

압력용기용 강의 저온 피로크랙 하한계 특성에 관한 연구(II)

박경동* · 김정호** · 정찬기** · 하경준**

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 대학원 기계공학과

A Study of Fatigue Crack Threshold Characteristics in Pressure Vessel Steel at Low Temperature

KYUNG-DONG PARK*, JUNG-HO KIM**, CHAN-GI JUNG** AND 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: Fatigue crack propagation 피로 균열전파, Low temperature 저온, Stress ratio 응력비, Cryogenic-brittleness 저온취성

ABSTRACT: In this study, CT specimens were prepared from ASTM SA516 Gr. 70 which was used for pressure vessel plates for room and low temperature service. And we got the following characteristics from fatigue crack growth test carried out in the environment of room and low temperature at 25 °C, -60 °C, -80 °C and -100 °C and in the range of stress ratio of 0.05, 0.3 by means of opening mode displacement. At the constant stress ratio, 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 increased in proportion to descending temperature. It was assumed that the fatigue resistance characteristics and fracture strength at low temperature is considerable higher than that of room temperature in the early stage and stable of fatigue crack growth region. The straight line slope relation of logarithm $da/dN - \Delta K$ in Region II, that is, the fatigue crack growth exponent m increased with descending temperature at the constant stress ratio. It was assumed that the fatigue crack growth rate da/dN is rapid in proportion to descending temperature in Region II and the cryogenic-brittleness greatly affect a material with decreasing temperature.

1. 서 론

최근 피로파괴의 구조이론과 실험적인 해석은 상당히 발전되었지만, 여러 가지 인자들의 복합적인 영향을 받는 부재로 이루어진 항공기와 선박 등 대형구조물의 피로파괴에 대한 규명은 명확히 확립되지 않았으며, 피로현상에 대하여 충분히 축적된 자료를 이용하여 내피로 설계에 적용한다는 것은 일부 구조물 및 부품에만 가능한 실정이다. 따라서 기계부품이나 발전설비, 원자로, 압력용기, 저수조 탱크 등이 다양한 환경에서 장시간 사용되는 경우에 이들 구조물의 설계, 제작 및 유지의 측면에서 파괴역학적인 적용이 크게 필요하게 되었다.

실제 구조물에는 제조과정 중에 소재내에 노치나 개재물 등 결함의 잠재 가능성이 크고, 또한 사용 중에 외적환경의 부하 조건에 의해 결함이 존재하게 된다. 이와 같이 재료 내부에 존재하는 결함 부분에 반복하중이 작용하게 되면 응력은 피로로 축적되어 미세한 균열을 발생 또는 진전시켜 재료파괴로 이어지는 경우가 일반적이라 하겠다.

따라서 이러한 결함들로부터 피로균열이 성장하지 않도록 하는 공학적인 설계를 위한 피로균열 하한계 특성과 피로균열이 생성·성장했을 때의 잔존수명을 평가하기 위한 피로균열 진전 특성을 규명하는 것은 대단히 중요한 일이다.

Paris는 피로균열진전에 대한 파괴역학적인 파라미터 K 를 사

용하여 균열진전속도 da/dN 과 응력확대계수 폭 ΔK 의 함수관계를 도입하여 발표함으로써 선형파괴역학적인 피로균열진전 거동의 이론을 확립하였으며(Paris and Erdogan, 1963; 박, 1983; 김, 1989), 그 외에도 많은 학자들에 의해 피로파괴에 대한 연구가 계속되고 있으며, 기계 및 구조물의 안전설계를 위하여 보다 많은 자료의 축적이 요구되고 있다(김, 1989).

최근에는 압력용기나 관련 구조물 등이 고온뿐만 아니라 저온에서도 장시간 사용하는 경우가 많아졌고, 그 설계 제작과 유지의 필요성에 따라 저온피로 분야에서도 파괴역학을 적용할 필요성이 높아졌으나, 국내에서는 이에 대한 연구가 미미한 실정이다.

