

단일 쏠 충돌시 피닝잔류응력 유일해를 위한 2차원 유한요소해석 모델

김 태 형[†] · 이 형 일^{*}

(2007년 12월 11일 접수, 2008년 2월 28일 심사완료)

A 2D FE Model for Unique Solution of Peening Residual Stress in Single Shot Impact

Taehyung Kim and Hyungyil Lee

Key Words : Physical Behavior Factor(물리적 거동인자), Kinematical Peening Factor(운동학적 피닝 인자), Plastic Shot(소성쏠), Single Impact(단일충돌)

Abstract

In this paper, we propose a 2D-FE model in single impact with combined physical factors to obtain a unique residual stress by shot peening. Applied physical parameters consist of elastic-plastic deformation of shot ball, material damping coefficients, strain rate, dynamic friction coefficients. As a kinematical parameter, there is impact velocity. Single impact FE model consists of 2D axisymmetric elements. The FE model with combined factors showed converged and unique distributions of surface stress, maximum compressive residual stress and deformation depth. Further, in contrast to the FE models with rigid shot and elastic deformable shot, FE model with plastic deformable shot produces residual stresses very close to experimental solutions by X-ray diffraction. We therefore validated the 2D FE model with combined peening factors and plastic deformable shot. This FE model will be a base of the 3D FE model for residual stresses by multi-impact shot peening.

1. 서 론

잔류응력은 박막제조나 표면코팅, 그리고 기계 가공 및 열처리, 쏠피닝 및 레이저피닝 등에 의해 발생된다.⁽¹⁾ 잔류응력은 재료의 피로파괴 및 부식, 마모, 마찰 등에 큰 영향을 주는 주요 인자이므로 그 정량적 평가는 매우 중요하다. 쏠피닝 가공은 금속 재료 표면에 유익한 압축잔류응력을 발생시켜 부품의 피로수명을 향상시키는 기술로서 자동차, 발전설비, 항공우주 산업 등에서 전보다 활발히 활용되고 있다. 쏠피닝 잔류응력을 평가하기 위한 필수 인자로는 아크하이트와 피닝커버리지가 있다. 이들 인자

들은 SAE1070 스프링 강재로 얇게 만든 알멘스트립(Almen strip)을 사용함으로써 측정된다. 이때 아크하이트(arc height)는 쏠피닝 후 굽어진 알멘스트립의 만곡높이를 의미하며, 피닝커버리지(coverage)는 피닝 후 표면에 생성된 압흔의 밀집정도를 의미한다. 지금까지의 쏠피닝 잔류응력은 대체로 이론적 방법⁽²⁾ 들이나 실험방법⁽³⁾들에 의해 예측되어 왔다. 이 중에서 쏠피닝 잔류응력 측정을 위해 널리 사용되고 있는 X-선 회절, 중성자, 홀 드릴링과 같은 실험 방법들은 많은 비용과 시간을 필요로 한다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해 최근 유한요소법을 이용한 연구가 많이 수행되고 있다. Schiffner 등⁽⁴⁾은 쏠 한 개가 재료에 수직 충돌되는 탄소성 동적 거동해석을 실시했고, Levers 등⁽⁵⁾은 열하중을 가하는 방법으로 쏠피닝에 의한 압축잔류응력 형태를 해석에 반영하였다. 그러나 이들의 기존 해석연구들 대부분은 쏠 피닝 소재의 표면에 쏠 한 개가 충돌되는 경우를

[†] 책임저자, 회원, 서강대학교 대학원 기계공학과

E-mail : kthmax@sogang.ac.kr

TEL : (02)705-8636 FAX : (02)712-0799

* 회원, 서강대학교 기계공학과

100% 피닝 커버리지로 가정하여 잔류응력을 정리하고 있다. 따라서 수많은 쏫볼들의 무작위 충돌로 발생하는 응력간섭 효과가 전혀 고려되지 않았다. 최근에는 Majzoubi 등⁽⁶⁾과 Meguid 등⁽⁷⁾이 3차원 다중충돌 유한요소 대칭-셀 해석모델로부터 실제에 가까운 피닝 현상을 모사했다. Guagliano⁽⁸⁾는 제한된 국부위치에 대하여 다중충돌 해석을 수행한 후 알멘스트립의 잔류아크하이트와 유한요소 잔류응력해의 관계를 수치적으로 예측했다. 국내에서도 김태준 등⁽⁹⁾이 3차원 다중충돌 유한요소 잔류응력해를 구하였다. 그러나 이들 다중충돌 모델들은 실제 쏫피닝 현상에서 필수요소들인 알멘강도와 피닝커버리지가 일부 제한적으로만 고려되었다. 또한 쏫볼의 유한요소해석 모델들도 충돌시 변형이 없다고 가정한 강체 및 탄성체 모델들이 주로 사용됐다. 즉 실제 쏫피닝 잔류응력해 도출에 결정적 요소인 쏫볼의 소성거동이 고려되지 않았다. 또한 2차원, 3차원 해석모델들 대부분 재료가 고유로 지니는 물리적 인자들과 쏫피닝에 의한 운동학적 인자들 사이의 조합이 이뤄지지 않았다. 이로부터 본 연구에서는 기존 분리된 물리적 거동인자들과 운동학적 인자들을 통합하여 피닝잔류응력을 정량적으로 평가할 수 있는 유용한 2차원 단일충돌 해석모델을 제안한다.

2. 단일충돌 2차원 유한요소해석모델

단일충돌 해석모델에 반영된 재료의 물성들은 쏫피닝 공정에 많이 사용되는 AISI4340소재이다. 이 재료를 815°C에서 담금질 한 후 230°C에서 2시간 동안 뜨임 처리했다. 재료의 인장시험 물성치들로는 항복강도 $\sigma_0=1510\text{MPa}$, 인장강도 $\sigma_t=1860\text{MPa}$, 탄성계수 $E=205\text{GPa}$, 푸아송비 $\nu=0.25$, 밀도 $\rho=7850\text{kg/m}^3$ 이다. 쏫볼은 일반적으로 널리 사용되는 컷와이어 라운드 쏫(CWRS)을 모델로 선정하였다. 쏫볼의 인장시험 물성치들로는 항복강도 $\sigma_0=1470\text{MPa}$, 인장강도 $\sigma_t=1840\text{MPa}$, 탄성계수 $E=210\text{GPa}$, 푸아송비 $\nu=0.3$, 밀도 $\rho=7850\text{kg/m}^3$, 쏫볼 경도 = 670Hv이며, 직경 $D=0.8\text{mm}$ 이다. 쏫볼은 충돌시 변형이 없다 가정한 강체쏫(RS: Rigid shot), 변형을 고려한 탄성쏫(EDS: Elastic deformable shot) 및 소성쏫(PDS: Plastic deformable shot)을 고려했다. Fig. 1(a)는 재료의 항복강도로 무차원화된 진 응력-변형률 선도를, (b)는 충돌 후 쏫볼의 유효변형률 분포를 보여준다.

