

알멘 스트립 시험 모사를 이용한 유한요소모델의 유효성 검증 및 잔류응력분포 계산

양조예¹ · 박성호¹ · 이영석[#]

Verification of Finite Element Model Using the Almen Strip Test and Its Applications to Calculate Residual Stress Distribution

Z. R. Yang, S. H. Park, Y. S. Lee

(Received October 26, 2011 / Revised April 13, 2012 / Accepted April 17, 2012)

Abstract

We performed a shot peening test and used a 2-D finite element model which predicts the compressive residual stress distribution below the material's surface. In this study, the concept of 'impact cycle' is introduced to account for the irregularity in the shot's impact position during testing. The impact cycle was imbedded in the finite element model. In the shot peening test, shot bombarded a type-A Almen strip surface with different impact velocities. To verify the proposed finite element model, we compared the deformed cross sectional shape of the Almen strips with the shapes computed by the proposed finite element model. Good agreement was noted between measurements and the finite element model predictions. With the verified finite element model, a series of finite element simulations was conducted to compute the residual stress distribution below the material's surface and the characteristics of these distributions are discussed.

Key Words : Shot Peening, Residual Stress, Almen Strip, Arc Height

1. 서론

쇼트피닝은 금속/비금속 부품표면에 미세한 크기의 볼을 고속으로 충돌 시키면서 표면 및 그 하부에 잔류압축응력(Residual compressive stress)을 생성하는 공정이다. 쇼트피닝 실험은 시편 깊이 방향으로 잔류응력분포를 측정해야 하기 때문에 많은 시간과 비용이 요구된다. 따라서 쇼트피닝 실험을 모사 해서 잔류응력을 예측하고 실험과 비교하려는 연구들이 많았다.

Meguid et al.[1]은 쇼트볼 1개의 투사 속도와 쇼트볼 사이즈를 변수로서 압축잔류응력의 영향을 연구하였다. Hong et al.[2]는 단일 충돌 할 때 투사 각도와 재료의 표면 경화 파라미터 비(hardening

parameter ratio)가 압축잔류응력분포 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 그리고 Kim et al.[3]은 2차원 유한요소해석 모델을 사용하여 단일 쇼트볼 충돌 모사를 하고 잔류응력을 계산했다. 그들은 충돌에 의한 재료감쇠와 동적 마찰계수가 잔류응력에 미친 영향을 살펴보았다. 그들은 투사되는 볼이 한 개인 경우에 국한 해서 해석하였다. 하지만 쇼트피닝 실험에서는 수많은 볼이 시편표면의 임의의 위치에 비동시적으로 투사되기 때문에 실험 값과 예측 값이 항상 많은 차이가 발생하게 된다. 따라서 다중 투사에 의한 잔류응력변화에 대한 연구가 있었다.

