

## 원자로 압력용기용 강의 고온피로특성에 미치는 응력비의 영향

박경동\* · 정찬기\*\* · 김정호\*\*

### Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Propagation Behavior of Pressure Vessel Steel SA516-Grade70 at High Temperature.

K-D Park\* · J-G Jung\*\* · J-H Kim\*\*

**Key words :** Crack propagation rate(피로균열진전속도), High temperature(고온), Stress ratio(응력비),  $da/dN - \Delta K$ (균열진전속도와 응력확대계수범위), Crack closure(균열닫힘)

#### Abstract

The fatigue crack propagation behavior of the SA516-Grade70 steel which is used for pressure vessels was experimentally examined under the condition of at room temperature, 150°C, 250°C and 370°C with stress ratio of R=0.1 and 0.3. The fatigue crack propagation rate,  $da/dN$ , related with the stress intensity factor range,  $\Delta K$ , was influenced by the stress ratio within the stable growth of fatigue crack(Region II) with an increase in  $\Delta K$ .

The resistance to the fatigue crack growth at high temperature is higher in comparison with that at room temperature, and the resistance attributed to the extent of plasticity-induced by compressive residual stress according to the cyclic loads. Fractographic examinations reveal that the differences of the fatigue crack growth characteristics between room and high temperatures are mainly explained by the crack closure and oxide-induced by high temperature.

#### 1. 서론

최근 압력용기, 원자로 및 에너지 관련 설비와 장치 등 각종 기기가 고온, 고압하의 가혹한 환경 조건에서 장기간 사용되는 경우가 많아졌다. 여러

가지 인자들의 복합적인 영향을 받는 대형 구조물의 피로파괴에 대한 규명은 명확히 확립되지 않았으며, 피로 현상에 대하여 충분히 축적된 자료를 이용하여 내피로 설계에 적용한다는 것은 일부 구조물 및 부품에만 가능한 실정이다. 또한, 구조물

\* 부경대학교 기계공학부(원고접수일 : 2001년 5월)  
\*\* 부경대학교 기계공학과 박사과정

의 설계 제작시에 고온 피로 분야에 파괴역학을 적용한 자료가 요구되고 있는 실정이다<sup>[14][15]</sup>.

실제의 구조물에는 많은 노치, 개재물 등 결함의 존재 가능성이 있고, 또한 사용 중에 외적인 여러 환경조건에 의해 결함이 존재하게 된다. 이들 결함을 갖는 재료의 피로균열 진전 및 구조물의 잔류수명을 평가하기 위해서는 피로균열 진전 특성을 파악하는 것이 대단히 중요하다. 피로균열 진전속도  $da/dN$ 과 응력확대계수범위  $\Delta K$ 와의 관계가 Paris에 의해 밝혀진 이래 피로균열 진전 저항은 피로균열 진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 를 기초로 하여 평가되고 있다

따라서 가혹한 환경에서 재료의 파괴해석에는 고온 피로균열 진전속도의 수명 평가가 필수적이라 하겠다. 그러므로 고온 환경에서 사용되고 있는 각종 고온 압력용기, 원자로 등 실제 구조물들의 고온 피로균열진전 특성 등을 연구하여 수명, 안정성, 신뢰성 및 효율성을 해석하고, 파괴 역학적 개념을 기초로 피로설계에 직접 응용하는 것이 대단히 중요하다.

본 연구에서는 고온 압력 용기, 원자로 냉각재 배관, 탭조류등에 사용되는 SA516강에 대하여 고온 환경에서 고온 피로균열 진전속도에 미치는 응력비와 사이클 및 온도의 영향을 고찰하였다. 또한  $da/dN$ - $\Delta K$ 곡선의 제 2단계 직선 구간과 응력비 관계를 규명하고, 파면해석을 통하여 온도의 영향에 따른 고온 피로균열 진전거동을 해석하였다.

