

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.3.323

# 경사충돌 피닝잔류응력에 미치는 해석인자의 영향 및 소성솟이 포함된 3차원 유한요소모델

이배화\* · 김태형\*\* · 이형일\*†

\* 서강대학교 기계공학과

## 3D FE Model with FEA Factors and Plastic Shots for Residual Stress Under Oblique Shot Peening

Baehwa Lee\*, Taehyung Kim\*\* and Hyungyil Lee\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

\*\* Honam leading industry office

(Received October 20, 2009 ; Revised January 6, 2010; Accepted January 16, 2010)

**Key Words :** Oblique impact (경사충돌), Peening residual stress(피닝잔류응력), Finite element model (유한요소모델), Plastic shot (소성솟), Single impact (단일충돌)

**초록:** 본 연구에서는 경사충돌시 피닝잔류응력 평가를 위해 3 차원 유한요소해석모델을 제안한다. 단일경사충돌 해석모델을 이용해 Rayleigh 재료감쇠, 동적마찰 그리고 재료의 변형률 속도에 대한 영향을 알아 보고 이를 통합하여 피닝잔류응력 유일해를 얻는다. 솟볼은 변형을 고려한 소성솟을 포함한 해석 모델이며, 다중솟 경사충돌해석으로 확장한다. 다중경사충돌 해석모델은 단일경사충돌 연구를 통해 결정된 통합된 피닝인자들을 반영했고, 솟볼은 소성솟을 사용하였다. XRD 실험해와 비교시, 강제 및 탄성솟 해석모델에서 얻어진 해석해에 비해 소성솟 모델의 해석해가 실험해에 매우 근접하다. 이로부터 다양한 투사각을 갖는 3 차원 유한요소해석모델의 유효성을 확인하였다. 궁극적으로 제안된 해석모델은 실제 피닝현상을 충분히 반영하기 위한 다중솟 경사충돌해석연구의 초석이 될 것이다.

**Abstract:** In this study, we propose a 3D finite element (FE) model for the residual stress under oblique shot peening. Using the FE model for an oblique impact, we examine the effects of factors on the residual stress such as the Rayleigh damping in the material, dynamic friction, and the rate dependency of the material and systematically integrate the effects. The plastic deformation of the shot is also emphasized. Then, the FE model is used to study oblique multi-impacts. The results obtained using the FE model are compared with experimental x-ray diffraction (XRD) results; in contrast to the rigid and elastic shots, plastic shots are found to produce residual stresses similar to that shown in the XRD results. Thus, the 3D FE models with integrated factors and plastically deformable shots are validated. The proposed model will serve as a basis for the 3D FE model for multi-impacts with different impact angles to simulate the actual phenomenon of shot peening.

- 기호설명 -

- EDS : 탄성솟
- PDS : 소성솟
- RS : 강제솟
- $z_{max}$  : 최대 압축잔류응력 발생 깊이
- $\alpha$  : 솟볼 투사각
- $\mu$  : 동적 마찰계수
- $\sigma_{max}$  : 최대 압축잔류응력
- $\sigma_{sur}$  : 재료표면잔류응력
- $\xi$  : 재료 감쇠계수

### 1. 서론

통상 솟피닝 기술은 기계부품의 피로특성을 향상 시키거나, 구조물의 용접잔류응력을 개선 시키고자 활용된다. 여기서 잔류응력은 재료의 부식, 마찰, 마모 등에 큰 영향을 주는 주요인자로서 피닝시 재료의 잔류응력평가는 매우 중요하며, 정량적이고 다각적인 연구가 필요하다. 일반적으로 피닝잔류 응력은 X-선 회절 (XRD)을 이용한 실험법에 의해 측정된다. 그러나 실험을 통해 측정값을 얻는데 많은 시간이 소요되며, 측정기술에 따른 오차도 발생되어 측정시 숙련된 기술을 요구한다. 이러한 불편함이 발생하는 이유로 유한요소해석을 이용한

† Corresponding Author, hylee@sogang.ac.kr

수직접근법 등이 소개되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 그리고 Majzooobi 등<sup>(4)</sup>은 3차원 다중충돌 유한요소해석모델을 이용해 실제 피닝현상을 모사하였다. 그러나 이들 선행 해석연구들은 대부분 샷볼이 재료표면에 수직으로 충돌하는 이상적인 유한요소모델들을 제안했다. 하지만 실제 피닝공정은 엄밀히 말해서 수직투사가 아니며, 재료의 표면이 경사각을 갖는 경우, 샷볼 들은 일정한 경사각을 갖고 재료에 충돌하게 된다. 이때 샷볼의 투사각은 샷피닝 잔류응력 추이를 예측하는 중요한 인자가 된다. 이에 최근들어 경사 충돌해석들이 점차 수행되고 있다. Baek 등<sup>(5)</sup>은 3차원 동적해석을 수행하여, 수직 및 경사충돌 피닝시 투사각에 따른 잔류응력분포를 살펴 보았고, Miao 등<sup>(6)</sup>은 무작위 충돌을 가정한 샷볼들의 일정한 경사각을 갖고 재료에 충돌시 피닝잔류응력을 평가 했다. 또한 Hong 등<sup>(7,8)</sup>은 3차원 해석모델의 표면에 단일 및 다중샷 경사충돌 후 잔류응력을 얻었다. 그러나 그들은 단지 경사각 변화에 따른 피닝잔류 응력을 평가하였으며, 실험적 검증을 배제 하였다. 또한 샷볼의 변형이 무시된 강체샷을 이용했으며, 재료의 물리적 거동특성을 고려하

지 않았다. 이에 본 연구에서는 XRD 실험해에 가장 근접하는 샷피닝 잔류응력해를 얻기 위한 3 차원 경사충돌 유한요소 모델을 제안한다. 여기에 김태형과 이형일<sup>(9)</sup>이 제안한 대칭-셀 유한요소 해석모델을 확장시켜 경사 충돌해석모델로 채택하고 재료의 물리적 인자들의 영향들을 파악한다. 궁극적으로 경사충돌시 피닝 잔류응력의 유일해를 위한 새로운 해석모델을 제안 한다. 그리고 본 유한요소 해석모델을 통해 얻은 해석해와 실험해와의 비교를 통해 유효성을 검증 한다.