Fig. 2는 단일충돌 2차원 유한요소해석 모델을 보여준다. 본 해석에서는 상용 유한요소해석 프로

그램 ABAQUS⁽¹⁰⁾를 사용했고, 축대칭 4절점 감차적분요소 (CAX4R, ABAQUS)⁽¹⁰⁾를 사용하여 재료의 유한요소망을 구성하였다. 경계조건으로 바닥면을 완전구속 ($U_x=U_y=0$) 처리하였고, 축 중심은 폭 W 방향으로만 구속 ($U_x=0$) 처리하였다. 쏫볼의 초기 투사속도 v 는 쏫피닝 장비의 최대성능⁽¹¹⁾을 고려해 $v=75\text{m/s}$ 로 정하였다. 재료와 쏫볼의 충돌에 대해 페널티 알고리즘을 적용하여 접촉처리 하였다. 본 해석에 사용된 절점수는 약 3100개, 요소수는 약 3000개이다.

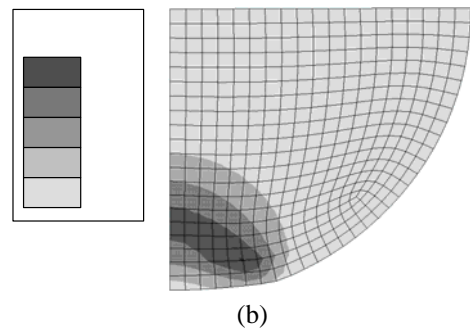
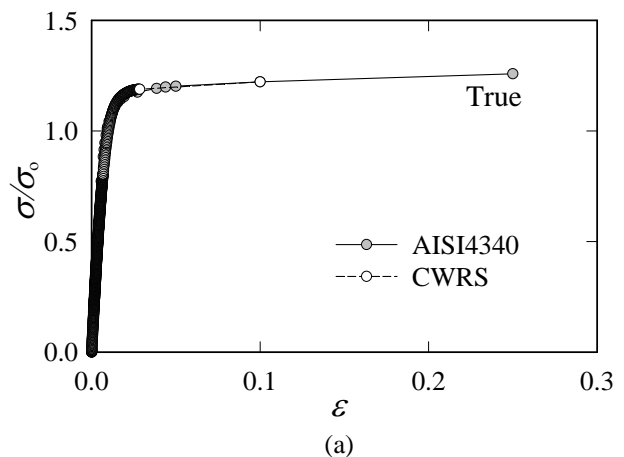


Fig. 1 Plastic properties for FEA and equivalent strain in a deformed shot

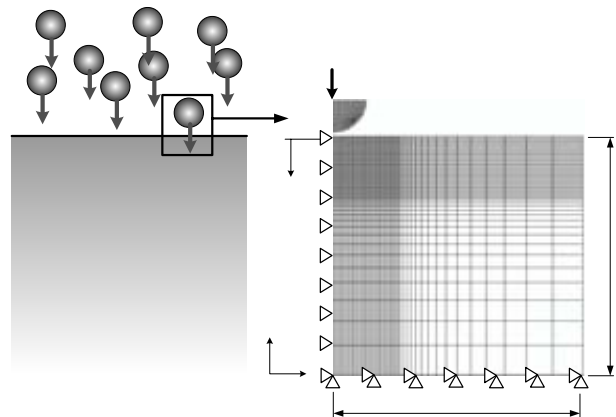


Fig. 2 FE model for single shot impact

3. 해석모델의 검증

Fig. 2에 표현된 2차원 단일충돌 유한요소해석 모델의 가장 적절한 반경 r 과 높이 h 를 Fig. 3으로부터 결정했다. 가로축 x 는 충돌 중심축으로부터 표면을 따라 반경 r 방향으로의 거리이며, y 는 충돌 중심축을 따라서 표면으로부터 깊이 d 방향으로의 거리이다. 세로축은 각 거리에서 재료의 항복강도

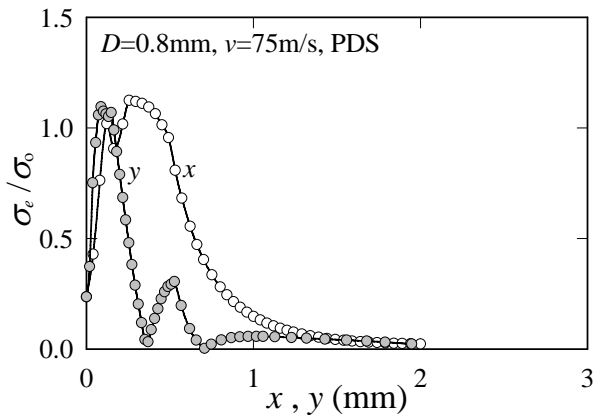


Fig. 3 Selection of FE model size

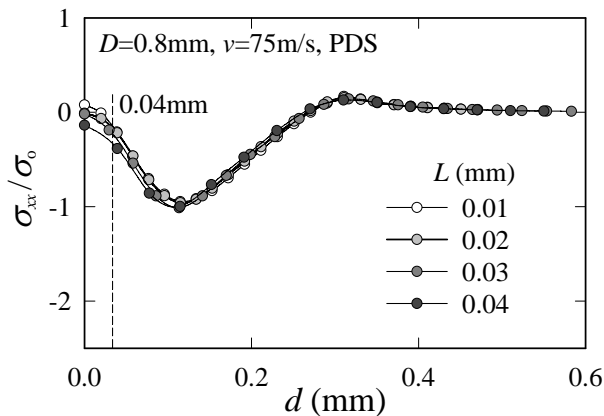


Fig. 4 Convergence of residual stresses for L

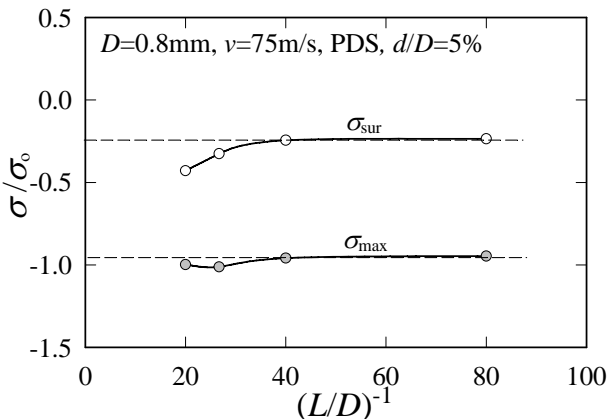


Fig. 5 Selection of minimum element size

($\sigma_0=1510$ MPa)로 무차원화된 유효응력을 나타낸다. x 및 y 가 각각 2mm일 때부터 응력의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이로부터 유효응력이 충분히 0이 되는 유한요소 해석모델의 반경 r 과 높이 h 를 각각 3mm로 정했다. 이는 반무한체에 대한 단일 슛 충돌에 해당된다.