## 2. 실험 및 방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 용접성, 절삭성 및 가공성이 우수한 SA516-Grade70 압력용기용 강재이며 시험편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

실험에 사용된 시험편은 CT시험편으로 두께 13mm이고, 시험편 채취방향은 압연방향과 부하방향이 평행하고 균열 진전방향이 이에 수직인 L-T방향으로 채취하였으며, 슬로터 가공은 와이어 커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)를 사용하

Table 1 Chemical composition of specimen(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.16	0.30	1.14	0.008	0.001	0.36
Cr	Cu	V	Mo	Cb	Al
0.07	0.20	0.027	0.097	0.018	0.028

Table 2 Mechanical properties of specimen

Temp.(℃)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
RT	390	558	26
150	373	549	28
250	363	540	31
370	363	550	27

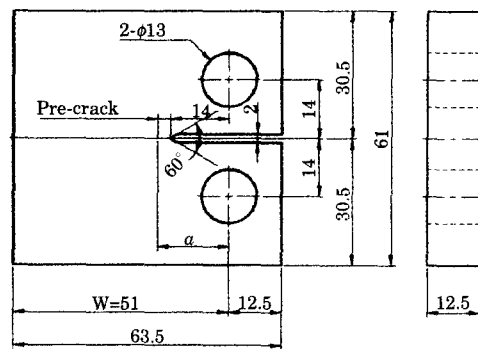


Fig. 1 Configuration of CT-specimen(unit : mm)

여 ASTM E647-95a의 규정(ASTM, 1997)에 따라 가공하였다<sup>[6]</sup>.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 시험편 형상과 치수를 나타낸 것이다.

### 2.2 실험장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로시험기(MTS, 100kN)이며, 파괴역학 파라미터는 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 산출하였다.

고온 실험을 위한 장치는 열전대, 고온 챔버, 고온 COD 클립게이지 등으로 구성하였다.

### 2.3 실험방법

실험은 서보 전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중증가 제어방식으로 주파수 20Hz, 정현파형으로 실험을 수행하였다.

실험의 신뢰성을 높이기 위하여 고온 챔버내의 분위기 온도와 시험편에 전도된 열의 온도 편차는  $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였고, 응력비  $R=0.1, 0.3$ , 주파수  $20\text{Hz}$ , 실험온도 실온( $25^\circ\text{C}$ ),  $150^\circ\text{C}$ ,  $250^\circ\text{C}$  및  $370^\circ\text{C}$ 로 하였다. 크랙길이는 고온 COD 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 측정하고 피로 균열 진전 실험은 ASTM E647-95a 규정(ASM, 1997)에 따라 일정진폭 하중 하에서 수행하였다. 피로크랙 진전속도는 시컨트법(secant method)에 의하여 구하였다.

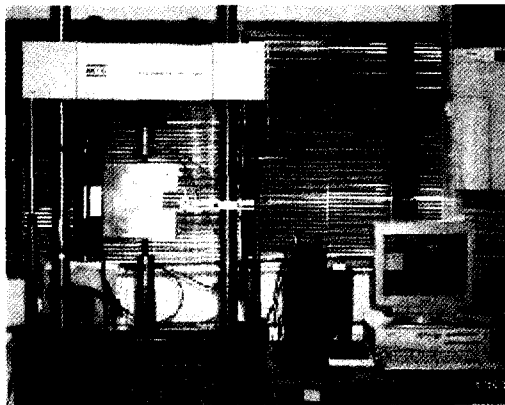


Fig. 2 Apparatus of fatigue test machine (MTS 810 : 10tonf)

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 피로크랙전파 속도에 미치는 온도의 영향

Fig. 3 및 Fig. 4에 응력비  $R=0.1$ 과 응력비  $R=0.3$ 에 대하여 실제 원자료와 압력용기에 사용되는 온도를 상징하여 피로크랙전파특성 실험을 통하여 얻어진 크랙 전파속도  $da/dN$ 와 응력확대계수  $\Delta K$ 의 관계를 각각 온도에 대하여 나타내었다<sup>[6][8]</sup>.

Fig. 3과 Fig. 4에서 소성개구변위가 발생하는 고 응력확대계수  $\Delta K$ 영역에서는 온도의 영향이 크게 나타나지 않았으나 피로크랙전파속도가 진행하여 저  $da/dN$  속도영역에 도달할수록 온도의 영향이 크게 나타났다.

