

다중충돌 피닝잔류응력 평가를 위한 소성shots이 포함된 3차원 유한요소해석 모델

김 태 형[†], 이 형 일^{*}

(2008년 4월 7일 접수, 2008년 6월 15일 수정, 2008년 6월 17일 심사완료)

A 3D FEA Model with Plastic Shots for Evaluation of Peening Residual Stress due to Multi-Impacts

Taehyung Kim and Hyungyil Lee

Key Words : Symmetry-Cell(대칭-셀), Peening Coverage(피닝커버리지), Impact Sequence(충돌순서), Repeated Cycle(주기반복), Multi-Impact(다중충돌), Equi-biaxial Stress(양축등가응력)

Abstract

In this paper, we propose a 3-D finite element (FE) analysis model with combined physical behavior and kinematical impact factors for evaluation of residual stress in multi-impact shot peening. The FE model considers both physical behavior of material and characteristics of kinematical impact. The physical parameters include elastic-plastic FE modeling of shot ball, material damping coefficient, dynamic friction coefficient. The kinematical parameters include impact velocity and diameter of shot ball. Multi-impact FE model consists of 3-D symmetry-cell. We can describe a certain repeated area of peened specimen under equi-biaxial residual stress by the cell. With the cell model, we investigate the FE peening coverage, dependency on the impact sequence, effect of repeated cycle. The proposed FE model provides converged and unique solution of surface stress, maximum compressive residual stress and deformation depth at four impact positions. Further, in contrast to the rigid and elastic shots, plastically deformable shot produces residual stresses closer to experimental solutions by X-ray diffraction. Consequently, it is confirmed that the FE model with peening factors and plastic shot is valid for multi-shot peening analyses.

1. 서론

shots피닝에 의해 생성된 압축잔류응력의 정량적인 평가는 내구성 평가와 관련되어 매우 중요하다. 표면 압축잔류응력 및 최대 압축잔류응력의 크기, 변형깊이 등이 주요 평가항목들이다. 피닝변수들 가운데 shots의 종류와 크기, 충돌각, 투사시간, shots 피닝 커버리지 등은 피닝압축잔류응력에 직접적인

영향을 준다.^(1,2) 잔류응력은 일반적으로 X-선 및 중성자 회절법, 홀 드릴링법, 식각법, 곡률 / 변형률 측정법, 빔 굽힘법 등으로 측정된다.^(3,4) 이와 같은 측정법들은 정확성, 민감성, 분해능, 시편채취 여부, 편이성, 재료 / 기하형상에 따라 적용범위의 제한을 받는다. Al-Hassani,⁽⁵⁾ Al-Obaid,⁽⁶⁾ Hills 등⁽⁷⁾은 shots피닝 잔류응력과 피닝변수들 사이의 상관관계를 이론적으로 살펴보았다. 그러나 이론적 접근으로는 실제 shots피닝시 다중충돌에 의한 응력간섭 효과와 피닝 변수들 사이의 상호작용, 다양한 재료물성과 표면형상 등을 모두 고려할 수 없다. 이를 극복하고자 유한요소법에 의한 잔류응력 평가법이 국내외로 시도되고 있다.

[†] 책임저자, 회원, 서강대학교 대학원 기계공학과

E-mail : kthmax@sogang.ac.kr

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

^{*} 회원, 서강대학교 기계공학과

Schiffner와 Helling,⁽⁸⁾ Al-Obaid⁽⁹⁾는 단일 솟볼의 수직충돌에 대하여 탄-소성 동적 유한요소해석을 수행했다. 또한 Han 등⁽¹⁰⁾은 단일 솟의 수직충돌에 대해 유한요소와 이산요소를 조합하여 3차원 동적 해석을 수행하였다. 이들은 충돌되는 솟볼과 재료 사이의 접촉문제를 유동학적 측면에서 정리했다. 이와 같은 기존 해석연구들에서는 대개 피닝소재 표면에 솟볼 1개가 충돌되는 경우를 100% 솟피닝 커버리지로 가정하여 잔류응력을 살펴보고 있다. 즉 수많은 솟볼들의 무작위 충돌에 의한 응력간섭 효과를 고려하지 않았다. Guagliano⁽¹¹⁾는 임의 다중충돌 유한요소해석을 수행하여 알렌스트립의 잔류 아크하이트와 피닝잔류응력과의 관계를 도출했다. 김태준 등⁽¹²⁾의 3차원 다중충돌 해석에서도 솟볼 간 중심거리에 임의의 변화를 주어 피닝커버리지 효과를 얻고자 했다. 이 같은 단순 다중충돌 해석들에서는 피닝잔류응력의 위치무관 균질해를 얻을 수 없다. 이에 Meguid 등⁽¹³⁾과 Majzoobi 등⁽¹⁴⁾은 솟피닝의 위치 균질성을 구현하기 위한 3차원 대칭-셀 해석모델을 고안하여 다중충돌 솟피닝 현상을 모사하였다. Han 등⁽¹⁵⁾도 유한요소와 이산요소를 조합한 선행의 단일충돌⁽¹⁰⁾ 유한요소해석 기법을 핀포밍 (peen forming) 공정에 대한 다중충돌 해석으로 확장했다. 그러나 이들은 솟볼의 소성변형을 무시한 강체 또는 탄성체로 구성된 유한요소해석 모델을 사용하였다. 즉 실제의 솟피닝 잔류응력해 도출에 결정적 요소로 작용하는 솟볼 소성변형은 고려되지 않았다. 이와 같이 이전의 연구들에서는 제한된 변수들의 독립된 영향만 살펴보았을 뿐 재료의 물리적 거동인자들과 솟볼의 운동학적 인자들간 체계적 통합을 시도하지는 않았다. 이에 김태형과 이형일⁽¹⁶⁾은 재료 고유의 물리적 거동 특성과 운동학적 피닝변수들이 포괄적으로 고려된 2차원 단일충돌 유한요소 해석모델을 제안하였다. 본 연구에서는 김태형과 이형일⁽¹⁶⁾의 연구에서 한 걸음 더 나아가 유한요소 피닝커버리지, 충돌순서, 주기반복의 효과 등을 살펴본다. 이로부터 3차원 다중충돌시 솟피닝 잔류응력을 정량적으로 평가하는 유한요소해석 모델을 제안한다.

2. 다중충돌 3차원 유한요소 예비해석

2.1 단일주기 충돌시 유한요소 피닝잔류응력

Fig. 1은, 다중충돌 기본 유한요소해석 모델에서, 서로 이웃하는 솟볼간 중심거리 S 가 0.4 mm일 때

7개의 솟볼들이 연속 충돌된 후의 압흔들을 보여 준다. 1번 솟볼이 가장 먼저 충돌하도록 설정한 후 충돌중심 P_1 에서 표면으로부터 깊이 d 방향으로 잔류응력해를 평가했다. 솟피닝에 의해 생성되는 응력들은 x 와 z -축에 대하여 서로 동격인 양축등가 잔류응력이다. 이를 고려해 1번 솟볼을 기준으로 임의에 가까운 (1) 1-2-3-5-6-4-7 그리고 시계방향의 (2) 1-2-3-4-5-6-7 충돌순서를 선택하여 해석하였다. Fig. 2는 솟볼 중심간의 거리 S 의 변화에 따른 유한요소 피닝커버리지 (FE peening coverage: C)를 보여준다. S 가 0.6mm일 때 45%, 0.5mm일 때 95%, 0.4mm일 때 82%로 평가된다. Fig. 3는 (1)-(2) 충돌순서시 유한요소 피닝커버리지 변화에 따른 잔류 응력해들이다. 피닝커버리지의 증감에 따라 (1)-(2) 충돌순서들 모두에서 표면 및 최대 압축잔류응력들의 변화가 뚜렷하다. S 가 커지면 표면 압축잔류응력의 크기는 감소하며, 반대로 최대 압축잔류응력의 크기는 증가하여 단일충돌해에 근접한다. 특히 S 가 충분히 커지면 잔류응력해는 단일충돌해에 수렴한다. 이는 S 가 증가함에 따라 솟볼들에 의한 압흔들간 응력간섭효과가 작아지거나 상쇄되기 때문이다.

