

## 2단쇼트피닝에 의한 피로특성의 향상

이승호\*, 심동석

경기공업대학 정밀계측과

## The Improvement of Fatigue Properties by 2-step Shot Peening

Seung-Ho Lee\*, Dong-Suk Shim

Department of Precision Measurement Kyonggi Institute of Technology,  
 2121-3 Jungwangdong, Siheung, Kyungi 429-792, Korea

(Received 20 October 2003 ; accepted 29 November 2003)

### Abstract

In this study, to investigate the effects of 2-step shot peening at the surface of spring steel, tests are conducted on spring steel and shot peened specimens. Various tests are accomplished to evaluate mechanical properties influenced by shot peening process, and fatigue tests are also performed to evaluate the improvement of fatigue strength. And then the residual stresses are examined. The mechanical properties of material did not change so much by shot peening. However, the fatigue strength of notched specimen remarkably increased. In the case of 1-step shot peening, fatigue strength increased by about 20% than unpeened specimen. Especially, in the case of 2-step shot peening, fatigue strength increased by about 40%, because the residual compressive stress at surface was higher than that of 1-step shot peened specimen. The fatigue strength and life are closely related to the value and position of maximum compressive residual stress by shot peening.

*Keywords* : Surface treatment(표면처리), 2-step shot peening(2 단쇼트피닝), Compressive residual stress(압축잔류응력), Hardness(경도), Fatigue strength(피로강도), Fatigue life(피로수명)

## 1. 서 론

기계 부품, 수송기계류, 구조물 등에서 일어나는 파괴는 나사, 키홈, 구멍 등의 응력 집중부에서 발생한다<sup>1)</sup>. 노치에 의한 피로는 기계·구조물 전체의 안전성에 매우 중요하므로, 피로강도와 수명을 향상시키기 위해 여러 가지 열처리 및 표면처리 방법 등이 제시되고 있다. 이중 쇼트피닝은 피로강도 및 수명향상에 있어서 대단히 효과적인 표면처리법<sup>2,3)</sup>으로 자동차 및 항공기 부품의 취약부 등에 많이 사용되고 있으며 보다 광범위한 영역으로 이의 사용이 확대되고 있다.

쇼트피닝의 효과는 표면에 발생하는 압축잔류응력에 기인한다고 보고 되고 있다. Wohlfahrt<sup>4)</sup>는 쇼트피닝 후 압축잔류응력에 대한 연구결과에 있어서

쇼트피닝에 의한 압축잔류응력은 표면에서 최대 값을 갖는 것이 아니라 표면 아래에서 최대 값을 형성하며 최대 압축잔류응력의 양은 쇼트피닝 가공조건에 따라 향상시킬 수 있다고 하였다. 또한 Tange, Takamura<sup>5)</sup>와 Natto, Ochi<sup>6)</sup>는 쇼트피닝의 압축잔류응력과 피로 크랙진전과의 관계를 연구한 결과 피로 균열 진전 수명에 있어서 표면에 형성된 압축잔류응력은 매우 중요한 인자이며 최대 압축잔류응력이 표면에 가까울수록 피로수명이 증가함을 연구하였다. Iida, Tosha<sup>7)</sup>와 Lyu, Inoue, Kato<sup>8)</sup>의 연구에서 쇼트피닝 처리한 후에 최대 압축잔류응력을 극표면으로 노출시키기 위해 표면연마 처리를 하여 압축잔류응력 층을 표면으로 노출시킬수록 피로 강도와 수명이 증가됨을 보고하였다.

이상의 연구에서와 같이 쇼트피닝의 효과는 표면 아래에 생성되는 최대 압축잔류응력의 크기와 극표면에 잔류된 압축잔류응력의 크기에 의하여 영향을

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

받는다. 따라서 극표면으로 압축잔류응력을 끌어내기 위한 쇼트피닝 가공방법에 대한 연구는 대단히 중요하다. 국내 산업체에서는 자동차부품과 항공기 부품 회사에서 쇼트피닝 가공을 하고는 있으나 쇼트피닝에 대한 체계적인 연구와 데이터가 극히 일부에 국한되어 있는 상태이다.

본 연구에서는 극표면에 보다 높은 압축잔류응력을 생성시키기 위한 방법으로 2단 쇼트피닝을 제안하고 이의 가공방법이 재료의 기계적 성질에 미치는 효과를 규명하기 위하여 1단 및 2단 쇼트피닝을 행하고 재료의 기계적 성질 평가 및 피로평가를 행하였다.

