

압력용기용 강의 응력비에 따른 저온 피로균열 진전특성에 관한 연구

박경동 · 하경준* · 박형동*
부경대학교 기계공학부, *부경대학교 대학원 기계공학부

A Study of Stress Ratio Influence on the Fatigue Crack Growth Characteristics of Pressure Vessel Steel at Low Temperature

KYUNG-DONG PARK, KYUNG-JUN HA* AND HEYOUNG-DONG PARK*

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 피로균열진전과, Low temperature 저온, Stress ratio 응력비, Cryogenic-brittleness 저온취성

ABSTRACT: In this study, CT specimens were prepared from Pressure Vessel Steel 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, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C and -120°C and in the range of stress ratio of 0.05 and 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) was increased in proportion to descend temperature. It 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

파괴역학은 예기치 못했던 많은 구조물의 파괴경험을 통하여 생긴 새로운 학문분야이며, 과거 십수년 사이에 급속히 발전해 왔다.

구조물의 파괴는 대부분의 경우 예고없이 일어나서, 인명이나 물질재산에 많은 손해를 준다. 더불어 필연적으로 파괴역학의 발전을 요구하고 있다. 파괴역학의 선구적 이론연구는 Griffith에 의해 행해진 이래, Irwin과 Orowan등 그 외의 많은 학자들에 의해 피로파괴에 대한 연구가 계속되고 있으나, 기계 및 구조물의 안전설계를 위하여 보다 많은 자료의 축적이 요구되고 있다.

실제 구조물에는 제조과정 중에 소재내에 노치나 개재물등 결함의 잠재 가능성이 크고, 또한 사용중에 외적환경의 부하조건에 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 대부분이라 하겠다.

따라서 이러한 결함들로부터 피로균열이 성장하지 않도록 하는 공학적인 설계를 위한 피로균열 하한계 특성과 피로균열이 생성·성장했을 때의 잔존수명을 평가하기 위한 피로균열진전

특성을 규명하는 것은 대단히 중요한 일이다.

Paris는 피로균열진전에 대한 파괴역학적인 파라미터 K 를 사용하여 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 높아졌지만, 여기에 관한 국내 연구실적은 아직 미미한 실정이다.

본 연구는 압력용기용 강판 SA516에 대하여 상온 25°C 와 -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C의 저온환경 속에서 정(+)-방향 사인파형 반복하중을 주파수 20cycle/sec로서 응력비 0.05, 0.3에 대해 안정성장 영역에서 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 압력용기 재료에 대한 파괴기준을 제

시함으로써 강도상의 안전설계에 기여하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시험편

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

Fig. 1은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서 산소절단기를 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 실험 장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로시험기(INSTRON 8501, 1000KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤

Table 1 Chemical composition (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	V	Mo	Cb
0.12	0.23	0.97	0.017	0.04	0.028	0.02	0.03	0.02	0.01	0.018

Table 2 Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (H _{RB})
310	459	29	66.12

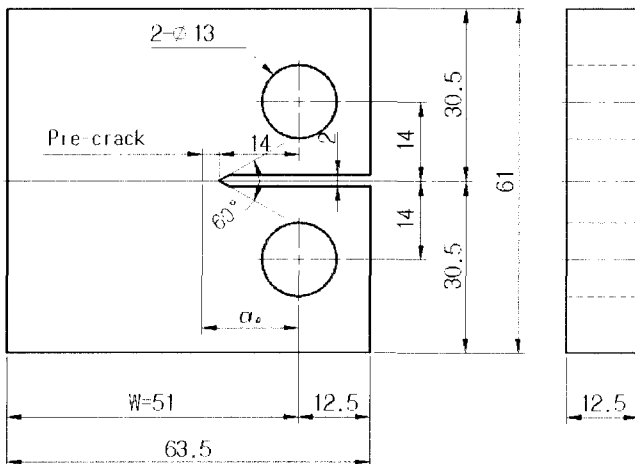


Fig. 1 Configuration of CT-specimen (unit: mm)

하였다. 균열길이 측정은 시편에 COD 클립게이지를 부착하여 Compliance법을 사용하였으며, 파단면의 미시적 촬영은 주사식 전자현미경(S.E.M)을 사용하였다.

