

소성샷이 포함된 3차원 다중충돌 대칭-셀 해석모델을 이용한 면적평균 피닝잔류응력해

김태형[†] · 이형일^{*}

(2009년 1월 5일 접수, 2009년 1월 30일 수정, 2009년 2월 18일 심사완료)

Area-Averaged Solution of Peening Residual Stress Using a 3D Multi-impact Symmetry-cell FE Model with Plastic Shots

Taehyung Kim and Hyungyil Lee

Key Words : Area-Averaged Solution (면적평균해), Symmetry-Cell (대칭-셀), Almen Curve (알멘선도), Peening Coverage (피닝커버리지), Arc Height (아크하이트), Multi-Impact (다중충돌)

Abstract

In this paper, we estimate area-averaged solution of peening residual stress using a 3-D multi-impact symmetry-cell FE model. The symmetry-cell model includes factors reflecting peening phenomena and plastic shot. Area-averaged solution is much closer to XRD experimental solution than 4-node-averaged solution in plastic shot FE model. We then obtain FE Almen saturation curve corresponding to experimental Almen curve based on area-averaged solution. Using the curve, we obtain FE area-averaged solution in major peening materials, and compare the FE solution with experimental solution. In peening materials, surface, maximum compressive residual stress and deformation depth reach experimental solutions. Thus, FE Almen curve is useful for estimation of residual stress solution and could improve the efficiency of peening process. Consequently, it is confirmed that concept of area-averaged solution is the realistic analytical method for evaluation of peening residual stress.

1. 서론

피닝은 금속재료 표면에 유익한 압축잔류응력을 발생시켜 부품의 피로수명을 향상시키는 기술로서 자동차, 발전설비, 항공우주 산업 등에서 활발히 활용되고 있다. 대부분 피닝잔류응력은 X-선 회절 (X-ray diffraction: XRD)을 이용한 실험법⁽¹⁻³⁾에 의해 측정되나, 많은 비용과 시간, 숙련된 기술이 요구된다. 이 같은 문제점들을 해결하고자, 이론적

방법들⁽⁴⁻⁶⁾에 의해 피닝잔류응력해들이 예측되어 왔으며, 최근에 유한요소법을 이용한 연구들이 많이 수행되고 있다. 초기 해석연구들에는 2차원 단일샷 충돌 해석모델이 주로 사용되었다. 대부분 재료표면에 샷 한 개가 충돌되는 경우를 100% 피닝커버리지 (coverage: C)로 가정하여 잔류응력을 정리하고 있다.^(7,8) 즉 수많은 샷들의 무작위 충돌로 발생하는 응력간섭 효과가 전혀 고려되지 않았다. 또한 물리 및 운동학적 인자들의 통합을 시도하지 못했다. 이후 점차로 실제 샷피닝 충돌 현상에 가까운 다중충돌 해석연구들이 다수 소개되고 있다.⁽⁹⁻¹¹⁾ 그러나 실제의 피닝현상들이 반영되지 않았고, 샷들의 소성변형도 고려되지 않았다. 또한 양축등가응력 수렴성도 살펴보지 않아 실험해와 비교도 없었다. 즉 실험적 검증이 무시됐다. 이에 김태형과 이형일^(12,13)은 2차원 단일샷 충돌

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 (2008. 5. 29.-30., 충북대) 발표논문임]

[†] 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과

E-mail : kthmax@sogang.ac.kr

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

^{*} 회원, 서강대학교 기계공학과

해석을 통해 통합인자 및 소성솓 해석모델을 제안했으며, 이를 3차원 다중충돌 대칭-셀 해석모델에 채택하였다. 여기에 유한요소 피닝커버리지, 충돌 순서, 주기반복 등의 피닝현상들을 추가로 반영했다. 이로부터 양축등가 피닝잔류응력 유한요소해와 XRD 실험해를 비교하여 해석해의 유효성을 검증하였다.

Boo 등⁽¹⁴⁾은 초경합금강 표면 Ø4mm 원형면적에서 XRD 실험 잔류응력을 얻었다. Hong 등⁽¹⁵⁾은 자동차용 소재표면의 2mm×7mm 면적에서 XRD 실험해를 얻었다. 최근에는 Jakobsen 등⁽¹⁶⁾이 3차원 XRD로 0.25mm×0.5mm 면적에서 재료의 변형률 특성을 살펴보기도 했다. 피닝 실험연구들을 살펴보면, Prevey와 Cammett⁽¹⁷⁾은 5mm×5mm 면적평균해와 솓피닝 커버리지의 관계를 설명했다. Kirk와 Hollyoak⁽¹⁸⁾도 4mm×4mm, 12mm×1mm, 4mm×1mm 등의 다양한 면적평균 표면잔류응력해를 얻었다. 이와 같이 XRD 실험해는 다양한 크기와 형상을 갖는 면적들에서 평균해를 준다. 실험연구와 달리 기존 해석연구들은 단순히 솓볼이 충돌된 단일 절점 위치에서만 해석해를 주었을 뿐, 면적평균해를 전혀 고려하지 않았다.^(9,10) 따라서 XRD 실험해와 큰 차를 갖는 것은 자명하다. 이에 본 연구에서는 김태형과 이형일⁽¹²⁾이 제안한 3차원 다중충돌 대칭-셀을 활용해 대칭-셀의 각 단면을 구성하는 전체절점들에서 면적평균해를 구한다. 이를 XRD 실험해와 비교해 실제해로의 근접성을 살펴본다. 이로부터 면적평균해에 기초한 유한요소 알멘선도(Almen curve)를 구한다. 알멘선도는 피닝장비 성능을 가늠하는 척도이며, 피닝정도를 파악하기 위한 지표로 활용된다. 이를 활용해 솓볼 투사속도를 계산하고, 다양한 피닝소재들에 채택한다. 해석 후 XRD 실험해에 근접된 면적평균해를 얻어, 그 유효성을 검증한다. 궁극적으로 본 연구의 면적평균해 개념은 실제 피닝잔류응력해의 예측에 매우 체계적인 해석방법임을 확인한다.

2. 다중충돌 3차원 면적평균 해석모델

2.1 해석모델 및 경계조건

유한요소 면적평균 피닝잔류응력해를 얻기 위해 김태형과 이형일⁽¹²⁾이 제안한 3차원 대칭-셀 해석모델을 활용한다(Fig. 1). 솓볼간 간격(또는 대칭-셀 한번의 크기) S 를 솓볼의 반지름 $R = 0.4\text{mm}$ 로 고정했다. 이는 대칭-셀 모델과 솓볼 대칭을 함께 고려하면 $S \geq R$ 이어야 하며, $S = R$ 일 때 응력

간섭 효과가 가장 크기 때문이다. 대칭-셀은 통합인자와 솓피닝 현상들을 포함한다.^(12,13) 대칭-셀 네충돌위치들 A-D에서 절점평균해를 얻고, 전체절점들에서 면적평균해를 얻는다.

본 해석연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS⁽¹⁹⁾를 사용했다. 솓피닝시 시편의 탄소성 변형을 해석하고자 ABAQUS Explicit 코드 중에서 NLGEOM (Nonlinear geometry) 옵션을 사용했으며, 3차원 8절점 감차적분 요소들(C3D8R)로 유한요소망을 구성하였다. 해석모델의 바닥면은 완전구속($U_x = U_y = U_z = 0$) 처리 하고, 네 옆면들은 대칭($U_x = 0$, 또는 $U_z = 0$)처리 한다. 또한 대칭-셀의 A-D를 기준으로 솓볼들도 1/4로 모델링한 후 두 면들에 각각 대칭 처리한다($U_x = 0$, 또는 $U_z = 0$). 솓볼의 초기 투사속도는 김태형과 이형일^(12,13)의 선행연구에서 정리된 실험 알멘선도로부터 유도된 식들을 사용해 $v = 55\text{m/s}$ 를 얻는다. 재료와 솓볼간 충돌시 페널티 알고리즘을 적용해 이들 양쪽 면들에 접촉요소면(Contact surfaces)을 배치했다.

