

## 쇼트피이닝 가공 스프링강의 압축잔류응력이 피로균열 진전거동에 미치는 영향

박 경 동\*

부경대학교 기계공학과\*

### A Study on the Effect of Compressive Residual Stress on Fatigue Crack Propagation Behavior of the Shot-peened Spring Steel

Keyoung-Dong Park\*

\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**Abstract** : The lightness of components required in automobile and machinery industry is requiring high strength of components. In particular, manufacturing process and new materials development for solving the fatigue fracture problem attendant upon high strength of suspension of automobile are actively advanced. In this paper, the effect of compressive residual stress of spring steel(JISG SUP-9) by shot-peening on fatigue crack growth characteristics in high temperatures(100℃, 150℃, 180℃) was investigated with considering fracture mechanics. So, we can obtain followings.  
(1)Compressive residual stress decreases in high temperature, that is, with increasing temperature.  
(2)The effect of compressive residual stress on fatigue crack growth behavior in high temperature increases below  $\Delta K=17\sim 19\text{MPa}$   
(3)It was investigated by SEM that the constraint of compressive residual stress for plastic zone of fatigue crack tip was decreased in high temperature as compared with room temperature.

**Key words** : Compressive residual stress(압축잔류응력), Fatigue crack propagation(피로균열진전), Spring steel(스프링강), Shot-peening(쇼트피이닝), Striation(스트라이에이션)

### 1. 서론

기술산업에서 요구되는 부품의 경량화는 소비자로부터 요구되는 필수적인 사항으로서 기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차 등에 필요한 철강소재 분야에서 활발히 연구되어지고 있다.<sup>1)</sup>

특히 철강소재분야에서 대체 재질 개발과 재료의 고응력화에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 부품의 설계시 고려되는 금속의 고강도화는 부품의 경량화를 실현시킴으로써 재료와 연료절감이라는 잇

점을 갖고 있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중, 진동조건 등에 따라 차이는 있지만 금속표면이나 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에도 균열이 개시되고 서서히 안정성장하여 최종적으로 금속파괴되는 현상이 발생된다. 이와 같이 금속에서 발생하는 피로파괴현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재해를 초래할 수 있으므로 현재와 같이 대형화 된 산업기술사회에 피로파괴 방지기술은 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

쇼트피이닝가공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축 잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시키

\*To whom correspondence should be addressed.  
parkkd@pknu.ac.kr

므로 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시키고, 균열의 안정성장을 지연시키어 피로수명을 향상하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.<sup>2-4)</sup>

본 논문에서는 실험적으로 어려운 스프링강(JISG SUP-9)의 표면을 쇼트피닝가공하여 형성된 압축잔류응력을 정성적으로 조사하고, 전기유압서보 피로시험기에서 고온 환경하의 피로균열진전거동에서의 피로균열 안정성장구간과 피로균열진전이 정지되는 하한계 응력확대계수를 정식화하고 피로균열 진전 파면 양상을 관찰하였다.

## 2. 시험편 및 시험방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 철도차량 및 자동차 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 이 재료의 화학적 성분을 Table 1에 표시하였고, Table 2는 시험편 재료의 기계적 성질로서 Fig. 1과 같은 조건에서 열처리한 후의 결과이다. 기계적 성질을 시험하기 위한 인장 시험편은 KSB-08의 규격4로 가공하였다.

피로균열 진전거동을 관찰하기 위한 CT시험편은 두께 12.5mm로 하였으며, 시험편의 채취는 열간 압연된 플랫바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 시험편의 열처리는 Fig.1과 같은 조건으로 970℃에서 20분간 가열한 후 유중에서 담금질하여 정상적인 마르텐사이트 조직이 형성되었고, 이 시험편을 다시 490℃에서 80분간 뜨임 하였으며, 정상적인 소르바이트 조직의 확인은 금속 현미경(Versmet-2)에서 400배로 확대한 현미경 조직사진에 의하여 확인되었다. 스프링강을 열처리 후 쇼트피닝 가공을

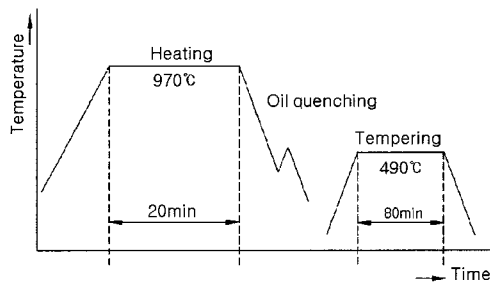


Fig. 1 Condition of heat-treatment

Table 1 Chemical composition of specimen (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
JISG SUP-9	0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88	-

