

온간 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력의 변화

이승호^{a*}, 심동석^a, 김기전^b

^a경기공업대학 정밀계측과, ^b대원강업(주) 기술연구소

The Improvement of Compressive Residual Stress by Warm Shot Peening

Seung-Ho Lee^{a*}, Dong-Suk Shim^a, Gi-Jeon Kim^b

^aDepartment of Automobile, Kyonggi Institute of Technology, Shihung-City, Kyonggi-Do, Korea

^bDaewonkangup, Gajwa-Dong, Seo-Gu, Incheon-City, Korea

(Received 15 August 2004 ; accepted 4 October 2004)

Abstract

The requirements of getting spring steel with higher fatigue strength have been increased to achieve the weight reduction of a vehicle. As the possible increment in fatigue strength by using the conventional shot peening treatment is found to be limited, it is necessary to modify the shot peening treatment. In this study, to investigate the effects of warm shot peening on increasing fatigue strength, tests are conducted on spring steel SAE9524. By the results of rotating bending fatigue tests, the fatigue strength increases up to 23.8% in warm shot peening specimens at 200°C compared with conventional shot peening. The major reason why the warm shot peening is effective to the improvement of fatigue strength is the increment of the compressive residual stress, which can be effectively formed by shot peening under the condition of warm temperature than room temperature.

Keywords : Warm Shot Peening(온간 쇼트 피닝), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Spring Steel(스프링강), Fatigue Strength(피로강도), Fatigue Life(피로수명)

1. 서 론

산업의 급격한 발전과 더불어 기계부품, 자동차, 항공기 부품, 발전기 터빈 등의 기계구조물에서는 에너지 및 자원 절약 등을 목적으로 경량화에 대한 요구가 증가하고 있다. 자동차산업의 경우에는 경량화에 대한 연구에서 현가장치용 스프링의 무게를 10% 감량할 경우 보통 100 MPa의 설계응력 증가를 요구한다. 오일쇼크 이전에는 스프링 설계 최대응력을 800~900 MPa 정도로 하였지만, 현재는 소재의 개발과 가공법의 발달로 대부분의 스프링은 1000~1100 MPa의 설계 최대응력을 가진다¹⁾. 앞으로 자동차용 스프링은 1200 MPa 이상의 설계응력과 지속적인 경량화가 요구되고 있는 실정이다.

최근 스프링의 설계응력 증가를 위해서 새로운 강종이 개발되고 있다. 개발된 강종은 높은 강도와 경도를 갖추고 있다. 그러나 이러한 스프링 강종의 기계적인 특성은 인성의 저하를 동반하여 피로파괴에 민감함을 나타내고 있다. 따라서 재료에 인성을 부여하여 피로강도를 상승시키기 위한 다양한 가공방법이 사용되고 있다. 이의 방법 중 쇼트피닝가공은 청정 표면처리법으로서 재료의 피로강도와 피로수명을 현저히 증가시킬 수 있어, 이의 사용이 증가하고 있다.

기존의 쇼트피닝 가공법은 상온에서 경화된 강구를 고속으로 재료의 표면에 투사함으로써 재료의 표면에 압축잔류응력을 형성시켜 재료의 피로강도 및 피로수명을 강화하였다. 그런데 고강도 스프링강의 쇼트피닝 가공(shot peening)에 있어서 고경도의 쇼트볼의 사용은 불과 쇼트피닝기의 수명을 감

*Corresponding author. E-mail : leesh@kinst.ac.kr

소시키는 원인으로 작용한다. 이 문제 해결하고 쇼트피닝의 효과를 증대하기 위한 방안으로 템퍼링 (tempering) 온도이하에서 쇼트피닝을 하는 온간 쇼트피닝 가공법(warm shot peening)이 적용되기 시작하였다. 일본의 경우 현가장치용 스프링의 일부 생산 공정에서 온간 쇼트피닝 가공을 적용하고 있으나 국내에서는 아직 실험단계에 머물고 있는 실정이다.

