

## 차량용 스프링강의 피로거동에 미치는 온도의 영향

박경동<sup>1)</sup> · 류찬욱<sup>2)</sup>

부경대학교 기계공학과<sup>1)</sup> · 부경대학교 기계공학과 대학원<sup>2)</sup>

### An Effect of Temperature on the Fatigue Crack Propagation Behavior of Spring Steel for Vehicle

Kyoungdong Park<sup>\*1)</sup> · Chanuk Ryu<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

<sup>2)</sup>Graduate School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 30 April 2003 / Accepted 6 November 2003)

**Abstract** : In this study, CT specimens were prepared from spring steel(SUP9) processed shot peening which was room temperature and low temperature experiment. And 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, -100°C and -150°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) was increased but stress intensity factor range  $\Delta K$  in the stable of fatigue crack growth (Region II) was decreased in proportion to decrease temperature. It is assumed that the fatigue resistance characteristics and fracture strength at low temperature and high temperature is considerably higher than that of room temperature in the early stage and stable of fatigue crack growth region.

**Key words** : Shot peening(쇼트피닝), Residual stress(잔류응력), Low temperature(저온), Fatigue crack propagation(피로균열진전)

### 1. 서론

최근 피로파괴의 구조이론과 실험적인 해석은 상당히 발전되었지만, 여러 가지 인자들의 복합적인 영향을 받는 부재로 이루어진 항공기와 선박등 대형구조물의 피로파괴에 대한 규명은 명확히 확립되지 않은 실정이다. 따라서 기계부품이나 발전설비, 원자로, 저온 압력용기, 저수조 탱크 등이 다양한 환경에서 장시간 사용되는 경우에 이들 구조물의 설계, 제작 및 유지의 측면에서 파괴역학적인 적용이 크게 필요하게 되었다.<sup>1)</sup>

부품의 설계시 고려되는 금속의 고강도화, 고응력화는 부품의 경량화를 실현시킴으로써 재료 절감 과 고출력화, 연료절감이라는 잇점을 갖고 있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부 하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정 성장하여 최종적으로 금속파괴 되는 현상이 발생된다.<sup>2)</sup> 이와 같이 금속에서 발생하는 피로파괴 현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있으므로 현재와 같이 대형화 된 산업 기술사회에 피로파괴 방지 기술은 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 여기에서 가공경화에 따른 정도의 증가는 피로수명에 큰

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

영향을 주지 않으며, 표면의 요철과 압축 잔류응력이 피로수명에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 쇼트피이닝은 금속 표면에 압축 잔류응력을 형성함으로써 피로에 의한 균열의 생성과 균열의 전파 역지력을 향상시킨 것으로 여기서 압축 잔류응력은 금속의 표면부에 되도록 가까이 형성될 수 있도록 하고, 또 압축 잔류응력이 높게 형성될수록 피로수명은 향상된다고 알려져 있다.<sup>3,4)</sup> 그러나 쇼트피이닝재료의 저온영역에서의 피로 시험결과는 찾아보기 힘들었다. 본 연구는 자동차용 스프링재료로 사용되는 SUP9강에 대하여 쇼트피이닝에 의해 -68kgf/mm<sup>2</sup>의 압축잔류응력으로 가공된 재료를 상온 25°C, -30°C, -50°C, -70°C, -100°C 및 -150°C의 저온에서 응력비 R=0.05로 하여 쇼트피이닝을 하지 않은 재료와 쇼트피이닝을 한 재료에 대해 피로균열 전진특성과 하한계특성, 피로균열전진지수 m과 재료상수 C의 관계를 규명하여 저온에서의 피로수명과 잔존수명 등을 예측하여 안전설계에 기여하고자 한다.<sup>5)</sup>

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 시험편

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

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

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

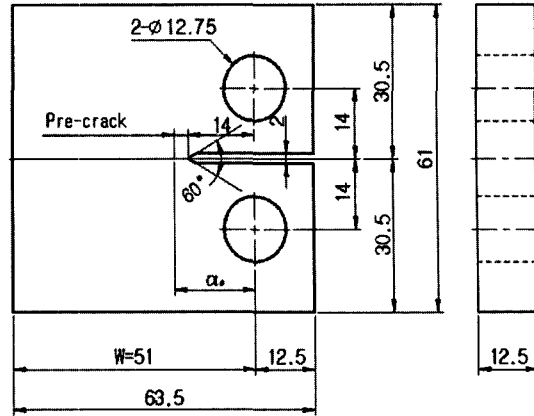


Fig. 1 Configuration of CT-specimen (unit:mm)

cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈반지름 0.1mm가 되게 가공하였다. 그리고 피로균열전진의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며, 25°C 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력범위에서 ASTM E647-93 규정에 의거 3mm의 피로예균열을 주었다.<sup>6)</sup>