2.2 다주기 충돌시 유한요소 피닝잔류응력

Fig. 1에서 솟볼 7개의 충돌을 1주기 (cycle)라 하면 n 주기는 $7n$ 회 충돌들을 의미한다. Fig. 4는 $S=0.4$ mm로 2, 3, 4주기 (14, 21, 28shots) 반복 후 얻은 유한요소 피닝커버리지를 보여준다. 1주기에서는 이웃하는 압흔들의 원주가 접하며 약 82%의 피닝커버리지를 준다. 2주기 이상의 주기반복들에서는 압흔의 크기와 형상이 점차 변하여 100% 이상의 피닝커버리지를 준다. 이는 재료 표면에 솟볼들의 투사에너지가 추가 전이되면서 소성변형으로 인한 압흔들도 커지기 때문이다. Fig. 5는 (1)-(2)의 충돌순서들로 1-4 주기반복 후 P_1 에서 평가된 깊이 따른 잔류응력 분포를 나타낸다. 두 충돌순서 (1)-(2)의 응력분포는 그 형태가 유사하나 다소 다른 응력수렴해를 준다. 특히 2주기 충돌후 피닝잔류응력해는 수렴한다. 이는 각 솟볼의 투사에너지가 표면에 계속 전이되면서 점차 수용 가능한 일정한 에너지량에 도달해 소성변형량이 작아지거나 발생하지 않기 때문으로 사료된다. 이같이 다중충돌 솟피닝 잔류응력해는 유한요소 솟피닝 커버리지와 충돌순서, 주기반복 등에 좌우된다. 이에 본 논문에서는 이들을 모두 통합해 해석 모델에 반영하는 해석기법을 제시한다.

3. 다중충돌 3차원 유한요소 해석모델

3.1 유한요소 대칭-셀 해석모델

Fig. 6는 다중충돌 슛피닝 잔류응력 평가를 위한 유한요소해석 모델을 보여준다. 좌측은 기본의 네 열들로 구성된 수 많은 슛볼들이 재료표면에 다중 충돌되는 현상을 나타낸다. 각 열간 높이는 동일하며, 각 열에 속한 슛들은 모두 수평을 유지한다.

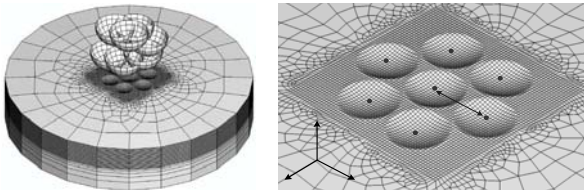


Fig. 1 Impact positions by 7 shots and position (P_1) for evaluation of residual stress in a basic FE model

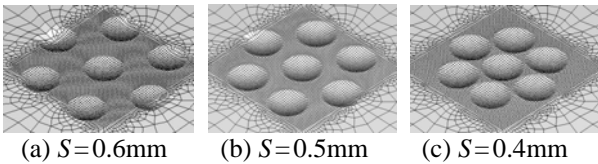


Fig. 2 FE peening coversages with respect to the variation impact distance S

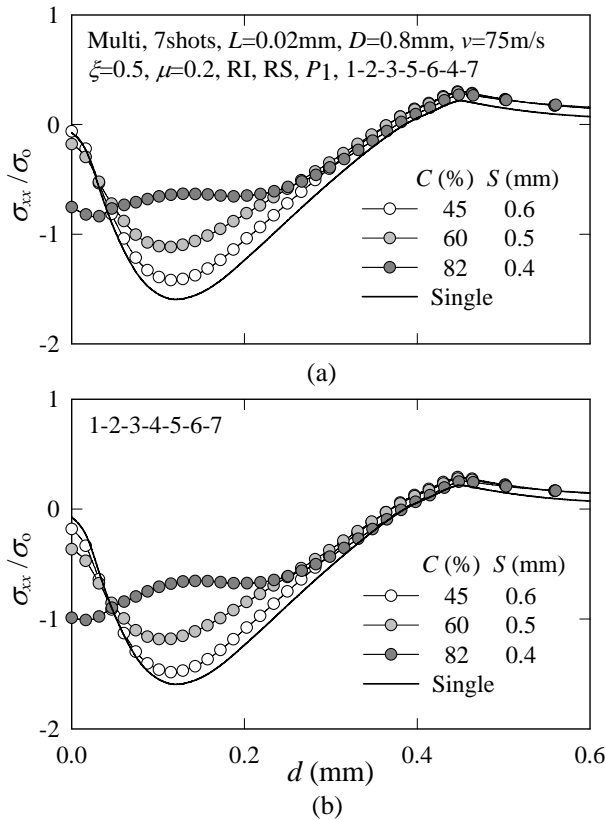


Fig. 3 Comparison of residual stresses with variation coversages in multi-impact by 7 shots

그리고 네 열들은 순서대로 재료표면에 충돌된다. 이때 첫 번째 열의 충돌위치를 기준으로 하여 두 번째 열을 x -방향으로 슛볼의 반지름 r 만큼 위치 이동시켰다. 세 번째 열을 x 와 z -방향으로, 네 번째 열을 z -방향으로 각각 r 만큼 위치를 이동시켰다. 이는 네 열들에 속한 슛볼들이 서로 부딪히지 않고 최대한 근접되도록 하기 위해서이며, 한곳에만 집중 충돌되지 않도록 하기 위함이다.

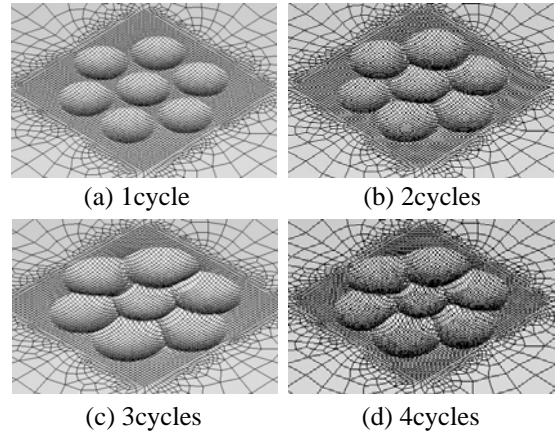


Fig. 4 FE coversages with respect to the variation impact cycles

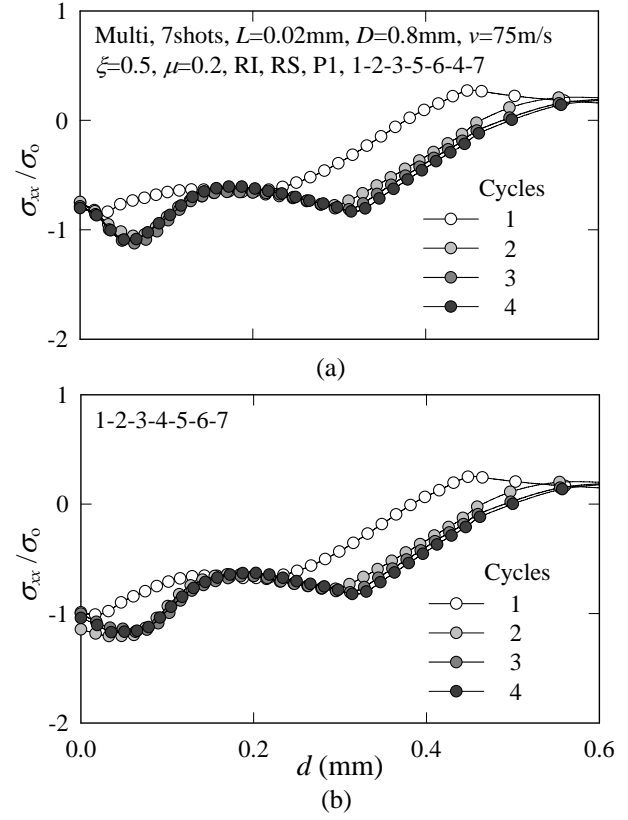


Fig. 5 Comparison of residual stresses with variation impact cycles in multi-impact by 7 shots

네 열들이 모두 충돌된 후 재료표면에서의 임의 면적에 대한 유한요소 피닝커버리지 $C = 78\%$ 로서 모두 동일하다. 이러한 점에 착안하여 가장 작은 단위의 셀을 선택하여 우측과 같이 유한요소 대칭-셀 (Symmetry-cell)⁽¹³⁾ 해석모델을 생성하였다.

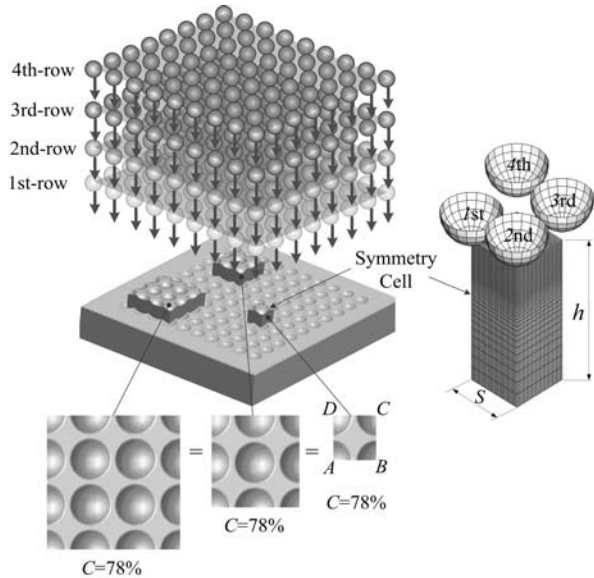


Fig. 6 FE symmetry-cell model for residual stress of shot peening under multi-impacts

이와 같은 대칭-셀 유한요소해석 모델은 솟피닝된 재료 표면의 전체 면적을 대변함과 동시에 실제의 양측 등가 피닝잔류응력을 구현시켜줄 수 있다. 대칭-셀 모델 하나로 솟피닝된 전체면적을 표현하므로 해석시간도 상당히 단축된다.

