

Shot peening 가공에 의한 노치재의 응력분포와 피로강도의 개선

이 승 호*, 김 회 송**

The Stress Distribution and Improvement of Fatigue Strength for Notched Materials by Shot Peening

Seung-Ho Lee*, Hei-Song Kim**

Abstract

Second step shot peening was applied on both smooth specimen and U-notch specimen in order to investigate the stress distribution and the improvement in fatigue strength.

Various experiments and measurements such as rotary bending fatigue test and the measurement of compressive residual stress were performed.

The results showed that the fatigue strength of second step shot peened specimens increased by 34 percent compared to that of unpeened ones.

Compressive residual stress also considerably increased, which resulted in the increase of fatigue strength. Finite element analysis showed that shot peening is effective in decreasing the bending stress by external force.

The effectiveness of shot peening in reducing the compressive residual stress was anticipated by the superposition of the concentrated stress and the compressive residual stress.

Keywords : Shot Peening(샷피닝), 2-step Shot Peening(2단 샷피닝), U-notch(U-노치), Fatigue Strength(피로강도), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Stress Concentration(응력 집중), Stress Distribution(응력분포)

1. 서 론

* 단국대학교 대학원

** 단국대학교 기계공학과

최근 기계, 구조물에 대한 대형화, 고속화 및 경량화, 고강도화가 필요하게 되고 높은 피로강도 특성의 요구가 증가되고 있다.

기계부품, 수송기계류, 구조물 등에서 일어나는 파괴는 나사, 키홈, 구멍 등 그 부재의 단면이 변화하는 노치 부분에서 응력집중(stress concentration)이 발생하고, 특히 노치의 존재에 따라서 얼마나 응력이 집중하는가 하는 것은 피로문제를 취급함에 있어 매우 중요하다.⁽¹⁾ 또한 노치부에서는 정적 하중과 동적인 하중을 받는데, 후자에 의한 파괴가 대부분을 차지한다.

피로강도를 증가시키는 방법으로 기존의 재료를 효과적으로 그리고 손쉽게 원하는 성능과 수명을 유지하도록 하기 위해서 여러 가지 열처리 및 표면처리 방법 등이 제시되고 있다. 표면경화법에는 침탄법, 질화법, 고주파 열처리법, 샷피닝 등이 있으며, 샷피닝은 피로강도 및 수명향상에 있어서 대단히 중요하다.⁽²⁾⁽³⁾ 이들 중에서 경제성의 측면과 피로수명 향상의 관점에서 보면 샷피닝(shot peening)은 우수한 표면가공 방법이라 할 수 있다.

샷피닝에 대한 연구는 1940년대에 자동차 및 항공기 분야에서 시작되어 실용화되기 시작하였으며, 최근에는 피로강도의 최적화라는 관점에서 재료에 가장 적합한 샷피닝 조건을 선택하려는 연구가 많이 진행되고 있다.⁽⁴⁾

Verpoort와 Gerdes⁽⁵⁾는 샷볼(shot ball)이 재료에 가하는 투사 에너지를 변화시키면서 샷볼의 질량, 속도, 투사량을 변경하여 시험한 결과 샷피닝할 때 에너지가 높은 것만이 좋은 것은 아니고 적절한 샷피닝조건을 가지는 것이 좋다는 연구를 하였다. 피로수명에 중요한 영향을 미치는 잔류응력은 다양한 샷피닝의 실시조건과 부재의 기계적 특성 등에 의하여 분포형태가 변화되므로, 기계구조물의 설계능력 및 내구성 향상에 있어서 대단히 중요하다.⁽⁶⁾ Iida, Tosha⁽⁷⁾와 Lyu 등⁽⁸⁾의 연구에서 샷피닝 처리한 후에 최대 압축잔류응력(compressive residual stress)을 극표면으로 노출시키기 위해 표면연마(polishing) 처리를 하여 피로강도와 균열 진전을 연구하여 표면연마 후 최대 압축 잔류응력 층을 표면으로 노출시킬수록 피로 강도와 수명이 증가됨을 보고하였다.

