

〈論 文〉

## 크리프-피로 균열성장에서의 초기 천이거동에 대한 연구

백운봉\* · 남승훈\* · 서창민\*\* · 윤기봉\*

(1994년 1월 27일 접수)

### A Study on Initial Transient Behavior in Creep-Fatigue Crack Growth

Un Bong Baek, Seung Hoon Nahm, Chang Min Suh and Kee Bong Yoon

**Key Words :** Creep-Fatigue(크리프-피로), Crack Growth(균열성장), Oxidation(산화), Initial Transient Behavior(초기 천이거동), Cr-Mo-V Steel(Cr-Mo-V강)

#### Abstract

At early stage of creep-fatigue crack growth tests, initial transient behavior which implies high crack growth rate has been generally observed by some researchers. Since the influence of the initial transient crack growth behavior on the remaining life of components is significant, cause of it should be further studied. In this study, characteristics of the initial transient behavior of 1Cr-1Mo-0.25V steel is studied experimentally by performing creep-fatigue crack growth tests at 538°C in air under trapezoidal waveshapes. It is verified that the cause of the initial transient behavior is not high  $(C_t)_{avg}$  values due to the small scale creep condition at the early stage of test, but oxidation-dominated crack growth mechanism during the transient period which is different from the creep-dominated crack growth mechanism in steady crack growth period.

#### 1. 서 론

발전설비 및 석유화학 플랜트 설비 등의 고온 요소 후육부에서는 크리프, 피로 등에 의해 균열이 생성된 이후에도 일정기간 동안 피로하중에 의해 균열이 성장하여 최종 파단에 이르는 것이 일반적이다.<sup>(1,2)</sup> 실기(實機)의 균열성장기간 동안의 잔여 수명은, 실험실에서 단기간에 가속시험으로 측정할 수 있는 크리프-피로 균열성장률 데이터를 실기의 균열성장률 예측용 모델에 적용하여 평가하게 된다.<sup>(3,4)</sup> 실험실에서 피로하중에 의한 균열성장률을 측정하기 위해 크리프-피로 균열성장시험(CFCG test, creep fatigue crack growth test)을 실시할때에 시험초기

에 높은 균열성장률을 보여주는 초기 천이거동이 일반적으로 관찰되고 있다.<sup>(5,6)</sup> 즉, 실험 초기에는 균열이 진전함에 따라  $\Delta K$ 가 증가해도 균열성장률인  $da/dN$ 이 감소하는 현상이 나타나며, 이러한 비정상 상태가 일정시간 지난후  $da/dN$ 이  $\Delta K$ 에 따라 증가하는 정상적 거동을 보이게 된다.

이와 같은 초기 천이거동의 원인에 대해 아직까지는 알려진 연구나 해석결과가 없으며, 가능한 원인에 대한 추론이 제시된 정도이어서<sup>(7)</sup> 초기의 균열성장률을 예측할 수 있는 모델이 제시되어 있지 않다. 따라서, 현재 실기의 균열성장 수명평가에 사용되고 있는 균열성장률 예측 모델에서는 초기 천이거동이 고려되고 있지 않다.<sup>(8)</sup> 만약 이러한 초기 천이거동이 실기 사용중에도 나타난다면, 현재 알려진 균열성장 예측 모델을 사용하여 잔여 수명을 평가하는 경우, 실제의 잔여수명이 계산에 의해

\*정회원, 한국표준과학연구원 소재특성평가센터

\*\*정회원, 경북대학교 기계공학과

예측된 잔여수명보다 작아서, 사용중의 사고유발 가능성이 있다. 따라서 잔여수명 평가의 정확도를 높이기 위해서는 초기 천이거동의 원인을 연구할 필요가 있다.

본 논문에서는 1Cr-1Mo-0.25V강을 사용한 사다리꼴 파형에서의 크리프-피로 균열성장 실험 결과로부터, 초기 천이거동의 특징에 대해 조사하였으며 초기 천이거동이 나타날 때의 균열성장기구 (crack growth mechanism)가 정상상태의 경우와 다름을 보여 주었다.

