결과

#### 3.1 1회 충돌 해석

우선, 쇼트볼의 충돌속도 및 크기가 잔류응력 및 압흔에 미치는 영향을 살펴보고자 1회 충돌에 대한 유한요소해석을 실시하였다. 해석에서는

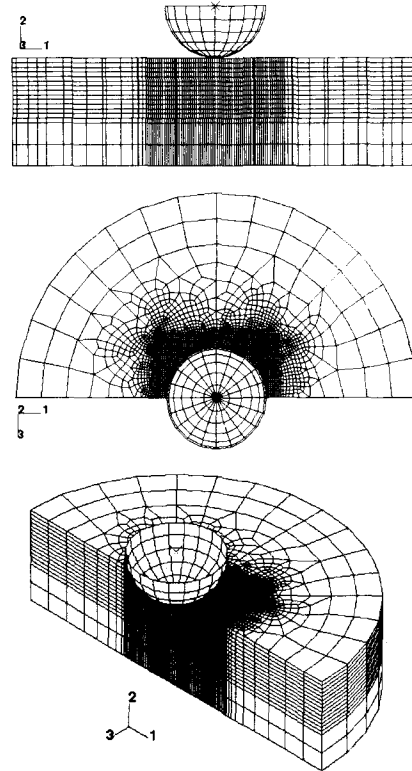


Fig. 1 Symmetric finite element model

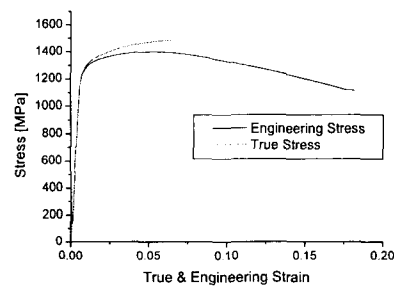


Fig. 2 Stress-strain relationships of SUP9

Table 1 Material properties of SUP9

Yield Stress [MPa]	Strain Hardening Exponent, n	Strength Coefficient, K [MPa]	True Fracture Stress [MPa]
1176	0.06	1764	1703