본 논문에서는 온간 쇼트피닝 가공의 효과를 분석하기 위하여 스프링강(SAE9524)을 대상으로 상온에서 일반적인 쇼트피닝 가공을 한 시험편과 온간 쇼트피닝 가공을 한 시험편에 대한 잔류응력 분석과 피로시험을 행하였다. 쇼트피닝 가공 조건은 상온/100°C/200°C/300°C 상태로 하였으며, 표면특성 및 피로특성이 시험편의 가열온도에 따라 어떠한 경향을 나타내는지 비교 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 쇼트피닝 가공의 개념

쇼트피닝 가공은 금속의 작은 쇼트볼을 고속으로 투사하여 제품의 표면을 타격하는 방법으로 행한다. 쇼트볼은 일반적으로 100 m/sec 이상의 높은 속력을 가지고 있어서 재료의 표면에 소성변형을 유발하고 기계적 성질을 변화시킨다. 쇼트피닝 가공은 재료의 표면경도를 증가시키고, 재료의 표면에는 압축잔류응력을 생성시킨다. 이 압축잔류응력은 피로강도와 피로수명의 증가에 상당한 영향을 미친다^{2,5)}.

쇼트피닝 가공의 효과는 저사이클 영역보다는 10⁵ 사이클 이상의 반복하중을 받는 부분의 피로수명 연장에 효과적이고, 응력이 집중되는 라운드 부분, 홈 부분, 노치, 급격한 단면 변화부, 작은 구멍부분, 나사부분, 키 홈 부분, 베어링 자리 등의 부위에 응력집중 현상을 완화시키는 효과가 있다^{6,8)}.

금속 재료에서 쇼트피닝 가공에 의한 피로수명 증가의 원인은 첫째로 재료의 표면에 균일한 슬립밴드를 형성하여 응력 집중을 감소시키는 작용이다. 그림 1(a)과 같이 쇼트피닝 가공을 하지 않은 재료의 표면 조직은 고유의 슬립밴드가 상대적으로 적은 곳이 응력집중에 의한 절손의 기점으로 작용하게 된다. 그러나 쇼트피닝 가공을 하게 되면 그림 1(b)와 같이 가공 후에 재료의 표면부가 균일하게 소성 변형이 되어 슬립밴드가 골고루 형성된다. 이는 제품에 반복적인 외력이 작용할 때 응력을 분산시키는 작용을 하게 되어 피로수명을 향상시키는 요인으로 작용하게 된다.

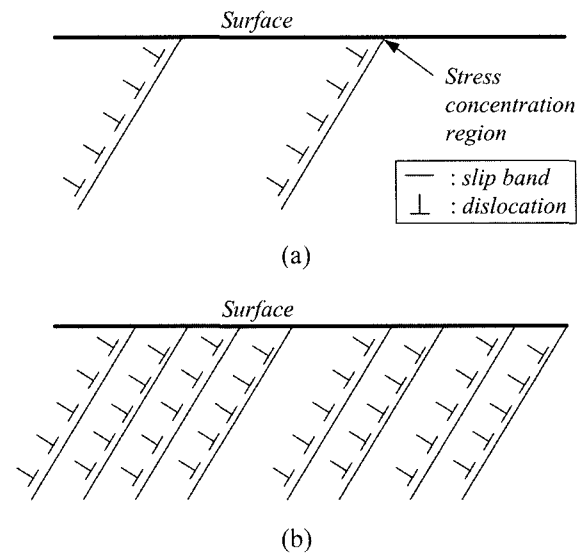


Fig. 1. Material surface (a) Unpeened surface (b) Shot peened surface.

둘째로는 재료의 표면에 발생하는 소성변형에 의한 압축잔류응력의 효과이다. 일반적으로 균열의 발생은 인장응력에 기인하기 때문에 표면부에 발생된 압축잔류응력은 표면부의 인장력을 상쇄시키므로 균열의 발생을 지연시킨다. 이의 결과 피로수명의 향상을 가져온다.

2.2 온간 쇼트피닝 가공의 개념

온간쇼트피닝 가공법은 일반적인 쇼트피닝의 한계를 극복하기 위한 방법으로 재료의 표면에 더 높은 압축잔류응력을 얻기 위한 방법의 하나로써 제안된 것이다.

온간쇼트피닝 가공은 일반적으로 상온상태에서 가공하는 쇼트피닝 가공법과 동일하다. 다만 쇼트피닝 가공시에 재료의 온도가 상온이냐 아니면 가열상태인 온간이냐에 따라 구분된다. 일반적으로 온간에서 쇼트피닝 가공은 상온에서의 쇼트피닝 가공에 비해 더 높은 압축잔류응력과 피로강도를 갖는다고 보고되고 있다⁹⁾.

