

# SUP9강의 저온피로크랙 전파특성에 관한 연구

박경동\* · 박상오\*\*

\*부경대학교 기계공학부

\*\*부경대학교 대학원 기계공학부

## A Study on the Fatigue Crack Propagation Characteristics for SUP9 Steel at Low Temperature

KEYOUNG-DONG PARK\* AND SANG-OH PARK\*\*

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

\*\*Graduate School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Shot Peening 쇼트 피이닝, Residual Stress 잔류응력, Low Temperature 저온, Fatigue Crack Propagation 피로균열전파

**ABSTRACT:** In this study, CT specimens were prepared from spring steel(SUP9) which was used in suspension of automobile for room temperature and low temperature service. We got the following characteristics from fatigue crack growth test carried out in the environment of room temperature and low 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  $\Delta K_{th}$  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 is 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

기술산업에서 요구되는 부품의 경량화는 소비자로부터 요구되는 필수적인 사항으로서, 기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차등에 필요한 철강소재 분야에서 활발히 연구되어지고 있다. 특히 철강소재 분야에서 대체 재질 개발과 재료의 고응력화에 대한 연구가 절실히 요구되고 있지만 생산성과 같은 경제적인 측면과 환경보호 측면에서 많은 문제점을 갖고 있으므로 그것에 상응하는 소재개발은 매우 중요한 사항이 되고 있다(박경동과 정찬기, 2001).

부품의 설계시 고려되는 금속의 고강도화, 고장력화는 부품의 경량화를 실현시킴으로서 재료 절감과 고효율화, 연료절감이라는 잇점을 갖고 있으나, 고장력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정 성장하여 최종적으로 금속파괴 되는 현상이 발생된다(박경동과 정찬기, 2001).

기계부품의 파손은 대부분 반복적인 인장응력에 의하여 발생하기 때문에 사용중에 높은 인장응력을 받는 기계부품의 경우에는 표면에 압축잔류응력을 발생시켜서 인장응력을 상쇄시

키는 방법으로 부품의 피로수명을 증대시킨다. 쇼트피이닝은 이와같이 기계부품의 표면에 유익한 압축잔류응력을 발생시키기 위한 방법으로 현재 자동차 및 항공기부품에 폭넓게 적용되고 있다. 쇼트피이닝가공은 금속 표면에 압축 잔류응력을 형성함으로써 피로에 의한 균열의 생성과 균열의 전파 억지력을 향상시킨 것으로 여기서 압축 잔류응력은 금속의 표면부에 되도록 가까이 형성 될 수 있도록 하고, 또 압축 잔류응력이 높게 형성 될수록 피로수명은 향상된다고 알려져 있다(정성균과 이승호, 2001; 배성인과 한민구, 1995).

그러나 쇼트피이닝가공된 재료를 저온영역에서의 피로 시험 결과는 찾아보기 힘들었다. 본 연구는 자동차용 스프링재료로 사용되는 SUP9강에 대하여 쇼트피이닝재료 -68kgf/mm<sup>2</sup>의 압축 잔류응력으로 가공된 재료를 상온 25°C, -30°C, -50°C, -70°C 및 -100°C의 저온에서 응력비 R=0.05로 하여 쇼트피이닝을 하지 않은 재료와 쇼트피이닝을 한 재료에 대해 피로크랙전파특성과 하한계특성, 피로균열진전지수 m과 재료상수 C의 관계를 규명하여 저온에서의 피로수명, 잔존수명등을 예측하여 안전설계에 기여하고자 한다(장동일 등 1992).

### 2. 실험장치 및 방법

#### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연 강재 스프링강 SUP9이며, 시험편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었

제1저자 박경동 연락처 : 부산광역시 남구 용당동 산 100  
051-620-1592 parkkd@pknu.ac.kr

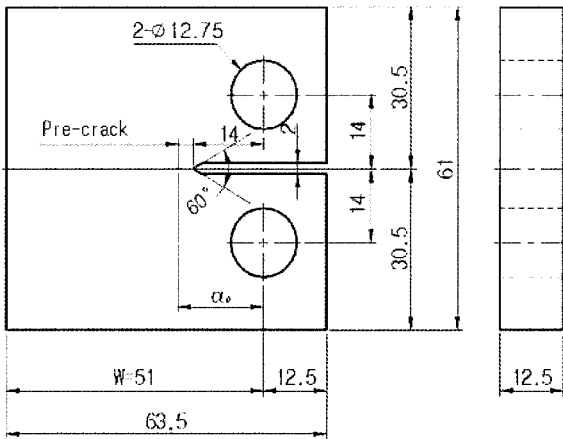
고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