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Tensile strength (MPa)	Hardness(HrC)		Yield strength (MPa)
		After quenching	After tempering	
JISG SUP-9	1226	55	47	1079

Table 3 Condition of shot-peening

Impeller diameter (mm)	Shot velocity (rpm)	Shot Ball diameter (mm)	Arc height (mm)	Coverage (%)
490	2200	0.8	0.49	95

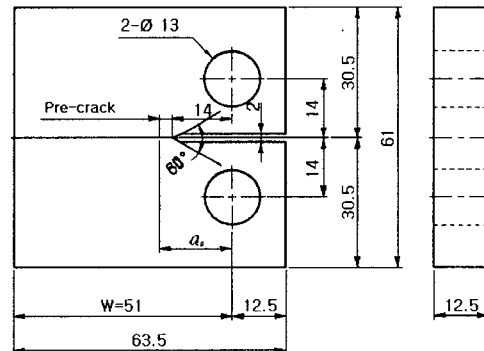


Fig. 2 Dimension of CT-specimen

실시해주면 그 굽힘 강도가 45kg/mm<sup>2</sup>으로 열처리만을 실시한 후의 강도인 18kg/mm<sup>2</sup>에 비해 강도가 매우 향상됨을 알 수 있다.

시험편의 형상과 치수는 Fig. 2와 같다.

### 2.2 시험편의 압축잔류응력

2.1항과 같이 완성된 CT 시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 고속회전 터어빈식 쇼트피닝기로 Table 3과 같은 쇼트피닝 조건 하에서 쇼트피닝을 실행하였으며 표면에 형성된 압축잔류응력은 Fig.3과 같이 최대값이 -730MPa이 표면으로부터 110μm 깊이에 형성되었다.<sup>6)</sup>

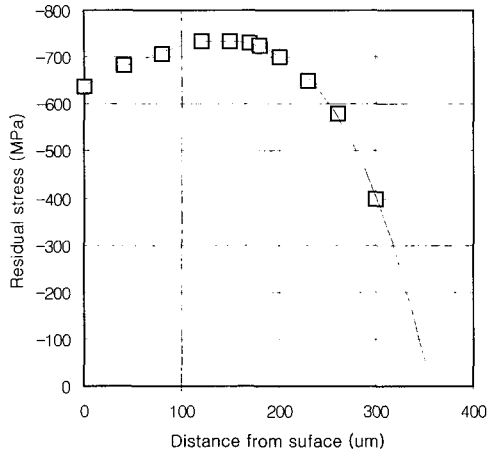


Fig. 3 Compressive residual stress distributions produced by shot-peening

### 2.3 실험방법

완성된 CT시험편의 피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기(INSTRON 8501)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용하중파형은 정현파로 하고 응력비는 R=0.3, 주파수는 10Hz로 하였으며 피로균열 길이측정은 INSTRON사의 고온 클립게이지를 이용한 컴프라이언스법으로 ASTM E647-95a 규정에 따라 상온환경(25°C)과 고온환경(100°C, 150°C, 180°C)에서 실험하였다. Fig. 4는 실험장치의 구성도이다.

시험편의 초기균열은 초기응력확대계수 범위 ΔK를 10MPa로 하여 초기 ΔK의 95% 범위내에서 ΔK 증가법으로 진행하였고 초기균열진전길이 3~5 mm 지점에서 다시 95% 범위내의 ΔK 저감법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다. 본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK의 계산식은 식 (1)과 같다.<sup>7)</sup>

$$\Delta K = \frac{\Delta P \sqrt{a}}{BW} \left\{ 29.6 - 185.5 \left( \frac{a}{W} \right) + 655.7 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 1017.0 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 638.9 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \right\} \quad (1)$$

여기서 ΔP는 하중진폭변위, a는 하중중심에서의 균열길이, B는 시험편의 두께, W는 하중중심에서의 시험편 길이가 된다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