2.3 실험방법

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

저온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 펌베를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 5MPa내외로 되도록 하여 액체질소를 챔버내로 유입시켜 저온환경으로 만든다. 실험 중 액체질소의 감소에 따라 질소펌베의 압력으로 액체질소의 유입을 정상적으로 밀어주며 온도유지는 전자석밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는 +1℃로 유지하였고 응력비 R=0.05 R=0.3, 주파수 20Hz, 실험온도는 25℃ 와 -30℃, -60℃, -80℃, -100℃, -120℃로 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-감소방식을 이용하였는데 그 감소조건은 다음과 같다 (Kitsunai, 1991).

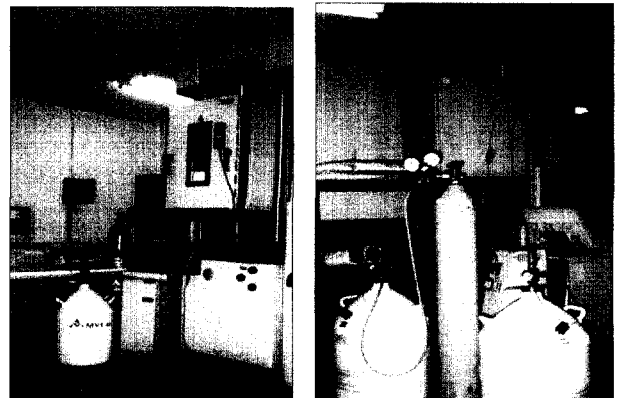


Fig. 2 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

ΔK 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 $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로크랙진전 하한계특성

온도 25°C 와 -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C에서, 응력비 0.05 및 0.3에 대하여 크랙진전특성에 관한 실험을 하고, 그 결과 크랙진전속도 da/dN와 응력확대계수 폭 ΔK 의 관계를 양대수 선도상에 표시하였다. 실험 결과 최소자승법을 이용하여 구한 피로크랙 하한계특성 ΔK_{th} 은 Table 3에, 응력비에 대한 크랙진전속도 da/dN와 응력확대계수 폭 ΔK 의 관계는 Fig. 3, 4에 나타내었다.

실험 결과 응력비 0.05 및 0.3에서 온도가 내려갈수록 피로크랙 진전 제1단계에서의 피로크랙진전 하한계특성 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났으며, 피로수명의 대부분이 피로크랙 진전 제1단계에 소요된다는 것을 알 수 있었다.

3.2. 온도에 따른 피로크랙진전특성에 미치는 응력비영향

Fig. 5(a~f)는 응력비 R=0.05, 0.3에서 온도 25°C 와 -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C에 따른 da/dN- ΔK 관계를 그림으로 나타낸 것이다.

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

Stress ratio	Tem.					
	25°C	-30°C	-60°C	-80°C	-100°C	-120°C
0.05	11.20	11.65	12.05	13.38	15.99	17.98
0.3	6.49	7.24	7.79	8.49	11.62	12.92

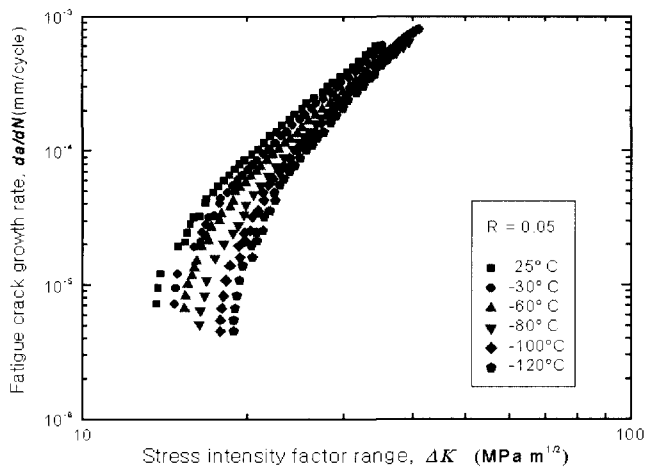


Fig. 3 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range ($R = 0.05$)