### 2.2 실험장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로시험기(INSTRON 8501, 100KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤하였다. 균열길이 측정은 시편에 COD클립게이지를 부착하여 Compliance법을 사용하였다. 또 스프링강에 있어서 쇼트피이닝이 피로강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 연

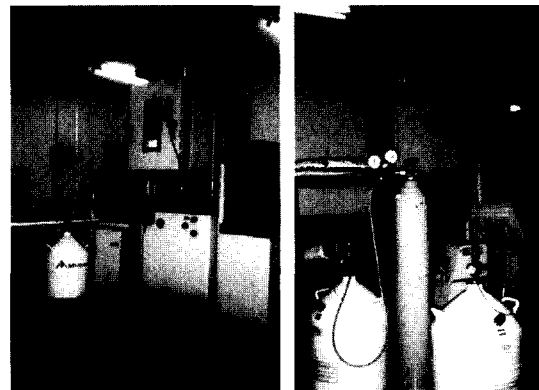


Fig. 2 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

Table 3 Conditions of shot-peening

Condition	Shot-peening
Impeller dia	490 mm
Blades Width /Q'ty	90mm/6 pcs
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 %

쇼트피이닝과 1단 쇼트피이닝으로 나누어 실험하였다.

그리고 쇼트피이닝은 스프링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일스프링 제조용 쇼트피이닝기와 엔진벨브 스프링 제조용 쇼트피이닝기를 사용하였으며, 그 조건은 Table 3과 같다.

### 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 10~20 $\mu$ m 단위로 연마해 가면서 Table 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류 응력을 측정하였다. 측정결과 표면에서 150  $\mu$ m의 깊이 부에 -68kgf/mm<sup>2</sup> 크기의 최대 압축잔류응력이 형성되었다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-ray diffraction	Condition	
	Taget	Cr-V
	X-ray source	Voltage
	Current	10 mA
$\Psi$	0°, 15°, 30°, 45°	
2 $\theta$	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 펌베를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 5MPa내외로 되도록 하여 액체질소를 챔버 내로 유입시켜 저온환경으로 만든다. 실험 중 액체질소의 감소에 따라 질소 펌베의 압력으로 액체질소의 유입을 정상적으로 밀어주며 온도유지는 전자석밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는  $\pm 1^{\circ}$ C로 유지하였고 응력비 R=0.05, 20Hz, 실험온도는 25 $^{\circ}$ C와 -30 $^{\circ}$ C, -50 $^{\circ}$ C, -70 $^{\circ}$ C, -100 $^{\circ}$ C, -150 $^{\circ}$ C로 하였다. 실험해석을 하기 위해 응력확대계수 K는

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

및 응력비

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

의 함수가 된다. 여기서 R의 영향을 제외하면 특정의  $\Delta K$ 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인<sup>7)</sup>

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

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 여기서 C와 m은 재료상수로서 그 값은 동일 재료, 동일환경 구조물 등의 균열진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다. 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 시험에서는 ASTM (1997) E647-95a 규정에 의거  $\Delta K$ 콘트롤에 의한 K-감소방식을 이용하였는데 그 감소조건은 다음과 같다.<sup>8)</sup>

$\Delta K$ 의 기울기는

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

da/dN의 측정범위  $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$ <sup>9)</sup>

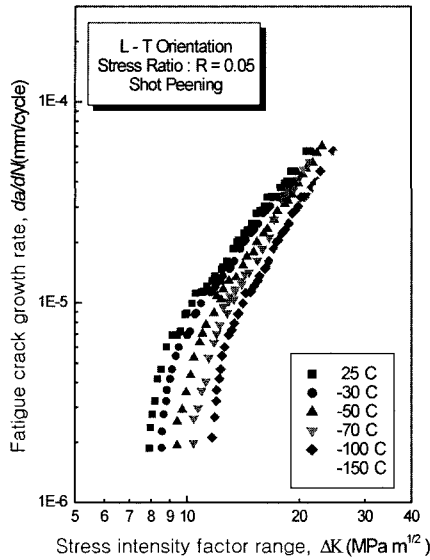
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 저온피로균열 전파특성

