

단일 쏫 충돌에서의 잔류응력 유일해를 위한 2차원 유한요소해석 모델

김태형[†] · 이형일^{*}

A 2D FE Model for a Unique Residual Stress in Single Shot Impact

Taehyung Kim[†], Hyungyil Lee^{*}

Key Words : Physical behavior (물리적 거동), Finite element model (유한요소모델), Single impact (단일충돌), Plastic deformable shot (소성변형 쏫), Residual stress (잔류응력), Shot peening (쏘피닝)

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 include elastic-plastic deformation of shot ball, material damping coefficients, strain rate, dynamic friction coefficients. 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 peeing 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.

기호설명

σ_0 : 항복강도 (MPa)
 σ_t : 인장강도 (MPa)
 ϵ_p^e : 유효소성변형률
 D : 쏫볼 직경 (mm)
 d : 표면으로부터 깊이 (mm)
 v : 쏫볼 투사속도 (m/s)
 E : 재료의 영률 (MPa)
 ν : 푸아송비
 R : 재료 모델의 반경 (mm)
 H : 재료 모델의 높이 (mm)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)
 L : 요소최소크기 (mm)
 ξ : 감쇄비

1. 서론

잔류응력은 박막제조나 표면코팅, 그리고 기계적 가공 및 열처리, 쏫피닝, 레이저 피닝 등에 의해 발생된다⁽¹⁾. 잔류응력은 재료의 피로파괴 및 부식, 마모, 마찰 등에 큰 영향을 주는 주요 인자이므로 그 정량적 평가는 매우 중요하다. 쏫피닝 가공은 금속표면에 유익한 압축잔류응력을 발생시켜 부품의 피로수명을 향상시키는 기술로서 자동차 산업, 발전설비, 항공우주 등에서 전보다 더 활발히 활용되고 있다. 최근 국내외에서는 이와 같은 내피로 부품의 극대수명을 위해 최적 피닝정도 (intensity)를 선택하는 기술이 소개되고 있다. 지금까지 쏫 피닝 잔류응력은 대체로 이론적인 방법⁽²⁾이나 실험적인 방법⁽³⁾들에 의하여 예측되어 왔다. 이중 압축잔류응력 측정을 위해 널리 사용되고 있는 X-선 회절, 중성자, 홀 드릴링과 같은 실험적인 방법들은 많은