## 2. 재료물성 및 유한요소모델

Figure 1은 경사 충돌각을 갖는 단일 및 다중샷 3차원 유한요소해석모델들을 보여준다. 해석에 강체샷(RS: Rigid shot), 탄성샷(EDS: Elastic deformable shot) 그리고 소성샷(PDS: Plastic deformable shot)을 고려했다. 해석시 재료에 적용한 물성은 피닝 공정에 많이 사용되는 AISI4340 소재이다. 재료의 인장시험 물성치들은 항복강도  $\sigma_0 = 1510\text{MPa}$ , 인장강도  $\sigma_t = 1835\text{MPa}$ , 탄성계수  $E = 205\text{GPa}$ , 푸아송 비  $\nu = 0.25$ , 밀도  $\rho = 7850\text{kg/m}^3$ 이다. 충돌에 사용되는 샷볼은 일반적으로 널리 사용되는 컷와이어라운드 샷(CWRS)을 모델로 선정하였다. 샷볼의 인장시험 물성치들로는  $\sigma_0 = 1470\text{MPa}$ , 인장강도  $\sigma_t = 1860\text{MPa}$ , 탄성계수  $E = 210\text{GPa}$ , 푸아송비  $\nu = 0.3$ , 밀도  $\rho = 7850\text{kg/m}^3$ , 직경  $D = 0.8\text{mm}$ 이다. 본 연구에서는 상용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(10)</sup>를 사용했고, Fig. 2로부터 해석모델의 사이즈를 결정하였다. 샷볼 투사속도는 장비의 최대성능<sup>(11)</sup>을 고려해,  $v = 75\text{m/s}$ 로 정했다. 여기서 가로축의  $x, z$ 는 각각 충돌 지점에서 재료의 중심으로부터 표면을 따르는  $x$ -방향으로의 거리와 재료의 표면으로부터 깊이 방향인  $z$ -방향으로의 거리이다. 세로축은 각 거리 에서 재료의 항복강도 ( $\sigma_0 = 1510\text{MPa}$ )로 무차원화된 유효응력을 나타낸다.  $x$  및  $z$ 가 각각  $0.6\text{mm}$ 일 때부터 응력의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이로부터 유효응력이 충분히 0이 되는 값  $1\text{mm}$ 로 정했다. 샷볼의 충돌에 의해 생성되는 피닝잔류 응력은 대부분 재료의 표면과 표면직하부에 내재 된다. 따라서 해석모델은 응력값이 큰 표면 부위는 세밀하게, 응력값이 작은 하부는 상대적으로 크게 해석모델의 유한 요소망을 구성하였다. Fig. 3를 통해 표면 잔류응력은 표면에 생성된 요철들로 인한 통상의 X-선 회절(X-ray diffraction, XRD) 실험오차와

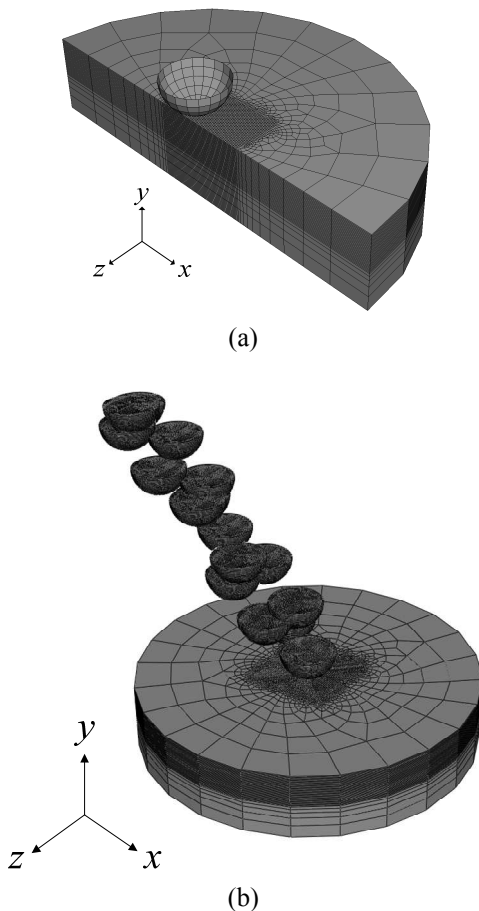


Fig. 1 3D FE model for (a) single impact and (b) multi-impact under oblique impacts

유한요소 접촉해석시의 해석오차를 고려하여 솟볼 직경의 약 5% ( $z/D$ ) 위치  $z = 0.04\text{mm}$ 에서 평가 되었다. Fig. 4는 요소최소크기  $L$ 이 솟볼 직경  $D$ 의 1/40일 때 부터 표면 및 최대 압축잔류응력해가 일정하게 수렴되는 것을 보여 준다. 이로써 본 해석모델의 요소최소크기  $L$ 을  $0.02\text{mm}$ 로 정하였다. 유한요소망은 3차원 8절점 감차 적분요소들 (C3D8R)로 구성했다. 경계조건으로서 재료의 바닥면은 완전 구속 ( $U_x = U_y = U_z$ ) 처리했다. 이때 솟볼은 투사시 단방향울 가지고 충돌하게 되므로 해석시간의 효율을 높이고자 1/2 대칭모델의 단면에 대칭처리 ( $U_z = 0$ )하였다. 그리고 경사충돌시 재료의 표면과 솟볼표면에 접촉요소면들 (Contact surfaces)을 배치했다.

