

# 압력용기용 SA516/70 강의 고온피로균열 진전거동에 대한 연구

박경동\* · 김정호\*\* · 윤한기\*\*\* · 박원조\*\*\*\*

\* 부경대학교 기계공학부, \*\*부경대학교 대학원 기계공학과

\*\*\*동의대학교 기계산업시스템 공학부, \*\*\*\*경상대학교 기계수송공학부

## A Study on Fatigue Crack Propagation Behavior of Pressure Vessel Steel SA516/70 at High Temperature.

K.D.Park\*, J. H.KiM\*\*, H.K.Yoon\*\*\* and W.J.Park\*\*\*\*

\*School of Mechanical Engineering, Pukyong national University, Pusan 608-739, Korea

\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Pukyong national University, Pusan 608-739, Korea

\*\*\*School of Faculty of Mechanical and Industrial System Engineering, Dong-eui University, Pusan 614-714

\*\*\*\*School of Transport Vehicle Engineering, Gyeong Sang University, Jinju 650-160, Korea

**KEY WORDS** : Crack Propagation Rate 피로균열진전속도, High Temperature고온, Stress Ratio응력비,  $da/dN - \Delta K$  균열진전속도와 응력확대계수범위, Crack Closure 균열닫힘

**ABSTRACT** : The fatigue crack propagation behavior of the SA516/70 steel which is used for pressure vessels was examined experimentally 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. 서 론

최근 압력용기, 원자로 및 에너지 관련 설비와 장치 등은 구조물과 각종 기기는 고온, 고압하의 가혹한 환경조건에서 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. 따라서 구조물의 설계 제작시에 고온 피로 분야에는 파괴역학을 적용하여 크게 활용하고 있는 실정이다.

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  $da/dN$ 는 응력확대계수범위  $\Delta K$ 를 적용할 수 있다고 Paris에 의해 제안된 이래 피로균열 진전 저항은 피로균열 진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 를 기초로 하여 평가되고 있다 (Paris and Erdogan, 1963 ; 박, 1983 ;김과 조 등, 1999).

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 SA516/70강에 대하여 고온 피로균열 진전 특성을 실험에 의하여 해석하고 고온 환경에서 고온 피로균열 진전속도에 미치는 응력비와 사이클의 영향을 고찰하였다. 또한  $da/dN - \Delta K$ 곡선의 제 2단계 직선 구간과 응력비 관계를 규명하고, 파면해석을 통하여 온도의 영향에 따른 고온 피로균열 진전을 해석하였다.

## 2. 실험 및 방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 용접성, 절삭성 및 가공성이 우수한 SA516/70 압력용기용 강재이며 시험편의 화학적 성분은 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of specimen(wt.%)

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

Table 2 Mechanical properties of specimen

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

실험에 사용된 시험편은 CT시험편으로 두께 13mm이고, 시험편 채취방향은 압연방향과 부하 방향이 평행하고 균열 진전방향이 이에 수직인

L-T방향으로 채취하였으며, 슬로터 가공은 와이어 커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)를 사용하여 ASTM E647-95a의 규정(ASM, 1997)에 따라 가공하였다.

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

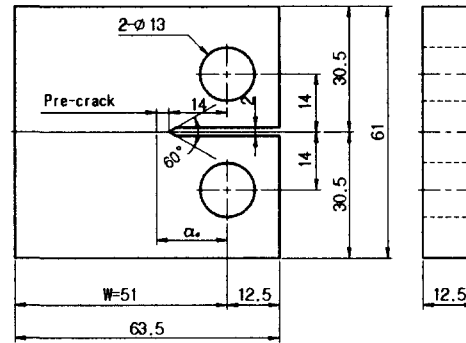


Fig. 1 Configuration of CT-specimen(unit:mm)

