

현가장치용 코일스프링의 피로특성에 미치는 온간쇼트피닝 가공의 영향

김기전* · 정석주*

(2001년 12월 26일 접수, 2002년 4월 30일 심사완료)

An Effect of Warm Shot Peening on the Fatigue Behavior of Suspension Coil Springs

Ki-Jeon Kim and Suk-Choo Chung

Key Words: Shot Peening(쇼트피닝), Warm Shot Peening(온간쇼트피닝), Suspension Coil Spring
(현가장치용 코일스프링), Fatigue Limits(피로한도), Residual Stress(잔류응력)

Abstract

The requirements of coil spring for higher fatigue strength have been increased to achieve the weight reduction of a vehicle. As the possible increase in fatigue strength by using the conventional shot peening treatment is found to be limited, it is necessary to modify the shot peening treatment. The warm shot peening is a shot peening treatment carried out within warm temperature range. The aim of this paper is to analyze some experimental results concerned with the effect of warm shot peening and to discuss the mechanism of warm shot peening in detail. By the results of rotating bending fatigue test, the fatigue strength of test specimen increases up to 23.8% in the production condition of warm shot peening 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 increase of a compressive residual stress distribution, which can be caused by more effective deformation under the condition of warm temperature.

1. 서론

근래 산업사회의 급격한 발전과 더불어 기계부품, 자동차, 항공기 부품, 발전기 터빈 등의 기계구조물에서는 에너지와 자원 절약의 목적으로 경량화에 대한 요구가 증가하고 있다.

자동차산업에 있어서 경량화에 대한 연구에 있어서 현가장치용 코일 스프링의 무게를 10% 감량할 경우 보통 100 MPa의 설계응력을 증가시킬 수 있다.

그러므로, 오일쇼크 이전에는 설계 최대응력을

800~900 MPa 정도로 스프링을 설계하였지만, 현재는 소재의 개발과 가공법의 발달로 인해 대부분의 스프링은 1000~1100 MPa의 설계 최대응력을 가지고 있다.⁽¹⁾

또한 앞으로 설계되어지는 자동차용 코일 스프링은 1200 MPa 이상의 설계응력 증가와 함께 계속된 경량화를 요구하고 있는 실정이다. 코일 스프링의 설계응력 증가를 위해서 최근에 새로운 스프링 강종이 개발되고 있으며, 개발된 스프링 강종의 경도 또한 높은 설계 응력에 맞맞추어 증가하고 있는 실정이다. 그러나, 이러한 스프링 강종은 높은 인성과 경도의 증가를 가져왔지만, 반면에 경도의 증가에 따른 노치 민감성을 동반하게 되었다. 이러한 노치 민감성에 대한 저감의 목적으로 쇼트피닝 가공은 더욱더 중요하게 되었다.

고강도 스프링강의 쇼트피닝 가공(shot peening)

* 책임저자, 회원, 대원강업(주) 기술연구소

E-mail : r-newp@dwku.com

TEL : (032)578-0051 FAX : (032)578-3090

* 회원, 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

에 있어서, 고경도의 쇼트볼은 불과 피닝기의 수명을 감소시키는 원인으로 작용하게 되어, 이러한 문제 해결을 위한 방안으로, 템퍼링(tempering) 온도이하에서의 쇼트피닝 가공법인 온간쇼트피닝 가공법(warm shot peening)이 적용되기 시작하였다. 가까운 일본의 경우 현가장치용 코일스프링의 일부 생산공정에 온간쇼트피닝 가공공정을 적용되고 있으나, 국내에서는 아직 실험단계에 머물고 있는 실정이다.

본 논문에서는 온간쇼트피닝 가공에 따른 효과 분석을 위해 상온에서 가공하는 일반적인 쇼트피닝 가공에 대해 실험적으로 비교 평가하였다.

