

쇼트피이닝 가공된 스프링강의 저온 피로균열진전 평가

박 경 동 · 정 찬 기 · 하 경 준* · 박 상 오* · 손 명 균** · 노 영 석*

부경대학교 기계공학부

*부경대학교 대학원 기계공학부

A Study on the Shot Peening on the Low Temperature Fatigue Crack Propagation

Kyung-Dong Park · Chan-Gi Jung* · Kyung-Jun Ha* · Sang-Oh Park* · Myung-Koon Son** · Young-Sok No*

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), Low Temperature(저온), 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, low temperature and high temperature at 25°C, -30°C, -50°C, -70°C and -100°C in the range of stress ratio of 0.05 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 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 고응력화되어야 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 저온영역에서의 피로 시험결과는 찾아보기 힘들었다. 본 연구는 자동차용 스프링재료 사용되는 SUP9강에 대하여 쇼트피이닝재료 -68kg/cm²의 압축잔류 응력으로 가공된재료를 상온 25°C, -30°C, -50°C, -70°C 및 -100°C의 저온에서 응력비 R=0.05로 하여 피로크랙전파특성과 하한계특성을 규명하여 피로수명, 잔존수명등을 예측하여 안전설계에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연 강재 스프

링강 SUP9이며, 시편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

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 ²)	Elongation (%)	Hardness (H _{RB})
177.8	11.4	2.75

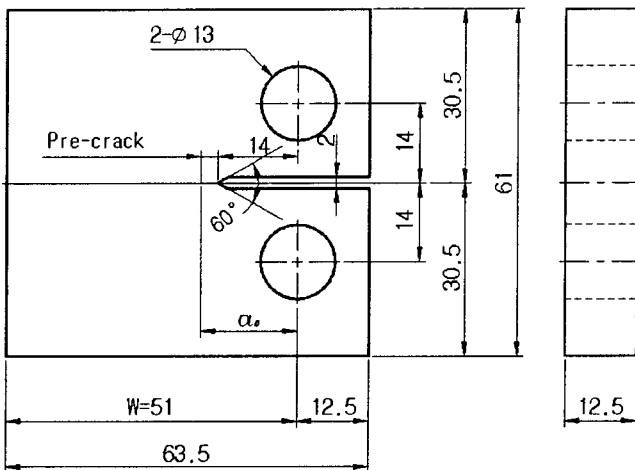


Fig. 1 Configuration of CT-specimen (unit:mm)

Fig. 1은 콤팩트(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.

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 시험 장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로시험기(INSTRON 8501, 1000KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤하였다. 균열길이 측정은 시편에 COD클립게이지를 부착하여 Compliance법을 사용하였다. 또 스프링에 있어서 쇼트피닝이 피로강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 언쇼트피닝과 1단 쇼트피닝으로 나누어 실험하였다.

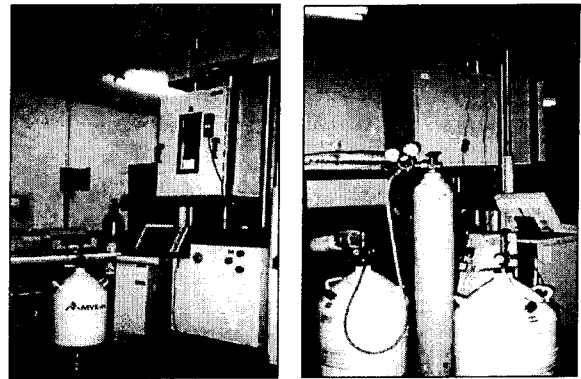


Fig. 2 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

그리고 쇼트피닝은 스프링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일스프링 제조용 쇼트피닝기와 엔진벨브 스프링 제조용 쇼트피닝기를 사용하였으며, 그 조건은 Table 3과 같다.

또한 시험편이 단면임을 감안하여 표면 전체에 균일한 쇼트피닝 가공면을 얻기 위하여 Fig. 3와 같이 시험편의 양단을 치구로 고정하고 그 치구를 Fig. 4와 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 %

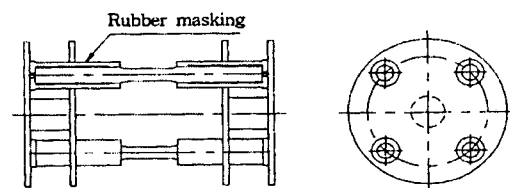


Fig. 3 Fixture of specimen

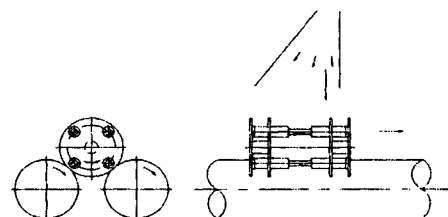


Fig. 4 Shot-peening apparatus

2.3 실험방법

2.3.1 잔류응력

쇼트 피닝된 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 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