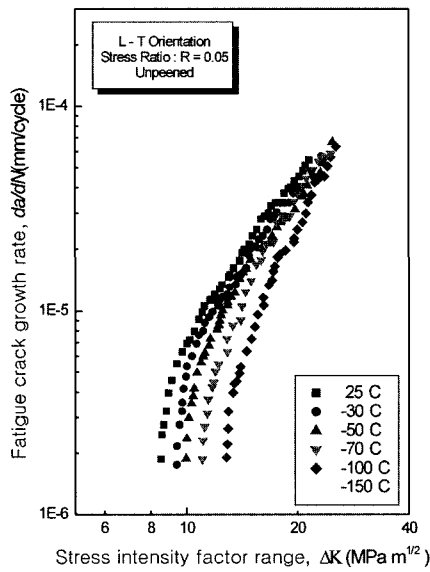
Fig. 3에 쇼트피이닝에 의해 -68kgf/mm<sup>2</sup>의 압축잔류응력으로 가공된 스프링강 SUP9에 인피이닝재와 쇼트피이닝재에 대하여 CT시험편으로 응력비

R=0.05에서 시험온도 25°C(RT), -30°C, -50°C, -70°C, -100°C 및 -150°C에서의 점감하중법에 의해 피로균열 전파속도 da/dN와 응력확대계수 범위 ΔK의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 ΔK에서 저온으로 갈수록 da/dN의 관계는 직선적으로 감소하고 있으며, 또

한 Fig. 3에서 (a), (b)의 그래프를 비교하여 보면 언피닝재가 쇼트피닝재보다 빠르게 균열이 진전되고 있음을 알 수 있다. 또한 실험 결과 쇼트피닝 및 언피닝재는 온도가 내려갈수록 피로균열 전파 초기영역(제1단계 영역)에서의 피로균열진전 하한계 특성 ΔK<sub>th</sub> 값이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 저온일수록 탄성계수의 상승으로 인한 재료강도의 증가 때문으로 균열초기 피로저항성이 우수한 것으로 판단되며, 또한 쇼트피닝가공재는 언피닝재에 비해 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속으로 피로강도의 증가로 판단된다.<sup>10)</sup>



(a) Shot peening



(b) Unpeened

Fig. 3 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

### 3.2 하한계 특성과 온도와의 관계

Fig. 4에서 상온 25°C에서 -40°C까지는 하한계 응력확대계수 ΔK<sub>th</sub>가 완만하게 증가하다가 -40°C부터 -150°C까지는 급격하게 증가함을 알 수 있다. -40°C부터 급격하게 증가하는 것은 저온취성의 영향이 크게 나타난 것으로 생각된다.<sup>11)</sup> 시험결과를 온도별로 표시하여 Table. 5에 나타내었다.

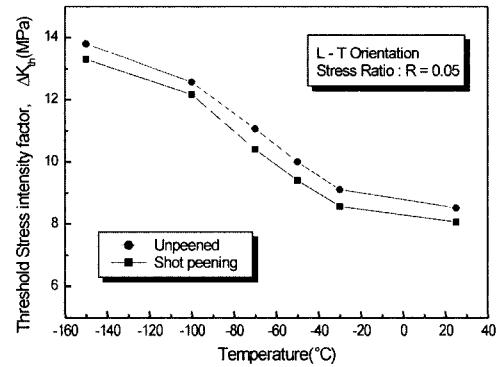


Fig. 4 Relation between Threshold stress intensity factor and temperature(°C)

Table 5 The value of fatigue crack growth threshold ΔK<sub>th</sub> (Mpa √m)

Temperature	25°C	-30°C	-50°C	-70°C	-100°C	-150°C
Shot peening	8.0	8.51	9.4	10.4	12.2	13.3
Unpeened	8.5	9.1	10.0	11.7	12.6	13.8

### 3.3 온도변화에 따른 재료상수 C, m 관계

피로균열진전과정의 제2단계 영역에 있어서  $da/dN - \Delta K$ 는 양대수 선도상에서 직선 관계로 나타났고, Paris식  $da/dN=C(\Delta K)^m$ 의 상수 C, m을 구하여, Table 6, Table 7, Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다.