[†] 정회원, 서강대학교 기계공학과 대학원

E-mail : kthmax@sogang.ac.kr

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

^{*} 서강대학교 기계공학과

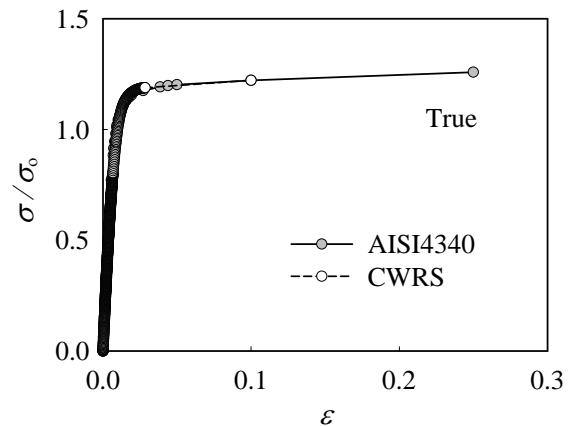
비용과 시간을 필요로 한다. 이와 같은 문제들을 극복하기 위해 최근 유한요소법을 이용한 연구가 많이 수행되고 있다. Schiffner 등⁽⁴⁾은 슛볼 1개가 충돌되는 탄소성 동적 거동해석을 실시했고, Levers 등⁽⁵⁾은 열부하를 가하는 방법으로 슛피닝에 의한 잔류응력 형태를 해석에 반영하였다. 그러나 이들 기존 해석연구 대부분은 피닝소재 표면에 슛 1개가 충돌되는 경우를 100% 커버리지로 가정하여 잔류응력을 정리하고 있다. 따라서 수많은 슛의 무작위 충돌로 발생하는 응력간섭 효과가 고려되지 않았다. 최근에는 Majzoubi 등⁽⁶⁾ 과 Meguid 등⁽⁷⁾이 3차원 다중충돌 셀 해석모델로부터 실제에 가까운 슛피닝 현상을 모사했다. Guagliano⁽⁸⁾는 제한된 국부위치에 대하여 다중충돌 해석을 수행한 후 알멘스트립의 잔류 아크하이트와 피닝잔류응력해의 관계를 수치적으로 예측했다. 국내에서도 김태준 등⁽⁹⁾이 3차원 다중충돌 유한요소 잔류응력해를 구하였다. 그러나 이들 다중충돌 모델들은 실제의 피닝현상에서 필수 요소들인 알멘강도와 커버리지를 일부 제한적으로 고려하였다. 또한 슛볼의 유한요소 모델도 충돌시 변형이 없는 강체 요소, 탄성체 요소를 사용하였다. 즉 실제의 잔류응력해 도출에 결정적 요소인 슛의 소성거동은 전혀 고려하지 않았다. 아울러 2차원 및 3차원 해석모델은 대부분 재료가 고유로 지니는 물리적 변수들과 슛피닝에 의한 운동학적 변수들 간의 조합이 이뤄지지 않았다. 본 연구에서는 기존 분리된 물리적 거동 인자들을 통합하여 피닝잔류응력을 정량적으로 평가하는 유용한 2차원 단일충돌 해석모델을 제안한다.

2. 단일충돌 2차원 유한요소해석 모델

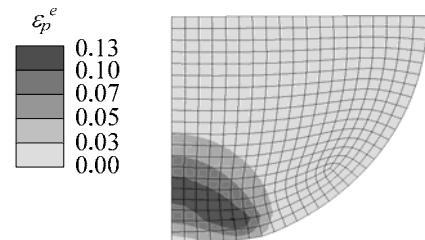
단일충돌 해석모델에 반영된 재료 물성은 피닝 공정에 많이 사용되는 AISI 4340 소재이다. 재료는 815°C 에서 담금질 한 후 230°C 에서 2시간 동안 뜨임처리 하였다. 항복강도 $\sigma_0 = 1510$ MPa, 인장강도 $\sigma_T = 1860$ MPa, 탄성계수 $E = 205$ GPa, 푸아송비 $\nu = 0.25$, 밀도 $\rho = 7850$ kg/m³이다. 슛볼은 일반적으로 널리 사용되고 있는 컷와이어 라운드 슛 (CWRS)을 모델로 선정하였다. 인장시험 물성치들은 항복강도 $\sigma_0 = 1470$ MPa, 인장강도 $\sigma_T = 1840$ MPa, 탄성계수 $E = 210$ GPa, 푸아송비 $\nu = 0.3$, 밀도 $\rho = 7850$ kg/m³이다. 그리고 경도 = 670Hv 이며, 직경 $D = 0.8$ mm이다. 슛볼은 충돌시 변형이 없다고 가정한 강체 슛 (RS: Rigid shot)과 변형을 고려한 탄성변형스�

(EDS: Elastic deformable shot) 및 소성변형스� (PDS: Plastic deformable shot)을 고려했다. Fig. 1(a)는 재료의 항복강도로 무차원화된 진 응력-변형률 선도이며, (b)는 충돌 후 슛의 유효 변형률을 나타낸 것이다.