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

2.3.2 피로시험

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

저온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 보배를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 5MPa내외로 되도록 하여 액체질소를 챔버내로 유입시켜 저온환경으로 만든다. 실험 중 액체질소의 감소에 따라 질소보배의 압력으로 액체질소의 유입을 정상적으로 밀어주며 온도유지는 전자석밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였고 응력비 $R=0.05$ 20Hz, 실험온도는 25 $^\circ\text{C}$ 와 -30 $^\circ\text{C}$, -50 $^\circ\text{C}$, -70 $^\circ\text{C}$, -100 $^\circ\text{C}$ 로 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.

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. 실험결과 및 고찰

3.1 저온피로균열전파 특성

Fig. 5에 쇼트피닝에 의해 -68kg/cm²의 압축잔류응력으로 가공된 스프링강 SUP9에 대하여 CT시험편으로 응력비 $R=0.05$ 에서 시험온도 25 $^\circ\text{C}$, -30 $^\circ\text{C}$, -70 $^\circ\text{C}$ 및 -100 $^\circ\text{C}$ 에서의 점감하중법에 의해 피로균열전파특성인 피로균열전파속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다.

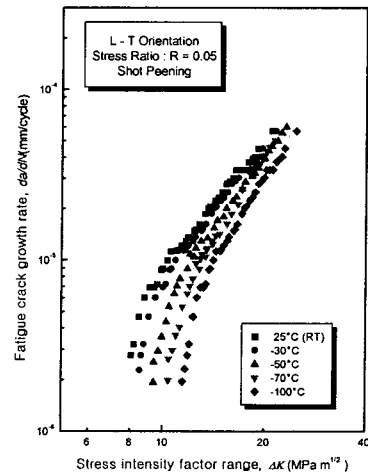


Fig. 5 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

Fig. 5에서 상온 25 $^\circ\text{C}$ 의 경우 균열전파과정 소성변형 폐구가 지배적인 제 2b단계에 있어서 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선 관계는 $da/dN > 4 \times 10^{-5} \text{mm/cycle}$ 까지 성립하다가 하한계 응력확대계수 $\Delta K_{th} = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에 도달하였다.

Fig. 5의 -30 $^\circ\text{C}$ 의 경우 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는 $da/dN > 3 \times 10^{-5} \text{mm/cycle}$ 까지 성립하다가 하한계 응력확대계수 $\Delta K_{th} = 8.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에 도달하였다.

Fig. 5의 -50 $^\circ\text{C}$ 의 경우 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는 $da/dN > 2 \times 10^{-5} \text{mm/cycle}$ 까지 성립하다가 하한계 응력확대계수 ΔK 의 저하에 따라 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 에 도달하였다. $\Delta K_{th} = 9.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이다.

Fig. 5의 -70 $^\circ\text{C}$ 의 경우 $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는

$da/dN > 1 \times 10^{-5}$ mm/cycle까지 성립하였고, 하한계 응력확대 계수 $\Delta K_{th} = 10.4 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 으로 나타났다.

Fig. 5의 -100°C 의 경우는 $da/dN - \Delta K$ 의 양대수 직선관계는 $da/dN > 9 \times 10^{-4}$ mm/cycle까지 성립하다가 하한계 응력확대 계수 $\Delta K_{th} = 12.2 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에 도달하였다. 상온에 비해 온도가 감소할수록 하한계 응력확대계수는 ΔK_{th} 가 상승함을 보였다.

3.2 상온과 저온의 피로 균열 전파 특성 비교

Fig. 6 ~ Fig. 9에 각종 차량, 선박 등에 스프링 재료로 사용되고 있는 SUP9강에 대하여 쇼트피닝에 의해 -68kg/cm^2 의 압축잔류응력으로 가공된 재료에 응력비 $R=0.05$ 로 하여 상온(25°C) -30°C , -50°C , -70°C 및 -100°C 의 저온에서 하중 일정의 점감 시험을 실시하여 피로균열 전파속도 da/dN 와 응력확대계수 ΔK 관계를 양대수 직선상에 온도별로 나타낸 것이다.

그림에서 상온 25°C 의 경우는 $da/dN \geq 4 \times 10^{-5}$ mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었다. 그러나 저온의 경우는, -30°C 의 경우가 $da/dN \geq 3 \times 10^{-5}$ mm/cycle, -50°C 의 경우가 $da/dN \geq 2 \times 10^{-5}$ mm/cycle, -70°C 의 경우가 $da/dN \geq 1 \times 10^{-5}$ mm/cycle, -100°C 의 경우가 $da/dN \geq 9 \times 10^{-5}$ mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었다.