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	$1.12 \times 10^{-9}$
-150°C	$14.02 \leq \Delta K \leq 25.47$	$6.016 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.51 \times 10^{-5}$	3.612	$4.75 \times 10^{-10}$

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	$3.05 \times 10^{-10}$
-150°C	$16.76 \leq \Delta K \leq 24.68$	$8.015 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 4.538 \times 10^{-5}$	3.846	$1.66 \times 10^{-10}$

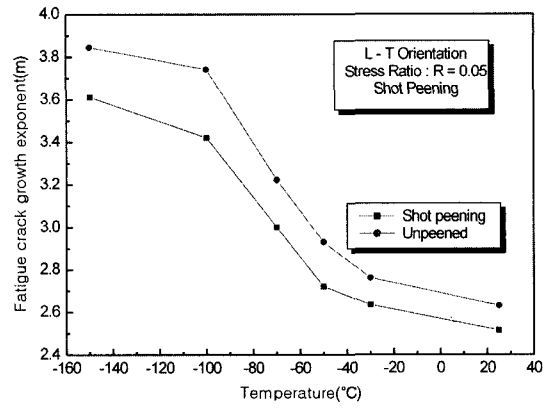


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth exponent m and Temperature(°C)

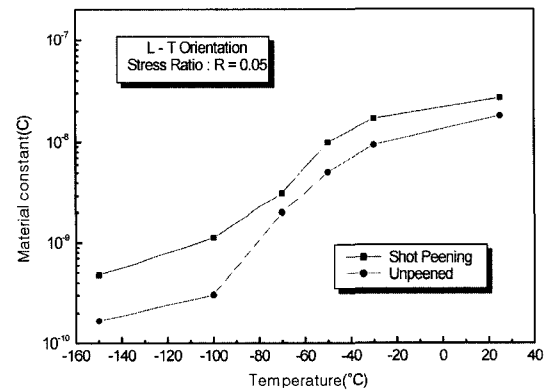


Fig. 6 Relation between material constant C and Temperature(°C)

쇼트피닝재가 언피닝재보다 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. 재료상수 C 값은 저온으로 갈수록 크기가 감소하기는 하나 균열진전지수 m에 비해  $da/dN$ 에 대하여 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되었다.