Meguid et al.[4]은 3-D 축대칭 모델을 이용하여 다중충돌 시 쇼트볼 간격이 잔류응력분포에 미

1. 중앙대학교 기계공학부 대학원
교신저자: 중앙대학교 기계공학부, E-mail: ysl@cau.ac.kr

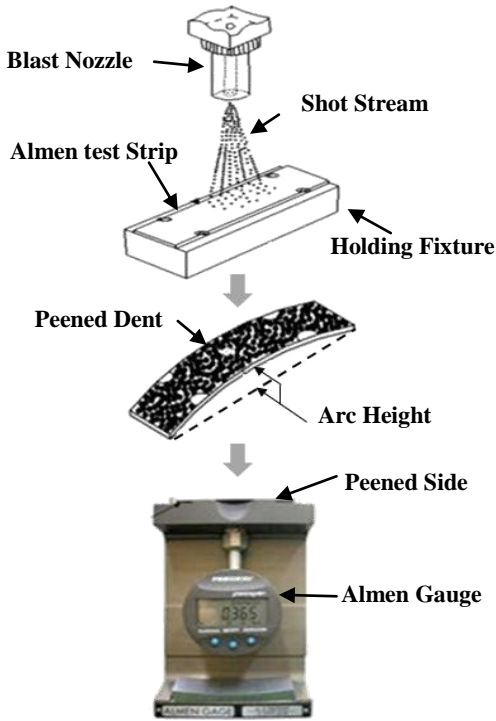


Fig. 1 Almen test system

친 영향을 분석하였다. Schiffner et al.[5]은 2개의 쇼트볼 순서대로 충돌이 일어날 때의 잔류응력과 압흔 크기를 예측했다. 하지만 쇼트볼 2개를 사용한 피닝 모사를 다중충돌 피닝해석이라고 보기에 부족하다. Majzoobi et al.[6]은 다중충돌 후 소재 표면의 압흔(indentation) 중심 및 압흔 근처의 잔류응력분포를 비교했다. 그리고 각 압흔 간의 잔류응력영향을 분석해왔다. Klemenz et al.[7]은 쇼트볼의 투사속도와 쇼트볼 크기가 소재 표면 깊이 방향에 따른 잔류응력의 영향을 분석했다. Guagliano[8]는 임의의 한 지점에서 다중충돌 3-D 대칭셀 모델을 만들고 FE 해석을 수행하였다. 하지만 제한적인 지점에서 다중충돌 모델은 실제 실험값과 많은 오차를 보였다. Baek[9]등은 3차원 동적 해석을 수행하여, 수직 및 경사충돌 피닝시 투사각에 따른 잔류응력분포를 살펴보았다. Kim et al.[10]은 3차원 대칭-셀(Symmetry-cell) 유한요소 해석 모델을 사용하였다. 투사되는 쇼트볼의 숫자를 증가시키면서 소재의 면적평균 잔류응력 예측결과와 실험결과를 비교했다. 이를 통하여 잔류응력의 정확성을 검증하였다.

하지만 유한요소법을 사용한 쇼트피닝 모사는 사용된 유한요소 모델의 검정이 항상 문제였다. 왜냐하면 쇼트피닝 상황을 제대로 모사하기 어렵기 때문이다. 따라서 알멘 스트립(Almen strip) 실험 및 모사를 하여 사용된 유한요소 모델을 검증하는 것이 대안이 될 수 있다. 참고로 알멘 스트립 실험(Fig.1)은 쇼트피닝 변수를 결정하기 위한 선행 실험이다. 즉 쇼트피닝 가공하기 전에 이 실험을 통하여 쇼트볼 속도, 투사시간, 투사각 등 변수를 선택한다.

그 대안은 알멘 스트립[11]에 볼을 투사한 후에 변형된 스트립 높이, 즉 아크 하이트(Arc height)를 측정하고 유한요소예측결과와 비교하는 것이다. 최근에 Baskaran[12]은 알멘 스트립에 대한 3차원 유한요소해석 모델을 제안하였다. 그는 알멘 스트립의 실제 크기를(79%) 감소시켜 유한요소해석을 수행했다. 때문에 유한요소해석모델을 그대로 신뢰하기 어렵다.

본 연구에서 우리는 2차원 다중 충돌 유한요소 해석모델을 만들어 알멘 스트립 실험 모사에 적용하였다. 우리가 공기압축식 쇼트피닝 실험장비를 만들었다. 알멘 스트립 편이 변형된 모습(아크 하이트)과 유한요소해석 결과를 비교하여 사용된 유한요소해석모델의 유용성을 검증했다. 최종적으로 이 모델을 사용하여 SAE9254 소재의 잔류응력 분포를 계산하였다.

2. 쇼트피닝 실험

Fig. 2는 본 연구를 위해 만들어진 공기 압력식 쇼트피닝 장비이다. 쇼트볼의 투사유량은 2.5kg/min 였다.