2.2 입력 재료물성 및 해석모델 검증

본 연구에 사용된 재료들은 실제 솓피닝시 많이 사용되는 탄소강재인 AISI4340, SAE170, AISI4140, SPS8 소재들이다. 이중 SAE1070 소재는 유한요소 알멘선도를 위한 알멘스트립(Almen strip) 유한요소 모델에 채택된다. AISI4340 소재의 경우 815°C에서 담금질 후, 230°C에서 2시간 동안 뜨임 처리했다.

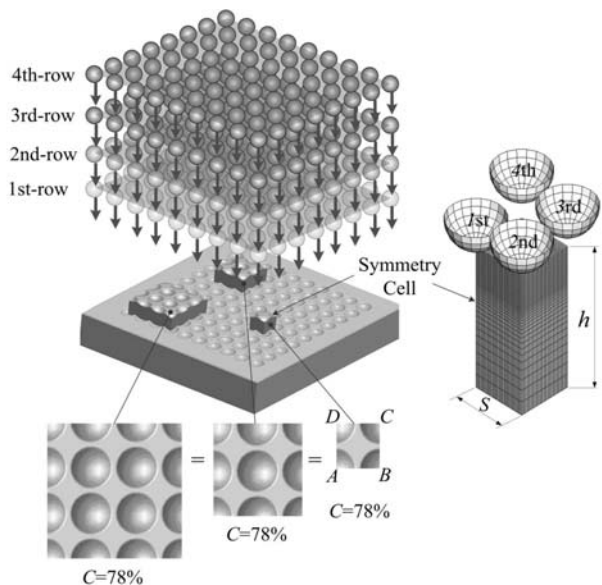


Fig. 1 FE symmetry-cell model for area-averaged residual stress of shot peening under multi-impacts

해석입력 물성들로서 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. AISI4140 소재의 경우 850°C 에서 담금질 후, 450°C 에서 2시간 동안 뜨임 처리하였다. 항복강도 $\sigma_0 = 1390\text{MPa}$, 인장강도 $\sigma_T = 1700\text{MPa}$, 탄성계수 $E = 210\text{GPa}$, 푸아송비 $\nu = 0.28$, 밀도 $\rho = 7850\text{ kg/m}^3$ 이다. SPS8 소재의 경우 기계가공 후 산화/탈탄을 방지하고자 진공열처리했고, 910°C 에서 담금질 후, 420°C 에서 90분 동안 뜨임 처리했다. 항복강도 $\sigma_0 = 1630\text{MPa}$, 인장강도 $\sigma_T = 1920\text{MPa}$, 탄성계수 $E = 210\text{GPa}$, 푸아송비 $\nu = 0.3$, 밀도 $\rho = 7850\text{ kg/m}^3$ 이다. 또한 유한요소 알멘선도를 얻고자 알멘스트립-A 인장시편을 제작하여 인장시험을 수행했다. 인장시험 후 얻은 물성들은 항복강도 $\sigma_0 = 1380\text{MPa}$, 밀도 $\rho = 7850\text{kg/m}^3$, 탄성계수 $E = 210\text{GPa}$, 푸아송비 $\nu = 0.25$ 이며, 이들을 알멘스트립 해석모델에 채택했다. 컷와이어라운드 샷을 해석모델로 택했고, 항복강도 $\sigma_0 = 1580\text{MPa}$, 밀도 $\rho = 7850\text{kg/m}^3$, 탄성계수 $E = 210\text{GPa}$, 푸아송비 $\nu = 0.3$ 이다. 샷볼 직경 $D = 0.8\text{ mm}$ 이며, 강제, 탄성 및 소성샷 해석모델들을 고려했다.

유한요소 해석모델은 김태형과 이형일⁽¹³⁾의 2차원 해석에서 결정된 최소 요소크기 $L = 0.02\text{mm}$, 재료 감쇠계수 $\xi = 0.5$, 동적 마찰계수 $\mu = 0.2$ 를 채택했다. 또한 양측등가응력으로의 수렴성과 무작위적 충돌 유형에 가까운 Case3 해석모델을 활용했다.⁽¹²⁾ 이때 대칭-셀의 높이 $h = 1.5\text{mm}$ 이다. 특히 본 연구에서 유한요소 알멘선도를 위한 알멘스트립-A의 대칭-셀 높이 $h = 1.27\text{mm}$ 로 했다.⁽²⁰⁾

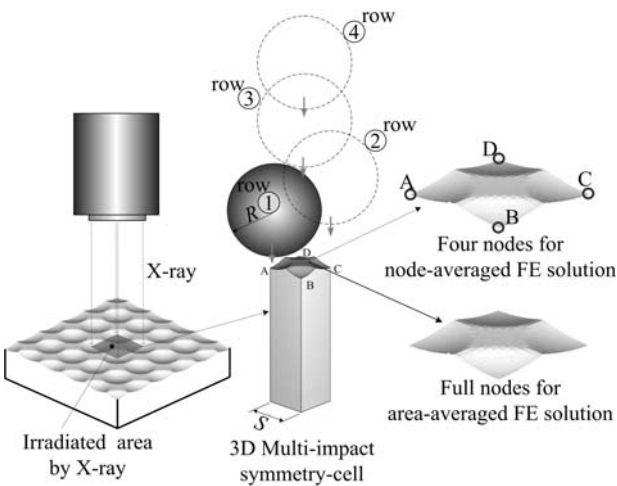


Fig. 2 Four-nodes and full-nodes in a symmetry-cell model for peening residual stresses

3. 절점 및 면적평균 유한요소 잔류응력

Fig. 2는 X-선 조사면적에 기초한 대칭-셀에서의 4-절점 및 전체절점들을 보여준다. 4-절점평균화는 샷볼이 충돌되는 대칭-셀 A-D 위치에서 얻어지며, 전체절점평균화는 대칭-셀 단면 ($0.4\text{mm} \times 0.4\text{mm}$)을 구성하는 전체절점들에서 얻어진다. 본 연구에서 전체절점평균화를 면적평균해라 한다. 또한 이를 4-절점평균해와 비교한다. 샷볼모델들로서 강제샷(RS: rigid shot), 탄성샷(EDS: elastic deformable shot), 소성샷(plastic deformable shot)들을 사용한다.