## 2. 실험방법

### 2.1 고온 기계물성 측정실험

본 연구에 사용된 재료는 터빈로터용 재료인 1Cr-1Mo-0.25V강으로 그 화학성분은 Table 1과 같다. 실험재료의 사용온도에서의 기계적 물성 측정을 위해 538°C에서 인장시험 및 크리프시험을 실시하였으며, 시험편은 단조한 원통형 재료로부터 Fig. 1과 같이 시험편의 길이방향이 재료의 원주방향과 일치하도록 가공하였다. 인장시험은 직경 6.25 mm, 표점거리 25.4 mm인 시험편을 사용하였으며, 상온 인장시험은 ASTM E8 규격에 준하여 실시하였고, 고온(538°C) 인장시험은 ASTM E21 규격에 준하여 변위제어 방식으로 실험하였다.

크리프시험은 직경 6.25 mm, 표점거리 32 mm의 크리프시험편을 사용하여 ASTM E139 규격에 따라 시험하였다. 사하중식 크리프시험기를 사용하였으며, 저항식 전기로를 사용하여 시험편을 538°C로 가열한 후 8시간 이상 유지한 뒤 실험하였다. 변위 측정을 위해 신장계를 시험편에 부착하였고, 신장계와 연결된 전기로 밖의 LVDT를 이용하여 변위 데이터를 측정하여 시간에 따라 컴퓨터에 기록 저장하였다.

### 2.2 크리프-피로 균열성장시험

크리프-피로 균열성장시험을 위한 C(T)시험편은 Fig. 1과 같이 균열성장 방향이 모재의 반경방

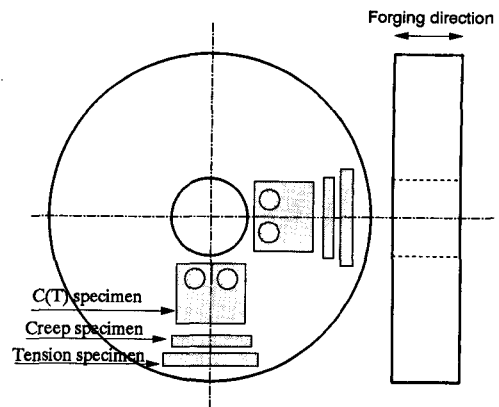


Fig. 1 Specimen orientation

향과 일치하도록 가공하였다. 초기 균열비는 0.4이며, 크리프-피로 균열성장시험시 발생하는 균열 터널링현상을 방지하기 위해서, 초기 피로균열 형성 후 시험편 두께의 25%에 해당하는 측면홈을 가공한 후 시험하였다. 이때 균열길이를 연속적으로 측정하기 위해 직류전위차법(DC electric potential drop method)<sup>(9,10)</sup>을 사용하였다.

실험은 균열길이가 7~10 mm정도 진전되었을 때 정지하고, 시험편을 액체질소에 담근 후 저온에서 파단시켰다. 이 파면으로부터 최종 균열성장량을 측정하기 위해 시험편을 두께방향으로 8등분한 9점에서 균열길이를 이동식 현미경을 사용하여 측정하였다. 측정된 최종 균열성장량을 예측된 값과 비교하여 만약 예측된 균열길이가 측정된 값과 상이할 때는 오차가 균열길이에 비례한다고 가정하고<sup>(6)</sup> 이를 보정하였다.

주기의존 균열성장률(cycle-dependent crack growth rate)을 측정하기 위해, 0.5 Hz 이상의 삼각파형 조건에서 피로시험을 실시하였으며, 시간의존 균열성장률(time-dependent crack growth rate)을 측정하기 위해 100초의 하중 유지시간을 갖는 사다리꼴파형 조건에서 피로시험을 실시하였다. 또한, 초기 천이거동이 나타날 때 균열선단에서의 손상유형을 관찰하기 위해서, 사다리꼴파형 피로시험 중 초기 천이거동이 나타날 때 시험을 중단하여 시

Table 1 Chemical composition of the test material (1Cr-1Mo-0.25V steel)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	As	Sn	Sb
Wt%	0.31	0.23	0.76	0.006	0.001	0.36	1.11	1.32	0.27	0.006	0.005	0.001