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

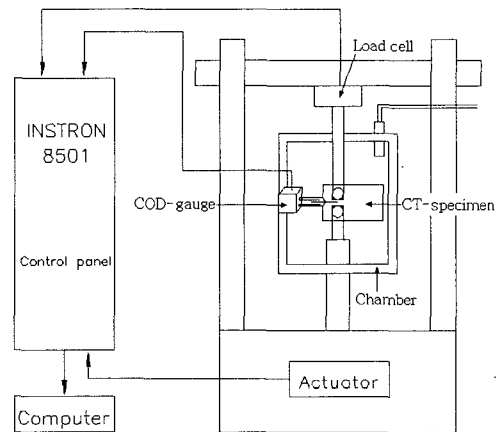


Fig. 4 Schematic diagram of low temperature fatigue testing machine

CT시험편의 쇼트피닝가공에 의한 압축잔류응력의 측정은 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKN-MASF2M)로 Table 4와 같은 조건하에서 계산방법 2θ-sin2∅법을 적용하였다. 압축잔류응력의 깊이별 조사는 표면으로부터 20~30μm 깊이단위로 300~350μm 깊이까지 측정하였다.

그리고, 피로균열 진전과 단면의 양상은 주사식 전자 현미경(SEM, HITACHI S-2150)으로 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 시험편의 압축잔류응력

Fig. 5는 상온(25°C)에서의 압축잔류응력의 분포와 고온환경(100°C, 150°C, 180°C)에서 실험 후 변화된 압축잔류응력의 분포를 나타내고 있다. 여기서 압축잔류응력은 상온환경에 비하여 100°C 환경에서 45MPa(6%), 150°C 환경에서 88MPa(12%), 180°C 환경에서 103MPa(14%)가 소멸됨으로서 온도

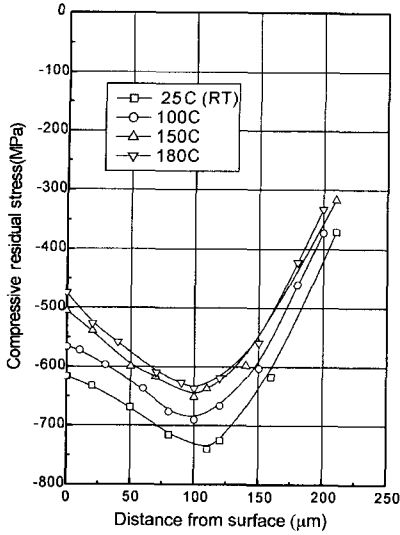


Fig. 5 Compressive residual stress distributions of specimen surface

가 상승할수록 압축잔류응력이 감소되는 것이 관찰되었다.

### 3.2 피로균열 진전거동

Fig. 6은 균열진전길이  $a$ 와 하중가진횟수  $N$ 과의 관계 그래프이며, 피로진전균열길이  $a=32\text{mm}$ 에서 피로수명은 상온환경에 비하여 온도증가에 따른 압축 잔류응력의 감소 방향으로  $100^\circ\text{C}$ 에서 44%,  $150^\circ\text{C}$ 에서 50%,  $180^\circ\text{C}$ 에서 64%가 감소되었다.

Fig. 7은 응력확대계수범위  $\Delta K$ 와 피로균열 진전 속도  $da/dN$ 와의 관계이며, 여기서 응력비  $R=P_{\min}/P_{\max}$ 는 0.3이 된다. 그리고 피로균열 진전곡선에서 직선부분이 중간속도영역이며 피로균열진전이 정지되는 하한계 응력확대계수범위는 수직선이 된다. 중간속도영역은 다음 식 (2)와 같다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

여기서  $C$ 는 재료상수이며  $m$ 은 피로균열진전지수가 된다.

Table 5는 중간속도 영역에서 응력확대계수범위  $\Delta K$ 와 피로균열 진전속도  $da/dN$ 범위를 구하였으며,  $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{m}$ 일 때 피로균열진전속도는 상온 환경에 비하여 고온환경인  $100^\circ\text{C}$ 에서 12%,  $150^\circ\text{C}$ 에서 21%,  $180^\circ\text{C}$ 에서 35%가 증가되었다.