## 2. 시험방법

### 2.1 재료 및 시험편

사용된 재료는 스프링강(SPS5A)을 열처리한 것으로 이의 화학적 성분은 표 1과 같다. 열처리는 880°C에서 30분간 가열후 유중에서 퀴칭(quenching)하고 500°C로 70분간 템퍼링(tempering)하였다. 표 2는 스프링강의 열처리 전, 후의 기계적 성질이다.

인장시험편은 KS B0801규격의 제4호 시험편을 사용하였고, 시험편은 부하방향이 압연방향에 평행하도록 채취하였다.

S-N 곡선을 위한 피로시험편은 인장 시험편과 동일한 방향으로 채취하였으며 중앙에 지름 1 mm의 관통 노치를 가공하였고 이 형상은 그림 1과 같다.

### 2.2 쇼트피닝 가공 및 잔류응력 측정

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 표 3과 같다. 쇼트피닝에 의한 가공량을 측정하는 아크하이트(arc height)는 알멘게이지로 측정<sup>9)</sup>하였다. 사용된 알멘스트립은 A형이며 1단에서 0.375 mm의 아크하이트를 얻었으며, 2단에서는 0.42 mm

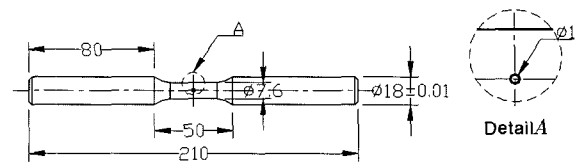


Fig. 1. Specimen of rotate bending fatigue.

Table 3. Conditions of shot peening

Content	1-step peening	2-step peening
Shot ball diameter	0.6 mm	0.4 mm
Impeller velocity	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 4. Measuring condition of residual stress

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

의 아크하이트를 얻었다. 또한 커버리지는 1단에서는 90%, 2단에서는 98%로 나타났다.

시험편의 잔류응력 분포는 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKU-MSF-2M)<sup>10)</sup>를 사용하여 표 4와 같이 압축잔류응력을 측정하였으며, 이때 계산법은 2 $\theta$ -sin<sup>2</sup> $\psi$ 법<sup>11)</sup>을 이용하였다.

잔류응력측정은 먼저 측정하고자하는 부위의 두께를 측정하고, 두께가 측정된 부위에서 표면층의 잔류응력을 측정한 후, 전해연마를 실시하며 반복하여 시험편의 표면부에서 중심부로 0.25 mm까지 측정하였다.

Table 1. Chemical composition of SPS5A (wt%)

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

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 5. Material properties of SPS5A after shot peening

Material	Yield strength	Tensile strength	Fracture strength	Elongation (%)
unpeened	820 MPa	1230 MPa	960 MPa	15.1
1step peened	820 MPa	1230 MPa	975 MPa	14.0
2step peened	835 MPa	1235 MPa	1100 MPa	12.2

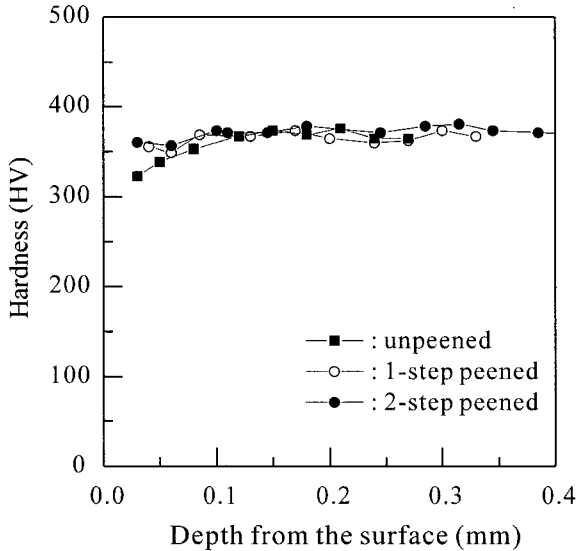


Fig. 2. Hardness distribution.

