

-shot peening 가공재의 저온 피로 강도 평가

박경동 · 권오현*†

부경대학교 기계공학부 · *부경대학교 안전공학과
(2003. 2. 27. 접수 / 2003. 8. 5. 채택)

An Evaluation on the Fatigue Strength Characteristics for the Shot Peening Spring Steel at Low Temperature

Keyoung-Dong Park · Oh-Heon Kwon*†

Division of Mechanical Engineering Pukyong National University

*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received February 27, 2003 / Accepted August 5, 2003)

Abstract : In this study, CT specimens were prepared from spring steel(SPS5) processed shot peening. The fatigue crack growth tests were carried out in the environment of the 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 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) were decreased in proportion to descend temperature. It was shown that the fatigue resistance characteristics and fracture strength at low temperature are considerable higher than those of room temperature in the early stage and stable of fatigue crack growth region.

Key Words : shot peening, residual stress, low temperature, fatigue crack propagation

1. 서 론

피로파괴의 이론과 실험적인 해석은 상당히 발전되어 있지만, 여러 가지 인자들의 복합적인 영향을 받는 부재로 이루어진 항공기와 선박 등 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 피로파괴 적용이 요구된다. 한편 부품 설계시 고려되는 금속의 고강도화, 고응력화는 부품의 경량화를 실현시킴으로써 재료 절감과 고출력화, 연료절감이라는 잇점을 갖고 있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 금속 표면 또는 금속 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정 성장

하여 최종적으로 급속파괴 되는 현상을 유발한다¹⁾. 이와 같은 현상을 방지하기 위하여 재료의 가공경화를 이용하는 수법이 적용될 수 있다. 가공경화에 따른 경도의 증가는 피로수명에는 큰 영향을 주지 않으나, 표면의 요철과 압축 잔류응력이 피로수명에 큰 영향을 주게 된다. 금속 표면에 압축 잔류응력이 형성되면 피로에 의한 균열의 생성과 균열의 전파 역지력을 향상시킬 수 있다. 여기서 압축 잔류응력은 금속의 표면부에 되도록 가까이 형성될 수 있도록 하고, 또 압축 잔류응력이 높게 형성될수록 피로수명은 향상된다고 알려져 있다²⁾. 이러한 압축 잔류응력을 재료에 형성시키는 방법으로 shot peening을 행하고 있으나³⁾ shot peening에 의한 효과를 저온영역에서 피로 시험한 결과는 찾아보기 힘들다. 본 연구는 자동차용 스프링재료로 사용되는 SPS5강에 대하여 shot peening -68kgf/mm²의 압축잔류응력으로 가공된 재료를 상온 25°C, -30°C, -50°C, -70°C -100°C 및 -150°C의 저온에서 응력비 R=0.05로 피로시험하였다. shot peening을 하지 않은 재료와 shot peening을 한 재료에 대해 피

†To whom correspondence should be addressed.
kwon@pknu.ac.kr

로균열전파특성과 하한계특성, 피로균열진전지수 m 과 재료상수 C의 관계를 규명하고 저온에서의 피로 수명, 잔존수명 등을 예측하여 안전설계에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연 강재 스프링강 SPS5이며, 시편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Fig. 1은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용, L-T방위로 채취하여 압연 방향이 하중방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93⁹⁾의 기준에 따라 외형가공은 밀링으로, 노치 홈은 와이어커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노치반지름 0.1mm가 되게 가공하였다. 그리고 피로균열진전의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며, 25°C 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력범위에서 ASTM E647-93 규정에 의거 3mm의 피로 예균열을 주었다.

Table 1. Chemical compositions (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 (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
1742	11.4	275

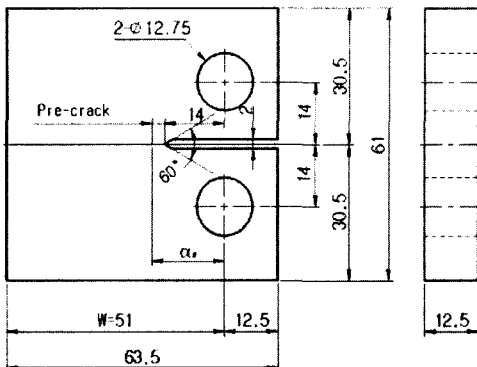


Fig. 1. Configuration of CT-specimen (unit : mm)

2.2. 실험 장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로시험기(INSTRON 8501, 100KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤하였다. 균열길이 측정은 시편에 COD클립게이지를 부착하여 Compliance법을 사용하였다⁹⁾. 또 스프링강에 있어서 샷피닝이 피로 강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 샷피닝하지 않은 것과 1단 샷피닝으로 나누어 실험하였다.