본 연구는 압력용기용 강판 SA516-70에 대하여 상온 25 °C와 -60 °C, -80 °C, -100 °C의 저온환경 속에서 정(+)방향 사인파형 반복 하중을 주파수 20 cycle/sec.로서 응력비 0.05, 0.3에 대해 안정성장영역에서 각각의 피로균열진전속도 da/dN 와 응력확대계수 범위 ΔK 선도 및 피로균열 하한계특성 ΔK_{th} 을 구하고, 온도 및 응력비에 따르는 피로균열진전지수 m 와 재료상수 C 를 규명하여 저온에서의 압력 용기 재료에 대한 파괴 기준을 제시함으로써 강도상의 안전 설계에 기여하고자 한다.

2. 실험 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 압력용기용 강판(SA516-70)이며, 시편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	V	Mo	Cb	Al
0.16	0.30	1.14	0.008	0.01	0.036	0.07	0.20	0.027	0.097	0.018	0.028

Table 2 Mechanical properties of specimen

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
390	558	26	77.37

시험편은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재를 이용하여 L-T방위로 채취해, 압연방향이 하중방향이 되게 하였고, 각 부 치수는 ASTM(1993) E647-93의 기준에 따라 외형가공은 밀링(milling)으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)에서 노치 끝 부분이 60°의 각도에 노즈반경 0.1mm가 되게 가공하였다. Fig. 1는 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다(ASTM(1993) E647-93, Instron2490)

그리고 피로크랙진전의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며, 25°C 정도의 온도환경과 항복강도이내의 응력 범위에서 ASTM(1993) E647-93 규정에 의거 3mm의 피로 예균열을 주었다.

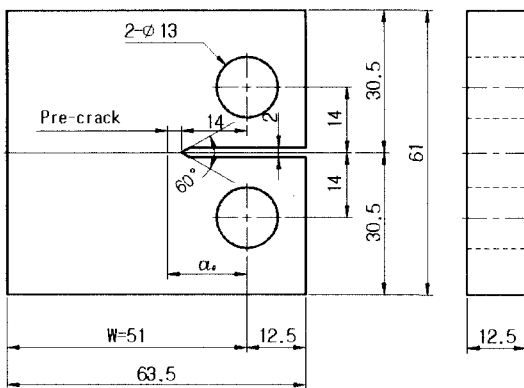


Fig. 1 Configuration of CT-specimen (unit: mm)

2.2 실험 장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로시험기 (INSTRON 8501, 10KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 조작하였다. 크랙길이 측정은 시편에 COD 클립게이지를 부착하여 Compliance법을 사용하였으며, 파단면의 미시적관찰은 주사식 전자현미경(S.E.M)을 사용하였다.

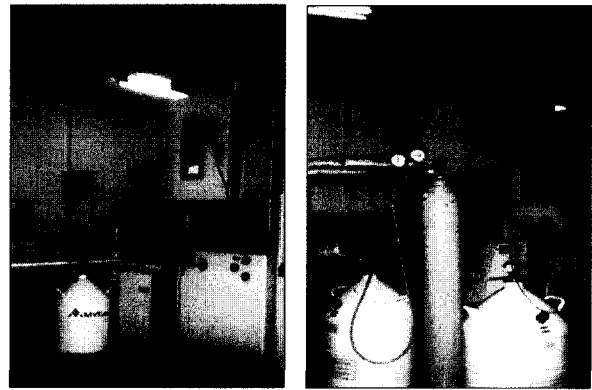


Fig. 2 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

2.3 실험방법

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

저온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 보배를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 0.5kg/mm²내외로 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 ± 1°C로 유지하였고 응력비R=0.05 R=0.3, 주파수 20Hz, 실험온도는 25°C, -60°C, -80°C, -100°C로 하였다.

실험해석을 하기 위해 응력확대계수K는

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

및 응력비

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

의 함수가 된다. 여기서 R의 영향을 제외하면 특정의 ΔK의 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 C와 m은 재료상수로서 그 값은 동일재료, 동일환경 구조물 등의 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다. 응력확대계수 범위 ΔK는 다음 식에 의해서 나타낸다(Instron 2490.1991; ASTM(1997) E647-95a ; JSME, 1981, S001 ; 小林英男, 1993). 본 시험에서는 ASTM(1997) E647-95a 규정에 의거 ΔK 콘트롤에 의한 K-증가방식을 이용하였는데 그 증가조건은 다음과 같다(Kitsunai, 1991).