편을 두께방향으로 절개한 후 균열선단을 전자현미경으로 관찰하였다. 또한, 사다리꼴과형 피로시험 중 초기 천이거동이 지나고 균열성장속도가 정상적으로 증가할 때 시험을 중단하여 균열선단의 손상 유형을 관찰하여 앞의 경우와 비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 고온 기계물성측정 결과

인장시험의 하중-변위 기록으로부터 진응력-진변형률 관계를 구한 후, 소성변형률,  $\epsilon_p$ 과 응력,  $\sigma$  사이의 지수법칙(power law)을  $\epsilon_p = D\sigma^m$ 으로 가정하여 최소자승법에 의해 재료의 소성상수  $D$ 와  $m$ 을 결정하여 Table 2에 정리하였다.

크리프시험으로 측정된 시간-변위 곡선을시간-변형률 곡선으로 변환한 후, 각 응력의 크리프 곡선에서 2차 크리프(secondary creep)만 선택해서 선형화하여 정상상태(steady state)에서의 크리프 변형속도를 결정하였다. 2차 크리프상태에서 변형율

속도  $\dot{\epsilon}_{ss}$ 와 응력  $\sigma$  사이의 지수법칙을  $\dot{\epsilon}_{ss} = A\sigma^n$ 로 가정하여, 최소자승법에 의해 재료의 크리프 상수  $A$ 와  $n$ 을 결정하였다. 이 결과는 Table 3에 요약하였으며 각 시험의 실험결과는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 가로축은 시험시간( $t$ )을 파단시간( $t_f$ )으로 무차원화하여 나타내었다.

#### 3.2 크리프-피로 균열성장시험 결과

삼각파형에서의 크리프-피로 균열성장시험으로 측정된 주기의존 균열성장거동은  $da/dN$ 을  $\Delta K$ 로 특성화하였다. 특성화 매개변수  $\Delta K$ 는 ASTM 규격 E647에 제시된 식(1)을 이용하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \cdot F\left(\frac{a}{W}\right) \tag{1}$$

여기서, C(T)시험편 의 경우 수정계수는 식(2)와 같다.

$$F\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2+a/W}{(1-a/W)^{1.5}} \left[ 0.886 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) \right]$$

Table 2 Tensile properties of the test material (1Cr-1Mo-0.25V steel) at 24°C and 538°C

Test temp (°C)	Yield stress (0.2%) (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	D (MPa <sup>-m</sup> )	m	Young's modulus (E) (GPa)
24	665.2	823.1	18.8	59.4	2.18E-73	25.54	209.4
538	533.5	580.6	22.7	55.5	2.82E-54	18.75	147.3

Table 3 Creep properties of the test material (1Cr-1Mo-0.25V steel) at 538°C

Specimen no.	Applied stress (MPa)	Secondary creep rate (hr <sup>-1</sup> )
1	346	1.271E-3
2	320	8.980E-4
3	274	7.447E-5
4	187	1.973E-6

Temp.	Creep constant	
	A (MPa <sup>-n</sup> · hr <sup>-1</sup> )	n
538°C	7.6985E-27	9.13

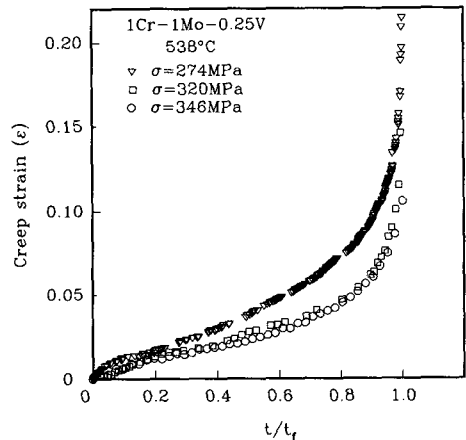


Fig. 2 Creep test results of 1Cr-1Mo-0.25V steel ( $t_f$ ; time to failure)