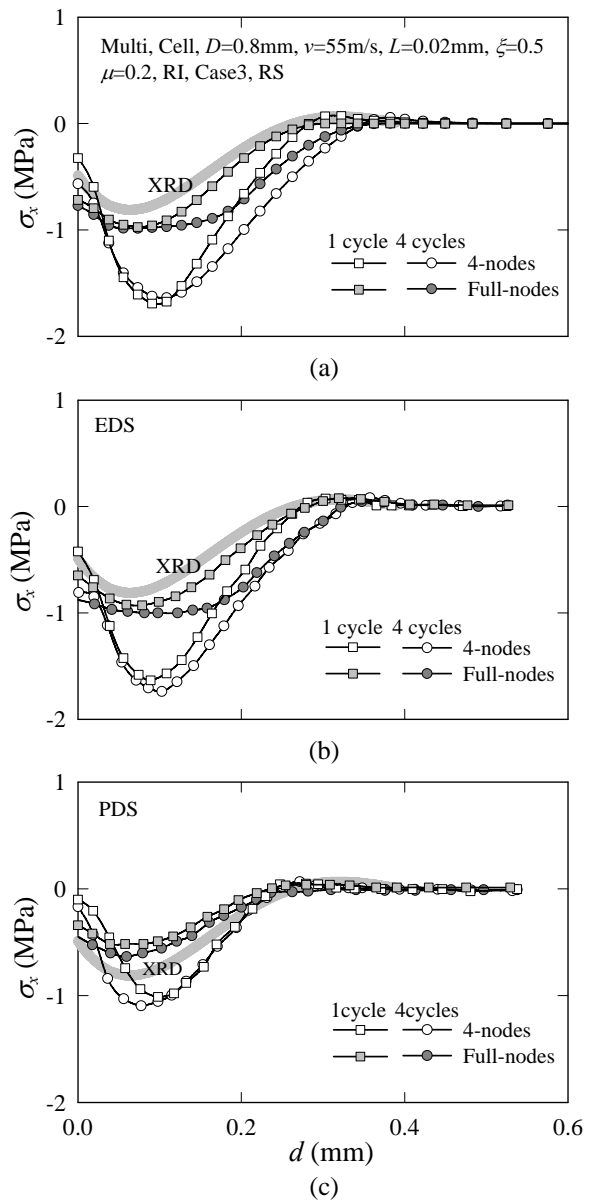


Fig. 3 Comparison of full-nodes-averaged residual stress with 4-nodes-averaged residual stress in (a) RS, (b) EDS and (c) PDS

Fig. 3은 솟볼의 해석모델들에서 4-절점 및 전체절점 평균잔류응력 분포들을 보여준다. 투사 속도 $v = 55\text{m/s}$ 를 해석에 반영했다. 대칭-셀 A-D에 단일주기 (1 cycle = 4 shots) 및 다주기 (4 cycles = 16 shots) 충돌 후 4-절점평균 및 면적평균해를 구해, 이들을 XRD 실험해와 비교한다. 세 솟볼 모델들에서 4-절점평균해는 XRD 실험해와 상당한 차를 보이는 반면, 면적평균해는 XRD 실험해에 상당히 근접한다. Fig. 3(a)-(b)의 강체 및 탄성솟 유한요소 면적평균 압축응력해들은 XRD 실험 압축응력해보다 크다. 100%의 피닝커버리지를 갖는 단일주기 충돌시 유한요소해가 XRD 실험해보다 크며, 100% 이상의 피닝커버리지를 가지면 충돌시에 재료가 수용하는 에너지량도 증가해, 해석해와 실험해의 차는 더욱 커진다. 본 연구에서 AISI4340 소재는 200% 피닝커버리지를 갖는다.⁽²¹⁾ 이에 200% 피닝커버리지를 갖는 강체, 탄성솟 해들은 실험해로의 접근성이 떨어진다. 반면에 Fig. 3(c)에서 소성솟의 면적평균해는 실험해로의 접근성이 매우 우수하다. 이를 근거로, 이후의 해석에 모두 소성솟 모델이 활용된다. 이로부터 소성솟이 포함된 본 연구의 3

차원 다중충돌 대칭-셀이 면적평균 피닝잔류응력해를 위한 적합모델임을 확인했다. Fig. 4는 소성솟 해석모델에서 4-5주기 충돌시 면적평균해의 양측 등가응력으로서의 수렴성을 보여준다. 두 충돌주기들에서 모두 완벽한 수렴성을 갖는다. 이와 같이 양측등가응력으로서의 뛰어난 응력수렴을 주는 면적평균해 개념은 선행 해석연구들에서는 전혀 보고된바 없다. 특히 실제 XRD 잔류응력 측정원리를 가장 흡사하게 대변한다는 점에 주목되며, 상당히 실제적임을 강조한다. 또한 본 해석모델은 다음절에서 유한요소 알멘선도를 정리하는데 사용된다.

4. 면적평균해에 기초한 유한요소 알멘선도

알멘선도는 피닝장비 성능을 가늠하는 척도이며 피닝정도 등을 파악하는 중요한 기준표이다. 이를 활용하여, 얻고자 하는 알멘강도에 대응되는 변수들을 쉽게 선택 및 조절할 수 있다. Guagliano⁽⁹⁾는 3차원 다중충돌 해석으로 얻어진 잔류응력 값들을 식 (1) - (2)에 적용하여 투사속도와 아크하이트의 관계를 설명했다. 그러나 그는 다중충돌 후 단일절점위치에서만 아크하이트를 계산했다. 즉 면적평균해가 아닌 절점해를 사용하였다. 아울러 실제

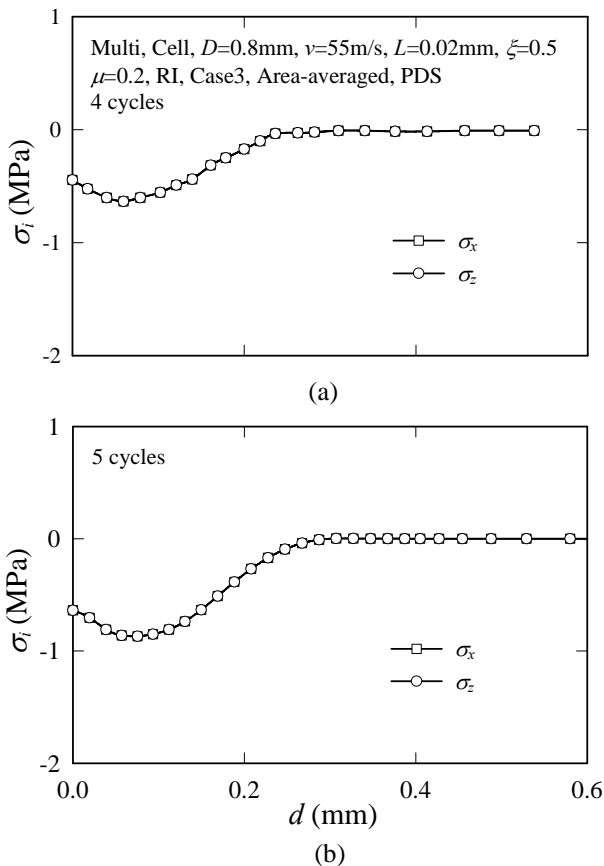


Fig. 4 Convergence to equi-biaxial stress in (a) 4 cycles and (b) 5 cycles

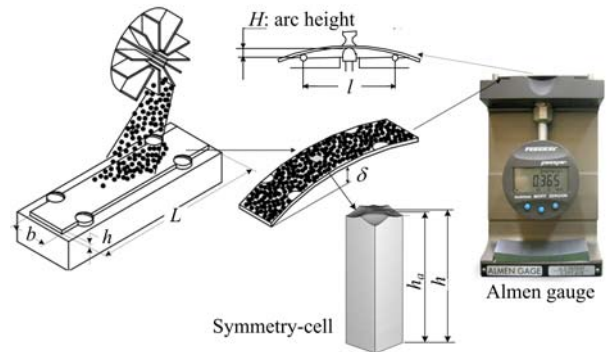


Fig. 5 Schematic illustration of a 3D symmetry-cell model for finite element arc heights

