

열처리된 스프링강의 피로수명 개선을 위한 쇼트피닝 가공 효과

이승호* · 심동석**†
경기공업대학 자동차과

Effect of Shot Peening on Fatigue Life of Heat Treated Spring Steel

Seung-Ho Lee* and Dong-Suk Shim**†

Department of Automobile, Kyonggi Institute of Technology, Shihung-City 429-792, Kyonggi-Do, Korea

Abstract The effect of shot peening conditions on the fatigue properties of heat-treated spring steel has been investigated by using residual stress measurement and metallography. The mechanical properties of material did not change so much by shot peening. However, the fatigue strength and fatigue life increased about 20% to 40% by 1-step and 2-step shot peening process. The fatigue strength and life were closely related to the value and position of maximum compressive residual stress by shot peening process. In the case of warm shot peening, compressive residual stress of specimens shot peening processed at 200°C was higher than those of specimens shot peening processed at room temperature, 100°C and 300°C.

(Received 26 August 2004; accepted 13 October 2004)

Key Words : Heat treated spring steel, 2-step shot peening, Compressive residual stress, Warm shot peening, Fatigue life, Fatigue strength

1. 서 론

판스프링, 코일스프링 등의 재료로 사용되는 스프링강은 일반적으로 퀴칭(quenching)후 템퍼링(tempering)을 통하여 재료의 기계적 성질을 개선한다. 이렇게 열처리된 스프링강은 강도와 경도가 한층 강화된다. 그러나 재료의 인성이 저하되어 피로파손에는 취약하다. 특히 제품에 불연속부가 존재하여 응력 집중이 유발되는 경우에는 피로 누적에 의하여 예기치 못한 급작스런 파손이 발생하기 쉽다. 따라서 재료의 피로수명을 개선하기 위하여 후처리 공정으로 표면처리를 행한다.

쇼트피닝(shot peening)은 기계부품의 신뢰성 및 피로강도를 향상시키기 위한 냉간가공법으로서 스프링강의 후처리 공정에 사용이 증대되고 있다. 쇼트피닝의 효과는 주로 표면에 발생하는 압축잔류응력에 기인한다고 보고되고 있다.

쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력의 효과에 대한 연구는 주로 S-N 곡선에 대하여 피로수명의 향상 및 피로한도의 증가에 대하여 이루어지고 있다 [1~5]. 최근에는 압축잔류응력을 향상시키기 위한 방

법으로서 상온보다는 높고 템퍼링 온도보다는 낮은 온간 분위기에서 쇼트피닝을 하는 온간 쇼트피닝 가공법(warm shot peening)이 적용되기 시작하였다. 일본의 경우 현가장치용 스프링의 일부 생산 공정에서 온간 쇼트피닝 가공을 적용하고 있다.

본 연구에서는 열처리된 스프링강의 피로수명을 향상시키기 위한 쇼트피닝 가공법에 대하여 검토하였다. 상온에서 쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력과 조도를 동시에 향상시킬 수 있는 다단 쇼트피닝과, 열응력을 이용한 쇼트피닝 기법인 온간 쇼트피닝 가공의 효과를 실험을 통하여 검증하고 분석하였다.

2. 실험방법

2.1. 다단 쇼트피닝

2.1.1. 재료 및 시험편

사용된 재료는 자동차용 기계요소부품의 소재로 사용되고 있는 스프링강(SPS5A)을 열처리한 것으로 화학적 성분은 Table 1과 같다. 열처리조건은 Fig. 1과 같이 880°C에서 30분간 가열후 유중에서 퀴칭하고 500°C로 70분간 템퍼링하였다. Table 2는 스

†E-mail : dssim@kinst.ac.kr

Table 1. Chemical composition of SPS5A

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
SPS5A	0.61	0.27	0.84	0.01	0.01	0.83	0.03	0.12

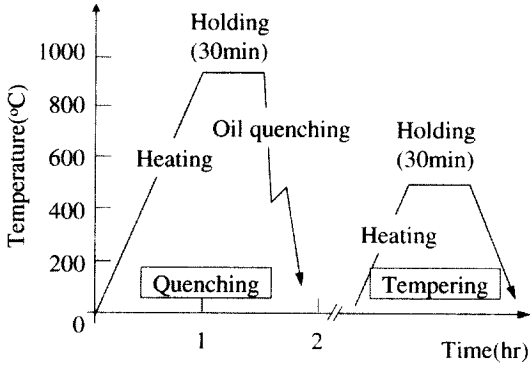


Fig. 1. Condition of heat treatment.