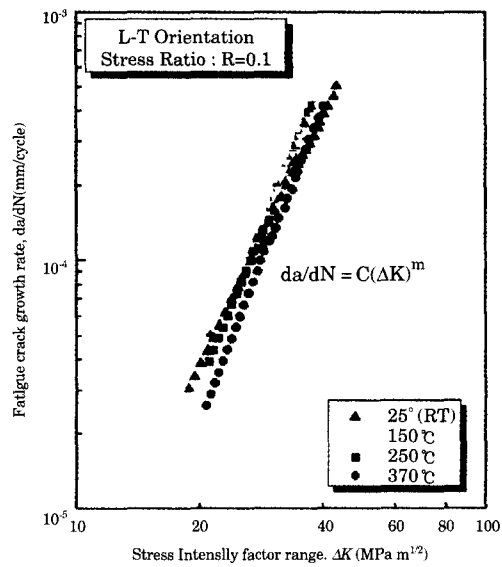


Fig. 3 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

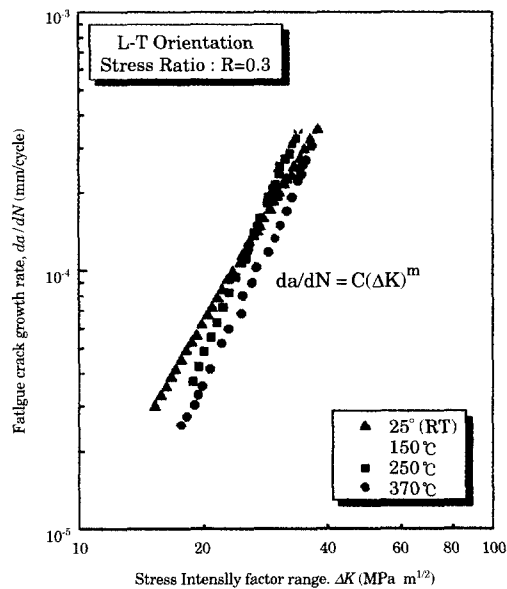


Fig. 4 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

그리고 응력확대계수에 관계없이  $150^\circ\text{C}$ 의 경우는 저  $\Delta K$ 영역까지  $da/dN-\Delta K$ 직선관계가 성립하여 피로크랙전파 속도가 가속함을 나타내었다. 특히 응력비  $R=0.3$ 의 경우가 더욱 현저하게 가속현상을 나타내었다. 각 응력비의 경우 저  $\Delta K$ 영역에

서 온도 영향이 크게 나타나는 것은 하한계에 도달할수록 크랙선단의 고온산화물 침착에 의한 고온산화물이 시험편표면에 부착한 원인으로 생각된다.

특히 250℃ 및 350℃의 경우 피로크랙전파속도가 감소의 경향을 나타내고 있다. 이는 두꺼운 고온산화물이 시험편 표면에 부착하여 크랙의 개폐를 차단하는 원인으로 감소되어 고  $\Delta K$  영역에서 하한계에 도달하는 것으로 생각된다.

3.2 온도와 재료상수 C 및 m의 관계

Table 3에 응력비 R=0.1 과 R=0.3에서 150℃, 250℃ 및 350℃에서의 피로크랙전파지수 m와 재료상수 C의 결과를 나타내었다.

그리고 Fig. 5에서 응력비 R=0.1, 응력비 R=0.3에서 피로크랙전파 거동 제2단계 영역에서 Paris 식  $da/dN=C(\Delta K)^m$  에 따른 피로크랙전파지수 m와 온도의 관계를 나타내었고 Fig. 6에 응력비 R=0.1, R=0.3에서 재료상수 C와 온도의 관계를 나타내었다.