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁷⁾를 사용했다. 솟피닝시 솟볼들의 연속 충돌로 시편에 압흔이 생성되며 충돌하부에서는 대변형이 발생한다. 탄소성 시편의 대변형을 해석하고자 ABAQUS Explicit 코드 중에서 NLGEOM (Nonlinear geometry) 옵션을 사용했다. 또한 3차원 8절점 감차적분요소들 (C3D8R)⁽¹⁷⁾로 유한요소망을 구성했다. 해석 경계조건으로 대칭-셀의 바닥면은 완전구속 ($U_x = U_y = U_z = 0$) 하고, 네 옆면들은 대칭 처리한다 ($U_x = 0$ 또는 $U_z = 0$). 일반적으로 솟피닝 공정에서는 장비 최대성능에 따라 차이를 보이긴 하나 통상 20 - 100m/s 범위에서 솟볼 투사속도를 선정한다.^(18,19) 따라서 본 연구에서도 해석해의 실험적 검증에 위해 사용된 피닝장비⁽²⁰⁾의 최대성능을 고려해 솟볼의 초기 투사속도 $v = 75\text{m/s}$ 로 선정하였다. 충돌에 대해 페널티 알고리즘을 적용하고자 재료와 솟볼 양쪽에 접촉요소면들 (Contact surfaces)⁽¹⁷⁾을 배치하였다. 해석에 사용된 절점 및 요소수는, 3차원 대칭-셀 해석모델과 솟볼의 해석 모델들을 합쳐, 강제솟 모델의 경우 약 16,000 및 14,000개이다. 변형솟 모델들의 경우 솟볼의 수에 따라 절점수는 약 85,000 (4shots) - 100,000 (16shots), 요소수는 약 80,000 (4shots) - 96,000 (16shots)개이다.

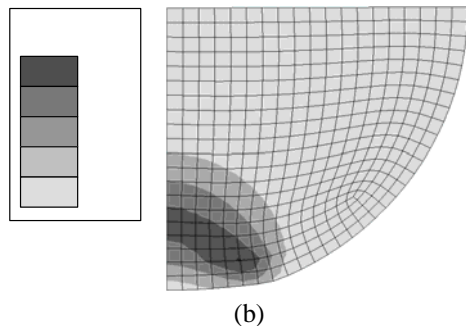
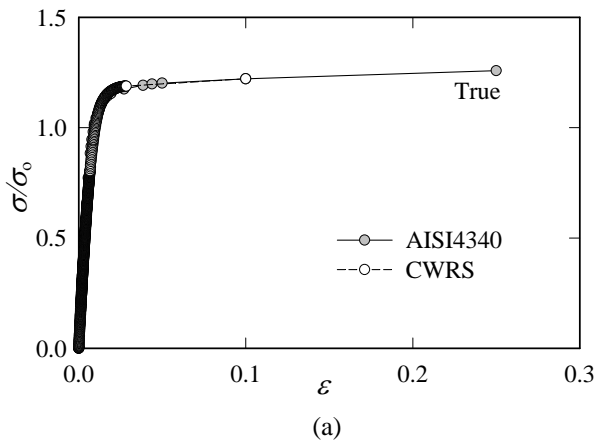


Fig. 7 Plastic properties for FEA and equivalent strain in a deformed shot

3.2 재료물성 및 해석모델 검증

단일충돌 해석모델에 반영된 재료의 물성들은 솟피닝 공정에 많이 사용되는 AISI4340 소재이다. 이 재료를 815°C에서 담금질한 후 230°C에서 2 시간 동안 뜨임 처리했다. 재료의 인장시험 물성치 들로는 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. 솟볼은 일반적으로 널리 사용되는 컷와이어 라운드 솟 (CWRS)을 모델로 선정하였다. 솟볼의 인장시험 물성치 들로는 항복강도 $\sigma_0 = 1470\text{MPa}$, 인장강도 $\sigma_t = 1840\text{MPa}$, 탄성계수 $E = 210\text{GPa}$, 푸아송비 $\nu = 0.3$, 밀도 $\rho = 7850\text{kg/m}^3$, 솟볼 경도 = 670Hv이며, 직경 $D = 0.8\text{mm}$ 이다. 솟볼은 충돌시 변형이 없다 가정한 강제솟 (RS: Rigid shot), 변형을 고려한 탄성솟 (EDS: Elastic deformable shot) 및 소성솟 (PDS: Plastic deformable shot)을 고려했다. Fig. 7 (a)는 재료의 항복강도로 무차원화된 진 응력-

변형률 선도를, (b)는 충돌 후 슛볼의 유효변형률 분포를 보여준다. 김태형과 이형일⁽¹⁶⁾은 선행연구에서 피닝재료의 물리적 특성과 슛볼의 운동학적 특성이 함께 반영된 2차원 단일스� 충돌 해석모델로부터 수렴된 유한요소 피닝잔류응력을 얻었다. 본 연구에서는 2차원 단일스� 충돌해석 모델에서 결정된 재료의 물리적 인자들인 동적 마찰계수 $\mu = 0.2$ 와 재료 감쇄계수 $\xi = 0.5$ 를 3차원 대칭-셀 해석 모델에 채택하였다.

제시된 3차원 다중충돌 대칭-셀 해석모델의 적절한 높이 h 를 Fig. 8으로부터 결정한다. 가로 축은 대칭-셀 표면으로부터의 깊이 d 이고, 세로 축은 항복강도 $\sigma_0 = 1510\text{MPa}$ 로 무차원화된 그 깊이에서의 유효응력이다. 여기서 A-D는 슛볼이 충돌되는 대칭-셀 표면상 네 절점위치들을 나타낸다 (Fig. 6). 약 1mm 깊이부터 응력값이 거의 0이 됨을 알 수 있으며, 이로부터 유효응력이 충분히 0이 되는 $d=1.5\text{mm}$ 를 h 로 선정하였다.

스�피닝에 의해 생성되는 압축잔류응력은 대부분 표면과 표면직하부에 내재 된다. 따라서 응력값이 큰 표면부위는 세밀하게, 응력값이 작은 하부는 상대적으로 크게 유한요소망을 구성했다. 그리고 김태형과 이형일⁽¹⁶⁾이 2차원 단일충돌 피닝 해석 모델에서 제안한 요소 최소크기 $L = 0.02\text{mm}$ 를 채택했다. 이때 압흔들에 의한 통상의 XRD 실험 오차와 접촉해석시의 해석오차를 고려하여 슛볼 직경의 약 5% ($d = 0.04\text{mm}$)가 되는 위치에서 응력 수렴성을 살펴보았다. 이와 같이 하면 L 이 슛볼 직경 D 의 1/40일 때 표면 및 최대 압축잔류응력이 모두 일정하게 수렴된다.

4. 유한요소 피닝커버리지의 정의

스�피닝 잔류응력해는 슛볼들의 다중충돌에 의해 생성된 압흔들의 밀집정도에 따라 다양하게 얻어진다. 이러한 압흔의 밀집정도를 피닝커버리지 (C: peening coverage)라 하며, 약 100%의 밀집정도를 완전커버리지 (full coverage)라 한다. 슛피닝된 부품 및 재료는 대부분 100% 이상의 피닝커버리지를 갖는다. 따라서 실제해에 근접한 유한요소 피닝 잔류응력해를 얻으려면 해석에 앞서 반드시 유한요소 피닝커버리지를 정의해야 한다. 기존의 피닝 잔류응력 유한요소해들은 대부분 피닝커버리지가 고려되지 않았거나, 단순히 충돌 중심거리만 달리 하여 표현되어 100%이상의 피닝커버리지 효과를 보여주지 못하고 있다. 그러므로 실제의 해와 많은