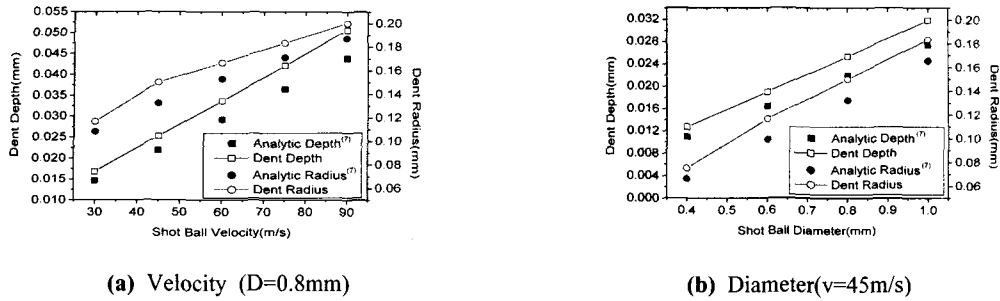


Fig. 3 Dent radius and depth

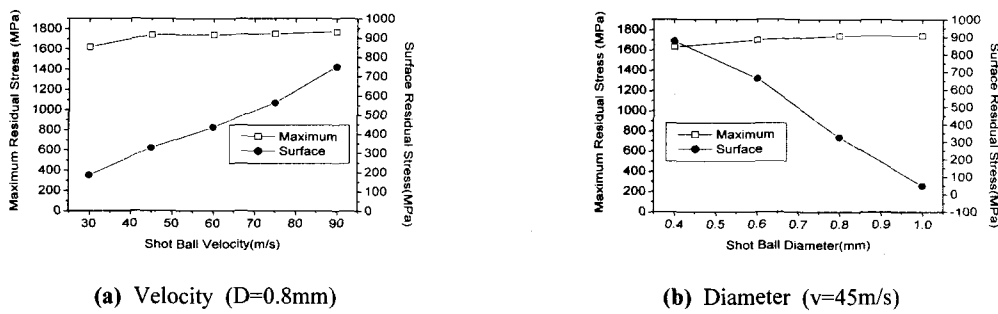


Fig. 4 Maximum and surface residual stresses

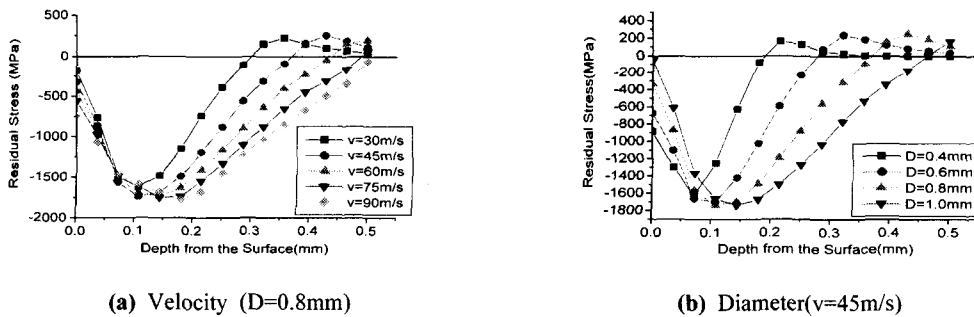


Fig. 5 Residual stress profiles with friction coefficient,  $\mu=0.1$

Fig.1에 나타난 형상과 같이 피닝재료의 중앙부에 1회 충돌하는 경우를 가정하였다. 쇼트볼의 직경  $D=0.4, 0.6, 0.8, 1.0\text{mm}$ , 속도  $30, 45, 60, 75, 90\text{m/s}$ 에 대해 각각 해석하였으며 마찰계수는  $0.1$ 을 사용하였다. 잔류응력 분포는 피닝재료의 중심축 값을 사용하였다.

Fig. 3(a)는 쇼트볼의 속도가, Fig. 3(b)는 쇼트볼의 직경이 변화함에 따른 압흔의 깊이와 반경을 보여주고 있으며, 비교한 이론해는 Al-Obaid<sup>(7)</sup>가 정의한 식을 사용하였다. 해석결과는 이론해에 비해 큰 값을 보여주고 있는데 이는 1회 충돌의 경우는 실제와 달리, 다중 충돌에 따른 변형

경화에 의한 압흔의 크기 감소를 고려하지 못했기 때문으로 보인다.

Fig. 4(a)와 (b)는 각각 쇼트볼의 속도와 직경이 변화함에 따른 최대압축잔류응력과 표면압축잔류응력의 크기를 보여주고 있다. Fig. 5(a)은 쇼트볼의 속도변화에 따른, Fig. 5(b)는 쇼트볼의 직경의 변화에 따른 1회 충돌시의 표면으로부터의 깊이에 따른 잔류응력 분포이다. 경향을 살펴보면 Fig. 3, 4, 5로부터 쇼트볼의 속도가 증가할수록 압흔의 깊이와 반경, 잔류응력 분포의 깊이 그리고 표면압축잔류응력이 모두 증가함을 알 수 있다. 하지만 최대압축잔류응력의 크기는 그 차이

가 크지 않다. Fig. 3, 4, 5로부터는 쇼트볼의 직경이 증가함에 따라 압흔의 깊이와 반경, 잔류응력 분포의 깊이는 증가하나, 표면압축잔류응력은 감소함을 알 수 있으며, 최대압축잔류응력의 경우에는 차이가 크지 않다. 이러한 점으로 미루어 볼 때, 쇼트볼의 직경과 속도를 크게 하는 것은 최대압축잔류응력에서 큰 효과를 거둘 수 없으며

오히려 압흔의 크기가 지나치게 커져 표면정도에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있음을 추론할 수 있다. 하지만 잔류응력 분포의 깊이가 중요한 요소일 경우에는 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다.