실험의 주 변수인 쇼트볼의 투사속도는 공기 압력을 조절하여 실험하였다. S230(Diameter, D=0.6mm) 컷와이어라운드 쇼트볼이 사용되었다.

Fig 3은 알멘 스트립이 쇼트피닝장비에 장착된 모습이다. 시편 경계조건이 기존의 알멘 스트립 실험(Fig.1)과 다르다. 그 이유는 기존의 알멘 스트립 실험인 경우 구속조건(시편 지지대와 시편밀면과의 접촉, 측면 4군데의 볼트접촉) 구성이 매우 복잡하다. 유한요소 해석에 적용하기 어렵기 때문이다. 하지만 본 연구에서 제시된 수정된 알멘 스트립 실험의 경계조건은 단순하다. 따라서 유한요소해석의 경계조건 설정이 매우 명확하다.

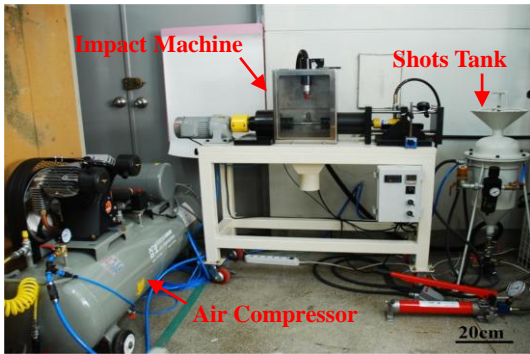


Fig. 2 Shot peening equipment for air type

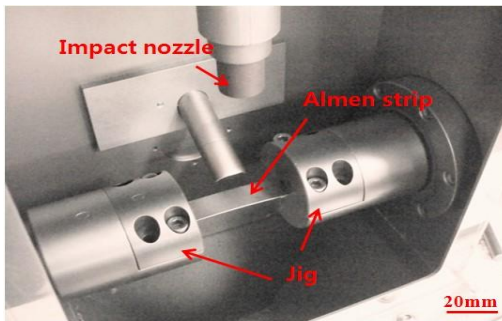


Fig. 3 Almen strip installed between two jig

Table 1 Property of SAE1070 steel

Property	Value
Density	7800kg/m ³
Poisson's Ratio	0.29
Young's Modulus	205GPa
Yield Strength	1268MPa
Ultimate Strength	1422MPa

SAE규격에 따른 SAE 1070강종의 A형 알멘 스트립을 사용했다. 재료SAE1070의 기계적 물성은 Table1에서 보여준다.

3. 2차원 유한요소해석

3.1 경계조건

본 연구에서 쇼트피닝 다중충돌을 해석하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS/ explicit 을 사용했다. 충돌, 칩투 등 비선형성이 강한 문제일수록 explicit으로 접근을 해야 한다. Explicit은 강성행렬을 풀어나가는 것이 아니고 이전 단계의

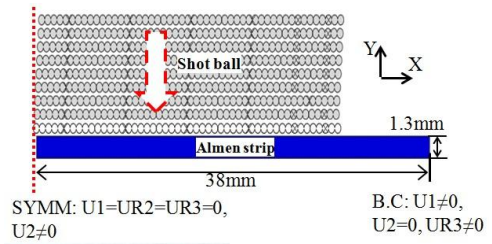


Fig. 4 1/2 Symmetry Almen test FE model

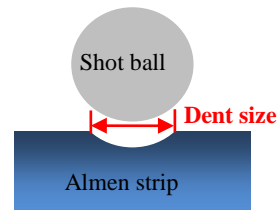


Fig. 5 The dent size for a single shot impact

값을 다음단계에 대입 함으로 해를 얻어 간다. 따라서 수렴에 대한 부담이 없다. 해는 반드시 구해 지게 된다. 그리고 해석에서 사용된 재료 모델은 Johnson-Cook stress model(응력모델)이다. 최소 요소 크기는 0.02mm, 재료감쇠계수 $\xi=0.5$, 동적 마찰계수 $\mu=0.2$ 를 채택했다. 축대칭 4절점 감차적분요소 (CAX4R, ABAQUS)를 사용하여 유한요소망을 구성하였다. 강체 해석모델을 쇼트볼에 적용하였다. Fig. 4 는 본 연구에서 사용된 알멘 테스트 쇼트피닝(Almen test shot peening) 실험의 경계조건이다. 해석시간을 단축시키기 위해 1/2대칭 조건을 사용 하였다.