Table 3의 실험결과를 보면 응력비 R과 온도에 따른 피로균열진전지수 m와 재료상수 C의 2단계 안전성장영역에서 Paris 식에 의한 지수값을 정량적으로 나타낸 것으로 응력비 R에 관계없이 피로균열지수 m은 증가하고 재료상수 C는 감소하는 경향을 나타내었으며 온도의 증가에 따라 더욱 뚜렷한 차이를 보였다.

Fig. 5에 피로균열진전지수 m을 온도 및 응력비 R의 변화에 따른 정량적 값을 비교하여 나타내었다.

그림에서 온도 150℃ 및 250℃에서는 응력비 R의 영향을 크게 받지 않았으나 온도가 증가할수록 피로균열지수 m의 값은 응력비 R에 관계없이 증가하였으며 특히 370℃에서는 응력비의 영향이 적게 나타남을 보였다.

고온의 경우 고온산화물의 영향에 의해 폐구가 이루어짐으로 응력비의 영향이 적게 나타나는 것으로 생각된다. 특히 250℃이후부터의 큰 변화는 피로균열진전 저항력이 고온에서 크게 약화되었음을 보인 것으로 생각된다<sup>19)</sup>.

Fig. 6에서는 재료상수 C의 온도변화에 따른 응

Table 3 The gradient and constant by Paris' equation

Stress ratio	Temp(℃)	m	C
0.1	150℃	3.281	$2.57 \times 10^{-9}$
	250℃	3.307	$1.93 \cdot 10^{-9}$
	370℃	4.071	$1.60 \cdot 10^{-10}$
0.3	150℃	2.629	$4.90 \cdot 10^{-9}$
	250℃	2.725	$1.81 \cdot 10^{-9}$
	370℃	3.795	$2.09 \cdot 10^{-10}$

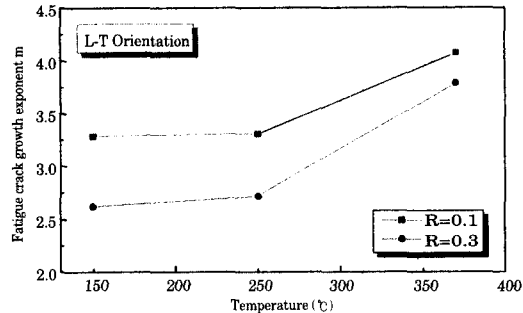


Fig. 5 Relations between fatigue crack growth exponent m and stress ratio R

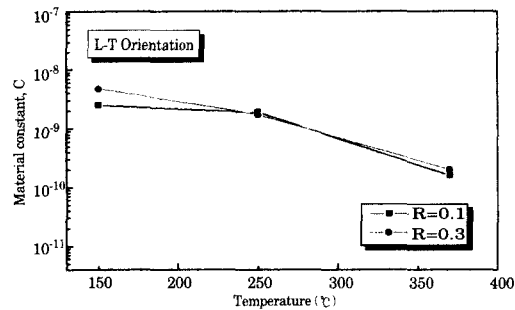


Fig. 6 Relations between material constant and temperature

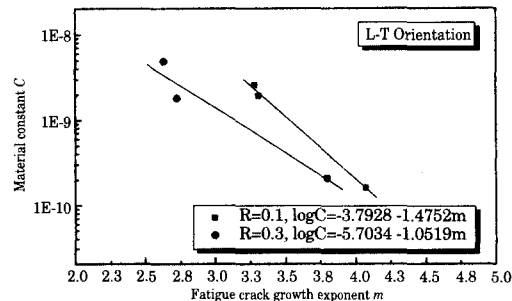


Fig. 7 Correlation between and in Paris equation

력비 R과 관계를 나타내었다.

그림에서 응력비 R=0.1의 경우 온도가 250℃까지는 거의 일정한 값을 보이다가 250℃부터는 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 응력비 R=0.3의 경우는 250℃까지는 약간 저하하는 경향을 보이다가 온도의 증가에 따라 역시 급격히 감소하였다. 온도 250℃ 이상에서는 응력비에 관계없이 C값이 급격히 감소하였으며 응력비에 따른 차이가 거의 나타나지 않았다. 온도의 증가에 따라 재료상수C가 감소되고 피로균열지수 m는 증가한다.