마찰계수를 0.0으로, 즉 무마찰조건을 사용하였을 경우에는 Fig. 6과 같은 결과를 보여주고 있다. 무마찰조건인 경우에는 마찰로 인한 접촉압력이 감소하면서 최대압축잔류응력이 감소하는 것으로 보이며, 표면압축잔류응력은 마찰로 인한 표면에서의 장력이 줄어들면서 증가하는 것으로 보인다. 쇼트볼이 쇼트재료에 90도로 충돌하는 경우에는 상대운동이 매우 적기 때문에 임의의 마찰계수를 주는 것보다 무마찰조건이 해석에는 좀더 적합하다고 판단된다. 하지만 이점을 고려하더라도 잔류응력의 크기는 여전히 일반적인 관찰값보다 매우 큰 값을 보여줌을 알 수 있다. 이로부터 1회 충돌에 의한 해석으로 잔류응력의 경향성은 파악할 수 있으나 잔류응력의 크기를 예측하기에는 부적절함을 알 수 있다.

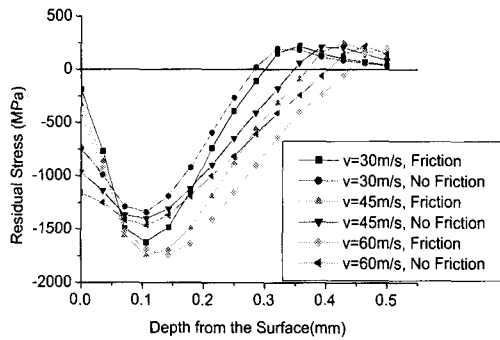
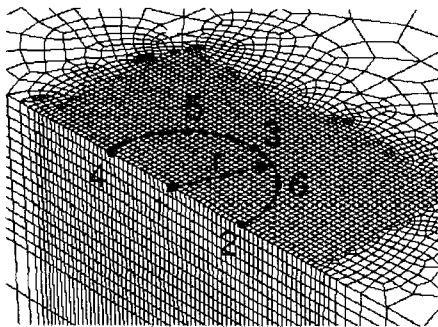
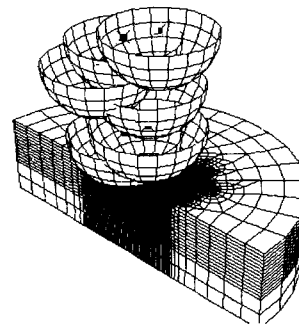


Fig. 6 Residual stress profiles with two different friction conditions,  $\mu=0.1$  and  $\mu=0.0$