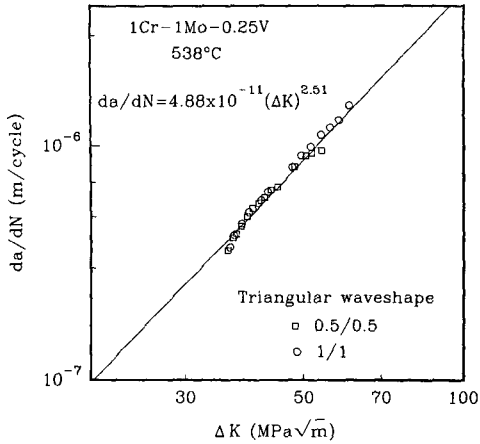


Fig. 3 Cycle-dependent crack growth rate of 1Cr-1Mo-0.25V steel

$$-13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (2)$$

여기서,  $a$ 는 균열길이,  $W$ 는 시편폭,  $B$ 는 시편 두께,  $\Delta P$ 는 하중범위이고, 이 식은  $a/W > 0.2$  범위에서 유용하다. 본 시험결과와는 Fig. 3과 같으며, 이 자료로부터 주기의존 균열성장률 표현식을 구하면 식(3)과 같다.

$$\frac{da}{dN} = 4.88 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2.51} \quad (3)$$

여기서,  $da/dN$ 은 m/cycle,  $\Delta K$ 는  $MPa\sqrt{m}$ 로 표현된다.

사다리꼴파형의 크리프-피로 균열성장시험으로 측정된 시간의존 균열성장거동은  $(da/dN)_{avg}$ 를  $C^*$  또는  $(C_t)_{avg}$ 로 특성화하는 것이 일반적이다.<sup>(11)</sup> 본 연구에서는 이를  $(C_t)_{avg}$ 로 특성화하였다. 특성화 매개변수  $(C_t)_{avg}$ 는 시험중 기록한 하중, 균열길이 및 재료의 크리프상수로부터 식(4)를 사용하여 계산하였다.

$$(C_t)_{avg} = \frac{2\alpha\beta\hat{r}_c(\theta, n)}{E} (1-\nu^2) \frac{\Delta K^4}{W} - \frac{F'}{F} (EA)^{\frac{2}{n-1}} t_n^{\frac{n-3}{n-1}} + C^* \quad (4)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{(n+1)^2}{2n\alpha_n^{n+1}} \right]^{\frac{2}{n-1}}$$

$$\alpha_n^{n+1} = \frac{n+1}{n} \frac{\pi(1-\nu^2)}{I_n}$$

$$\beta = \frac{1}{3}, \hat{r}_c(90^\circ, n) \approx 0.38$$

이며,  $E$ 는 탄성계수,  $\nu$ 는 푸아송비,  $t_n$ 는 하중 유지시간이며,  $I_n$ 은  $n$ 에 따른 무차원 함수이다.<sup>(12)</sup>  $C^*$ 는 알려진 J-적분 해<sup>(14)</sup>를 이용하여 계산하였다. 평면 변형률조건에서 C(T)시험편의  $C^*$ 는 식(5)와 같이 표현된다.

$$C^* = \frac{A}{(W-a)\pi} h_1 \left( \frac{a}{W}, n \right) \left( \frac{Pn+1}{1.455\zeta B} \right)^{n+1} \quad (5)$$

단,  $\zeta$ 는 식(6)과 같으며  $P$ 는 하중 유지기의 하중 크기,  $h_1$ 은  $n$ 에 따른 함수로서 1Cr-1Mo-0.25V강인 경우  $n$ 은 9.1이므로  $h_1$ 함수는 식(7)과 같다.

$$\zeta = \left[ \left( \frac{2a}{W-a} \right)^2 + 2 \left( \frac{2a}{W-a} \right) + 2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{2a}{W-a} \right) - 1 \quad (6)$$

$$h_1 \left( \frac{a}{W}, 9.1 \right) = 3.67 - 20.71 \left( \frac{a}{W} \right) + 47.62 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 45.54 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 15.94 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \quad (7)$$

단, 식(7)은  $0.375 \leq \frac{a}{W} \leq 1$ 에서만 적용된다.