온간쇼트피닝 가공에서 재료의 가열온도는 그 재료의 특성이 변하지 않는 가공 온도 이하에서 하게 된다. 금속의 소성변형은 전위(dislocation)의 이동과 관계가 있다. 금속 내에서 불순원자, 입계 또는 결정격자에 고정되어 있던 전위들은 금속의 온도가 올라갈수록 이동이 용이해지기 때문에, 응력이 동일한 경우 온도가 높을수록 소성변형이 많이 발생한다고 할 수 있다. 따라서 상온보다 온간에서 쇼트피닝 가공을 실시하였을 때 재료의 표면에 발생하는 소성변형량이 많음을 알 수 있다. 이러한 소

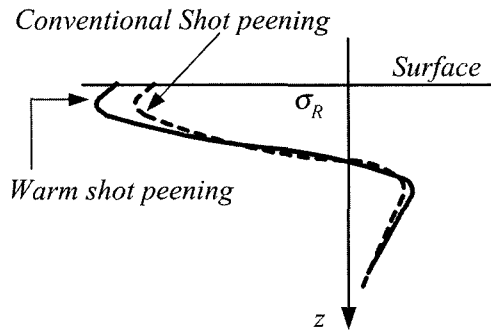


Fig. 2. Typical residual stress of warm shot peening.

성변형에 의한 가공경화 효과로 인하여 표면경도가 증가하고 또한 압축잔류응력이 증가하게 되는 것이다. 그림 2는 쇼트피닝 가공에 의하여 발생하는 압축잔류응력의 분포를 도식적으로 비교하여 나타낸 것이다.

3. 실험방법

3.1 재료의 기계적 화학적 성질

재료는 자동차 현가장치용 스프링에 사용되고 있는 스프링강(SAE 9254)을 사용하였다. 열처리 조건은 현가장치용 스프링의 열처리 조건과 동일하게 하였다. 먼저 920°C에서 15분간 가열한 후 유증에서 침하여 마르텐사이트 조직을 얻었고, 다시 420°C로 30분간 템퍼링하여 제작하였다. 이 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 표 1, 표 2에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of spring steel

	(wt%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
SAE 9254	0.51~0.59	1.20~1.60	0.6~0.8	0.035	0.04	0.6~0.8

Table 2. Mechanical properties of spring steel

	Tensile strength	Elongation	Hardness
SAE 9254	1750 MPa	9.4%	HRC 50

3.2 시험편 및 실험방법

3.2.1 인장시험편

인장시험편은 부하방향이 압연방향과 평행하도록 채취하였으며, 시험편의 최소지름은 14 mm인 KS B 0801규격 제4호 시험편으로 가공하였다. 인장 시험은 ASTM E8의 규정에 의거하여 실험하였다.

Table 3. Conditions of shot peening

Shot ball diameter	0.8 mm
Impeller velocity	3,100 rpm
Impeller diameter	360 mm
Time	4 min
Coverage	98%

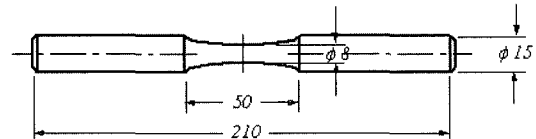


Fig. 3. Rotary bending fatigue test specimen.

3.2.2 회전굽힘 피로시험

재료의 피로특성을 평가하기 위해 상온 대기 중에서 최대 굽힘 모멘트가 10 kgf·m, 최대 회전수가 3,000 rpm인 회전식 4점 굽힘 피로시험기를 이용한 시험 시스템을 구성하였다. 사용된 시험편은 상온, 100°C, 200°C 및 300°C 온도조건에서 쇼트피닝 처리된 것이다. 표 3은 쇼트피닝 가공 조건을 나타낸 것이다.

회전굽힘 피로시험은 응력비(stress ratio, R)는 -1이며, 적용 응력의 증감은 추의 무게로 조절하며 실험하였다. 시험편의 형상 및 치수는 그림 3과 같다.

3.2.3 잔류응력 측정

쇼트피닝 가공에 따른 잔류응력의 분포를 관찰하기 위하여 X선 잔류응력 측정장치(RIGAKN-MASF2M)를 사용하였다. 내부 잔류응력 분포의 측정은 전해연마기로 시험편 표면에서부터 중심부 방향으로 20~25 μm씩 250 μm까지 반복 측정하였다. 측정조건은 표 4와 같다.