프링강의 열처리 전, 후의 기계적 성질이다.

회전굽힘 피로시험을 위한 시험편은 부하방향이 압연방향에 평행하도록 채취하여 Fig. 2와 같이 가공하였다.

2.1.2 쇼트피닝 가공 및 잔류응력측정

쇼트피닝 가공은 임펠러의 원심력을 이용하는 기계식 쇼트피닝기를 이용하였다. 지름 0.6 mm 쇼트볼을 투사하여 1차 가공을 한 후, 지름 0.4 mm의 쇼트볼로 투사하여 2단으로 처리하였다. 가공 조건은 Table 3과 같다. 이렇게 2단계의 가공을 행하는 것은 재료의 표면에 더 큰 압축 잔류응력을 발생하게 하기 위해서이다. 쇼트피닝의 가공량을 측정하는 아크하이트(arc height)는 알멘게이지로 측정하였다. 사용된 알멘스트립은 A형이며 1단에서 0.375mm의 아크하이트를 얻었으며, 2단에서는 0.42 mm의 아크하이트를 얻었다. 또한 커버리지는 1단에서는 90%, 2단에서는 98%로 나타났다.

시험편의 잔류응력 분포는 X-선 잔류응력 측정기

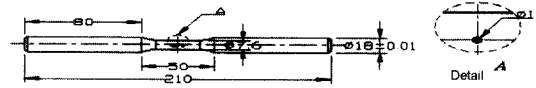


Fig. 2. Specimen of rotate bending fatigue.

(RIGAKU-MSF-2M)를 사용하였으며 계산법은 2θ-sin2φ법을 이용하였다. 잔류응력측정은 먼저 측정하고자하는 부위의 두께를 측정하고, 두께가 측정된 부위에서 표면층의 잔류응력을 측정한 후, 전해연마를 실시하며 반복하여 시험편의 표면부에서 중심부로 0.25 mm까지 측정하였다.

2.1.3 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. 회전굽힘 피로시험은 응력비(stress ratio, R)는 -1이며, 적용 응력의 증감은 추의 무게로 조절하며 실험하였다.

2.2 온간 쇼트피닝

2.1.1 재료 및 시험편

재료는 자동차 현기장치용 스프링에 사용되고 있는 스프링강(SAE 9254)을 사용하였다. 열처리 조건은

Table 3. Conditions of 2-step shot peening

Condition	1-step peening	2-step peening
Shot ball diameter	0.6 mm	0.4 mm
Impeller revolution speed	3,100 rpm	3,100 rpm
Impeller diameter	360 mm	360 mm
Time	8 min	6 min
Coverage	90 %	98 %
Arc height (Almen A strip)	0.375 mm	0.42 mm

Table 2. Mechanical properties of SPS5A

	Yield strength	Tensile strength	Fracture strength	Elongation	Hardness
Raw material	720 MPa	920 MPa	740 MPa	18.5 %	HV280
Heat treatment	820 MPa	1230 MPa	900 MPa	15.1 %	HV350

Table 4. Chemical composition of spring steel (SAE9254) (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 5. Mechanical properties of spring steel (SAE9254)

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

Table 6. Conditions of warm shot peening

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

현가장치용 스프링의 열처리 조건과 동일하게 하였다. 먼저 920°C에서 15분간 가열한 후 유중에서 쿨칭하여 마르텐사이트 조직을 얻었고, 다시 420°C로 30분간 템퍼링하여 제작하였다. 이 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 4 및 Table 5에 나타내었다.