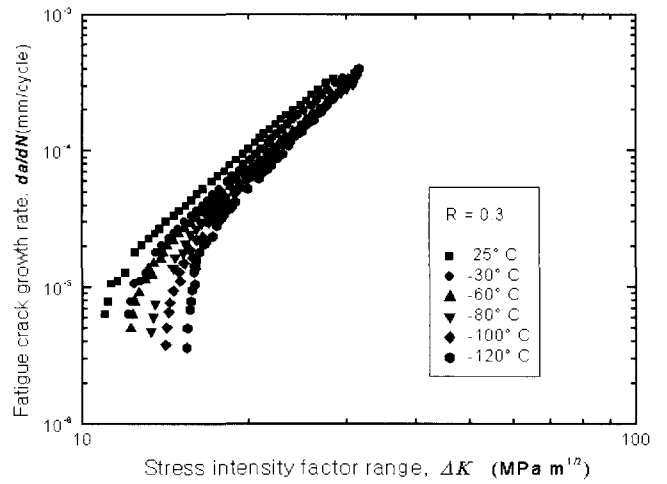
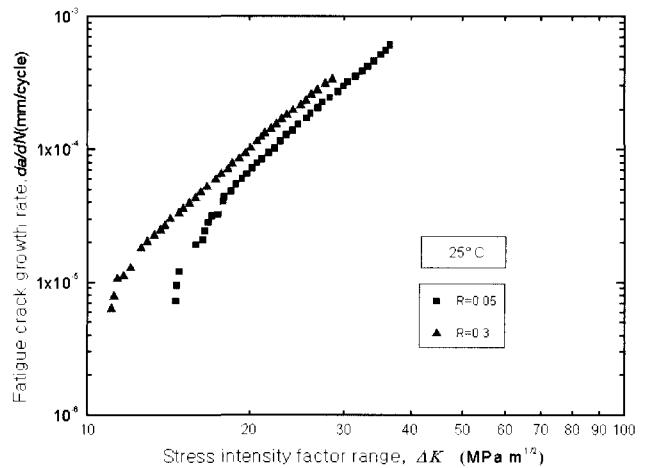
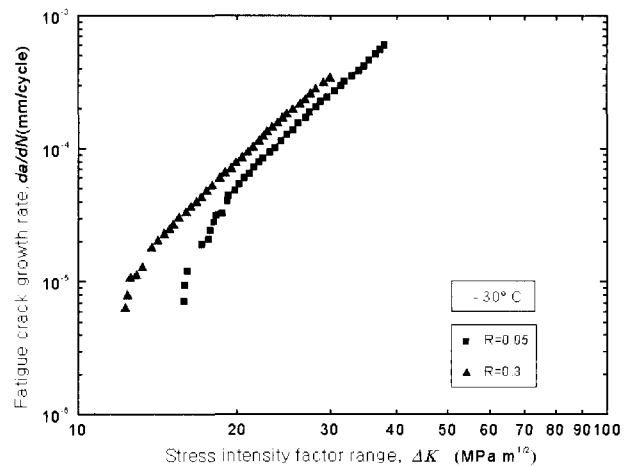


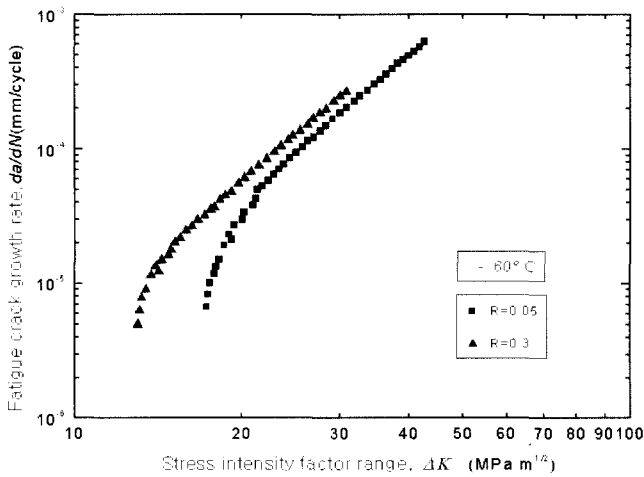
Fig. 4 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range ($R = 0.3$)