그리고 샷피닝은 스프링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일스프링 제조용 샷피닝기와 엔진밸브 스프링 제조용 샷피닝기를 사용하였으며, 그 조건은 Table 3과 같다.

2.3. 실험방법

2.3.1. 잔류응력

샷피닝된 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기 (RIGAKU - MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20μm 단위로 연마하면서 Table 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하여 압축잔류응력인 -68kgf/mm²를 얻었다.

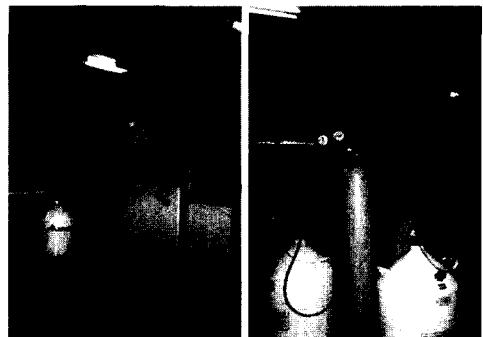


Fig. 2. Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

Table 3. Conditions of shot peening

Condition	Shot peening
Impeller Dia	490 mm
Blades Width /Qty	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%

Table 4. Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction		Condition	
X-Ray Source	Target	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 만들었다. 실험 중 액체질소의 감소에 따라 질소보배의 압력으로 액체질소의 유입을 정상적으로 밀어 주며 온도유지는 전자석밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 하였다. 온도편차는 ±1℃로 유지하였고 응력비 R=0.05 20Hz, 실험온도는 25℃ 와 -30℃, -50℃, -70℃, -100℃, -150℃로 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 함수를 적용하였다. 여기서 R의 영향을 제외 하면 특정의 ΔK 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인⁶⁾

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

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 여기서 C와 m은 상수로서 그 값은 동일재료, 동일환경 구조물 등의 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다. 응력확대계수 범위 ΔK 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 시험에서는 ASTM E647-95a 규정에 의거 ΔK 콘트롤에 의한 K-감소방식을 이용하였는데 그 감소조건은 다음과 같다⁷⁾.

ΔK 의 기울기는

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

이며, da/dN의 측정범위는 $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$ 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 저온피로균열 전파특성

Fig. 3에 피닝하지 않은 스프링강 SPS5와 샷피닝에 의해 -68kgf/mm²의 압축잔류응력으로 가공된 샷피닝재에 대하여 CT시험편으로 가공하여 응력비

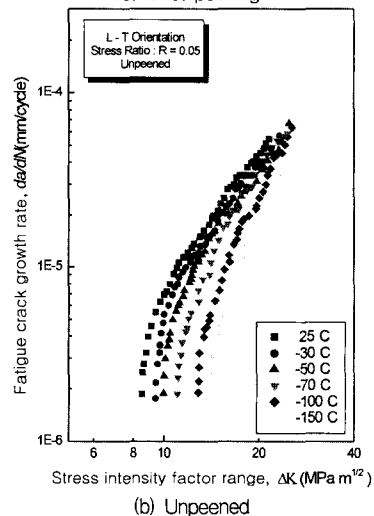
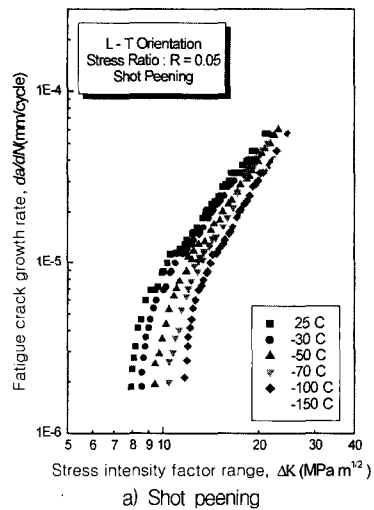