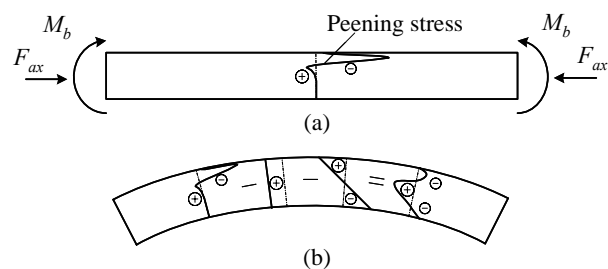


Fig. 6 Calculation of residual stresses in the Almen strip⁽²²⁾

피닝시 중요한 변수로 사용되는 피닝커버리지가 전혀 고려되지 않았으며, 슷볼의 모델도 강체스위를 채택했다.

$$H = \frac{3Ml^2}{2Ebh^3} \quad (1)$$

$$M = \int_A \sigma_x(y) y dA \quad (2)$$

Fig 5는 유한요소 아크하이트를 얻고자 사용된 3차원 대칭-셀 모델을 보여주며, 알멘스트립-A를 대신한다. L 은 알멘스트립 길이로서 76mm이며, l 은 알멘게이지의 표점거리로서 31.75mm⁽²⁰⁾이다. H 는 아크하이트의 크기로서 알멘게이지 표점거리 l 에 대한 스트립의 만곡높이를 의미한다. M 은 모멘트, E 는 알멘스트립 탄성계수 210GPa, b 는 알멘스트립 폭 19mm이다. h 는 슷피닝 전의 알멘스트립 두께로서 1.27mm, h_a 는 슷볼들의 충돌 전과 충돌 후 생성된 압흔들을 고려한 대칭-셀 평균높이 (피닝후 알멘스트립 두께)가 된다 (Fig. 5). y 는 알멘스트립 중립축으로부터 알멘스트립 표면 및 바닥면으로의 거리이며, $\sigma_x(y)$ 는 그 거리 y 에서 x -방향 잔류응력 값을 나타낸다.

본 연구에서는 식 (1)-(2)를 활용하여, 면적평균해에 기초한 유한요소 알멘선도를 얻어, 이로부터 유한요소 아크하이트, 유한요소 슷피닝 커버리지, 투사속도들간의 관계식들을 유도한다. 이때 식 (1)에서 Guagliano⁽⁹⁾는 l 에 알멘스트립 전체길이 L 을 대입하는 오류를 범했으나, 본 연구에서는 SAE J442⁽²⁰⁾ 규정을 준수하여 아크하이트를 계산했다. 또한 Guagliano는 슷피닝 전후, 알멘스트립 두께 감소를 배제해 $h=1.27\text{mm}$ 를 대입했으나, 본 연구에서는 두께감소를 고려해 $h=h_a$ 를 반영했다.

Fig 6는 슷피닝 후 알멘스트립의 내부에 생성된 잔류응력 분포들을 보여준다.⁽⁹⁾ (a)는 고정볼트가 체결된 경우의 알멘스트립에 내재하는 피닝잔류응력과 반력들을, (b)는 스트립 고정볼트를 제거한 후 굽은 알멘스트립의 응력평형상태를 보여준다. (a)의 피닝잔류응력 분포를 통하여 알멘스트립에 작용하는 굽힘모멘트 M 을 구한다. 그리고 이를 식 (1)에 대입해 아크하이트 H 를 계산한다. 유한요소 알멘선도를 표현하고자 여기에 유한요소 피닝커버리지를 추가 반영한다. 2차원 단일스위 충돌시 $C=100\%$ 라 한다. 이를 기준으로 2회 반복충돌시 $C=$

