

## 저온 압력용기용 SA516강의 응력비에 따른 피로크랙 전파특성에 관한 연구

박경동\* · 하경준\*\* · 박형동\*\*

### A Study on the Stress ratio Effect on the Fatigue Crack Characteristics of Pressure Vessel SA516 Steel at Low Temperature

K-D Park\* · K-J Ha\*\* · H-D Park\*\*

**Key words :** Crack Propagation, Fatigue, Low Temperature, Stress Ratio, Cryogenic-Brittleness.

#### Abstract

In this study, CT specimens were prepared from ASTM A516 steel which was used for pressure vessel plates for moderate and lower 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 0.1, 0.3 by means of opening mode displacement. At the constant stress ratio, 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 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 assumed that the fatigue crack growth rate  $da/dN$  is rapid in proportion to descend temperature in Region II and the cryogenic-brittleness greatly affect a material with decreasing temperature.

\* 부경대학교 기계공학부

\*\* 부경대학교 기계공학과 박사과정

## 1. 서 론

최근 피로파괴의 구조이론과 실험적인 해석은 상당히 발전되었지만, 여러 가지 인자들의 복합적인 영향을 받는 부재로 이루어진 항공기와 선박등 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, 원자력, 저온 압력용기, 저수조 탱크 등이 다양한 환경에서 장시간 사용되는 경우에 이들 구조물의 설계, 제작 및 유지의 측면에서 파괴역학적인 적용이 크게 필요하게 되었다<sup>[1][2]</sup>.

실제 구조물에는 제조과정 중에 소재내에 노치나 개재물등 결함의 잠재 가능성이 크고, 또한 사용 중에 외적환경의 부하 조건에 의해 결함이 존재하게 된다. 이와같이 재료 내부에 존재하는 결함 부분에 반복하중이 작용하게 되면 응력은 피로로 축적되어 미세한 크랙을 발생 또는 전파시켜 재료 파괴로 이어지는 경우가 일반적이라 하겠다.

따라서 이러한 결함들로부터 피로크랙이 성장하지 않도록 하는 공학적인 설계를 위한 피로크랙 하한계 특성과 피로크랙이 생성·성장했을 때의 잔존수명을 평가하기 위한 피로크랙전파 특성을 규명하는 것은 대단히 중요한 일이다<sup>[3][4]</sup>.

Paris는 피로크랙전파에 대한 파괴역학적인 파라미터  $K$ 를 사용하여 크랙전파속도  $da/dN$ 과 응력 확대계수 범위  $\Delta K$ 의 함수관계를 도입하여 발표함으로써 실험과파괴역학적인 피로크랙전파 거동의 이론을 확립하였으며, 그 외에도 많은 학자들에 의해 피로파괴에 대한 연구가 계속되고 있으며, 기계 및 구조물의 안전설계를 위하여 보다 많은 자료의 축적이 요구되고 있다<sup>[5][6]</sup>.

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 SA516에 대하여 상

온 25℃ 와 -30℃, -60℃, -80℃, -100℃, -120℃의 환경 속에서 정(+)방향 사인파형 반복 하중을 주파수 20Hz로서 응력비 0.1, 0.3에 대해 안정성장영역에서 각각의 피로크랙전파속도  $da/dN$ 과 응력확대계수 범위  $\Delta K$  선도 및 피로크랙 하한계특성  $\Delta K_{th}$ 을 구하고, 온도 및 응력비에 따르는 피로크랙전파지수  $m$  와 재료상수  $C$ 를 규명하여 저온에서의 압력용 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)이며, 시편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of specimen(%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V
0.12	0.23	0.97	0.017	0.04	0.026	0.02	0.03	0.002

Table 2 Mechanical properties of specimen

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)
310	459	29	66.12

시험편은 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재를 이용하여 L-T방위로 채취해, 압연방향이라중방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 외형가공은 밀링으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈반경 0.1mm가 되게 가공하였다. Fig. 1는 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다.

그리고 피로크랙전파의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며, 25℃ 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력 범위에서 ASTM E647-93 규정에 의거 3mm의 피로 예크랙을 주었다.