온도의 저하에 따라 피로균열 전진속도가 감소되어 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 에 도달하였다. 온도의 저하에 따라 피로균열 전진속도가 감소되어 Fig. 6 ~ Fig. 9에서와 같이 하한계 응력확대계수가 $8\text{MPa}\sqrt{m}$ 에서 $12.2\text{MPa}\sqrt{m}$ 으로 상승함을 나타내었다.

또한 온도에 따른 양대수 직선관계의 성립 구간에서 양대수 직선관계의 양상은 동일하게 나타났으며 온도의 저하에 따라 급격하게 감소되어 하한계 응력확대계수에 도달한 것은 저온취성 및 산화물의 크랙캐폐에 영향을 미칠 것으로 생각된다.

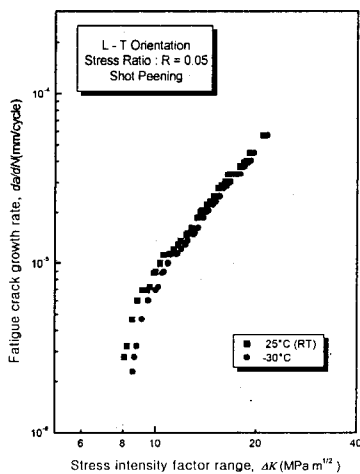


Fig. 6. Relations between fatigue crack growth rate and stress

intensity factor range(-30°C)

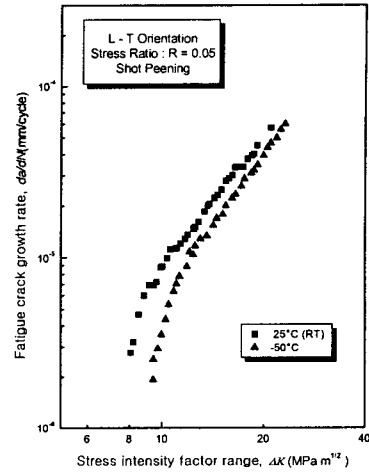


Fig. 7. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-50°C)

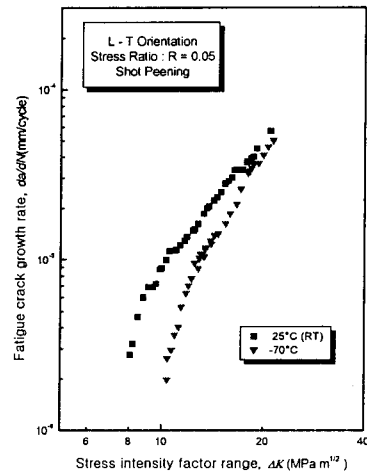


Fig. 8. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-70°C)

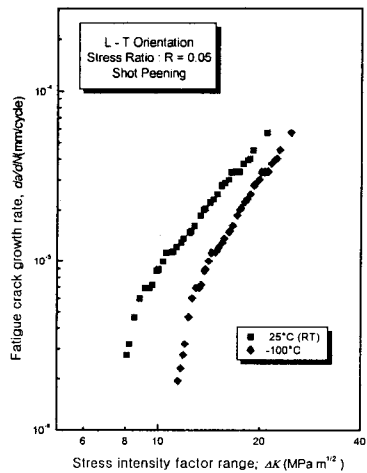


Fig. 9. Relations between fatigue crack growth rate and stress

intensity factor range(-100°C)

3.3 저온피로 하한계 특성과 온도와 관계

Fig. 10에 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 -68kg/cm^2 된 스프링강 SUP9에 대해 상온 25°C 에서 -100°C 까지 피로 크랙전파 특성 실험을 통하여 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 와 온도와의 관계를 나타내었다.

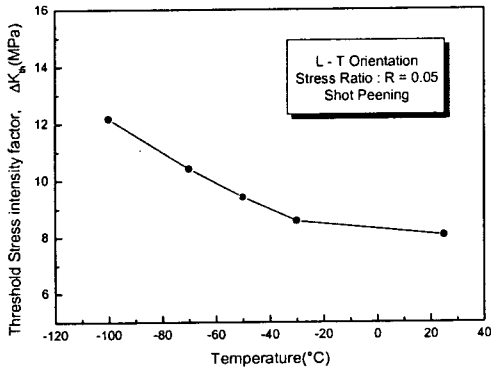


Fig. 10 Effect of Threshold stress intensity factor and temperature

Fig. 10에서 상온 25°C 에서 -40°C 까지는 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 완만하게 증가하다가 -40°C 부터 -100°C 까지는 급격하게 하한계 증가함을 나타내었다. -40°C 부터 급격하게 증가하는 것은 저온취성의 영향이 크게 나타난 것으로 생각된다. 시험결과를 온도별로 표시하여 Table. 5에 나타내었다.