이는 피로균열전진 저항성과 구속력이 약화된 결과로 생각된다. Fig. 7에 재료상수 C와 피로크랙전파 저항지수 m와의 관계를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 m의 증가에 따라 C값이 급격하게 감소함을 나타내었고, 응력비에 따른 영향을 나타냈으나 m의 증가에 따라 거의 동일한 경향을 나타내었다.

### 3.3 크랙전파에 미치는 산화물의 영향

Fig. 8에 크랙전파에 미치는 산화피막의 영향을 온도별로 현미경을 통하여 그 결과를 나타내었다. 실온의 경우 저  $\Delta K$ 영역에서 파면상에 파면의 마찰, 마모에 의한 흑색의 산화물이 부착하고 있었고, 온도의 상승에 따라 150℃의 경우는 파면상에 얇고 안정된 고온 산화 피막이 생성되어 파면을 보호하고 모지의 마찰, 마모를 방지하여 산화물의 생성을 억제하여 가속되어 이 온도범위에서는 온도상승에 따른 크랙 개폐구에 지배하는 원인을 크게 나타내지 않았다. 온도상승에 따른 습도의 영향도 나타났다. 그러나 온도가 250℃에서 370℃의 고온으로 상승하니 150℃에서의 안정한 산화피막에 비하여 두꺼운 산화피막이 증대하여 크랙전파와 개폐에 크게 영향을 주는 것으로 나타났다. 그러므로 온도가 상승할수록 크랙전파속도가 감소하여 고  $\Delta K$ 영역에서 하한계에 도달하는 것으로 판단된다.

### 3.4 크랙전파속도 da/dN와 응력비 R의 관계

Fig. 9에 피로크랙전파속도 da/dN와 응력비 R의 관계를 응력확대계수  $\Delta K=19MPam^{1/2}$ ,

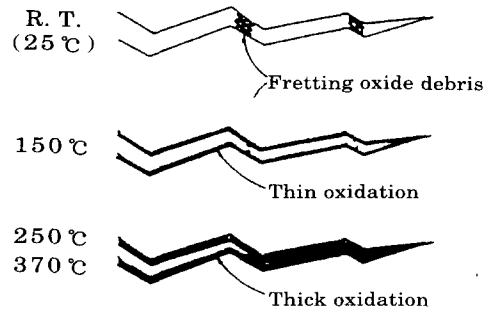


Fig. 8 Effect of high Temperature oxidation film

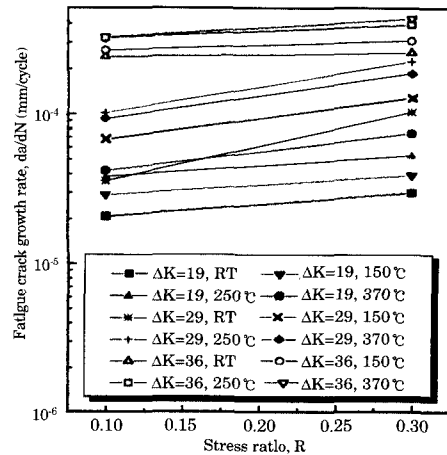


Fig. 9 Relation between fatigue crack growth and stress Ratio

$\Delta K=219MPam^{1/2}$ ,  $\Delta K=36MPam^{1/2}$ 에서 상온(25℃), 150℃, 250℃ 및 370℃의 고온에서 응력비 R=0.1과 R=0.3에서 실험한 결과를 나타내었다.

피로크랙전파속도 da/dN와 응력비R의 관계는 동일 응력확대계수 범위에서는 응력비 R의 증가에 따라 크랙전파속도 da/dN가 가속되어 증가하는 현상으로 나타났으며 특히 저 응력확대계수 범위에서 응력비의 증가에 따라 더욱 가속하여 증가하였다. 그러나 고  $\Delta K$ 영역에서는 응력비의 영향이 거의 나타나지 않았다.

동일 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 영역에서는 피로크랙전파속도 da/dN는 온도가 증가함에 따라 감소하는 현상으로 나타났다.