이를 위해 쇼트피닝 가공 조건은 시험편 온도를 상온/100℃/200℃/300℃ 상태로 쇼트피닝 가공하였으며, 표면특성 및 피로특성을 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 타격하고 튀어나간다. 이때 쇼트볼은 재료의 표면에 자국을 형성하며, 표면층에 압축잔류응력을 생성시킨다. 쇼트볼이 충돌할 때 일반적으로 높은 속력(100m/sec)을 가지고 있어서, 재료표면에 소성변형을 유발하게 되며, 기계적 성질을 변화시킨다. 쇼트피닝 가공을 하면 재료의 표면경도는 증가하고, 표면 근처에 생성된 압축잔류응력은 피로수명의 증가에 상당한 영향을 미친다고 연구보고 되고 있다.^(2~5)

쇼트피닝 가공의 효과는 지극히 표면에만 잔류하는 압축응력에 의한 것이므로, 탄성한계의 증가나 인성의 증가는 없다. 또한 저사이클 영역보다는 100,000 사이클 이상의 반복되는 하중을 받는 부분에서 피로수명 연장에 효과적이다. 또한 응력이 집중되는 라운드 부분, 홈 부분, 노치, 급격한 단면 변화부, 작은 구멍부분, 나사부분, 키홈 부분, 베어링 자리 등에 쇼트피닝 가공을 하면 응력집중을 완화시키는 효과가 있다고 보고되고 있다.^(6~8)

금속 제품에서 쇼트피닝 가공에 의한 피로수명 증가 원인은 첫째로 표면에 균일한 슬립밴드를 형성하여 응력 집중을 감소시키는 작용을 한다. Fig. 1(a)과 같이 쇼트피닝 가공하지 않은 제품의

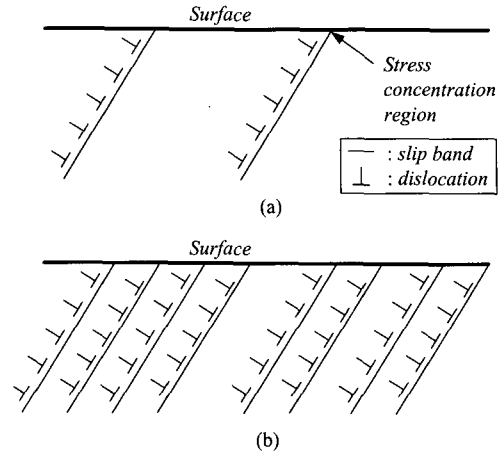


Fig. 1 Material surface (a) Unpeened surface, (b) Shot peened surface

표면에 대한 조직을 나타내는 재료인 경우에 고유의 슬립밴드가 상대적으로 적은 곳에서 응력집중에 의한 절손 기점으로 작용하게 된다. 하지만 쇼트피닝 가공을 하게 되면 Fig. 1(b)과 같이 가공 후에 재료의 전표면부가 균일하게 소성 변형이 되어 슬립밴드가 골고루 형성되어 제품에 반복적인 외력이 작용할 때 표면의 응력 집중을 분산시키는 작용을 하게 되어 피로수명을 향상시키는 요인으로 작용하게 된다.

둘째로 쇼트피닝 가공을 함으로서 스프링 표면에 발생하는 소성변형에 의해 압축잔류응력이 발생된다. 일반적으로 균열의 발생은 인장응력에 기인하기 때문에 표면부의 발생된 압축잔류응력은 제품에 반복적인 하중 부하시에 표면부의 인장력을 상쇄시켜 균열의 발생을 지연시킴으로서 피로수명의 향상을 가져온다.

2.2 온간쇼트피닝 가공의 개념

온간쇼트피닝 가공은 일반적으로 상온상태에서 가공하는 쇼트피닝 가공법과 모두 동일하며, 쇼트피닝 가공시의 제품의 온도가 상온이나 아니면 가열상태인 온간이나로 구분되어 진다고 할 수 있다.

이러한 온간쇼트피닝 가공법은 일반적인 쇼트피닝에서의 피로강도 증가의 한계를 극복하기 위한 방법의 하나로서 일반적인 쇼트피닝 가공에 비해 더 높은 압축잔류응력과 피로강도를 갖는다.⁽⁹⁾

온간쇼트피닝 가공에서 제품의 가열온도는 그 제품의 특성이 변하지 않는 가공 온도 이하에서

쇼트피닝 가공을 하게되며, 상온에서 가공되는 쇼트피닝 가공품에 비해 표면 경도 및 잔류응력이 증가하게 된다.