시험편은 상온, 100°C, 200°C 및 300°C의 4가지 온도조건에서 쇼트피닝 처리된 것이다. Table 6은 쇼트피닝 가공 조건을 나타낸 것이다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 다단쇼트피닝

3.1.1 압축잔류응력의 변화

Fig. 3은 시험편의 표면에서 중심방향으로 0.25 mm 영역까지 측정된 잔류응력의 분포이다. 그림에서 보는 바와 같이 시험편의 표면에서 0.25 mm까지 측정된 결과, 최대 압축잔류응력은 1단과 2단 시험편에서 깊이 0.07 mm에서 최대값 543.3 MPa로 측정되었다. 그러나 시험편 표면에서의 압축잔류응력은 1단에서는 466.8 MPa, 2단에서는 519.7 MPa로 약 52.95 MPa 개선됨을 알 수 있다.

Tange 등[6]은 극 표면에 압축잔류응력의 값이 증

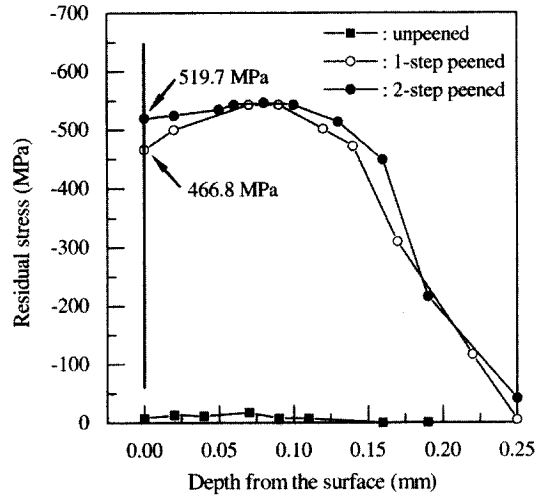


Fig. 3. Residual stress distribution with shot peening condition.

가할수록 재료의 피로강도가 증가됨을 보고하고 있다. 이의 연구에 의하면 재료의 피로수명은 균열이 표면에서 압축잔류응력이 최대가 되는 위치까지 전파하는 동안에 대부분을 차지하므로 극 표면의 압축잔류응력이 클수록 피로수명의 향상은 크다.

3.1.2 피로수명의 향상

회전 굽힘 시험은 파단 시까지 측정하여 피로강도를 얻었다. Fig. 4는 지름 1mm 원공을 가진 스프

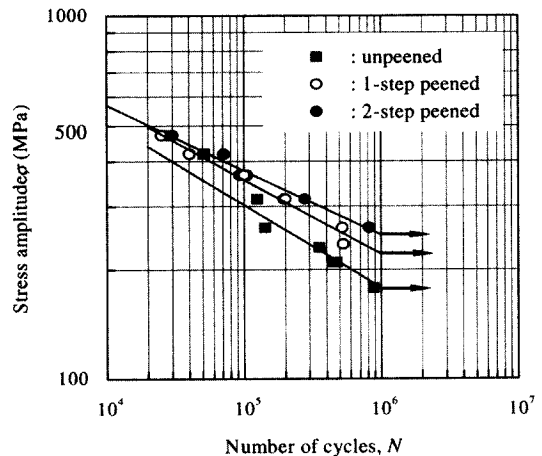


Fig. 4. S-N curve for SPS5A specimen with shot peening condition.

링강(SPS5A) 재료에 대한 시험결과로서 응력진폭과 피로수명의 관계를 나타내고 있다. 쇼트피닝가공을 한 재료는 가공을 하지 않은 재료보다 피로강도의 향상이 큼을 알 수 있다. 이는 쇼트피닝가공에 의하여 생성된 압축잔류응력이 시험편에 가해지는 인장응력을 완화시키기 때문이다. 또한 2단 쇼트피닝에 의한 S-N곡선은 1단 가공에 의한 것보다 피로강도가 향상되고 있다. 이는 2단 쇼트피닝가공에 의해서 극표면에 압축잔류응력이 높게 형성되기 때문이다.

Fig. 5는 10^6 사이클에서 쇼트피닝 가공에 의한 피로 한도를 쇼트피닝 가공을 하지 않은 재료의 피로강도에 대하여 무차원화 한 것이다. 그림에서와 같이 1단 및 2단 쇼트피닝 가공재의 피로강도는 가공하지 않은 것에 비하여 1단의 경우 1.2배, 2단의 경우 1.4배 증가함을 알 수 있다. 2단 쇼트피닝 가공한 시험편의 피로강도가 높은 것은 1단 쇼트피닝 가공에 의하여 재료표면에 압축잔류응력이 부여되고 2단 쇼트피닝 가공에 의하여 극표면에 압축잔류응력을 형성하게 함으로서 초기의 표면 균열 발생을 억제시켜 피로강도를 높이는 효과가 있기 때문이라 판단된다.