또한, 노치부에서의 응력집중에 따른 Akber⁽⁹⁾의 연구에서는 응력집중계수에 의한 노치재의 피로시험을 연구한 결과 샷피닝의 효과가 있음을 보고하였고, Fuchs⁽¹⁰⁾에 의한 연구결과 압축잔류응력에 의하여 노치부에서 샷피닝의 효과가 있는 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 피로강도를 향상시키는 가공방법으로 2

단 샷피닝을 적용하였으며, 평활재와 U-노치재 시험편에 대한 회전굽힘 피로시험을 행하고, 유한 요소 해석(finite element analysis)과 압축잔류응력 등을 측정하여, 샷피닝 가공에 따른 노치재의 응력분포와 피로강도 등에 대하여 고찰하였다.

2. 시험방법

2.1 재료 및 시험편

사용된 재료는 스프링강(SAE9254)을 열처리한 것으로 이의 화학적성분 및 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 열처리 조건은 880℃에서 30분간 가열한 후 유중에서 담금질하여 마르텐사이트 조직을 얻었다. 이 시험편을 다시 420℃로 70분간 뜨임하여 담금질로 얻어진 조직을 안정화하고, 스프링에 필요한 탄성 한도를 확보하기 위하여 슬라이트 조직이 되도록 열처리하였다.

Table 1 Chemical composition of SAE9254 (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr
SAE9254	0.55	1.36	0.7	0.01	0.02	0.68

Table 2 Mechanical properties

SAE9254	Tensile strength σ_t (MPa)	Elongation (%)	Area reduction (%)
Base material	1421	7.0	15
Heat treated	1729	9.4	36

인장시험편은 KS B0801규격의 제4호 시험편을 사용하였고, 시험편은 부하방향이 압연방향에 평행하도록 채취하였다. S-N 곡선을 얻기 위한 피로시험편은 인장 시험편과 동일한 방향으로 채취하였으며, Fig. 1과 같이 평활재와 U-노치재의 시험편을 준비하였다.

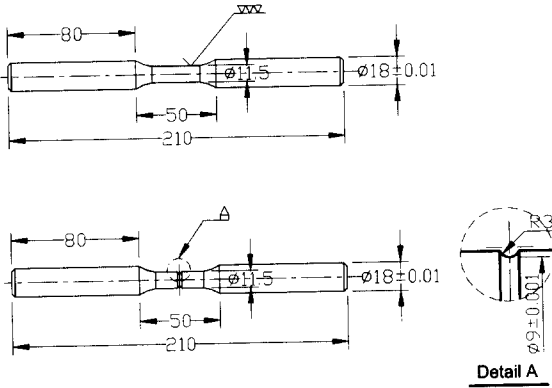


Fig. 1 Shapes and dimensions of smooth and U-notched specimens

2.2 슛피닝 가공

스�피닝 가공은 임펠러의 원심력을 이용하는 기계식 슛피닝기를 이용하였다. 본시험에 사용된 슛피닝의 공정도는 Fig. 2와 같다.

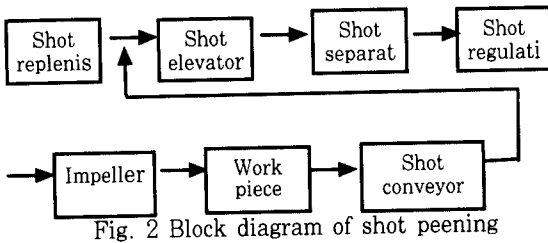


Fig. 2 Block diagram of shot peening

스�피닝은 지름 0.8mm 슛볼을 투사하여 1차 가공을 한 후, 지름 0.6mm의 슛볼로 투사하여 2단으로 처리하였으며, 가공 조건은 Table. 3과 같다. 슛피닝의 강도는 알멘게이지로 측정하였다. 사용된 시험편은 알멘스트립(almen strip) A형이며 1단에서 0.375 mm의 아크하이트(arc height)를 얻었으며, 2단에서는 0.42 mm의 아크하이트를 얻었다. 또한 커버리지(coverage)는 1단에서는 85%, 2단에서는 98%로 나타났다.