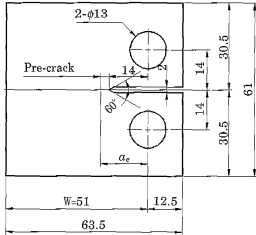


Fig. 1 Configuration of CT-specimen(Unit:mm)

## 2. 2 실험장치

Fig. 2은 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로 시험기(INSTRON 8501, 10KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 조작하였다. 크랙길이 측정은 시편에 COD 클립게이지를 부착한 콤팩트라이언스법을 사용하였으며, 파단면의 미시적 촬영은 주사식 전자현미경(S.E.M)을 사용하였다<sup>10)</sup>.

## 2. 3 실험방법

실험은 서보전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 20Hz, 정현 파형으로 하였다.



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

저온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착해 액체 질소용기에 질소 분배를 연결하여 액체 질소 용기 내의 압력을 0.5kg/mm<sup>2</sup>내외로 되도록 하여 액체질소를 챔버내로 유입시켜 저온환경으로 만든다. 실험 중 액체질소의 감소에 따라 질소분배의 압력으로 액체질소의 유입을 정상적으로 밀어주며 온도유지는 전자식밸브가 자동으로 작동되어 온도 분위기에 따라 자동으로 유입구를 개폐하도록 되어 있다. 온도편차는  $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였고 응력비  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ , 주파수 20Hz, 실험 온도는  $25^\circ\text{C}$ 와  $-30^\circ\text{C}$ ,  $-60^\circ\text{C}$ ,  $-80^\circ\text{C}$ ,  $-100^\circ\text{C}$ ,  $-120^\circ\text{C}$ 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 특성의  $\Delta K$ 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 paris 법칙인

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

으로 나타내고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 여기서  $C$ 와  $m$ 은 재료상수로서 그 값은 동일재료, 동일환경 구조물 등의 크랙전파속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다. 응력확대계수 즉  $\Delta K$ 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 시험에서는 ASTM E647-95a 규정에 의거  $\Delta K$ 콘트롤에 의한  $K$ -감소방식을 이용하였는데 그 감소조건은 다음과 같다<sup>11)</sup>.

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

$da / dN$ 의 측정범위  $\Delta a \leq 0.5 \text{ mm}$

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3. 1 피로크랙진파 하한계특성

온도  $25^\circ\text{C}$ 와  $-30^\circ\text{C}$ ,  $-60^\circ\text{C}$ ,  $-80^\circ\text{C}$ ,  $-100^\circ\text{C}$ ,  $-120^\circ\text{C}$ 에서, 응력비 0.1 및 0.3에 대하여 크랙전파특성에 관한 실험을 하고, 그 결과 크랙전파속도

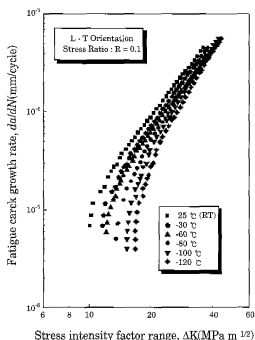


Fig. 3 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (R=0.1)

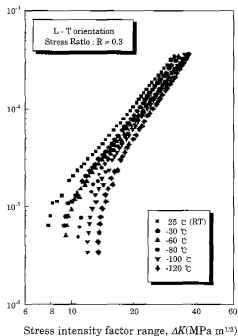


Fig. 4 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range (R=0.3)

$da/dN$ 와 응력확대계수 폭  $\Delta K$ 의 관계를 양대수 선 도상에 표시하였다. 실험 결과 최소자승법을 이용하여 구한 피로크랙 하한계특성  $\Delta K_{th}$ 은 Table 3에, 응력비에 대한 크랙전파속도  $da/dN$ 와 응력확대계수 폭  $\Delta K$ 의 관계는 Fig. 3, 4에 나타내었다.

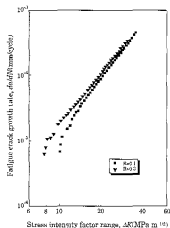
실험 결과 응력비 0.1 및 0.3에서 온도가 내려갈수록 피로크랙 전파영역(제1단계)에서의 피로크랙전파 하한계특성  $\Delta K_{th}$  값이 증가하는 것으로 나타났다. 피로수명의 대부분이 피로크랙 전파 제1단계 영역에서 소요된다는 점을 감안한다면, 이는 저온일수록 피로크랙 전파속도  $da/dN$ 가 감소되어  $\Delta K_{th}$ 가 상승하는 것으로 판단된다.