### 3. 단일솟 경사충돌 유한요소해석

#### 3.1 재료감쇠의 영향

재료와 솟볼이 서로 충돌하면 재료 내부에서는 응력과동이 발생하여 재료의 깊이 방향을 따라 응력파가 전파한다. 이때 응력파는 에너지의 손실로 시간에 따라 점차 감소하고 결국 소멸된다. 이에 충돌에너지를 좀더 단시간에 소산시키고자 본 연구에서는 재료감쇠의 영향을 살펴본다. 이때 재료감쇠는 근사화된 질량 비례계수와 강성 비례계수를 사용하는 Rayleigh 재료감쇠를 이용한다.<sup>(4,12)</sup> 또한 단순, 선형화된 수치적 표현이 가능하여 유동학적 해석기법 및 중첩성 원리를 잘 만족하는 점성 감쇠모델을 이용한다.<sup>(13)</sup> 점성 감쇠모델은 아래

$$C = 2\omega_0 \xi M \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2h} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

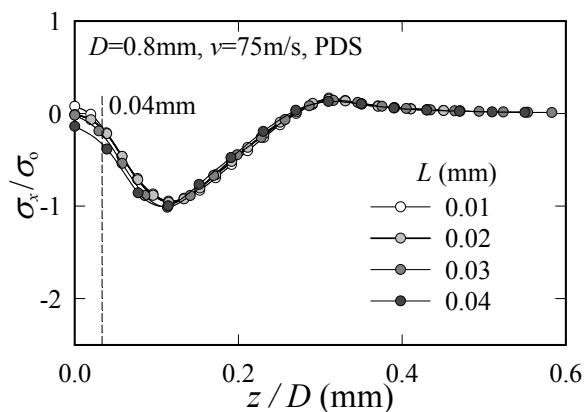


Fig. 2 Convergence of residual stresses for  $L$

식 (1) 및 (2)와 같이 표현할 수 있다. 여기서  $\omega_0$ 는 초기 주파수,  $\xi$ 는 감쇠비 ( $\xi < 1$ ),  $h$ 는 해석모델의 높이,  $E$ 는 탄성계수,  $\rho$ 는 밀도이다. 해석모델은 Rayleigh damping을 사용하여  $\xi = 0 - 0.5$ 에 따른 계수  $C$ 를 적용했으며, 충돌시 변형률 속도와 마찰은 고려하지 않았다 (RI: rate independency). Fig. 5는 충돌각  $\alpha = 45^\circ$ 일 때, 강체, 탄성 및 소성솟 해석 모델들에 0 - 0.5 감쇠비들을 채택하여 해석후 한 선으로 수렴된 잔류응력분포를 보여준다. 강체솟 해석하는 모든 감쇠비들에서 거의 수렴한다. 이와 달리 솟볼의 변형을 고려한 탄성 및 소성솟 해석 해들은  $\xi = 0.3 - 0.5$ 에서 잔류응력해들이 수렴하는 것을 알 수 있다. 재료감쇠비가 해석시간에 미치는 영향을 알아보고자 감쇠비를 0, 0.5로 선정한 모델을 비교했다. Fig. 6는 충돌중심절점에서 표면 잔류응력  $\sigma_{sur}$ 의 해석시간에 따른 수렴성을 보여 준다. 공통적으로  $\xi = 0.5$ 인 모델은 time step이  $7.5 \times 10^{-6}$ 초 이상이면 거의 수렴한다.  $\xi = 0$ 인 경우에는 주어진 time step에서  $\sigma_{sur}$ 가 안정되지 않아 좀더 긴 해석시간을 필요로 한다. 특히 Fig. 6(b)의 탄성솟 모델은  $\xi = 0$ 인 경우

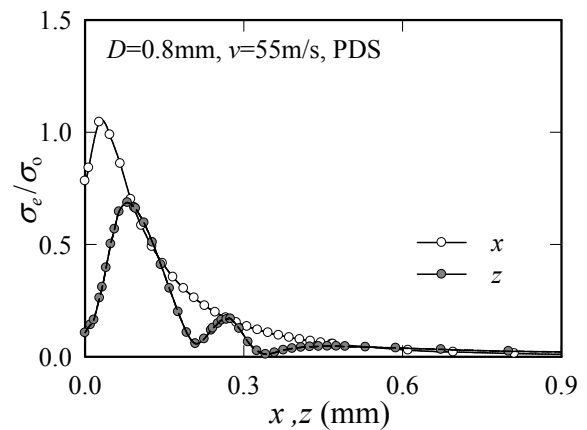


Fig. 3 Selection of FE model size

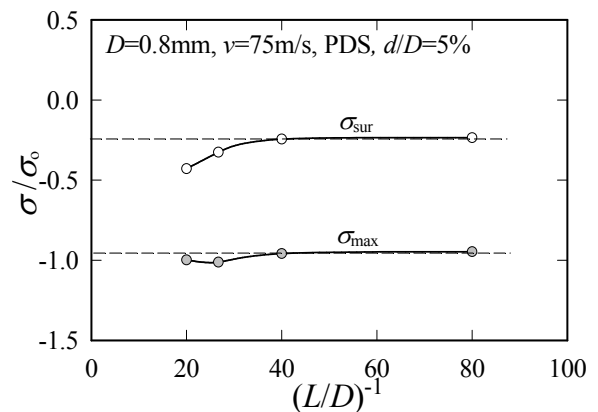


Fig. 4 Selection of minimum element size

$\sigma_{sur}$ 가 일정 time step이 지나도  $\sigma_{sur}$ 가 안정성을 갖지 않고,  $\xi = 0.5$ 의  $\sigma_{sur}$ 와 비교적 큰 차이를 보였다. 이를 고려해 해석해의 안정과 해석시간을 단축을 위해 이후 해석모델들은 감쇠비  $\xi=0.5$ 을 반영했다.