금속의 소성변형은 전위(dislocation)의 이동과 관계가 있으며, 금속내에서 불순원자, 입계 또는 결정격자에 고정되어 있던 전위들이 금속의 온도가 올라갈수록 이동이 용이해지기 때문에, 동일 응력하에서는 온도가 높을수록 소성변형이 많이 발생한다고 할 수 있다. 따라서, 동일한 쇼트피닝 가공조건에서는 상온 쇼트피닝 가공보다 온간 쇼트피닝 가공을 실시하였을 때 그 가공품의 표면부에서의 소성변형이 많이 발생함을 알 수 있고, 이러한 소성변형에 의한 가공경화 효과로 인하여 표면경도 및 압축잔류응력이 증가하게 되는 것이다. Fig. 2는 압축 잔류응력의 분포 경향을 도식적으로 비교하여 나타내었다. 그림에서와 같이 온간쇼트피닝 가공에서 표면 및 최대 압축잔류응력이 높게 나타난다.

3. 실험방법

3.1 재료의 기계적 화학적 성질

본 연구에서는 자동차 현가장치용 스프링에 사용되고 있는 스프링강(SAE 9254)을 사용하였다.

열처리 조건은 920℃에서 15분간 가열한 후 유증에서 퀘칭하여 마르텐사이트 조직을 얻었고, 다시 420℃로 30분간 템퍼링하여 제작하였다.

이 재료들의 화학적 성분은 Table 1에 표시하였으며, Table 2는 기계적 성질로서 시험편의 인장강도, 연신율과 경도를 나타내었다.

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.

3.2.2 회전굽힘 피로시험

상온 쇼트피닝과 100℃, 200℃ 및 300℃ 온도 조건의 온간쇼트피닝 가공에 따른 피로특성을 평가하였다.

시험편 피로특성 평가를 위해 상온 대기 중에서 최대 굽힘 모멘트가 10 kgf·m, 최대 회전수가 3,000 rpm인 회전식 4점 굽힘 피로시험기를 사용하

였다. 본 실험에서의 응력비(stress ratio, R)는 -1이며, 적용 응력의 증감은 추의 무게로 조절하며 실험하였다. 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 3과 같다.

3.2.3 온간쇼트피닝 가공

온간쇼트피닝 가공은 시험편 온도를 100℃, 200℃ 및 300℃의 3가지 온도 조건에서 Table 3의 조건으로 쇼트피닝 가공하였다. 이때 시험편의 온도 측정은 접촉식 디지털 온도측정계(RKC, DP-100)를 사용하였으며, 시험편 온도 측정 오차 범위는 $\pm 5^\circ\text{C}$ 이다.

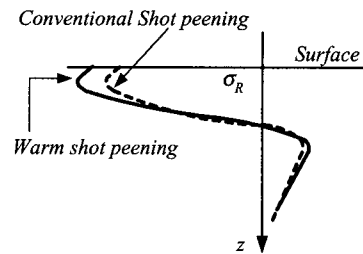


Fig. 2 Typical residual stress of warm shot peening

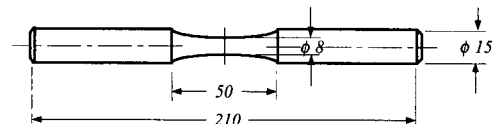


Fig. 3 Rotary bending fatigue test specimen

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

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%

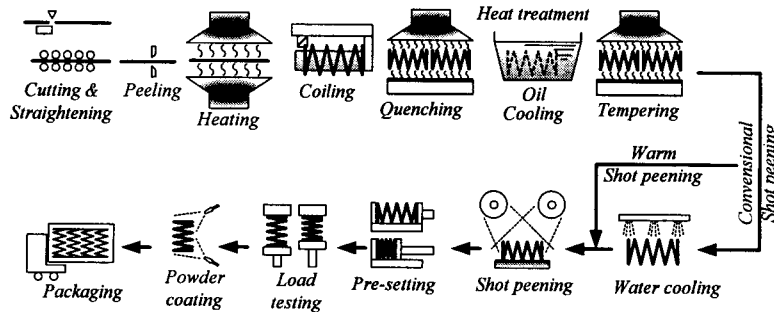


Fig. 4 Manufacture process of suspension coil spring

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray diffraction	Condition	
X-Ray source	Target	Cr-V
	Voltage	30 kV
	Current	10 mA
ψ	0°, 15°, 30°, 45°	
2θ	140° ~ 170°	
Diffraction	Scintillation counter	

Table 5 Suspension coil spring specifications

Specification	Data
Wire diameter	12.3 mm
Coil inside diameter	115.7 mm
Coil outside diameter	140.3 mm
Free length	334.0 mm
Spring constant	22 N/mm
Number of active coils	4.5
Number of total coils	6