### 2.2 실험장치

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

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

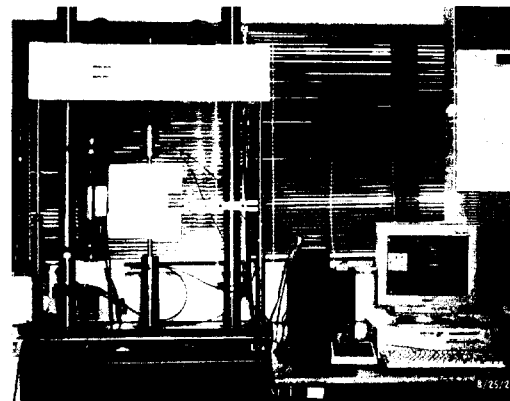


Fig. 2 Apparatus of fatigue test machine (MTS 810 : 10tonr)

### 2.3 실험방법

실험은 서보 전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중증가 제어방식으로 주파수 20Hz, 정현파

형으로 실험을 수행하였다.

실험의 신뢰성을 높이기 위하여 고온 챔버내의 분위기 온도와 시험편에 전도된 열의 온도 편차는  $\pm 1$  °C로 유지하였고, 응력비 R=0.1, 0.3, 주파수 20Hz, 실험온도 RT(실온), 150 °C, 250 °C 및 370 °C로 하였다. 실험하중은 P=10.2 kN으로 일정하게 하였으며, 크랙길이는 고온 COD 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 측정하고 피로균열 진전 실험은 ASTM E647-95a 규정(ASM, 1997)에 따라 일정진폭 하중 하에서 수행하였다. 피로균열 진전속도는 시컨트법(secant method)에 의하여 구하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 균열길이 a와 사이클 N에 미치는 온도와 응력비의 영향

Fig. 3은 응력비 R=0.1에서 실온(RT), 150 °C, 250 °C 및 370 °C에 대한 피로균열진전길이 a와 사이클N의 관계를 나타내었다.

하중증가 실험으로 응력확대계수범위  $\Delta K$ 를 증가시킬 때 동일 응력비에서, 온도 150 °C일 때에는 사이클수  $1.8 \times 10^5$ mm/cycle에서 균열이 급속성장 하였고, 250 °C 및 370 °C에서는 각각  $2.4 \times 10^5$ mm/cycle,  $2.65 \times 10^5$ mm/cycle에서 급속하게 성장하였다. 그리고 실온(RT)일 때는  $2.75 \times 10^5$ mm/cycle에서 균열성장의 폭이 완만하게 나타났다. 고온 370 °C 보다 실온(RT)일 때에 균열길이 증가가 완만하게 되는 것으로 나타났다. 150 °C, 250 °C 및 370 °C에서는 온도의 증가에 따라 사이클수가 증가되는 것은 고온피로 강도감소에 따른 피로균열 진전이 저하되고 응력확대 계수범위  $\Delta K$ 가 증가되며 균열전단의 소성역에 잔류압축응력이 발생되어 고온산화물의 생성이 중요한 인자로 작용되어 진전속도가 저하된 것으로 판단된다.

Fig. 4는 응력비 R=0.3에서 실온(RT), 150 °C, 250 °C 및 370 °C에 대한 a-N관계를 나타내고 있다. 하중증가 실험으로 응력확대계수범위  $\Delta K$ 를 증가시킬 때 온도 150 °C, 250 °C 및 370 °C에 따라 균열진전길이에 대한 사이클수가 각각  $1.02 \times 10^5$ mm/cycle,  $1.25 \times 10^5$ mm/cycle,  $1.35 \times 10^5$ mm/cycle로 급속하게 증가되었고, 실온(RT)에

서는  $1.45 \times 10^5$ mm/cycle에서 균열성장에 따라 사이클수가 크게 증가되었다.