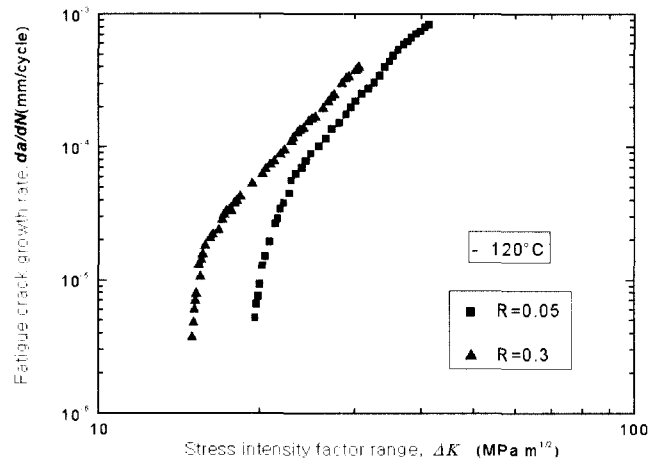
(a) 25°C



(b) -30°C

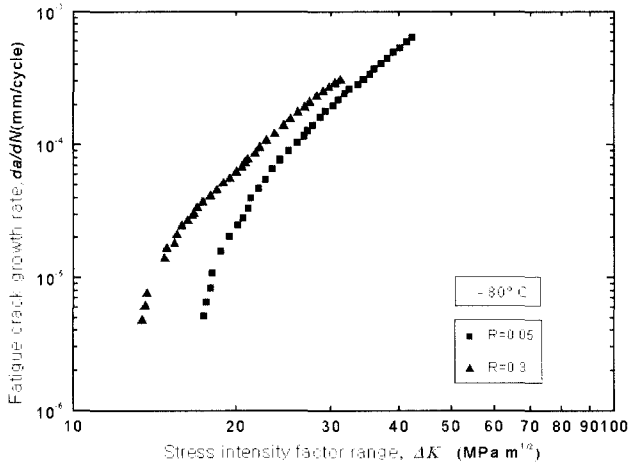


(c) -60°C

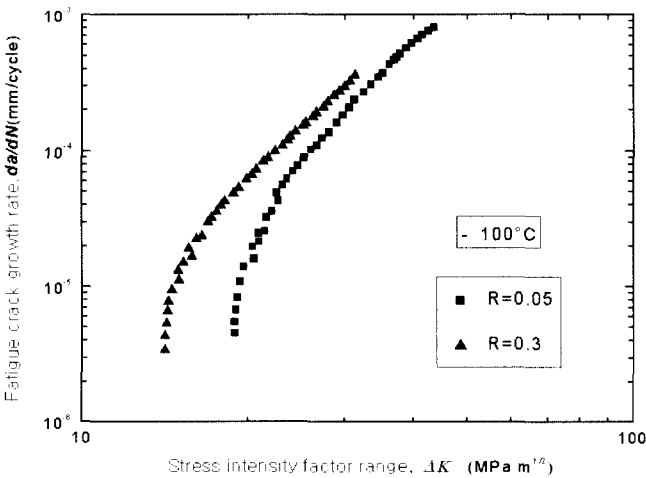


(f) -120°C

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



(d) -80°C



(e) -100°C

Fig. 5(a)는 상온 25°C에서 da/dN - ΔK 관계를 나타낸 것으로 피로균열진전속도는 응력비 감소에 따라 감소되어 응력확대계수가 증가되었다. 따라서 응력비가 높은 $R=0.3$ 이 $R=0.05$ 보다 빠르게 균열이 진전되는 것을 알 수 있으며, 이러한 현상은 응력비 증가에 따라 최대하중이 증가되어 피로균열 진전속도가 빨라지는 것으로 판단되며, 응력비 0.05일때는 0.3일때와 달리 프래팅 산화물에 의한 피로균열 개폐에 의해 피로균열 진전속도의 저하에 크게 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 5 (b), (c)는 -30°C 및 -60°C의 피로크랙전파속도 da/dN 와 응력확대계수범위 ΔK 의 관계를 나타낸 것으로 상온 25°C에 비하여 응력비 0.05와 0.3에서 모두 감소되어 하한계 응력확대계수가 증가하였다. 그러나 응력비 0.3보다는 0.05의 경우가 더욱 감소되어 높은 하한계를 나타내었다. 그리고 하한계 응력확대계수의 온도저하에 따른 증가는 완만하게 증가하였으며 큰차이를 나타내지 않았다. 응력비 증가에 따라 저온피로균열진전속도가 가속되어 재료가 가지고 있는 전위 운동이 불규칙적인 상태로 되어 입자를 취약하게 만들고 크랙전단의 개폐작용에 공기유입의 영향으로 응력확대계수가 감소되었다고 본다.