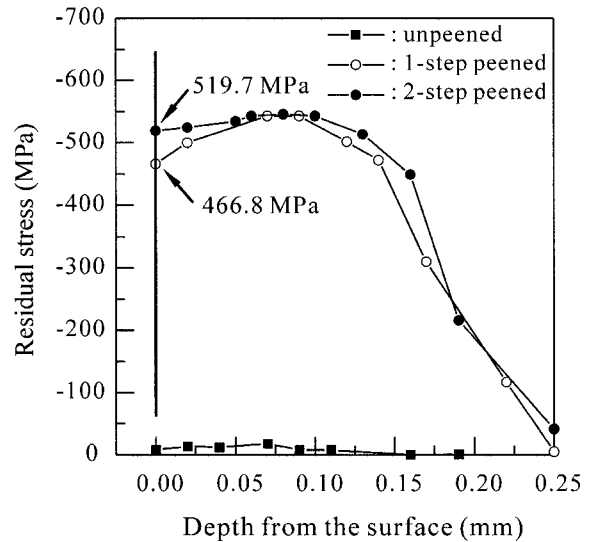


Fig. 3. Residual stress distribution.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 기계적 성질의 변화

쇼트피닝 가공 후의 기계적 성질의 변화는 표 5와 같다. 표에서 보는 바와 같이 2단쇼트피닝을 할 경우 단면수축률은 조금 감소함을 알 수 있다. 이는 인장력에 대한 단면수축률이 압축잔류응력에 의해 감소되기 때문으로 사료된다.

그림 2는 시험편의 깊이방향으로 경도를 측정하여 나타낸 것이다. 그림에서와 보는 바와 같이 쇼트피닝을 한 시험편의 표면 경도가 조금 향상되었다. 이는 쇼트볼이 표면에 충돌하면서 시험편의 표면에 소성변형을 일으켜 표면을 경화시켰기 때문이다. 그러나 이의 변화는 무시할 만큼 미소하다.

#### 3.2 쇼트피닝에 의한 잔류응력 분포

그림 3은 표면에서 중심방향으로 0.25 mm 영역까지 측정된 잔류응력의 분포이다. 그림에서 ■점은 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편의 잔류응력분포이고, ○점은 1단 쇼트피닝, ●점은 2단 쇼트피닝 가공한 시험편의 압축잔류응력 분포이다.

그림에서 보는바와 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 52.9 MPa 개선됨을 알 수 있다.

Tange, Takamura<sup>5)</sup>는 극 표면에 압축잔류응력의 값이 증가할수록 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.

본 실험결과에서도 같은 경향으로 나타나고 있으며, 압축잔류응력의 생성이 극표면에서 최대가 되도록 가공조건을 2단 쇼트피닝으로 처리하면 바람직 할 것으로 예상된다.

#### 3.3 S-N 곡선에 의한 피로강도 평가

회전 굽힘 시험은 파단 시까지 측정하여 피로강도를 얻었다. 그림 4는 지름 1 mm 원공을 가진 스프링강(SPS5A) 재료에 대한 실험결과로서 응력진폭과 피로수명의 관계를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 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-N 곡선은 1단

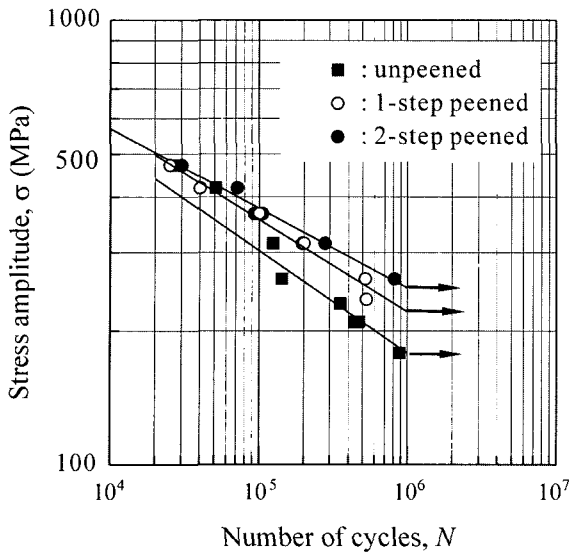


Fig. 4. S-N curve for specimen with hole on SPS5A specimen.

가공에 의한 것보다 피로강도가 향상되고 있다. 이는 2단 쇼트피닝가공에 의해서 극표면에 압축잔류응력이 높게 형성되기 때문이다.