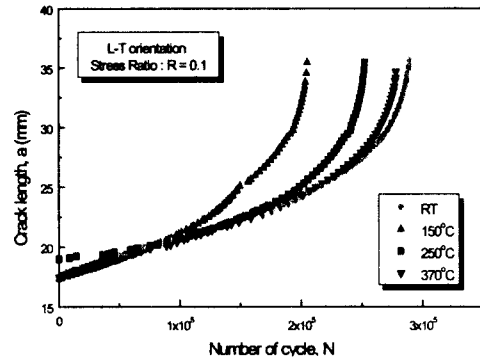


Fig. 3 Relation between crack length and number of cycle

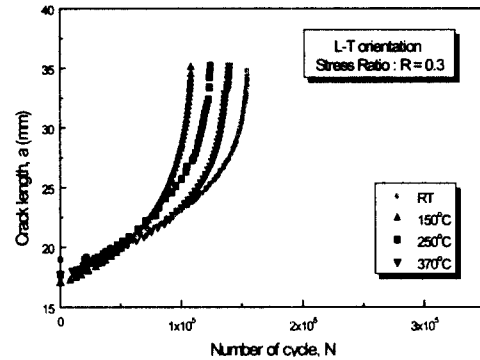


Fig. 4 Relation between crack length and number of cycle

따라서 동일 응력비 R=0.3에서 실온(RT)을 제외한 150 °C, 250 °C 및 370 °C에서는 온도저하에 따라 피로 균열 진전속도가 크게 가속되고 온도증가에 따라 피로균열진전속도가 저하되었으며 사이클수가 증가된 것으로 판단된다. 또한 인장과 압축에 따라 고온산화물의 입계침투 때문에 사이클수의 증감이 크게 영향을 받는 인자로 작용되었다고 생각된다. 이러한 인자들은 피로균열 진전길이에 영향을 주는 구속력과 구동력의 증감으로 나타난다고 생각된다. 또한 고온피로강도를 감소시키는 것은 기계적 성질 중 항복강도와 인장강도의 감소에 따른 영향이라고 판단된다.

### 3.2 각 실험온도에 피로균열 진전속도와 $\Delta K$ 의 관계

압력용기 및 구조용 재료에 초기 균열의 존재를 가정한 피로균열 진전거동은 피로균열 진전속도  $da/dN$  와 응력 확대계수 범위  $\Delta K$ 의 관계식으로 나타낸다. 초기결합의 피로 진전거동을 예측하기 위해 Paris가 제안한 피로결합 진전식을 다음의 관계식으로 나타내었다(Paris and Erdogan, 1963).

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad : C, m \text{은 재료상수이다.}$$

Fig. 5는 실온(RT)에서 응력비 R=0.1 및 R=0.3에서 피로균열진전속도  $da/dN$ 과 응력확대계수범위  $\Delta K$ 와의 관계를 나타내었다.

그림에서 보면 동일한 응력확대계수범위  $\Delta K$ 에서 응력비 R의 증가와 더불어 피로균열 진전속도  $da/dN$ 가 증가되며 이는 응력비의 증가가 하중을 증가시키므로 피로균열진전속도가 가속되는 것으로 생각된다. 응력비 감소에 따른 최대하중의 증가에 따라서 인장과 압축에 의한 균열선단의 소성역내 잔류응력이 작용하고 균열진전속도를 감소시키는 것으로 생각된다.

저  $\Delta K$ 영역에서 압축하중이 피로균열진전속도에 저항력으로 작용하게 된 것이 잔류응력을 발생시킨 것으로 균열진전에 크게 영향을 준다고 생각된다. 고  $\Delta K$ 영역에서는 응력비의 영향이 약간 작용된다고 볼 수 있으며, 응력비가 높을수록 소성역내의 압축잔류응력이 낮아지기 때문에 균열진전속도가 빨라지는 것으로 보인다. 이러한 각 인자들은 온도와 응력비 뿐만 아니라 재료의 불균질성으로 인하여 균열선단에서 균열진전 저항성이 불규칙하게 변화하는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 온도 150 °C에서 응력비 R=0.1 및 R=0.3에 대한 피로균열진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 와의 관계를 나타내었다. 응력비 R=0.3일 때 R=0.1에 비하여 가장 낮은  $\Delta K$ 영역을 나타내었으며 피로균열진전거동은 응력비 증가에 따라 인장과 압축의 피로균열진전저항력이 크게 감소되고, 구동력의 증가에 따른 피로균열진전이 크게 가속되는 현상이 나타났다. 상대적으로 응력비 R=0.1일 때는 피로균열진전속도가 응력비 R=0.3일 때 보다 정량적으로 둔화되는 현상과 응력확대계수범위  $\Delta K$ 가 증가되는 현상이 나타남

을 알 수 있다.