**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 <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (HRB)
177.8	11.4	2.75



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

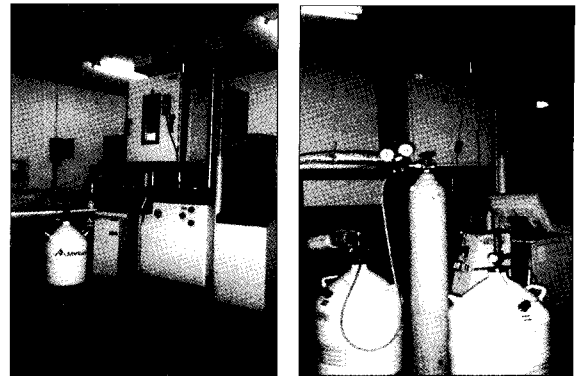
Fig. 1은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용, L-T방위로 채취하여 압연방향이 하중방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93 (1993)의 기준에 따라 외형가공은 밀링으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈반지름 0.1mm가 되게 가공하였다.

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

**2.2 실험 장치**

Fig. 2는 본 실험에 사용된 전기유압식피로시험기(INSTRON 8501, 1000KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤하였다. 균열길이 측정은 시험편에 COD클립게이지를 부착하여 Compliance법을 이용하였다. 또 스프링강에 있어서 쇼트파이닝이 피로강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 unpeened재와 shot peening재로 나누어 실험하였다.

그리고 쇼트파이닝가공은 스프링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일스프링 제조용 쇼트파이닝기와 엔진벨브



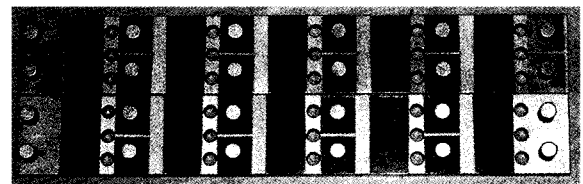
**Fig. 2** Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

스프링 제조용 쇼트파이닝기를 사용하여 가공하였으며, 그 조건은 Table 3과 같다.

또한 시험편이 단면임을 감안하여 표면 전체에 균일한 쇼트파이닝 가공면을 얻기 위하여 Fig. 3와 같이 시험편의 양단을 치구로 고정하고 그 치구를 자전 로울러 위에 올려 놓고 쇼트볼 투사하였다.

**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	



**Fig. 3** Fixture of specimen

**2.3 실험방법**

**2.3.1 잔류응력**

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

**2.3.2 피로시험**

실험은 전기유압식피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 20Hz, 정현파형으로 하였다.

**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		

저온장치로는 전기유압식피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 분배를 연결하여 사용하였으며, 액체 질소 용기 내의 압력을 5MPa내외로 되도록 하여 액체질소를 챔버내로 유입시킴으로써 저온환경으로 만들었다. 실험 중 액체질소의 감소에 따라 질소분배의 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  $\Delta K$ 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인(이용복 등, 1999)

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

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. 본 시험에서는 ASTM (1997) E647-95a 규정에 의거  $\Delta K$ 콘트롤에 의한 하중 감소 제어방식을 이용하였는데 그 감소조건은 다음과 같다 (Kobayashi, 1993; Kitsunai, 1991).

$\Delta K$ 의 기울기는

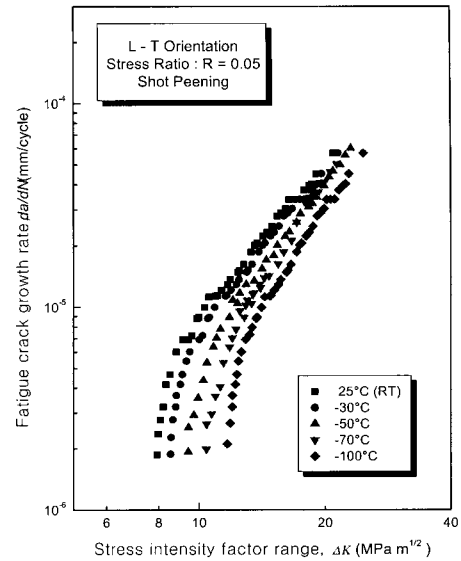
$$C_g = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \geq 0.08 \text{ mm}^{-1} \quad (4)$$