스�피닝에 의해 생성되는 압축잔류응력은 대부분 표면 및 표면직하부에 내재한다. 따라서 유한요소 해석 모델에 대해서도 중심축으로부터 표면부위는 세밀히 유한요소망을 구성했고, 점차 응력변화가 작아지는 부위는 상대적으로 크게 유한요소망을 구성하였다. Figs. 4와 5 (이하 그림들의 응력들은 재료의 항복강도로 무차원화됨)에서 충돌 부위를 기준으로 압축잔류응력에 대한 요소의 최소크기 L 을 정하였다. Fig. 4로부터 표면잔류응력은 표면에 생성된 요철들로 인한 통상의 X-선 회절 (X-ray diffraction, XRD) 실험오차와 유한요소 접촉해석시의 해석오차를 고려하여 슛볼 직경의 약 5% (d/D) 위치 $d=0.04$ mm에서 평가되었다. 슛볼은 소성변형을 고려한 해석모델이 사용되었다. Fig. 5는 요소 최소크기 L 이 슛볼 직경 D 의 1/40일 때부터 표면 및 최대 압축잔류응력해가 일정하게 수렴되는 것을 보여준다. 이로써 본 유한요소해석 모델의 요소 최소크기 L 을 0.02mm로 정하였다.

4. 단일충돌 2차원 유한요소해석

4.1 재료감쇠의 영향

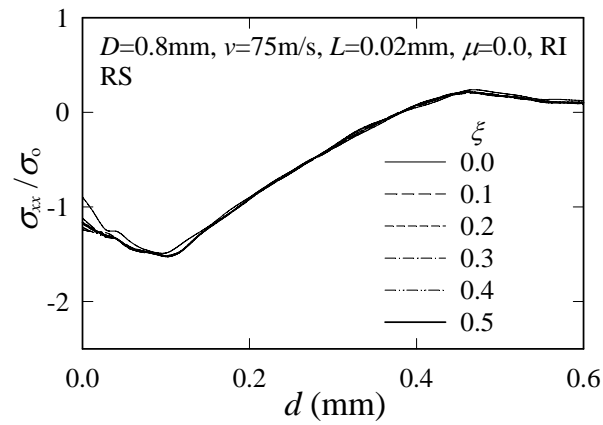
대부분의 동적 시스템에서는 마찰 또는 그 밖의 다양한 저항들에 의해 에너지가 손실되며 반드시 감쇠가 존재한다. 이 감쇠는 에너지가 재료 내부에서 소산되는 재료감쇠, 접촉부 및 경계면들에서 소산되는 구조감쇠, 유체내를 통과할 때 소산되는 유체감쇠로 크게 구분된다.^(12,13) 슛피닝의 경우에 재료와 슛볼이 서로 충돌하면 재료의 내부에 응력파가 발생하여 전파된다. 이때 충돌에너지 손실로 인해 응력파는 시간에 따라 점차 감소하고 결국 소멸된다. 이에 충돌에너지를 좀더 단시간에 소산시키고자 본 연구에서는 재료감쇠를 고려하였다. 그러나 이 재료감쇠는 물리적으로 정확하게 정의되지 않는다. 따라서 식 (1)의 근사화된 질량 비례계수 α 와 강성 비례계수 β 를 사용하는 Rayleigh 감쇠를 이용하였다.^(7,12) 재료감쇠 모델들에는 점성 (viscous) 및 이력 (hysteretic) 감쇠모델이 있다. 특히 이력감쇠 모델은 하중-제하의 복잡성, 이력 의존성 때문에 수치적 표현에 제약이 따른다.⁽¹³⁾ 이와 달리

점성감쇠 모델은 단순, 선형화된 수치적 표현이 가능하여 유동학적 해석기법 및 중첩성 원리에 잘 만족된다.⁽¹²⁾ 또한 이 모델은 비선형의 스프링 및 완충장치 (dash-pot) 등과 같은 유동학적 요소들로 구성되어 물리적 표현이 용이하다.⁽¹³⁾ 이로부터 본 연구에서는 두 모델 중 식 (2) 및 (3)과 같이 표현되는 점성 감쇠모델을 이용하였다.

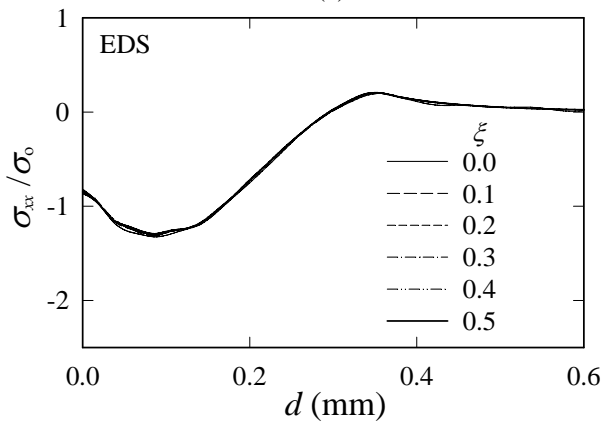
$$C = \alpha M + \beta K \tag{1}$$

$$C = 2\omega_0 \xi M \tag{2}$$

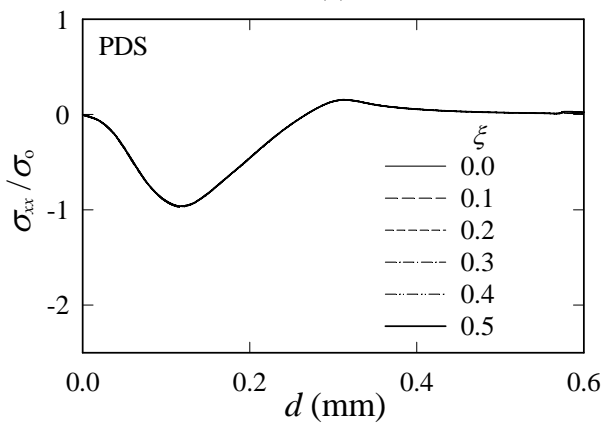
$$\omega_0 = \frac{\pi}{2h} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{3}$$