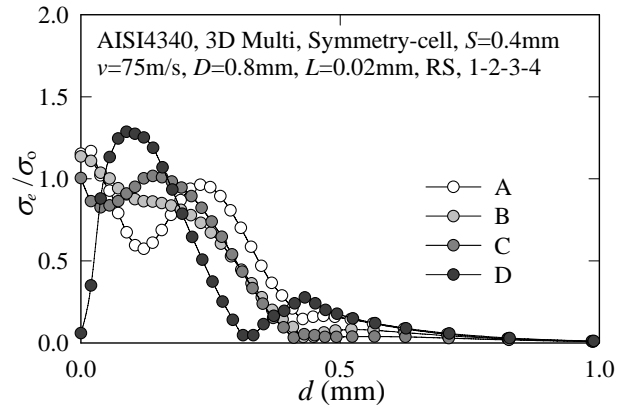


Fig. 8 Normalized equivalent stress distribution in FE symmetry-cell model

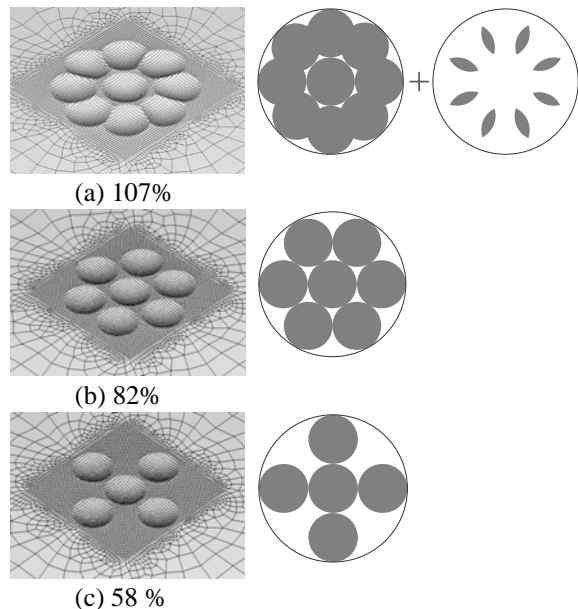


Fig. 9 Definition of finite element coverages

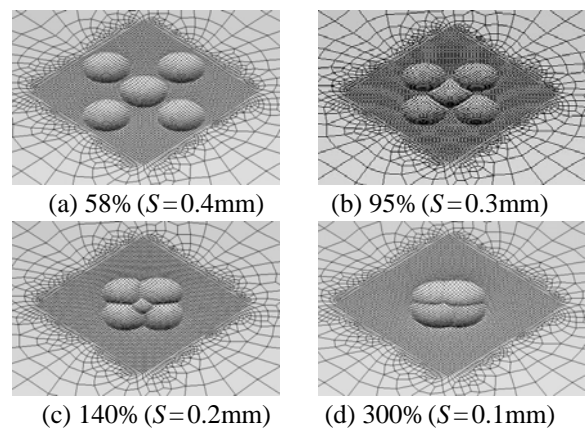


Fig. 10 Coverages by various distances of between shot balls (5 shots impact)

차이를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 유한요소 피닝커버리지를 100% 압흔 투영면적을 상수배로 표현함으로써 100%이상의 피닝커버리지 효과를 살펴본다. 즉 200%의 피닝커버리지는 100% 투영면적이 두 번, 300%는 세 번 반복되는 경우이다. Fig. 9은 실제 피닝현상을 기초로 정의된 유한요소 피닝커버리지이다. (a)는 9개의 솟볼이 연속으로 충돌된 후의 피닝커버리지로, 약 92% 압흔 투영면적에 중복 공유면적 15%가 추가되어 107%로 간주된다. (b)는 7개 솟볼들이 충돌된 후의 솟피닝커버리지로서 82%로 간주된다. (c)는 5개 솟볼들이 충돌된 후의 피닝커버리지로서 58%로 간주된다.

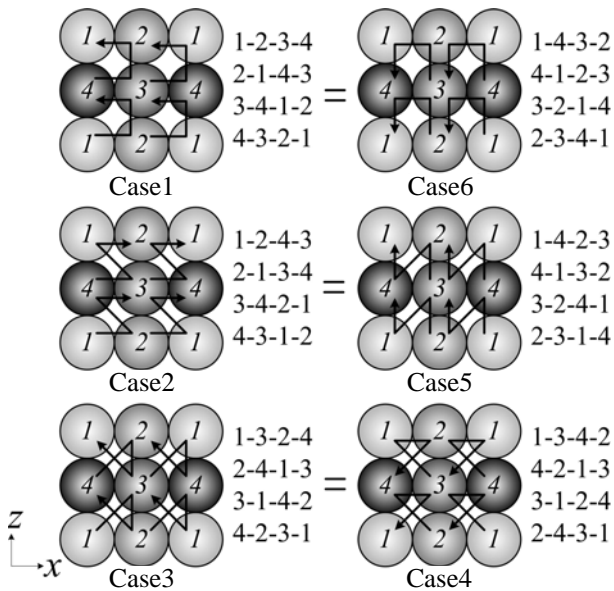


Fig. 11 Impact types with similar impact sequences in FE multi impact symmetry-cell

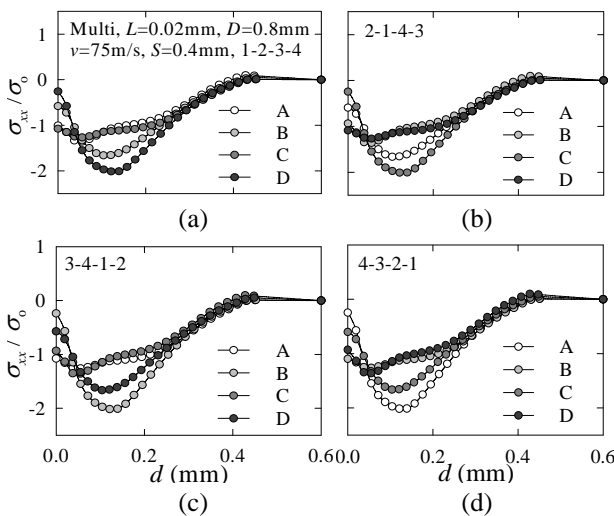


Fig. 12 Distribution of residual stresses with four impact sequences in Case1

Table 1 Impact sequences with single or multi cycles

Case	Cycles (shots)	Impact sequence
⌊	1 (04)	(1-2-3-4), (2-1-4-3), (3-4-1-2), (4-3-2-1)
	4 (16)	(1-2-3-4 / 2-1-4-3 / 3-4-1-2 / 4-3-2-1) × 1
	8 (32)	(1-2-3-4 / 2-1-4-3 / 3-4-1-2 / 4-3-2-1) × 2
	16 (64)	(1-2-3-4 / 2-1-4-3 / 3-4-1-2 / 4-3-2-1) × 4
Σ	1 (04)	(1-2-4-3), (2-1-3-4), (3-4-2-1), (4-3-1-2)
	4 (16)	(1-2-4-3 / 2-1-3-4 / 3-4-2-1 / 4-3-1-2) × 1
	8 (32)	(1-2-4-3 / 2-1-3-4 / 3-4-2-1 / 4-3-1-2) × 2
	16 (64)	(1-2-4-3 / 2-1-3-4 / 3-4-2-1 / 4-3-1-2) × 4
X	1 (04)	(1-3-2-4), (2-4-1-3), (3-1-4-2), (4-2-3-1)
	4 (16)	(1-3-2-4 / 2-4-1-3 / 3-1-4-2 / 4-2-3-1) × 1
	8 (32)	(1-3-2-4 / 2-4-1-3 / 3-1-4-2 / 4-2-3-1) × 2
	16 (64)	(1-3-2-4 / 2-4-1-3 / 3-1-4-2 / 4-2-3-1) × 4

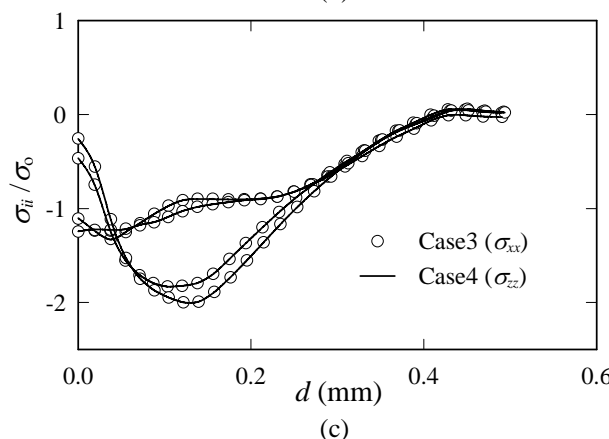
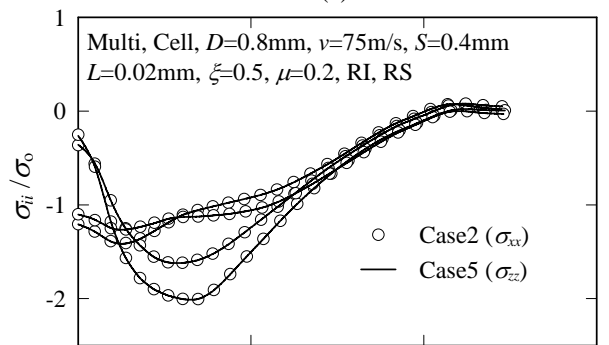
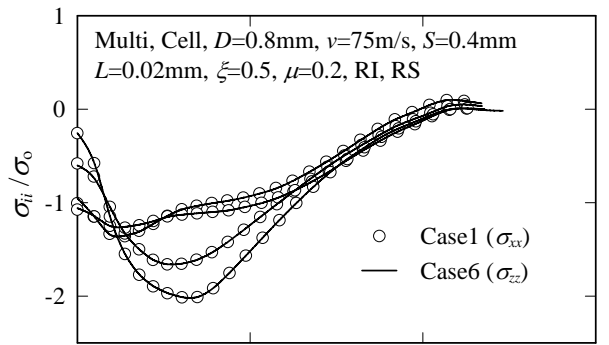