3.2 동적마찰의 영향

두 물체의 접촉면들에 수직인 하중이 가해지면, 접선방향 힘이 작용하여, 마찰이 발생한다. 마찰은 재료종류와 윤활상태 등에 따라 다양하게 변한다. 특히 동적 마찰계수를 실험적으로 측정하기란 그다지 쉽지 않으며, 슛피닝과 같이 단일충돌이 아닌 다중

충돌이 지배적인 경우는 더욱 난해하고 복잡하다. 이와 같이 동적마찰은 잔류응력에도 적지않은 영향을 주므로, 슛피닝시 동적 마찰효과를 무시할 수 없다. 이에 본 연구에서는 경사충돌시 동적 마찰의 영향을 살펴보고자 쿨롬마찰을 채택했다. Fig. 7은 강체, 탄성 및 소성슛 모델에 마찰계수  $\mu = 0 - 0.5$ 을 적용할 때, 피닝잔류응력분포를 보여준다. 마찰계수가 0 - 0.2인 경우, 잔류응력해들이 서로 큰 차를 가지나, 0.3 이상의 해석모델은 해석해가 하나의 해로 수렴된다. 이는 슛볼과 재료 사이가  $\mu \geq 0.3$  일 때 충분히 안정

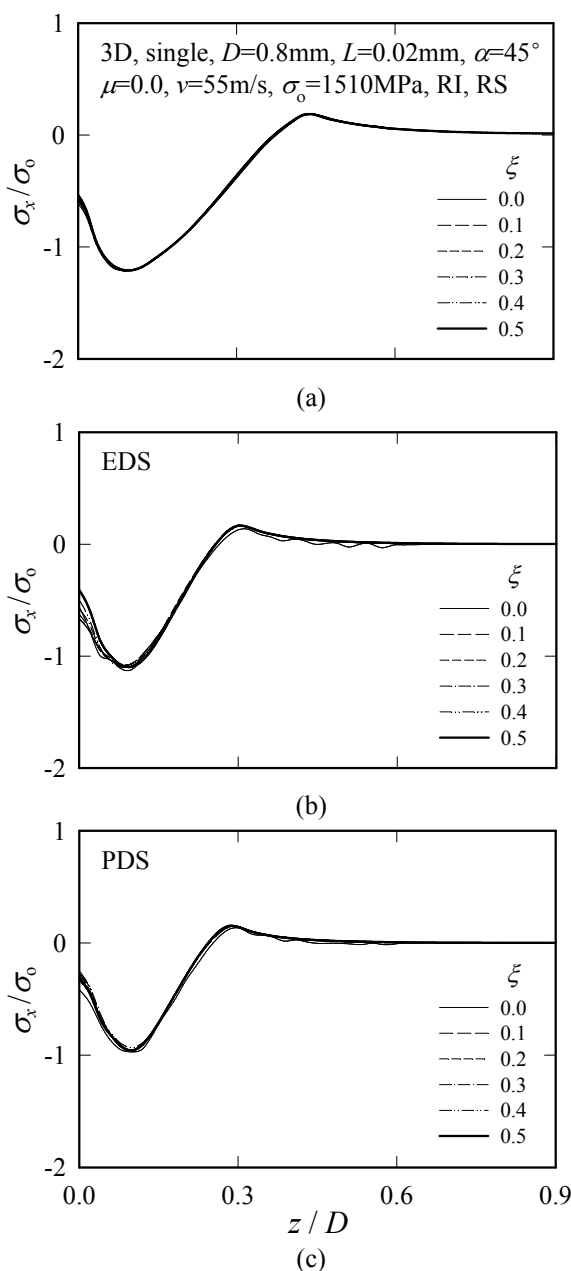


Fig. 5 Effects of material damping in three FE shot models with oblique impact angle as 45°

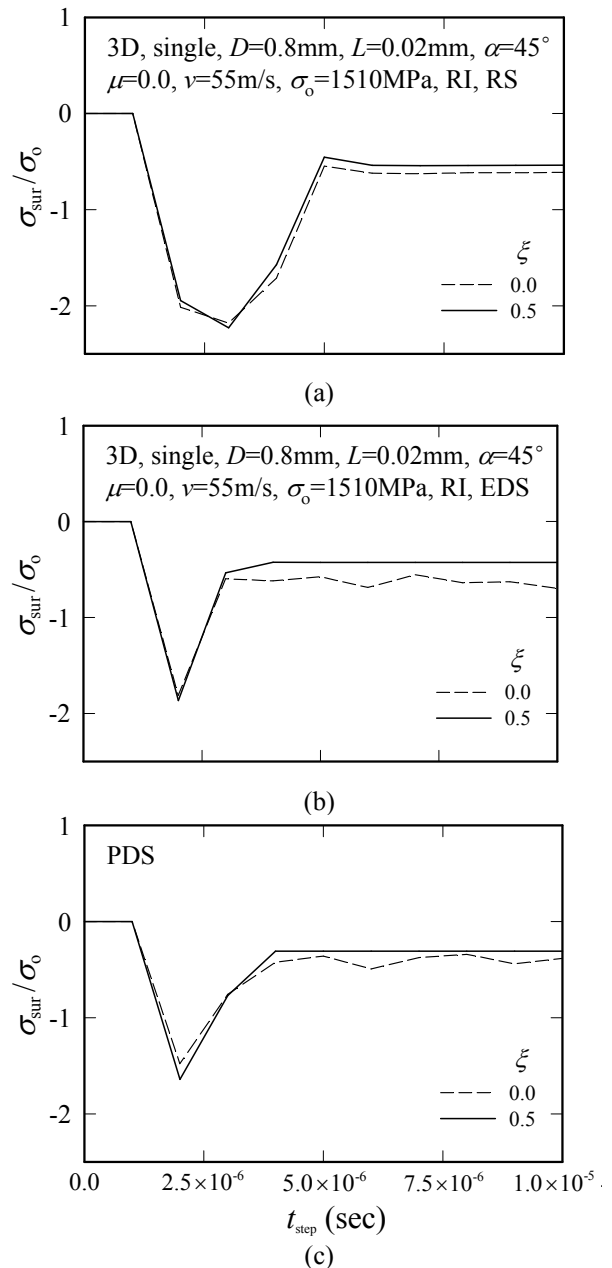


Fig. 6 Stability of surface residual stresses in FE shot models with oblique impact angle as 45°

된 접촉면을 가지는 것을 의미한다. 이로부터 해석모델의 마찰고려시 안정된 해석해의 도출과 수렴을 위한 또 다른 인자로서  $\mu=0.3$ 을 채택했다.