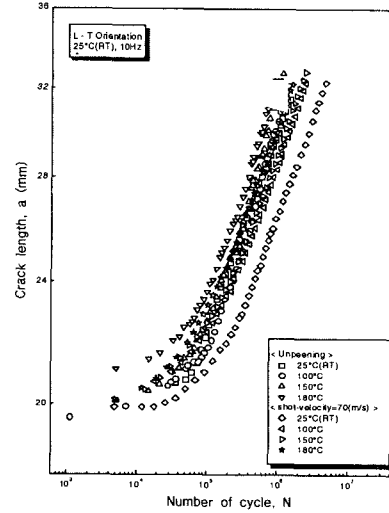


Fig. 6 Relation between crack length and number of cycle

Table 5 Experimental constants by  $da/dN = C(\Delta K)^m$  for the fatigue crack growth

	$\Delta K$ Range (MPa $\sqrt{m}$ )	$da/dN$ Range (mm/cycle)
RT 25 $^\circ\text{C}$	$8.39 \leq \Delta K \leq 17.22$	$1.80 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.55 \times 10^{-5}$
100 $^\circ\text{C}$	$6.26 \leq \Delta K \leq 18.12$	$1.73 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.29 \times 10^{-5}$
150 $^\circ\text{C}$	$5.83 \leq \Delta K \leq 17.68$	$1.66 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.04 \times 10^{-5}$
180 $^\circ\text{C}$	$5.37 \leq \Delta K \leq 17.59$	$1.69 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.07 \times 10^{-5}$

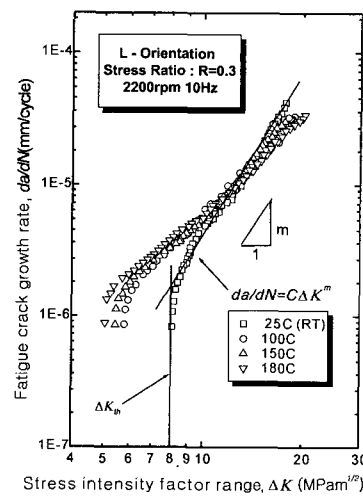


Fig. 7 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range in shot-peened

### 3.3 C와 m의 관계

Fig. 8은 C와 m의 관계그래프이고, Fig. 9는 C와 m값의 온도 의존성을 보여주고 있으며, 100℃에서의 온도의 급격한 변화가 있다. 재료상수 C의 값은 온도의 증가에 따라 증가하는 경향이고 피로균열진전 지수 m값은 감소하는 경향을 보여주고 있다. Table 6에 고온에서의 C와 m값의 실측정치를 나타내었다.

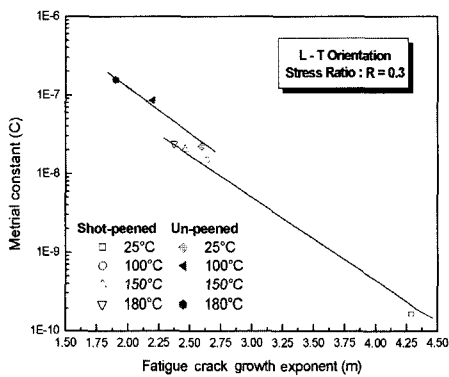


Fig. 8 Correlation between C and m in Paris law  $da/dN = C(\Delta K)^m$

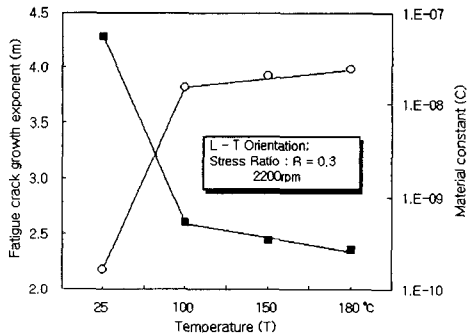


Fig. 9 Relation between dependence on temperature and C, m in Paris law  $da/dN=C(\Delta K)^m$

Table 6 A Metrial Constant and Fatigue crack growth exponent in high temperature

	C	m
RT		
25℃	$1.648 \times 10^{-10}$	4.289
100℃	$1.501 \times 10^{-8}$	2.639
150℃	$2.041 \times 10^{-8}$	2.462
180℃	$2.371 \times 10^{-8}$	2.372