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°, 15°, 30°, 45°	
2θ	140°~170°	
Diffraction	Scintillation counter	

4. 실험결과 및 고찰

4.1 조도분포

상온쇼트피닝 가공한 시험편과 온간쇼트피닝 가

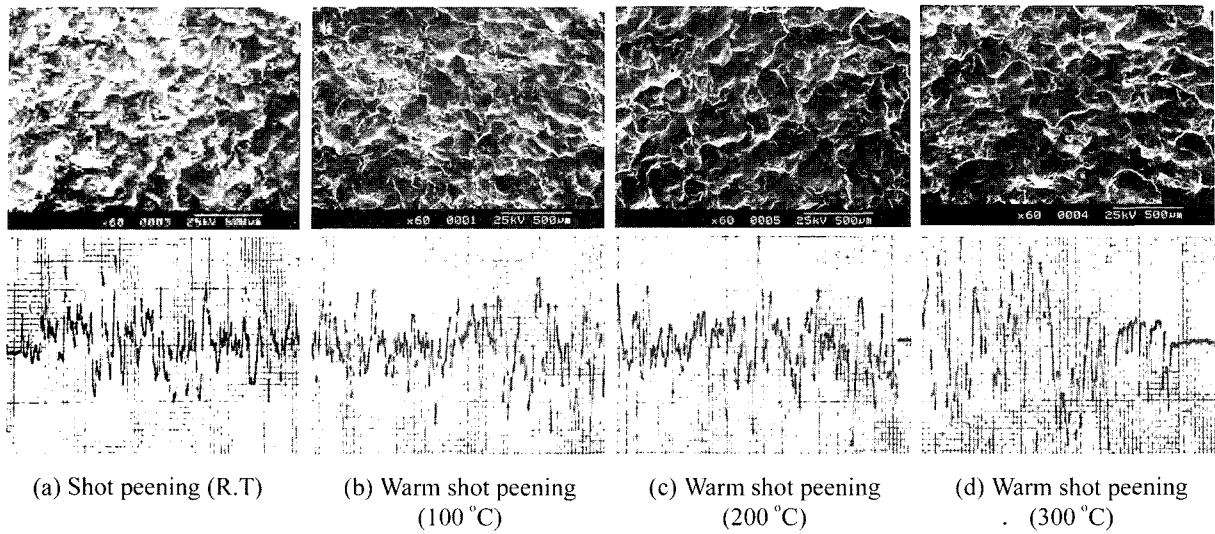


Fig. 4. Surface condition and roughness profile.

공한 시험편의 표면조도의 변화를 관찰하기 위해 시험편의 표면부를 표면조도계(Surfcam, Tokyo Seimitsu)를 사용하여 굴곡의 최대값(R_{max})을 측정하였다. 그림 4는 쇼트피닝 가공 온도조건에 따른 각 시험편의 조도 변화로 전자주사현미경(SEM)으로 표면을 60배로 확대하여 관찰한 것이다. 그리고 그림 5는 측정된 사진과 조도 변화를 R_{max} 로 나타낸 그래프이다.

그림 5에서 보는 바와 같이 상온에서 쇼트피닝 가공한 시험편에 비해 100°C, 200°C 및 300°C 온간 쇼트피닝 가공한 시험편의 표면 조도값 R_{max} 은 각각 15.7%, 35.4%, 45.7%의 증가를 나타내어, 상온의 쇼트피닝 가공에 비해 표면 조도의 상태가 악화되는 경향을 나타내었다. 이 현상은 그림 4에서 보는 바와 같이 온간 상태가 되면서 표면의 조직이

상온에 비해 연화되어 쇼트볼과 시험편간의 충돌에너지에 의한 변형이 더 많이 일어날 수 있는 조건을 형성함으로써 표면에 더 깊은 자국을 형성하기 때문이다.

