

쇼트피이닝 가공된 차량용 스프링강의 피로수명에 미치는 고온의 영향

박경동* · 하경준**

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 기계공학부

A Study on The Effect of High Temperature on Fatigue Life of The Vehicle Spring Steel

KEYOUNG-DONG PARK* KEYOUNG-JUN HA**

*Pukyong National University, Busan, Korea

**Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Shot Peening(쇼트피이닝), Residual Stress(잔류응력), High Temperature(고온), Fatigue Crack Propagation(피로균열전파)

ABSTRACT: In this study, CT specimens were prepared from spring steel(SUP9) processed shot peening which was room temperature, high temperature experiment. And we got the following characteristics from fatigue crack growth test carried out in the environment of room, and high temperature at 25°C, 100°C, 150°C, and 180°C in the range of stress ratio of 0.3 by means of opening mode displacement. The threshold stress intensity factor range ΔK_{th} in the early stage of fatigue crack growth (Region I) and stress intensity factor range ΔK in the stable of fatigue crack growth (Region II) was decreased in proportion to descend temperature. It assumed that the fatigue resistance characteristics and fracture strength at high temperature is considerable higher than that of room temperature in the early stage and stable of fatigue crack growth region.

1. 서 론

기계, 기술산업에서 요구되는 부품의 경량화 및 고응력화는 소비자로부터 요구되는 필수적인 사항으로서 기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차등에 필요한 철강(금속)소재 분야에서 활발히 연구되어지고 있다.

그러나 부품에 반복되는 하중 즉 피로하중이 작용함에 따라 어느 순간 파괴되어 버리는 현상을 발견 할 수 있는데 이러한 현상을 피로파괴라 한다.(村上と大南 1979)

이와 같이 피로강도 저하의 인자 중 철강재의 내부 비금속 개재물의 함유를 제외한 나머지 인자들은 철강재의 표면부위의 결함이 되기 때문에 철강재 표면부위의 결함을 제거하고 표면부위의 피로강도 향상을 위한 쇼트 피이닝은 수많은 양의 쇼트 볼(Shot Ball)을 일정한 속도로 금속 표면에 투사하는 것으로서, 쇼트 볼에 의해 타격된 금속 표면은 요철면을 이루게 되고, 요철의 깊이는 대개 0.13~0.16mm 정도이며, 또한 표면은 소성 가공에 의한 가공경화층과 압축 잔류응력층을 표면부 가까이에 형성하게 된다.(정성균과 이승호 2001)

여기에서 가공경화에 따른 정도의 증가는 피로수명에 제1저자 박경동 연락처: 부산시 남구 용당동 산100

051-620-1592 parkkd@pknu.ac.kr

큰 영향을 주지 않으며, 표면의 요철과 압축 잔류응력이 피로수명에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.

특히 금속 표면에 압축 잔류응력을 형성토록 함으로서 피로에 의한 균열의 생성과 균열의 전파 억지력을 향상시킨다고 볼 수 있으며, 여기서 압축 잔류응력은 금속의 표면부에 되도록 가까이 형성 될 수 있도록 하고, 또 압축 잔류응력이 높게 형성 될수록 피로수명은 향상된다고 알려져 있다.(Gillespie 1993)(Wohlfahrt 1984)

그러나 쇼트피이닝재를 고온 영역에서의 피로 시험결과는 찾아보기 힘들었다. 본 연구는 스프링강의 쇼트피이닝재를 상온 25°C 그리고 100°C, 150°C, 180°C의 고온에서 피로시험을 실시하여 고온환경에서의 크랙전파속도의 영향, 크랙전파 특성, 하한계 특성에 주는 온도 영향을 확실하게 하여 고온에서의 스프링강의 강도향상과 피로수명 예측을 통하여 안전한 설계에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연 강재 스프링강 SUP9이며, 시험편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Fig. 1은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서

산소 절단기를 이용, L-T방위로 채취하여 압연방향이 하중 방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93(1993)의 기준에 따라 외형가공은 밀링으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈반지름 0.1mm가 되게 가공하였다.