3.2 온간쇼트피닝

3.2.1 조도의 분포

상은 쇼트피닝 가공한 시험편과 온간 쇼트피닝 가공한 시험편의 표면조도의 변화를 관찰하기 위해 시험편의 표면부를 표면조도계(Surfcam, Tokyo Seimitsu)를 사용하여 굴곡의 최대값(Rmax)을 측정하였다. Fig. 6은 쇼트피닝 가공 온도조건에 따른 각 시험편의 조도 변화로 전자주사현미경(SEM)으로

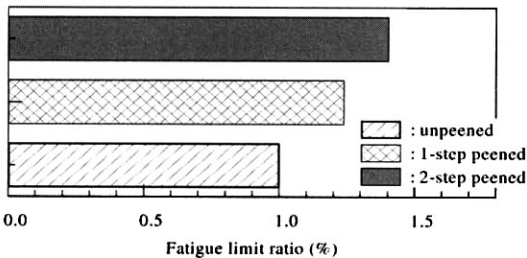


Fig. 5. Comparison of fatigue limit.

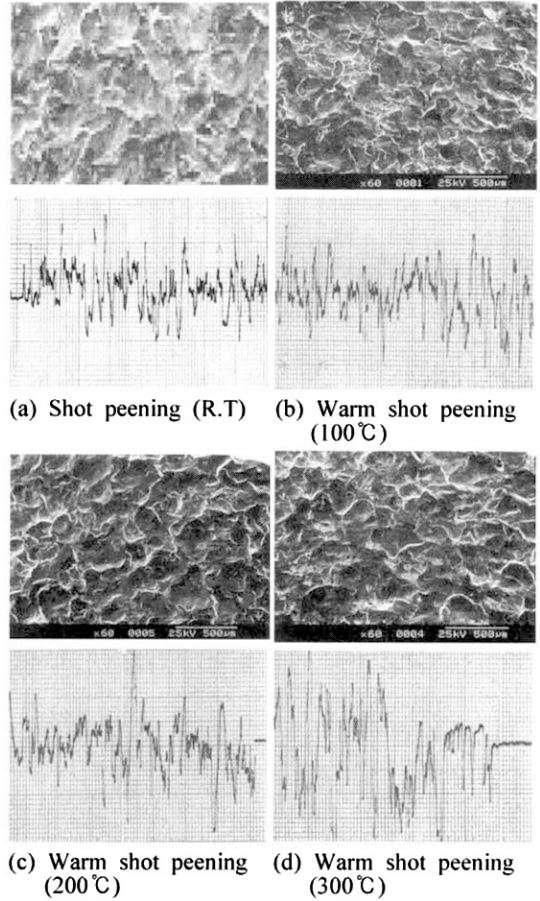


Fig. 6. Surface condition and roughness profile.

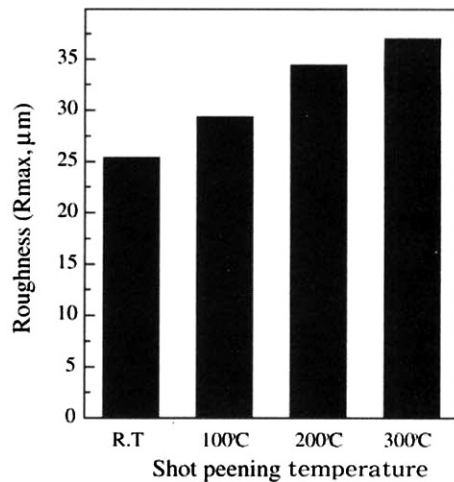


Fig. 7. Surface roughness with shot peening temperature.