Fig. 7은 온도 250 °C에서  $da/dN - \Delta K$ 의 관계를 나타내었다.

온도 250 °C에서는 150 °C에 비하여 전반적으로 피로균열진전속도가 저하되고 응력확대계수범위  $\Delta K$ 가 증가되는 현상을 보였으며, 이는 응력비와 온도의 영향이 크다고 생각된다. 따라서 응력비 R=0.3일 때는 R=0.1일 때에 비하여 피로균열진전거동이 빨라지는 현상이 나타났으며, 응력확대계수범위는 낮아지고 그 반면 응력비 R=0.1에서는 그와 반대되는 현상이 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 응력비 증가에 따라 최대하중이 증가되고 피로균열진전 구동력을 가속시키는 원인이 되며 균열선단에 잔류응력을 발생시키고 저항력이 약화되며 고온피로에 의한 산화물 생성이 크게 되어 피로균열진전속도와 피로강도 감소에 영향을 주는 것으로 생각된다. 이 재료의 사용온도는 약 250 °C이상에서 파괴저항성이 아주 우수한 것으로 생각된다.

Fig. 8은 온도 370 °C에서 응력비 R=0.1 및 R=0.3에 대한  $da/dN - \Delta K$ 관계를 나타내었다. 그림에서 응력비 R=0.1, 0.3일 때 온도 370 °C에서는 온도 250 °C에 비하여 응력확대계수범위  $\Delta K$ 가 증가되고 피로균열진전속도  $da/dN$ 가 저하되는 현상이 나타났으며, 이는 고온에서 피로파괴를 일으키는 기계적인 응력이 존재하여 열응력이 생성되고, 고온산화물 축적에 따라 고온피로강도가 크게 감소된 것으로 판단된다.

따라서 응력비 R=0.3에서는 R=0.1과 비교할 때 온도의 증가에 따라 피로균열진전속도가 증가되고 응력확대계수범위가 감소되는 현상이 나타남을 알 수 있다.

이러한 현상들은 고온의 특성으로서 전위상승, 결정립의 변형, 재결정현상 및 산화나 산화물의 입계침투등의 인자에 크게 영향을 받은 것으로 볼 수 있다. 또한 재료와 고온피로강도, 온도 및 응력비에 영향을 미친다고 생각된다.

### 3.3 피로균열진전속도와 $\Delta K$ 에 미치는 온도의 영향

Fig. 9는 응력비 R=0.1일 때 실온(RT), 150 °C, 250 °C 및 370 °C를  $da/dN - \Delta K$ 관계로 나타내었다. 실온(RT)을 제외한 온도 150 °C, 250 °C 및 370 °C에서 온도의 증가에 따라 응력확대계수범위  $\Delta K$ 는 증가하고 피로균열진전속도  $da/dN$ 가

저하되는데, 이는 고온으로 인하여 균열선단에 인장과 압축으로 인한 고온 산화물 침착에 의해 소성변형되어 진전속도에 저항력으로 작용하여 Pearlite층을 구성하고 있는 재료의 파괴저항성에 크게 영향을 미친다고 할 수 있다(윤과 이 등, 1999).