Table 6 Fatigue test conditions for suspension coil spring

	Installation	Maximum	Note
Spring length	285 mm	110 mm	Stroke 175 mm
Load	1873 N	5739 N	
Stress	373 MPa	1138 MPa	
Mean stress	755 ± 382 MPa		

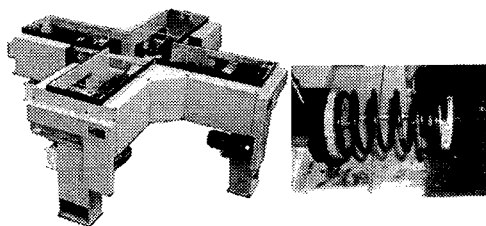


Fig. 5 Fatigue test machine for suspension coil spring

3.2.4 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 μm 씩 250 μm까지 측정하였다. 측정조건은 Table 4 과 같다.

3.2.5 현가장치용 코일스프링 피로시험

실제 자동차에 적용되고 있는 코일스프링 제품에 상온쇼트피닝과 온간쇼트피닝 가공을 실시하여 동일 응력조건에서의 피로수명을 비교하였다.

자동차 현가장치용 코일스프링의 제조공정은 다음의 Fig. 4와 같으며, 시험에 사용된 코일스프링 사양은 Table 5와 같다. 시험기는 최대 회전수 500 rpm, 최대 행정 200 mm인 로타리식 4축 코일스프링 피로시험기(DWS, CFT-600)를 사용하였으며, 형상은 Fig. 5와 같다. 시험 조건은 Table 6 에 나타내었다.

4. 실험결과 및 검토

4.1 조도분포

상온쇼트피닝 가공한 시험편과 온간쇼트피닝 가공한 시험편의 표면조도의 변화를 관찰하기 위해 시험편의 표면부를 표면조도계(Surfcam, Tokyo Seimitsu)를 사용하여 굴곡의 최대값(Rmax)을 측정하였다.

Fig. 6과 7에서는 각각의 쇼트피닝 가공 온도조건에 따른 조도 변화를 전자주사현미경(SEM)을 사용하여 표면을 60배로 확대 관찰한 사진과 조도 변화(Rmax)에 대한 그래프이다.

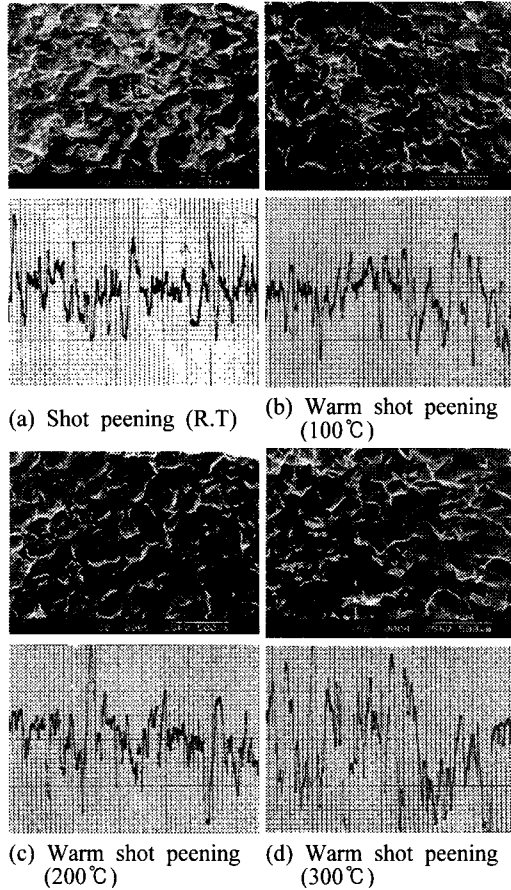


Fig. 6 Surface condition and roughness profile

Table 7 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% ↑

Fig. 5에서 가공 온도가 상승할수록 쇼트볼에 의한 표면의 자국이 더 커짐을 관찰할 수 있다.

이 현상은 온간 상태가 되면서 표면의 조직이 상온에 비해 조직이 연화되어 쇼트볼과 시험편간의 충돌에너지에 의한 변형이 더 많이 일어날 수 있는 조건을 형성함으로써 표면에 더 깊은 자국을 형성하게 된다.