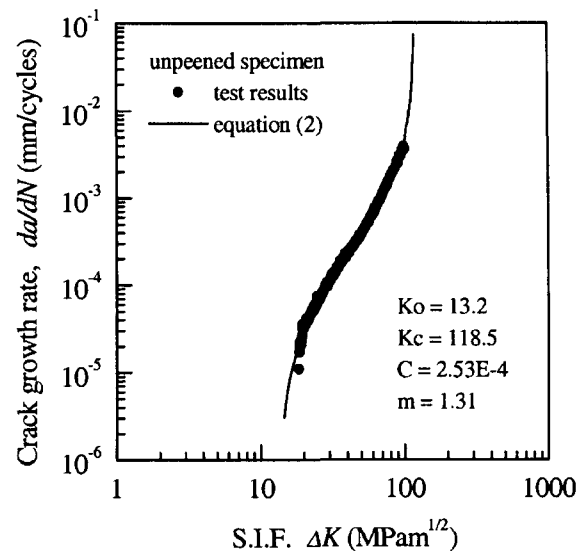
10<sup>6</sup> 사이클에서 쇼트피닝 가공에 의한 피로 강도와 쇼트피닝 가공을 하지 않은 재료의 피로강도에 대하여 비교하면 1단 및 2단 쇼트피닝 가공재의 피로강도는 가공하지 않은 것에 비하여 1단의 경우 1.2배, 2단의 경우 1.4배 증가함을 알 수 있다. 2단 쇼트피닝 가공한 시험편의 피로강도가 높은 것은 1단 쇼트피닝 가공에 의하여 재료표면에 압축잔류응력이 부여되고 2단 쇼트피닝 가공에 의하여 극표면에 압축잔류응력을 형성하게 함으로서 초기의 표면 균열 발생을 억제시켜 피로강도를 높이는 효과가 있기 때문이다.

2단 쇼트피닝에 의한 균열진전의 발생억제효과는 스프링강의 균열진전특성에 대한 평가결과에서 정량적으로 평가할 수 있다. Kim과 Shim<sup>12)</sup>은 균열진전거동의 전과정을 묘사할 수 있는 새로운 균열진전식을 보고하였다. 이들이 보고한 식은 균열진전의 발생영역뿐만 아니라 정적인 파손영역까지를 평가할 수 있는 식으로 다음과 같다.

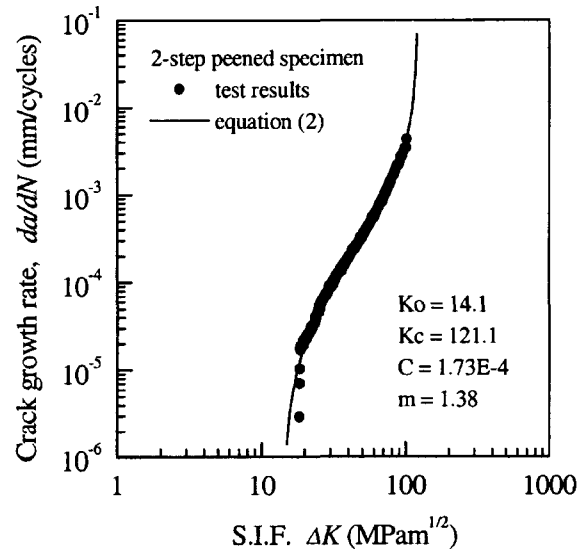
$$\frac{da}{dN} = Z \frac{C(\Delta K - K_o)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (1)$$

여기서  $K_c$ 는 파괴인성이고  $K_o$ 는 응력확대계수범위의 초기값으로  $\Delta K = K_o$ 에서  $da/dN \approx 0$ 이다. 그리고  $C$ 와  $m$ 은 재료상수이다. 이 식에서  $Z$ 는 랜덤변수로 균열진전의 변동성을 나타내며 균열길이 및 응력상태에 관계없는 변수이다.

Fig. 5(a)와 (b)<sup>13)</sup>는 스프링강(SPS5A)의 균열진전



(a) unpeened specimen



(b) Shot-peened specimen

Fig. 5.  $da/dN - \Delta K$  curves of spring steel.

특성을  $da/dN - \Delta K$  그래프의 형태로 나타낸 것이다. 그림에서 각 점들은 균열진전의 실험결과를 나타내고 있으며 실선은 식 (1)에 의하여 평가된 결과를 나타낸 것이다.

균열진전 거동은 그림에서 보는 바와 같이 완만한 S자 형태의 비선형성을 이루고 있으며 이는 식 (1)에 의하여 묘사될 수 있음을 보이고 있다. 따라서 피로균열진전에 대한 쇼트피닝 효과는 식 (1)의 상수 값을 비교함으로써 정량적으로 평가할 수 있다.