Table 3. The value of fatigue crack growth threshold  $\cdot \Delta K_{th}$  (MPa  $\cdot$  m)

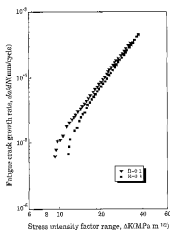
Stress ratio \ Temp.	25 °C	-30 °C	-60 °C	-80 °C	-100 °C	-120 °C
0.1	8.89	9.39	9.91	11.25	13.19	15.12
0.3	6.49	7.24	7.79	8.49	11.62	12.92

### 3.2 온도에 따른 피로크랙전파특성에 미치는 응력비 영향

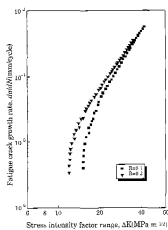
Fig. 5 (a), (b), (c), (d), (e), (f)은 응력비 R=0.1, 0.3에서 온도 25 °C와 -30 °C, -60 °C, -80 °C, -100 °C, -120 °C에 따른  $da/dN$ - $\Delta K$ 관계를 그림으로 나타낸 것이다.



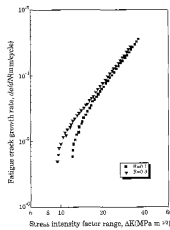
(a) 25 °C



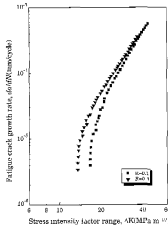
(b) -30°C



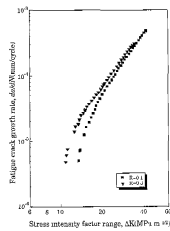
(e) -100°C



(c) -60°C



(f) -120°C



(d) -80°C

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

Fig. 5 (a)에서 상온 25°C에서는 피로크랙전파속도 영역이 응력비 감소에 따라 그 범위가 증가되는 경향을 나타냈고 응력확대계수 범위도 증가된다. 따라서 응력비가 높은 R=0.3이 R=0.1보다 빠르게 전파되는 것을 알 수 있으며, 이러한 현상은 응력비 증가에 따라 최대하중이 증가되어 피로크랙 전파속도가 빨라지는 것으로 생각되며, 응력비 0.1일 때는 0.3일 때와 달리 피로크랙 단형에 fretting 산화물이 피로크랙 전파속도의 저하에 크게 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 5 (b) 및 (c)와 Fig. 5(a)를 비교하였을 때

$\Delta K$ 성장의 범위가 아주 크지 않았지만, 저온  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-60^{\circ}\text{C}$ 에서 용력비 0.1일 때 용력비 0.3보다 저온피로 크랙전파속도가 감소되었으며, 또한 용력비 증가에 따라 저온피로 크랙전파속도  $da/dN$ 도 가속되어 용력확대계수 범위가 저 $\Delta K_{th}$ 영역으로 되었다.

Fig. 5 (d)는  $-80^{\circ}\text{C}$ 의 저온피로 크랙전파속도와 용력확대계수 범위 $\Delta K$ 관계에서 저온피로크랙 전파속도특성은  $-30^{\circ}\text{C}$  및  $-60^{\circ}\text{C}$ 보다 크게 감소되는데 그것은 비록 용력비 증가뿐만 아니라 재료의 기계적 성질을 좌우하는 파면 입자의 조대화와 온도의 영향이 피로강도의 저하력을 약화시킴으로서 용력확대 계수 범위가 증가되는 현상이 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 5 (e), (f)는 온도  $-100^{\circ}\text{C}$  및  $-120^{\circ}\text{C}$ 에서 용력비 0.1, 0.3의 저온피로 크랙전파속도는 다른 온도에 비해 크게 감소되었으며 용력확대계수범위는 고 $\Delta K$ 영역으로 이동하고 용력비는 온도에 크게 의존하지 않는 영역으로 천이되고 있음을 알 수 있다. 다시 말해서  $-120^{\circ}\text{C}$ 까지 저온환경으로 바뀌어도 고 $\Delta K$ 영역은 용력비에 크게 좌우되지 않으며 저온피로크랙 전파 거동력은 크랙전파속도를 지연시키는 것으로 판단되었다.