이고

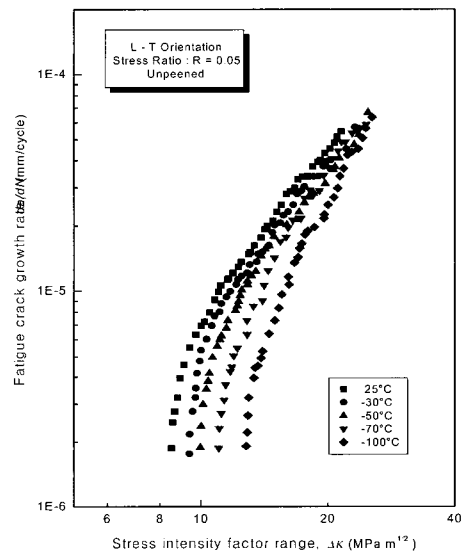
$da/dN$ 의 측정범위는  $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$  (Paris, 1963)이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 저온피로균열 전파특성



a) Shot peening



(b) Unpeened

**Fig. 4** Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

Fig. 4에 쇼트피닝에 의해  $-68\text{kgf}/\text{mm}^2$ 의 압축잔류응력으로 가공된 스프링강 SUP9에 Unpeened제와 Shot peening제에 대하여 CT시험편으로 응력비  $R=0.05$ 에서 시험온도  $25^\circ\text{C}$ ,  $-30^\circ\text{C}$ ,  $-50^\circ\text{C}$ ,  $-70^\circ\text{C}$  및  $-100^\circ\text{C}$ 에서의 점감하중법에 의해 피로균열 전파속도  $da/dN$ 과 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 동일한  $\Delta K$ 에서 저온으로 갈수록  $da/dN$ 의 관계는 직선적으로 증가하고 있으며, 또한 Fig. 4에서 (a), (b)의 그래프를 비교하여 보면 Unpeened제가 Shot peening제보다 빠르게 균열이 진전되고 있음을 알 수 있다. 또

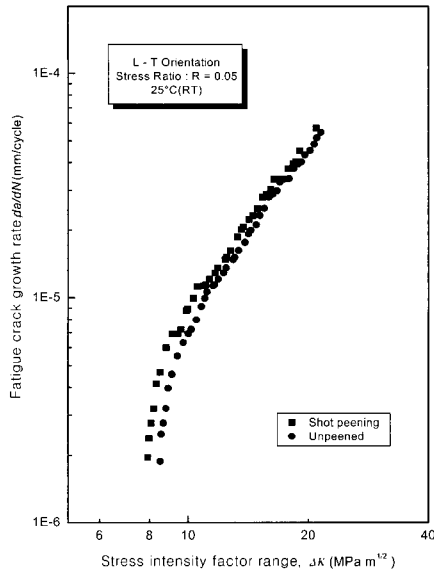


Fig. 5 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(25°C)

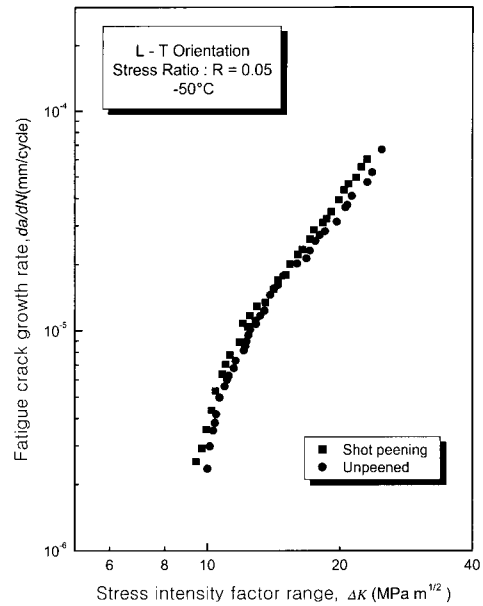


Fig. 7 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-50°C)

