

# 쇼트피이닝 가공된 스프링강의 고온 피로균열진전 평가

박 경 동 · 정 찬 기\* · 하 경 준\*

부경대학교 기계공학부

\*부경대학교 대학원 기계공학부

## A Study on the Shot Peening on the High Temperature Fatigue Crack Propagation

Kyung-Dong Park · Chan-Gi Jung\* · Kyung-jun Ha\*

School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

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

**Key words:** Shot Peening(쇼트 피이닝), Residual Stress(잔류응력), High Temperature(고온), Fatigue Crack Propagation(피로균열진전)

**Abstract :** In this study, CT specimens were prepared from spring steel(SUP9) processed shot peening which was room temperature, low temperature and 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, 50°C, 100°C, 150°C, and 180°C in the range of stress ratio of 0.05 by means of opening mode displacement. The threshold stress intensity factor range  $\Delta K_{th}$  in the early stage of fatigue crack growth (Region I) and stress intensity factor range  $\Delta K$  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 low temperature and 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, 항공기, 자동차 등에서 요구되는 고응력화는 부품의 경량화를 요구한다. 따라서 사용되는 재료, 특히 철강재는 고응력화 되어야 한다는 것이 필수적인 사항이 되고 있다.

그러나 부품에 반복되는 하중 즉 피로하중이 작용함에 따라 어느 순간 파괴되어 버리는 현상을 발견 할 수 있는데 이러한 현상을 피로파괴라 한다.

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 가까이 형성하게 된다.

여기에서 가공경화에 따른 경도의 증가는 피로수명에 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.

그러나 쇼트피이닝재를 고온 영역에서의 피로 시험결과는 찾아보기 힘들었다. 본 연구는 스프링강의 쇼트피이닝재를 상온 25°C 그리고 50°C, 100°C, 150°C, 180°C의 고온에서 피로시험을 실시하여 고온환경에서의 크랙전파속도의 영향, 크랙전파 특성, 하한계 특성에 주는 온도 및 응력비의 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 하중방향이 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
0.55	0.22	0.73	0.11	0.05	0.02

Table 2 Mechanical properties

Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (H <sub>RB</sub> )
177.8	11.4	2.75

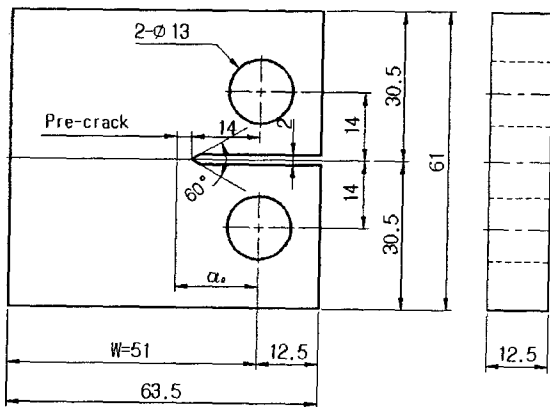


Fig. 1 Configuration of CT-specimen (unit:mm)

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 예균열을 주었다.

## 2.2 실험 장치

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

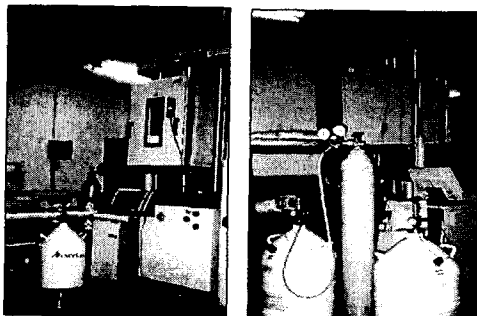


Fig. 2 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

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

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

또한 시험편이 원형단면임을 감안하여 표면 전체에 균일한 쇼트 피이닝 가공면을 얻기 위하여 Fig. 3와 같이 시험편의 양단을 치구로 고정하고 그 치구를 Fig.4과 같이 2개의 자전 로울러 위에 올려 놓고 쇼트 볼 투사하였다.