이것은 저온 환경분위기에서 나타나는 온도, 용력비 및 재료의 취성적 성질에 따른 것으로 항복강도 및 탄성계수 감소로 생각된다. 각 온도에 있어서 용력비 0.1과 0.3의 경우 고 $\Delta K$ 영역에 있어서는 용력비의 영향이 크게 나타나지 않았으나 용력확대계수범위  $\Delta K$ 가 감소되어 저  $\Delta K$ 영역에 오면 용력비의 영향이 크게 나타났다. 그리고 온도가 저하할수록 용력비의 영향이 적게 나타났다. Fig. 6 및 Fig. 7에 한한계 용력확대계수  $\Delta K_{th}$ 의 온도 영향과 피로크랙전파속도  $da/dN$ 의 용력비 영향을 각각 나타내었다.

### 3.3 피로크랙전파속도 $da/dN$ 와 피로크랙 전 전지수 $m$ , 재료상수 $C$ 의 온도 관계

피로크랙전파과정의 제2단계 영역에 있어서  $da/dN$ - $\Delta K$ 의 좌표선상에서 직선 관계가 나타났고, 이것을 Paris 식  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 를 적용하여 Table. 4에 나타내었다<sup>[10][11]</sup>.

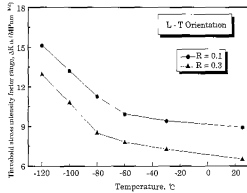


Fig. 6 Effect to threshold stress intensity factor range  $\Delta K_{th}$  and temperature

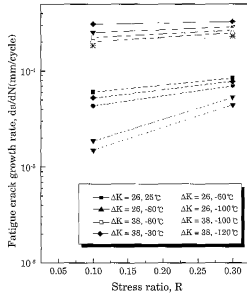


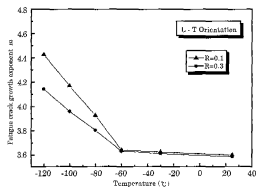
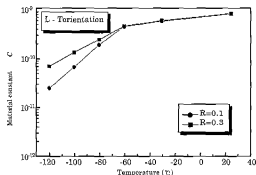
Fig. 7 Relations between Fatigue crack growth rate and stress ratio

Table 4에서 직선관계가 성립하는 제2단계 영역에서 일정한 용력비에서는 온도가 저하할수록, 크랙전파속도  $da/dN$ 가 감소한 반면 용력확대계수 범위  $\Delta K$ 이 증가한 것으로 미루어, 피로강도가 증가되고 인성이 저하되는 것으로 판단되며, 이것은 온도저하에 크게 영향을 받는 것으로 생각된다.

Fig. 8, 9에 크랙전파지수  $m$  및 재료상수  $C$ 와 온도관계를 그림에서 나타내었다. 일정한 용력비에서는 온도가 낮아질수록 직선관계가 성립하는 제2

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

Stress ratio	Temp(°C)	m	C
0.1	25°C	3.599	$7.64 \times 10^{-10}$
	-30°C	3.702	$4.65 \times 10^{-10}$
	-60°C	3.757	$4.36 \times 10^{-10}$
	-80°C	3.927	$1.87 \times 10^{-10}$
	-100°C	4.168	$6.76 \times 10^{-11}$
	-120°C	4.517	$1.12 \times 10^{-11}$
0.3	25°C	3.596	$7.64 \times 10^{-10}$
	-30°C	3.656	$5.84 \times 10^{-10}$
	-60°C	3.717	$4.44 \times 10^{-10}$
	-80°C	3.906	$2.37 \times 10^{-10}$
	-100°C	3.950	$1.34 \times 10^{-10}$
	-120°C	4.167	$1.07 \times 10^{-10}$

**Fig. 8** Relation between fatigue crack growth exponent  $m$  and Temperature(°C)**Fig. 9** Relation between material constant  $C$  and Temperature(°C)

단계 영역에서의  $da/dN$ - $\Delta K$ 직선의 기울기 즉, 크랙전파지수  $m$ 의 값이 증가한 것으로 나타났으며, 이것은 재료의 파괴가 시작되면 크랙전파속도  $da/dN$ 가 증가하게 되고, 따라서 취성파괴가 일어날 가능성이 높아 진것으로 판단된다. 온도가 25°C에서 -60°C까지는 크랙전파지수  $m$ 와 재료상수  $C$ 의 값이 응력비에 크게 영향을 받지 않았으나 -60°C에서 -120°C사이에는 응력비의 영향이 나타났으며 온도가 저하할수록 응력비 영향이 크게 나타났다.