이는 고온산화물의 영향으로 감소하여 고  $\Delta K$ 영역에서 하한계에 도달할 것으로 생각된다.

따라서 응력비의 증가에 따라 크랙전파속도  $da/dN$ 가 고온에서 가속화되는 현상은 결정입계에 공기의 유입으로 고온산화물의 흡착과 크랙전파의 저항성감소에 기인하는 것으로 판단된다.

### 3.5 고온피로균열 파면해석

실온(25℃), 370℃에서 응력비  $R=0.1 \sim R=0.3$  일 때 재료의 파단면 고찰을 위하여 피로균열진전과 사이클의 특성을 2단계 영역부분에서 파괴기구를 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 미시적 관찰을 하였다.

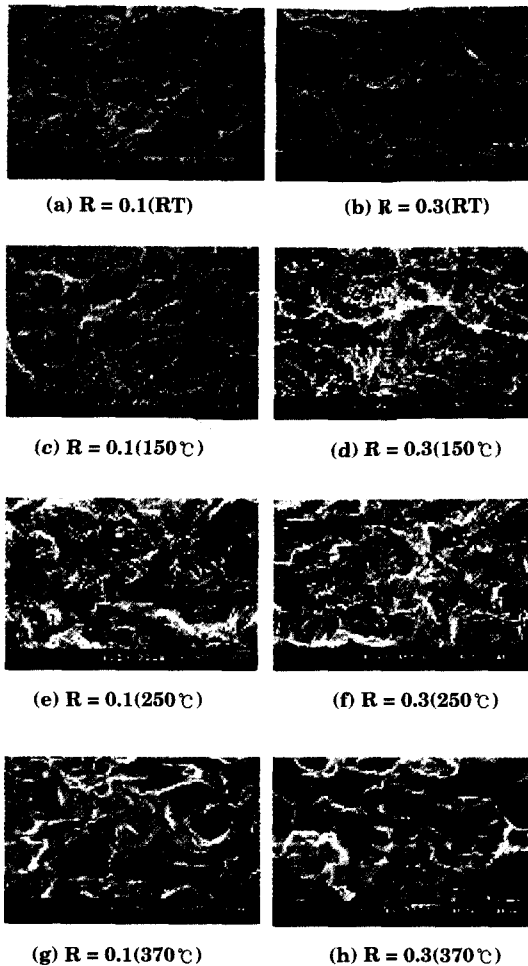


Fig. 10 Fractography of fatigue crack propagation surface at RT, 150℃, 250℃ and 370℃ for R=0.1, 0.3

Fig. 10 (a), (b)는 실온(RT)에서 응력비  $R=0.1$  및  $R=0.3$ 의 시편 파면상에는 fretting 산화물이 관찰되었으나 실온(RT)에서는 평면상으로 응력비  $R$ 의 영향을 받지 않는 것으로 보인다. Fig. 10의 (c), (d)는 온도 150℃에서 응력비  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ 의 파단면 사진으로 파면상에는 아주 얇고 연한 고온 산화물이 관찰되었다.

Fig. 10 (e), (f), (g), (h)는 온도 250℃ 및 370℃의 응력비  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ 의 그림으로 파면의 기지 내에 탄소나 질소같은 침입형 원소의 확산에 필요한 활성화 에너지가 고온에서 더욱 활성화 됨으로서 Ferrite-Pearlite강으로 된 재질에 대하여 강한 고온 산화물 흡착이 인장과 압축에 의해 피로균열진전의 구속력으로 작용되어 입자들이 심하게 소성변형 되었다. 응력비  $R=0.1$ 일 때보다  $R=0.3$ 일 때는 산화성분위기의 확산이 빨라지므로 크랙첨단부분에 고온산화물 침투가 많아진 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

원자로 1차 계통의 구조용재인 SA516-Grade70 강 의 피로하중에 의한 파괴거동에 미치는 고온의 영향을 검토하기 위하여, 일정하중진폭 피로균열진전실험을 시행하여 고온환경하에서 균열진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 에 미치는 응력비  $R$ 을 고찰한 결과 다음과 같다.