(a)

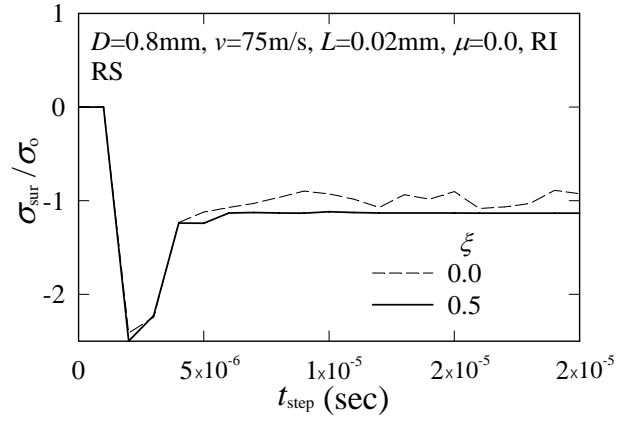


(b)

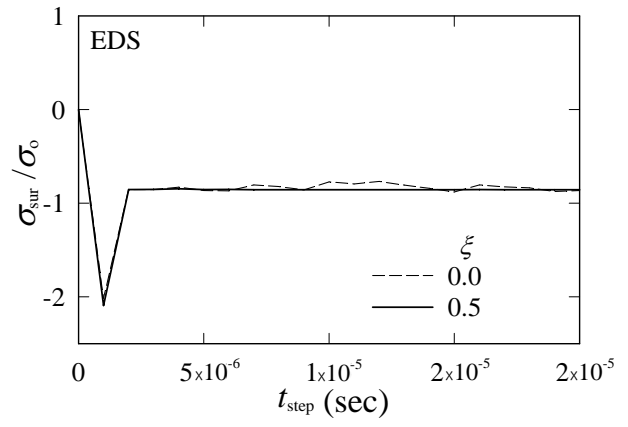


(c)

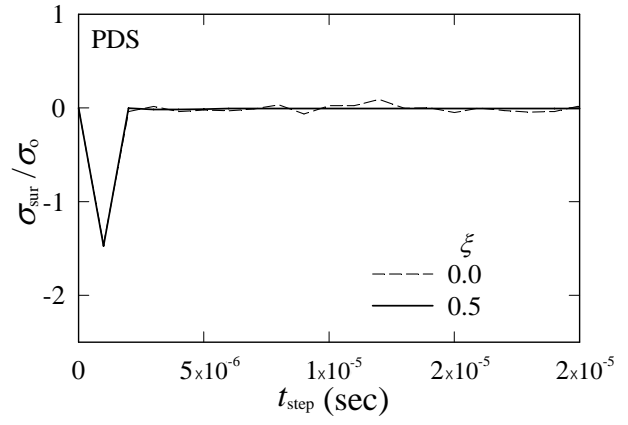
Fig. 6 Material damping effects



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Stability of surface residual stresses in FE shot models

여기서 ω_0 는 초기 주파수, ξ 는 감쇠비 ($\xi < 1$), h 는 해석모델 높이, E 는 영률, ρ 는 밀도이다. Fig. 6는 강체, 탄성, 소성솟 해석모델들에 0 - 0.5 감쇠비를 적용하여 해석 후의 수렴된 잔류응력 분포를 보여준다. 마찰과 변형률 속도는 고려되지 않았다 (RI: rate independent). Fig. 6(a)의 강체솟 모델은 감쇠비가 0.3 - 0.5일 때 유사한 잔류응력 분포들을 보였고, (b)의 탄성솟 모델은 감쇠비가 0.1 - 0.5일 때 거의 동일한 응력분포들을 보였다. (c)의 소성솟 모델은 모든 감쇠비들에 대해 수렴했다. 이로부터 강체, 탄성, 소성솟 해석모델들에 모두 공통되는 감쇠비 0.5를 채택했다.

Fig. 7은 재료 감쇠비가 0, 0.5일 때 강체, 탄성, 소성솟 해석모델의 충돌중심 절점에서 time step이 2×10^5 초일 때 표면잔류응력의 안정성을 보여준다. 재료감쇠를 고려하지 않은 $\xi = 0$ 의 경우 강체솟 및 탄성, 소성솟 모델들의 표면잔류응력해는 주어진 time step에서 안정되지 않아 좀더 긴 해석시간을 필요로 한다. 반면 재료감쇠를 고려한 $\xi = 0.5$ 의 경우 세 모델들의 표면잔류응력해는 주어진 time step 중도에서 이미 충분한 안정성을 갖는다. Fig. 7 (a)의 강체솟 모델에서 표면잔류응력해가 충분히 안정될 경우, 해석시간은 감쇠비가 0.5일 때 20초 소요됐다. (b)의 탄성솟 모델에서는 13초 소요됐고, (c)의 소성솟 모델에서는 15초 소요되었다. 충분한 잔류응력 분포의 수렴 및 안정된 최단 해석시간 등을 고려해 감쇠비를 0.5로 선정했다. 이는 해석시간이 결정적 변수로 작용되는 3차원 다중충돌 해석시 상당히 유용한 정보로 활용될 것이다.

4.2 동적 마찰계수의 영향

마찰은 두 물체의 접촉면에 수직력이 가해지며 하나의 물체에 접선방향 힘이 작용하면 발생된다. 일반적으로 널리 사용되는 쿨롬마찰 모델의 마찰계수는 접촉되는 재료들의 종류 및 운할상태 등에 의해 변화한다. 그러나 이같은 마찰계수를 실험적으로 측정하기란 쉽지 않다. 특히 솟피닝과 같이 단일충돌이 아닌 다중충돌이 지배적인 경우 더욱 난해하고 복잡하다. 다중충돌시 접촉면들 사이에 발생하는 동적 마찰현상은 잔류응력에 적지 않은 영향을 주기 때문에 그 효과를 무시할 수 없다. 본 연구에서는 쿨롬마찰을 고려했다. Fig. 8은 강체, 탄성, 소성솟 모델들에 마찰계수 μ 를 0 - 0.5까지 변화시키면서 점차 수렴되는 유한요소 잔류응력 분포를 보여준다. 감쇠비는 Fig. 6에서 선정된 0.5를 적용했다. 강체, 탄성솟 해석모델들에서는 마찰계수

0 - 0.2 사이에서 잔류응력해들의 차가 매우 컸다. 특히 무마찰 조건시 두 모델들은 표면에서 모두 압축잔류응력 (-)값을 주지만, 마찰계수가 커지면 점차 0에 가까운 값을 준다. 이와 달리 소성솟의 경우는 마찰계수 변화에 무관하게 모두 유사한 잔류응력 분포를 보인다. 강체, 탄성, 소성솟 해석