먼저 균열의 진전이 시작되는  $K_o$ 의 값에 대하여는 2단 쇼트피닝처리를 한 시험편이  $0.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  (약 7%) 높은 값을 나타내고 있다. 이는 시험편에 발생한 압축잔류응력이 균열의 열림을 억제하기 때

문으로 생각된다. Hammand와 Meguid<sup>14)</sup>는 쇼트피닝의 압축잔류응력에 따른 균열진전에 대한 연구에서 압축잔류응력으로 인하여 표면부의 미시균열의 진전이 억제된다고 보고하였다.

재료의 파괴인성을 나타내는  $K_c$  값도 쇼트피닝처리를 한 시험편에서 높게 나타나고 있으나 이 값의 차이는 2% 정도이다. 이는 정적인 파손 영역에서는 쇼트피닝의 효과가 적음을 의미한다. 재료의 정적인 파손은 시험편 내부의 균열진전력에 의하여 지배적인 영향을 받으므로 시험편의 표면에 발생한 압축잔류응력의 영향을 크게 받지 않는다. 따라서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력은 균열진전의 초기에 많은 영향을 미쳐서 노치재의 피로강도를 증가시킨다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 쇼트피닝에 의하여 발생하는 압축잔류응력을 극표면으로 끌어내기 위한 방법으로 2단쇼트피닝을 제시하였다. 이의 효과를 검증하기 위하여 스프링강과, 1단 및 2단 쇼트피닝된 시험편에 대하여 기계적 성질을 평가하기 위한 시험을 행하였다. 그리고 재료의 피로특성 개선에 대한 효과를 검증하기 위해서 피로시험을 행하고 이를 평가하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 항복강도, 인장강도, 경도 등의 기계적 성질은 2단 쇼트피닝 가공 전후에도 변화가 미소하였다.

(2) 쇼트피닝된 시험편에서 최대 압축잔류응력은 543.3 MPa로 동일하였다. 그러나 극표면에서의 압축잔류응력은 1단의 경우 466.8 MPa, 2단에서 519.7 MPa로 나타났다.

(3) 피로 거동에 미치는 쇼트피닝 효과에 있어서 1단 및 2단 쇼트피닝 가공된 노치 시험편의 피로강도는 1단에서 1.2배, 2단에서 1.4배 향상되었다.

(4) 극표면의 압축잔류응력이 증가되면 균열발생이 시작되는 응력확대계수범위  $K_c$  값이 증가하여 균열의 발생을 억제하게 된다. 이는 노치재의 피로강도를 높이는 주요인으로 작용한다.

#### 참고문헌

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, (1964) 323-339.

2. J. K. Xenophon, Shot Peening Viable Method to Extending Component Life, SAE Technical Paper Series 891932, (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, 27 (1982) 73-108.
4. H. Wohlfahrt, The Influence of Peening Conditions on the Resulting Distribution of Residual Stress, Proc. The 2nd International Conference on Shot Peening, Chicago, (1984) 316-331.
5. A. Tange, N. Takamura, 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.
6. K. Natto, T. Ochi, T. Takahashi, T. Suzuki, Effect of Shot Peening on the Fatigue Strength of Carburized Steels, Proc. The 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, (1990) 519-526.
7. K. Iida, K. Toshi, Fatigue Strength and Residual Stress Distribution of the work-softened steel by Shot Peening, Proc. The 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, (1990) 233-242.
8. S. K. Lyu, K. Inoue, M. Kato, "Effect of Surface Treatment on the Strength of Carburized Gear", Proc. International Gearing Conference, London, (1994) 83-188.
9. H. J. Plaster, Blast Cleaning and Allied Processes, The Garden City Press, London, (1973).
10. Riga-Ku., X-ray Stress Analyzer Manual, (1991) 9-17.
11. E915, Standard Method for Verifying the Alignment of X-ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement, Annual Book of ASTM Standard, (1993).
12. J. K. Kim, D. S. Shim, The Variation in Fatigue Crack Growth due to the Thickness Effect, *International Journal of Fatigue*, 22 (2000) 611-618.
13. H. S. Kim, S. H. Lee, 스프링강의 피로거동에 미치는 2단 쇼트피닝의 효과, 대한기계학회논문집A, 23(1) (1999) 140-147.
14. D. W. Hammond, S. A. Meguid, "Crack Propagation in the Presence of Shot-peening Residual Stresses, Engineering Fracture Mechanics, 37(2) (1990) 373-387.