Table 3 Conditions of shot peening

condition \ step	1-step	2-step
Shot ball	cut wire (HSW 3)	cut wire (HSW 3)
Diameter	0.8 mm	0.6 mm
Impeller diameter	490 mm	360 mm
rpm	2,200 rpm	3,000 rpm
Time	24 sec	600 sec

2.3 시험방법

인장시험은 ASTM E8 규정에 의거하여 시행하였으며 크로스헤드(crosshead)의 속도는 3mm/min으로 하였다. 변형률의 측정은 게이지길이(gauge length) 50mm의 변위신장계(extensometer)를 이용하여 연속적으로 하였고, 경도측정은 마이크로 비커스 경도계(MOK-E3)를 사용하여 측정하였다. 회전굽힘 피로시험은 오노식 시험기를 사용하여 항복응력의 30%~70% 범위 내에서 시험하였다.

시험편의 잔류응력분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력측정기(RIGAKU-MSF-2M)를 사용하였으며, Table 4와 같은 X-선 측정 조건으로 압축잔류응력을 측정하였으며, 이때 계산법은 $2\theta - \sin^2\psi$ 법을 이용하였다. 측정은 잔류응력을 측정하고자하는 부위의 두께를 측정하고, 두께가 측정된 부위에서 표면층의 잔류응력을 측정한 후, 전해연마를 실시하며 반복하여 시험편의 표면부에서 중심부로 0.3mm까지 측정하였다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray diffraction	Condition	
	Target	Cr-V
X-Ray source	Voltage	30 kV
	Current	10 mA
	ψ	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$
2θ	$140^\circ \sim 170^\circ$	
Diffraction	Scintillation counter	

3. 시험결과 및 고찰

3.1 기계적 성질의 변화

스�피닝 가공 후의 기계적 성질의 변화는 Table 5에 나

타넨바와 같이 큰 변화가 없었다. Fig. 3은 시험편의 단면을 채취하여 열경화성 수지에 고정하고 연마, 폴리싱하여 시험편의 표면에서부터 깊이방향으로 측정하였다. 그림에서와 같이 경도의 변화는 표면에서 약간의 증가를 보이고 있으나, 전체적으로는 변화가 거의 없었다.

Table 5 Material properties after shot peening

SAE9254	Tensile strength σ_t (MPa)	Elongation (%)	Area reduction (%)
Heat treated	1729	9.4	36
1-step peened	1736	10.1	37
2-step peened	1743	9.2	36

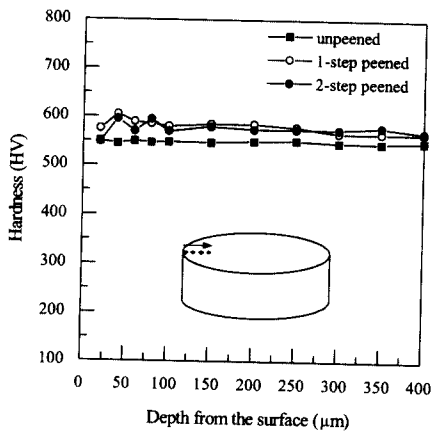


Fig. 3 Hardness distribution produced by shot peening

3.2 슛피닝에 의한 잔류응력의 분포

Fig. 4는 X-선 잔류응력측정기⁽¹¹⁾로 측정한 잔류응력의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 ■점은 슛피닝 가공하지 않은 시험편을 나타냈고, ○점은 지름 0.8mm의 슛볼로 1단 가공한 시험편의 잔류응력을 나타내고 있으며, ●점은 지름 0.6mm의 슛볼로 2단 처리된 시험편의 잔류응력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시험편의 표면에서 0.3mm까지 측정된 결과, 최대 압축잔류응력은 1단의 경우 0.1mm에서 737MPa, 2단의 경우 0.13mm

에서 792MPa로 측정되었다. 그러나 시험편 표면에서의 압축잔류응력은 1단에서는 533MPa, 2단에서는 600MPa로 약 13% 개선됨을 알 수 있다.

Akira Tange⁽¹²⁾ 등은 극 표면에 압축잔류응력의 값이 증가할수록 재료의 피로강도가 증가됨을 보고하고 있다. 이의 연구에 의하면 재료의 피로수명은 균열이 표면에서 압축잔류응력이 최고로 되는 위치까지 전파하는 동안에 대부분을 차지하므로, 극 표면의 압축잔류응력이 클수록 피로수명의 향상은 크다. 따라서 압축잔류응력의 생성이 극표면에서 최대가 되도록 가공조건을 2단 슛피닝으로 처리하는 것이 바람직 할 것으로 예상된다.