Table 1 Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88

Table 2 Mechanical properties

Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
1226	9	2.75

그리고 피로균열진전의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며, 25℃ 정도의 온도환경과 항복강도이내의 응력범위에서 ASTM(1993) E647-93 규정에 의거 3mm의 피로 균열을 주었다.

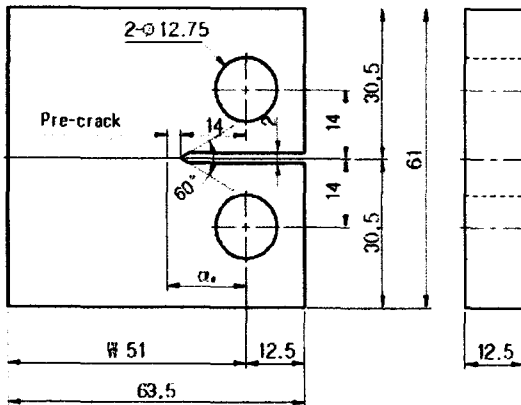


Fig. 1 Configuration of CT-specimen (unit:mm)

2.2 실험장치



Fig. 2 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

Fig. 2는 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로시험기(INSTRON 8501, 1000KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤하였다.

균열길이 측정은 시편에 COD 클립 게이지를 부착하여 Compliance법을 사용하였다. 또 스프링강에 있어서 쇼트 피이닝이 피로강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 쇼트 피이닝하여 실험하였다.

Table 3 Conditions of Shot-peening

Condition	Shot- Peening
Impeller Dia	490 mm
Blades	90mm/6 pcs
Width /Q'ty	2200 r.p.m
r.p.m	0.8 mm
Shot-Ball Dia.	24 sec.
Time	0.375 mm
Arc Height (Alman A-Stip)	85 %
Coverage	

그리고 쇼트 피이닝은 스프링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일스프링 제조용 쇼트 피이닝기와 엔진랩브 스프링 제조용 쇼트 피이닝기를 사용하였으며, 그 조건은 Table 3과 같다.

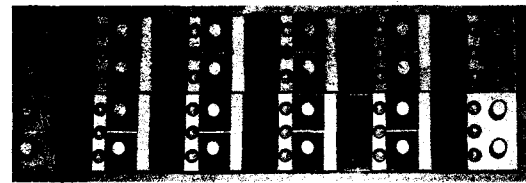


Fig. 3 Fixture of specimen

2.3 실험방법

2.3.1 잔류응력

X-Ray Diffraction	Condition	
	Target	Cr-V
X-Ray Source	Voltage	30 KV
	Current	10 mA
ψ	0°, 15°, 30°, 45°	
2 θ	140° ~ 170°	
Diffraction	Scintillation Counter	

Table 4 Measuring condition of residual stress

쇼트 피이닝된 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기 (RIGAKU - MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20 μ m 단위로 연마 해가면서 Table 4 와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력은 -720MPa로 측정되었다.

2.3.2 피로시험

실험은 서보전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 10Hz, 정현파형으로 하였다.

고온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착하였으며, 온도유지는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였고 응력비 $R=0.3$ 10Hz, 실험온도는 25°C 와 100°C , 150°C , 180°C 의 고온으로 하였다.

실험해석을 하기 위해 응력확대계수 K 는

$$\Delta K = \begin{cases} K_{\max} - K_{\min} & (K_{\min} > 0) \\ K_{\max} & (K_{\min} \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

및 응력비

$$R = K_{\min} / K_{\max} \quad (2)$$

의 함수가 된다. 여기서 R 의 영향을 제외하면 특정의 ΔK 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인(Paris and Erdogan, 1963)

$$da / dN = C (\Delta K)^m \quad (3)$$

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 여기서 C 와 m 은 재료상수로서 그 값은 동일재료, 동일환경 구조물 등의 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다. 응력확대계수 범위 ΔK 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 시험에서는 ASTM (1997) E647-95a 규정에 의거 ΔK 콘트롤에 의한 K -감소방식을 이용하였는데 그 감소조건은 다음과 같다.(TAKAMURA)

