

항공기 구조용 재료의 쇼트피닝에 의한 압축 잔류응력의 분포 특성

이환우[#], 박영수^{*}

Distribution Characteristics of Residual Compressive Stresses Induced by Shot-peening in the Aircraft Structural Material

Hwan Woo Rhee[#], Young Su Park^{*}

ABSTRACT

Residual stresses can have a significant influence on the fatigue lives of structural engineering components. For the accurate assessment of fatigue lifetimes a detailed knowledge of the residual stress profile is required. Significant advances have been made in recent years for obtaining accurate and reliable determinations of residual stress distributions. These include both experimental and numerical methods. The purpose of this study is to simulate peening process with the help of the finite element method in order to predict the magnitude and distribution of the residual stresses in accordance with the parameters, which are, e.g. shot velocity, shot diameter, shot impact angle, shot shape, distance between two impinging shots, and material parameters.

Key Words : Shot-peening(쇼트피닝), Fatigue crack(피로균열), Finite element analysis(유한요소해석), Elastic - plastic analysis(탄·소성해석), Residual compressive stress(압축잔류응력), Dent(압흔)

1. 서론

쇼트피닝이란 작은 쇼트 볼 입자를 피닝될 재료의 표면에 고속으로 충돌시켜 국부적인 소성변형을 유발시키는 표면 가공법으로서, 지난 50 여년 동안 기계요소 피로강도와 피로수명을 개선하기 위한 목적으로 자동차와 항공산업을 비롯한 제 산업분야에 광범위하게 활용되어 왔다. 이와 같이 산업현장에서 쇼트피닝이 주목되고 있는 까닭은- 대부분의 피로균열이 재료의 표면에서 발생되기 때문에- 표면에서의 균열발생과 초기 균열성장

억제시킬 수 있는 표면 가공법이 원리적인 면에서 가장 효과적인 피로특성 개선책으로 생각되고 있기 때문이다.^{1,2,9} 또한 쇼트 볼이 피닝될 재료에 투사되면 그 표면에 소성 변형층을 유발시키고 이 소성 변형층과 그 주변에 있는 탄성재료 사이의 상호작용에 의하여 잔류응력을 유발시키게 되며, 이와 같이 발생된 표면 근방의 압축 잔류응력이 피로강도와 피로수명 향상에 기여하는 것으로 알려져 있다.^{3,4} 그러나 재료에 쇼트피닝이 시행될 경우 위와 같은 압축 잔류응력을 유발시킬 뿐만 아니라, 부가적인 표면효과로서 가공경화와 상변

접수일: 2003년 6월 16일; 게재승인일: 2004년 3월 12일
교신저자, 경남대학교 기계자동차공학부
Email rhee@kyungnam.ac.kr Tel. (055) 249-2618
* 경남대학교 기계자동차공학부 대학원

화(Phase Transformation)를 수반하게 되고, 또한 피로균열의 발생과 초기 균열성장거동이 재료의 미세조직과 가공경화 상태에 의존하므로, 피닝된 재료의 피로특성과 쇼트피닝 효과를 검토할 경우에는 균열발생과 성장거동이 고려되어야 한다는 것에 유의할 필요가 있다. 이와 관련하여 지금까지 집적된 연구결과들을 검토해보면, De Los Rios¹ 등에 의해 지적되고 있는 바와 같이, 대부분의 경우에서 균열발생과 성장 측면이 간과되고 있으며, 실제로, 피로손상과 쇼트피닝의 영향을 검토한 연구결과 중에는 서로 상반된 견해를 피력하는 사례도 발표되고 있다.^{5,6} 따라서 일련의 본 연구에서는, 피로균열의 발생과 성장에 대한 쇼트피닝의 영향을 조사하기 위하여, 일차적으로 쇼트피닝에 의한 잔류응력의 분포 특성과 피닝 파라메타 사이의 관계를 검토해보기로 하였다.

2. 쇼트피닝에 의한 압흔과 잔류응력분포

구형 쇼트볼이 Fig. 1 과 같이 모재에 정적으로 접촉되었을 때, 쇼트볼의 반경 R 과 압흔 깊이 Z 및 접촉반경(Contact Radius) C_R 사이의 관계는 Z가 미소할 경우 다음과 같으며,

$$C_R^2 = 2RZ \tag{1}$$

쇼트볼에 의해 유발된 소성역의 깊이 h_p 와 압흔 깊이 Z 사이의 관계는 Al-Obaid⁸ 의 해석결과에 의해 다음과 같이 표시되고 있다.