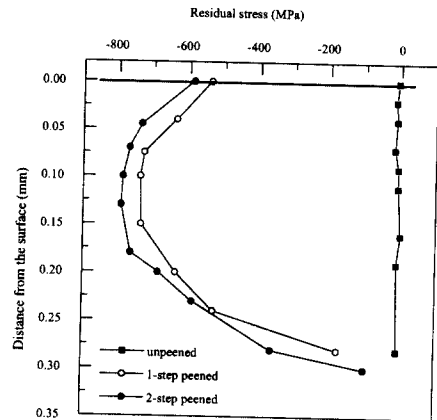


Fig. 4 Residual stress distribution produced by shot peening

3.3 S-N곡선에 의한 피로강도 평가

회전 굽힘 피로 실험을 통하여 피로강도를 측정하였다. Fig. 5는 평활재 시험편에 대한 S-N 곡선이며, Fig. 6은 U-노치재 시험편의 S-N 곡선이다. 그림에서와 같이 슛피닝 가공한 재료는 가공하지 않은 재료보다 피로강도의 향상이 큼을 알 수 있다. 이는 슛피닝 가공에 의하여 생성된 압축잔류응력이 시험편에 가해지는 인장응력을 완화시키며, 초기 균열 전파속도를 지연시켜 피로 강도가 향상되는 효과가 있기 때문이다. 또한 표면의 압축잔류응력이 더 높은 2단 슛피닝의 경우 1단 슛피닝에 비해서 피로 강도가 향상되었다.

피로강도의 향상을 알아보기 위하여 S-N 곡선으로부터

얻은 피로강도를 슷피닝 가공하지 않은 시험편의 피로강도로 노말라이즈(normalize)화하여 간단히 나타냈으며, Fig. 7과 같다. 슷피닝 가공된 평활재에서는 1단의 경우 1.6배, 2단의 경우 1.8배로 피로강도가 증가되었으며, U-노치재의 경우에서도 1단에서 1.2배, 2단에서 1.3배 피로강도가 증가되었다.