### 3.4 고온에서 쇼트피닝재와 언피닝재의 피로균열진전거동 비교

Fig. 10은 쇼트피닝을 하지 않은 언피닝 시편과 쇼트 피닝 처리한 시편을 상온(25℃)환경과 고온환경(100℃, 150℃, 180℃)에서 실험하여 비교 도시하였다. 여기에서 온도증가에 따라 언피닝 시편의 경우는 상온과 100℃사이에서 급격한 피로수명감소현상과 100℃이상의 온도증가에서는 비교적 완만한 비례현상의 피로수명 감소를 보여주고 있다. 쇼트피닝 시편의 피로수명이 언 피닝시편에 비하여 상온 25℃에서 98%, 100℃에서 39%, 150℃에서 63%, 180℃에서 54%가 증가되었다.<sup>8)</sup>

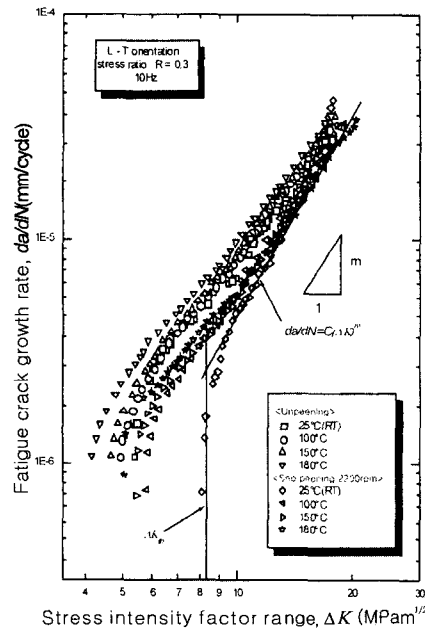


Fig. 10 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range in shot-peened and un-peened

### 3.5 피로균열진전 파면의 양상

CT시험편의 피로균열진전 파면의 양상을 관찰하기 위해서 압축잔류응력이 부여되지 않은 언피닝 시편의 상온(25℃)실험 파단면과 본 실험의 쇼트피닝 가공된 시편에 대한 고온환경 실험 파단면을 비교하였다.

Photo. 1은 언피닝 시편의 상온환경실험파단면과 쇼트피닝 시편의 상온환경 실험 및 쇼트피닝

시편의 고온환경 실험에 대한 피로균열진전 파면의 실물사진이고 Photo. 2~4는 균열선단표면부의 30배 확대 전자현미경 사진이다. 언피이닝 시편의 파면과 쇼트피이닝 시편의 파면양상은 현저한 차이를 보이고 있으며, 이 현상은 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전 과정에서 균열선단 소성영역을 구속하므로 피로균열진전이 지연되는 현상을 관찰할 수 있으나 쇼트피이닝 시편의 상온환경 피로균열진전 파면과 고온환경 피로균열진전 파면의 양상은 고온환경 피로균열진전에서 균열선단 소성영역에 대한 구속력이 감소하고 있는 것이 균열선단 표면부에 관찰되었다.<sup>9)</sup>

Fig. 11은 파단면을 미시적으로 관찰하기 위한 SEM 사진촬영 지점이고, Photo. 5~7은 각 지점의 2000배 확대 사진으로서 각 지점의 파면양상을 미시적으로 관찰한 결과 시편표면부에 형성된 압축잔류응력은 피로균열진전 과정에서 Fig. 11과 같이 균열선단 소성영역 중심부와 표면부의 스트라이에이션 방향형성에 현저한 차이가 있었다.



Un-peening(RT) Shot-peening(RT) Shot-peening(180°C)  
Photo. 1 Photographs of fracture surface