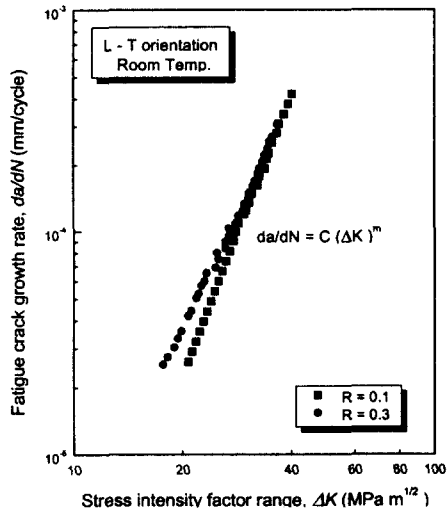


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

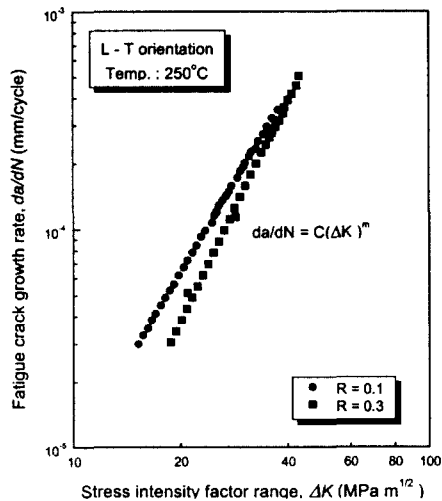


Fig. 6 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

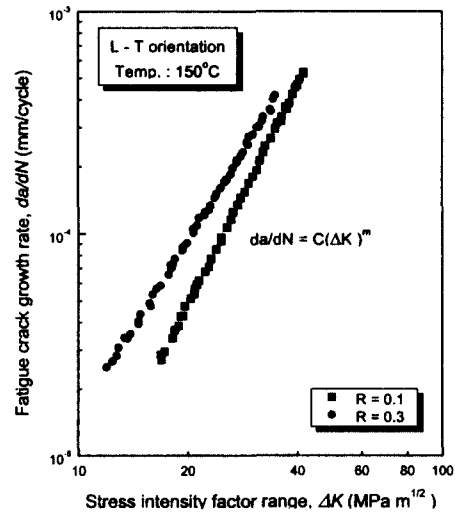


Fig. 7 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

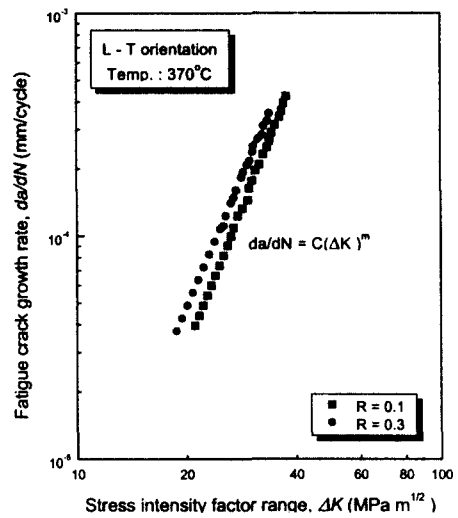


Fig. 8 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

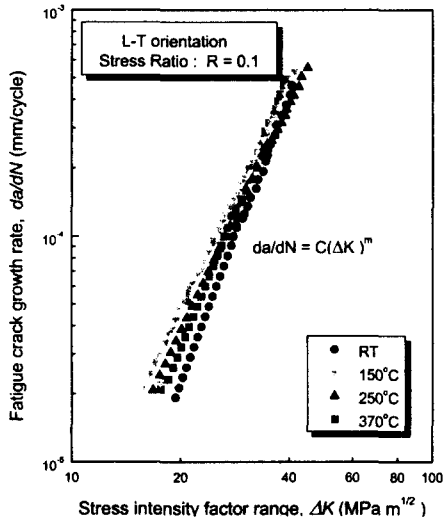


Fig. 9 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

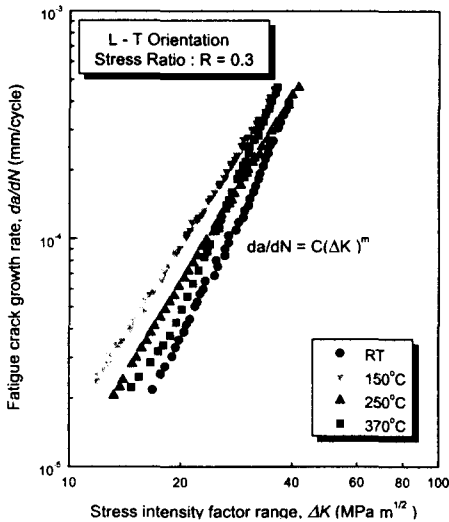


Fig. 10 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

이런 현상은 동일응력비에서 재료가 가지고 있는 특성의 일부로 고온에서 산화물 흡착이 균열진전 진행을 지연시키는 것으로 실온(RT)에 비하여 그 영향이 아주 크다고 볼 수 있다.