$$h_p / R = 2.57(Z / R)^{1/2} \tag{2}$$

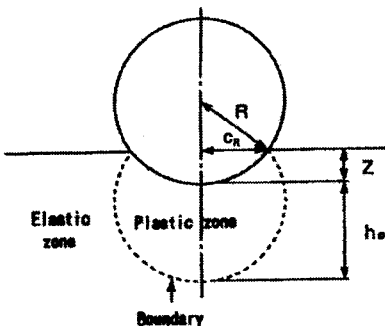


Fig. 1 Elastic-plastic boundary below contact zone

또한, 구형 강체 쇼트볼이 강소성(Rigid Plastic) 물체에 투사되었을 때, 쇼트볼에 대한 저항력을 평균압력 $\bar{p} = 3\sigma_Y$ (여기서 σ_Y : 항복강도)로 표시할 수 있다고 가정할 경우, 쇼트볼의 운동 방정식은 다음과 같으며,

$$m \, dv / dt = -\pi C_R^2 \bar{p} \tag{3}$$

여기서

$$m = 4/3 \rho \pi R^3 : \text{Mass of shot}$$

$$\rho : \text{Density of shot}$$

식(3)을 미소 압흔 깊이 $Z = C_R^2 / 2R$ 의 항으로 적분하면

$$Z / R = (2/3)^{1/2} (\rho V^2 / \bar{p})^{1/2} \tag{4}$$

여기서 V 는 초기 투사속도이고, $(\rho V^2 / \bar{p})$ 는 쇼트피닝 상태의 동적 상사성을 표시하는 무차원 수 (Nondimensional Number)이다.

이제, 정적시험에서 얻어진 것과 크기가 같은 동적 압흔은 같은 크기의 소성역을 유발시킨다는 전제하에서 (2)식과 (4)식을 조합하면 소성역의 깊이에 관한 유용한 방정식을 얻을 수 있다.

$$h_p / R = (2.57)(2/3)^{1/4} (\rho V^2 / \bar{p})^{1/4} \tag{5}$$

한편, Al-Obaid⁸ 는 쇼트피닝된 박판의 잔류응력 분포 $\sigma_R(z)$ 를 측정된 잔류응력 패턴을 이용하여 다음과 같이 정의하였다. 즉,

$$\sigma_R(z) = \sigma_b + \sigma_{ax} + \sigma_s \tag{6}$$

여기서 σ_b : Bending stress
 σ_{ax} : Axial stress
 σ_s : Source stress

위식에서, 굽힘 모멘트 M 을 받고 있는 폭 b 이고 두께가 h 인 보의 깊이 z 에서의 굽힘응력 σ_b 는 다음과 같으며,

$$\frac{12M}{bh^3} \left(\frac{h}{2} - z \right) \quad \text{where}$$

$$M = \int_0^{h_p} \sigma(z) \cdot \left(\frac{h}{2} - z \right) \cdot b \cdot dz \tag{7}$$

마찬가지로, 축응력 σ_{ax} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{ax} = \frac{F}{bh} \quad \text{where}$$

$$F = \int_0^{h_p} \sigma(z) \cdot b \cdot dz \quad (8)$$

또한, 식(7)과 식(8)을 $\sigma(z)$ 가 작용하는 전 영역 즉, $0 \leq z \leq h_p$ 에 걸쳐서 적분하면 굽힘응력 σ_b 와 축응력 σ_{ax} 는 각각 다음과 같으며,

$$\sigma_b = \frac{E \varepsilon_m 12(1-\alpha) \left(\frac{h}{2} - z\right) \lambda}{(1-\nu)\pi h} C_1 \quad (9)$$

$$\sigma_{ax} = \frac{E \varepsilon_m 2(1-\alpha)\lambda}{(1-\nu)\pi} C_2 \quad (10)$$

여기서

$$\lambda = \frac{h_p}{h}$$

$$C_1 = C_2 - 2\lambda + \frac{4\lambda}{\pi} (1-\alpha) \cos \frac{\pi \alpha}{2(1-\alpha)}$$

$$C_2 = 1 + \sin \frac{\pi \alpha}{2(1-\alpha)}$$

이와 같은 적분결과를 식(6)에 대입하면 쇼트피닝에 의한 잔류응력분포는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma_R(z) = \frac{E \varepsilon_m}{1-\nu} \left\{ \frac{12\lambda}{\pi h} (1-\alpha) \left(\frac{h}{2} - z\right) C_1 + \frac{2\lambda}{\pi} (1-\alpha) C_2 - \frac{\varepsilon(z)}{\varepsilon_m} \right\} \quad (11)$$