200%, 3회 반복충돌시 $C=300\%$ 가 된다. 또한 3차원 다중충돌시 4개의 슷볼들이 충돌되는 1주기 충돌

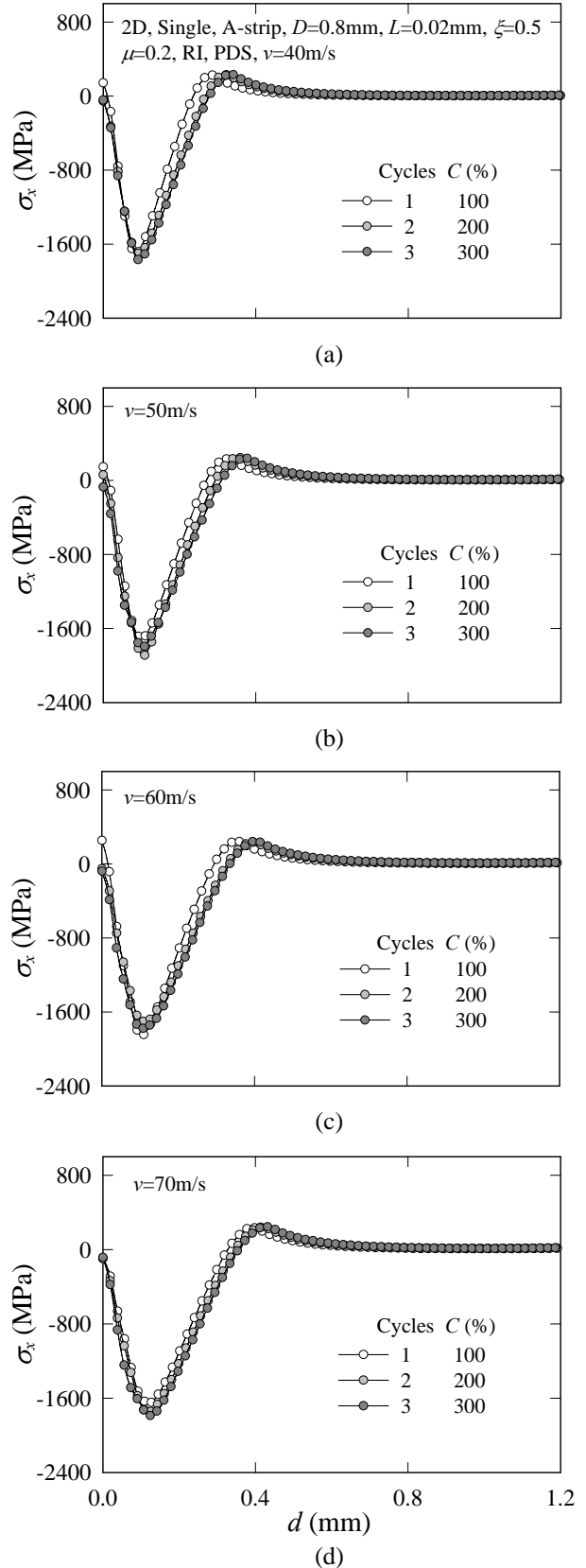


Fig. 7 Residual stresses with various impact cycles in 2D single shot impacts

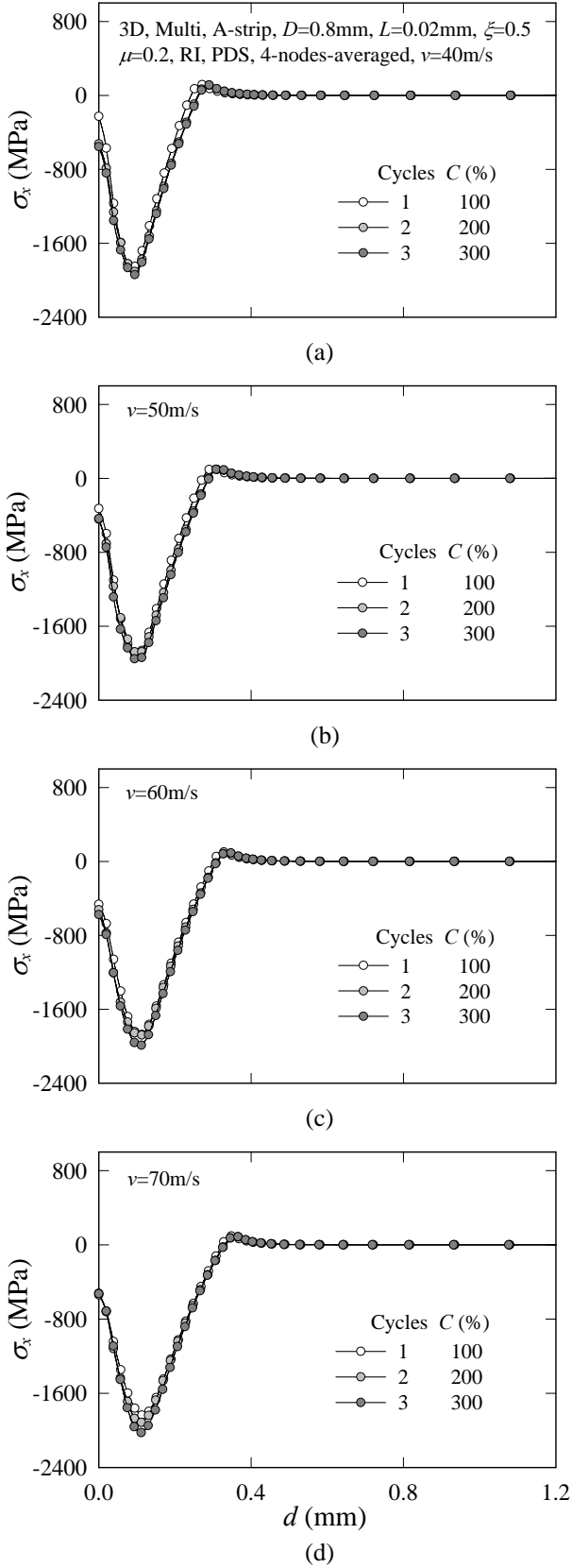


Fig. 8 4-nodes-averaged residual stresses with various impact cycles in 3D multi-impacts

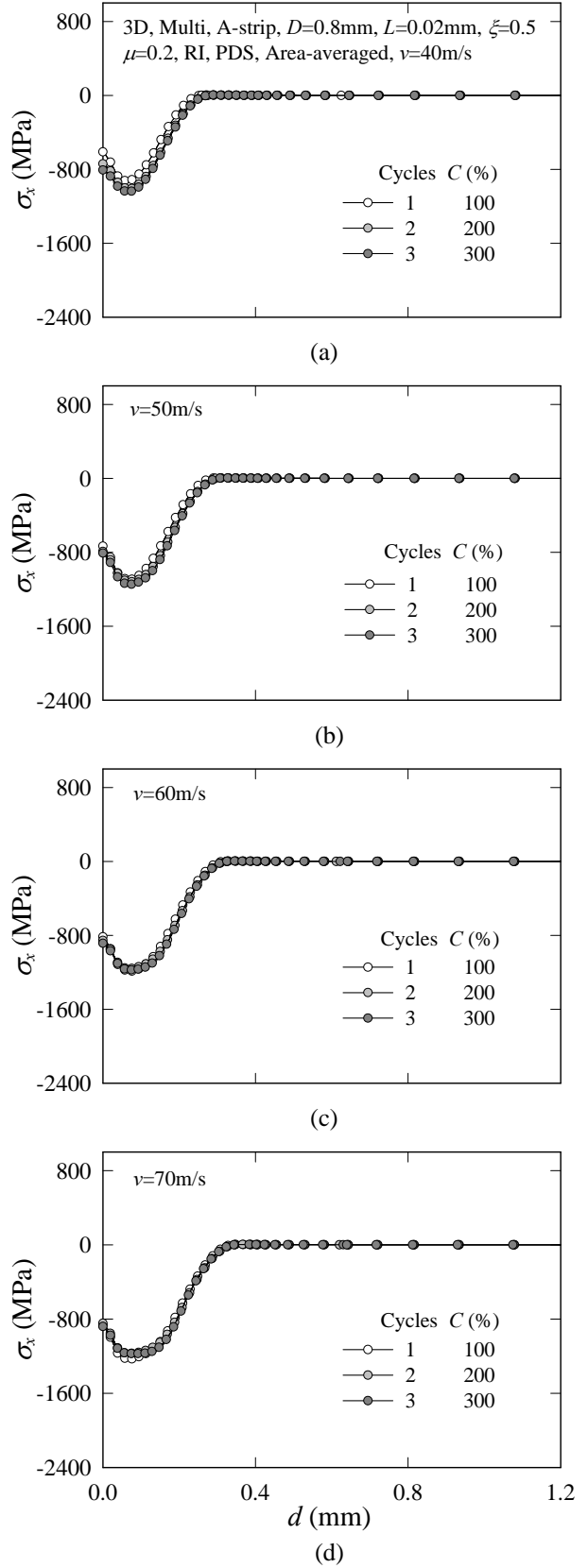


Fig. 9 Area-averaged residual stresses with various impact cycles in 3D multi-impacts

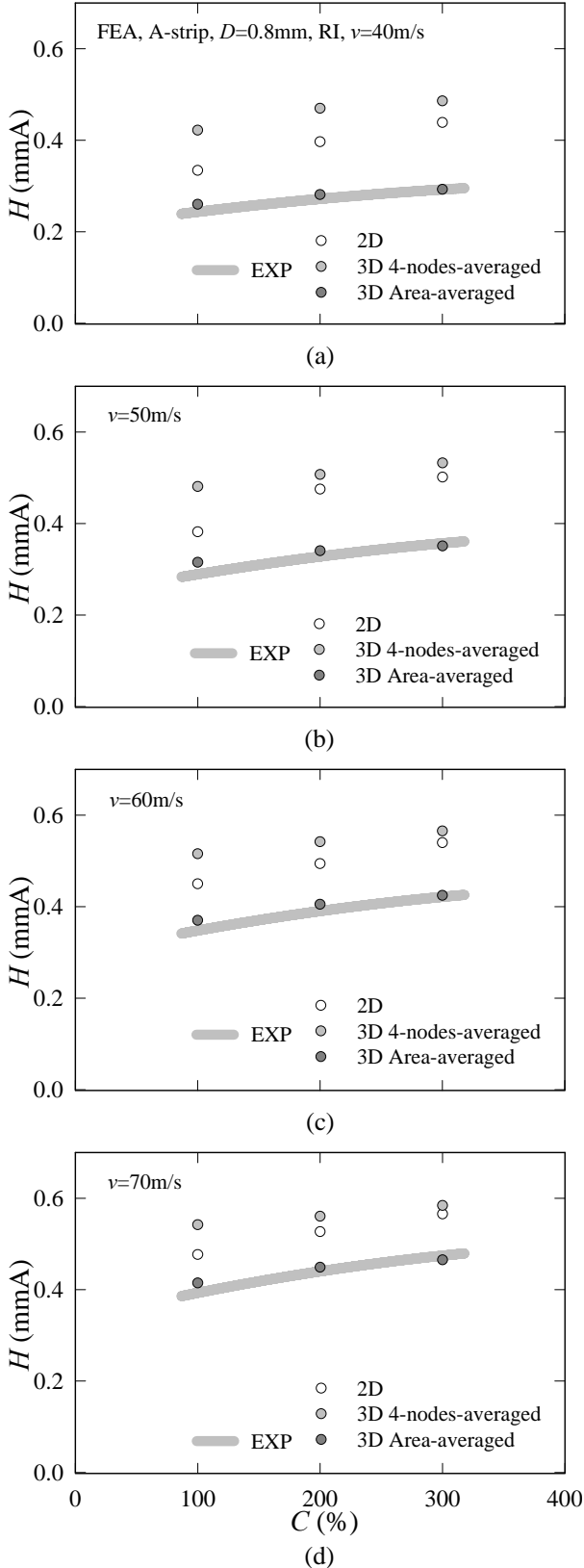


Fig. 10 Variation of finite element arc heights with various finite element peening coverages

후의 피닝커버리지 $C=100\%$ 라 한다. 2주기 충돌시 $C=200\%$, 3주기 충돌시 $C=300\%$ 가 된다. 계산된 유한요소 아크하이트와 피닝커버리지 관계로부터 유효식들을 얻을 수 있다. 내피로 부품들은 통상 100% 이상의 커버리지를 가지며, 주로 100-300% 범위로 가공된다.⁽²²⁻²⁵⁾ 이에 본 연구에서는 유한요소 피닝커버리지의 범위를 100-300%로 하였다.