ΔK의 기울기는

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

da/dN의 측정범위 Δa ≤ 0.5mm

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로크랙진전 하한계특성

온도 25°C와 -60°C, -80°C 및 -100°C에서, 응력비 0.05 및 0.3에 대하여 크랙진전특성에 관한 실험을 하고, 그 결과 크랙진전속도 da/dN 와 응력확대계수 폭 ΔK 의 관계를 양대수 선도상에 표시하였다. 실험 결과 최소자승법을 이용하여 구한 피로크랙 하한계특성 ΔK_{th} 은 Table 3에, 응력비에 대한 크랙진전속도 da/dN 와 응력확대계수 폭 ΔK 의 관계는 Fig. 3, 4에 나타나 있다.

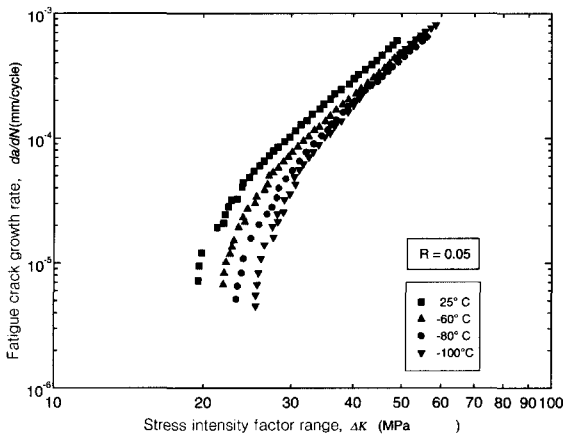


Fig. 3 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (R = 0.05)

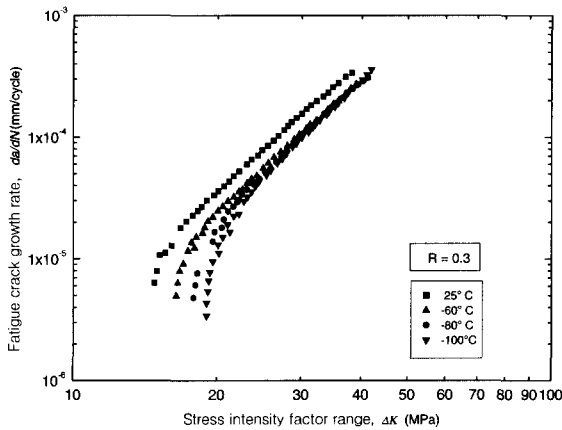


Fig. 4 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (R = 0.3)

실험 결과 응력비 0.05 및 0.3에서 온도가 내려갈수록 피로크랙 진전초기영역(제1단계 영역)에서의 피로크랙진전 하한계특성 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났으며, 피로수명의 대부분이 피로크랙 진전 초기에 소요된다는 점을 감안한다면, 이는 저온일수록 탄성계수의 상승으로 인한 재료강도의 증가 때문으로 크랙초기 피로저항성이 우수한 것으로 판단된다.

Table 3 The value of fatigue crack growth threshold - ΔK_{th} ($MPa\sqrt{m}$)

Stress ratio	Tem.			
	25°C	-60°C	-80°C	-100°C
0.05	18.20	19.05	21.38	23.99
0.3	13.49	14.79	15.49	18.62

3.2 온도에 따른 피로크랙진전특성에 미치는 응력비영향

Fig. 5(a) (b) (c) (d)은 응력비 R=0.05, 0.3에서 온도 25°C, -60°C, -80°C, -100°C에 따른 $da/dN-\Delta K$ 를 그림으로 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)에서 상온 25°C에서는 피로균열진전속도 영역이 응력비 감소에 따라 그범위가 증가되는 경향을 나타내고 응력확대계수 범위도 증가된다. 따라서 응력비가 높은 R=0.3이 R=0.05보다 빠르게 균열이 진전되는 것을 알 수 있으며, 이러한 현상은 응력비 증가에 따라 최대하중이 증가되어 피로균열진전속도가 빨라지는 것으로 생각되며, 응력비 0.05일때는 0.3일때와 달리 피로균열 단합에 의해 피로균열 진전속도의 저하에 크게 기인하는 것으로 생각된다.