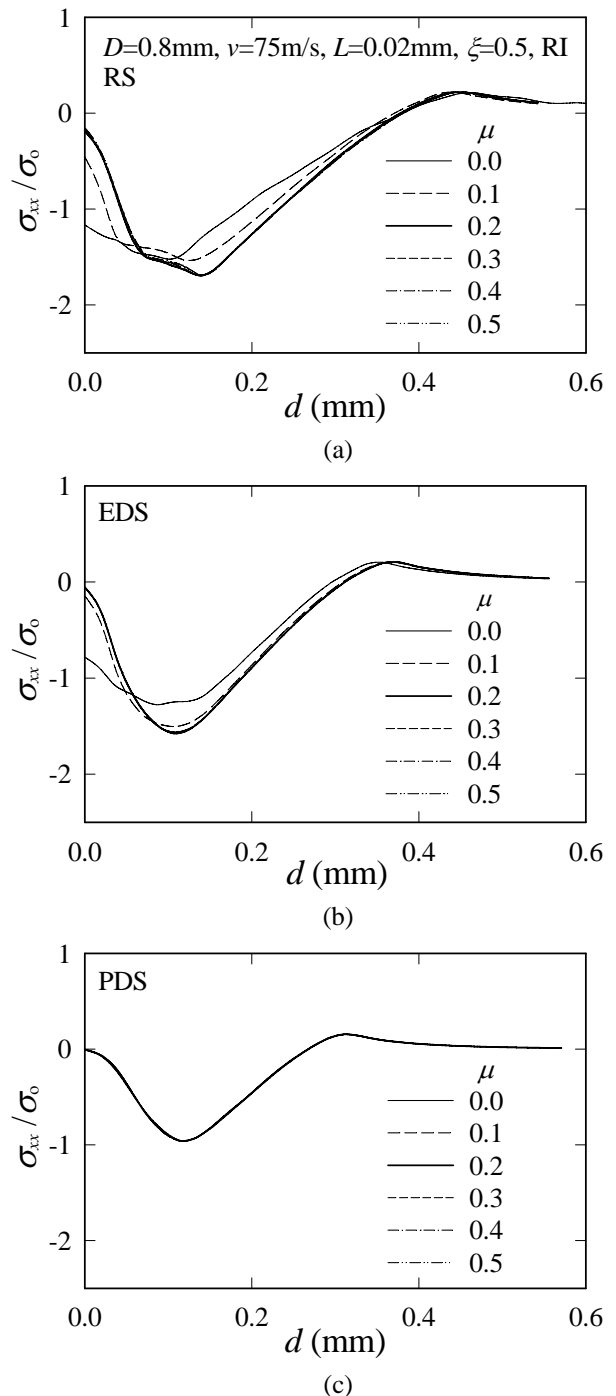


Fig. 8 Dynamic frictional effects

모델들 모두에서 마찰계수값이 0.2보다 크면, 잔류응력이 더 이상 변화하지 않고 대체로 수렴된다. 이로부터 동적 마찰계수 0.2를 본 해석모델의 또 다른 물리적 인자로 선정하였다. 이는 일반적인 금속재료간 접촉시 보통 0.1-0.4 정도의 쿨롬마찰계수 범위에도 포함된다. 동적 마찰계수가 고려된 2차원 해석모델은 실제 쏘피닝 잔류응력 평가를 위한 모델에 좀더 가까워졌으며, 유효성도 한층 높아졌다고 판단된다.

4.3 변형률 속도의 영향

금속재료는 가공법이나 사용하는 장비에 따라 저속 또는 고속으로 성형된다. 피닝시 투사쏘불이 재료에 충돌하면 재료는 순간 고속으로 변형하여 재료는 변형률속도 의존성을 보인다. 이에 물리적 인자로서 변형률 속도를 추가 고려하였다. 변형률 속도 계산은 다음 식 (4)와 같이 표현되는 멱함수식을 활용하였다.

$$\dot{\epsilon}_p = D_m \left(\frac{\sigma_e(\dot{\epsilon}_p)}{\sigma_o} - 1 \right)^n \tag{4}$$

여기서 $\dot{\epsilon}_p$ 는 유효 소성변형률 속도, $\sigma_o(\dot{\epsilon}_p)$ 는 변형률 속도 ($\neq 0$)에서의 유효응력, σ_o 는 변형률속도 $\dot{\epsilon}_p=0$ 에서의 항복강도이다. D_m 과 n 은 재료상수들로서 Premack와 Douglas⁽¹⁴⁾의 유효 소성변형률 속도에 대한 무차원화된 항복강도 선도로부터 $D_m=2.5 \times 10^6$,

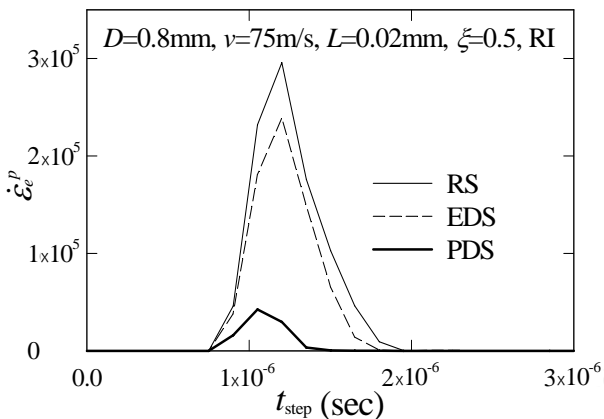


Fig. 9 Equivalent plastic strain-rate time history during impact

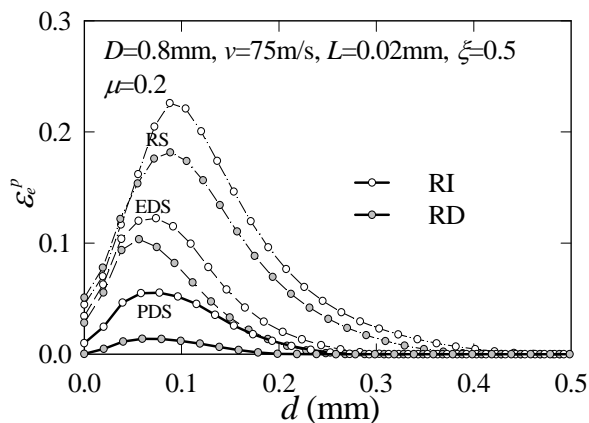


Fig. 10 Effect of strain-rate dependency upon equivalent plastic strain versus depth