3.2 커버리지 및 투사 위치

커버리지(coverage)는 쇼트볼이 투사될 때 물체의 표면이 변형된 밀도를 말한다. Fig 5은 한 개의 쇼트볼이 소재에 투사한 후 2차원 압흔 사이즈 (dent size)를 나타낸 것이다. 커버리지는 쇼트피닝 대상인 소재표면 있는 모든 점(위치) 이 압흔으로 커버되면 커버리지는 100%가 된다.

실제 쇼트볼 실험에서 쇼트볼은 소재표면에 매우 임의적으로 부딪친다. 우리는 각 볼이 소재에 충돌하는 위치(점)를 알 수 없다. 경우에 따라서 많은 수의 쇼트 볼이 소재에 투사된다 하더라도 커버리지가 100%가 된다는 보장이 없다. 즉, 소재의 어떤 점에서는 표면 변형이 발생하지 않을 수 있다. 따라서 실제 쇼트볼 실험에서 많은 볼을 투사하여 그런 경우를 미리 배제시킨다. 하지만 유한요소해석에서 그렇게 수많은 쇼트 볼을 투사

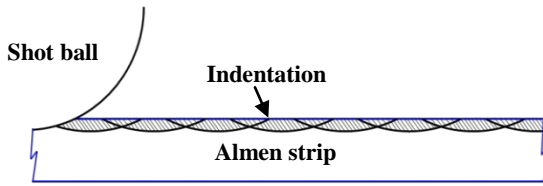


Fig. 6 The indentation location of shot impact with 100% coverage

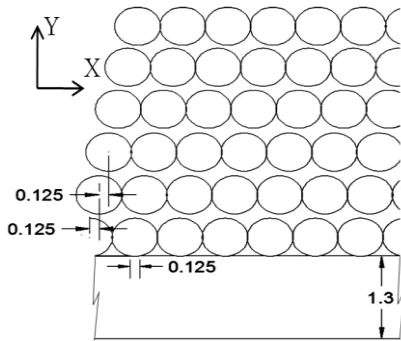


Fig. 7 The impact order for 100% coverage at 1-cycle

할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 커버리지 100% 일 때를 기준으로 쇼트볼 충돌 위치를 배정한다 (Fig. 6).

3.3 투사 사이클 (Impact cycle)

쇼트피닝 실험이 진행될 때 소재에 투사되는 볼의 순서는 대단히 불규칙적이다. 하지만 유한요소해석에서 이 불규칙적 투사순서를 모사 하려면 거의 무한대의 경우의 수를 감당해야 한다. 이는 불가능하다. 따라서 본 연구에서 불규칙한 순서로 투사되는 쇼트 볼을 모사하기 위해 투사 사이클 개념을 도입한다. 투사 사이클은 쇼트 볼이 투사될 때 어떤 규칙을 가지고 100% 커버리지를 유지한다는 가정이다. 다층으로 불규칙적으로 투사되는 볼의 순서는 어떤 순서를 가진 쇼트볼의 매트릭스로 설정하였다. Fig 7는 커버리지 100%일 때 1사이클의 투사사이클을 보여준다.