### 3.3 변형률 속도의 영향

금속재료는 가공법이나 사용장비에 따라 저속 또는 고속으로 성형된다. 피닝시 투사되는 솟불이 재료에 충돌하면 재료는 순간 고속변형되므로, 변형률 속도에 대한 의존성을 갖는다. 이에 본 연구에서는 물리적 인자로서 변형률 속도를 추가한다.

변형률속도의 계산은 다음 식 (3)과 같이 표현되는 멱함수식을 활용해 해석모델에 반영한다.

$$\dot{\epsilon}_p = D_m \left( \frac{\sigma_e(\dot{\epsilon}_p)}{\sigma_0} - 1 \right)^n \quad (3)$$

여기서  $\dot{\epsilon}_p$ 는 유효 소성변형률 속도,  $\sigma_e(\dot{\epsilon}_p)$ 는 변형률 ( $\neq 0$ )속도에서의 유효응력,  $D_m$ 과  $n$ 은 재료 상수로서 Premack 등<sup>(14)</sup>의 유효 소성변형률 속도에

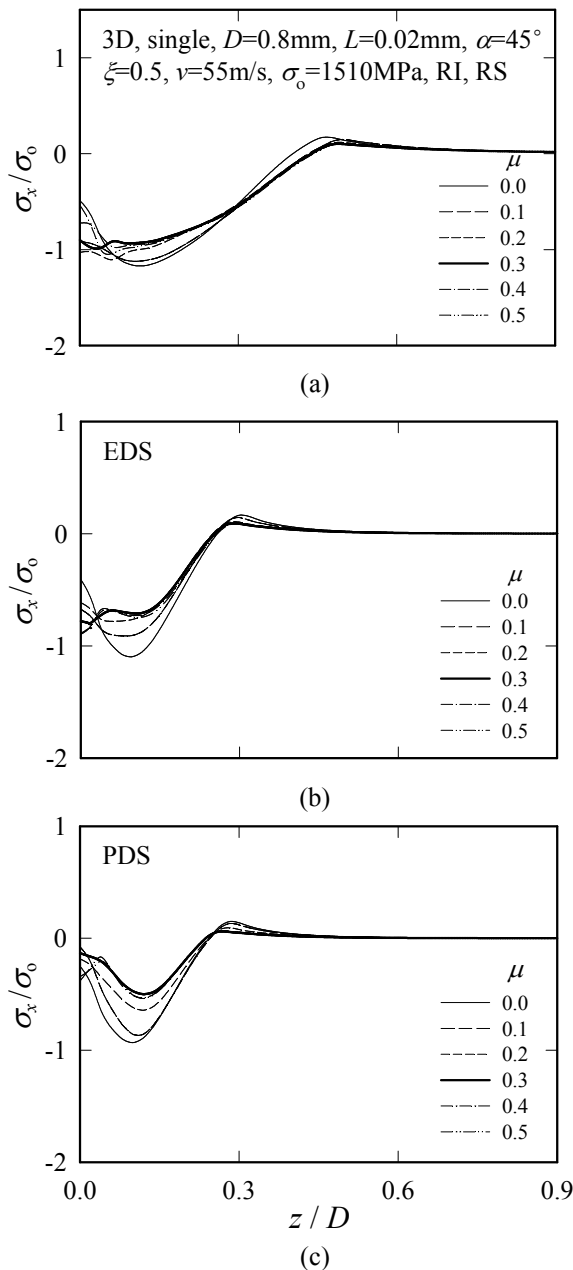


Fig. 7 Effects of dynamic friction in three FE shot models with oblique impact angle as  $45^\circ$

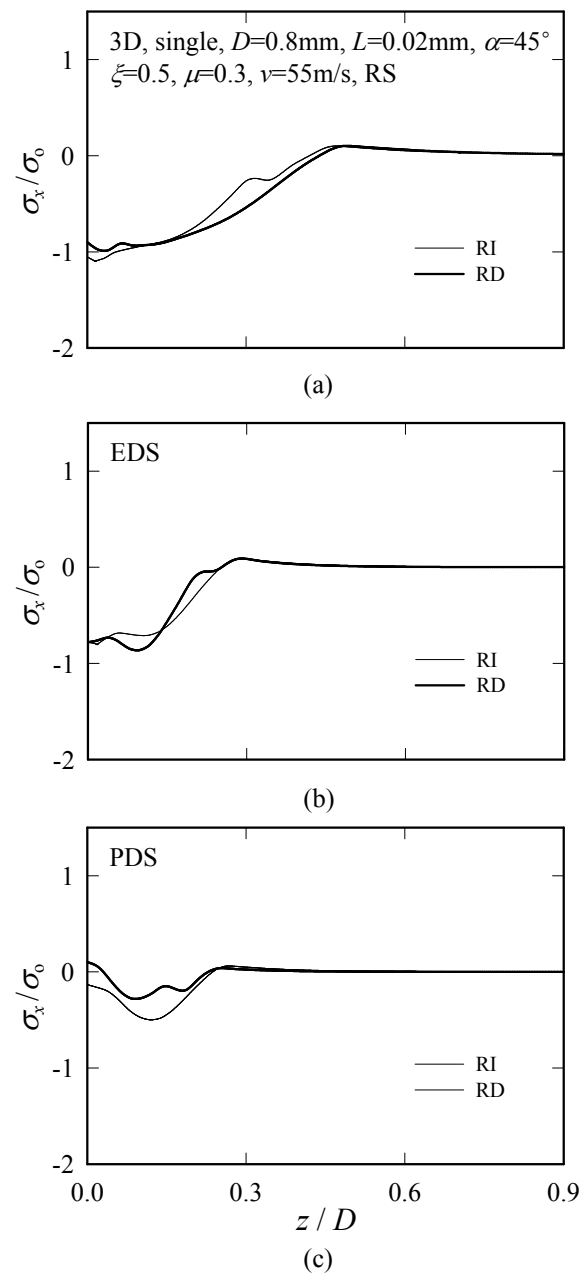


Fig. 8 Effects of strain rate in three FE shot models with oblique impact angle as  $45^\circ$