Fig. 13 Identity of peening residual stresses for similar impact types in single cycle

숫피닝 커버리지는 이와 같이 투영면적으로 표현되기도 하고, 다음과 같이 이웃한 압흔들의 중심간 거리 S 에 의해 표현되기도 한다. Fig. 10은 숫볼의 개수가 일정할 때 숫볼 중심간 거리에 따른 다양한 유한요소 피닝커버리지를 보여준다. 숫볼 개수가 5개 일 때 S 를 각각 0.4, 0.3, 0.2, 0.1mm로 점차 줄였다. S 가 0.4mm일 때 약 58%, 0.1mm일 때 약 300%로 평가된다. 이와 같이 숫볼들 간의 충돌 중심거리가 작아지면 피닝커버리지는 점차 증가한다. 초기에 뚜렷한 원형을 유지하며 서로 접하던 압흔들은 중첩되는 소성변형에 의하여 그 형상과 크기가 변한다. 즉 서로 이웃하는 숫피닝 커버리지는 응력간섭과 연계되며 숫피닝 잔류응력

해에도 영향을 준다. 따라서 실제에 근접한 다중 충돌 피닝잔류응력을 얻기 위해서는 유한요소 숫피닝 커버리지의 정의와 반영이 필수이다.

5. 충돌순서 의존성

Fig. 6의 3차원 다중충돌 대칭-셀 해석모델에 피닝커버리지를 반영하고자, 이후의 해석들에서는 S 를 숫볼의 반지름 $r = 0.4\text{mm}$ 로 고정했다. 재료의 대칭-셀 해석모델과 숫볼의 대칭을 함께 고려할 경우 $S \geq r$ 이어야 하며, $S = r$ 일 때 응력 간섭 효과가 가장 크기 때문이다. 이와 같이 유한요소 피닝커버리지가 반영된 본 해석모델로 충돌순서의

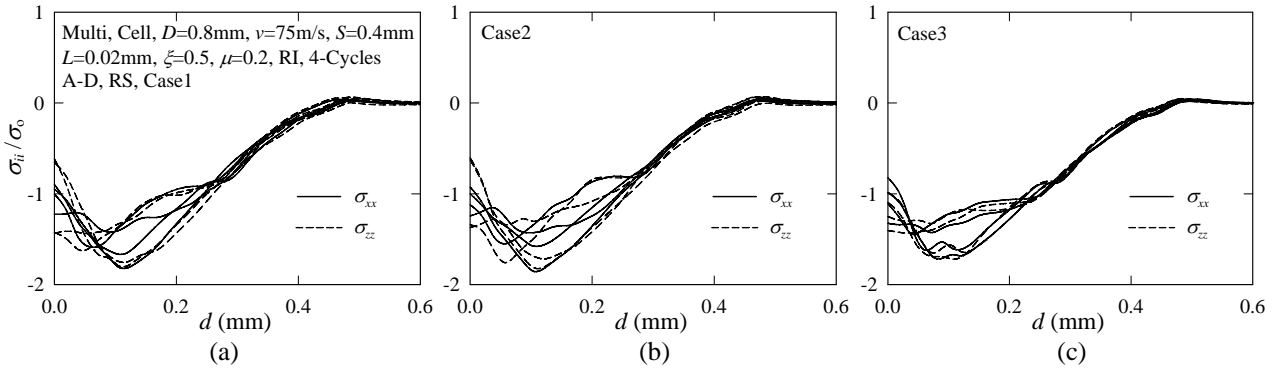


Fig. 14 Convergence to equi-biaxial stress in rigid shot FE model with 4-cycles

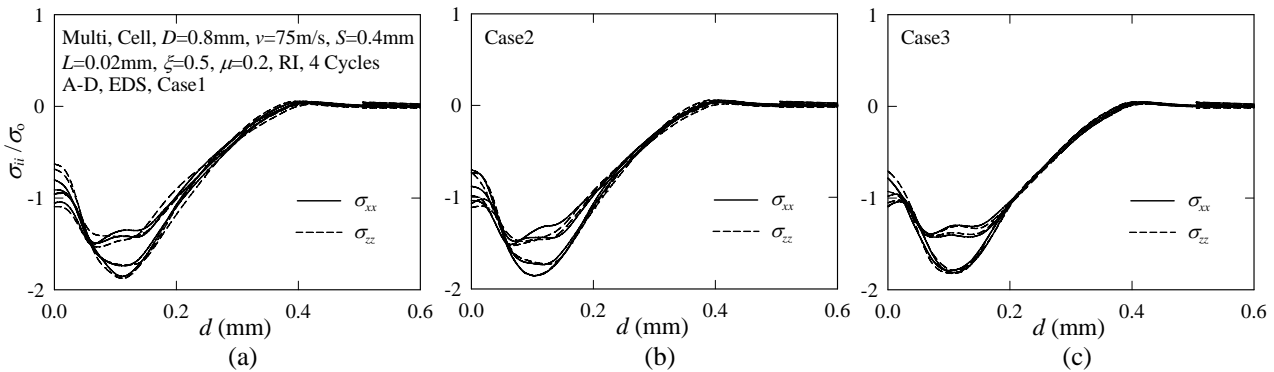


Fig. 15 Convergence to equi-biaxial stress in elastic deformable shot FE model with 4-cycles

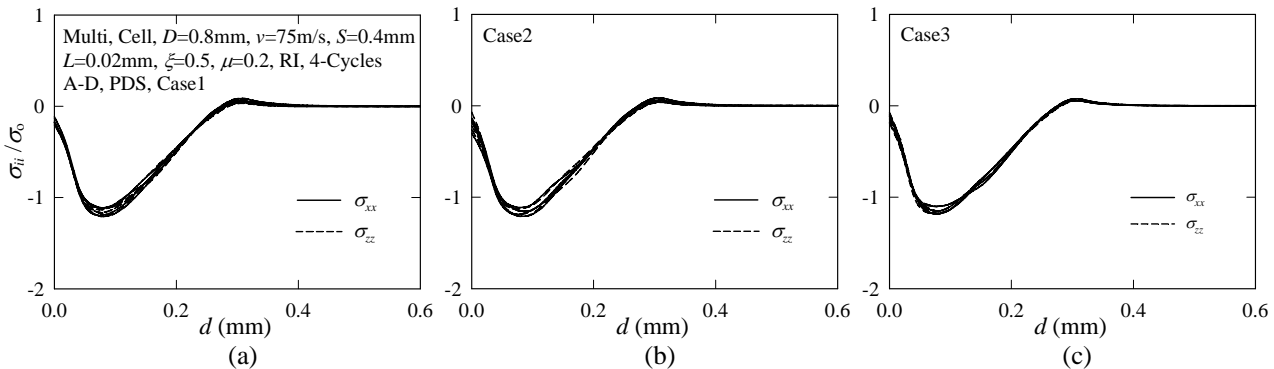


Fig. 16 Convergence to equi-biaxial stress in plastic deformable shot FE model with 4-cycles

영향을 살펴보았다. 다양한 충돌순서들에 대해, 셀 표면상 네 위치 (A-D; Fig. 6 참조)들에서 깊이 따른 잔류응력의 크기와 수렴을 고찰하였다. Fig. 11은 3가지 동격의 충돌유형들을 보여준다. Case1-6의 기본적인 6가지 충돌유형들로 구분되며, 각 Case는 첫 충돌이 다른 네 단일주기 (1-cycle) 들로 세분된다. 이때 Case1은 Case6와 같고, Case2 = Case5, Case3=Case4 이다. 이는 x 축 기준의 Case1-3 충돌유형들이 90° 회전시 Case6-4와 각각 같기 때문이다. Fig. 12는 Fig. 11에 정리된 순서들 중 Case1의 네 단일주기들에 대한 잔류응력 분포들을 보여준다. 동적마찰계수 $\mu=0.2$, 재료 감쇄계수 $\xi=0.5$ 를 유지하였으며, 변형률 속도의 영향은 고려되지 않았다 (RI : rate independent). 솟볼의 해석 모델은 강제솟 (RS)으로 구성하였다. 이와 같은 인자들 값은 김태형과 이형일⁽¹⁶⁾이 선행한 2차원 단일충돌 해석 연구에서 결정되었다. 솟볼들의 각 충돌위치 A-D에서 잔류응력해들의 크기와 분포가 서로 다르다. 여기서 네 충돌위치 A-D를 구별하지 않으면 Fig. 12의 네 그림 (a)-(d)는 사실상 같다는 점에 주목된다. 따라서 위치 A-D 구별이 없다면, Fig. 12 (a) - (d)는 각각 위치포괄해라 볼 수 있다. 실제 피닝잔류응력장은 위치와 무관한 균질해를 갖는다. 즉 A-D 위치들에서의 네 곡선들이 하나의 곡선으로 수렴되어야 한다. 이에 다음 절에서는 Case1-3 충돌유형들에 다주기 충돌순서들을 반영하여 위치포괄해의 양축등가응력으로서의 수렴성을 살펴본다.