Fig. 10는 응력비 R=0.3에서 실온(RT), 150 °

C, 250 °C 및 370 °C를  $da/dN-\Delta K$  관계로 나타내었다. 응력비 R=0.1에 비하여 R=0.3에서는 피로균열진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 의 각 영역이 온도별로 약간 확장되었다고 할 수 있으며 이는 응력비가 증가되어 균열진전이 증가되고 응력확대계수범위가 균열진전을 저하시키므로 저  $\Delta K$ 영역에 존재하고 있다고 말할 수 있다.

온도와 응력비 증가는 구동력의 가속에 달려있으므로 R=0.1일 때 보다 더욱 고온 산화물이 입계 침투되어 산화물 활성화로 인하여 균열진전에 앞서 소성변형으로 균열 닫힘 현상이 생기게 되어 피로균열 진전을 저하시키게 된다.

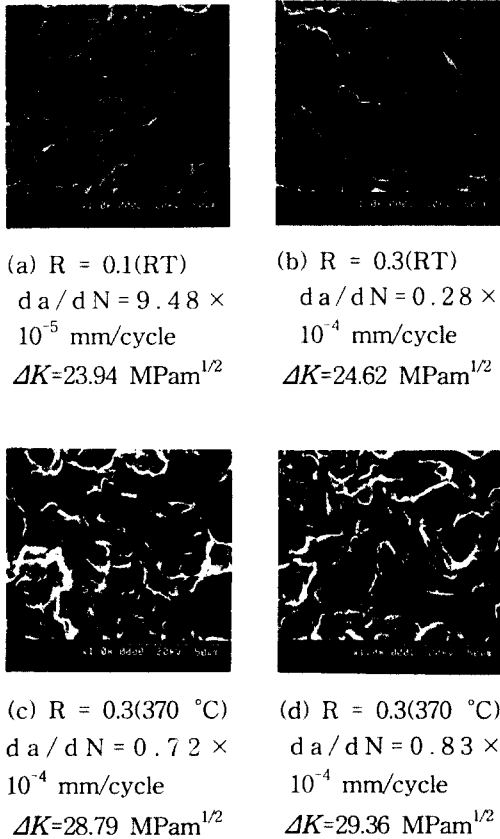
#### 4. 고온피로균열 파면해석

실온(RT), 370 °C에서 응력비 R=0.1 및 R=0.3일 때 재료의 파단면에 나타나는 파괴과정을 고찰하기 위하여 피로균열진전과 사이클의 특성을 2단계 영역부분에서 파괴기구 및 원인을 관찰하여 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 미시적 관찰을 하였다.