Fig. 5 (d), (e)는 -80°C 및 -100°C에서 da/dN - ΔK 관계를 나타내었다. -80°C 및 -100°C의 경우도 상온 25°C보다 크게 감소되어 높은 ΔK_{th} 값을 나타내었다. 응력비 0.05와 0.3 모두 상온 25°C에 비하여 하한계 응력확대계수가 2~5 $MPa\sqrt{m}$ 정도 증가하였으며 응력비 0.05에 비하여 0.3의 경우가 평균 4 $MPa\sqrt{m}$ 정도 감소함을 나타내었다. 그리고 -60°C에서 -100°C로 저하할수록 ΔK_{th} 가 급속히 증가하는 현상을 나타내었다.

이는 천이온도의 영향과 저온 산화물의 영향을 받은 것으로 생각된다.

Fig. 5 (f)는 -120°C에서 응력비 $R=0.05$ 와 $R=0.03$ 에서 da/dN - ΔK 관계를 나타내었다. -120°C의 경우도 상온 25°C보다 피로크랙진전속도 da/dN 가 크게 감소되어 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 증가하는 현상으로 나타났다. -120°C의 경우가 -30°C, -6

0°C, -80°C 및 -100°C보다도 더욱 감소되었다. 그리고 응력비 R=0.05와 R=0.3의 결과를 비교하면 응력비 영향이 나타났으나 상온과 다른 온도에 비하여 응력비 영향이 줄어들었다.

응력비는 피로크랙전단의 개폐에 영향을 미친 것으로 생각되며 특히 -120°C의 경우 파단면상의 파면 입자의 크기가 다른 온도에 비해 크게 나타났다.

Fig. 6 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 의 응력비와 온도의 의존성을 나타내었다.

Fig. 7에 $\Delta K = 26\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 와 $38\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에서 각 온도에 대한 피로크랙진전속도 da/dN 와 응력비 관계를 나타내었다. 그림에

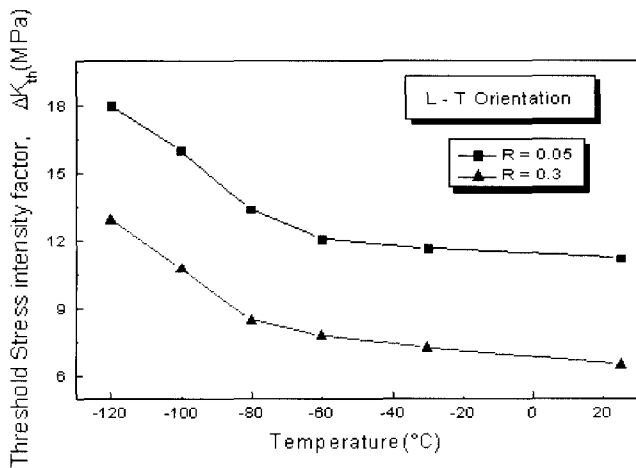


Fig. 6 Effect of threshold stress intensity factor range and temperature

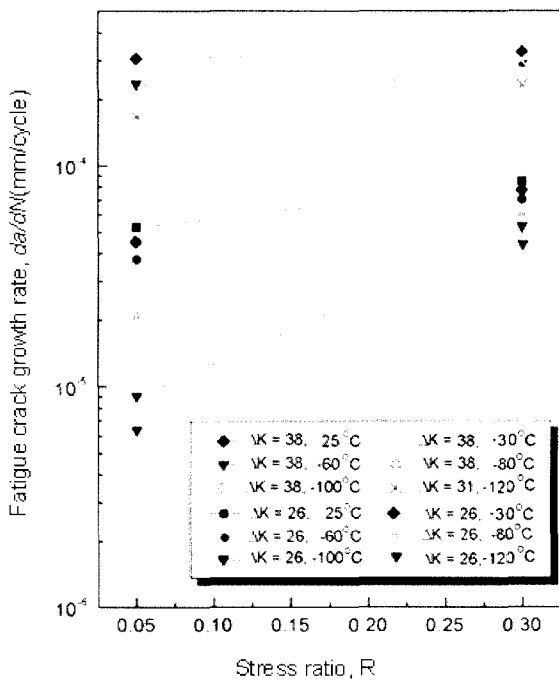


Fig. 7 Relations between fatigue crack growth rate and stress ratio

의하면 응력확대계수 ΔK 가 큰 경우가 응력비와 온도의 영향을 적게 받으며 적은 값일수록 응력비와 온도의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

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. 8, 9에 그 결과를 나타내었다.