ΔK 의 기울기는

$$C_g = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \geq 0.08 \text{ mm}^{-1} \quad (4)$$

da/dN 의 측정범위 $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 압축잔류응력의 분포

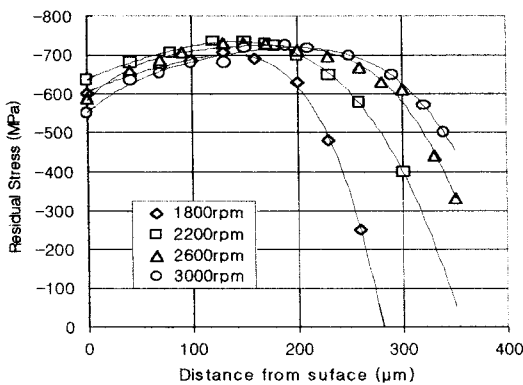


Fig. 4 Compressive Residual Stress Distributions Produced by Shot-Peening

Fig 4는 쇼트피닝 임페라 속도를 변화시켜 쇼트볼을 시험편 표면에 투사하여 얻어진 압축잔류응력치를 깊이별로 조사한 그

래프로서 1800rpm에서 압축잔류응력의 최대치가 깊이 $120\mu\text{m}$ 로 조사되었고, 2200rpm에서는 $150\mu\text{m}$, 2600rpm은 $180\mu\text{m}$, 3000rpm은 $200\mu\text{m}$ 로서 쇼트볼의 투사속도를 높여줄수록 압축잔류응력의 최대치가 깊고 넓게 형성되고 있으나 표면의 압축잔류응력치는 투사속도를 높여주므로서 투사에너지가 너무 크기 때문에 발생하는 오버쇼트피닝 (Over Shot-peening) 현상으로서 Verpoort와 Gerdes의 논문에서는 이러한 문제점을 지적하고 있다.(Verpoort and Gerdes 1989)

3.2 고온크랙전파 특성

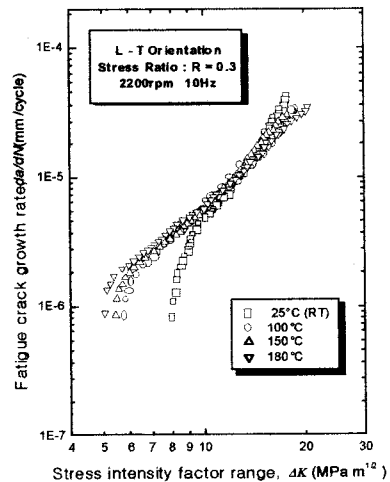


Fig. 5 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

스프링강으로 사용되고 있는 SUP9 스프링강에 대하여 쇼트피닝에 의해 720MPa 의 압축잔류응력이 있는 재료에 대하여 상온 25°C , 100°C , 150°C , 180°C 의 고온에서 피로크랙전파 특성을 고찰하여 압축잔류응력으로 가공된 재료의 고온 피로 특성과 온도의 변화에 대한 특성을 고찰하여 Fig. 5에 그 결과를 나타내었다.

Fig. 5에서 상온 25°C 의 경우는 $da/dN - \Delta K$ 는 $4.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하다가 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 에 도달하였다. 상온 25°C 의 경우 $\Delta K_{th} = 8.08 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 하였다.

Fig. 5의 100°C 의 경우는 $da/dN - \Delta K$ 의 양대수 관계는 $da/dN > 2.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하다가 하한계응력확대계수 $\Delta K_{th} = 5.79 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 나왔다.

Fig. 5의 150°C 의 경우는 $da/dN - \Delta K$ 의 양대수 관계가 $da/dN > 2 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하다가 하한계 응력확대계수 $\Delta K_{th} = 5.44 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로

나타났다. Fig. 5의 180℃ 경우 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계가 $1.7 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 성립하다가 급격히 감소하여 하한계 응력확대계수에 도달하였다. $\Delta K_{th} = 5.06 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 나타났다.

온도의 상승에 따라 상온 25℃에 비해 $da/dN-\Delta K$ 양대수 직선 관계가 성립하는 구간이 저하하여 하한계응력 확대 계수 ΔK_{th} 가 감소하는 크랙진전 속도와 가속하는 경향으로 나타났다. 이는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 온도의 증가에 따라 영향이 크게 감소하는 것으로 생각된다.