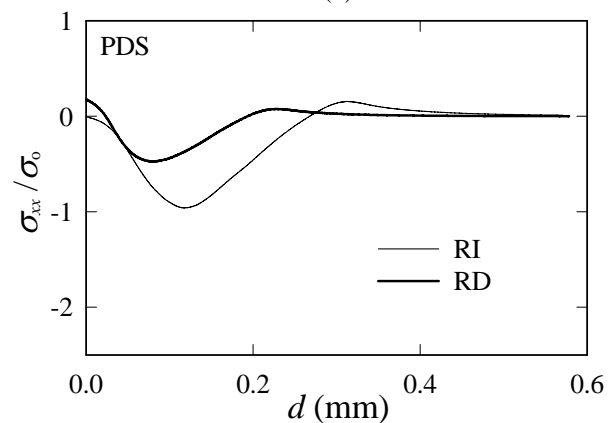
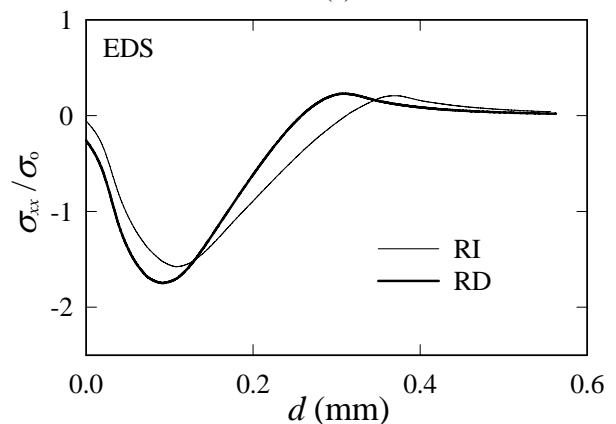
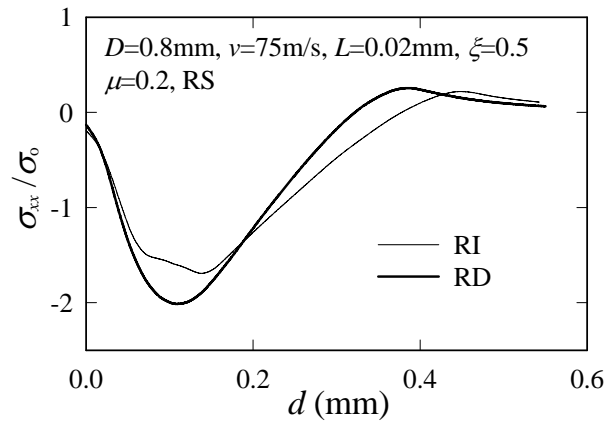


Fig. 11 Strain-rate effects

$n=6$ 로 계산되었다. Fig. 9은 강제 및 탄성, 소성솟 모델들에서 재료 변형속도가 최대치를 갖는 깊이에서 살펴본 해석시간에 따른 소성변형률 속도의 변화를 보여준다. 해석모델들 모두에서 충돌초기에는 소성변형률 속도가 급격히 증가하다가 해석시간이 약 $1.1 - 1.3 \times 10^{-6}$ 초일 때 최대가 된다. 이때 솟볼 속도는 0이 된다. 이후 곧바로 솟볼이 반발하면서 소성변형률 속도는 감소하며 점차 0에 수렴된다. 특히 소성솟 해석모델은 강제, 탄성솟 해석모델들보다 소성변형률 속도가 비교적 작다. 이는 충돌시의 투사에너지가 소성솟 변형에 소모되면서 재료에 전이되는 에너지량이 상대적으로 적어지기 때문이다. Fig. 10은 세 해석모델들의 깊이에 따른 유효 소성변형률을 보여준다. 세 해석모델들 모두 변형률 속도를 고려하면 유효 소성변형률이 작아진다. Fig. 11은 강제, 탄성, 소성솟 모델들에 변형률 속도를 반영한 경우 (RD: rate dependent)와 반영하지 않은 경우 (RI)의 잔류응력 분포를 보여준다. 강제 및 탄성솟 모델들의 최대압축잔류응력해는 변형률

속도를 고려하지 않은 경우보다 고려한 경우에 큰 값을 준다. 특히 변형률 속도가 고려된 소성솟 모델에서 표면잔류응력해는 오히려 양(+)의 값을 주며, 일반적으로 음(-)의 값을 주는 실험해와 다르다. 이는 해석에서는 단일솟의 1회 충돌에 의해 해가 얻어지는 반면, 실제 솟피닝에서는 수 많은 솟볼들이 다중충돌되며 지속적 에너지의 전이로 인해 수렴된 음(-)의 해가 얻어지기 때문으로 판단된다.

4.4 통합된 인자들에 의한 유한요소해

Fig. 12는 Figs. 6 - 11에서와 같이 각각 분리됐던 물리적 거동인자들을 해석모델에 모두 반영한 후 강제 및 탄성, 소성솟 해석모델들에 대한 유한요소 잔류응력 분포들을 보여준다. 그리고 이들 해석해들을 XRD 실험해⁽¹⁵⁾와 비교하였다. 앞서 분리된 인자들을 모두 통합 및 반영하여 하나의 유한요소 피닝잔류응력해를 얻음으로써 좀더 실제의 솟피닝 잔류응력해에 근접할 수 있었다.

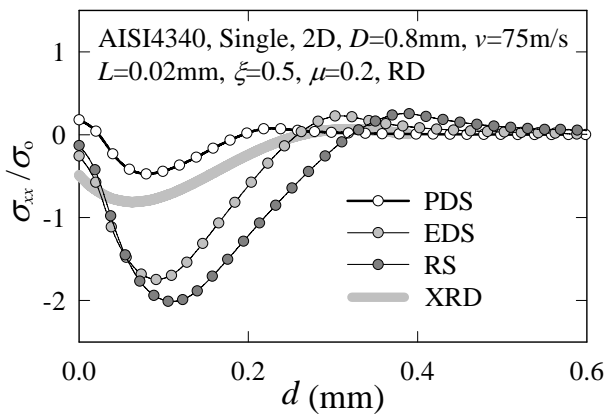


Fig. 12 Residual stresses with combined physical factors ($v=75\text{m/s}$)