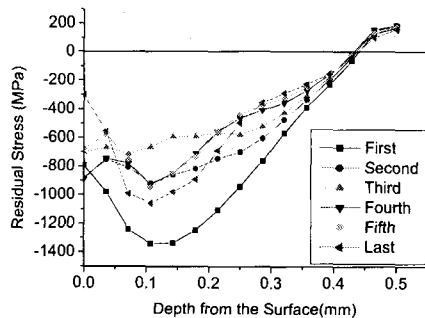


(a) Order of impacts

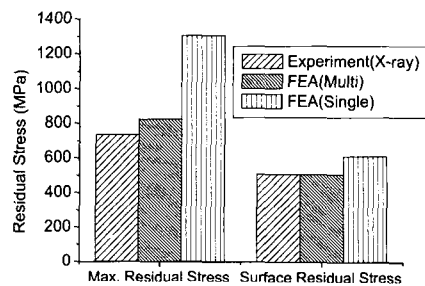


(b) Position of shot balls

Fig. 7 Impact sequence of shot balls in multiple impacts model



(a) Residual stress profiles after each impact



(b) Comparison with experiment

Fig. 8 Residual stresses of multiple impacts model

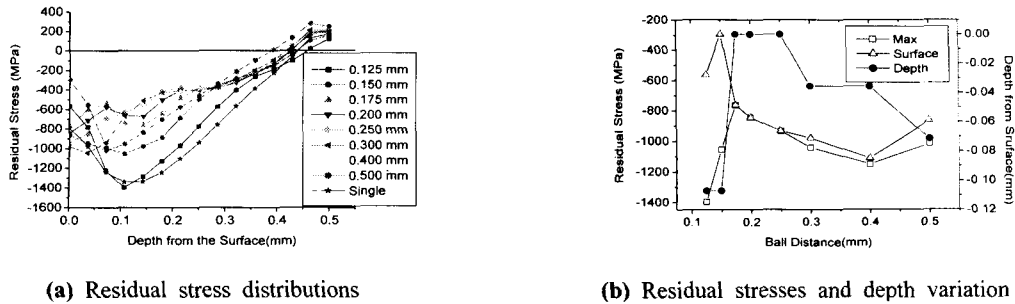


Fig. 9 Effects of shot distance,  $r$ , in multiple impacts model

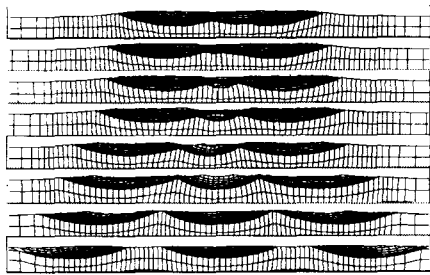


Fig. 10 Deformed surfaces of workpiece with various shot distances at the symmetric plane

3.2 다중 충돌 해석

다중 충돌 해석은 총 6개의 쇼트볼을 충돌하여 실시하였으며 쇼트볼의 속도는 45m/s로 고정하였다. 이는 단일 충돌 시 45m/s 이후로 최대압축잔류응력의 변화가 매우 적었기 때문이다. 또한, 최초로 충돌하는 쇼트볼에서 일정한 거리만큼 떨어진 곳에서 후속충돌이 일어난다고 가정하였다.

Fig. 7은 다중 충돌의 유한요소 해석에 사용된 쇼트볼의 충돌순서와 위치를 보여주고 있다. 충돌순서는 각 위치에 충돌하는 쇼트볼의 초기 높이를 각기 다르게 주어 결정하였다. “쇼트볼 간의 거리”에 해당하는 반경  $r$ 은 최초 충돌이 일어난 피닝재료의 중심으로부터 후속 충돌지점의 쇼트볼 중심까지의 거리이다. 5, 6번째 위치는 4-1-2 선과 각각 45도의 위치로 가정하였다. 마찰조건은 위에서 언급한 바와 같이 무마찰조건을 사용하였다.

Fig. 8(a)는 직경이 1.0mm,  $r=0.150$ mm인 경우에 각 쇼트볼의 충돌에 따른 잔류응력 분포의 변화를 보여준다. 1회 충돌과 같은 상황인 첫번째 충돌의 경우 최대압축잔류응력의 크기는 1340MPa

이지만, 최종 충돌 후의 최대압축잔류응력의 크기는 1057MPa 정도로 처음 값의 약 78% 정도를 보여주고 있다. 2회 충돌부터 최대압축잔류응력의 감소가 급격히 이뤄지고 또한 표면압축잔류응력도 많은 영향을 받게 됨을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)는 김기전<sup>(8)</sup> 등의 X-선 회절법에 의한 실험값과의 비교로, 다중 충돌의 경우 최대압축잔류응력의 크기는 12% 정도 크고, 표면압축잔류응력은 거의 일치하고 있다. 그러나 1회 충돌의 경우 최대압축잔류응력은 77%, 표면압축잔류응력은 20% 가량 큰 값을 보여주고 있다.

1회 충돌과 달리 다중 충돌 해석 시에는 쇼트볼 간의 거리가 매우 중요하다. Fig. 9는 쇼트볼의 속도 45m/s, 직경 1.0mm의 경우에서 쇼트볼 간의 거리만을 바꿔가며 해석한 결과이다. Fig. 9(b)에서 알 수 있듯이 거리가 아주 근접한 경우에는 다단 쇼트피닝의 효과<sup>(9)</sup>와 비슷한 최대압축잔류응력의 증가가 나타나고 있다. 쇼트볼이 압흔의 가장자리에 걸치며 떨어지는 경우에는 심한 소성변형이 이루어진 내부측과 변형이 크지 않은 외부측간의 영향으로 표면에서의 압축잔류응력이 최대값이 되는 것을 알 수 있다. 겹치는 부분이 없을 만큼 쇼트볼 간의 거리가 멀어질 경우에는, 서로간의 응력간섭 현상이 감소하기 때문에, 1회 충돌 시와 비슷한 잔류응력 분포로 변해감을 알 수 있다. 다중충돌모델의 해석결과를 1회 충돌결과와 비교하면 대부분 1회 충돌 때보다 작은 잔류응력값을 보이고 있다.