Table 3 Conditions of Shot-peening

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

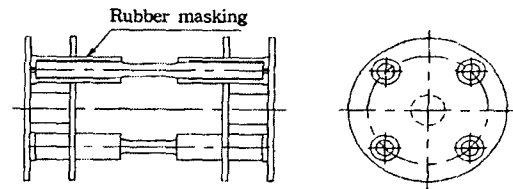


Fig. 3 Fixture of specimen

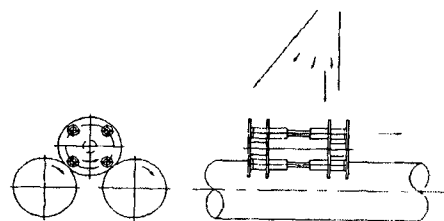


Fig. 4 Shot-peening apparatus

## 2.3 실험방법

### 2.3.1 잔류응력

쇼트 피이닝된 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기 (RIGAKU - MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20μm 단위로 연마 해가면서 Table 4 와 같은 X선 측정 조건하에서

잔류응력을 측정하였다. 잔류응력은  $-68\text{kg/cm}^2$ 로 측정되었다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction	Condition	
	Target	Cr-V
X-Ray Source	Voltage	30 KV
	Current	10 mA
$\psi$	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$	
$2\theta$	$140^\circ \sim 170^\circ$	
Diffraction	Scintillation Counter	

### 2.3.2 피로시험

실험은 서보전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 20Hz, 정현파형으로 하였다.

고온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착하였으며, 온도유지는  $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였고 응력비  $R=0.05$  20Hz, 실험 온도는  $25^\circ\text{C}$  와  $50^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$ 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  $\Delta K$ 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 크랙전진속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다. 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 시험에서는 ASTM (1997) E647-95a 규정에 의거  $\Delta K$  컨트롤에 의한  $K$ -감소방식을 이용하였는데 그 감소조건은 다음과 같다.

$\Delta K$ 의 기울기

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

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

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 고온 크랙전파속도 특성

스프링강으로 사용되고 있는 SUP9 스프링강에 대하여 쇼트피닝에 의해  $-68\text{kg/cm}^2$ 의 압축잔류응력이 있는 재료에 대하여 상온  $25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$ 의 고온에서 피로 크랙전파 특성을 고찰하여 압축잔류응력으로 가공된 재료의 고온 피로 특성과 온도의 변화에 대한 특성을 고찰하여 Fig. 5에 그 결과를 나타내었다.

Fig. 5에서 상온  $25^\circ\text{C}$ 의 경우는  $da/dN - \Delta K$ 는

$4 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하다가 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 에 도달하였다. 상온  $25^\circ\text{C}$ 의 경우  $\Delta K_{th} = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 하였다.

Fig. 5에서  $50^\circ\text{C}$ 의 경우는  $da/dN - \Delta K$ 의 양대수 직선관계는  $da/dN > 1 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 까지 성립하다가 응력확대계수  $\Delta K$ 의 저하에 따라 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 에 도달하였다. 그러므로  $\Delta K_{th} = 8.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 되었다.

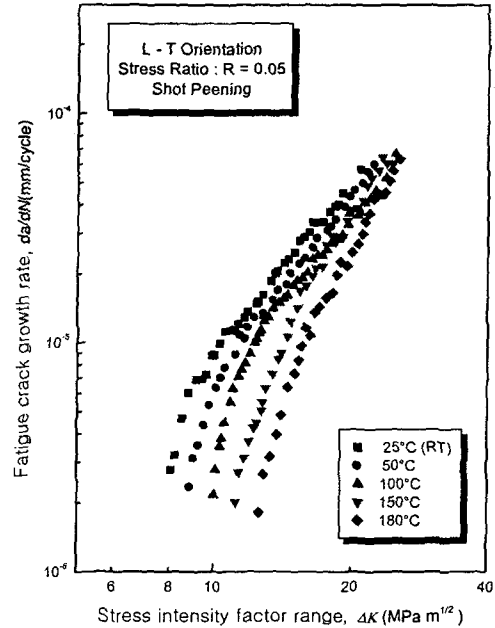


Fig. 5 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

Fig. 5의  $100^\circ\text{C}$ 의 경우는  $da/dN - \Delta K$ 의 양대수 관계는  $da/dN > 9.2 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하다가 하한계응력확대계수  $\Delta K_{th} = 10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 로 나왔다.

Fig. 5의  $150^\circ\text{C}$ 의 경우는  $da/dN - \Delta K$ 의 양대수 관계가  $da/dN > 9 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하다가 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th} = 11.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 나타났다. Fig. 5의  $180^\circ\text{C}$  경우  $da/dN - \Delta K$ 의 양대수 직선관계가  $8 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ 까지 성립하다가 급격히 감소하여 하한계 응력확대계수에 도달하였다.

$\Delta K_{th} = 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 나타났다.