### 3.4 쇼트피닝재료의 저온에서 피로균열 진전길이와 사이클 수의 관계

Fig. 7은 저온 피로균열 진전길이와 사이클의 관계를 나타내었다. Fig. 7에 의하면 각 온도에 있어서

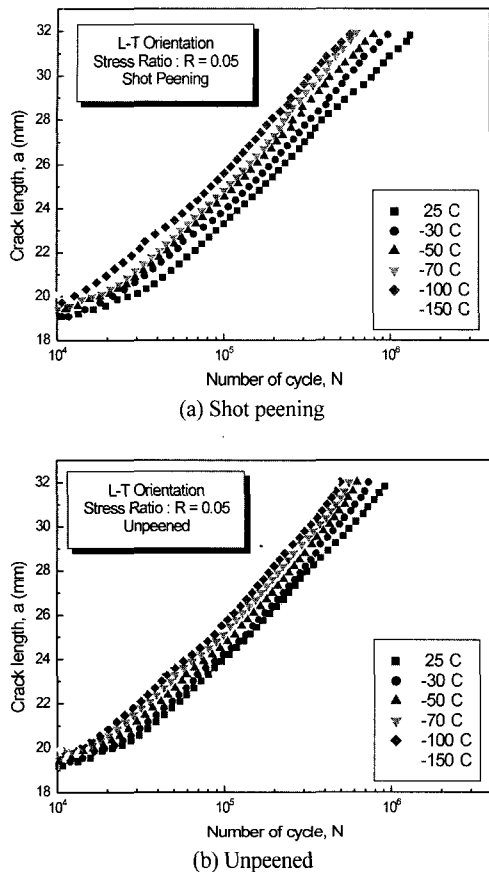


Fig. 7 Relations between crack length and number of cycle

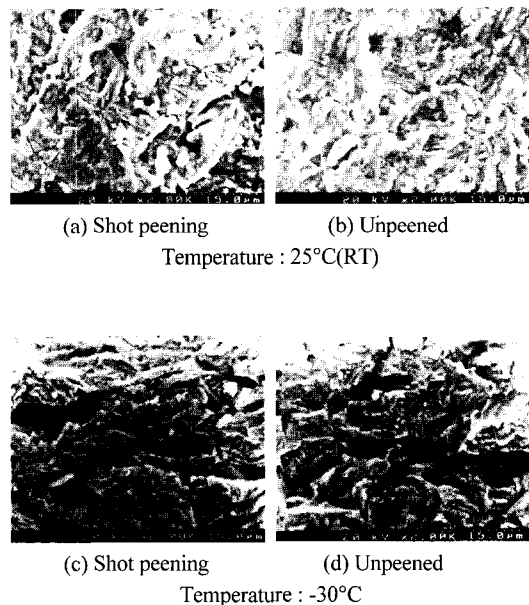
크랙길이는 저온으로 갈수록 사이클의 수가 줄어드는 것을 볼 수가 있다. 쇼트피닝재의 각각의 사이클은 상온(25°C)에서  $1.32 \times 10^6$  Cycle, -30°C에서  $9.7 \times 10^5$  Cycle, -50°C에서  $7.9 \times 10^5$  Cycle, -70°C에서  $6.3 \times 10^5$  Cycle, -100°C에서  $5.7 \times 10^5$  Cycle, -150°C에서  $5.2 \times 10^5$  Cycle로 나타났다.

그리고 언피닝재의 각각의 사이클 수는 상온(25°C)에서  $9.2 \times 10^5$  Cycle, -30°C에서  $7.3 \times 10^5$  Cycle, -50°C에서  $6.3 \times 10^5$  Cycle, -70°C에서  $5.6 \times 10^5$  Cycle, -100°C에서  $5.0 \times 10^5$  Cycle, -150°C에서  $4.6 \times 10^5$  Cycle로 나타났다. 이처럼 상온(25°C)에서 저온 -150°C로 갈수록 사이클 수가 감소하는 것을 볼 수 있었고 쇼트피닝재가 언피닝재보다 사이클 수가 더 많은 것을 볼 수가 있었다. 이러한 현상은 저온 취성이 피로크랙길이와 사이클에 미치는 영향으로 생각되고, 또한 쇼트피닝재가 언피닝재보다

피로수명이 향상은 되었는데 이는 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속으로 쇼트피닝재가 언피닝재보다 수명이 더 길어진 것으로 판단된다.

### 3.5 파단면의 특성

Fig. 8은 스프링강 SUP9에 대하여 상온 25°C와 -30°C, -50°C, -70°C, -100°C 및 -150°C 등의 저온 환경에서, 쇼트피닝재와 언피닝재에 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.



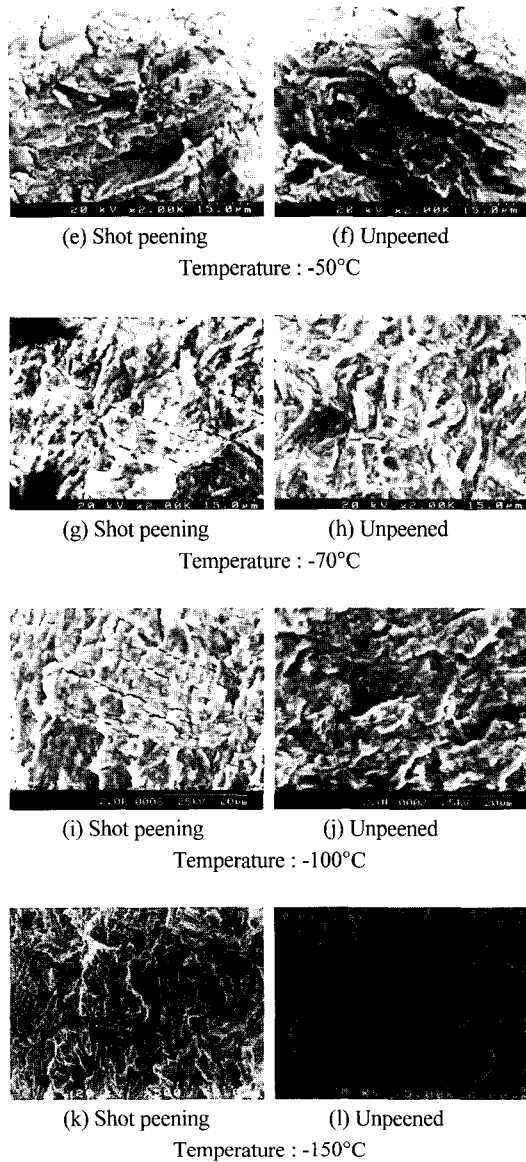


Fig. 8 Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C and -150°C for R=0.05