Fig. 10은 Fig. 9의 각각의 경우에 대해 대칭면에서의 변형 형상을 순서대로 나타낸 것이다. 쇼트볼 간의 거리가 근접할수록, 누적되는 소성변형으로 인하여, 압흔의 깊이가 깊음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 일반적으로 사용되는 1회 충돌을 이용하여 쇼트볼의 조건에 따른 잔류응력의 경향성을 파악하고, 다중 충돌에 의한 응력 변화를 고려한 모델을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 쇼트볼의 속도가 증가하면 압흔의 반경, 깊이, 표면압축잔류응력의 크기 등이 모두 증가하나, 최대압축잔류응력의 크기는 일정속도 이상에서는 크게 변화하지 않는다. 그리고 쇼트볼의 크기가 커지면 압흔의 반경, 깊이도 증가하며, 표면 압축잔류응력의 크기는 감소한다. 또한 쇼트볼의 속도와 크기가 증가할수록 잔류응력 분포와 최대 압축잔류응력의 위치가 깊어진다.

(2) 다중 충돌에 의한 해석은 각 충돌간의 응력 간섭에 의한 잔류응력 분포의 변화를 예측할 수 있으며, 쇼트볼의 속도와 크기뿐만이 아닌 쇼트볼 간의 거리, 충돌 순서 등에 의한 변화 예측이 가능하다. 특히 1회 충돌에 의한 과장된 최대 잔류응력값이 아닌 응력 변화 후의 실질적인 값을 얻을 수 있다.

(3) 다중 충돌 해석 시 쇼트볼 간의 거리는 잔류응력 분포에 큰 영향을 끼친다. 압흔의 경계에 쇼트볼이 충돌할 경우 표면압축잔류응력에 큰 영향을 주며, 최대압축잔류응력이 표면으로 이동하는 경향을 보인다. 압흔 간의 간격이 멀어지면 상호간의 간섭은 감소한다.

후 기

본 연구는 (주)현대자동차와 서강대학교 산업기술연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

(1) 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.

(2) Murakami, Y., Kobayashi, M., and Matsui, T., 1998, "Mechanism of Creation of Compressive Residual Stress by Shot Peening," *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, No. 5, pp. 351~357.

(3) Meguid, S.A., Shagal, G., and Stranart, J.C., 1999, "Finite Element Modelling of Shot-Peening Residual Stresses," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, pp. 401~404.

(4) Kim, C., Yang, W., Sung, K., and Ko, M., 2001, "Finite Element Analysis for Prediction of Residual Stresses Induced by Shot Peening," *Transactions of the KSAE*, Vol. 9, No. 1, pp. 198~204.

(5) Schiffner, K., and Helling, C., 1999, "Simulation of Residual Stresses by Shot Peening," *Computers & Structures*, Vol. 72, pp. 329~340.

(6) Levers, A., and Prior, A., 1998, "Finite Element Analysis of Shot Peening," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80-81, pp. 304~308.

(7) Guagliano, M., 2001, "Relating Almen Intensity to Residual Stresses Induced By Shot Peening: A Numerical Approach," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 110, pp. 277~286.

(8) Kim, K., Kim, T., and Park, S., 2000, Effect of the Fatigue Life in Leaf Spring by Stress Peening," *Proceeding of Shot Peening Tech. Conference for Industrial-Educational Cooperation*, pp. 82~90.

(9) Lee, S.H., and Kim, H.S., 1999, "The Effect of 2-Step Shot Peening on the Fatigue Behavior of Spring Steel," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 23, No. 1, pp. 140~147.

(10) Cheong, S.K., Lee, S.H., and Chung, S.C., 2001, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1590~1596.

(11) Al-Obaid, Y.F., 1990, "Three-Dimensional Dynamic Finite Element Analysis for Shot-Peening Mechanics," *Computers & Structures*, Vol. 36, No. 4, pp. 681~689.