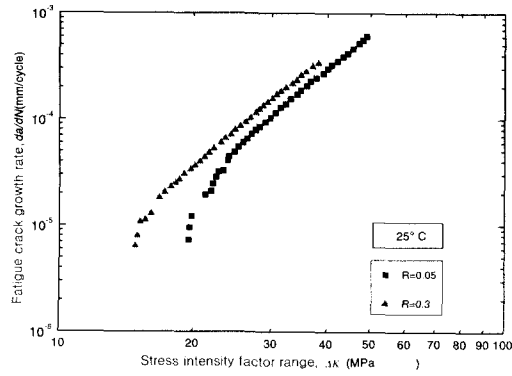
Fig. 5(b)에서 그림(a)와 비교하였을 때 성장의 범위가 아주 크지 않았지만, 저온 -60°C에서 응력비 0.05일 때 저온피로 균열진전 속도영역이 증가 하며, 또한 응력비 성장에 따라 저온 피로 균열진전 속도 영역도 감소되어 재료가 가지고 있는 전위의 운동이 불규칙적인 상태로 되어 입자를 취약하게 만듦으로서 서서히 피로강도가 증가되며, 또한 응력확대계수 범위로 감소 된다.

Fig. 5(c)는 -80°C의 저온피로 균열진전속도와 응력확대계수 범위 관계에서 저온피로균열 진전속도영역은 특히 -80°C에서 영역이 -60°C보다 크게 감소되는데 그것은 비록 응력비 성장뿐만 아니라 재료의 기계적 성질을 좌우하는 입자의 조대화와 온도의 영향이 피로강도의 저항력을 약화시킴으로서 응력확대 계수 범위가 증가되는 현상이 나타나는 것으로 생각된다.

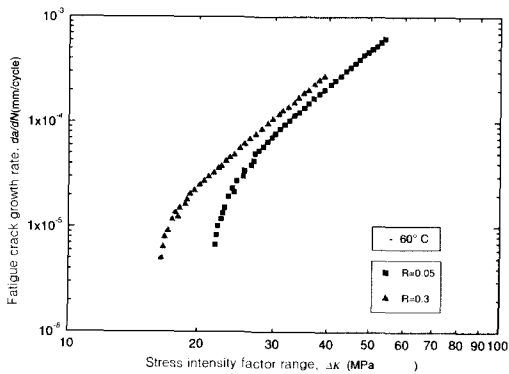
Fig. 5(d)는 온도 -100°C에 따른 응력비 0.05, 0.3에서 저온피로 균열진전거동은 고 ΔK 영역으로 이동하고 응력비는 온도에 크게 의존하지 않는 영역으로 천이되고 있음을 알 수 있다. 다시말해서 -100°C까지 저온환경으로 바뀌어도 고 ΔK 영역은 응력비에 크게 좌우되지 않으며 재료물성치에 의한 저온피로균열 진전 거동력은 더욱더 저온피로 균열진전속도를 지연시키는 것으로 판단된다. 이것은 저온 환경분위기에서 나타나는 온도, 응력비 및 재료의 취성적 성질에 따른 것으로 항복강도 및 탄성계수 감소로 생각된다.

3.3 피로크랙진전속도 da/dN 와 피로크랙 진전지수 m

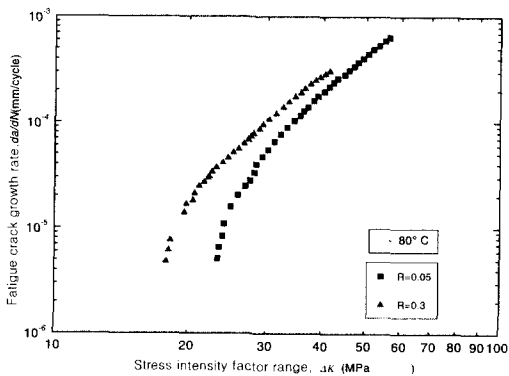
피로크랙진전과정의 제2단계 영역에 있어서 $da/dN-\Delta K$ 의 좌표선상에서 직선 관계로 나타났고, 이것을 paris식 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 대입하여, 각 온도에 대한 크랙진전지수 m 및 재료상수 C 를 Table 4와 Fig. 6, 7에 그 결과를 나타내었다.