4.2 잔류응력 변화

그림 6은 상온쇼트피닝 가공과 100°C, 200°C 및 300°C 온간쇼트피닝 가공한 시험편에 발생된 압축 잔류응력의 분포도이다. 그리고 표 5는 극표면의 잔류응력값과 최대 압축잔류응력 값을 비교한 것이다. 압축잔류응력의 극표면값과 최대값은 200°C 온간쇼트피닝 조건일 때 637 MPa과 818 MPa로 상온쇼트피닝 가공에 비해 극표면에서는 33.3%의 압축잔류응력 증가와 최대 압축잔류응력은 24.9%의

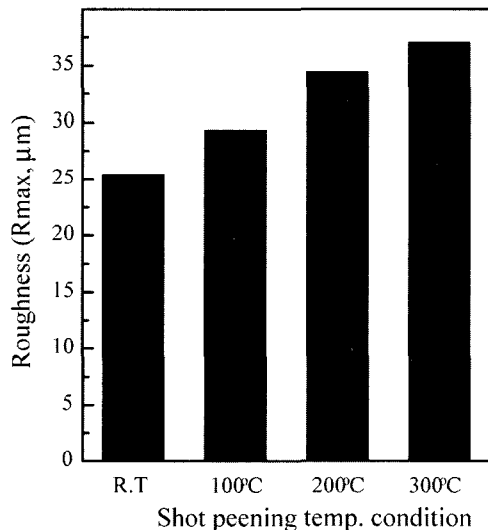


Fig. 5. Surface roughness.

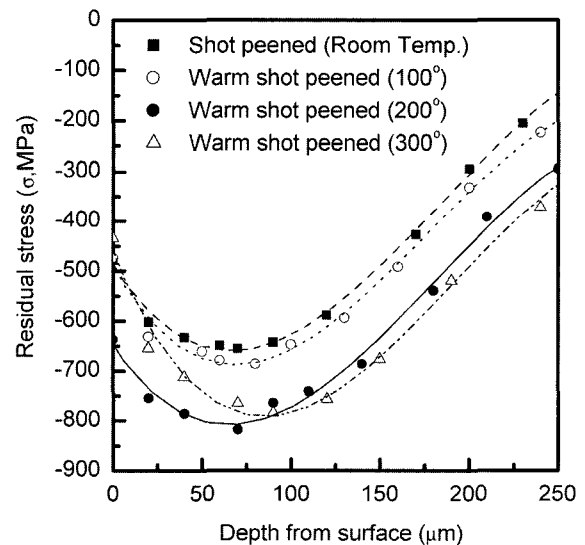


Fig. 6. Residual stress distribution of fatigue test specimen.

Table 5. Surface residual stress after shot and warm shot peening

Condition		Surface residual stress (MPa)		Max. residual stress (MPa)	
Shot peening		-478	-	-655	-
Warm peening	100°C	-473	1.1% ↓	-686	4.7% ↑
	200°C	-637	33.3% ↑	-818	24.9% ↑
	300°C	-434	9.2% ↓	-784	19.7% ↑

높은 증가를 나타내었다. 그러나 상온의 쇼트피닝과 100°C 및 300°C 온간 쇼트피닝 가공한 재료의 표면에 형성된 압축잔류응력은 거의 차이를 나타내지 않았다. 다만 300°C에서 온간쇼트피닝 가공한 재료의 최대 압축잔류응력 값이 784 MPa로 19.7%의 증가를 나타내었다. 이는 온간 쇼트피닝 가공에 있어서 최대의 효과를 얻을 수 있는 온도범위가 있음을 시사 한다. 이에 대한 연구는 본 연구에서 수행하지는 못하였다.

4.3 피로특성 평가

스프링강(SAE9254)의 온간 쇼트피닝 가공에 따른 피로강도를 평가하기 위하여 회전굽힘 피로시험을 하였다. 그림 7은 상온, 100°C, 200°C 및 300°C에서 쇼트피닝한 시험편에 대한 회전굽힘 피로시험 결과를 응력과 파단 회전수로 나타낸 S-N 선도이다.

그림 7에서 S-N 곡선 상에서 시험편의 피로한도(fatigue limits)는 수명이 10⁵에서 10⁶ 회전수를 범위에서 기울기가 수평인 구간으로 설정하였다. 피로한도는 상온 쇼트피닝 가공에서 682.7 MPa, 100°C, 200°C 및 300°C 온간쇼트피닝 가공에서 682.7 MPa, 845.5 MPa, 780.3 MPa로 각각 나타났