Fig. 2는 단일충돌 2차원 유한요소해석 모델이다. 축대칭 4절점 감차적분요소 (CAX4R, ABAQUS)⁽¹⁰⁾를 사용해 시편의 유한요소망을 구성하였다. 경계조건은 평판의 바닥면을 완전구속 ($U_x = U_y = 0$) 하였고, 축 중심은 폭 (W) 방향으로만 구속 ($U_x = 0$) 하였다. 실제 슛피닝 장비의 최대성능을 고려하여 슛볼의 초기 투사속도 $v = 75$ m/s로 하였고, 재료와 슛볼의 충돌에 대하여 penalty 알고리즘을 적용하여 접촉 처리했다. 사용된 절점수는 약 3100개, 요소



(a) True stress-strain curves of material and shot



(b) Equivalent plastic strain of shot

Fig. 1 Plastic properties for FEA and deformed shot

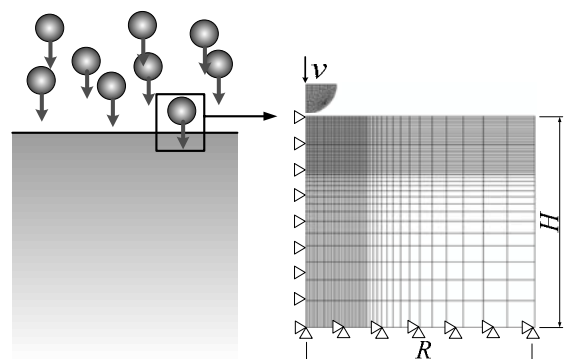


Fig. 2 FE model for single shot impact

수는 약 3000개 이다. 그리고 본 해석에서는 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS⁽¹⁰⁾를 사용하였다.

3. 해석모델의 검증

제시된 2차원 단일충돌 모델에서 가장 적절한 시편의 크기를 Fig. 3로부터 결정하였다. 가로축의 x 는 충돌 중심 축으로부터 표면을 따라서 반경 (R) 방향으로의 거리이며, y 는 충돌 중심 축을 따라서 표면으로부터 깊이방향으로의 거리이다. 세로축은 각 거리에서 항복강도 ($\sigma_0=1510\text{MPa}$)로 무차원화된 유효응력을 나타낸다. 약 2mm일 때부터 응력의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이로부터 주변 유효응력이 충분히 0이 되는 해석모델 반경 (R)과 높이 (H)를 각각 3mm로 정했고, 이는 반무한체에 대한 단일 솟 충돌에 해당한다.

솟피닝에 의해 생성되는 압축잔류응력은 대부분 표면 및 표면직하부에 내재한다. 따라서 유한요소 해석 모델에 대해서도 중심축으로부터 표면부위는 세밀하게 요소망을 구성하였고, 점차 응력변화가 작아지는 부위는 상대적으로 크게 요소망을 구성했다. Figs. 4와 5 (이하 그림들의 응력들은 재료의 항복강도로 무차원화됨)로부터 충돌부를 기준으로 압축잔류응력에 대한 요소 최소크기 (L)를 정했다. 이때 표면 잔류응력은 표면에 생성된 요철로 인한 통상의 XRD 실험오차와 접촉해석에 의한 해석적 오차를 고려하여 솟볼 직경의 약 5% ($d/D=0.04$)가 되는 위치에서 평가됐다. 또한 솟볼은 소성변형을 고려한 모델이 사용됐다. 요소의 최소크기 (L)가 솟볼 직경 (D)의 1/40일 때부터 표면 및 최대 압축 잔류응력 모두 일정하게 수렴됐다. 이에 본 해석 모델의 요소 최소크기를 0.02mm로 정하였다.