- (1) 150℃의 경우는 피로균열진전속도가 상온보다 저응력확대계수범위까지 진행되었으나 250℃ 및 370℃의 경우는 두꺼운 고온 산화물의 생성으로 감속되어 상온보다 높은 응력확대계수 범위를 나타내었다<sup>10)</sup>.
- (2) 250℃까지는 피로균열진전지수  $m$ 가 일정하게 나타났으나 250℃부터 급격하게 증가하였다. 응력비  $R=0.1$ 의 경우  $m$ 는 온도 150℃-250℃에서 3.281-3.307이었으나 370℃는 4.071로 되었다. 응력비  $R=0.3$ 의 경우 온도 150℃-250℃에서 2.629-2.725이었으나 370℃는 3.795로 급격히 증가하였다.
- (3) 피로균열진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 의 관계에서 응력비와 온도의 영향

이 큰 이유는 고온 크랙의 흡착에 기인한 것으로 생각된다.

- (4) 고온 피로균열진전과면을 관찰한 결과, 응력비 0.1에서 실온에 비해 고온 산화물의 흡착 현상이 관찰되었으며, 응력비 0.3에서는 고온 산화물 침투가 더 많아진 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상 때문에 피로균열진전 저항력이 작용한 것으로 생각된다<sup>11)</sup>.

### 참고 문헌

1. 김정규, 김철주, 조동혁, 윤인수(1999), "저온하에서 LNG저장탱크용 멤브레인재(STS 304강)의 피로균열 진전거동," 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집 (A), pp. 703~708
2. 박경동(1983), "원자로용 저합금강의 고온피로 크랙 전파와 크랙 개폐구 특성에 관한 연구," 동아대학교 박사학위논문, pp. 10~16
3. 박경동, 노태영, 김영대, 김형자, 손재윤(1999), "압력용기용 A516강의 저온피로 크랙전파 특성에 관한 연구," 한국해양공학회지, 제13권 제3(1)호, pp. 108~115
4. 윤지현, 이봉상, 오용준, 문홍곤, 홍준화(1999), "1차 냉각재 계통 엘보우용 SA516-Grade70 강의 동적변형시효 및 파괴저항 특성," 한국원자력 안전기술원 5.11~12 (제 6회 원전기기 안전성 Work Shop)
5. ASTM Standard(1997), E647-95a
6. C.Q.Bowles and D.Brook (1972). "International Journal of Fracture Mechanics," 8,75
7. J.K.Chakra vartty, S.L.Wadekar, T.K.Shinga and M.K.Ansundi(1983) : J.Nucl. Mater, 119.51
8. P.C.Paris and F.Erdogan(1963), Tran. of the ASME Ser.D. pp. 528~534
9. R.M.N.Pelloux(1969) : Trans , ASM.62.281
10. Y.Kitsunai(1991). " Fatigue Crach Growth Behavior in Mild Steel Weldment at Low Temperature," pp. 280~290
11. Y.Tomota, Y.Xia. and K.Inuoue(1998). " Mechanism of Low Temperature Brittle Fracture in High Nitrogen Bearing Austenitic Steels," Acta Meter, Vol. 46, No.5. pp. 1557~1587.

### 저 자 소 개



#### 박경동(朴卿東)

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



#### 정찬기(鄭燦基)

1954년 1월생. 1992년 2월 서울산업대학교 기계공학 졸업. 1994년 2월 서울산업대학교 정밀기계과 졸업(석사). 2001년 부경대학교 기계공학과 박사과정. 1979년 3월~현재 대원강업 창원공장기술상무. 1997년 대한기계학회백봉상수상.



#### 김정호(金正浩)

1949년 3월생. 1966년 2월 조선대학교 기계공학과 졸업. 1998년 2월 동의대학교 산업기술대학원 졸업(석사). 2001년 2월 부경대학교 기계공학과 대학원졸업(공학박사). 1973년 3월~1975년 2월 거창상업고등학교 근무. 1978년 3월~현재 동의공업고등학교 재직중.