Fig. 7과 같이 상온쇼트피닝 가공한 시험편에

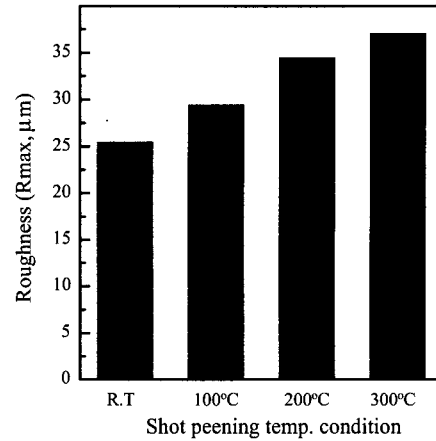


Fig. 7 Surface roughness

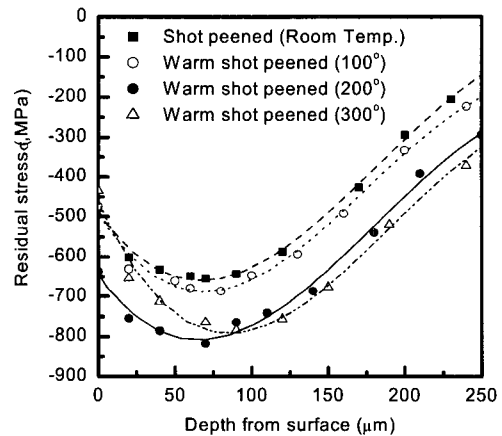


Fig. 8 Residual stress distribution of fatigue test specimen

비해 100°C, 200°C 및 300°C 온간쇼트피닝 가공한 시험편의 표면 조도값은 각각 15.7%, 35.4%, 45.7%의 증가를 나타내어, 상온쇼트피닝 가공에 비해 표면 조도상태가 악화되는 경향을 나타내었다.

4.2 잔류응력 변화

Fig. 8은 상온쇼트피닝 가공과 100°C, 200°C 및 300°C 온간쇼트피닝 가공한 시험편에 발생된 압축잔류응력의 분포도이며, Table 7은 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 높은 증가를 나타내어 다른 조건에 비해 최적

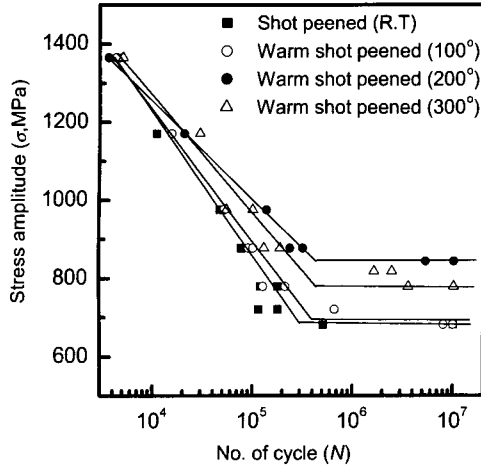


Fig. 9 S-N curve of warm peened spring steel
 입을 알 수 있다. 그러나, 상온쇼트피닝과 100°C 온간쇼트피닝 가공한 재료의 압축잔류응력은 큰 차이를 나타내지 않았다. 300°C에서 온간쇼트피닝 가공한 재료의 극표면값은 상온쇼트피닝 가공에 비해 향상되지 못했지만, 최대 압축잔류응력 값은 784 MPa로 19.7%의 증가를 나타내었다.
 또한 압축잔류응력의 최대값은 극표면에서 발생되지 않고 표면 아래에서 발생되었으며, 지금까지의 많은 연구결과와 일치됨을 알 수 있었다.^(5,6) 극표면부의 압축잔류응력은 반복되는 피로 하중에 대한 저항력으로 작용하여 피로강도를 증가하는 요인으로 작용하게 된다.^(4,5)

4.3 피로특성 평가

스프링강(SAE9254)의 온간쇼트피닝 가공에 따른 피로강도를 평가하기 위하여 회전굽힘 피로시험을 하였다.

Fig. 9은 상온쇼트피닝과 온간쇼트피닝 시험편에 대한 회전굽힘 피로시험 결과를 응력과 파단 회전수로 나타낸 S-N 선도이다.