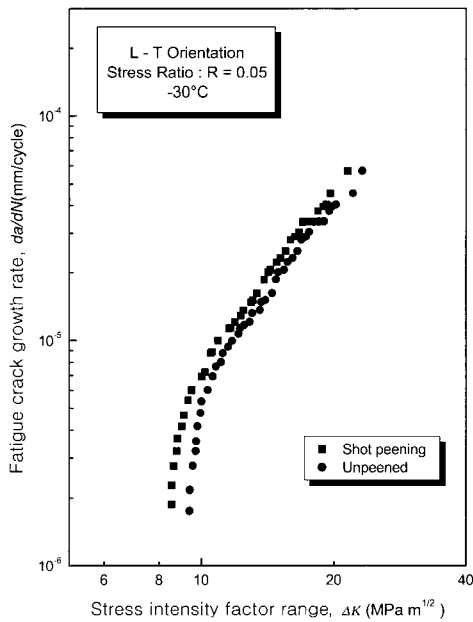


Fig. 6 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-30°C)

한 실험 결과 Shot peening 및 Unpeened재는 온도가 내려갈수록 피로균열 전파초기영역(제1단계 영역)에서의 피로균열진전 하한계 특성  $\Delta K_{th}$  값이 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 현상은 저온일수록 탄성계수의 상승으로 인한 재료강도의 증가 때문으로 균열초기 피로저항성이 우수한 것으로 판단되며, 또한 쇼트피닝가공재는 unpeened재에 비해 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열전단의 구속으로 피로강도의 증가로 판단된다(박경동 등, 1999).

### 3.2 온도에 따른 피로크랙 전파특성

Fig. 5, 6, 7, 8, 9에 각종 차량, 선박 등에 스프링 재료로 사용되고 있는 SUP9강에 대한 피로균열 전파속도  $da/dN$ 와 응력확대계수  $\Delta K$ 관계를 양대수 직선상에 각각의 온도별로 unpeened재와 shot peening재를 비교하여 나타낸 것이다.

각각의 그림에서 알 수 있듯이 Shot peening가공된 SUP9강은 상온 25°C의 경우는  $da/dN \geq 4 \times 10^{-5}$  mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었다. 그러나 저온의 경우는, -30°C의 경우가  $da/dN \geq 3 \times 10^{-5}$  mm/cycle, -50°C의 경우가  $da/dN \geq 2 \times 10^{-5}$  mm/cycle, -70°C의 경우가  $da/dN \geq 1 \times 10^{-5}$  mm/cycle, -100°C의 경우가  $da/dN \geq 9 \times 10^{-6}$  mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었다. 또한 각각의 그림에서 Shot peening재와 Unpeened재를 비교하여 보면 Shot peening재가 Unpeened재보다 제 2단계 영역의  $da/dN$ 가 높아짐을 알 수 있다.

각 그림에서 알 수 있듯이 피로균열진전속도는 온도의 저하에 따라 피로균열 진전속도가 감소되어 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 에 도달하였다. 상온에서 저온으로의 온도저하에 따라 피로균열 전진속도가 감소되어 Fig. 5, 6, 7, 8, 9에서 나타난 것과 같이 하한계 응력확대계수가 상승함을 볼 수 있다.

또한, 온도에 따른 양대수 직선관계의 성립 구간에서 양대수 직선관계의 양상은 동일하게 나타났고, 온도의 저하에 따라 급격하게 감소되어 하한계 응력확대계수에 도달한 것은 저온취성 영향으로 생각된다.

### 3.3 하한계 특성과 온도와 관계

Fig. 10에 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 -68kgf/mm<sup>2</sup>인 스프링강 SUP9에 대해 상온 25°C에서 -100°C까지 피로 크랙전파 특성 실험을 통하여 ASTM647규정에 의거 컴플라이언스법으로 측정된  $da/dN$ - $\Delta K$ 관계의 최종 5점의 결과를 최소자승법으로

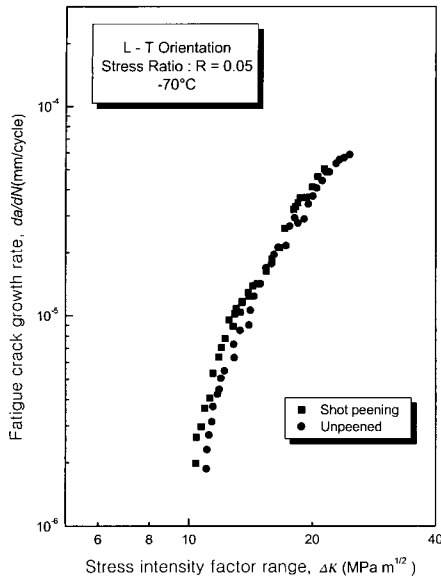


Fig. 8 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-70°C)