여기서

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_m \cos \pi \left[\frac{z - \alpha h_p}{2(1-\alpha)h_p} \right] \quad \text{for } 0 \leq z \leq h_p$$

$$\varepsilon_m = \frac{2}{3} \frac{\pi h \delta}{\lambda L^2 (1-\alpha) C_1}$$

δ : Arc Height

3. 유한요소해석

3.1 해석모델과 방법

본 연구에서는 Fig. 2(a)와 같이 수많은 쇼트볼이 피닝될 대상재료에 수직으로 투사되는 상황을 가정하였으며, 이와 같은 경우 대상재료의 중앙부에서는 그 경계의 영향을 무시할 수가 있을 것이므로,⁷ 유한요소해석시 쇼트볼이 대상재료에 투사되는 과정을 해석목적에 따라 Fig. 2(b)와 같이 대상재료의 중앙부에서 C×C×H 크기로 분할된 대칭셀(Symmetry Cell)에 한 개의 쇼트볼이 타격되는 단일 쇼트볼 모델과 여러 개의 쇼트볼이 순차적으로 타격되는 복수 쇼트볼 모델로 각각 모형화 하였다. 여기서 C는 인접 쇼트볼 사이의 간격을 표시하는 상수이고, H는 셀의 높이(H=4R, R: 쇼트볼의 반경)이다. 이상과 같이 설정된 모형의 유한요소모델링에는, 대칭 셀의 경우 쇼트볼이 타격되는 부분에는 정밀도를 고려하여 8 절점 직육면체(Brick) 요소를 이용하여 분할하고, 그 밖의 영역에는 사면체(Tetrahedral) 요소를 이용하였으며, 쇼트볼은 대칭 셀의 타격부위에 사용된 직육면체 요소를 이용하여 대칭 셀과 같은 밀도를 갖도록 분할하였다. 또한 연성재료를 대상으로 하는 쇼트피닝의 경우, 일반적으로 피닝될 재료에 비해 쇼트볼의 경도가 훨씬 크기 때문에 쇼트볼은 강체로 가정하였으며, 셀의 상면과 쇼트볼의 하반면은 접촉면(Contact Surface)으로 처리하여 쇼트볼이 대칭

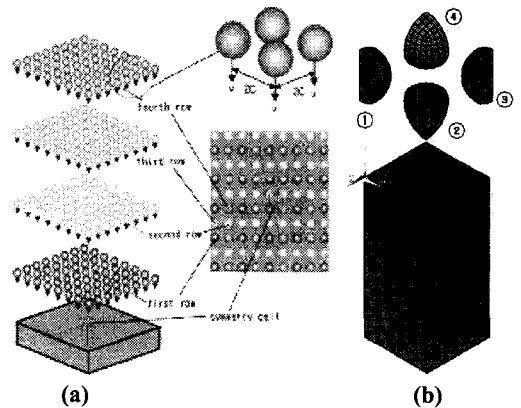


Fig. 2 Finite element model of multiple impingement of multiple shots: (a) full model, and (b) discretised symmetry cell

셀을 타격한 다음 그 내부로 파고들지 못하도록 하였다.

한편, 피닝될 대상재료로는 항공기 구조용 재료로 널리 활용되고 있는 Al 2024-T351 판재를 선정하였으며, 이 재료의 포아송의 비는 $\nu=0.33$ 이고, 다른 주요 기계적 성질은 Table 1 과 같다. 또한, 쇼트피닝 가공의 모델링과 유한요소해석에는 상용 유한요소 코드인 NE/NASTRAN 과 ANSYS 를 이용하여 동적 탄소성 해석을 수행하였다.

Table 1 Mechanical properties of the target material

Yield Strength (Mpa)	Ultimate Strength (Mpa)	Young's Modulus (Gpa)	Density (g/cc)	Elongation (%)
325	470	72.4	2.78	20

3.2 유한요소모델의 유용성

쇼트피닝 가공에 관여하는 변수들이 복잡하여 설정된 유한요소모델의 유용성을 직접 검증할 수가 없었으므로, 본 연구에서는 일차적으로 압흔 깊이 Z 에 대한 Al-Obaid⁸ 의 이론해석결과에서 얻어진 식(4)에 쇼트볼의 반경과 밀도, 속도 및 모재의 항복강도를 대입하여 계산된 이론치와 유한요소 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, 또한 쇼트볼과 피닝된 재료의 접촉반경에 대한 식(1)의 계산 결과를 재차 비교하여 유한요소해석결과의 유용성을 검토하였다.