대한 무차원화된 항복강도선도로부터  $D_m = 2.5 \times 10^6$ ,  $n = 6$ 로 계산된다. Fig. 8은 강체 및 탄성, 소성솥 해석모델에 변형률 속도를 고려한 (RD: rate dependent) 경우와 반영하지 않은 경우 (RI: rate independent)의 잔류응력분포들을 보여준다. 마찰 계수와 투사각은 각각 0.3과 45°를 반영했다. 강체 및 탄성솥 해석모델들의 최대 압축잔류응력해  $\sigma_{max}$ 는 소성솥 해석모델해 보다 큰 값을 준다. 또한 소성솥 해석모델의 경우 변형률 속도를 고려하면 (RD), 표면잔류응력해  $\sigma_{sur}$ 가 통상의 실험적 측정에 의해 얻어지는 압축 (-)응력 값과 달리 오히려 인장 (+)의 값을 갖는다. 이와 달리 소성솥 해석모델은 변형률 속도를 고려하지 않은 경우 (RI)에는,  $\sigma_{sur}$ 가 음(-) 값을 갖는다. 이는 솥볼 충돌이 1회에 그치는 단일솥 경사충돌에 의한 해석해이기 때문이다. 그러나 실제 피닝공정은 무수히 많은 솥볼들에 의해 피닝잔류응력은 생성된다. 결국 솥볼이 연속적으로 충돌되는 다중솥 경사충돌모델로 확장하면, 솥볼의 충돌에너지가 꾸준히 전이되어 점차 좀더 큰 값의 압축응력해를 줄 것으로 판단된다. 아울러 소성솥 모델의 해석해가 실험해와 다소 차이를 보이긴 하나, 실험해로 접근함을 알 수 있다. 이후, 위에서 고려한 재료감쇠, 마찰계수 그리고 변형률 속도의 영향을 통해 얻어진 물리적 인자를 채택한 경사충돌 해석모델의 해석해는 궁극적으로 실험해로 근접하게 된다. 이는 아래 4장에서 확인된다.

3.4 투사각의 영향

실제 솥피닝공정은 노즐이나 임펠러를 통해 많은 솥볼들이 고속으로 분사된다. 이때 솥볼의 투사각은 주로 최대 압축잔류응력을 주는 수직충돌 ( $\alpha = 90^\circ$ )을 갖는 공정이 이뤄지나, 경사면을 갖는 판재나 기어치면의 경우는 경사각 ( $\alpha \leq 90^\circ$ )을 갖는 피닝공정이 수행된다. 즉 재료형태나 피닝조건에 따라 투사각이 결정된다. 이에 본 연구는 피닝 효과가 극히 미약해지는 투사각을 제외한 45°, 60°, 75°, 90°를 솥볼 투사각으로 선정했다. Fig. 9는 강체, 탄성 및 소성솥 경사충돌 해석모델들의 투사각에 따른 잔류응력분포와 실험해를 비교해 보여준다. 실험해는 항공기용 착륙장치 등에 많이 사용되는 AISI4340 소재의 알멘스트립 시편을 사용해 얻었다. 실험은 임펠러 타입의 피닝머신을 이용해  $v = 55\text{m/s}$  상황에서 수행됐으며, 시편은 아크하이트  $H = 0.36\text{mmA}$ 와 피닝 커버리지  $C = 200\%$ 를 갖는다.<sup>(15)</sup> 해석 모델 모두에서 투사각이 증가하면 피닝잔류응력해도 증가하는 전체적으로 유사한 잔류응력해의 변화를