Fig. 13은 Fig. 11에 정리된 동격 충돌유형들의 위치포괄해들이 서로 같음을 보여준다. (a)의 경우 Case1의 σ_{xx} 와 Case6의 σ_{zz} 가 서로 같음을 나타낸다. (b)-(c)는 각각 Case2 = Case5, Case3 = Case4 임을 보여준다. 따라서 위치포괄해를 기준으로 충돌순서의 중복성을 배제하여 양축등가응력을 위한 충돌순서 Case1-3만 고려한다.

6. 주기반복 효과

일반적인 피닝잔류응력은 단순 1회, 1주기성이 아닌 많은 솟볼들이 수회 반복충돌 되면서 점차 양축등가응력해에 수렴한다. 이에 본 연구에서는 실제 피닝현상에 가까운 다중충돌 해석을 위해 각 Case의 네 단일주기들의 주기반복 효과를 살펴 보았다. Table 1에 Case1-3의 다주기 충돌순서들을 정리하였다. 각 Case에 따라 1(4shots), 4(16shots), 8(32shots), 16(64shots) 주기들로 구분했다. Figs. 14-16은 위치포괄해와 주기반복성이 고려된 Case1-3에서 양축등가응력으로서의 수렴을 보여준다. 충돌 주기는 4주기로 했으며, 강제, 탄성, 소성솟 해석 모델들을 고려하였다. 앞서 수행된 단일주기보다 다주기 충돌에서 응력의 수렴성이 향상됐다. Case3에서 σ_{xx} 와 σ_{zz} 의 양축등가 잔류응력으로서의 수렴성이 가장 우수하다. 소성솟 모델의 양축등가응력 수렴성이, 강제 및 탄성솟 모델들에 비하여 크게 우수함이 주목된다.

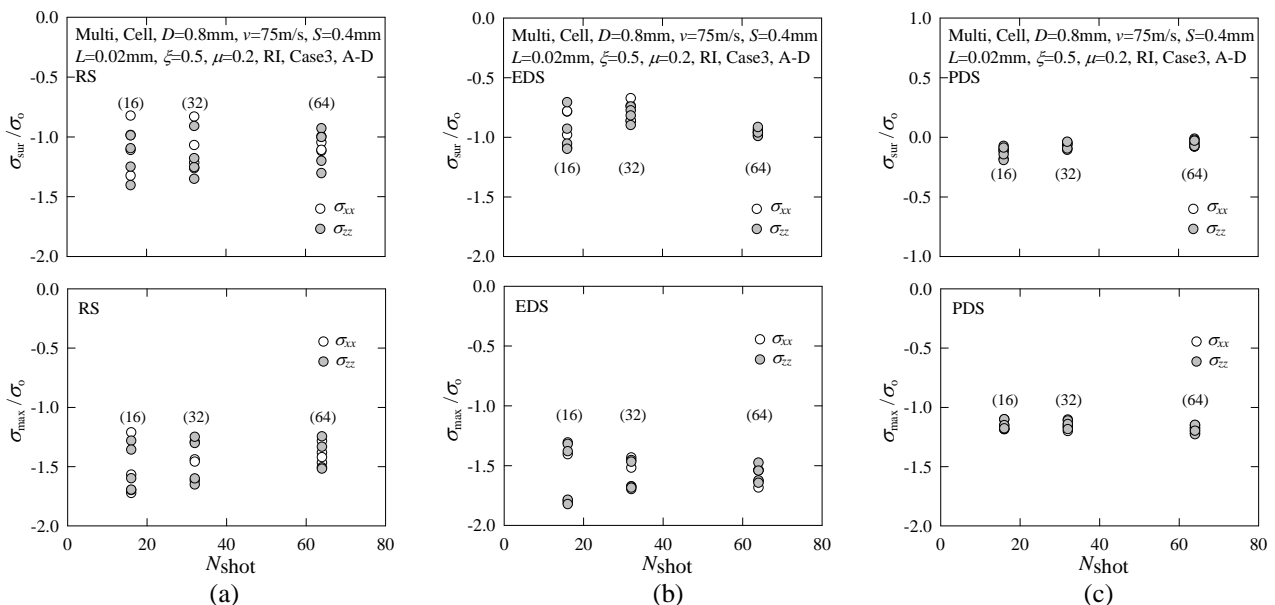


Fig. 17 Convergence on equi-biaxial residual stress with respect to increase of shot ball quantity in (a) rigid shot and (b) elastic deformable shot and (c) plastic deformable shot model

여기서 좀더 뚜렷한 양측등가 피닝잔류응력으로의 수렴성을 살펴보고자 4주기를 한 단위 (set)로 하여 1회 (4주기), 2회 (8주기), 4회 (16주기) 반복충돌들에 대한 해석을 수행하였다. 즉 Case3에 대한 1set (4cycles = 16shots), 2set (8cycles = 32shots), 4set (16cycles = 64shots)의 주기반복성을 살펴봤다. Fig. 17은 강재, 탄성, 소성솟 모델들의 주기반복성을 보여준다. 주기반복이 점차 증가할수록 $\sigma_{xx} = \sigma_{zz}$ 가 되면서 양측등가응력으로의 뛰어난 수렴을 보여준다. 이로부터 본 연구에서는 양측등가 피닝잔류응력으로의 수렴성과 무작위 충돌에 가장 가까운 Case3를 유한요소해석 기준 모델로 정하였다.

7. 유한요소 솟 모델 및 실험해와의 비교

유한요소 피닝커버리지 정의, 충돌순서 의존성, 주기반복성을 통합적으로 해석모델에 반영한 후, 본 장에서는 솟볼의 변형을 강조하였다. 솟볼의 변형을 무시한 강재솟, 탄성변형만 고려된 탄성솟,

소성변형이 고려된 소성솟 모델들에 대해 해석을 수행했다. 그리고 이들 해석모델들에 의해 얻어진 유한요소해와 XRD에 의해 측정된 실험해를 비교하였다. XRD 잔류응력 실험해는 200% 커버리지와 0.36mmA의 아크하이트 H 를 갖는다.⁽²¹⁾ 이들 인자들이 Fig. 18의 포화선도와 대응되면 해석을 위한 투사속도 v 를 계산할 수 있다. 가로축 t 는 솟피닝 공정시간을, 세로축 H 는 그 공정시간에서의 아크하이트 크기를 의미한다. SAE J442 규정에 준하여 A형 알멘스트립에 솟피닝 후 굽어진 만곡높이를 알멘게이지로 측정했다. 이때 아크하이트 단위는 사용된 스트립의 종류 A형과 mm단위 만곡높이로부터 mmA가 된다. 솟피닝 공정시간 t 에 대한 아크하이트는 식 (1)과 같이 표현된다. 또한 Fig. 19은 계수 A 와 투사속도 v 의 관계를 보여준다. 본 연구에 사용된 피닝장비의 성능을 고려해 t (min), v (m/s), C (%)의 한계를 각각 $1 \leq t \leq 16$, $30 \leq v \leq 80$, $C \geq 100$ 로 정했다.⁽¹⁸⁾ Table 2는 식 (1)의 계수 및 변수값들을 보여준다.