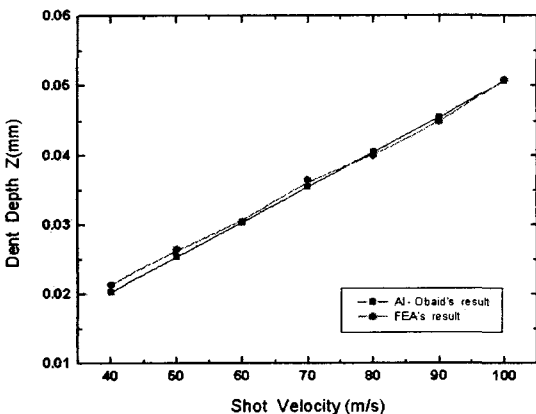


Fig. 3 Comparison between the dent depth obtained by the Al-Obaid's analysis and this FEA results

Fig. 3 과 Fig. 4 는 반경 $R=0.3$ mm 의 쇼트볼이 초고속도 $V=40\sim 100$ m/s 로 피닝 대상재료에 투사되었을 때 압흔 깊이 Z 와 접촉반경 C_R 에 대한 Al-Obaid 의 해석결과와 본 연구의 유한요소해석결과를 비교한 것으로서, 대체적인 경향은 타격속도의 증가와 더불어 쇼트피닝에 의한 압흔 깊이와 접촉반경도 점차 증대되는 양상을 보이고 있으며, 유한요소해석결과와 Al-Obaid 의 이론해석결과를 비교할 경우, 양자는 최대 5% 미만의 오차범위 내에서 서로 잘 일치함을 알 수 있었다.

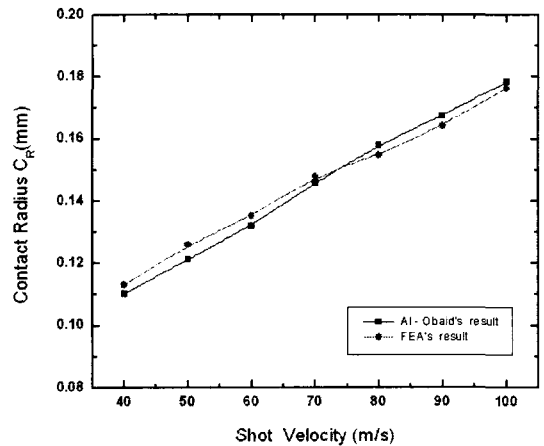


Fig. 4 Comparison between the contact radius obtained by Al-Obaid's analysis and this FEA results

4. 해석결과 및 고찰

4.1 투사속도의 영향

Fig. 5 는, 쇼트볼의 투사속도에 따른 잔류응력의 분포 특성을 검토하기 위하여, 쇼트볼의 투사속도를 $V=40, 50, 60, 70, 80, 90$ 및 100 m/s 와 같이 몇 단계로 변화시켜 깊이방향의 잔류응력분포를 해석하고 그 결과를 도시한 것이다.

이 결과에 의하면, 대체적인 잔류응력의 분포 패턴은 최대 압축잔류응력의 작용점을 변곡점으로 하여 그 크기가 점차 증가하다가 감소하는 곡선상으로 표시되었으며, 그 경향은 투사속도가 증가함에 따라 최대 압축잔류응력의 크기도 다소 증가하는 양상을 나타내었다. 또한 투사속도가 증가할수록 최대 압축잔류응력의 작용층이 표면으로부터 점차 내부로 이동하는 경향을 나타내었다.

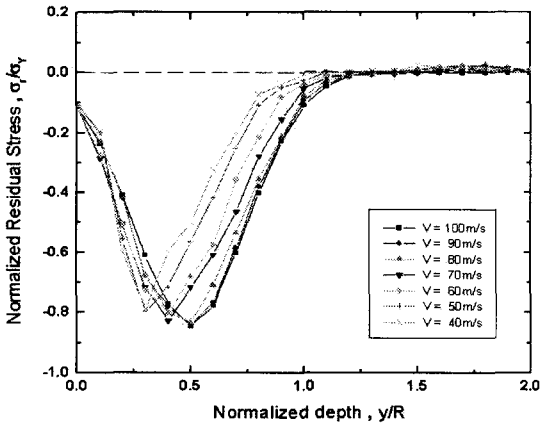


Fig. 5 Effect of shot velocity upon residual stress distribution for a shot radius $R=0.3$ mm

4.2 쇼트볼의 크기와 형상의 영향

Fig. 6 은, 쇼트볼의 크기가 잔류응력의 분포 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 쇼트볼의 반경을 각각 $R=0.3, 0.4, 0.5$ 및 0.6 과 같이 설정한 다음, 쇼트피닝에 의한 잔류응력 분포를 해석하고 그 결과를 도시한 것으로서, 이 결과에 의하면 최대 압축 잔류응력의 크기는 쇼트볼의 크기에 무관하게 거의 일정한 양상을 보이고 있으나, 쇼트볼의 반경이 커질 경우 최대 압축잔류응력이 작용하는 층의 깊이가 표면으로부터 점차 내부에 위치하는 양상을 나타내었다.