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

Temperature	25°C	-30°C	-50°C	-70°C	-100°C
Growth Threshold	8.0	8.51	9.4	10.4	12.2

3.4 저온에서의 크랙길이와 사이클수와 관계

쇼트피닝에 의해 -68kg/cm^2 의 압축잔류응력으로 가공된 스프링강 SUP9에 대하여 응력비 $R=0.05$ 에서 시험온도 상온 25°C , -30°C , -50°C , -70°C 및 -100°C 의 저온에서 하중점감시험을 실시하여 크랙길이와 반복사이클수와의 관계를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11에 의하면 각 온도에 있어서 크랙길이 $19\sim 20\text{mm}$ 에서 반복사이클 3×10^5 사이클까지는 크랙길이 a 와 반복횟수 N 의 관계가 완만하게 나타났다. 이는 전온도에 있어서 동일한 경향을 나타내었다.

그러나 -100°C 의 경우가 조금 타온도에 비하여 급하게 크랙이 발생한 것으로 나타났다. $a-N$ 관계에서 온도에 따른 차이를 나타내었으며 상온에서 $a-N$ 관계가 가장 완만하게 나타났으며 온도가 저하할수록 조금씩 증가하였다.

그리고 저온의 경우 사이클에 따른 크랙길이의 증가가 동일한 경향을 나타내었다. 그러나 온도가 감소할수록 $a-N$ 관계의

기울기가 급하게 되었다. 각 온도에 있어서 동일 크랙길이에서 반복사이클수의 간격은 2cm 로 거의 일정하게 나타났으며 크랙길이 29mm 에서부터 길이증가가 더욱 크게 나타났다. 이는 저온 취성이 피로크랙길이와 사이클에 미치는 영향으로 생각된다.

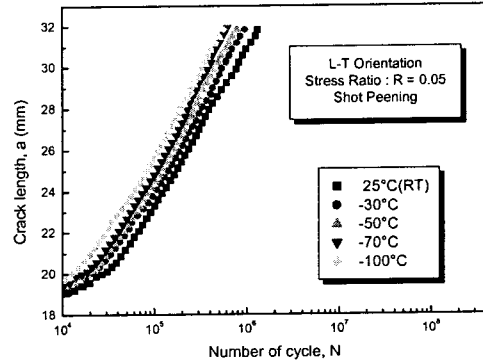


Fig. 11 Relations between Crack length and number of Cycle

4. 결론

스프링강 SUP9에 대하여 쇼트피닝으로 -69kg/cm^2 의 압축 잔류응력으로 가공하여 응력비 $R=0.05$ 로 25°C , -30°C , -50°C , -70°C 및 -100°C 의 저온에서 크랙전파시험을 실시하여 스프링강의 저온에서의 크랙전파속도, 크랙전파특성 및 하한계 응력확대계수를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 상온 25°C 의 경우 $da/dN-\Delta K$ 양대수 직선관계는 $4\times 10^5\text{mm}$ cycle까지 성립하다가 온도의 저하에 따라 -30°C 의 경우 $3\times 10^5\text{mm/cycle}$, -50°C 의 경우 $2\times 10^5\text{mm}$ cycle, -70°C 의 경우 $1\times 10^5\text{mm}$ cycle, -100°C 의 경우 $9\times 10^4\text{mm}$ cycle까지 양대수 직선관계가 성립하였다. 온도의 저하에 따라 양대수 직선관계가 조금씩 감소함을 나타내었다.
2. 저온에서의 하한계 응력확대계수는 상온 25°C 에서 -40°C 까지는 하한계 응력확대계수는 변화가 없었으나 -40°C 부터는 급격하게 증가함을 보였다. 이는 $-40^\circ\text{C} \sim -50^\circ\text{C}$ 사이의 저온 취성의 영향으로 생각된다.
3. 상온 25°C 에서 -100°C 사이의 저온까지 하한계 응력확대계수 $\Delta K_{th}=8\sim 12.2\text{MPa}\sqrt{m}$ 으로 나타났다. 온도의 저하에 따라 크랙전속도가 감소하여 하한계가 증가함을 보였다.
4. 각 온도에 있어서 크랙길이 $19\sim 21\text{mm}$ 사이의 사이클수에 비해 완만하게 증가하였으나 크랙길이 21mm 이상부터는 사이클수에 비해 급격하게 증가하였으며 각 온도에 있어서 동일한 경향을 보였다.

- 참고문헌 생략 -