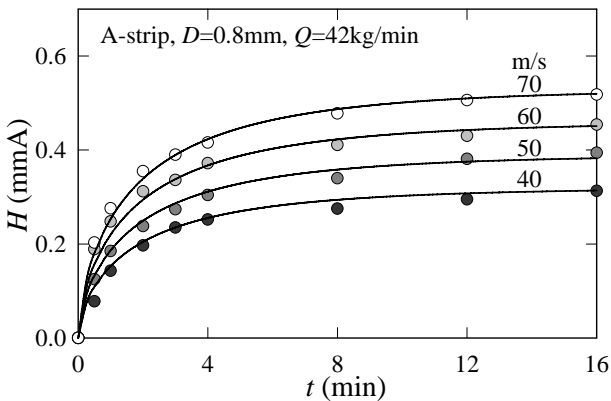


Fig. 18 Saturation curves for estimation of peening intensity

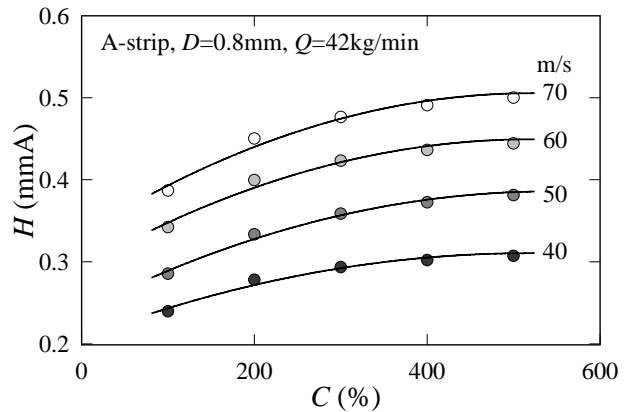


Fig. 20 Variation of arc height H with various peening coverages

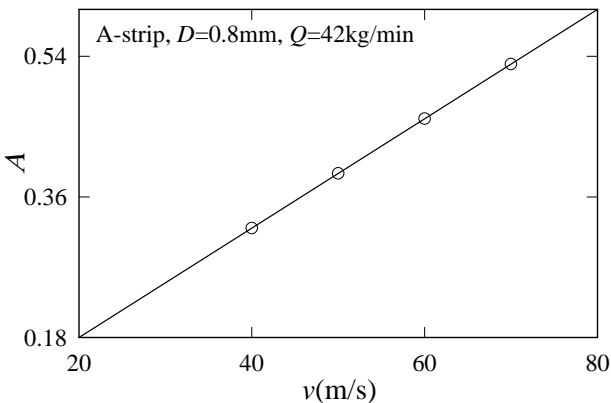


Fig. 19 Variation of constant A with impact velocity v

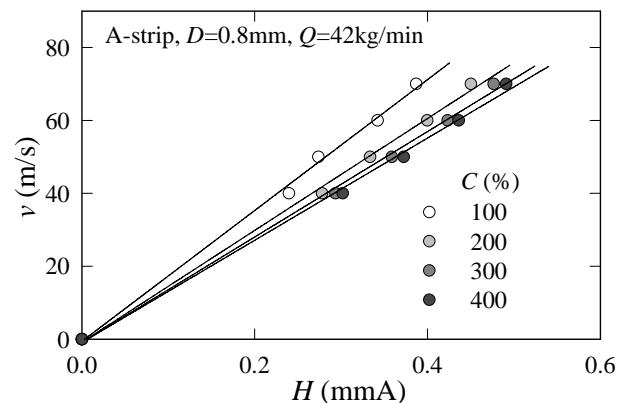


Fig. 21 Variation of shot impact velocity v with various arc heights H

Table 2 Numerical values of variables and coefficients of Eq. (1)

v (m/s)	A	t (min)	H (mmA)	Computed H (mmA)	Error (%)
70	0.53	1	0.276	0.253	9.0
		2	0.355	0.338	4.8
		3	0.390	0.389	0.1
		4	0.416	0.423	1.7
		8	0.478	0.487	1.8
		12	0.506	0.510	0.8
60	0.46	16	0.518	0.520	0.3
		1	0.248	0.212	13
		2	0.312	0.294	6.1
		3	0.336	0.338	0.6
		4	0.372	0.367	1.3
		8	0.411	0.423	2.8
50	0.39	12	0.430	0.442	2.8
		16	0.454	0.451	0.7
		1	0.185	0.186	0.8
		2	0.238	0.249	4.6
		3	0.274	0.287	4.4
		4	0.304	0.311	2.3
40	0.32	8	0.340	0.358	5.1
		12	0.381	0.375	1.6
		16	0.394	0.382	3.0
		1	0.143	0.153	6.5
		2	0.197	0.205	3.7
		3	0.235	0.235	0.1
4	0.252	0.255	1.3		
8	0.275	0.294	6.5		
12	0.295	0.308	4.2		
16	0.313	0.314	0.2		

Table 3 Numerical values of variables and coefficients of Eq. (2)

v (m/s)	B_i	C (%)	H (mmA)	Computed H (mmA)	Error (%)
70	$B_1 = -6.33 \times 10^{-7}$ $B_2 = 6.60 \times 10^{-4}$ $B_3 = 0.333$	100	0.387	0.393	1.4
		200	0.450	0.440	2.3
		300	0.477	0.474	0.6
		400	0.491	0.496	1.0
		500	0.500	0.505	0.9
60	$B_1 = -5.34 \times 10^{-7}$ $B_2 = 5.98 \times 10^{-4}$ $B_3 = 0.294$	100	0.342	0.348	1.9
		200	0.400	0.392	2.0
		300	0.423	0.425	0.6
		400	0.436	0.448	2.6
		500	0.444	0.460	3.4
50	$B_1 = -4.92 \times 10^{-7}$ $B_2 = 5.34 \times 10^{-4}$ $B_3 = 0.241$	100	0.286	0.289	1.2
		200	0.334	0.328	1.8
		300	0.359	0.357	0.6
		400	0.373	0.376	0.8
		500	0.381	0.385	1.0
40	$B_1 = -3.84 \times 10^{-7}$ $B_2 = 3.98 \times 10^{-4}$ $B_3 = 0.218$	100	0.240	0.244	1.6
		200	0.278	0.272	2.1
		300	0.294	0.293	0.4
		400	0.302	0.306	1.2
		500	0.307	0.311	1.3

$$H^v = A(1 - e^{-0.65t^{0.65}}) \quad (1)$$

Fig. 20는 피닝커버리지에 대한 아크하이트의 변화를 보여준다. 커버리지는 광학 현미경으로부터 찾아내며, $C=100\%$ 인 솟피닝 공정시간을 t_p 라 한다. 100% 이상 피닝커버리지는 t_p 에 상수배하여 정한다. 즉 $2t_p$ 일 때 $C=200\%$, $3t_p$ 일 때 $C=300\%$ 의 솟피닝 커버리지로 정한다. 이로부터 커버리지와 아크하이트 관계는 식 (2)와 같이 표현된다. Table 3는 식 (2)의 계수 및 변수값들을 보여준다.

$$H^v = B_1C^2 + B_2C + B_3 \quad (2)$$

Fig. 21은 아크하이트의 변화에 따른 투사속도의 관계를 나타낸다. 아크하이트 증가에 대한 솟볼의 투사속도는 선형으로 표현되며, 아래식 (3)과 같다. 또한 커버리지가 증가할수록 선형기울기는 작아지며, 점차 수렴된다. Table 3은 식 (3)의 계수 및 변수값들을 보여준다.

$$v^C = C_1H - C_2 \quad (3)$$

이와 같이 포화선도에서 산출한 식 (1)-(3)들로 부터 솟볼의 투사속도를 구할 수 있다. 식 (3)에서 $C=200\%$ 일 때 계수 $C_1=153.4$, $C_2=0.82$ 이다. 식에 아크하이트 0.36mmA를 대입하면 속도 $v=55\text{m/s}$ 로 계산된다. 그리고 이를 해석에 사용했다. Fig. 22는 Case3 기준 모델에 강재, 탄성, 소성솟 모델들이 추가로 고려된 후 표면 및 최대 압축잔류응력해의 수렴성을 보여준다.

Table 4 Numerical values of variables and coefficients of Eq. (3)

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
		0.387	70	68.9	1.7
200	$C_1=153.4$ $C_2=0.82$	0.278	40	41.8	4.4
		0.334	50	50.4	0.8
		0.400	60	60.5	0.9
		0.450	70	68.2	2.6
300	$C_1=144.6$ $C_2=0.87$	0.294	40	41.6	3.9
		0.360	50	51.2	2.3
		0.423	60	60.3	0.5
		0.477	70	68.1	2.8
400	$C_1=140.2$ $C_2=0.89$	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