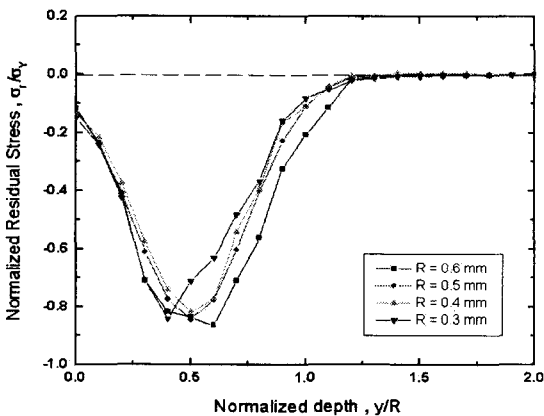


Fig. 6 Effect of shot size upon residual stress distribution beneath the center line of the shot for a $V=100$ m/s

Fig. 7 은, 쇼트볼의 형상이 잔류응력의 분포 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 수평축 방향의 지름이 a 이고 수직축 방향의 지름이 b 인 3 가지 유형의 타원형 쇼트볼이 피닝될 재료에 $V=100$ m/s 의 속도로 투사되었을 때, 각각의 경우에 대한 잔류응력의 분포를 해석하고 그 결과를 도시한 것으로서, 쇼트볼의 형상에 따른 잔류응력의 분포 특성은 원형 쇼트볼에 비해 그 종횡비 (Aspect Ratio)가 작은 $a/b=0.5$ 일 때 최대 압축 잔류응력의 크기가 상대적으로 큰 것을 알 수 있었으며, 또한 최대 압축 잔류응력의 작용층이 피닝 대상재료의 표면 근방으로 이동하는 경향을 나타내었다.

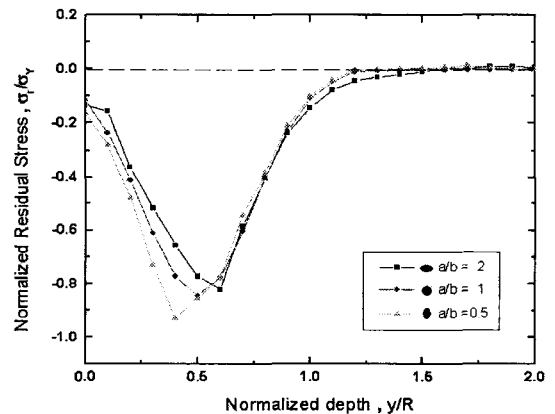


Fig. 7 Effect of shot shape upon residual stress distribution beneath the center line of the shot for $V=100$ m/s

4.3 두께의 영향

Fig. 8 은, 피닝 대상재료의 두께에 따른 잔류응력의 분포 특성을 조사하기 위하여, 쇼트볼의 반경을 기준으로 한 대상재료의 두께를 $t=2R, 3R, 4R$ 및 $5R$ 과 같이 4 단계로 설정한 다음, 쇼트피닝에 의한 잔류응력 분포를 해석하고 그 결과를 도시한 것이다.

이 결과에 의하면 피닝 대상재료의 두께가 증가할 경우 최대 압축잔류응력의 크기가 다소 증가하는 양상을 보이고 있으나, 피닝 대상재료의 두께가 달라지더라도 최대 압축잔류응력이 작용하는 층의 위치는 $y/R=0.5$ 로 모두 일정하였다. 이와 같은 현상은, 쇼트볼과 피닝된 재료의 접촉면 하부

에 생성된 소성역의 깊이 h_p 에 관한 식(5)에서 알 수 있는 바와 같이, 쇼트볼의 반경 R 과 ρ , V 및 \bar{p} 가 변하지 않는 한, 피닝 대상재료의 두께가 달라지더라도 접촉면 하부에 생성된 소성역의 크기가 변하지 않기 때문이라고 할 수 있으며, 이러한 특성은 유사한 문제에 대한 Al-Obaid⁸의 이론해석결과와 비교할 경우, 양자가 서로 잘 일치하였다.

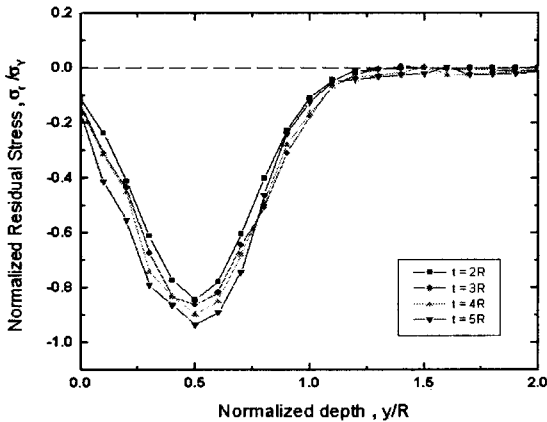


Fig. 8 Effect of the target material thickness upon residual stress distribution for a $R=0.3$ mm and $V=100$ m/s

4.4 마찰의 영향

쇼트피닝에 의한 소성 변형률과 잔류응력의 분포에 대한 계면마찰(Interfacial Friction)의 영향을 검토하기 위하여, 쇼트볼과 피닝 대상재료의 접촉면 마찰계수를 각각 $\mu=0.0, 0.1, 0.25$ 및 0.5 와 같이 설정한 다음, 소성 변형률과 잔류응력 분포를 해석하고 그 결과를 각각 Fig. 9(a), (b)에 도시하였다.