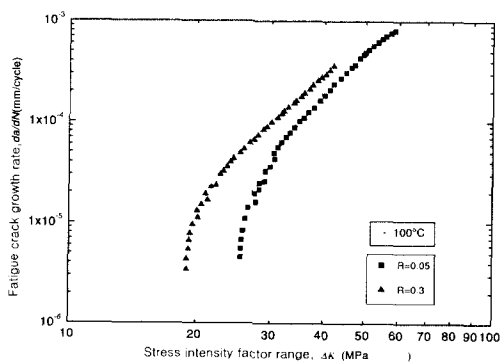
(a) 25 °C



(b) -60 °C



(c) -80 °C



(d) -100 °C

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

Table 4 Experimental constants by $da/dN=C (\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth

Stress ratio	Tem.	ΔK Range (MPa \sqrt{m})	da/dN Range (mm/cycle)	m	C
0.05	25 °C	23.99 $\leq \Delta K \leq$ 48.87	$4.416 \times 10^{-7} \leq da/dN \leq 6.053 \times 10^{-4}$	3.610	4.87×10^{-10}
	-60 °C	27.04 $\leq \Delta K \leq$ 53.90	$4.966 \times 10^{-7} \leq da/dN \leq 6.281 \times 10^{-4}$	3.649	3.08×10^{-10}
	-80 °C	28.31 $\leq \Delta K \leq$ 56.23	$3.990 \times 10^{-7} \leq da/dN \leq 6.422 \times 10^{-4}$	3.971	7.91×10^{-11}
	-100 °C	30.41 $\leq \Delta K \leq$ 58.53	$4.887 \times 10^{-7} \leq da/dN \leq 8.072 \times 10^{-4}$	4.341	1.97×10^{-11}
0.3	25 °C	16.79 $\leq \Delta K \leq$ 38.19	$1.803 \times 10^{-7} \leq da/dN \leq 3.381 \times 10^{-4}$	3.596	7.64×10^{-10}
	-60 °C	19.14 $\leq \Delta K \leq$ 39.08	$2.032 \times 10^{-7} \leq da/dN \leq 2.710 \times 10^{-4}$	3.717	4.44×10^{-10}
	-80 °C	21.09 $\leq \Delta K \leq$ 41.37	$2.460 \times 10^{-7} \leq da/dN \leq 3.072 \times 10^{-4}$	3.906	2.37×10^{-10}
	-100 °C	22.75 $\leq \Delta K \leq$ 42.03	$2.979 \times 10^{-7} \leq da/dN \leq 3.589 \times 10^{-4}$	3.950	1.34×10^{-10}

Table 4에서 직선관계가 성립하는 제2단계 영역에서 일정한 응력비에서는 온도가 저하될수록, 크랙진전속도 da/dN 가 감소한 반면 응력확대계수 폭 ΔK 이 증가한 것으로 미루어, 피로강도가 증가되고 인성이 저하되는 것으로 판단되며, 이것은 온도저하에 크게 영향을 받는 것으로 생각된다(김 등, 1999)

실험 결과 일정한 응력비에서는 온도가 낮아질수록 직선관계가 성립하는 제2단계 영역에서의 $da/dN-\Delta K$ 직선의 기울기 즉, 크랙진전지수 m 의 값이 증가한 것으로 나타났으며(서와오, 1996), 이것은 재료의 파괴가 시작되면 크랙진전속도 da/dN 가 증가하게 되고, 따라서 취성파괴가 일어날 가능성이 높아질 것으로 판단된다.