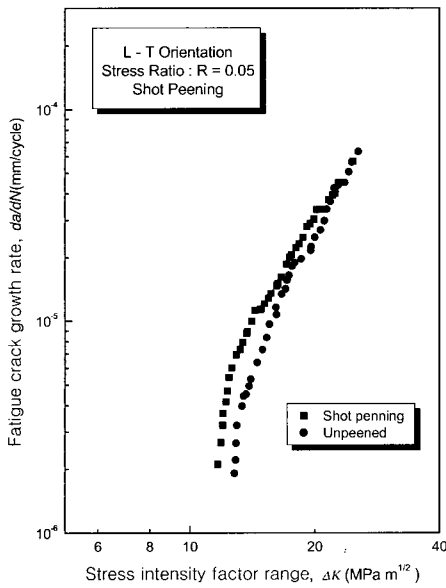


Fig. 9 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range(-100°C)

구한 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 와 온도와의 관계를 나타내었다.

Fig. 10에서 상온 25°C에서 -40°C까지는 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 가 완만하게 증가하다가 -40°C부터 -100°C까지는 급격하게 증가함을 나타내었다. -40°C부터 급격하게 증가하는 것은 저온취성의 영향이 크게 나타난 것으로 생각된다(박경동 등, 1999). 시험결과를 온도별로 표시하여 Table. 5에 나타내었다.

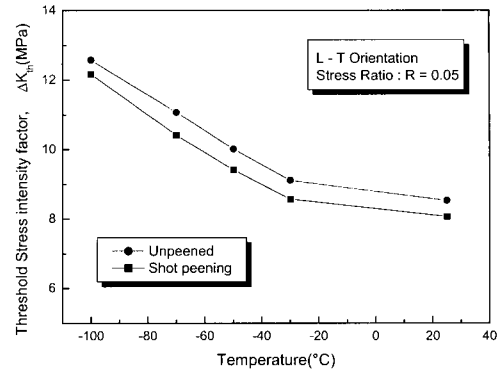


Fig. 10 Effect of Threshold stress intensity factor and temperature(°C)

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

Temperature	25°C	-30°C	-50°C	-70°C	-100°C
Shot peening	8.0	8.51	9.4	10.4	12.2
Unpeened	8.5	9.1	10.0	11.7	12.6

### 3.4 저온변화에 따른 재료상수 C, m 관계

피로균열진전과정의 제2단계 영역에 있어서  $da/dN - \Delta K$ 는 양대수 선도상에서 직선 관계로 나타났고, 이것을 Paris식  $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에 대입하여, Table 6, Table 7, Fig. 11 및 Fig. 12에는 그 결과를 나타내었다.

Shot peening재가 Unpeened재보다 양대수 직선관계가 성립하는 제 2단계 영역에서의  $da/dN - \Delta K$ 직선의 기울기 즉, 균열진전지수 m의 값이 증가한 것으로 나타났으며, 이것은 재료의 파괴가 시작되면 균열진전속도  $da/dN$ 가 증가하게 되고, 따라서 취성파괴가 일어날 가능성이 커질 것으로 추정된다.

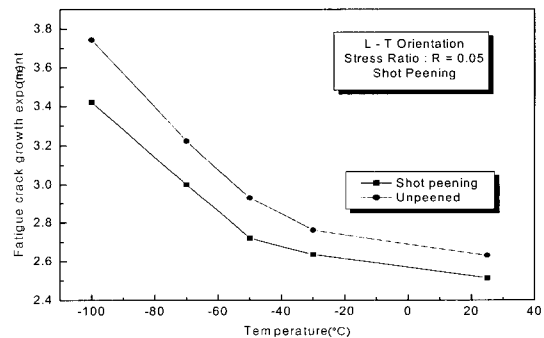


Fig. 11 Relation between fatigue crack growth exponent m and temperature(°C)

### 3.5 쇼트피닝재료의 저온에서 피로균열 진전길이와 사이클 수의 관계

Fig. 13은 저온 피로균열 진전길이와 사이클의 관계를 나타

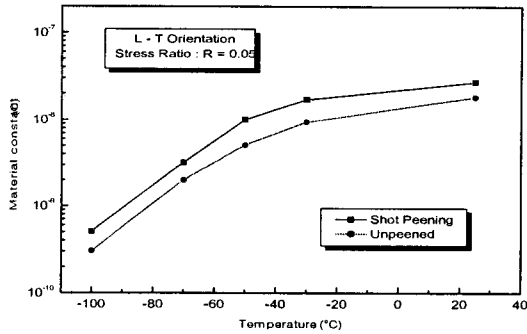


Fig. 12 Relation between material constant C and temperature(°C)