표면을 60배로 확대하여 관찰한 것이다. 그리고 Fig. 7은 측정된 사진과 조도 변화를 Rmax로 나타낸 그래프이다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 상온에서 쇼트피닝 가공한 시험편에 비해 100°C, 200°C 및 300°C에서 온간 쇼트피닝 가공한 시험편의 표면 조도값 Rmax은 각각 15.7%, 35.4%, 45.7%의 증가를 나타내어, 상온의 쇼트피닝 가공에 비해 표면 조도의 상태가 악화되는 경향을 나타내었다. 이 현상은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 온간 상태가 되면서 표면의 조직이 상온에 비해 연화되어 쇼트볼과 시험편간의 충돌에 너지 에 의한 변형이 더 많이 일어날 수 있는 조건을 형성함으로써 표면에 더 깊은 자국을 형성하기 때문이다.

3.2.1 조도의 분포

Fig. 8은 상온쇼트피닝 가공과 100°C, 200°C 및 300°C 온간쇼트피닝 가공한 시험편에 발생된 압축잔류응력의 분포도이다. 그리고 Table 7는 극표면의

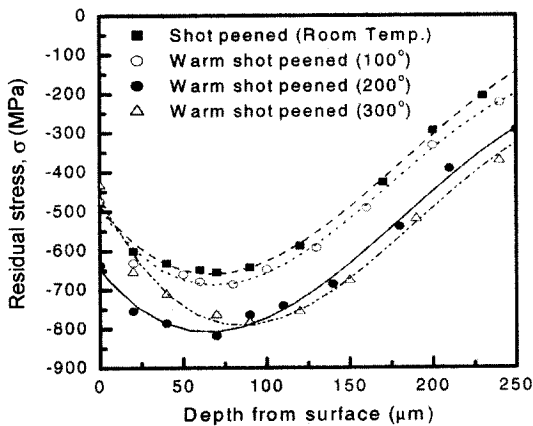


Fig. 8. Residual stress distribution of fatigue test specimen.

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% ↑

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 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.

5. 결 론

본 연구에서는 열처리된 스프링강의 피로특성을 개선하기 위한 방안으로 극 표면의 압축잔류응력을 높이기 위한 다단 쇼트피닝 가공과 온간 쇼트피닝 방법에 대하여 검토하였다.

두 가지 쇼트피닝 가공법에 대한 시험 평가 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 다단 쇼트피닝은 후처리 쇼트볼의 직경을 감소시켜 표면의 조도를 향상시키는 동시에 극표면에 더 큰 압축잔류응력을 유도한다.
2. 다단 쇼트피닝 결과 재료의 피로한도는 40% 향상되어 피로수명의 대폭적인 향상을 기대할 수 있다.
3. 온간 쇼트피닝 결과 200°C에서 쇼트피닝 가공한 시험편의 표면 압축 잔류응력이 가장 높았고 300°C에서는 오히려 표면 압축잔류응력이 감소하였다.
4. 온간 쇼트피닝 가공에서 온도가 증가할 수록 표면의 조도가 감소하였다. 이는 온도가 증가 할수록 재료의 연화가 일어나기 때문이다.
5. 열처리된 스프링강의 후처리 공정을 최적화하기 위해서는 최적의 온간 쇼트피닝 온도를 얻고, 다단 쇼트피닝 가공으로 표면조도를 향상시키는 동시에 극 표면의 압축잔류응력을 높이는 것이 재료의 피로수명을 높일 수 있다.

참고문헌

1. Lee J. K. and Kim J. K., Influence of Residual Stress Due to Shot Peening on Fatigue Strength and Life, Transaction of KSME A, 21(9) (1997), 1498-1506.
2. Lee S. H. and Kim H. S., The Effect of 2-Step Shot Peening on the Fatigue Behavior of Spring Steel, Transaction of KSME A, 23(1) (1999), 140-147.
3. Yozo, K., Shinzaburo, T. and Masaki, K., Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Alloy at Elevated Temperatures, Journal of The Society of Materials Science in Japanese, 45(1) (1996), 43-47.
4. Natto, K., Ochi, T., Takahashi, T. and Suzuki, T., Effect of Shot Peening on the Fatigue Strength of Carburized Steels, Proc. The 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, (1990), 519-526.
5. Lyu, S. K., Inoue, K. and Kato, M., Effect of Surface Treatment on the Strength of Carburized Gear, Proc. International Gearing Conference, London, (1994), 183-188.
6. Tange, A. and Takamura, N., Relation between Shot-peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation life in Spring steel, Proc. The 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, (1990) 243-253.