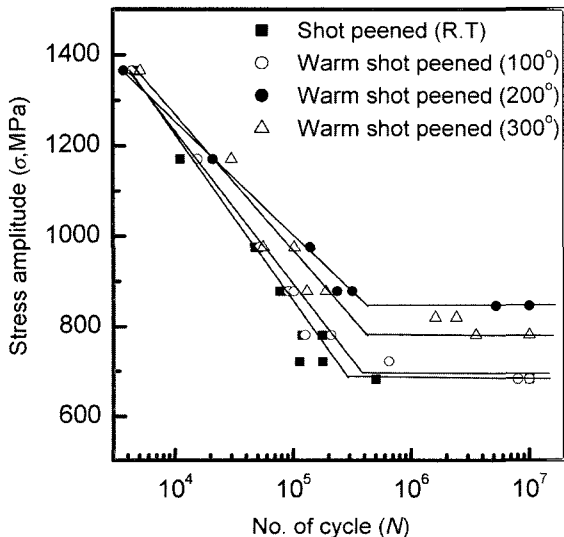


Fig. 7. S-N curve of warm peened spring steel.

다. 200°C 온간쇼트피닝의 경우 상온쇼트피닝 가공에 비해 23.8%의 피로강도의 증가를 나타내어 가장 높은 피로강도를 나타내었다. 이러한 이유는 일반적인 쇼트피닝 가공과 마찬가지로 극표면에서의 압축잔류응력이 상대적으로 높게 형성되어 시험편에 가해지는 인장력을 완화시키기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동차 현가장치용 스프링에 사용되는 스프링강에 대해 피로수명 향상법으로서 적용되고 있는 일반적인 쇼트피닝 가공법보다 우수한 쇼트피닝 처리법인 온간 쇼트피닝 가공의 효과에 대하여 검토하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 쇼트피닝 가공에 의한 표면 조도 분포는 상온 쇼트피닝 가공에 비해 300°C 온간 쇼트피닝에서 최대 45.7% 악화되었다.
2. 쇼트피닝 가공시에 발생하는 압축잔류응력은 200°C 온간쇼트피닝 가공에서 최대값을 나타내었다. 상온쇼트피닝 가공에 비해 압축잔류응력 값이 극표면에서 33.3%, 최대값이 24.9% 증가하였다.
3. 300°C 온간 쇼트피닝 가공에서 표면 압축잔류응력과 최대압축잔류응력 값이 200°C 온간 쇼트피닝 가공에 비하여 저하하는 것은 재료마다 최적의 온간 쇼트피닝 가공 온도가 있음을 시사한다.
4. 회전굽힘 피로시험 결과 200°C 온간 쇼트피닝 시험편이 상온에서 쇼트피닝 가공한 시험편보다 피로한도가 23.8%의 증가하였다. 이는 200°C 온간 쇼트피닝 시험편에서 극표면의 압축잔류응력이 최대 값을 나타내기 때문이다.

참고문헌

1. T. Akira, K. Hiroshi, T. Hiroshi, "Study on Warm Shot Peening for Suspension Coil Spring", SAE Technical Paper 1999-01-0415, Society of Automotive Engineers (1999).
2. K. Iida, "Dent and Affected Layer Produced by Shot Peening", Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening, Chicago, (1984) 283-292.
3. M. C. Sharma, "Assessment of over Peening by Time on Fatigue Behavior of Spring Steel", 6th International Fatigue Congress, (1996) 1397-1402.
4. 신용승, 정성교, 서유원, "쇼트피닝한 SCM 22강의 피로특성평가", 한국공작기계학회 논문집, (1998) 126-131.
5. 이종규, 김정규, "피로강도 및 수명에 미치는 Shot

- Peening에 의한 잔류응력의 영향”, 대한기계학회논문집 A권, 21(9) (1997) 1498-1506.
6. J. S. Eckersley, “Shot Peening Plays a Vital Roll in Rejuvenation of Aging Aircraft”, Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International, (1991) 241-255.
 7. J. Bergstron, T. Ericsson, “Relaxation of Shot Peening Induced Compressive Stress During Fatigue of Notched Steel Samples”, Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Chicago, (1984) 241-248.
 8. J. A. Akber, S. Kyriacou, A. M. El-Zafrany, “Effect of Shot Peening on the Fatigue Life of Axially Loaded Notched Components”, Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Tokyo, (1993) 349-358.
 9. W. Andreas, S. Vilker, V. Otmar, “Effects of Stress and Warm Peening of AISI 4140 on Fatigue Life”, J. of Steel Research, 71(8) (2000) 316-321.