Fig. 9(a), (b)에서 소성 변형률과 잔류응력의 분포에 대한 마찰의 영향은 주로 피닝 대상재료의 표면 근방에 국한되며, 무차원 깊이가 $y/R=0.75$ 이상이 되면 마찰의 영향은 거의 무시할 수 있을 만큼 미소하였다. 또한 쇼트볼과 피닝 대상재료의 접촉면 마찰은 피닝 대상재료의 표면에서 소성 변형률의 크기를 감소시키는 반면에 압축 잔류응력의 크기를 미소하게나마 증가시키는 것을 알 수 있었다. 그러나 마찰계수가 $0.25 \leq \mu \leq 0.5$ 이 되면 소성 변형률과 잔류응력의 분포는 마찰계수의 크기에 상관없이 거의 일정하였다.

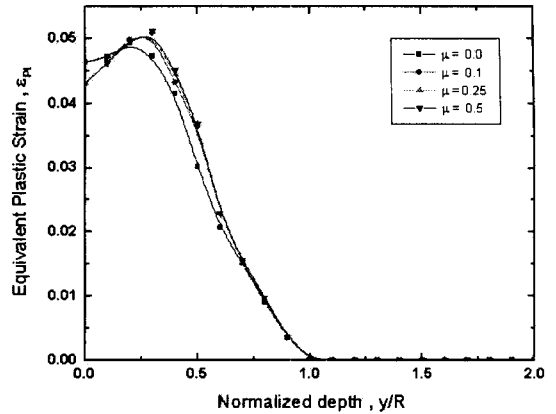


Fig. 9(a) Effect of friction upon equivalent plastic strain versus normalized depth along the centerline of the shot

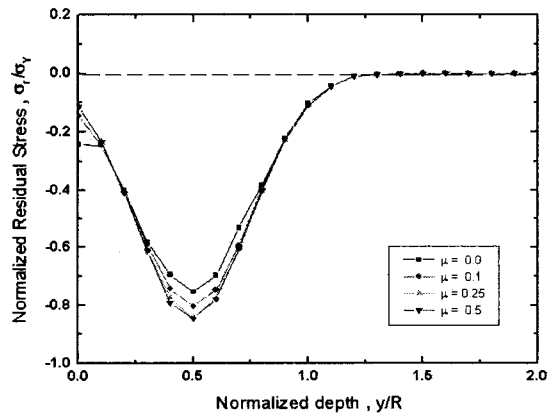


Fig. 9(b) Effect of friction upon residual stress versus normalized depth along the centerline of the shot

4.5 인접 쇼트볼 간격의 영향

인접 쇼트볼 사이의 간격이 쇼트피닝에 의한 소성 변형률과 잔류응력의 분포 특성에 미치는 영향을 검토하기 위하여, 4 개의 쇼트볼이 $10\mu s$ 의 간격으로 대칭 셀에 순차적으로 투사되는 복수 쇼트볼 모델을 설정한 다음(Fig. 2 참조), 쇼트볼의 반경을 기준으로 한 인접 쇼트볼 사이의 간격이 $C/R=1.0, 1.5$ 및 2.0 일 때, 쇼트볼의 중심선이 통과하는 면 A-A 와 그로부터 각각 $C/2$ 및 C 만큼 떨어져 있는 면 B-B, C-C 에서의 소성 변형률과 잔

류응력의 분포를 해석하고, 그 결과를 Fig. 10(a), (b), (c) 및 Fig. 11(a), (b)에 도시하였다.

이 결과에 의하면, 여러 개의 쇼트볼이 순차적으로 피닝될 재료에 투사됨에 따라 제하 잔류응력장(Unloading Residual Stress Fields) 사이의 간섭을 유발시키게 되며, 또한, 이와 같은 제하 잔류응력의 간섭효과(Interaction Effect)는 단일 쇼트볼 모델에 비해 일반적으로 훨씬 균일한 소성 변형률과 잔류응력의 분포를 유발시키게 될 것이므로, 피닝된 재료의 표면으로부터 y/R 로 표시되는 특정 층

에 위치한 A-A, B-B 및 C-C에서의 소성 변형률과 압축 잔류응력의 크기를 서로 비교해보면, 비록 제한된 해석결과이기는 하지만, 인접 쇼트볼 사이의 간격이 작으면 작을수록 관찰 대상으로 선정되면 A-A, B-B 및 C-C 사이의 소성 변형률과 잔류응력의 편차가 점점 작아지는 경향을 보이고 있다. 따라서 인접 쇼트볼 사이의 간격이 조밀해지면 조밀해질수록 쇼트피닝에 의한 소성 변형률과 압축 잔류응력의 분포는 점차 균일해지는 것을 알 수 있다.