### 3.2 상온과 고온의 피로 균열 전파특성 비교

스프링 강으로 사용되고 있는 SUP9스프링강에 대하여 쇼트피닝에 의해  $-68\text{kg/cm}^2$ 의 압축잔류응력재료로 가공하여 상온  $25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$ ,  $180^\circ\text{C}$ 의 고온에서 피로균열전

과시험을 통하여 상온과 각 온도의 시험결과를 비교 하여 Fig. 6에서 Fig. 9에 각각 피로균열전파속도  $da/dN-\Delta K$  관계를 각 온도별로 상온과 비교하여 나타내었다.

Fig. 6에서 Fig. 9를 보면 온도의 상승과 더불어  $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는 감소되어 상온 25°C에서  $4 \times 10^{-5}$  mm/cycle, 50°C의 경우  $1 \times 10^{-5}$  mm/cycle, 100°C의 경우가  $9.2 \times 10^{-6}$  mm/cycle, 150°C의 경우  $9 \times 10^{-4}$  mm/cycle, 180°C의 경우  $8 \times 10^{-4}$  mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립하였다. 이를 보면 온도의 증가에 따라 속도가 감소하여 양대수 직선 성립구간이 저하하는 경향으로 나타났다. 이 영향으로 인하여 하한계응력 확대계수가 증가하는 것으로 나타났다.

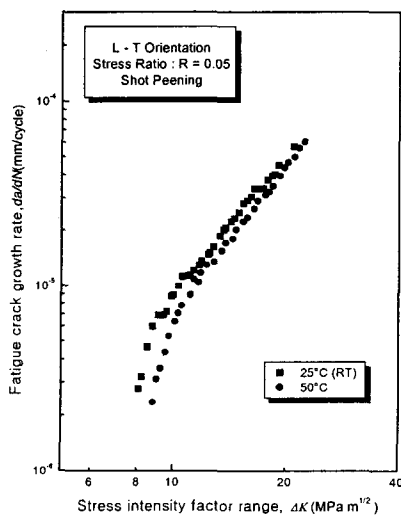


Fig. 6 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (50°C)

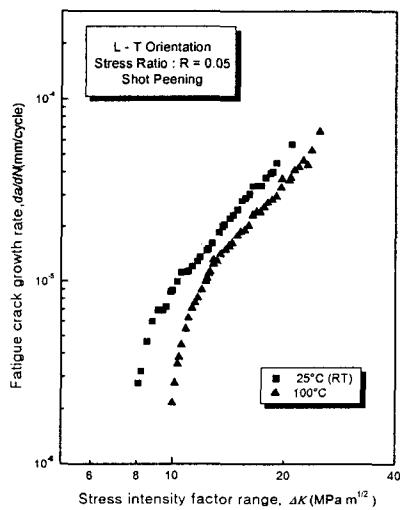


Fig. 7 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (100°C)

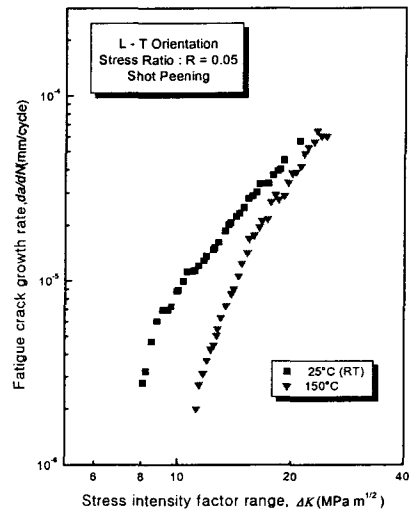


Fig. 8 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (150°C)

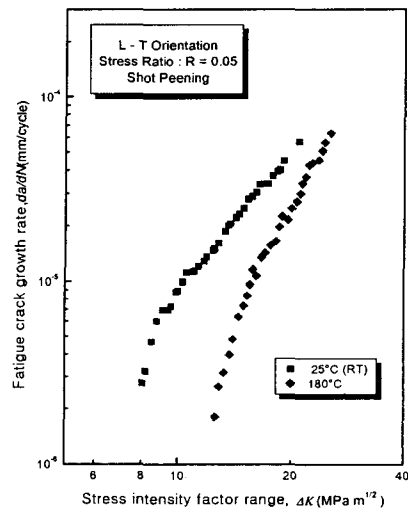


Fig. 9 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (180°C)

### 3.3 고온에서의 하한계 응력확대계수

Fig. 10에 쇼트피닝에 의해  $-68\text{kg/cm}^2$ 의 압축잔류응력으로 가공된 스프링강 SUP9에 대하여 상온 25°C, 50°C, 100°C, 150°C, 180°C의 온도에서 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 의 관계를 나타내었다. 그리고 Table 5에 그 값을 나타내었다.