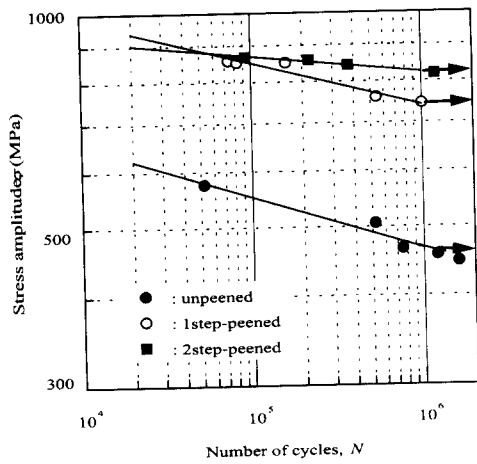


Fig. 5 S-N curve of smooth specimen

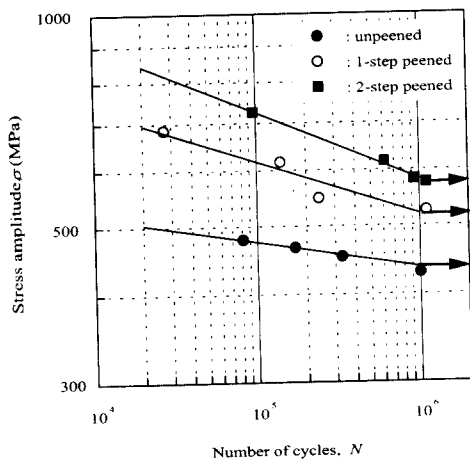


Fig. 6 S-N curve of U-notched specimen

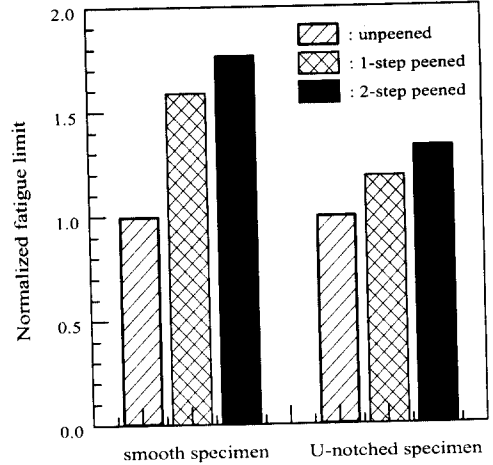


Fig. 7 Comparison of normalized fatigue limit

3.4 노치부의 응력분포 해석

노치를 갖는 재료는 응력이 집중되어 피로파괴가 노치 부분에서 발생하게 되므로 2단 슷피닝 가공함으로써 피로강도의 저하를 막을 수 있다. Fuchs⁽¹⁰⁾는 응력집중을 받는 노치부분에 대해서 피로수명에 미치는 압축잔류응력의 영향을 연구하여 노치부에서도 효과를 가지고 있음을 증명하였다. 또한, Nelson⁽¹³⁾은 압축잔류응력이 피로 균열의 진전에 미치는 영향을 연구하여 압축잔류응력이 표면에서 발생하는 초기 균열을 지연시킴을 확인하였다.

Fig. 8은 평활재에 굽힘 모멘트(M)가 작용할 때의 응력분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 점선부는 슷피닝 하지 않은 시험편의 굽힘 하중선도를 나타내며, 표면에서 굽힘 응력(bending stress)이 최대 또는 최소값을 갖게 된다. 실선부는 Fuchs⁽¹⁰⁾와 Nelson⁽¹³⁾이 적용한 방법에 따라 슷피닝하지 않은 시험편의 굽힘 응력에 시험편의 압축잔류응력을 중첩한 응력값이다. 그림에서 A부분은 인장력이 작용하는 부분이며, B부분은 압축력이 작용하는 부분이다. 인장력이 작용하는 부분에서는 압축잔류응력에 의해서 표면부에서 인장력이 감소하며, 압축응력을 받는 부분에서는 압축력이 더 증가함을 볼 수 있다. 표면부에서 인장력의 감소는 표면부에서 발생하는 피로 균열의 성장을 지연시키게 된다.

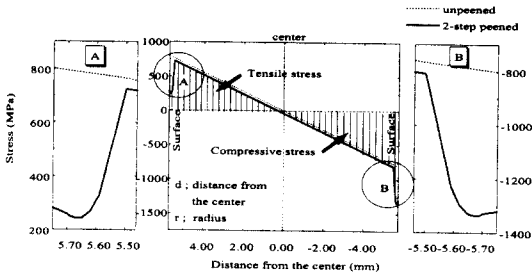


Fig. 8 Stress distribution of shot peened smooth specimen under bending stress

평활재 시험편에서 적용한 이론을 바탕으로 응력 집중 (stress concentration)을 받는 U-노치 시험편에 대해서 알아보았다. 먼저 U-노치된 부분을 유한요소법으로 모델링하여 시험편의 노치부에 작용하는 응력 집중 값을 계산하여 적용하였다. 요소(element)의 형상은 Fig. 9와 같으며 사용된 요소는 8절점 등대개요소(8-node 2D structural solid element)를 사용하였다. Fig. 10은 U-노치 시험편에 대해 굽힘 응력을 작용시키고 압축잔류응력 값을 중첩한 최종 응력 선도이다. 그림에서 A부분은 인장력을 받는 부분에 대한 압축잔류응력의 효과를 나타내며, B부분은 압축력을 받는 부분의 압축잔류응력의 효과를 나타낸다. 그림에서와 같이 극표면에서는 샷피닝의 결과로 굽힘응력이 상당히 감소하는 경향을 보였다. 노치재에서도 평활재와 같이 샷피닝에 의한 압축잔류응력의 효과가 있음을 이론적으로 알 수 있었다.

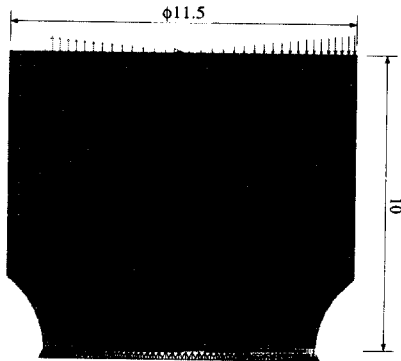


Fig. 9 Finite element modeling of U-notched specimen

또한 Fig. 10에서 1단과 2단 샷피닝을 비교해 볼 때 압축잔류응력 값이 더 큰 2단 샷피닝이 노치부에서도 좋은 효과를 나타내었다. 실제로 많은 구조물들은 여러 가지 형상을 가진 노치부가 많이 존재하며, 대부분의 피로 균열은 노치부에서부터 발생한다. 만일 노치부에 미리 압축잔류응력을 내재시킨다면, 노치 부분에서 발생하는 응력집중을 완화시켜 피로 수명이 증가한다.