Fig. 4에 본 연구에서 수행된 하중 유지시간 100초인 사다리꼴파형 피로시험결과를 균열의 성장속도와  $\Delta K$ 로 특성화하여 나타내었다. 하중증가 시간의 차이와 상관없이 본 연구의 모든 시편에서 시험초기에 균열성장률이 감소하는 초기 천이거동이

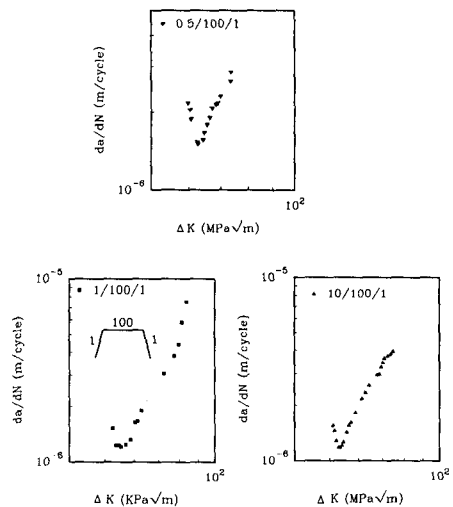


Fig. 4 Creep-fatigue crack growth results of 1Cr-1Mo-0.25V steel under trapezoidal waveshapes showing initial transient behavior

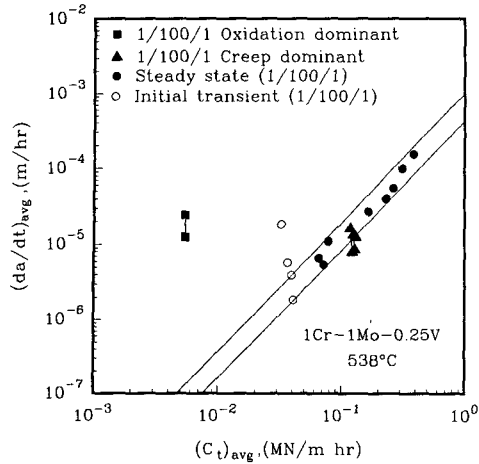


Fig. 5 Time-dependent crack growth behavior of 1Cr-1Mo-0.25V steel under trapezoidal wave-shapes

관찰되었다. 이중, 1초/100초/1초의 하중 증가시간/하중 유지시간/하중 감소시간 조건에서 시험한 사다리꼴파형 피로시험결과로부터 측정된 시간의존 균열성장거동을 재정리하여 Fig. 5에 원으로 나타내었다. 초기 천이거동이 나타나는 동안 측정된 데이터는 ○표시로 나타내었으며, 정상적 거동을 보일때 측정된 데이터는 ●표시로 나타내었다. 초기 천이거동이 나타날 때의 데이터가 정상적 거동을 보일때의 데이터 경향과 상이함을 나타내기 위해 정상적 거동을 보일때의 데이터에 대해 분포범위를 실선으로 표시하였다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 시간의존 균열성장거동  $(da/dt)_{avg}$ 를  $(C_t)_{avg}$ 로 특성화한 그래프에서도, 초기에  $(da/dt)_{avg}$ 가 상대적으로 높은 초기 천이거동이 존재함을 관찰할 수 있다.

초기 천이거동의 발생가능한 이유로서 다음과 같은 설명이 제시되어 있다. (i) 균열선단의 소규모 크리프조건 (small scale creep condition)이 광역 크리프조건 (extensive creep condition)으로 발전하는 사이에 초기 천이거동이 나타난다는 설명, (ii) 균열선단이 고온에서 피로하중을 받으면 주기적 경화 또는 주기적 연화 (cyclic hardening or cyclic softening)가 발생하여 균열 선단부의 재료물성 자체가 변하기 때문이라는 설명, (iii) 균열선단에서의 크리프손상 조건이 초기에서 정상상태로 되는데 일정시간이 필요하다는 설명 등이다.<sup>(7)</sup> (i), (ii), (iii)은 각각 Cr-Mo-V강, Cr-Mo강 그리고

Cu-Sb강에서 나타나는 초기 천이거동에 대한 가능한 원인으로 제시되었다.