Fig. 3. Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

R=0.05에서 점감하중법에 의해 피로균열 전파속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다. 시험온도는 25°C(RT), -30°C, -50°C, -70°C, -100°C 및 -150°C에서 행하였다. 그림에서 알 수 있듯이 동일한 ΔK 에서 저온으로 갈수록 da/dN 의 관계는 직선적으로 증가하고 있으며, 또한 Fig. 3에서 (a), (b)의 그래프를 비교하여 보면 피닝하지 않은 가공재가 샷피닝재보다 빠르게 균열이 진전되고 있음을 알 수 있다. 또한 실험 결과 샷피닝재 및 피닝하지 않은 재료는 온도가 내려갈수록 피로균열 전파초기영역(제1단계 영역)에서의 피로균열진전 하한계 특성 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 저온일수록 탄성계수의 상승으로 인한 재료강도의 증가 때문으로 균열초기 피로저항성이 우수한 것으로 판단되며, 또한 샷피닝 가공재는 피닝하지 않은 가공재에 비해 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속으로 인한 피로강도의 증가로 판단된다.

3.2. 하한계 특성과 온도와 관계

Fig. 4에 샷피닝에 의한 압축잔류응력이 -68kgf/mm²인 스프링강 SPS5에 대해 상온 25°C에서 -150°C까지 피로 크랙진과 특성 실험을 통하여 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 와 온도와의 관계를 나타내었다.

Fig. 4에서 상온 25°C에서 -40°C까지는 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 완만하게 증가하다가 -40°C부터 -150°C까지는 급격하게 증가함을 나타내었다. ΔK_{th} 가 급격하게 증가하는 것은 저온취성의 영향이 크게 나타난 것으로 보고되고 있다⁸⁾. 시험결과를 온도 별로 표시하여 Table. 5에 나타내었다.

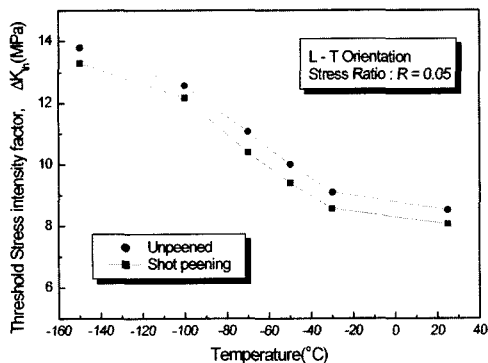


Fig. 4. Effect of Threshold stress intensity factor and temperature(°C)

Table 5. The value of fatigue crack growth threshold ΔK_{th} (Mpa \sqrt{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. 저온변화에 따른 상수 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. 5 및 Fig. 6에 그 결과를 나타내었다.

샷피닝재가 피닝하지 않은 가공재보다 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 취성 파괴가 일어날 가능성이 커질 것으로 추정된다.

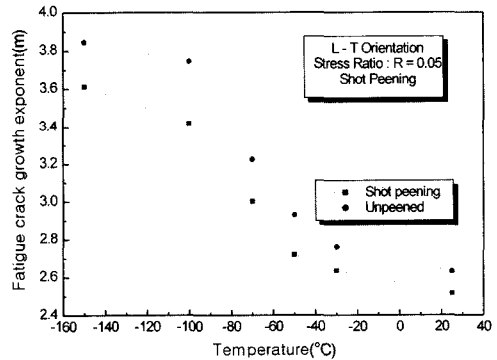


Fig. 5. Relation between fatigue crack growth exponent m and temperature(°C)

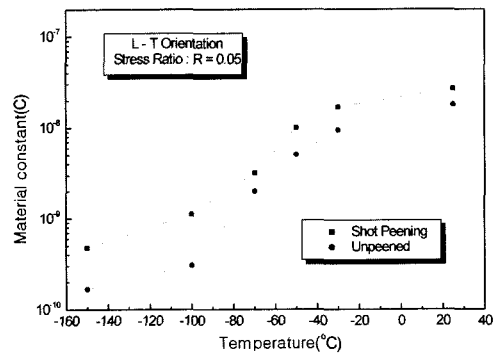


Fig. 6. Relation between material constant C and temperature(°C)

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

Tem.	ΔK 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	2.71×10^{-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	1.72×10^{-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	1.01×10^{-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	3.02×10^{-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	1.12×10^{-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	4.75×10^{-10}

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

Tem.	ΔK 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	1.81×10^{-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	9.42×10^{-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	5.09×10^{-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	2.01×10^{-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	3.05×10^{-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	1.66×10^{-10}

3.4. 샷피닝재료의 저온에서 피로균열 진전 길이와 사이클 수의 관계

Fig. 7은 저온 피로균열 진전길이의와 사이클의 관계를 나타내었다. Fig. 7에 의하면 저온으로 갈수록 작은 사이클의 수에서 최대균열길이가 성장함을 알 수 있다. 샷피닝재의 각각의 최대 파단 사이클은 상온(25°C)에서 1.32×10^6 Cycle, -30°C에서 9.7×10^5 Cycle, -50°C에서 7.9×10^5 Cycle, -70°C에서 6.3×10^5 Cycle, -100°C에서 5.7×10^5 Cycle, -150°C에서 5.2×10^5 Cycle로 나타났다.