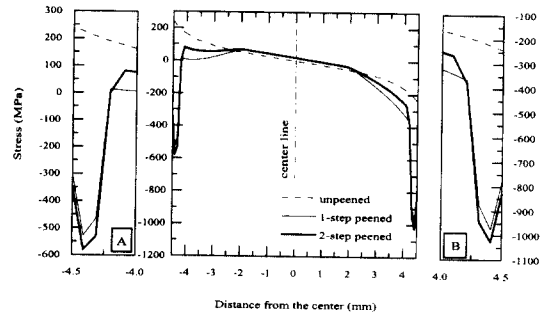


Fig. 10 Stress distribution of shot peened U-notched specimen under bending stress

4. 결론

본 연구에서는 노치재의 피로강도와 응력분포를 살펴보기 위하여 회전 굽힘 피로시험과 응력해석을 하였다. 시험편에 2단 샷피닝 가공을 하고 압축잔류응력, 피로강도, 응력해석 등을 검토하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 노치재에서 샷피닝 가공하지 않았을 때의 피로강도는 430MPa이고, 2단 샷피닝 가공시에는 576MPa로 증가되어 약 1.3배가 향상되었다.
2. 압축잔류응력이 극표면에서 샷피닝하지 않은 재료에서는 7.9MPa로 형성되었고, 2단 샷피닝에서는 588.0 MPa로 나타났다.
3. U-노치 시험편의 응력 집중부에서 유한요소해석에 의한 굽힘응력과 샷피닝에 의한 압축잔류응력을 중첩한 결과 응력집중이 감소하였다. 샷피닝에 의한 응력집중 감소는 피로강도 향상 요인으로 작용하였다.

참고 문헌

1. 構堀武夫 外 7人, 金屬 材料の強度と破壊, 日本金屬學會 強度委員會編, 丸善, pp.323~339, 1964.
2. Xenophon J. K., "Shot Peening Viable Method to Extending Component Life," SAE Technical Paper Series 891932, pp.1~8, 1989.
3. 社團法人 日本ばね工業會 ばね技術研究會., "Study on the Shot Peening Small Springs Relation between Processing Condition and Improvement of Fatigue Strength," ばね論文集, 제 27호, pp.73~108, 1982.
4. K. Yozo, T. Shinzaburo, K. Masaki, "Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Alloy at Elevated Temperatures," Journal of The Society of Materials Science in Japanese, Vol. 45, No. 1, pp.43~47, 1996.
5. C.M. Verpoort, C. Gerdes, "Influence of Shot Peening on Material Properties of Turbin Blades", Shot peening theory and application, IITT-International, France, pp.11~70, 1989.
6. 이종규, 김정규, "피로강도 및 수명에 미치는 Shot Peening에 의한 잔류응력의 영향," 대한기계학회 논문집, 제 21권, 제9호, pp.1498~1506, 1997.
7. K.Iida, K.Tosha, "Fatigue Strength and Residual Stress Distribution of the Work-softened steel by Shot Peening", 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, pp.233~242, 1990.
8. S.K. Lyu, G. Deng, M. Kato, "Effect of Surface Treatment on the Strength of Carburized Gear," A.P.C.F.C '96, pp.161~166, 1996.
9. J.A. Akber, S.Kyriacou, A.M. El-Zafrany, "Effect of Shot Peening on the Fatigue Life of Axially Loaded Notched Components," 5th International Conference on Shot Peening, pp.349~358, 1993.
10. H.O. Fuchs, "Approximate Analysis for Optimizing Prestress Treatments," ASTM STP 1004, pp.13~20, 1988.
11. Rira-Ku, X-ray Stress Analyzizer Manual, pp.9~17, 1991.
12. Akira Tange, Noritoshi Takamura, "Relation between Shot-peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation Life in Spring steel," 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, pp.243~253, 1990.
13. D.V. Nelson, "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation," Residual Stress Effect in Fatigue, ASTM STP 776, American Society for Testing and Materials, pp.172~194, 1982.