내었다. Fig. 13에 의하면 각 온도에 있어서 크랙길이는 저온으로 갈수록 사이클의 수가 줄어드는 것을 볼 수가 있다. Shot peening재의 각각의 사이클은 상온(25°C)에서  $1.32 \times 10^6$  Cycle, -30°C에서  $9.7 \times 10^5$  Cycle, -50°C에서  $7.9 \times 10^5$  Cycle, -70°C에서  $6.3 \times 10^5$  Cycle, -100°C에서  $5.7 \times 10^5$  Cycle로 나타났다.

Table 6 Experimental constants by  $da/dN=C(\Delta K)^m$  for the fatigue crack growth(Shot peening)

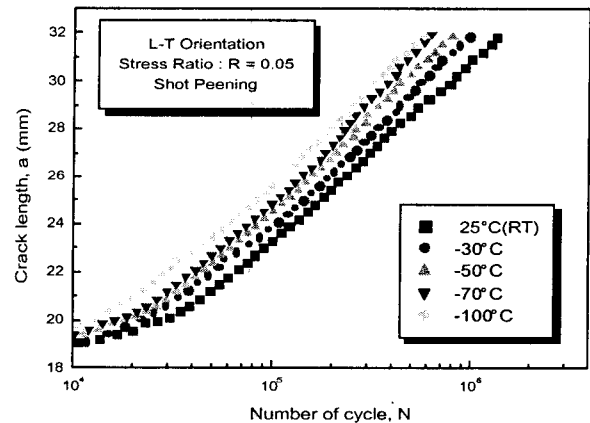
Tem.	$\Delta K$ Range (MPa $\sqrt{m}$ )	$da/dN$ Range (mm/cycle)	m	C
25°C	$10.95 \leq \Delta K \leq 20.91$	$1.131 \times 10^{-5} \leq da/dN \leq 5.701 \times 10^{-5}$	2.515	$2.71 \times 10^{-8}$
-30°C	$10.49 \leq \Delta K \leq 21.51$	$8.762 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.721 \times 10^{-5}$	2.635	$1.72 \times 10^{-8}$
-50°C	$11.01 \leq \Delta K \leq 23.06$	$7.051 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.022 \times 10^{-5}$	2.721	$1.01 \times 10^{-8}$
-70°C	$11.82 \leq \Delta K \leq 21.37$	$6.351 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.031 \times 10^{-5}$	3.001	$3.02 \times 10^{-9}$
-100°C	$12.92 \leq \Delta K \leq 20.19$	$6.923 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.36 \times 10^{-5}$	3.421	$5.12 \times 10^{-10}$

그리고 Unpeened재의 각각의 사이클 수는 상온(25°C)에서  $9.2 \times 10^6$  Cycle, -30°C에서  $7.3 \times 10^5$  Cycle, -50°C에서  $6.3 \times 10^6$  Cycle, -70°C에서  $5.6 \times 10^5$  Cycle, -100°C에서  $5.0 \times 10^5$  Cycle로 나타났다. 이처럼 상온(25°C)에서 저온 -100°C로 갈수록 사이클 수가 감소하는 것을 볼 수 있었고 Shot peening재가 Unpeened재보다 사이클 수가 더 많은 것을 볼 수가 있었다.

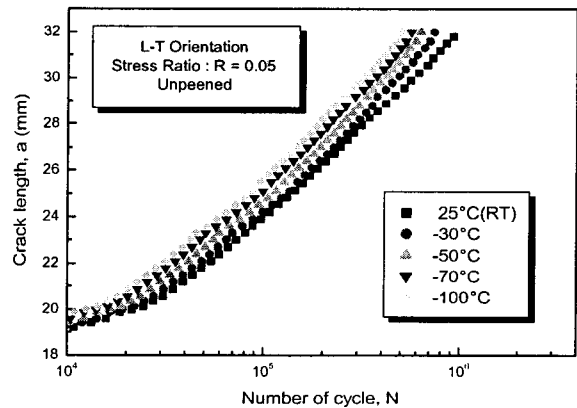
이러한 현상은 저온 취성이 피로크랙길이와 사이클에 미치는 영향으로 생각되고, 또한 Shot peening재가 Unpeened재보다 피로수명이 향상은 되었는데 이는 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열전단의 구속으로 Shot peening재가 Unpeened재보다 수명이 더 길어진 것으로 판단된다.