Table 4에서 직선관계가 성립하는 제2단계 영역에서 일정한 응력비에서는 온도가 저하될수록, 크랙진전속도 da/dN 가 감소한 반면 응력확대계수 범위 ΔK 이 증가한 것으로 미루어, 파괴 인성이 저하되는 것으로 판단되며, 이것은 온도저하에 크게 영향을 받는 것으로 생각된다(김 등, 1989)

실험 결과 일정한 응력비에서는 온도가 낮아질수록 직선관계가 성립하는 제2단계 영역에서의 $da/dN-\Delta K$ 직선의 기울기 즉,

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

Stress ratio	Tem.	m	C
0.05	25°C	3.610	4.87×10^{-10}
	-30°C	3.742	3.98×10^{-10}
	-60°C	3.827	3.08×10^{-10}
	-80°C	3.971	7.91×10^{-11}
	100°C	4.341	1.97×10^{-11}
	-120°C	5.072	1.25×10^{-11}
0.3	25°C	3.596	7.64×10^{-10}
	-30°C	3.656	5.84×10^{-10}
	-60°C	3.717	4.44×10^{-10}
	-80°C	3.906	2.37×10^{-10}
	-100°C	3.950	1.34×10^{-10}
	-120°C	4.167	1.07×10^{-10}

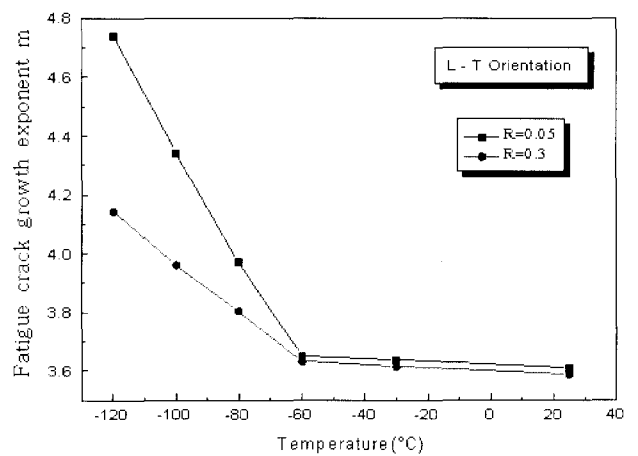


Fig. 8 Relation between fatigue crack growth exponent m and Temperature(°C)

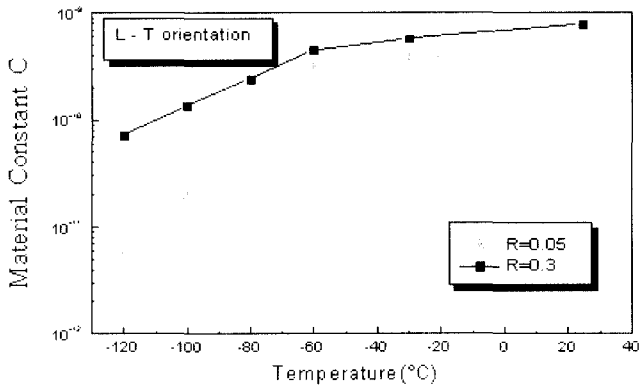


Fig. 9 Relation between material constant C and Temperature(°C)