4. 유한요소해석 및 고찰

재료와 솟볼이 서로 충돌하면 재료 내부에서는 응력파동이 발생하여 전파된다. 이때 충돌에너지 손실로 응력파동은 시간이 지남에 따라 점차 감소하고 결국 소멸된다. 이처럼 충돌에너지를 좀더 단시간에 소산시키고자 본 연구에서는 재료감쇄를 고려했다. 그러나 이 같은 재료감쇄는 물리적으로 정확히 정의되지 않는다. 따라서 식 (1)의 근사화된 질량 비례계수 (α)와 강성 비례계수 (β)를 사용하는 Rayleigh 감쇄를 이용한다. 이 계수들은 재료 또는 구조물 특성 등의 에너지 손실에 의해 결정된다. 이로부터 감쇄를 표현하는 에너지 손실모델 중에

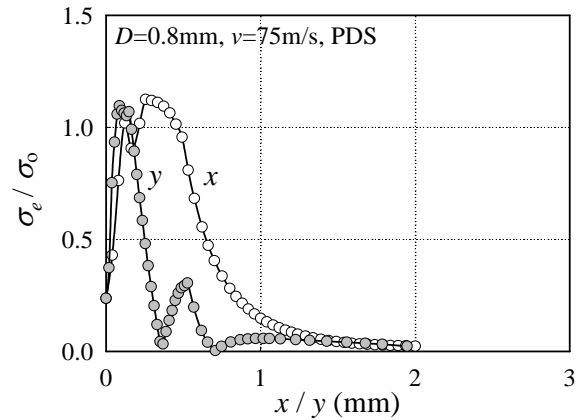


Fig. 3 Selection of FE model size

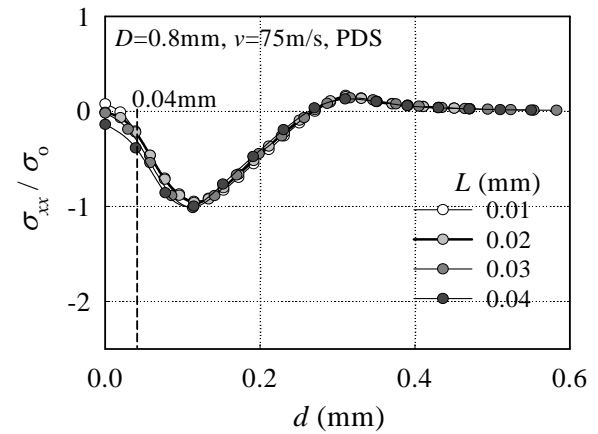


Fig. 4 Convergence of residual stresses for L

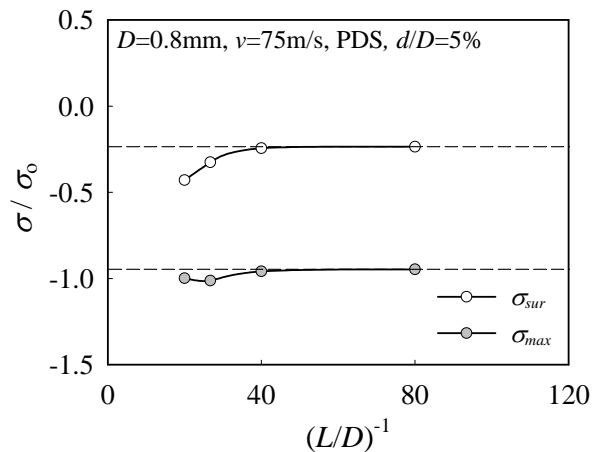


Fig. 5 Selection of minimum element size

본 연구에서는 Han과 Owen⁽¹¹⁾이 제시한 Viscous 감쇄모델을 이용하였다. 이 모델은 비선형 스프링 및 완충장치 (dash-pot) 등의 유동학적인 요소들로 구성되어 물리적 표현이 용이하기 때문이다. 따라서 식 (1)은 (2)와 같이 축소 표현된다 ($\beta = 0$)⁽¹¹⁾. 식 (2)와 (3)에 다양한 감쇄비 (ξ)를 적용하여 질량 비례계수 (α)를 구한 후 해석에 활용하였다.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