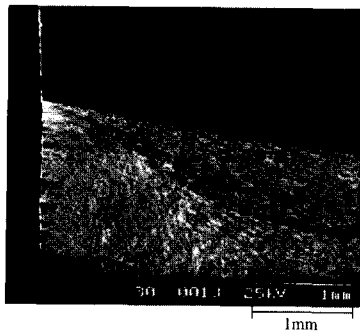


Photo. 2 SEM photographs of un-peening(RT) fracture

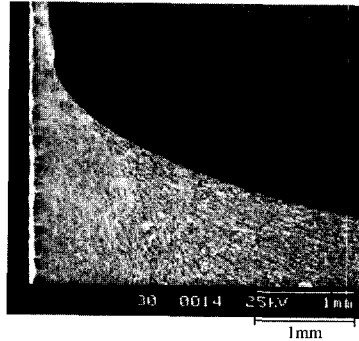


Photo. 3 SEM photographs of shot-peening(RT) fracture

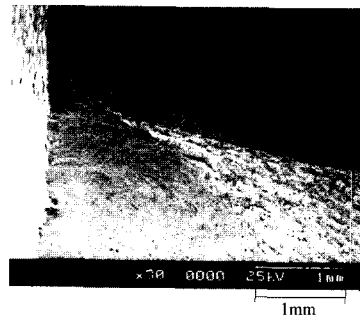


Photo. 4 SEM photographs of shot-peening(180°C) fracture

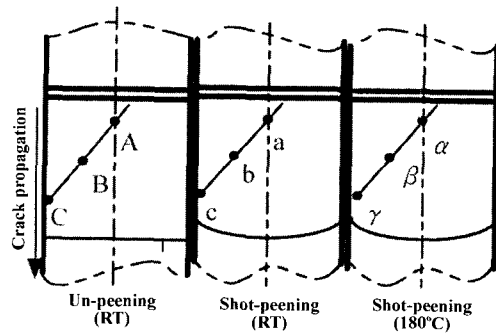
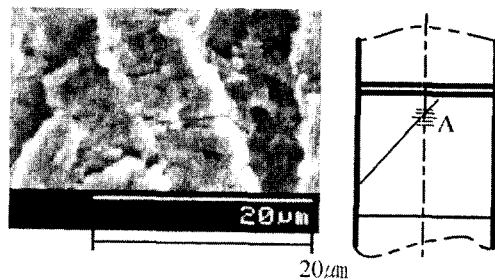


Fig. 11 Picture point of fracture surface



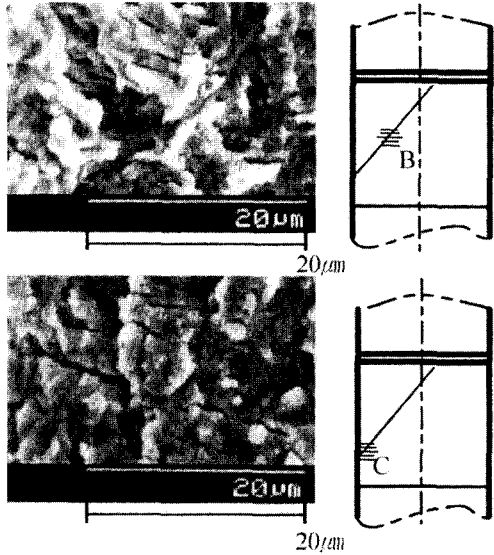


Photo. 5 Striation of fatigue crack propagation by SEM(Un-peening, RT)

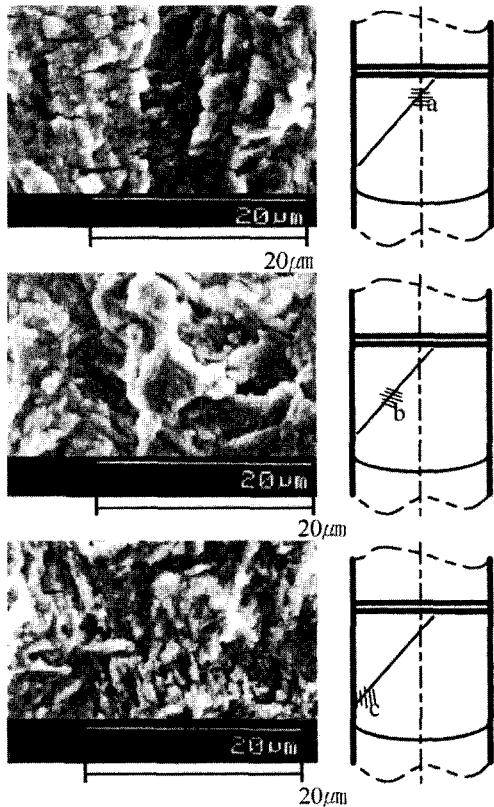


Photo. 6 Striation of fatigue crack propagation by SEM (Shot-peening, RT)