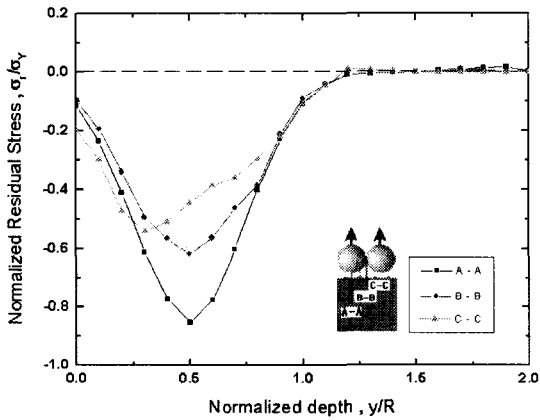


Fig. 10(a) Effect of separation distance upon residual stress contours for a $C/R=1.0$, $R=0.3$ mm, and $V=100$ m/s

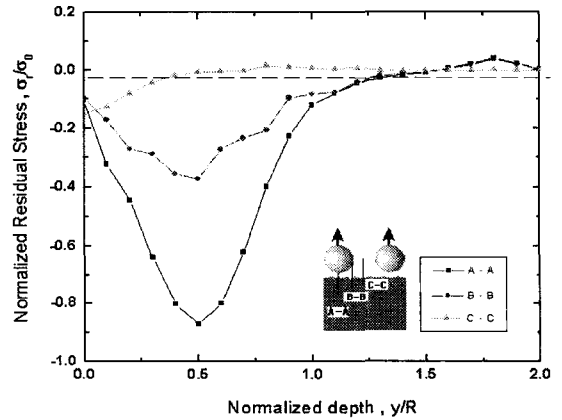


Fig. 10(c) Effect of separation distance upon residual stress contours for a $C/R=2.0$, $R=0.3$ mm, and $V=100$ m/s

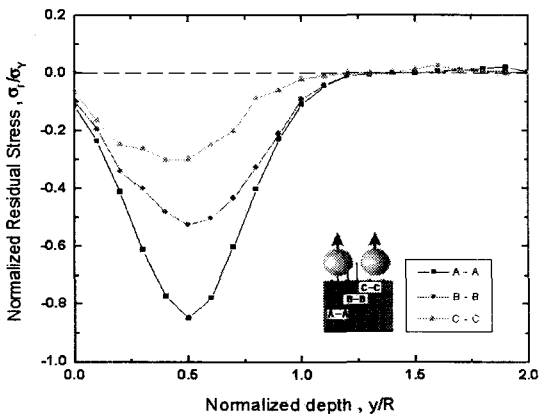


Fig. 10(b) Effect of separation distance upon residual stress contours for a $C/R=1.5$, $R=0.3$ mm, and $V=100$ m/s

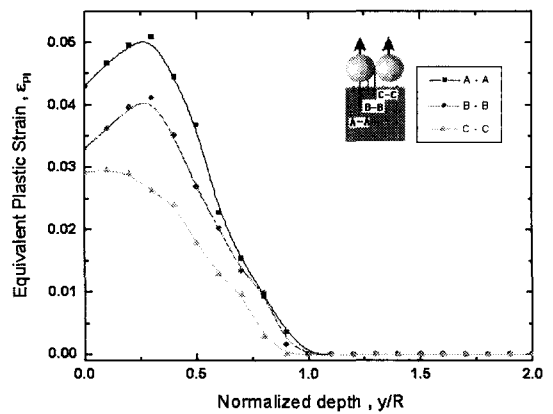


Fig. 11(a) Effect of separation distance upon equivalent plastic strain contours for a $C/R=1$, $R=0.3$ mm, and $V=100$ m/s

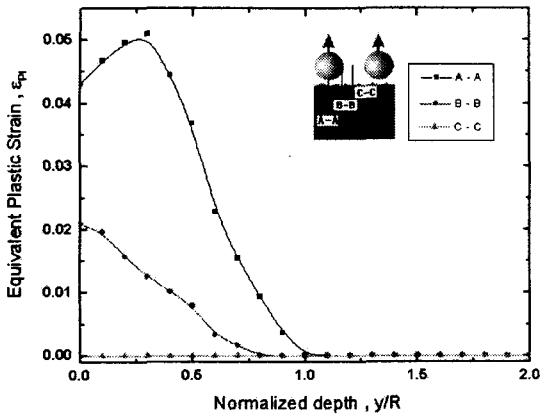


Fig. 11(b) Effect of separation distance upon equivalent plastic strain contours for a $C/R=2$, $R=0.3$ mm, and $V=100$ m/s