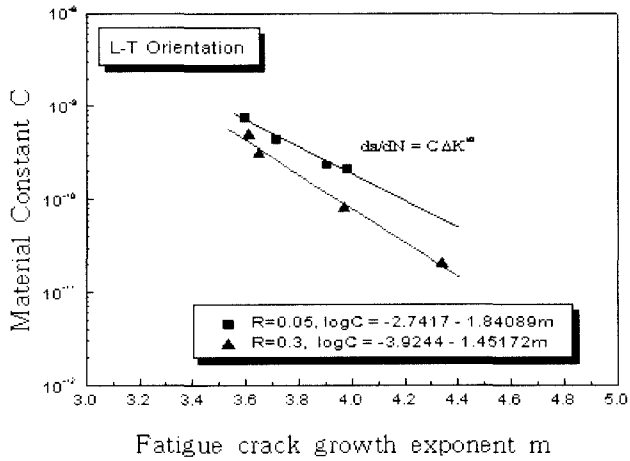


Fig. 10 Correlations between C and m in Paris law $da/dN=C\Delta K^m$

크랙진전지수 m 의 값이 증가한 것으로 나타났으며(시와오, 1996), 이것은 재료의 파괴가 시작되면 크랙진전속도 da/dN 가 증가하게 되고, 따라서 취성파괴가 일어날 가능성이 높아질 것으로 판단된다.

3.4 파단면의 특성

온도 25°C 와 -30°C, -60°C, -80°C, -100°C, -120°C등에서, 응력비 0.05 및 0.3에 대한 피로크랙진전특성을 ΔK -감소방식으로 시험한 후, 제2단계 영역의 중심부의 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경으로 촬영하여 Fig. 11에 나타내었다.

각 시험편의 파단면에는 상온 25°C에서는 fretting 산화물이 관찰되었으나 저온에서는 저온 피로파단면의 특징이 되는 스트라이에이션(striation)이 관찰되었는데, 그 생성은 인장과정에서 크랙선단에 소성변형이 생김에 따라 둔화가 일어나고, 압축과정에서 재예하가 일어나는 둔화-재예하 과정에 의해 형성되는 것으로 보이며 각 온도별 스트라이에이션의 크기와 모양은 -100°C, -120°C의 파면상에서는 뚜렷한 변화를 보이고 있으며 파면조직상의 크기도 뚜렷한 차이를 나타내어 균열의 붕괴현상에 의해 저온일수록 취성파괴가 발생하여 의백개(quasi cleavage) 현상을