3.3 상온과 고온의 피로 균열 전파특성 비교

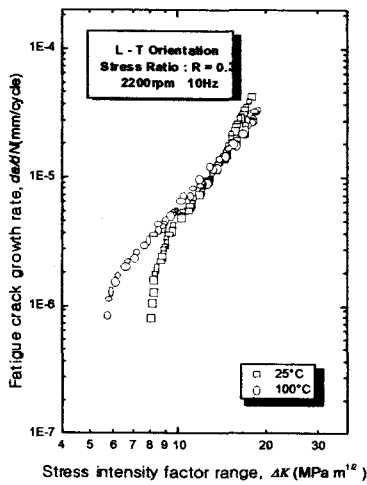


Fig. 6 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (100℃)

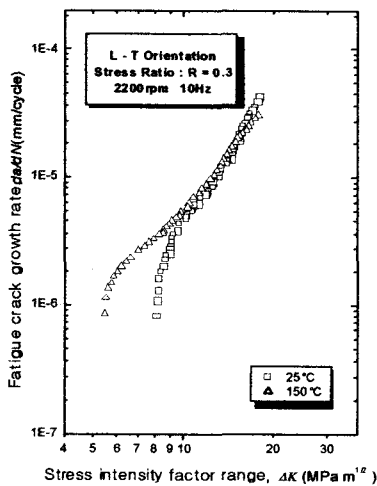


Fig. 7 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (150℃)

상온 25℃, 100℃, 150℃, 180℃의 고온에서 피로균열전파시험을 통하여 상온과 각 온도의 시험결과를 비교하여 Fig. 6~Fig. 9에 각각 피로균열전파속도 $da/dN-\Delta K$ 관계를 각 온도별로 상온과 비교하여 나타내었다.

Fig. 6에서 Fig. 8를 보면 온도의 상승과 더불어 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는 저하되어 상온 25℃에서 $4.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$, 100℃의 경우가 $2.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$, 150℃의 경우 $2 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$, 180℃의 경우 $1.7 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하였다.

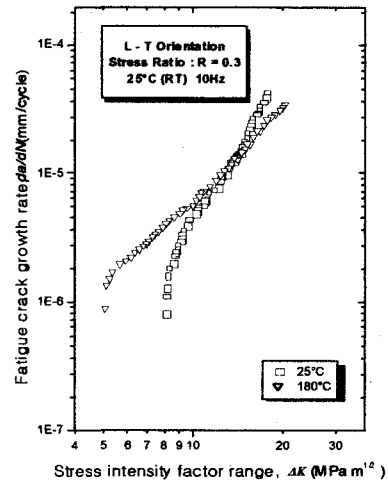


Fig. 8 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (180℃)

이를 보면 온도의 증가에 따라 속도가 가속하여 양대수 직선 성립구간이 저하하는 경향으로 나타났다. 이 영향으로 인하여 하한계응력 확대계수가 감소하는 것으로 나타났다.

3.4 고온에서의 하한계 응력확대계수

Fig. 9에 쇼트피닝에 의해 -720MPa의 압축잔류응력으로 가공된 스프링강 SUP9에 대하여 상온 25℃, 100℃, 150℃, 180℃의 온도에서 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 의 관계를 나타내었다. 그리고 Table 5에 그 값을 나타내었다.

Table 5 The value of fatigue crack growth threshold $-\Delta K_{th}$ (Mpa $\sqrt{\text{m}}$)

Temperature	25℃	100℃	150℃	180℃
Growth Threshold	8.08	5.79	5.44	5.06

그림에서 온도가 고온으로 상승할수록 하한계 응력확대

계수 ΔK_{th} 가 100°C 이상은 급하게 감소함을 나타내었다. 상온에 비하여 온도가 상승할수록 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 가 감소함을 알았다.