Fig. 11 (a),(b)는 실온(RT)에서 응력비 R=0.1 및 R=0.3의 관계를 비교하여 보면 시험편에 평면 응력의 영향이 나타나고 소성구속에 의하여 변형이 되며, 실온(RT)에서 고찰된 것은 연성 스트라이에이션이며 균열의 미시적 전파방향으로 거의 직각으로 형성되어 응력반복마다 피로균열선단의 위치를 나타내고 있다. 스트라이에이션 형성은 균열선단의 소성역에서 교차하는 두 개의 슬립면에서 부하시 상호 작용하는 슬립이 생기는 결과로서 (C.Q.Bowles and D.Brook,1972 ; R.M.N. Pelloux, 1969) 실온(RT)에서는 평면상으로 응력비 차이에 거의 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

Fig. 11 (c),(d)는 온도 370 °C의 응력비R=0.1, R=0.3의 그림으로 파면의 기지내에 탄소나 질소 같은 침입형 원소의 확산에 필요한 활성화 에너지가 고온에서 더욱 활성화 됨으로서(윤과 이 등, 1999) Ferrite-Pearlite강으로 된 재질에 대하여 강한 고온 산화물 흡착이 인장과 압축에 의해 피로균열진전의 구속력으로 작용되고 입자들이 심하게 소성변형 되어 파괴저항성을 증가시키며, 이러한 현상은 탄소함량이 적게 분포되어 파괴저항성에 나쁜 영향을 미치는 Pearlite 함량 (J.K.Chakra vartty and S.L.Wadekar etal, 1983) 이 적은 것이 파괴저항성을 증가시키는 원인이라

고 생각된다. 따라서 응력비 R=0.1일 때보다 R=0.3일 때는 산화성분위기의 확산이 빨라지므로 고온산화물침투가 많아진 것으로 판단된다.



**Fig. 11** Fractography of fatigue crack propagation surface at Room Temperature and 370 °C for R = 0.1, 0.3

### 5. 결론

원자로 1차 계통의 구조용재인 SA516/70강의 피로하중에 의한 파괴거동에 미치는 고온의 영향을 검토하기 위하여, 일정하중진폭 피로균열진전 실험을 시행하여 고온환경하에서 균열진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 에 미치는 응력비 R을 고찰한 결과 다음과 같다.

- (1) 고온환경에서 인장, 압축에 의한 고온산화물생성이 크게 확산되어 피로균열진전속도와 피로강도의 감소현상에 영향을 미친 것으로 판단된다.
- (2) 피로균열진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 의 관계에서 응력비와 온도의 영향이 큰

이유는 고온 산화물의 흡착에 기인한 것으로 생각된다.

- (3) 고온 피로균열진전과면을 관찰한 결과 응력비 0.1에서 실온에 비해 고온 산화물의 흡착현상이 관찰되었으며, 응력비 0.3에서는 고온 산화물 침투가 더 많아진 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상 때문에 피로균열진전 저항력이 작용한 것으로 생각된다.

### 참고문헌

김정규, 김철주, 조동혁, 윤인수(1999), “저온하에서 LNG저장탱크용 멤브레인재(STS 304강)의 피로균열 진전거동,” 대한기계 학회 춘계 학술대회 논문집(A), PP 703~708

박경동(1983), “원자로용 저합금강의 고온피로 크랙 진파와 크랙 개폐구 특성에 관한 연구,” 동아대학교 박사학위논문, PP10~16

박경동, 노태영, 김영대, 김형자, 손재윤(1999), “압력용기용 A516강의 저온피로 크랙진파 특성에 관한 연구,” 한국해양공학회지, 제13권 제3(1)호, PP 108~115

윤지현, 이봉상, 오용준, 문홍곤, 홍준화(1999), “1차 냉각재 계통 엘보우용 SA516-Gr.70 강의 동적 변형시효 및 파괴저항 특성,” 한국원자력 안전 기술원 5.11~12 (제 6회 원전기기 건전성 Work Shop)

ASTM Standard(1997), E647-95a

C.Q.Bowles and D.Brook (1972). " International Journal of Fracture Mechanics," 8,75

J.K.Chakra vartty, S.L.Wadekar, T.K.Shinga and M.K.Ansundi(1983) : J.Nucl. Mater, 119,51

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

R.M.N.Pelloux(1969) : Trans , ASM.62.281

Y.Kitsunai(1991). " Fatigue Crach Growth Behavior in Mild Steel Welldment at Low Temperature," PP 280~290

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.