그림 7에 보인 투사사이클 설정근거는 다음과 같다. 투사속도 25m/s인 경우의 압흔 크기는 0.125mm 였다. 이를 기준으로 쇼트볼 사이의 투사 간격은 0.125mm로 설정했다. 실제 쇼트피닝 실험에서 시편의 x축 방향으로 투사범위 길이는 30mm이다. 이 길이 내에서 한 층에 50개의 쇼트볼을 배열했다. 이렇게 300개의 쇼트볼을 6층으로

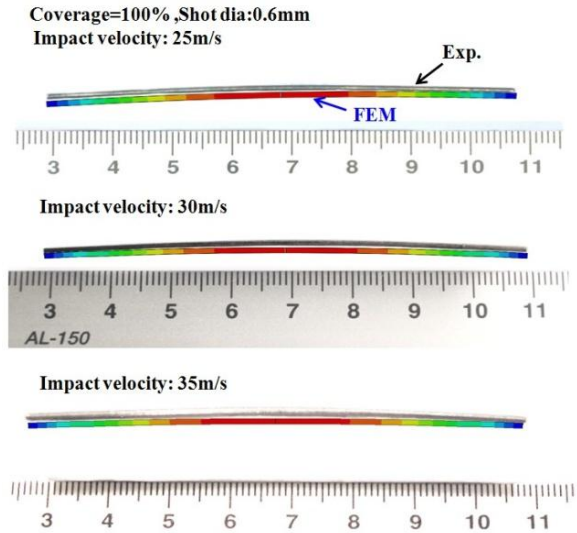


Fig. 8 FEM arc height and experiment arc height comparison for different impact velocity

Table 2 Numerical values of FEM with change impact velocity (2-cycle)

Impact velocity (m/s)	Arc height EXP. (mm)	Arc height FEA (mm)	Error
25	0.99	0.92	7.07
30	1.14	1.21	6.14
35	1.35	1.27	5.93

배열하며 1사이클(cycle)를 정의했다. 이런 형태로 쇼트 볼이 투사되면 1 사이클 투사에서 소재의 모든 표면은 100% 커버리지를 가질 수 있게 된다. 실험에서 쇼트볼의 투사수량이 증가하는 것을 해석에서 투사 사이클을 증가하는 것으로 표현했다. 즉 투사 사이클이 증가되면 투사시간도 증가된다.

4. 결과 및 토의

4.1 투사속도 변화에 따른 알멘 스트립 (Almen strip)의 형상변화

Fig. 8은 투사속도 변화에 따른 알멘 스트립 (Almen strip)의 단면의 전체형상변화를 보여준다. 유한요소 해석결과와 실험결과의 차이를 실험 결과로 나눈 것을 에러(error)라고 정의한다.

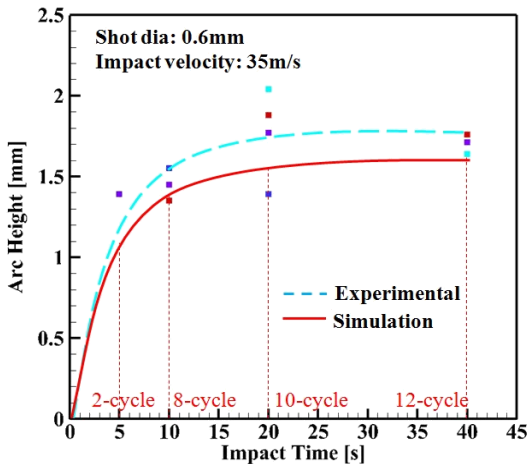
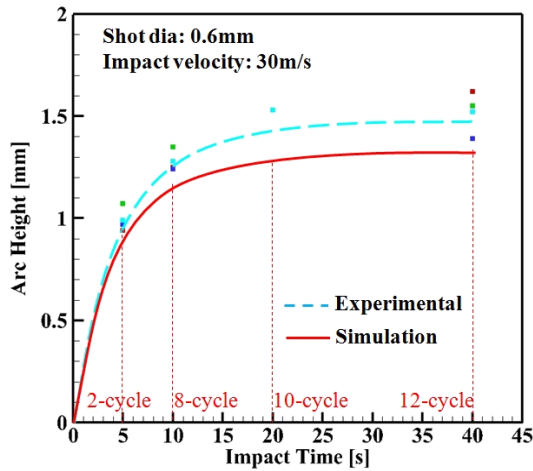
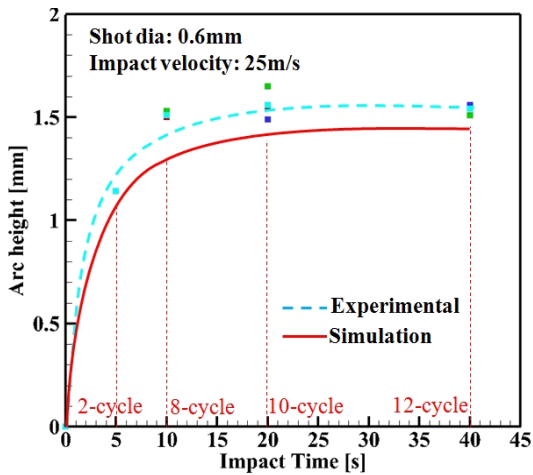