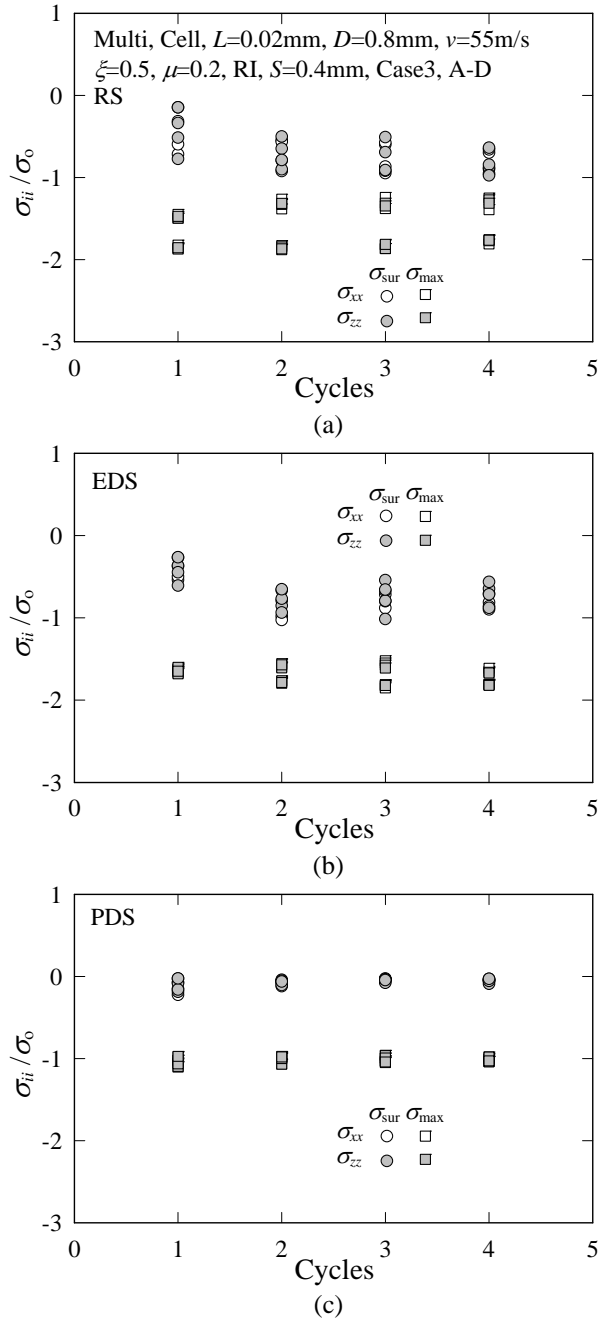


Fig. 22 Convergence of residual stresses with three FE shot model by repeat cycles in Case3

4주기 충돌 후 대칭-셀 A-D 위치에서 세 해석 모델들의 표면 및 최대 압축잔류응력해들은 모두 양축등가응력해로 수렴한다. 특히 세 해석모델 중 소성샷 해석모델에서 양축등가응력해로의 수렴이 가장 우수하다. Fig. 23는 통합된 인자들과 샷볼 해석모델들에 대한 유한요소해와 XRD 실험해의 비교를 보여준다. (a)에서 강제 및 탄성샷 모델의 유한요소해들은 실험해와 큰 차이를 보인다. 반면 소성샷 모델은 실험해와 다소 차이는 있으나 강제

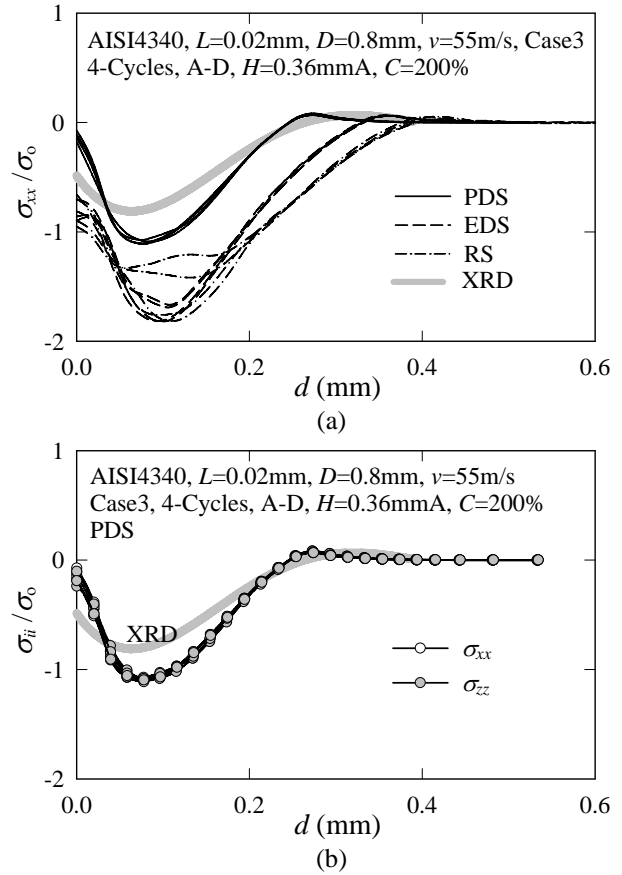


Fig. 23 (a) Comparison of residual stresses by FE and XRD (b) Equi-biaxial stress of plastic shot model

및 탄성샷 모델들보다 훨씬 향상된 해를 준다. (b)는 소성샷 해석모델에서의 양축등가응력해로의 수렴성을 보여준다. 이로써 양축등가응력해로의 수렴과 XRD 실험해에 대한 근접성이 우수하다는 점에서 소성샷 해석모델이 가장 유용함을 확인하였다. 일반적으로 XRD 실험해는 X-선 조사부 영역에서 면적평균 피닝잔류응력값을 준다. 이를 고려해, 대칭-셀 각 깊이에서 그 단면을 구성하는 전체절점들에서의 면적평균해와 이에 기초한 유한요소 알멘선도 개념을 정리하고 있으며 추후 보고 될 것이다.

8. 결론

본 연구에서는 샷피닝 잔류응력을 정량적으로 평가하고자 3차원 다중충돌 대칭-셀 해석모델을 활용하였고, 유한요소해와 실험해의 비교를 통해 그 유효성을 확인했다. 재료의 물리적 거동특성과 샷볼의 운동학적 특성이 충분히 반영된 대칭-셀 해석모델에서 유한요소 피닝커버리지, 충돌순서의존성, 주기반복 효과들을 살펴보았다.

여기에 강체, 탄성, 소성솟 해석모델들을 고려해, 대칭-셀의 네 충돌위치에서 양측등가응력으로의 수렴성을 확인하였다. 각 충돌위치들에서는 서로 다른 응력 분포를 보이거나 위치포괄해로 표현되는 표면 및 최대 압축잔류응력은 양측등가응력으로 수렴했다. 또한 강체 및 탄성솟 해석모델과 달리 소성솟 모델은 XRD 실험해에 매우 근접한 해를 준다. 이로부터 물리적 거동인자들 및 운동학적 피닝인자들의 통합, 소성솟 유한요소해석 모델의 유효성을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Verpoort, C. M. and Gerdes, C., 1989, "Influence of Shot Peening on Material Properties of Turbine Blades," *Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International*, Vol. 1, pp. 11~70.
- (2) Garibay, R. P. and Terry, S. L., 1989, "High Technology Shot Peening for Automatic Industry," *Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International*, Vol. 1, pp. 227~234.
- (3) Carlsson, S. and Larsson, P. L., 2001, "On the Determination of Residual Stress and Strain Fields by Sharp Indentation Testing. Part I: Theoretical and Numerical Analysis," *Acta Materialia*, Vol. 49, pp. 2179~2191.
- (4) Suresh, S. and Giannakopoulos, A. E., 1998, "A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation," *Acta Materialia*, Vol. 46, pp. 5755~5767.
- (5) Al-Hassani, S. T. S., 1981, "Mechanical Aspects of Residual Stress Development in Shot Peening," 1st *International Conference on Shot Peening*, pp. 583~602.
- (6) Al Obaid, Y. F., 1995, "Shot Peening Mechanics: Experimental and Theoretical Analysis," *Mechanics of Materials*, Vol. 19, pp. 251~260.
- (7) Hills, D. A., Waterhouse, R. B. and Noble, B., 1983, "An Analysis of Shot Peening," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 18, pp. 95~100.
- (8) Schiffner, K. and Helling, C., 1999, "Simulation of Residual Stresses by Shot Peening," *Computers & Structures*, Vol. 72, pp. 329~340.
- (9) Al-Obaid, Y. F., 1990, "Three Dimensional Dynamic Finite Element Analysis for Shot Peening Mechanics," *Computers & Structures*, Vol. 36, pp. 681~689.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) Han, K., Owen, D. R. J. and Peric, D., 2001, "Combined Finite/Discrete Element and Explicit /Implicit Simulations of Peen Forming Processes," *Engineering Computations*, Vol. 19, No. 1, pp. 92~118.
- (16) 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.
- (17) ABAQUS User's Manual, 2004, Version 6.5, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- (18) Fathallah, R., Inglebert, G. and Castex, L., 1996, "Modeling of Shot Peening Residual Stresses and Plastic Deformation Induced in Metallic Parts," 6st *International Conference on Shot Peening*, pp. 464~473.
- (19) Cao, W., Fathallah, R. and Castex, L., 1995, "Correlation of Almen Arc Height with Residual Stresses in Shot Peening Process," *Materials Science and Technology*, Vol. 11, No. 9, pp. 967~973.
- (20) Rotation Table Type Impeller Peening Machine (PMI-0608) User's Manual, 2004, Saemyung Shot Machinery Co., 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.