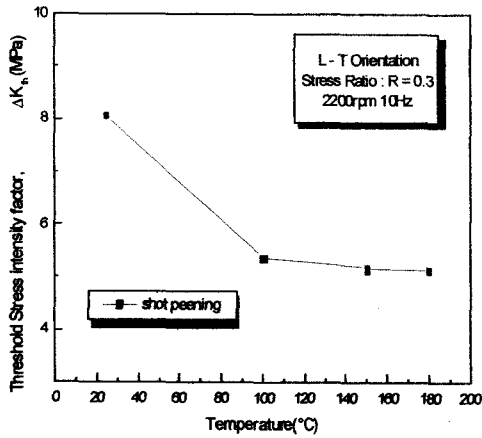


Fig. 9 Effect of Threshold stress intensity factor and temperature

3.5 크랙진전지수 m 및 재료상수 C의 고온영향
 상온 25°C, 100°C, 150°C 및 180°C에서 시험한 각 온도에서 크랙진전지수 m와의 관계를 Fig. 10에 각각 나타내었다.

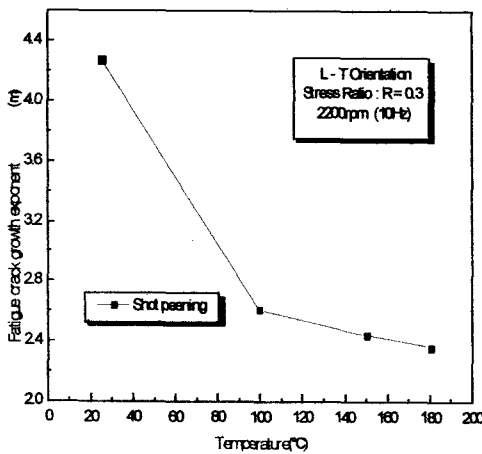


Fig. 10 Relation between fatigue crack growth exponent m and Temperature(°C)

Fig. 11에서 상온에서 100°C까지는 온도의 상승에 따라 재료상수가 급하게 감소하였으나 온도가 100°C에서 180°C까지는 완만하게 감소함을 나타내었다.

이 결과와 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 와 온도 관계와 동일한 경향을 나타내었다. 그리고 Fig. 12의 재료상수 C와 온도와의 관계에서는 크랙진전지수와 반대의 경향을 나타내고 있다. 상온에서 100°C까지는 급격히 상승하다가 100°C이상부터는 완만하게 증가하는 경향을 나타내었다.

그리고 재료상수 C와 크랙진전지수 m와의 관계를 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 재료상수 C의 감소에 따라 크랙진전지수 m는 직선 증가하는 현상을 나타내었다.

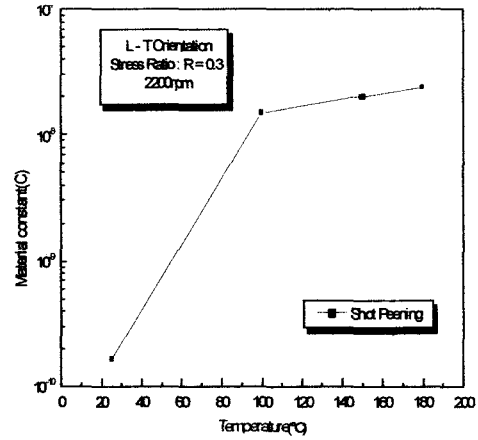


Fig. 11 Relation between material constant C and Temperature(°C)

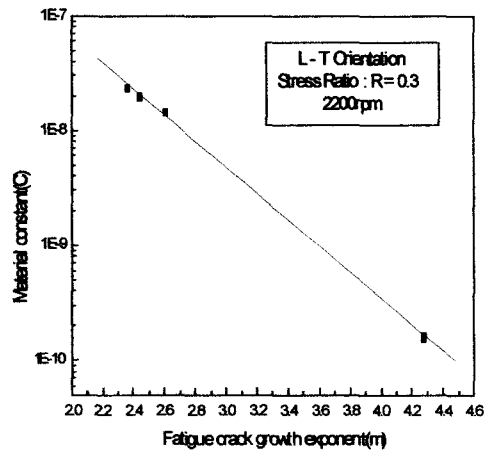


Fig. 12 Relation between fatigue crack growth exponent m and material constant C

3.6 고온에서의 크랙길이와 사이클 수의 관계

상온 25°C, 100°C, 150°C 및 180°C에서 시험한 각 온도에서의 크랙길이 a와 반복 사이클 수(N)의 관계를 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 13에서 각 온도에 있어서 크랙길이 19mm에서 22mm까지는 반복횟수 증가가 크게 나타나지 않고 완만한 형태를 보였다. 그러나 크랙길이 22mm이상부터는 반복횟수의 증가가 급격하게 증가함을 보였다. 각 온도에 있어서 동일한 경향을 나타내었다.