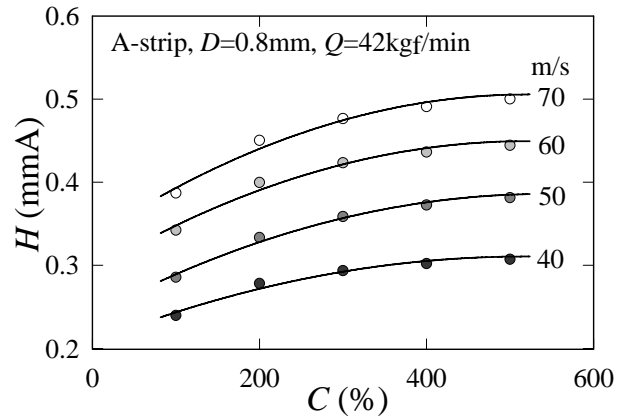


Fig. 14 Variation of arc height H with various peening coverages

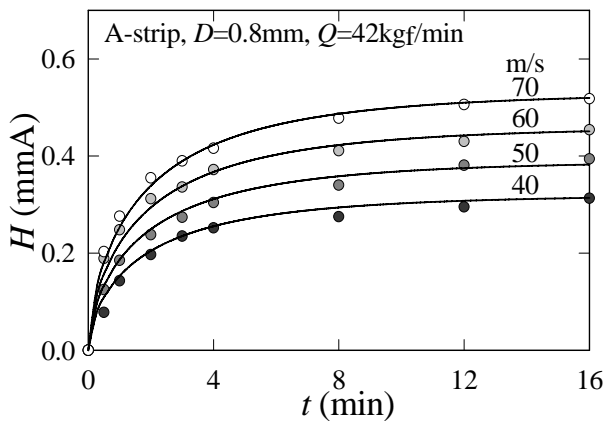


Fig. 13 Saturation curves for estimation of peening intensity

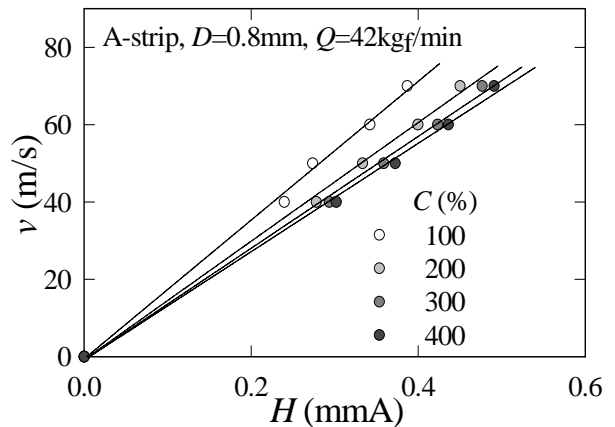


Fig. 15 Variation of shot impact velocity v with various arc heights H

5. 유한요소해의 실험적 검증

Fig. 13은 피닝정도를 가늠하기 위해 사용되는 포화 선도이다. 가로축 t 는 슛피닝 공정시간을 의미하며, 세로축 H 는 그 공정시간에서의 아크하이트 크기를 의미한다. A형 알렌스트립에 슛피닝 처리 후 굽어진 만곡높이를 알렌게이지로 측정하였다. 아크하이트의 단위는 SAE J442 규정을 준수하여 mmA로 표현하였다. 이는 굽어진 A형 알렌스트립 만곡높이를 mm로 측정함을 의미한다. Fig. 14은 피닝 커버리지에 대한 아크하이트의 변화를 보여준다. 피닝커버리지는 광학현미경 이미지에서 찾아내며, $C=100\%$ 인 피닝 공정시간을 t_p 라 한다. 100% 이상의 피닝커버리지는 t_p 에 상수배하여 정한다. 즉 $2t_p$ 일 때 $C=200\%$, $3t_p$ 일 때 $C=300\%$ 인 슛피닝 커버리지를 갖는다. Fig. 15은 아크하이트와 투사속도의 관계를 보여준다. 아크하이트의 증가에 따른 슛볼 투사속도는 선형으로 표현되며, 아래식(5)와 같다.

Table 1에 식 (5)의 계수들과 변수값들이 정리되어 있다. XRD 실험해는 $C=200\%$, $H=0.36\text{mmA}$ 이므로⁽¹⁵⁾ $v=55\text{m/s}$ 로 계산된다. Fig. 16은 계산된 슛볼의 투사속도 $v=55\text{m/s}$ 를 해석모델들에 반영하여 유한요소해석으로 얻은 해석해와 XRD 실험해를 비교하고 있고, Fig. 17은 유효잔류응력 분포를 보여준다.

$$v^C = C_1 H - C_2, (C \geq 100, 30 \leq v \leq 80) \quad (5)$$

강체 및 탄성스� 모델들의 유한요소해는 실험해와 상당히 큰 차이를 보인다. 이와 달리 소성변형을 고려한 소성스� 해석모델은 실험해와 비교할 때 다소 응력 차가 있긴 하나 강체 및 탄성체 모델보다는 훨씬 향상된 해를 준다. 이때 유한요소해가 실험해와 다른 이유는 다음과 같이 사료된다.

Table 1 Numerical values of Eq. (5)

C (%)	C_i	H (mmA)	v (m/s)	Computed v (m/s)	Error (%)
100	$C_1=179.4$ $C_2=0.57$	0.240	40	42.5	5.9
		0.274	50	48.6	2.9
		0.342	60	60.8	1.3
200	$C_1=153.4$ $C_2=0.82$	0.387	70	68.9	1.7
		0.278	40	41.8	4.4
		0.334	50	50.4	0.8
300	$C_1=144.6$ $C_2=0.87$	0.400	60	60.5	0.9
		0.450	70	68.2	2.6
		0.294	40	41.6	3.9
400	$C_1=140.2$ $C_2=0.89$	0.360	50	51.2	2.3
		0.423	60	60.3	0.5
		0.477	70	68.1	2.8
		0.302	40	42.8	6.5
		0.373	50	53.1	5.8
		0.436	60	62.2	3.5
		0.491	70	70.1	0.2

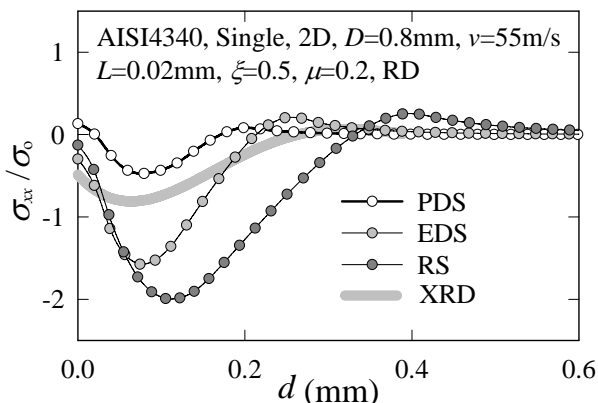


Fig. 16 Comparison of FE solutions with XRD solution ($C=200\%$, $H=0.36\text{mmA}$)