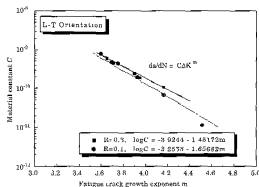
**Fig. 10** Correlation between  $C$  and  $W$  in Paris equation  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 

Fig. 10의  $m$ 와  $C$ 의 관계를 보면 크랙전파지수  $m$ 가 증가함에 따라 재료상수  $C$ 가 감소하는 경향으로 나타났으며 응력비의 영향은 크게 나타나지 않았다.

### 3.4 파단면의 특성

온도 25°C와 -30°C, -60°C, -80°C, -100°C 및 -120°C에서, 응력비 0.1 및 0.3에 대한 피로크랙전파특성을  $\Delta K$ -감소방식으로 시험한 후, 하한계 영역 중심부의 미시적 파단양상을 주사현미경으로 촬영하여 Fig. 11에 나타내었다.

각 시험편의 파단면에는 피로파단면의 특징이 되는 스트라이에이션(striation)이 관찰되었는데, 그 생성은 인장과정에서 크랙선단에 소성변형이 생김에 따라 둔화가 일어나고, 압축과정에서 재에 화가 일어나는 둔화-재에와 과정에 의해 형성되는 것으로 반복응력 사이클당 스트라이에이션이 형

성되는 것으로 보이며 각 온도별 스트라이에이션의 크기와 모양은  $-80^{\circ}\text{C}$ ,  $-100^{\circ}\text{C}$ ,  $-120^{\circ}\text{C}$ 의 표면상으로는 뚜렷한 변화를 보이고 있으며 파면조직상의 크기는 뚜렷한 차이를 나타내어 크랙의 붕괴현상에 의해 저온일수록 취성파괴가 발생하여 의백개(quasi cleavage) 현상을 보이고 있다. 그리고 온도저하에 따라 피로크랙전파속도가 크게 저하되는 것은 산화물의 영향일 것으로 생각된다.

이는 피로크랙전파 특성과 비교하여 Table 4에 나타난 결과에서 저온일수록 피로 크랙전파에 대한 저항성이 증가하며 취성파괴가 일어날 가능성이 높은 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 저온 압력용기용 SA516 강판에 대하여 온도  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-60^{\circ}\text{C}$ ,  $-80^{\circ}\text{C}$ ,  $-100^{\circ}\text{C}$  및  $-120^{\circ}\text{C}$ 의 저온에서 응력비 0.1 및 0.3으로 피로크랙전파 특성에 관한 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험 온도가 저하할수록 피로크랙전파 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 값이 증가하며  $da/dN$ - $\Delta K$ 곡선 상에서 제 2단계 영역은 더 높은  $\Delta K$ 값에서 시작되는 것으로 나타났다. 응력비 0.1과 0.3에서 같은 경향으로 나타났다. 이는 저온취성의 영향으로 생각된다. 그리고 응력비 0.1보다 0.3일 때가 가속의 경향을 나타내어  $\Delta K_{th}$ 가 낮게 나타났다<sup>10)</sup>.

2) 온도가 저하할수록 직선판제가 성립하는 제 2단계 영역에서  $da/dN$ - $\Delta K$ 의 직선 기울기 즉 크랙전파지수가 증가하는 것으로 나타났다. 응력비 0.1 및 0.3에서도 같은 경향으로 나타났다. 온도가 저하할수록 크랙전파속도  $da/dN$ 가 감소되어 하한계 응력확대계수가 증가하였다.

크랙전파지수의 크기가 응력비 영향을 받아 응력비가 0.1의 경우 3.599~4.517로 나타났으나 0.3의 경우 3.596~4.167로 나타나 응력비가 증가할수록 낮게 나타났다.

3) 상온  $25^{\circ}\text{C}$ 에서  $-120^{\circ}\text{C}$ 까지의 하한계 응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 는 응력비 0.1의 경우 8.89MPa $\sqrt{m}$ ~14.96MPa $\sqrt{m}$ 로 온도의 저하에 따라 증가하였다.