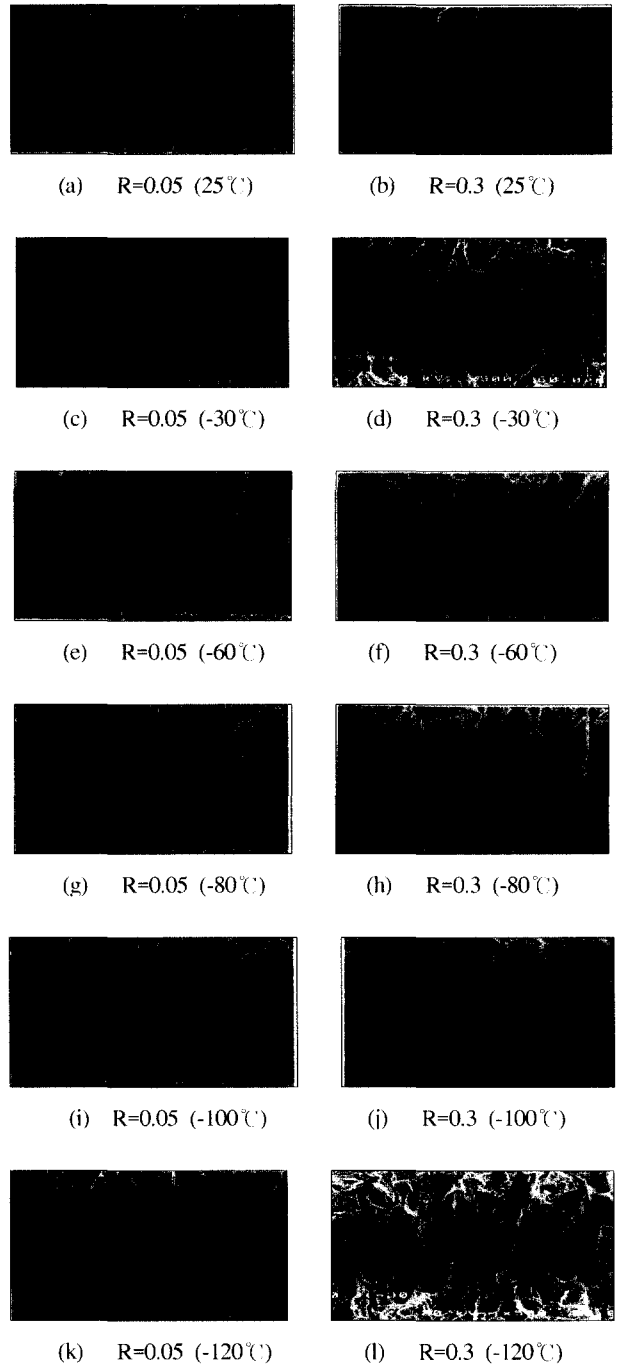


Fig. 11 Fractography of fatigue crack growth surface at 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C and -120°C for R=0.05, 0.3

보이고 있다. 따라서 온도저하에 피로크랙진전속도가 크게 감소되었다.

4. 결 론

본 연구는 저온 압력용기용 SA516 강판에 대하여 온도 25°C, -30°C, -60°C, -80°C, -100°C 및 -120°C의 저온에서 응력비 0.05 및

0.3으로 피로크랙전파 특성에 관한 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상온 25℃에서 온도가 저하할수록 피로크랙진전 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 및 제 2단계 영역에서 응력확대계수 ΔK 가 증가하는 것으로 나타났다. 응력비 0.05과 0.3이 동일한 경향으로 나타났다. 이는 저온취성의 영향으로 생각된다. 그리고 응력비 0.05보다 0.3일 때가 더욱 가속의 경향을 나타내어 ΔK_{th} 가 낮게 나타났다.

(2) 온도가 저하할수록 직선관계가 성립하는 제 2단계 영역에서 $da/dN - \Delta K$ 의 직선 기울기 즉 크랙진전지수가 증가하는 것으로 나타났다. 응력비 0.05 및 0.3에서도 같은 경향으로 나타났다. 온도가 저하할수록 크랙진전 속도 da/dN 가 감소되어 하한계 응력확대계수가 증가하였다.

크랙진전지수의 크기가 응력비 영향을 받아 응력비가 0.05의 경우 3.610~5.072로 나타났으나 0.3은 3.596~4.167로 응력비가 증가할수록 낮게 나타났다.

(3) 상온 25℃에서 -120℃까지의 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 는 응력비 0.05의 경우 11.20MPa \sqrt{m} ~17.98MPa \sqrt{m} 로 온도의 저하에 따라 증가하였다.

응력비 0.3의 경우 상온 25℃~-120℃까지의 ΔK_{th} 값은 6.49MPa \sqrt{m} ~12.92MPa \sqrt{m} 로 역시 온도의 저하에 따라 증가하였으나 응력비가 증가할수록 감소하였다.

이는 상온 및 저온에서 산화물이 크랙 개폐에 영향이 된 것으로 생각된다.

(4) 파단면상에는 상온의 경우 fretting 산화물에 의해 크랙 개폐에 영향을 주었으나 저온으로 갈수록 스트라이에이션 파면을 나타내었으며 모양과 크기도 차이를 나타내어 저온 취성의 영향을 받은 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 박경동(1983). “원자로용 저합금강의 고온피로 크랙 전파와 크랙개폐구 특성에 관한 연구,” 동아대학교 박사학위 논문, pp 10~16.
- 김재훈(1989). “기계구조용재료의 피로크랙 진전거동에 관한 연구,” 충남대학교 박사 학위 논문, pp 10~16.
- 박경동, 노태영, 김영대, 김형자, 오명석, 이경렬, 김정호(1999). “압력용기용강의 저온피로크랙하한계 특성에 관한 연구(I),” 한국동력 기계공학회 추계학술대회 논문집, pp 131~136.
- 서창민, 오명석(1996). “2024-T3 및 황동의 작은표면 결함재의 피로균열 성장특성에 관한연구,” 한국해양 공학회지 제10권 제1호, pp 53~63.
- 小林英男(1993). “破壊力学,” 共立出版株式会社, pp 85~96.
- 日本機械學會 基準(1981). “弾塑性 破壊引性 JIC試驗方法,” JSME S001
- Advanced Fatigue 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.
- ASME Sec.VIII Division 1 Subsection C(1995) Rules for Construction of Pressure Vessels, pp 261~263.

2001년 4월 23일 원고 접수

2001년 6월 7일 수정본 채택