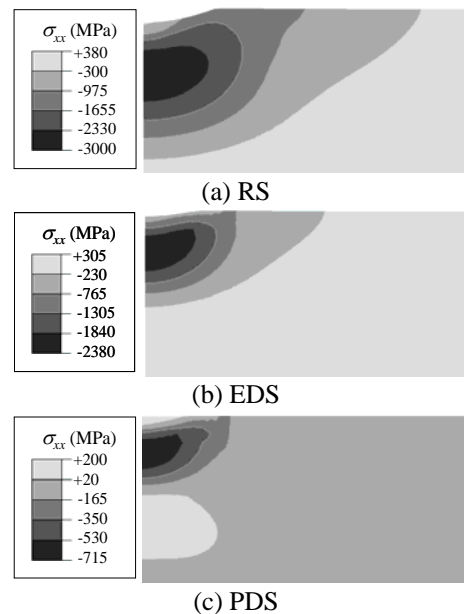


Fig. 17 The distribution of x-direction residual stress in (a) rigid, (b) elastic and (c) plastic shot models

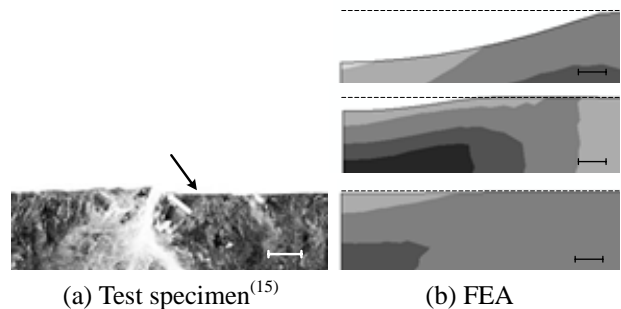


Fig. 18 Comparison between FE surface with test specimen ($C=200\%$, $H=0.36\text{mmA}$)

XRD 실험해는 X-선이 조사되는 일정영역에 대한 면적평균 잔류응력이며, 해석해는 충돌 중심선을 따라서의 값이기 때문이다. 따라서 추후 정량적인 피닝잔류응력 평가를 위해서는 다중충돌 해석이 필수이다. Fig. 18은 유한요소해석 후 재료 표면과 실제 슛피닝된 재료표면의 비교를 보여준다. 강체 및 탄성슛 해석모델들의 압흔들은 뚜렷한 반면에 소성슛 해석모델의 압흔은 표면이 거의 평활하여 구별이 쉽지 않다. 이는 실제 슛피닝 시편 표면과 매우 흡사하다. 즉 강체나 탄성슛 모델들보다 소성슛 모델이 실제 슛피닝 현상에 가장 근접한 모델이라 할 수 있다. 이상의 통합된 변수들과 더불어 소성슛을 고려해 단일충돌 유한요소해석 모델을 제시하였으며, 이는 다중충돌시 슛피닝 잔류응력 평가를 위한 3차원 해석모델의 기초가 될 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 슛피닝에 의한 잔류응력을 평가하기 위해 물리적 거동인자들과 운동학적 피닝인자들이 조합된 2차원 단일충돌 유한요소해석 모델을 제안한다. 반영된 물리적 인자들은 재료 감쇠계수, 동적 마찰계수, 변형률 속도, 그리고 슛볼의 탄-소성 변형이다. 운동학적 인자들은 슛볼의 직경, 투사속도, 수직 투사각이다. 해석 후 유한요소모델은 표면 및 최대 압축잔류응력, 변형깊이 등에서 수렴, 유일해를 준다. 또한 강체 및 탄성슛 모델들과 달리 소성슛 모델은 XRD 실험해에 매우 근접한 해석해를 준다. 이로부터 통합된 인자들과 소성슛으로 구성된 유한요소해석 모델의 유효성을 입증했다. 본 해석모델은 통상의 다중충돌 피닝잔류응력 평가를 위해 3차원 유한요소해석시 유용하게 활용될 것이다.

후 기

본 논문은 2004년 산업자원부 신기술실용화 기술 개발사업(과제번호: 10009952)에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E., 1998, "A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation," *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 16, pp. 5755~5767.
- (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) Song, P. S. and Wen, C. C., 1999, "Crack Closure and Crack Growth Behavior in Shot Peened Fatigued Specimen," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 63, pp. 295~304.
- (4) Schiffner, K. and Helling, C., 1999, "Simulation of Residual Stresses by Shot Peening," *Computers & Structures*, Vol. 72, pp. 329~340.
- (5) Levers, A., Prior, A. and Socie, D., 1989, "Multi-axial Fatigue: Analysis and Experiments," *SAE Inc., Warrendale*, pp. 16~17.
- (6) Majzoubi, G. H., Azizi, R. and Alavi N. A., 2005, "A Three-Dimensional Simulation of Shot Peening Process using Multiple Shot Impacts," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164~165, pp. 1226~1234.
- (7) Meguid, S. A., Shagal, G., and Stranart, J. C., 2002, "3D FE Analysis of Peening of Strain-Rate Sensitive Materials using Multiple Impingement Model," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, pp. 119~134.
- (8) Guagliano, M., 2001, "Relating Almen Intensity to Residual Stresses Induced by Shot Peening: A Numerical Approach," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 110, pp. 227~286.
- (9) Kim, T. J., Kim, N. S., Park, S. C. and Jeong, W. W., 2002, "Finite Element Analysis of Shot Peening Effected by Multiple Impacts," *KSME(A)*, Vol. 26, No. 12, pp. 2656~2661.
- (10) ABAQUS User's Manual, 2004, Version 6.5, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (11) Rotation Table Type Impeller Peening Machine (PMI-0608) User's Manual, 2004, Saemyung Shot Machinery Co., Inc.
- (12) De Silva, C. W., 1999, *Vibration*, CRC Press, New York, pp.349~398.
- (13) Crook, A. J. L. and Owen, D. R. J., 2000, "A Combined Finite/Discrete Element Simulation of Shot Peening Processes, Part I: Studies on 2D Interaction Laws," *Engineering Computations*, Vol. 17, No. 5, pp. 593~619.
- (14) Premack, T. and Douglas, A. S., 1995, "Three-Dimensional Analysis of The Impact Fracture of 4340 steel," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 32, No. 17-18, pp. 2793~2812.
- (15) Torres, M. A. S. and Voorwald, H. J. C., 2002, "An Evaluation of Shot Peening, Residual Stress and Stress Relaxation on the Fatigue Life of AISI 4340 Steel," *International Journal of Fatigue*, Vol. 24, pp. 877~886.