Fig. 9 Almen saturation curves with different impact velocity

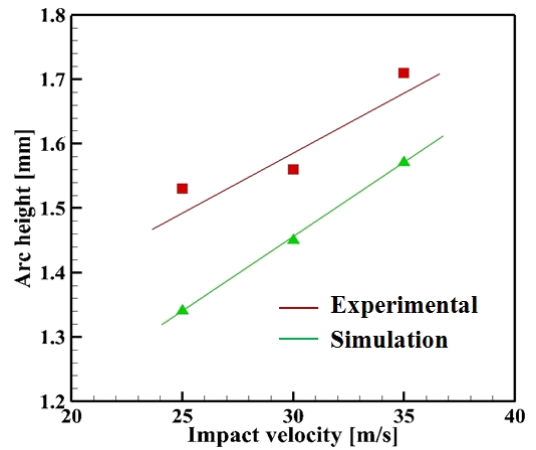


Fig.10 Effect of impact velocity with arc height (10-cycle)

표 2 를 보면 투사속도가 25m/s 일 때 약 7.07%의 에러가 발생하였고 투사속도가 35m/s 일 때 에러는 5.93%로 줄어들었다. 따라서 투사 속도 증가에 따라 에러가 감소하는 것을 알 수 있다.

투사속도가 증가할수록 아크 하이트도 증가하는 것을 알 수 있다. 아크하이트는 쇼트피닝 잔류응력과 표면 소성변형에 의한 알멘스트립이 볼록하게 된 곡면의 높이로 정의된다. 이것은 투사속도가 증가 될수록 쇼트볼의 충격에너지가 증가하게 되기 때문이다. 그리고 이에 따라 재료 표면에 형성된 압축잔류응력 층이 더욱 깊어졌기 때문이다.

4.2 투사시간 증가에 따른 아크 하이트

투사시간과 아크하이트 값과의 관계를 알멘 선도라고 한다. 알멘 선도를 활용하여 최적의 피닝시간을 선택할 수 있다. Fig 9 는 투사속도범위가 25~35m/s 일 때의 투사시간 증가에 따라 아크 하이트 변화를 보여준다. 아크 하이트는 투사시간 증가에 따라 무조건 증가하는 것이 아니다. 일정한 투사시간을 지나면 계속 투사해도 아크 하트를 증가하지 않는다. 투사시간 약 20sec(10-cycle)부터 아크 하이트 포화가 시작되는 것을 알 수 있다. 10-cycle 에서 12-cycle 까지투사시간 이 증가하더라도 아크 하이트의 변화는 실험과 해석 결과에서 크지 않았다. 이것은 시편 표면에 일정한 쇼트피닝이 일어나면 표면 잔류응력이 포화되기 때문이다.