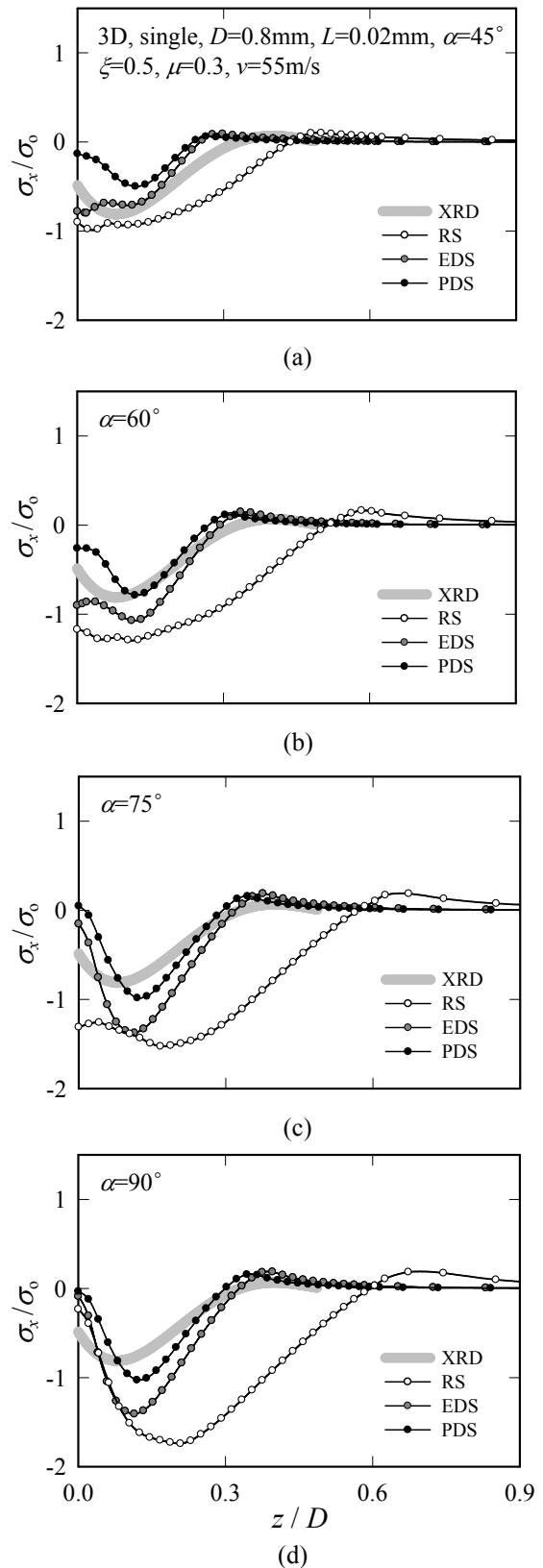


Fig. 9 Effects of various oblique impact angles in three FE shot models

보인다. 이는 솟볼 투사각이 증가하면 충돌시 재료에 전이 되는 충돌에너지가 재료의 내부까지 충분히 전달되어 압축잔류응력해가 증가하기 때문이다. 특히 강제솟 해석모델은 모든 투사각에서 세 모델 중 가장 큰 최대 압축잔류응력을 가지며, 소성솟 모델은 비교적 작은 최대 압축잔류응력해를 갖는다. 이는 강제 및 탄성솟 모델의 경우, 충돌시 투사에너지가 충돌로 인한 솟볼의 변형과 무관하게 재료에 전이되었기 때문이다. 이에 반해 소성솟 모델은 일부 충돌 에너지가 솟볼의 변형에 사용되었기 때문으로 판단된다. Table 1은  $\alpha$ 에 따른  $\sigma_{\max}$ ,  $z_{\max}$  및 재료표면과  $\sigma_{\max}$ 가 발생하는 지점이 이루는 각도  $\alpha_{\max}$  들이 정리되어 있다. 솟볼이 재료와 충돌시 투사에너지가 재료에 전이되는 동안 발생하는 에너지손실로 인해  $\alpha_{\max}$ 는  $\alpha$ 보다 작은 값을 가진다. 세 모델 모두  $\alpha$ 와  $\mu$ 에 따른 해석해의 수렴성과  $\alpha_{\max}$ 의 변화가 뚜렷하다. 이로서 피닝잔류응력 평가를 위한 해석모델로서 소성솟이 모델이 적합하다고 판단된다.

#### 4. 다중경사각 충돌시 유한요소해석

단일경사충돌 연구를 통해 얻어진 물리적 인자들의 유효성을 확인하고자 실제 피닝공정과 유사한 다중경사충돌 해석모델 [Fig. 1(b)]을 제안한다. 해석 모델은 앞에서 체계적으로 통합된 인자들  $\xi=0.5$ ,  $\mu=0.3$ , RI를 반영하고 소성솟을 채택했다. 또한 본 연구는 다중솟 충돌로서 해석모델은 1 (4shots), 2

(8shots), 3 (12shots), 4 (16shots) 주기들로 구분되며, 이때 솟볼 4 개의 충돌을 1 주기(set)라 한다. Fig. 10

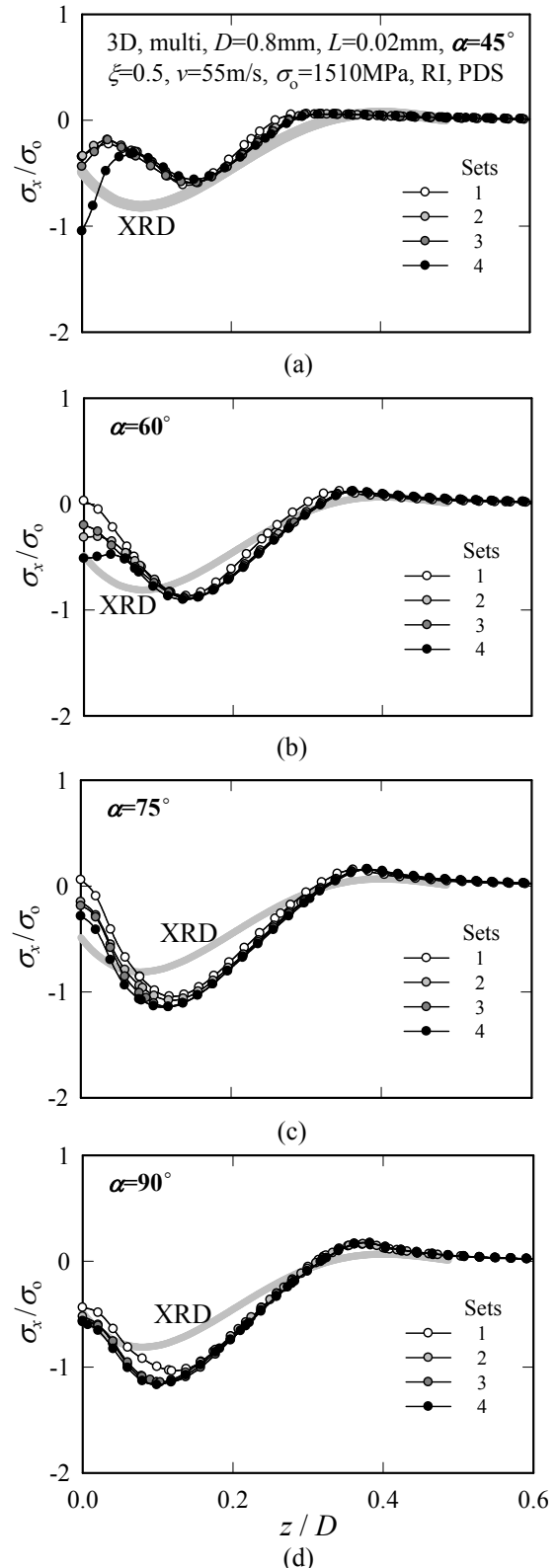


Fig. 10 Comparison of FE solutions with XRD solution under oblique multi-impacts

Table 1 Numerical values of various oblique impact angles in three FE shot models