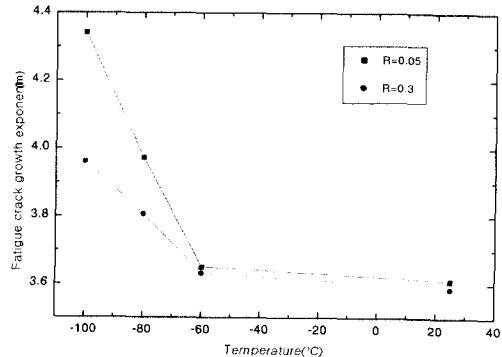


Fig. 6 Relation between fatigue crack growth exponent m and Temperature (°C)

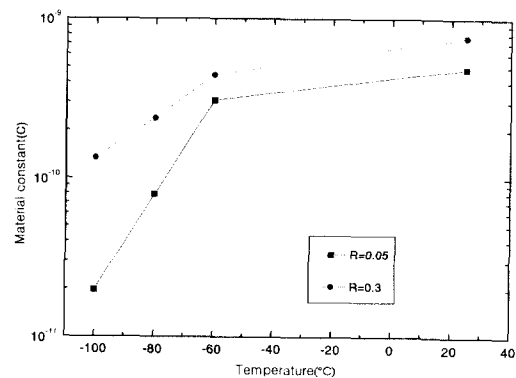


Fig. 7 Relation between material constant C and Temperature (°C)

3.4 파단면의 특성

온도 25°C와, -60°C, -80°C 및 -100°C 등에서, 응력비 0.05 및 0.3에 대한 피로크랙진전특성을 ΔK -증가방식으로 시험한 후, 제2단계 영역의 중심부의 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경으로 촬영하여 Fig. 8에 나타내었다.

각 시험편의 파단면에는 피로파단면의 특징이 되는 스트라이에이션(striation)이 관찰되었는데, 그 생성은 인장과정에서 크랙선단에 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 -80°C, -100°C의 파면상으로는 뚜렷한 변화를 보이고 있으며 파면조직상의 크기는 뚜렷한 차이를 나타내어 균열의 붕괴현상에 의해 저온일수록 취성파괴가 발생하여 의백개(quasi cleavage) 현상을 보이고 있다. 따라서 응력비 및 온도저하에서 피로크랙진전속도가 크게 저하되는 것은 저온피로강도 상승에 기인한다고 생각된다.

이는 피로크랙진전 특성과 비교하여 Table 4에 나타난 결과에서 저온일수록 피로 크랙진전에 대한 저항성이 증가하며 취성파괴가 일어날 가능성이 높다는 사실과도 일치하고 있다.

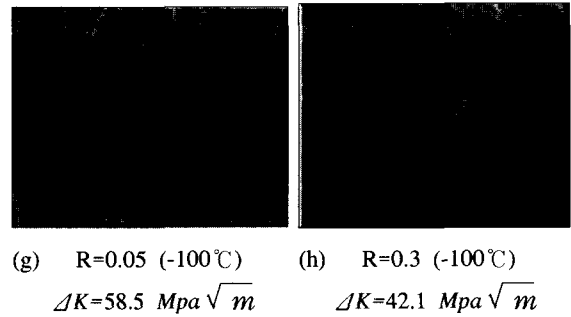
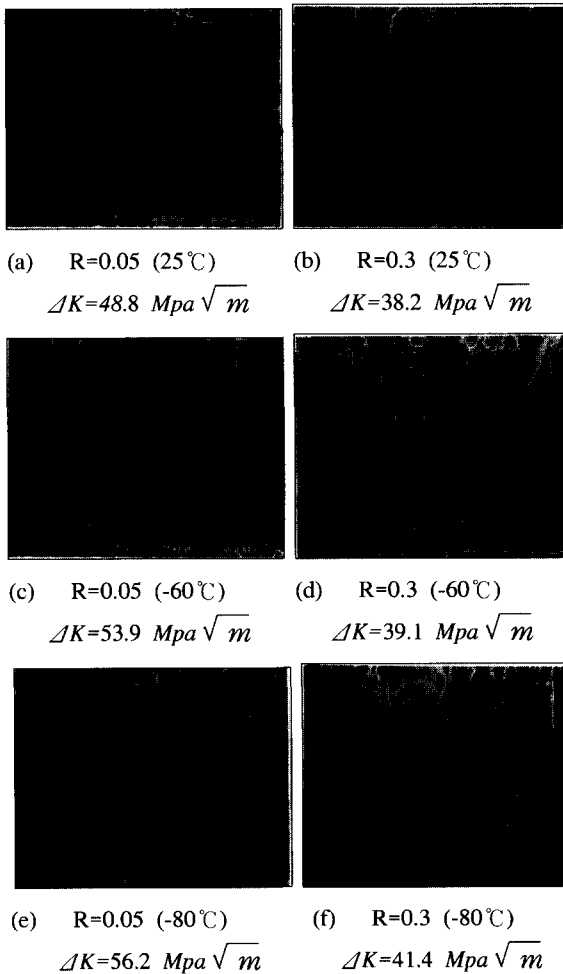