그리고 피닝되지 않았는 가공재의 각각의 사이클 수는 상온(25°C)에서 9.2×10^5 Cycle, -30°C에서 7.3×10^5 Cycle, -50°C에서 6.3×10^5 Cycle, -70°C에서 5.6×10^5 Cycle, -100°C에서 5.0×10^5 Cycle, -150°C에서 4.6×10^5 Cycle로 나타났다. 이처럼 상온(25°C)에서 저온 -150°C로 갈수록 사이클 수가 감소하는 것을 볼 수 있었고 샷피닝재가 피닝되지 않았는 가공재보다 사이클 수가 더 많은 것을 볼 수가 있었다. 이러한 현

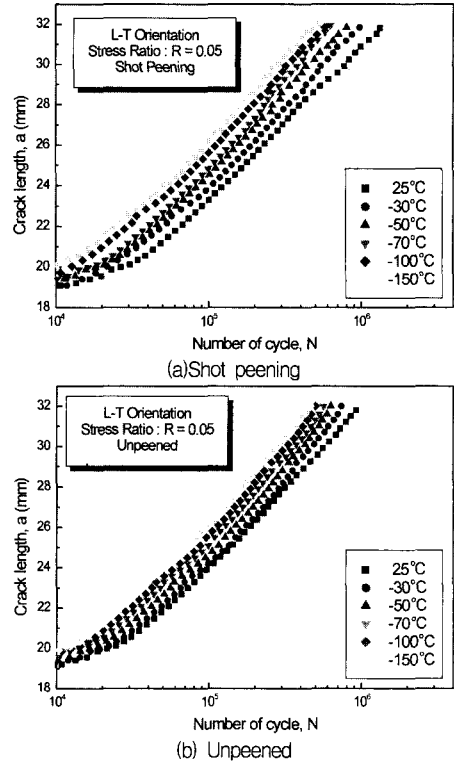


Fig. 7. Relations between crack length and number of cycle

상은 저온 취성이 피로크랙길이의와 사이클에 미치는 영향으로 생각되고, 또한 샷피닝재가 피닝되지 않았는 가공재보다 피로수명이 향상 되었는데 이는 극 표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속으로 샷피닝재가 피닝되지 않았는 가공재보다 수명이 더 길어진 것으로 판단된다.

3.5. 파단면의 특성

Fig. 8은 스프링강 SPS5에 대하여 상온 25°C와 -30°C, -50°C, -70°C, -100°C 및 -150°C 등의 저온 환경에서, 샷피닝재와 피닝되지 않았는 가공재에 대한 피로균열진전특성을 K-감소방식으로 시험한 후, 제 2단계 영역의 중심부의 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경으로 촬영하여 나타내었다. 각 시험편의 파단면에는 피로파단면의 특징이 되는 스트라이에이션(striation)⁹⁾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 변

화가 없었다. 그러나, 파면 조직상의 크기는 뚜렷한 차이를 나타내어 저온일수록 취성과파괴특성이 큰 것으로 판단된다¹⁰⁾.

4. 결 론

스프링강 SPS5에 대하여 슛피닝으로 -68kgf/mm^2 의 압축잔류응력으로 가공하여 응력비 $R=0.05$ 로 25°C , -30°C , -50°C , -70°C , -100°C 및 -150°C 의 저온에서 크랙전파시험을 실시하여 스프링강의 저온에서의 크랙전파속도, 크랙전파특성 및 하한계 응력확대계수를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 피로진전거동에 슛피닝 효과에 있어서 상온 25°C 의 경우 $da/dN-\Delta K$ 양대수 직선관계는 $4 \times 10^5\text{mm/cycle}$ 까지 성립하다가 -150°C 의 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°C 에서 -40°C 까지의 하한계 응력확대계수는 완만히 증가하였으나 -40°C 부터는 급격하게 증가함을 보였다. 그 후 -100°C 이상에서는 다시 완만히 증가하는 추세로 변화하였다. 이는 $-40^\circ\text{C} \sim -50^\circ\text{C}$ 사이의 저온 취성의 영향으로 생각된다.