Fig. 10 은 알멘 스트립(Almen strip) 시편의 아크 하이트와 쇼트볼 투사속도의 상관 관계를 표시하

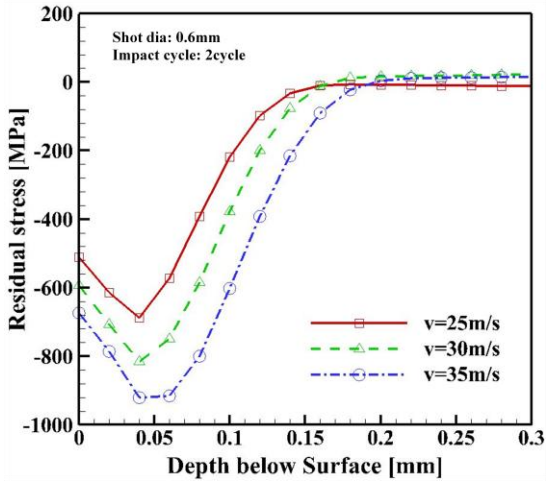


Fig.11 Effect of impact velocity with residual stress and depth below surface

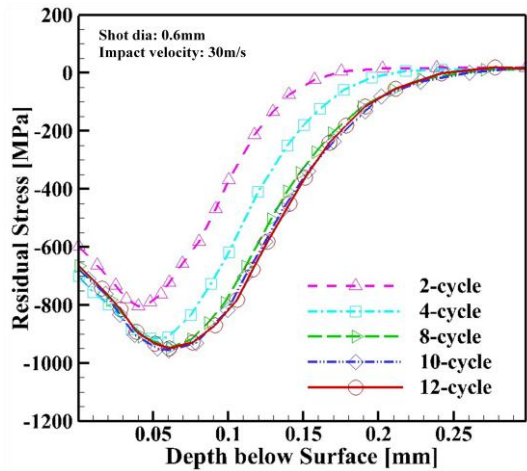


Fig.12 Effect of impact cycle with residual stress and depth below surface

는 그림이다. 그림에서 표시된 아크 하이트는 포화상태에서 얻은 값이다. 투사속도가 증가하면 아크 하이트도 증가하게 된다. 투사속도가 25m/s 일 때 포화 상태의 아크 하이트 실험과 해석 결과 에러가 12.98%로 가장 크다. 그리고 투사속도가 30m/s 일 때 에러는 7.69%이고 35m/s 일 때 에러는 8.14%이다.

4.3 표면잔류응력분포 계산

그림 9, 10 을 통해 유한요소 해석 모델의 유효성을 검증하였다. 이 유한요소 모델을 사용하여

쇼트피닝 공정에서 투사 속도 및 쇼트볼 투사 수량에 대한 잔류응력분포를 계산하였다. 잔류응력 분포모사에 사용된 소재는 자동차 및 기계용 스프링 부품 등에 많이 사용되는 SAE 9254 강 이다.

Fig. 11 은 투사속도 증가에 따른 유한요소 잔류응력분포이다. 투사속도가 35m/s 일 때의 최대 압축잔류응력은 921MPa 으로 가장 많았으며, 25m/s 인 경우 최대 압축잔류응력은 687MPa 까지 25.4% 가 감소되었다.

해석 결과를 보면, 투사속도의 증가와 더불어 최대 압축잔류응력도 증가하였다. 또한 표면 잔류응력과 잔류응력 깊이도 함께 증가한 것을 알 수 있다. 이는 투사속도의 증가에 따른 아크 하이트가 증가된 때문이다.

Fig. 12는 투사사이클 증가에 따라 시편 깊이 방향 압축잔류응력분포 변화를 보여준다. 8-cycle까지는 투사사이클의 증가하면 잔류응력 크기와 깊이 모두 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 투사사이클이 10-cycle이상일 때 잔류응력 분포의 변화는 없었다. 결과적으로 투사사이클 10-cycle이상에서 시편 깊이 방향 잔류응력은 수렴하게 된다.