Fig. 9에서 S-N 곡선 상에서 시험편의 피로한도(fatigue limits)는 수명이 10⁵에서 10⁶ 회전수를 범위에서 기울기가 수평인 구간으로 설정하였다.

피로한도는 상온쇼트피닝 가공에서 682.7 MPa, 100°C, 200°C 및 300°C 온간쇼트피닝 가공에서 682.7 MPa, 845.5 MPa, 780.3 MPa로 각각 나타났다. 여기서 200°C 온간쇼트피닝의 경우 상온쇼트피닝 가공에 비해 23.8%의 피로강도의 증가를 나타내어 가장 높은 피로강도를 나타내었으며, 이

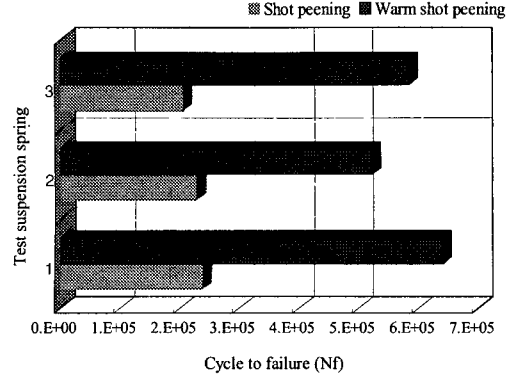


Fig. 10 Fatigue life of suspension coil spring by shot peening and warm shot peening

리한 이유는 일반적인 쇼트피닝 가공과 마찬가지로 극표면부의 압축잔류응력이 상대적으로 높게 형성되어 시험편에 가해지는 인장력을 완화시키기 때문에 피로 강도가 증가되었다.

4.4 현가장치용 코일스프링의 온간쇼트피닝 가공에 따른 피로수명 평가

이상에서 얻어진 시험 결과를 토대로 하여 실제 자동차사에서 양산 적용하고 있는 승용차 현가장치용 코일스프링 제품에 대해 온간쇼트피닝 가공하여 피로시험을 수행한 결과이다. 이때 온간쇼트피닝 가공조건은 시험편 피로시험에서 가장 피로한도가 높았던 200°C 온간쇼트피닝 가공조건을 적용하여 일반적인 상온 쇼트피닝 가공된 코일스프링과 동일 응력조건(755±382 MPa)에서 파단시까지의 피로수명을 상대 비교 평가하였다.

Fig. 10은 실제 현가장치용 코일스프링에 대한 제품 피로시험 결과이다. 이 그림에서 상온쇼트피닝가공에 비해 온간쇼트피닝 가공에서 약160%의 피로수명 증가를 나타내었다. 이 결과는 시험편 피로시험 결과와 마찬가지로 온간쇼트피닝에서 더 우수한 피로특성을 나타내었다.

Fig. 11은 코일스프링 제품에 대한 피로시험 후 파단된 제품의 파면을 광학현미경으로 관찰한 것이다. Fig. 11(a)은 상온쇼트피닝 가공후 피로파단된 조직의 파면을 30배와 3,000배로 관찰한 것이며, Fig. 11(b)은 온간쇼트피닝 가공 후 피로 파단된 조직의 파면을 30배와 3,000배로 관찰한 것이다.