그리고 상온 25°C보다는 온도가 상승할수록 반복횟수가 감소함을 나타냈고 전체적으로 동일한 경향을 나타내었다. 이는 상온에 비해 고온에서의 잔류응력의 소멸현상으로 인한 균열진전의 역지력의 감소를 나타내며 온도영향에

의한 수명의 감소로 보아진다.

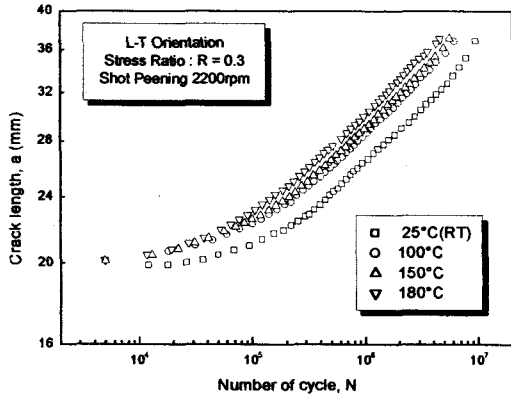


Fig. 13 Relations between crack length and number of cycle

4. 결 론

스프링강 SUP9에 대하여 쇼트피닝으로 -720MPa의 압축잔류 응력으로 가공한 재료에 대하여 응력비 R=0.3로 상온 25°C, 100°C, 150°C, 180°C의 고온에서 크랙전파 특성시험을 실시하여 스프링강의 고온에서의 크랙전파속도, 크랙전파 특성 및 하한계 응력확대계수를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 응력비 R=0.3로 하여 25°C~180°C까지의 고온에서 크랙전파속도 da/dN 와 응력확대계수 ΔK 와의 관계에서 $da/dN \geq 4.3 \times 10^{-6}$ mm/cycle에서 $da/dN \geq 1.7 \times 10^{-6}$ mm/cycle까지로 양대수직선 관계가 성립하다가 급격하게 감소하여 온도의 영향을 나타내었다.

(2) 고온의 경우 하한계 응력확대계수는 25°C에서 100°C까지는 직선적으로 감소하여 100°C이상부터는 급격하게 감소함을 보였고, 재료상수 C는 100°C급하게 감소하였으나 온도가 100°C에서 180°C까지는 완만하게 감소하였다.

(3) 재료상수 C와 크랙진전지수 m와의 관계는 재료상수가 감소함에 따라 크랙진전지수 m는 직선적으로 증가하는 현상을 보였다.

(4) 크랙길이와 반복횟수와와의 관계에서 크랙길이 19~22 mm까지는 반복횟수가 완만하게 나타났으나 이후 크랙길이의 증가에 따른 반복횟수는 급격하게 증가하였다.

(5) 쇼트피닝가공에 의해 형성된 압축잔류응력에 의한 피로수명의 향상은 고온의 영향에 의해 상당한 감소를 나타냈다.

참 고 문 헌

(1) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp10-16(1989)

(2) 박경동, 原子爐用 低合金鋼의 高溫疲勞 크랙전이와 크랙 開口 特性에 關한 研究, 동아대학교 박사학위논문 (1983)

(3) 장동일, 정경섭, 한민구, 파괴역학 원장출판사 pp12~13, 1998, Jan

(4) 정성균, 이승호, 쇼트피닝 가공개론 도서출판새화, pp 6~12. 2001,Jan(1) 村上, 大南 : 破壊力學 入門, オム社,(1979), pp 121-127

(5) 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

(6) Gillespie, R. D., "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.

(7) Verpoort, C. M. and Gerdes, C., "Influence of Shot Peening on Material Properties of Turbine Blades", Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International, Vol. 1, France, pp.11~70, 1989.

(8) Wohlfahrt, H., "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

(9) 村上, 大南 : 破壊力學 入門, オム社,(1979), pp 121-127