5. 결론

쇼트피닝 가공을 시뮬레이션하기 위하여 다양한 피닝 파라메타들을 변수로 설정한 다음, 동적 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 쇼트피닝에 의한 잔류응력의 분포는, 쇼트볼의 투사속도가 $V=40$ m/s 에서 100 m/s 까지 증가함에 따라 최대 압축잔류응력의 크기도 점차 증대되는 것을 알 수 있었으며, 또한 최대 압축잔류응력의 작용층이 표면으로부터 $y/R=0.5$ 근방으로 이동하는 것을 알 수 있었다.
2. 잔류응력의 분포패턴은 쇼트볼의 크기에 의존하지 않으나, 쇼트볼의 반경이 커질 경우 최대 압축잔류응력의 작용층이 표면으로부터 점차 내부에 위치하였다.
3. 쇼트볼의 형상이 비원형일 경우, 원형에 비해 그 종횡비가 작은 $a/b=0.5$ 일 때 최대 압축잔류응력의 크기가 상대적으로 큰 것을 알 수 있었으며, 또한 최대 압축잔류응력의 작용층이 피닝 대상재료의 표면에 근접하는 경향을 나타내었다.
4. 피닝 대상재료의 두께에 따른 잔류응력의 분포 특성은 두께가 두꺼울수록 최대 압축잔류응력의 크기는 다소 증가하였으나, 그 작용층의 위치는 대상재료의 두께에 무관하게 거의 일정하였다.
5. 쇼트볼과 피닝 대상재료의 접촉면 마찰은, 피닝 대상재료의 표면에서 소성 변형률의 크기를 감

소시키는 반면에 압축 잔류응력의 크기를 미소하게나마 증가시키는 것을 알 수 있었으며, 두께방향의 무차원 깊이가 $y/R=0.75$ 이상이 되면 마찰의 영향은 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 또한, 마찰계수의 크기가 $0.25 \leq \mu \leq 0.5$ 의 범위에서는 마찰계수의 크기에 무관하게 소성 변형률과 잔류응력의 분포가 일정한 것을 알 수 있었다.

6. 인접 쇼트볼 사이의 간격에 따른 소성 변형률과 잔류응력의 분포 특성은 쇼트볼 사이의 간격이 변화되어도 소성 변형률과 잔류응력의 분포 패턴은 변하지 않으나, 쇼트볼 사이의 간격이 조밀해질수록 잔류응력의 분포가 점차 균일해지는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 경남대학교 학술 장려금의 지원으로 수행된 연구결과의 일부이며, 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. De Los Rios, E.R., Trull, M. and Levers, A., "Modelling Fatigue Crack Growth in Shot-peened Components of Al 2024-T351," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 23, pp. 709-716, 2000.
2. Meguid, S.A., Shagal, G., Stranart, J.C., Daly, J., "Three-dimensional Dynamic Finite Element Analysis of Shot-peening Induced residual Stresses," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 31, pp. 179-191, 1999.
3. Kobayashi, M., Matsui, T. and Murakami, Y., "Mechanism of Creation of Compressive Residual Stress by Shot Peening," *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No. 5, pp. 351-357, 1998.
4. Schiffner, K., Droste, Gen., Helling, C., "Simulation of Residual Stresses by Shot Peening," *Computers & Structures*, Vol. 72, pp. 329-340, 1999.
5. Song, P.S., Wen, C.C., "Crack Closure and Crack Growth behavior in Shot Peened Fatigue Specimen," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, pp. 295-

- 304, 1999.
6. De Los Rios, E.R., Walley, A., Milan, M.T. and Hammersley, G., "Fatigue Crack Initiation and Propagation on Shot-peened Surface in 316 Stainless Steel," *Int. J. Fatigue*, Vol. 17, pp. 493-499, 1995.
 7. Meguid, S.A., Shagal, G., Stranart, J.C., "3D FE Analysis of Peening of Strain-rate Sensitive Materials using Multiple Impingement Model," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, pp. 119-134, 2002.
 8. Al-Obaid, Y.F., "A Rudimentary Analysis of Improving Fatigue Life of Metals by shot-peening," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, pp. 307-312, 1990.
 9. Lyu, Sung-Ki, Jeon, Hyung-Ju, Moon, Bong-Ho, "A Study on the Effect of Shot Peened Treatments on the Strength of Carburized Gears," *J. of KSPE*, Vol.14, No. 9, pp. 61-67, 1997.