Table 7 Experimental constants by  $da/dN=C(\Delta K)^m$  for the fatigue crack growth(Unpeened)

Tem.	$\Delta K$ Range (MPa $\sqrt{m}$ )	$da/dN$ Range (mm/cycle)	m	C
25°C	$15.95 \leq \Delta K \leq 21.51$	$2.801 \times 10^{-5} \leq da/dN \leq 5.443 \times 10^{-5}$	2.631	$1.81 \times 10^{-8}$
-30°C	$10.01 \leq \Delta K \leq 23.21$	$5.362 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.702 \times 10^{-5}$	2.761	$9.42 \times 10^{-9}$
-50°C	$10.41 \leq \Delta K \leq 24.9$	$3.821 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.667 \times 10^{-5}$	2.931	$5.09 \times 10^{-9}$
-70°C	$13.34 \leq \Delta K \leq 24.65$	$8.513 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.872 \times 10^{-5}$	3.223	$2.01 \times 10^{-9}$
-100°C	$15.32 \leq \Delta K \leq 25.46$	$8.351 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 6.332 \times 10^{-5}$	3.743	$3.05 \times 10^{-10}$



(a) Shot peening



(b) Unpeened

Fig. 13 Relations between crack length and number of cycle

3.6 파단면의 특성

Fig. 14은 스프링강 SUP9에 대하여 상온 25°C와 -30°C, -50°C, -70°C 및 -100°C 등의 저온 환경에서, Shot peening재와 Unpeened재에 대한 피로균열진전특성을 K-감소방식으로 시험한 후, 제 2단계 영역의 중심부의 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경으로 촬영하여 나타내었다.

각 시험편의 파단면에는 피로파단면의 특징이 되는 스트라이에이션(striation)이 관찰되었는데, 그 생성은 인장과정에서 균열선단에 소성변형이 생김에 따라 둔화가 일어나고, 압축과정에서 재예화가 일어나는 둔화-재예화 과정에 의해 형성되는 것으로 반복응력 1사이클당 스트라이에이션 1개가 형성되는 것으로 보이며 각 온도별 스트라이에이션의 크기와 모양은 큰 변화가 없었으나, 파면 조직상의 크기는 뚜렷한 차이를 나타내어 저온일수록 취성파괴가 발생한 것으로 판단된다(박경동 등, 2000).

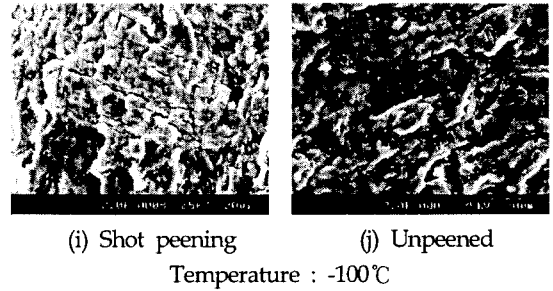
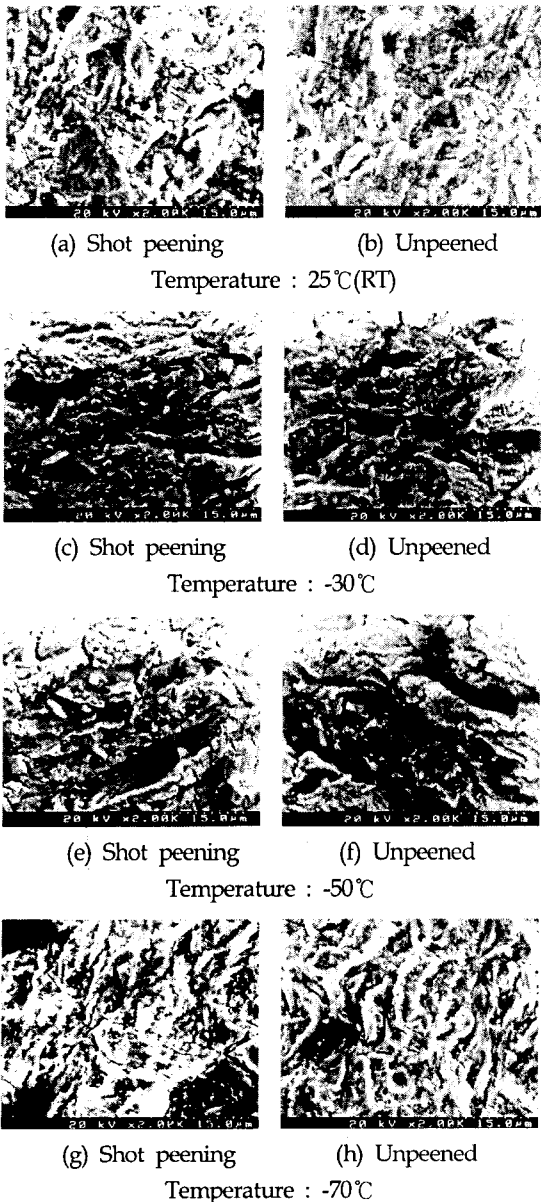