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

$$\omega_0 = \frac{\pi}{2H} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

여기서 ω_0 는 초기 주파수, ξ 는 감쇠비 ($\xi < 1$), H 는 재료 모델의 높이, E 는 영률, ρ 는 밀도이다. Fig. 6는 강체, 탄성, 소성변형률 모델에 0-0.5의 감쇠비를 적용하고 해석 후의 수렴된 잔류응력을 보여준다. 마찰과 변형률 속도는 고려되지 않았다 (RI : rate independent). Fig. 6(a) 강체는 감쇠비가 0.3-0.5일 때 유사한 잔류응력분포를 보였고, (b)의 탄성변형률은 0.1부터 수렴됐다. (c)의 소성변형률은 모든 감쇠비에 대해 수렴되었다. 또한 감쇠비의 변화에 따른 해석시간도 비교하였다. 소성변형률의 경우 감쇠비가 0일 때 해석시간이 240 초이고, 감쇠비가 0.5일 때는 85 초로서 약 1/3로 단축되었다. 이로써 충분한 응력수렴 및 최단 해석시간 등을 고려하여 감쇠비를 0.5로 선정했다. 이는 해석시간이 결정적 변수로 작용되는 3차원 다중충돌 해석시에 상당히 유용한 정보로 활용될 것이다.

동적 마찰계수를 실험적으로 측정하기란 그다지 쉽지 않다. 또한 슛피닝 현상과 같이 단일충돌이 아닌 다중충돌이 지배적인 경우는 더욱 난해하고 복잡하다. 이처럼 다중충돌에 의해 표면에 발생하는 동적 마찰은 잔류응력에도 적지 않은 영향을 준다. 따라서 동적 마찰의 영향을 무시할 수 없기 때문에 Fig. 7과 같이 본 해석모델에 무마찰부터 점차 마찰계수를 높여가면서 일정한 분포를 갖는 유한요소 잔류응력해를 관찰하였다. 강체 슛, 탄성 및 소성변형률 각각 모델에 마찰계수를 0-0.5까지 변화시켰으며, 재료 감쇠비는 Fig. 6에서 선정된 0.5를 적용했다. 강체 및 탄성변형률 모델들에서는 마찰계수 0-0.2 사이에서 잔류응력해들의 차이가 매우 컸다. 특히 무마찰시에 각 모델은 모두 표면에서는 압축잔류응력 (-)의 값을 주나, 마찰계수가 커지면서 점차 0에 가까운 값을 준다. 이와 달리 소성변형률의 경우는 마찰계수 변화에 무관하게 모두가 유사한 잔류응력 분포를 나타냈다. 마찰계수가 0.2보다 크면, 강체스�, 탄성 및 소성변형률 모델들로부터 모두에서 잔류응력 값이 더 이상 마찰계수 증가에 따라 변하지 않음을 알 수 있다. 이로써 동적 마찰계수 0.2를 피닝시 잔류응력해를 위한 본 해석 모델의 또 다른 물리적 인자로 선정