3) 슛피닝재는 상온 25°C 에서 -150°C 사이의 저온까지 하한계 응력확대계수 $\Delta K_{th}=8 \sim 13.3\text{MPa}\sqrt{m}$ 으로 나타났고 피닝되지 않았는 가공재 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) 슛피닝 가공재 경우에 피닝되지 않았는 가공재 보다 각 온도에서 피로수명의 향상을 보이고 있다. 피로수명의 향상은 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속의 영향으로 생각된다.

참고문헌

- 1) 박경동, 정찬기, "SA516강의 탄소성 파괴인성평가에 관한 연구", 한국해양공학회 논문집, 제34권 제1호, pp. 37~44, 2001.
- 2) 박경동, 정찬기, "JISG4081SUP7-DIN50CrV4강의 피로강도에 미치는 슛피닝의 영향", 한국해양공학회 논문집, 제15권 제4호, pp. 66~72, 2001.
- 3) 정성균, 이승호, 쇼트피닝 加工概論, 世和출판사, pp. 13~29, 1978.

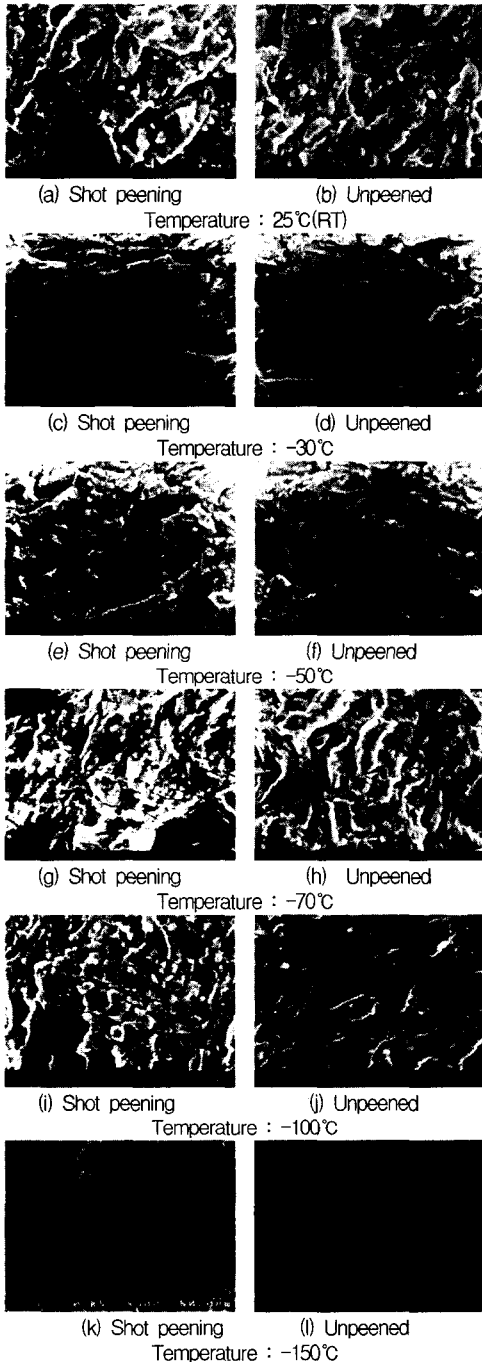


Fig. 8. Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C , -30°C , -60°C , -80°C , -100°C and -150°C for $R=0.05$

- 4) ASTM : E647-93, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, pp. 57~63, 131~135, 1993.
- 5) 배성인, 한민구, “파괴역학 실험법”, 원창출판사, pp. 8~11, 1995.
- 6) P. C. Paris and F. Erdogan, Trans. of the ASME Ser. D, pp. 528~534, 1963.
- 7) Y. Kitsunai, “Fatigue Crack growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperature”, pp. 280~290, 1991.
- 8) 박경동, 노태영, 김영대, 김형자, 손재윤, “압력용기용 A516강의 저온피로 크랙전파특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제13권, 제3(1)호 pp. 108~115, 1999.
- 9) 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, pp. 99~125, 1999.
- 10) 박경동, 김정호, 정찬기, 하경준, “압력용기용 강의 저온 피로크랙 하한계 특성에 관한 연구 (II)”, 한국해양공학회 논문집, 제14권, 제3호, pp. 78~83, 2000.