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

Temperature	25°C	50°C	100°C	150°C	180°C
Growth Threshold	8.0	8.8	10.0	11.2	12.0

그림에서 온도가 고온으로 상승할수록 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 가 직선적으로 증가하다가 150°C 이상은 급하게 증가함을 나타내었다.

150°C 이상의 온도에서는 고온산화물의 개폐구 영향이 큰 것으로 나타남을 알 수 있었다. 상온에 비하여 온도가 상승할수록 수명이 감소함을 알았다.

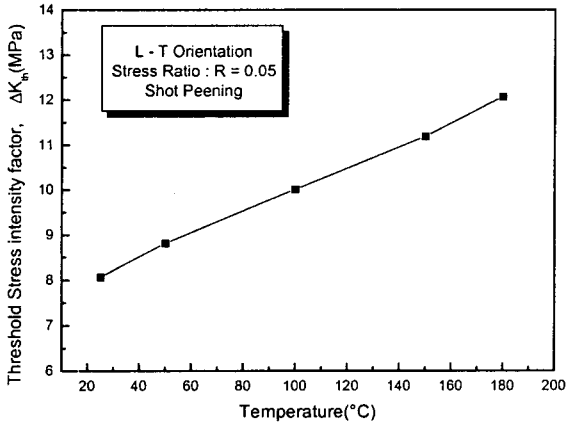


Fig. 10 Effect of Threshold stress intensity factor and temperature

### 3.4 고온에서의 크랙길이와 사이클 수의 관계

상온 25°C, 50°C, 100°C, 150°C 및 180°C에서 시험한 각 온도에서의 크랙길이 a와 반복 사이클 수(N)의 관계를 Fig. 11에 나타내었다.

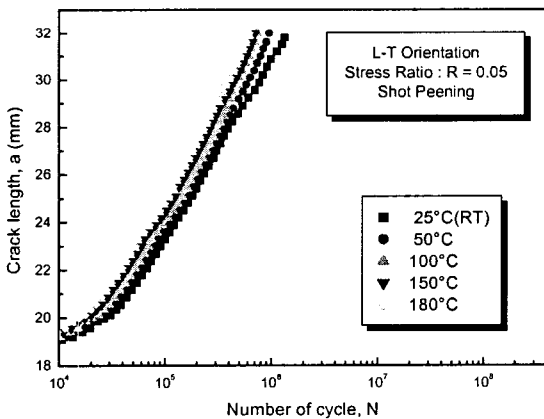


Fig. 11 Relations between crack length and number of cycle

Fig. 11에서 각 온도에 있어서 크랙길이 19mm에서 반복횟수  $2 \times 10^5$ 사이클까지는 크랙길이의 증가가 크게 나타나지 않고 완만한 형태를 보였다. 그러나 반복횟수  $3 \sim 4 \times 10^5$ 사이클에서는 크랙길이가 급격하게 증가함을 보였다. 각 온도에 있어

서 동일한 경향을 나타내었다. 그러나 상온 25°C보다는 온도가 상승할수록 크랙길이가 더욱 급하게 증가함을 나타내었고 전체적으로 동일한 경향을 나타내었다.

반복횟수가 증가할수록 크랙길이의 증가는 차이를 보여 크랙길이 30~32mm 사이에서는 더욱 온도와 반복횟수와의 차이를 나타내었다. 이는 고온 산화물의 크랙개폐에 미친 영향으로 생각되어진다.

## 4. 결 론

스프링강 SUP9에 대하여 쇼트피닝으로  $-68 \text{ kg/cm}^2$ 의 압축잔류응력으로 가공한 재료에 대하여 응력비 R=0.05로 상온 25°C, 50°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=0.05로 하여 25°C~180°C까지의 고온에서 크랙전파속도  $da/dN$  와 응력확대계수  $\Delta K$ 와의 관계에서  $da/dN \geq 4 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$  에서  $da/dN \geq 8 \times 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선 관계가 성립하다가 급격하게 감소하여 온도의 영향을 나타내었다.
2. 온도의 증가에 따라 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 가 8~12  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 범위로 증가함을 나타내었다. 이는 고온 산화물의 영향으로 생각된다.
3. 고온의 경우 하한계 응력확대계수는 25°C에서 150°C까지는 직선적으로 증가하여 150°C이상부터는 급격하게 증가함을 보였다.
4. 크랙길이와 반복횟수와의 관계에서 크랙길이 19mm, 반복횟수  $2 \times 10^5$ 사이클까지는 완만하게 나타났으나 이후 크랙길이의 증가에 따른 사이클 수는 급격하게 증가하였다.

- 참고문헌 생략 -