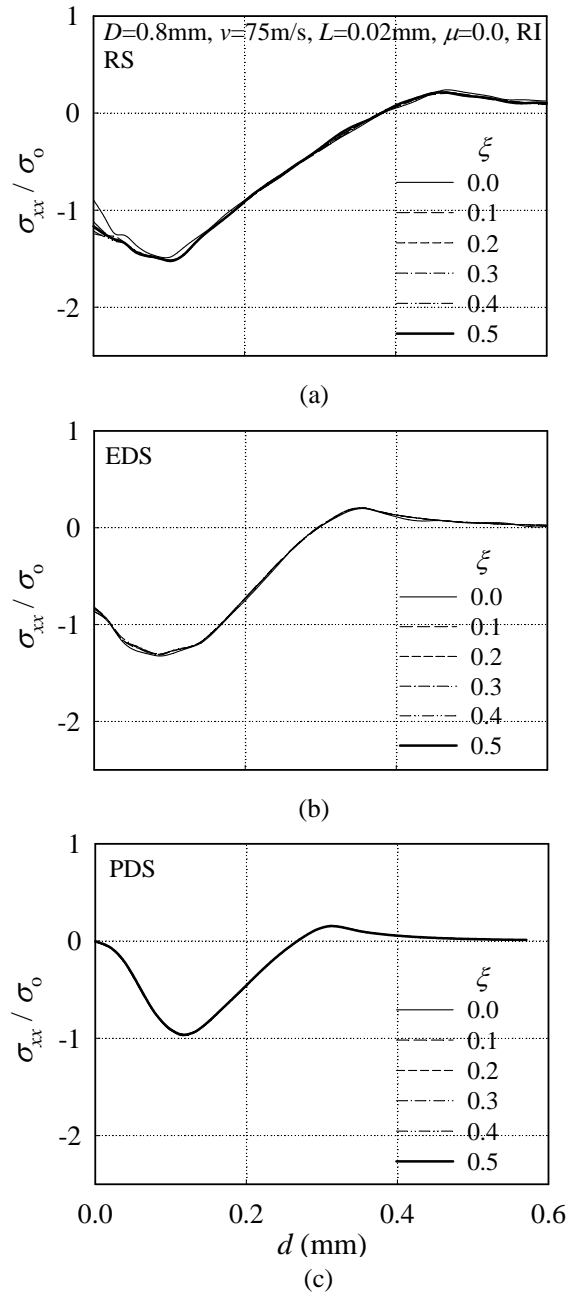


Fig. 6 Material damping effects

하였다. 이와 같이 동적 마찰계수가 고려된 2차원 유한요소해석 모델은 실제에 보다 가까워졌고 그 유효성도 한층 높아졌다.

금속재료는 가공법이나 사용 장비에 따라 저속 또는 고속으로 성형된다. 피닝시 투사되는 슛볼이 재료에 충돌하면 재료는 순간 고속 변형하게 되어 재료의 변형률 속도 의존성을 고려할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 물리적 거동 인자로서 변형률 속도를 추가로 고려하였다. 변형률 속도의 계산은 다음 식 (5)와 같이 표현되는 power law식을 적용하였다.

$$\dot{\epsilon}_p = D_m \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^n \quad (5)$$

여기서 $\dot{\epsilon}_p$ 는 유효 소성변형률 속도, σ 는 소성변형률 속도 ($\neq 0$)에서의 항복강도, σ_0 는 항복강도이다. D_m 과 n 은 재료상수로서 Premack와 Douglas⁽¹²⁾의 유효 소성변형률 속도에 대한 무차원화된 항복강도 선도로부터 $D_m=2.5 \times 10^6$, $n=6$ 로 계산되었다.