일반적으로 균열이 발생하여 진전할 때 진전방향과 수직으로 스트라이에이션(striation)이라는 줄무늬가 발생하게 되는데 줄무늬의 간의 간격을

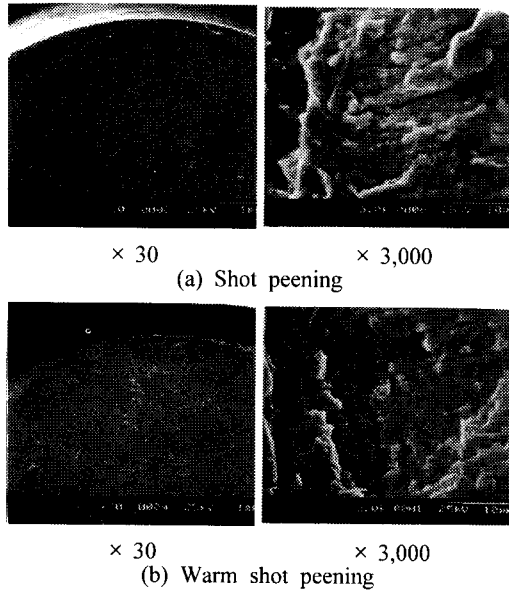


Fig. 11 Fatigue fracture surface

통해 균열의 전파속도를 평가할 수 있다. Fig. 11의 사진으로부터 상온 쇼트피닝에 비해 온간쇼트피닝 가공한 제품에서 스트라이에이션 줄무늬 간격이 더 조밀한 경향을 관찰할 수 있는데 이는 균열전파 속도가 상대적으로 지연되어 최종적인 파단 수명을 연장하는 메커니즘으로 작용하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 자동차 현가장치용 코일스프링에 사용되는 스프링강에 대해 피로수명 향상법으로서 적용되고 있는 일반적인 쇼트피닝 가공법에 더한 한계를 벗어날 수 있는 새로운 방안으로 온간쇼트피닝 가공법을 검토하였다.

본 연구에서 온간쇼트피닝 가공을 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 쇼트피닝 가공에 의한 표면조도 분포는 상온쇼트피닝 가공에 비해 온간쇼트피닝에서 표면조도가 악화되었다.

(2) 쇼트피닝 가공시에는 표면층에 얇은 압축잔류응력 층을 형성하게 된다. 상온쇼트피닝 가공에 비해 온간쇼트피닝 가공할 경우 내부에 발생하는 압축잔류응력 값은 증가를 나타내었다. 이 중에서 200℃ 온간쇼트피닝 가공에서 상온쇼트피닝 가공에 비해 압축잔류응력 값이 극표면에서

33.3%, 최대값이 24.9% 증가하여 가장 높은 증가를 나타내었다.

(3) 시험편에 대한 회전굽힘 피로시험 결과 극표면부의 압축잔류응력 값이 가장 높았던 200℃ 온간쇼트피닝 시험편이 상온쇼트피닝 가공한 시험편보다 피로한도가 23.8%의 증가를 가져왔다. 그러므로 세가지의 온도 조건 중에서 200℃가 가장 우수한 결과를 나타내었다.

(4) 실제 자동차 현가장치용 코일스프링 제품에 대한 제품 피로시험에서 온간쇼트피닝 가공한 코일스프링이 상온쇼트피닝 가공한 코일스프링에 비해 약160%의 피로수명 증가를 나타내었다. 코일스프링의 파단면 조직관찰을 통해서 온간 쇼트피닝 가공한 제품에서 피로균열의 전진속도가 상대적으로 지연되었음을 알 수 있었다.

(5) 이러한 온간쇼트피닝 가공 기술을 실제 자동차용 스프링 생산라인에 적용한다면 더 높은 설계 응력을 가진 스프링을 설계, 생산할 수 있을 것이고, 제품의 경량화에도 큰 몫을 할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 서울산업대학교 교내 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Akira, T., Hiroshi, K. and Hiroshi, T., 1999, "Study on Warm Shot Peening for Suspension Coil Spring," *SAE Technical Paper 1999-01-0415*, Society of Automotive Engineers.
- (2) Iida, K., 1984, "Dent and Affected Layer Produced by Shot Peening," *Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening*, Chicago, pp. 283~292.
- (3) Sharma, M. C., 1996, "Assessment of over Peening by Time on Fatigue Behavior of Spring Steel," *6th International Fatigue Congress*, pp. 1397~1402.
- (4) 신용승, 정성교, 서유원, 1998, "쇼트피닝한 SCM 22강의 피로특성평가," 한국공작기계학회 논문집, pp. 126~131.
- (5) 이종규, 김정규, 1997, "피로강도 및 수명에

- 미치는 Shot Peening에 의한 잔류응력의 영향," 대한기계학회논문집 A권, 제21권, 제9호, pp. 1498~1506.
- (6) Eckersley, J. S., 1991, "Shot Peening Plays a Vital Roll in Rejuvenation of Aging Aircraft," *Shot Peening Theory and Application*, Institute for Industrial Technology Transfer International, pp. 241~255.
- (7) Bergstron, J. and Ericsson, T., 1984, "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, pp. 241~248.
- (8) Akber, J. A., Kyriacou, S. and El-Zafrany, A. M., 1993, "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, pp. 349~358.
- (9) Andreas, W., Vilker, S. and Otmar, V., 2000, "Effects of Stress and Warm Peening of AISI 4140 on Fatigue Life," *J. of Steel Research*, Vol. 71, No. 8, pp. 316~321.