$\alpha$ (°)	Shot ball	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$z_{\max}$ (mm)	$\alpha_{\max}$ (°)
45	RS	1834	0.102	23.8
	EDS	1576	0.069	29.1
	PDS	1052	0.050	11.6
60	RS	1992	0.121	31.0
	EDS	1773	0.071	31.6
	PDS	1190	0.059	15.6
75	RS	2149	0.140	36.2
	EDS	1970	0.072	34.1
	PDS	1328	0.069	19.6
90	RS	2629	0.186	-
	EDS	2136	0.108	-
	PDS	1583	0.104	-

은 다중충돌시 다양한 경사투사각에 따른 잔류응력분포를 보여준다. 해석 후 모든 다중경사각들에서, 3set 이상 충돌시 모든 해석모델의 해석해가 한 곡선으로 수렴한다. 이는 다중샷 해석모델의 경우, 최소 12 개 이상의 샷볼들이 필요하다는 것을 보여 준다. 또한 수직충돌 ( $\alpha = 90^\circ$ )에 가까워 질수록  $\sigma_{\max}$  가 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만  $z_{\max}$  는 줄어 들어,  $\alpha$  가 커질수록  $\sigma_{\max}$  는 재료표면에 가깝게 발생 한다. 해석모델은 무수한 샷볼을 이용하는 실제 피닝공정과 달리 한정된 수량의 샷볼들을 투사 하지만, 해석해가 실험해보다 더 큰 압축잔류응력을 보인다. 이는 실험해가 X-선이 조사되는 면적을 바탕으로 한 일정한 면적의 평균잔류응력해이나, 해석해는 충돌중심에서 수직방향으로 존재하는 절점 들의 응력해들로 얻었기 때문이다. 따라서 실험해에 좀더 근접한 해석해를 도출하기 얻기 위해 면적 평균해<sup>(16)</sup>에 기초한 다중샷 경사충돌해석이 필요하다. 또한 정량적인 피닝잔류응력 평가를 위해선 소성샷을 고려한 다중샷 경사충돌해석에서 샷볼 투사패턴의 연구가 필요하다고 판단된다. 이로써 경사충돌시 다양한 피닝인자들의 영향을 살펴보고, 이상의 통합된 변수들과 더불어 강체, 탄성 및 소성샷의 경사충돌을 고려한 유한요소 해석모델을 제시했다.

## 5. 결론

피닝처리가 된 재료의 잔류응력획득은 많은 시간과 비용이 수반된다. 그리고 XRD 실험해는 재료의 형상에 따라 측정에 제약이 있으며 실험 오차를 다소 갖고 있다. 이에 본 연구는 경사충돌에 의한 피닝잔류응력을 평가하기 위해 물리적 거동인자들과 운동학적 피닝인자들이 조합된 단일 경사충돌 유한요소해석모델을 제안했다. 반영된 재료의 물리적 인자들은 Rayleigh 재료감쇠, 동적 마찰 그리고 변형률 속도의 의존성이다. 샷볼의 운동학적 인자는 샷볼 투사각으로 물리적 인자가 통합된 해석모델에 적용되어 각도 별 잔류응력 평가를 수행했다. 이들 인자들과 더불어 샷볼의 소성 변형을 강조했다. 충돌후 지금까지 이상의 통합된 변수들과 더불어 강체, 탄성 및 소성샷의 경사충돌을 고려한 유한요소모델을 제시하였으며, 단일샷 투사시 경사각에 따른 잔류응력해의 변화와 응력분포의 경향에 대해 확인했다. 또한 다중샷 경사충돌시 해석해와 XRD 실험해를 비교해 제안한

해석모델의 유효성을 검증했다. 단일샷 경사충돌 해석해와 달리, 다중샷 경사충돌 해석해는 XRD 실험해에 비교적 근접함을 보였다. 이를 통해 본 연구는 실제 피닝가공시 샷볼의  $\alpha$  에 따른  $\sigma_{\max}$  의 크기와 위치를 예상하는데 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 2008년도 한국학술진흥재단 기초과학 연구 (KRF-2008-D00017)에 의해 이뤄졌으며, 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Schiffrer, K. and Helling, C., 1999, "Simulation of Residual Stresses by Shot Peening," *Computers & Structures*, Vol. 72, pp. 329 ~ 340.
- (2) Han, K., Peric, D., Owen, D. R. J. and Yu, J., 2000, "A Combined Finite/Discrete Element Simulation of Shot Peening Processes Part II: 3D Interaction Laws," *Engineering Computations*, Vol. 17, No. 6, pp. 680 ~ 702.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) Baek, S., Yang, W. H., Seok, C. S. and Ryu, M. H., 2003, "Residual Stress Analysis of Inclined Shot Peening Using Finite Element Method," *KSME (A) Spring Annual Meeting*, pp. 328 ~ 333.
- (6) Miao, H. Y., Larose, S., Perron, C., Levesque, M., 2009, "On the Potential Applications of a 3D Random Finite Element Model for the Simulation of Shot Peening," *Advances in Engineering Software*, Vol. 40, pp. 1023 ~ 1038.
- (7) Hong, T., Ooi, J. Y. and Shaw, B., 2008a, "A Numerical Simulation to Relate the Shot Peening Parameters to the Induced Residual Stresses," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 15, No. 8, pp. 1097 ~ 1110.
- (8) Hong, T., Ooi, J. Y. and Shaw, B., 2008b, "A



- Numerical Study of the Residual Stress Pattern from Single Shot Impacting on a Metallic Component," *Advances in Engineering Software*, Vol. 39, pp. 743 ~756.
- (9) Kim, T. and Lee, H., 2008, "A 2D FE Model for Unique Solution of Peening Residual Stress in Single Shot Impact," *KSME (A)*, Vol. 32, No. 4, pp. 362 ~ 370.
- (10) ABAQUS User's Manual, 2004, Version 6.5, Hibbitt, 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) Premark, 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*, 24, 877 ~ 886.
- (16) Kim, T., Lee, J. H., Lee, H. and Cheong, S. K., 2009, "An Area-averaged Approach to Peening Residual Stress Under Multi-impacts Using a Three-Dimensional Symmetry-cell Finite Element Model with Plastic Shots," *Materials & Design*, Vol. 31, pp. 50 ~ 59.