Fig. 7은 2차원 단일샷 충돌시 샷볼 투사속도가 40-70m/s일 때의 유한요소 피닝잔류응력 분포를 보여준다. Figs. 8-9은 3차원 대칭-셀 모델에 동일 투사속도 조건 (40-70m/s)으로 다중충돌된 후의 유한요소 피닝잔류응력 분포들을 보여준다. 이때 해석해들은 절점평균해를 의미하며, 면적평균해와 4-절점평균해의 분포들을 나타낸다. Figs. 8-9의 피닝잔류응력해들을 식 (1)-(2)에 대응시켜, 유한요소 아크하이트들을 구한다. Fig. 10은 유한요소 피닝커버리지와 아크하이트의 관계를 보여준다. 2차원 단일절점 해석해와 3차원 4-절점 및 면적평균해의 분포들을 보여주며, 실험해와 비교했다. 2차원 해석해와 3차원 4-절점평균해를 대응시키면 유한요소 아크하이트들이 실험 아크하이트와 그 차이가 매우 크음을 알 수 있다. 반면에, 면적평균해를 대응시키면 실험해에 상당히 근접한다. 이로부터 Figs. 11-13과 같이 다양한 유한요소 알멘선도들을 표현한다. Fig. 11은 샷볼의 수량 N_{shot} 과 유한요소 아크하이트 H 의 관계를 보여준다. 이는 실험 알멘선도^(12,13)와 매우 흡사한 분포형태를 가지며, 이들 관계는 아래식 (3)과 같이 표현된다. 샷볼의 수량 N_{shot} 과 샷볼의 투사속도 v 의 범위는 각각 $1 \leq N_{shot} \leq 12$, $30 \leq v \leq 80$ 로 정하였다. Table 1은 식 (3)의 계수 및 변수값들을 보여준다.

$$H^v = A(1 - e^{-0.5N_{shot}}) \quad (3)$$

Fig. 12는 유한요소 피닝커버리지에 따른 유한요소 아크하이트 변화를 보여준다. 유한요소 피닝커버리지는 1주기 충돌시 100%가 된다. 따라서 2주기 및 3주기 충돌시 피닝커버리지는 각각 200, 300%가 된다. 이들 관계는 아래식 (4)와 같이 2차식으로 표현되며, 유한요소 피닝커버리지 범위는 $100 \leq C \leq 300$ 이다. Table 2는 식 (4)의 계수들과 변수값들을 보여준다.

$$H^v = B_1 C^2 + B_2 C + B_3 \quad (4)$$

Fig. 13은 유한요소 아크하이트의 변화에 따른 투사속도 관계를 보여준다. 유한요소 아크하이트 증가에 대한 투사속도는 선형으로 표현되며, 아래 식 (5)와 같다. 유한요소 피닝커버리지가 증가할수록 선형기울기는 작아지며, 점차 수렴된다. Table 3은 식 (5)의 계수 및 변수값들을 보여준다.

$$v^C = C_1 H - C_2 \quad (5)$$

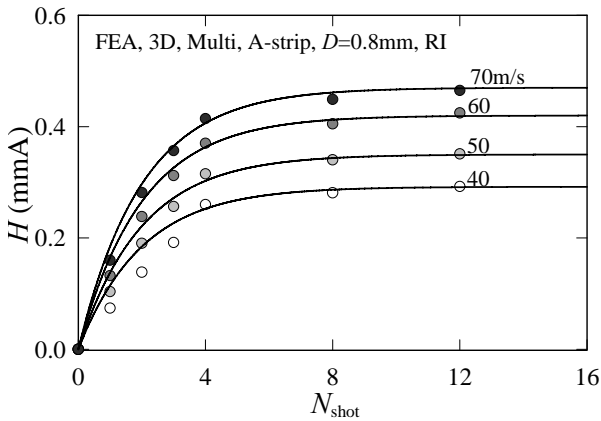


Fig. 11 FE Almen saturation curves

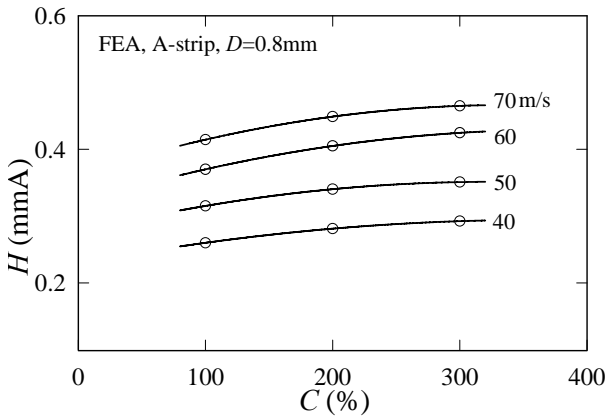


Fig. 12 FE arc heights with various FE coverages

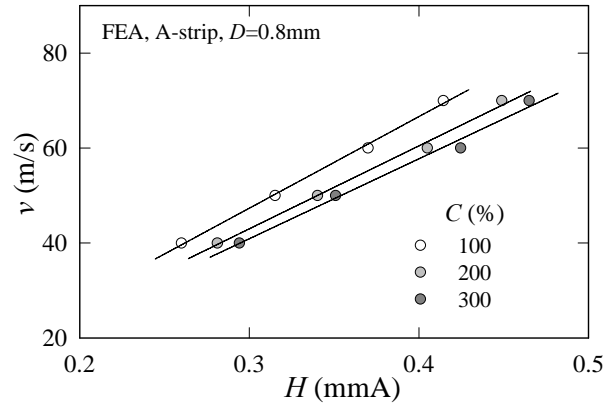


Fig. 13 Variation of shot impact velocities v with various arc heights H

이와 같이 유한요소 알멘선도에서 산출한 식 (3) - (5)들로부터 숫돌 투사속도를 구할 수 있다. 이들 식들은 다음절에서 주요 피닝소재들의 유한요소 면적평균해를 얻기 위해 활용된다.