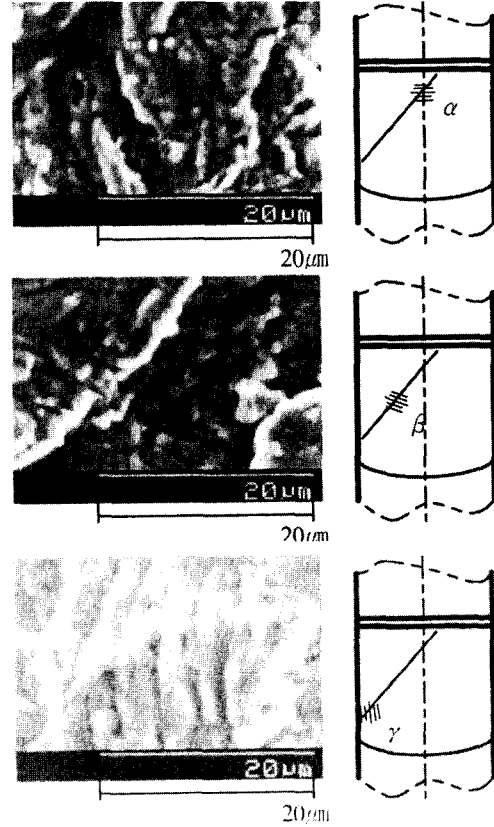


Photo. 7 Striation of fatigue crack propagation by SEM (Shot-peening, 180°C)

#### 4. 결론

쇼트피닝 가공한 스프링강(JISG SUP-9)의 압축 잔류응력이 고온환경에서 피로균열 진전거동에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 쇼트피닝재에서 압축잔류응력은 상온환경에 비하여 고온환경 100°C에서 6%, 150°C에서 12%, 180°C에서 14% 소멸되었다.
- 2) 응력확대계수 범위 17~19 MPa√m 이하에서 압축잔류응력은 고온환경 피로균열 진전거동에 미치는 영향이 크다.
- 3) 중간속도영역(Stage II)에서의 피로균열 진전 속도는 상온환경에 비하여 고온환경인 100°C에서 12%, 150°C에서 21%, 180°C에서 35%가 증가되었으며, 피로수명은 44%, 50%, 64%가 감소되었다.
- 4) 피로균열진전 파면을 주사식 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과 피로균열 파면양상에서 상

온환경에 비하여 고온환경 피로균열과면이 피로균열 선단의 소성영역에 대한 구속력을 감소시키는 양상이 관찰되었다.

5) 쇼트피닝재에서 재료상수 C의 값은 온도의 증가에 따라 증가하는 경향이고 피로균열 진전지수 m 값은 감소하는 경향을 보여주고 있다.

6) 언피닝재에 비하여 쇼트피닝재의 피로수명이 상온 25°C에서 98%, 100°C에서 39%, 150°C에서 63%, 180°C에서 54%가 증가되었다.

### References

- 1) Murakami, Ominami, A Guide of Fracture Mechanics, O-mu Co., pp.121-127, 1979.
- 2) S. K. Jung, S. H. Lee, A Guide of Shot peening Processing, Se Hwa Pub, pp.6-12, 2001.
- 3) R. D. Gillespie, "Its Effect on Process Consistency and Resultant Improvement in Fatigue Characteristics", Proc. of the 5th International Conference on Shot Peening, Vol.1, Oxford, pp.81-90, 1993.
- 4) H. Wohlfahrt, "The Influence of Peening Conditions on the Resulting Distribution of Residual Stress", Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening, Vol.1, Chicago, pp.316-331, 1984.
- 5) K. D. Park, J. H. Kim, H. K. Youn, W. J. Park, "Fatigue Crack Propagation Characteristics in SA 516/70 Steel for Pressure Vessels at High Temperature", KCORE, Vol.15, pp.105-110, 2001.
- 6) K. D. Park, C. G. Jung, "The Effect of Compressive Residual Stresses of Two-stage Shot-peening for Fatigue life of Vehicle Spring Steel", Transactions of the KSAE, Vol.11, No.1, pp.185-192, 2003.
- 7) A. Tange, N. Takamura, "Relation Between Shot-peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation Life in Spring Steel", Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening, Vol.1, Tokyo, pp.243-253, 1990.
- 8) J. H. Kim, "A Study of Fatigue Crack Propagation Characteristics in Mechanical Structural Steel", Chung-nam Uni. Thesis of Doctorate, pp.10-16, 1989.
- 9) J. Willenborg, R. M. Engle, H. A. Wood, "A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept", AFFDL-TM-71-1-FBR, 1971.