Fig. 8은 강제, 탄성 및 소성변형률 모델들에 대해

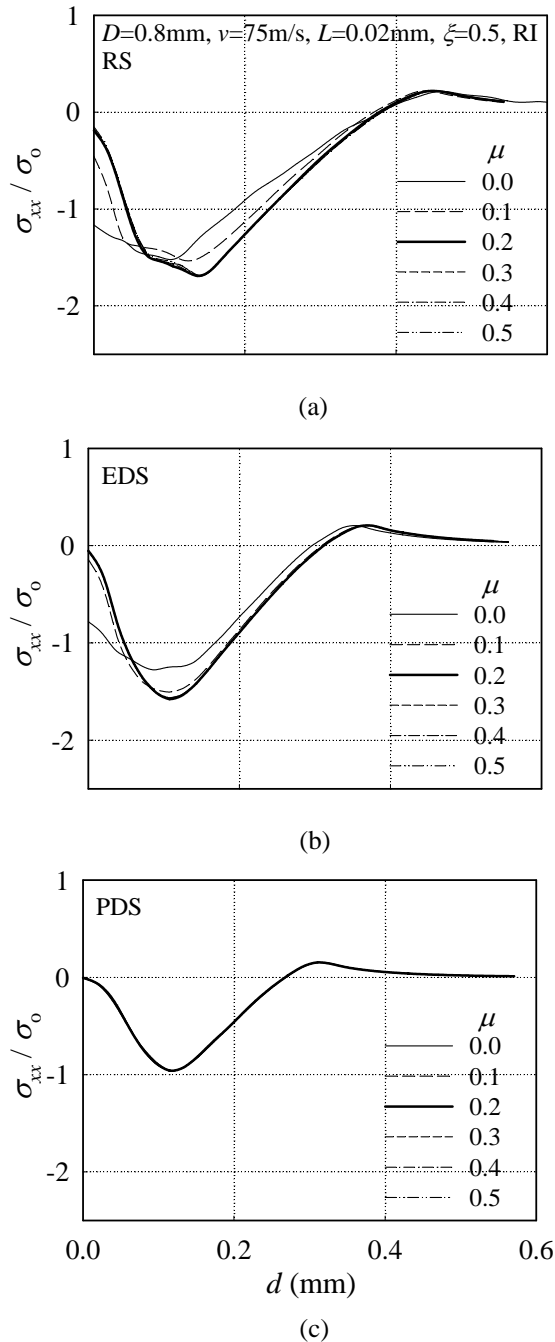


Fig. 7 Dynamic frictional effects

변형률 속도를 반영 (RD : rate dependent)한 경우와 반영하지 않은 경우 (RI)의 잔류응력해를 비교한 것이다. 강제 및 탄성 변형률 모델들의 경우 최대 압축잔류응력해가 더 컸으며, 소성변형률의 경우 오히려 해가 인장 (+)방향으로 이동하였다

Fig. 9은 Figs. 6 - 8에서와 같이 각각 분리되었던 물리적 거동 인자들을 해석모델에 모두 반영한 후 강제, 탄성 및 소성변형률 모델들에 대한 유한요소 잔류응력해를 나타낸 것이다. 그리고 XRD에 의해