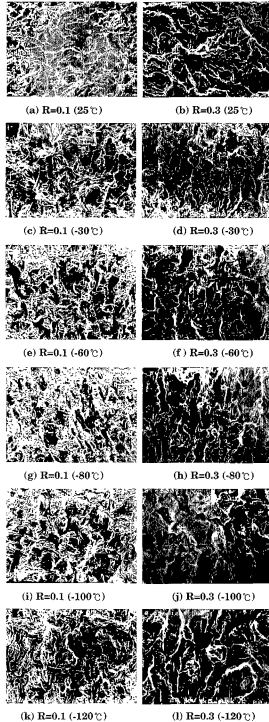


Fig. 11 Fractography of fatigue crack growth surface at  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-60^{\circ}\text{C}$ ,  $-80^{\circ}\text{C}$ ,  $-100^{\circ}\text{C}$  and  $-120^{\circ}\text{C}$  for  $R=0.1, 0.3$



용력비 0.3의 경우 상온 25℃~120℃까지  $\Delta K_{th}$  값은  $6.49\text{MPa}\sqrt{m} \sim 12.92\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 용력비가 증가할수록 감소하였다.

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

### 참 고 문 헌

1. 김재훈. "기계구조용재료의 피로크랙 전진거동에 관한 연구", 충남대학교 박사 학위 논문, pp. 10-16, 1989.
2. 김영대, 김형자, 노태영, 박경중, 손재운. "압력용기용 A516강의 저온 피로크랙 전파특성의 관한 연구" 한국해양공학회지, 제13권, 제3(1)호, pp. 108-115, 1999.
3. 박경동. "원자로용 저합금강의 고온피로 크랙 전파와 크랙개폐구 특성에 관한 연구," 동아대학교 박사 학위 논문, pp 10-16, 1983.
4. 박경동, 노태영, 김영대, 김형자, 오병석, 이경렬, 김정호. "압력용기용강의 저온피로크랙러한계 특성에 관한 연구(1)", "한국동력 기계공학회 추계학술대회 논문집, pp. 131~136, 1999.
5. 서창민, 오병석. "2024-T3 및 황동의 작은표면결합대의 피로균열 성장특성에 관한연구", 한국해양 공학회지 제10권 제1호, pp. 53-63, 1996.
6. 小林英男. "破壊力学", 共立出版株式会社, pp. 85-96, 1993.
7. 日本機械學會 基準. "彈塑性 破壊引性 JIC試驗方法," JSME S001-1981.
8. Advanced Facticeg Crack Propagation, Instron 2490 Series Application Programs, pp. 1-4, 1991
9. ASTM Standard, E647-95a, 1997.

10. P.C.Paris and F.Erdorgan, Tran. of the ASME Ser. D, pp. 528-534, 1963.
11. Standard Test Method For Measurement of Fatigue Crack Growth Rates ASTM, E647-93, 1993.
12. Y.Kitsunai. "Fatigue Crack Growth Behavior in Mild Steel Weldment at Low Temperature", pp. 280-290, 1991.

### 저 자 소 개

#### 박경동(朴景東)

1943년 2월 13일생. 1983년 동아대학교 대학원(공학박사). 1992년 3월 '일본중경공대(공파박사). 1970~1974년 2월 동아대학교 기계공학과 교수. 1974년 3월~현재 부경대학교 기계공학과 교수



#### 하경순(河敬淳)

1955년 6월생. 1986년 2월 부산개발대학 기계설계학과 졸업. 1988년 2월 부산수산대학원 박용기계학 졸업(석사). 2001년 부경대학교 기계공학과 박사과정. 1986년 3월~현재 대원강입 침원공장 설비계획팀 차장. 한성기업 500등급 내인기관 1등기관사호 5년 근무. 김경직관장 면허소지



#### 박형동(朴亨東)

1959년 12월생. 1986년 2월 부경대학교 기계공학과 졸업. 1995년 8월 부경대학교 산업대학원 기계공학과 졸업(석사). 1999년 8월 부경대학교 대학원(공학박사). 1986년 4월~현재 부산주공주식회사 설비보전 과장 및 팀장