5. 결론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 알멘 스트립(Almen strip) 실험을 모사하였다. 이 실험을 모사하기 위해 투사사이클 개념을 도입하여 실제 쇼트피닝 실험에서 발생하는 불규칙적인 쇼트볼 투사를 질서 있는 투사로 바꾸었다. 계산된 알멘 스트립 단면형상과 측정된 단면형상을 비교하고 유한요소 해석 모델의 유효성을 검증하였다.

검증한 유한요소해석 모델을 통하여 쇼트피닝에서 복잡한 투사순서가 질서 있는 순서로 바꿀 수 있는 것을 확인하였다. 또한 제안된 유한요소 해석 모델에 필요한 투사속도나 투사사이클을 적용하면 실험과 근접한 잔류응력분포를 얻을 수 있다. 그리고 투사속도가 증가하면 잔류응력 분포가 계속 증가하지만, 투사 사이클은 10-cycle 이상 증가하면 잔류응력분포 변화가 없는 것을 확인했다.

참 고 문 헌

[1] S. A. Meguid, G. Shagal, J. C. Stranart, 1999, Finite Element Modeling of Shot-peening Residual

- Stresses, J. Mater. Process. Technol., Vol. 92, No. 93, pp. 401~404.
- [2] T. Hong, J. Y. Ooi, B. A. Shaw, 2008, A Numerical Study of the Residual Stress Pattern from Single Shot Impacting on a Metallic Component, Adv. Eng. Software, Vol. 39, No. 9, pp.743~756.
- [3] T. H. Kim, 2008, A 2D FE Model for Unique Solution of Peening Residual Stress in Single Shot Impact, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 38, No. 4, pp. 362~370.
- [4] S. A. Meguid, G. Shagal, J. C. Stranart, 2002, 3D FE Analysis of Peening of Strain-Rate Sensitive Materials using Multiple Impingement Model, Int. J. Impact Eng., Vol. 27, No. 2, pp.119~134.
- [5] K. Schiffner, C. Droste gen. Helling, 1999, Simulation of Residual Stresses by Shot Peening, Comput. Struct., Vol. 72, No.1-3, pp. 329~340.
- [6] G. H. Majzoobi, R. Azizi, A. Alavi Nia, 2005, A Three-Dimensional Simulation of Shot Peening Process using Multiple Shot Impacts, J. Mater. Process. Technol., Vol. 164-165, pp.1226~1234.
- [7] M. Klemenz, V. Schulze, I. Rohr, D. Lohe, 2009, Application of the FEM for the Prediction of the Surface Layer Characteristics after Shot Peening, J. Mater. Process. Technol., Vol. 209, No.8, pp. 4093~4012.
- [8] M. Guagliano, 2001, Relating Almen Intensity to Residual Stresses Induced by Shot Peening: Anumerical Approach, J. Mater. Process. Technol., Vol. 110, No. 3, pp. 277~286.
- [9] S. Baek, W. Yang, C. S. Seok, M. H. Ryu, 2003, Proc. KSME Spring Annual Meeting(K. Y. Lee), Kor. Soc. Mech. Eng., Seoul, Korea, pp. 328~333.
- [10] T. H. Kim, J. H. Lee, H. Y. Lee, S. K. Cheong, 2010, An Area-Average Approach to Peening Residual Stress Under Multi-Impacts using a Three-Dimensional Symmetry-Cell Finite Element Model with Plastic Shots, Mater. Des., Vol. 31, No. 1, pp. 50~59.
- [11] SAE J442, 2004, Test Strip, Holder and Gage for Shot Peening, Society of Automotive Engineers, Inc.USA.
- [12] B. Baskaran, 2011, Numerical Simulation of Almen Strip Response Due to Random Impacts with Strain-Rate Effects, Int. J. Mech. Sci., Vol. 53, pp. 417~424.