Fig. 14 Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C and -120°C for R=0.05

4. 결 론

스프링강 SUP9에 대하여 쇼트피이닝으로 -68kgf/mm<sup>2</sup>의 압축 잔류응력으로 가공하여 응력비 R=0.05로 25°C, -30°C, -50°C, -70°C 및 -100°C의 저온에서 크랙전파시험을 실시하여 스프링강의 저온에서의 크랙전파속도, 크랙전파특성 및 하한계 응력 확대계수를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 피로진전거동에 쇼트피이닝가공된 SUP9강은 상온 25°C의 경우  $da/dN-\Delta K$  양대수 직선관계는  $4 \times 10^5 \text{ mm/cycle}$ 까지 성립하다가 -100°C의 경우  $9 \times 10^6 \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하였다. 온도의 저하에 따라 양대수 직선관계가 조금씩 감소하여 하한계 응력확대계수가 증가하였다.
- (2) 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 는 상온 25°C에서 -40°C까지 완만하게 증가하였으나 -40°C 이하의 저온에서는 급격하게 증가하였다. 이는 -40°C이하의 저온에서는 취성이 크게 나타난 것으로 생각된다.
- (3) Shot peening재는 상온 25°C에서 -100°C사이의 저온까지 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}=8 \sim 12.2 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 으로 나타났고, Unpeened재는 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}=8.5 \sim 12.6 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 으로 나타났다. 온도의 저하에 따라 크랙진전속도가 감소하여 하한계가 증가함을 보였다.
- (4) 쇼트피이닝 가공재 경우에 Unpeened재 보다 각 온도에서 피로수명의 향상을 보이고 있다. 이러한 피로수명의 향상은 SUP9강의 극표면에 쇼트피이닝 가공에 의해 형성된 압축잔류응력에 의한 표면에서 균열선단의 구속의 영향으로 생각된다.

참 고 문 헌

박경동, 정찬기 (2001). "SA516강의 탄소성 파괴인성평가에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제34권 제1호, pp 37-44.  
 박경동, 정찬기 (2001). "JISG4081SUP7-DIN50CrV4강의 피로강도에 미치는 쇼트피이닝의 영향", 한국해양공학회지, 제15권 제4호, pp 66-72.  
 박경동, 김정호, 정찬기, 하경준 (2000). "압력용기용 강의 저온 피로크랙 하한계 특성에 관한 연구(II)", 한국해양공학회지, 제14권, 제3호, pp 78-83.

- 박경동, 노태영, 김영대, 김형자, 손재윤 (1999). "압력용기용 A516강의 저온피로 크랙전파특성에 관한 연구", 한국해양 공학회지, 제13권, 제3(1)호, pp 108-115.
- 배성인, 한민구 (1995). 파괴역학 실험법, 원창출판사.
- 이용복, 김호경, 정진성(1999), 피로해석의 기초, 청문각.
- 장동일, 정경섭, 한민구 (1992). 파괴역학, 원창출판사.
- 정성균, 이승호 (2001), 쇼트피닝 가공개론, 세화출판사.
- Kitsunai, Y. (1991). "Fatigue Crack Growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperature", ASTM STP 857, pp 280-290.
- Kobayashi, H. (1993). Fracture Mechanics, 공립출판주식회사.
- 
- 2002년 3월 11일 원고 접수  
2002년 9월 2일 최종 수정본 채택