#### 4. 결론

스프링강 SUP9에 대하여 쇼트피닝으로  $-68\text{kgf}/\text{mm}^2$ 의 압축잔류응력으로 가공하여 응력비  $R=0.05$ 로 25°C, -30°C, -50°C, -70°C, -100°C 및 -150°C의 저온에서 크랙전파시험을 실시하여 스프링강의 저온에서의 크랙전파속도, 크랙전파특성 및 하한계 응력확대계수를 측정하여 다음과 같은 결과

를 얻었다.

- 1) 피로진전거동에 쇼트피닝 효과에 있어서 상온 25°C의 경우  $da/dN \sim \Delta K$  양대수 직선관계는  $4 \times 10^5 \text{mm/cycle}$ 까지 성립하다가 -150°C의 경우  $9 \times 10^6 \text{mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하였다. 온도의 저하에 따라 양대수 직선관계가 조금씩 감소함을 나타내었다.
- 2) 저온에서의 하한계 응력확대계수는 상온 25°C에서 -40°C까지의 하한계 응력확대계수는 완만히 증가하였으나 -40°C부터는 급격하게 증가함을 보였다. 그 후 -100°C 이상에서는 다시 완만히 증가하는 추세로 변화하였다. 이는 -40°C ~ -50°C 사이의 저온 취성의 영향으로 생각된다.
- 3) 쇼트피닝재는 상온 25°C에서 -150°C 사이의 저온까지 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}=8 \sim 13.3 \text{MPa}\sqrt{m}$ 으로 나타났고 언피닝재 역시 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}=8.5 \sim 13.8 \text{MPa}\sqrt{m}$ 으로 나타났다. 온도의 저하에 따라 크랙진전속도가 감소하여 하한계가 증가함을 보였다.
- 4) 쇼트피닝 가공재의 경우에 언피닝재 보다 각 온도에서 피로수명의 향상을 보이고 있다. 피로수명의 향상은 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단을 구속하기 때문으로 생각된다.

#### 후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경 첨단에너지기계연구센터의 지원(과제번호 : R12-2003-001-02012-0)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

#### References

- 1) K. D. Park, C. G. Jung, "A Study of Stress ratio Influence on the Fatigue Crack Growth of SA516 Steel at Low Temperature," KCORE, Vol.34, No.1, pp.37-44, 2001.
- 2) 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 KSAE, Vol.11, No.1,

- pp.185-192, 2003.
- 3) S. G. Jung, S. H. Lee, A Guide of Shot Peening Processing, Sehwa Pub. pp.6-12. 2001.
  - 4) S. I. Bae, M. G. Han, Test Method of Fracture Mechanics, Wonchang Pub. pp.8-11, 209, 1995.
  - 5) D. I. Jang, K. S. Jung, M. G. Han, Fracture Mechanics, Wonchang Pub. pp.87-96, 1992.
  - 6) ASTM : E647-93, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 1993.
  - 7) Y. B. Lee, H. K. Kim, J. S. Jung, Fundamentals of Fatigue Analysis, Chungmungak, pp.99-125, 1999.
  - 8) Y. Kitsunai. "Fatigue Crack Growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperature," ASTM STP 857, pp.280-290, 1991.
  - 9) P. C. Paris, F. Erdogan, Tran. of the ASME Ser. D, pp.528-534, 1963.
  - 10) K. D. Park, J. H. Kim, C. G. Jung, K. J. Ha, "A Study on the Fatigue Crack Growth Threshold Characteristic for Steel of Pressure Vessel at Low Temperature," KCORE, Vol.14, No.3, pp.78-83, 2000.
  - 11) K. D. Park, T. Y. No, Y. D. Kim, H. J. Kim, J. Y. Son, "A Study on the Fatigue Crack Propagation Characteristic for Steel of Pressure Vessel A516 at Low Temperature," KCORE, Vol.13, No.3(1), pp.108-115, 1999.