Table 1 Numerical values of Eq. (3)

v (m/s)	A	N_{shot}	FE H (mmA)	Computed H (mmA)	Error (%)
70	0.470	4	0.414	0.406	1.97
		8	0.449	0.461	2.70
		12	0.465	0.469	0.82
60	0.420	4	0.370	0.363	1.88
		8	0.405	0.412	1.77
		12	0.425	0.419	1.35
50	0.350	4	0.315	0.303	1.15
		8	0.340	0.344	0.96
		12	0.351	0.349	0.51
40	0.292	4	0.260	0.252	2.98
		8	0.281	0.287	1.90
		12	0.292	0.291	0.39

Table 2 Numerical values of Eq. (4)

v (m/s)	B_i	C	Computed FE H (mmA)	Computed EXP H (mmA)	Error (%)
70	$B_1 = -9.2 \times 10^{-7}$	100	0.260	0.244	6.6
	$B_2 = 6.21 \times 10^{-4}$	200	0.281	0.272	3.3
	$B_3 = 0.362$	300	0.292	0.293	0.2
60	$B_1 = -7.7 \times 10^{-7}$	100	0.315	0.290	8.9
	$B_2 = 5.81 \times 10^{-4}$	200	0.340	0.328	3.7
	$B_3 = 0.32$	300	0.351	0.357	1.7
50	$B_1 = -7.25 \times 10^{-7}$	100	0.370	0.348	6.2
	$B_2 = 4.69 \times 10^{-4}$	200	0.405	0.392	3.3
	$B_3 = 0.276$	300	0.425	0.425	0.2
40	$B_1 = -5.0 \times 10^{-7}$	100	0.414	0.393	5.5
	$B_2 = 3.62 \times 10^{-4}$	200	0.449	0.440	2.1
	$B_3 = 0.229$	300	0.465	0.474	1.9

Table 3 Numerical values of Eq. (5)

C (%)	C_1	Computed FEH (mmA)	v (m/s)	Computed FE v (m/s)	Error (%)
100	$C_1=193.0$ $C_2=10.5$	0.260	40	39.7	0.8
		0.315	50	50.3	0.7
		0.370	60	60.9	1.5
		0.414	70	69.5	0.7
200	$C_1=175.0$ $C_2=9.4$	0.260	40	39.8	0.5
		0.322	50	50.2	0.3
		0.386	60	61.5	2.5
		0.452	70	69.2	1.2
300	$C_1=168.4$ $C_2=9.6$	0.261	40	39.9	0.1
		0.323	50	49.5	1.0
		0.389	60	61.9	3.2
		0.461	70	68.7	1.8

5. 절점 및 면적평균 유한요소 잔류응력

전 절에서 정리된 유한요소 알멘선도를 활용해, 피닝잔류응력을 좀더 정량적으로 평가할 수 있다. 또한 내피로 부품 및 재료 표면에 요구하는 양의 압축잔류응력을 사전 예측함으로써 샷피닝 공정의 효율을 최대화 할 수 있다. 이에 본 절에서 유한요소 알멘선도를 이용하여, 주요 샷피닝 재료들의 면적평균 잔류응력해들을 예측해 본다.

Fig. 14은 항공기용 착륙장치 등에 많이 사용되는 AISI4340 소재의 면적평균 해석해와 XRD 실험해의 분포를 보여준다. AISI4340 소재는 아크하이트 $H = 0.36\text{mmA}$ 와 피닝커버리지 $C = 200\%$ 를 갖는다.⁽²¹⁾ 식 (5)에서 $C = 200\%$ 일 때, 계수들 $C_1 = 175.0$, $C_2 = 9.4$ 이다. 여기에 아크하이트 0.36mmA 를 대입하면 속도 $v = 54\text{m/s}$ 가 얻어진다. 이를 해석에 채택하여, 4-절점 및 면적평균 피닝잔류응력해들을 얻고, 이들 해석해들을 XRD 실험해와 비교한다. 해석후 면적평균 해석해가 4-절점평균해보다 XRD 실험해에 좀더 접근함을 알 수 있다. 특히 표면의 면적평균해가 실험해에 매우 근접하며, 변형깊이 $d = 0.08\text{mm}$ 에서 최대압축잔류응력은 다소 차이를 주나 전반적으로 실험해로의 접근성이 우수하다.

Fig. 15은 자동차 및 기계용 기어부품 등에 많이 사용되는 AISI4140 강의 면적평균 해석해와 XRD 실험해의 분포들을 보여준다. 소재는 아크하이트 $H = 0.26\text{mmA}$, 피닝커버리지 $C = 100\%$ 를 갖는다.⁽²⁶⁾ 피닝잔류응력해들을 식 (5)에서 $C = 100\%$ 일 때 계수 $C_1 = 193.0$, $C_2 = 10.5$ 이다. 여기에 아크하이트 0.26mmA 를 대입해 투사속도 $v = 39.6\text{m/s}$ 를 얻는다. 이를 해석모델에 채택해, 해석 후 4-절점 및 면적평균해들을 얻는다. 그리고 이들을 XRD 실험해와

비교한다. AISI4140 소재 또한 면적평균 해석해가 4-절점 평균해보다 XRD 실험해에 가깝다. 특히 표면 및 최대압축잔류응력, 변형깊이 등 모두에서 면적평균해가 월등함을 알 수 있다.

Fig. 16은 자동차용 스프링 등에 많이 사용되는 SPS8 강의 면적평균 해석해와 XRD 실험해 분포들을 보여준다. 소재는 아크하이트 $H = 0.37\text{mmA}$, 피닝커버리지 $C = 85\%$ 를 갖는다.⁽²⁷⁾ 통상의 실험적 커버리지 C 가 $85 \leq C \leq 98\%$ 이면 편리상 완전한 커버리지 즉 $C = 100\%$ 라 한다. 이점에 착안해 본 해석에서 유한요소 피닝커버리지 $C = 100\%$ 를 반영한다. 식 (5)에서 $C = 100\%$ 일 때 계수 $C_1 = 193.0$, $C_2 = 10.5$ 이다. 여기에 아크하이트 0.375mmA 를 대입하면 속도 $v = 61\text{m/s}$ 로 계산된다. 이를 해석모델에 채택해 해석 후 4-절점 및 면적평균해들을 얻고, XRD 실험해와 비교한다. 본 소재 또한 면적평균 해석해가 4-절점평균해보다 실험해에 상당히 근접한다. 이상과 같이 면적평균해에 기초한 유한요소 알멘선도를 활용해, 다양한 주요 피닝소재들에서 해석해와 실험해를 비교해봄으로써 해석적 접근 방법의 유효성을 검증했다.

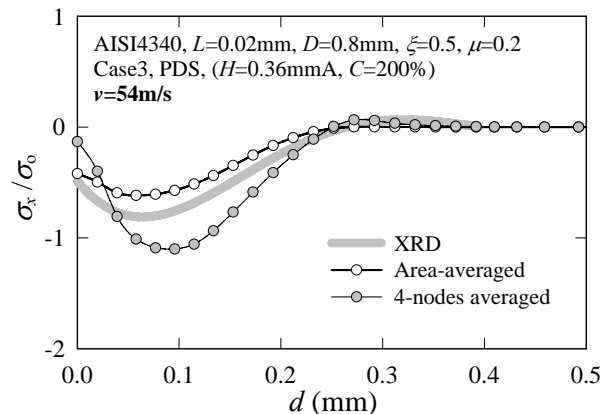


Fig. 14 Comparison of finite element solutions with XRD solution in AISI4340 material

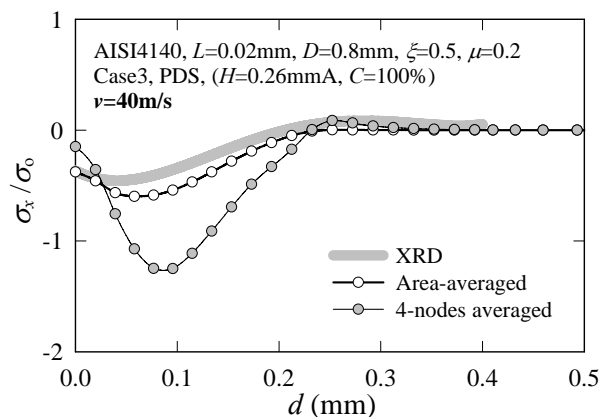


Fig. 15 Comparison of finite element solutions with XRD solution in AISI4140 material