Fig. 8 Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C, -60°C, -80°C and -100°C for R=0.05, 0.3

4. 결 론

본 연구에서는 SA516-70강판에 대하여 온도 25°C와 -60°C, -80°C 및 -100°C와 응력비 0.05 및 0.3으로 유지하여 피로크랙진전특성에 관한 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일정한 응력비에서 온도가 낮을수록 피로크랙진전 초기영역에서(제1단계 영역) 피로 크랙 하한계 특성 ΔK_{th} 및 제2단계 영역에서의 응력확대계수 폭 ΔK 값이 증가하는 것으로 나타났다으며, 이는 저온일수록 크랙초기 피로저항성과 제2단계 영역에서의 피로파괴강도가 우수한 것으로 판단된다.
- (2) 일정한 응력비에서 온도가 낮을수록 직선관계가 성립하는 제2단계 영역에서의 크랙진전속도와 응력확대계수 폭 $dajdN - \Delta K$ 의 직선기울기 즉, 크랙진전지수 m 이 증가하였으며, 이는 제2단계 영역에서 온도가 낮을수록 크랙진전속도 $dajdN$ 가 빨라지게 되며, 저온취성의 영향이 클 것으로 생각된다.
- (3) 일정한 응력비에서 각 온도에 따라 피로크랙진전지수 $m=3.596(25^\circ\text{C}), 3.717(-60^\circ\text{C}), 3.906(-80^\circ\text{C}), 3.950(-100^\circ\text{C})$ 로 증가하여 상온에 비하여 피로 저항력이 감소하게 된다.
- (4) 파단면은 크랙선단 소성둔화에 의한 연속진전의 연성 스트라이에이션 파면이 나타났고, 상온에서 저온으로 진행될수록 스트라이에이션의 모양과 크기는 큰 변화가 있었으며 파단면 조직상의 크기도 현저한 차이를 나타내어 이는 저온에서 피로강도 증가와 함께 취성파괴가 일어난 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김재훈(1989). “기계구조용재료의 피로크랙 진전거동에 관한 연구”, 충남대학교 박사 학위 논문, pp 10~16.

김영대, 김형자, 노태영, 박경동, 손재운(1999). “압용기용 A516강의 저온 피로 크랙 진파특성의 관한연구” 한국해양공학회지, 제13권, 제3(1)호, pp 108~115.

박경동(1983). “원자로용 저합금강의 고온피로 크랙 진파와 크랙개폐구 특성에 관한 연구”, 동아대학교 박사학위 논문, pp 10~16.

박경동, 노태영, 김영대, 김형자, 오명석, 이경렬, 김정호(1999). “압력용기용강의 저온피로크랙하한계 특성에 관한 연구(1)”, 한국동력 기계공학회 추계학술대회 논문집, pp 131~136.

서창민,오병석(1996). “2024-T3 및 황동의 작은표면 결함대의 피로균열 성장특성에 관한연구”,한국해양 공학회지 제10권 제1호, pp 53~63.

Advanced Factingue Crack Propagation (1991), Instron 2490 Series Application Programs, pp 1~4.

ASTM Standard(1997), E647-95a

P. C. Paris and F. Erdorgan, Tran. of the ASME Ser. D(1963), pp 528~534.

Standard Test Method For Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM(1993), E647-93

Y. Kitsunai(1991). “Fatigue Crack Growth Behavior in Mild Steel Weldment at Low Temperature”, pp 280~290.

小林英男(1993). “破壊力學”, 共立出版株式會社, pp 85~96.

日本機械學會 基準. “彈塑性 破壊引性 JIC試驗方法,” JSME S001-1981

2000년 3월 20일 원고 접수
 2000년 6월 29일 수정본 채택