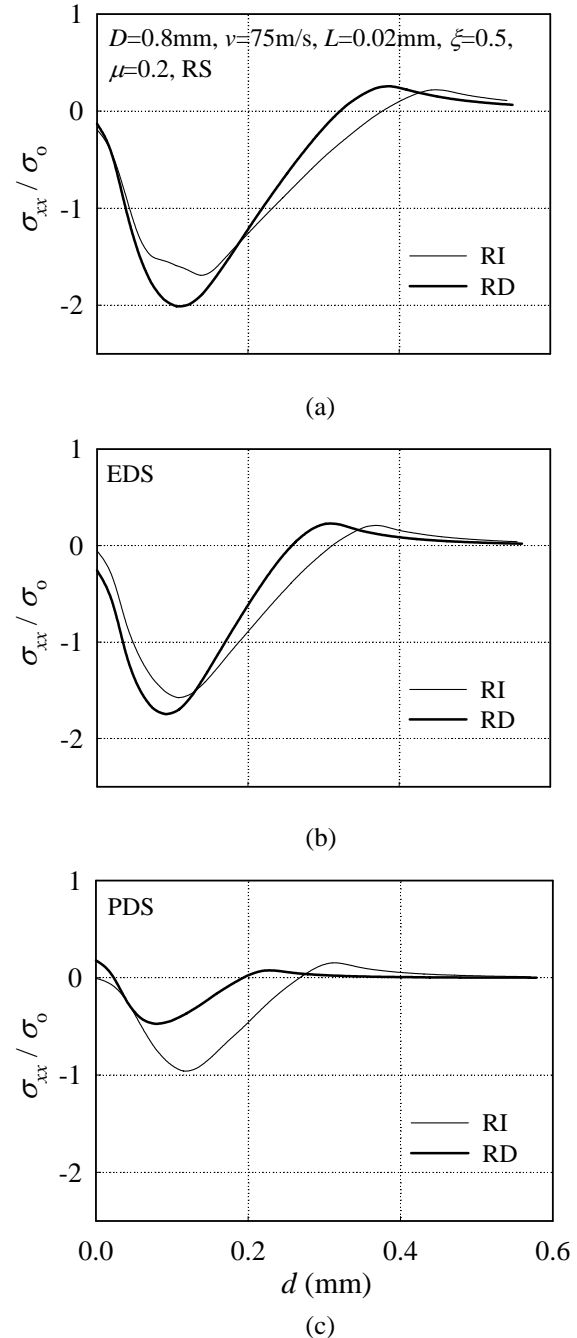


Fig. 8 Strain-rate effects

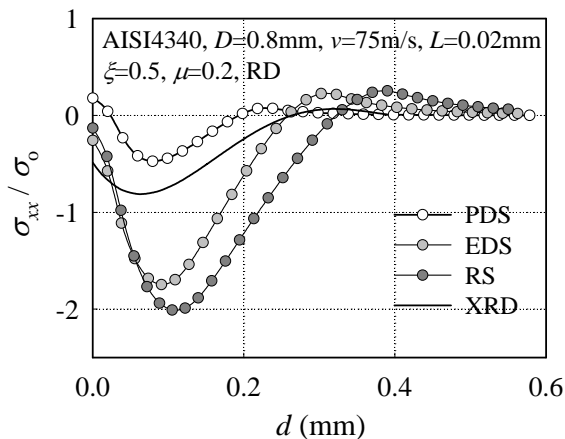


Fig. 9 Residual stresses with combined physical factors

측정된 실험 잔류응력해와 비교하였다. 앞서 분리된 인자들을 모두 통합-반영하여 하나의 유한요소 피닝잔류응력해를 얻음으로써 좀더 실제의 피닝 잔류응력해에 근접할 수 있었다. 특히 강체 및 탄성변형률 모델들에 대한 유한요소해는 실험해와 상당히 큰 차이를 보인다. 이와 달리 소성변형을 고려한 소성변형률 모델의 경우는 실험해와 비교하여 아직 다소의 응력차가 있긴 하나 강체 및 탄성체 모델보다는 훨씬 향상된 해를 준다. 본 유한요소 피닝잔류응력해가 실험치와 차이를 갖는 주된 이유는 다음과 같이 사료된다. XRD 실험해는 X-선이 조사되는 어느 일정면적에 대한 평균 잔류응력이며, 유한요소해는 충돌 중심선을 따라서의 값이다. 따라서 추후 정량적인 슷피닝 잔류응력평가를 위해서는 다중충돌 해석이 필수이다. 이상 통합된 거동 변수들과 더불어 소성 변형률을 고려해 단일 슷 충돌 잔류응력에 대한 해석모델을 제시했으며, 이는 다중충돌시의 피닝 잔류응력을 위한 3차원 해석모델의 기초가 될 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 슷피닝에 의한 잔류응력을 평가하기 위해 물리적 거동인자들이 조합된 2D 단일충돌 유한요소해석 모델을 제안하였다. 반영된 물리적 인자들은 슷볼의 탄-소성 변형, 재료감쇄 계수, 변형률 속도, 동적 마찰계수 이다. 해석 후 유한요소모델은 표면 및 최대 압축잔류응력, 변형 깊이 등에서 수렴된 잔류응력 분포를 나타냈다. 또한 강체나 탄성변형률 모델들과 달리 소성변형률 모델은 XRD 실험해에 매우 근접한 해를 준다. 이로써 통합된 인자들과 소성변형 슷볼로 구성된 유한요소모델의 유효성을 입증하였다. 본 모델은

통상의 다중충돌 피닝잔류응력을 해석하는 3 차원 유한요소모델에 사용될 수 있을 것이다.

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) 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.
- (12) Premack, T. and Douglas, AS., 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.