XRD solution in AISI4140 material

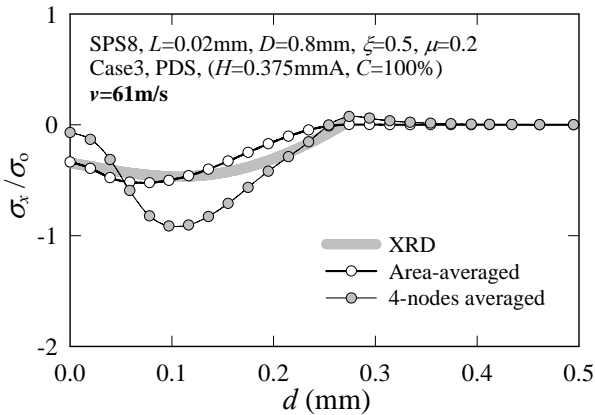


Fig. 16 Comparison of finite element solutions with XRD solution in SPS8 material

6. 요약

피닝잔류응력은 통상 XRD 실험법으로 측정되며, 다양한 X-선 조사면적들에서 면적평균해를 준다. 해석연구들 대부분 단일절점 해석해를 소개할 뿐 면적평균해를 전혀 고려하지 않고 있다. 따라서 XRD 실험해와 큰 차를 갖는 것은 자명하다. 이에 본 연구에서는 3차원 다중충돌 대칭-셀⁽¹²⁾ 모델을 활용해, 면적평균 피닝잔류응력해를 얻었다. 대칭-셀은 통합인자와 소성솟을 포함하며, 솟피닝 현상들이 충분히 반영된다. 대칭-셀 A-D 네 충돌위치에서 4-절점평균해를 얻었으며, 대칭-셀의 각 단면 (0.4mm×0.4mm)에 포함된 전체절점에서 면적평균해를 얻었다. 그리고 해석해들을 XRD 실험해와 비교했다. 소성솟 면적평균해가 4-절점평균해보다 XRD 실험해로의 근접성이 뛰어났다. 또한 양축 등가응력으로서의 완벽한 수렴성을 보였다. 이로써 면적평균해에 기초한 유한요소 알멘선도를 구해, 유한요소 아크하이트, 유한요소 피닝커버리지 및 투사속도들간의 관계식들을 유도하였다. 유한요소 알멘선도는 김태형과 이형일^(12,13)이 정리한 실험적 알멘선도의 추이를 따랐으며, 그 유효성이 한층 향상됐다. 유도식들을 활용하여, 주요 피닝소재들 AISI4340, AISI4140, SPS8에서 유한요소 면적평균해들을 얻고 XRD 실험해들과 비교했다. 피닝소재 모두에서 표면 및 최대압축잔류응력, 변형깊이가 실험해와 잘 일치하여, 피닝부품들의 잔류응력해 예측에 유한요소 알멘선도가 매우 유용함을 확인했다. 이상과 같이 본 연구의 면적평균해가 실제 XRD 잔류응력 측정해를 매우 잘 따른다는 점에 주목되며, 궁극적으로 실재하는 솟피닝 잔류응력 평가를 위한 체계적인 해석방법임을 확인했다.

후 기

이 논문은 2006년도 한국학술진흥재단으로부터 교육인적자원부 학술연구 조성사업비 지원을 받아 연구 되었으며 (KRF-2006-511-D00009), 이에 감사 합니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Menig, R., Pintschovius, L., Schulze, V. and Vöhringer, O., 2001, "Depth Profiles of Macro Residual Stress in Thin Shot Peened Plates Determined by X-ray and Neutron Diffraction," *Scripta Materialia*, Vol. 45, pp. 977~983.
- (3) Luan, W., Jiang, C., Ji, V., Chen, Y. and Wang, H., 2008, "Investigation for Warm Peening of TiB₂/Al Composite Using X-ray Diffraction," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 497, pp. 374~377.
- (4) Al-Hassani, S. T. S., 1981, "Mechanical Aspects of Residual Stress Development in Shot Peening," 1st *International Conference on Shot Peening*, pp. 583~602.
- (5) Hills, D. A., Waterhouse, R. B. and Noble, B., 1983, "An Analysis of Shot Peening," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 18, pp. 95~100.
- (6) 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.
- (7) Levers, A., Prior, A. and Socie, D., 1989, "Multi-axial Fatigue: Analysis and Experiments," Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, pp. 16~17.
- (8) Schiffner, K. and Helling, C., 1999, "Simulation of Residual Stresses by Shot Peening," *Computers & Structures*, Vol. 72, pp. 329~340.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Majzooobi, 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.
- (12) Kim, T. and Lee, H., 2008, "A 3D FEA Model with Plastic Shots for Evaluation of Peening Residual Stress due to Multi-impacts," *KSME(A)*, Vol. 32, No. 8, pp. 642~653.
- (13) 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.
- (14) Boo, M. H., Oh, S. W., Park, Y. C. and Hirose, Y., 1994, "Studies on Elastic Deformation by X-ray Stress Measurement of WC-Co Alloy," *The Study of Ocean and Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 105~114.
- (15) Hong, S. H., Lee, D. W., Cho, S. S. and Joo, W. S., 2002, "A Study on the Failure Mechanism of Turbine Blade Using X-ray Diffraction and FEM," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 10, No. 6, pp. 150~157.
- (16) Jacobsen, B., Lienert, U., Almer, J., Poulsen, H. F. and Pantleon, W., 2008, "Direct Observation of Strain in Bulk Subgrains and Dislocation Walls by High Angular Resolution Three-dimensional X-ray Diffraction," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 483~484, pp. 641~643.
- (17) Prevey, P. S. and Cammett, J. T., 2002, "The Effect of Shot Peening Coverage on Residual Stress, Cold Work and Fatigue in a Ni-Cr-Mo Low Alloy Steel," 8th *International Conference on Shot Peening*, pp. 295~304.
- (18) Kirk, D. and Hollyoak, R. C., 2005, "Relationship between Coverage and Surface Residual Stress," 9th *International Conference on Shot Peening*, pp. 373~378.
- (19) ABAQUS User's Manual, 2004, Version 6.5, Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (20) SAE J442, 2004, Test Strip, Holder and Gage for Shot Peening, Society of Automotive Engineers, Inc.
- (21) 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.
- (22) SAE J443, 1984, Surface Vehicle Recommended Practice, Society of Automotive Engineers, Inc.
- (23) MIL-S-113165C, 1989, Shot Peening of Metal Parts, Military Specifications.
- (24) AMS 2430L, 1993, Aerospace Material Specification, Society of Automotive Engineers, Inc.
- (25) AMS-S-13165, 1997, Aerospace Material Specification, Society of Automotive Engineers, Inc.
- (26) Menig, R., M., Schulze, V. and Vohringer, O., 2002, "Residual Stress Relaxation and Fatigue Strength of AISI4140 under Torsional Loading after Conventional Shot Peening, Stress Peening and Warm Peening," 8th *International Conference on Shot Peening*, pp. 311~316.
- (27) Chung, S. J. and Back, S. D., 1998, "Effect of Shot Peening on Fatigue Properties in Spring Steel," *KSME (A)*, Vol. 22, No. 6, pp. 1009~1015.