본 연구에서는 1Cr-1Mo-0.25V강을 사용했으므로 이 재료에 대한 설명으로 제시된 (i)의 가능성에 대해 검토해 보았다. Adefris 등<sup>(13)</sup>은 1Cr-1Mo-0.25V강의 경우 사다리꼴파형 크리프-피로에서 하중 유지시간의 크리프변형이 매 주기마다 누적된다고 주장하였다. 이런 경우에는 마치 정하중 조건에서 균열이 성장하는 크리프 균열성장시험 (CCG test, Creep Crack Growth test)에서와 같이 시험 초기에 높은 균열성장률이 나타날 수 있다. 이는 소규모 크리프조건이 우세한 시험초기의  $C_t$  값이 광역 크리프조건이 형성되는 시험후기에서의  $C_t$  값보다 크기 때문이다. 크리프변형이 매 주기마다 누적되는 경우의  $(C_t)_{avg}$ 는 식(4)와는 달리 식(8)로 표시될 수 있다.

$$(C_t)_{avg} = \frac{2\alpha\beta\hat{r}_c(\theta, n)}{E} (1-\nu^2) \frac{AK^4}{W} \frac{F'}{F} (EA)^{\frac{2}{n-1}} (Nt_h)^{\frac{n-3}{n-1}} + C^* \quad (8)$$

식(8)을 사용하여  $(C_t)_{avg}$ 를 다시 계산한 후,  $(da/dt)_{avg}$ 와  $(C_t)_{avg}$ 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 식(8)을 사용하면 천이거동이 나타나는 시험초기에는  $(C_t)_{avg}$  값이 크고, 피로 반복회수가 증가함에 따라  $(C_t)_{avg}$ 가 작게 계산되므로, 초기에  $(da/dt)_{avg}$ 가 크게 나타나는 이유를 설명해 줄 수 있다. 그러

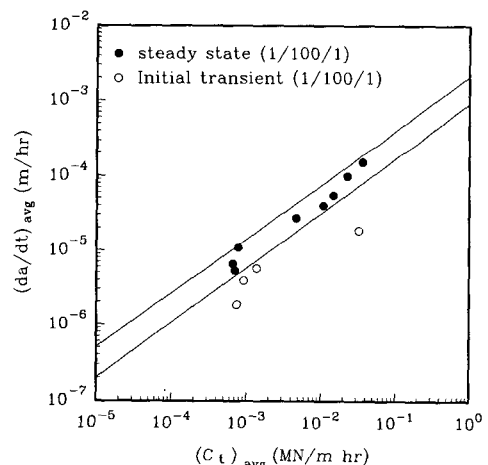


Fig. 6 Time-dependent crack growth behavior of 1Cr-1Mo-0.25V steel under the assumption of accumulated creep strain during the load hold period

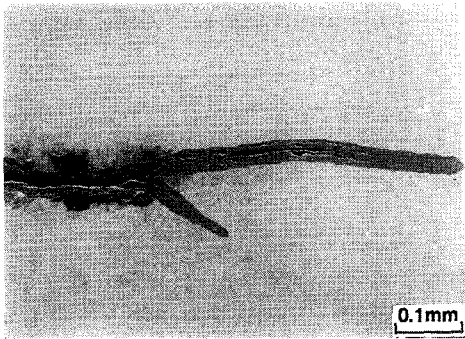
나 Fig. 6에 보인 바와 같이 초기 천이거동이 나타나는 동안의  $(da/dt)_{avg}$ 와  $(C_t)_{avg}$  관계는 정상상태 때의 거동과는 다르다. 따라서 (i)은 본 연구에서 관찰된 초기 천이거동의 원인을 설명하는데 충분치 못함을 알 수 있다.

3.3 균열선단손상 관찰결과

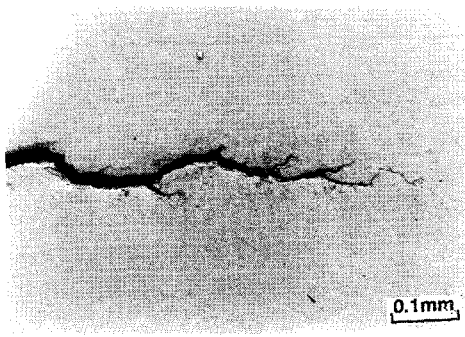
시간의존 균열성장률,  $(da/dt)_{avg}$ 를  $(C_t)_{avg}$ 로 특성화할 때의 기본 가정은 균열선단에서 크리프 변형이 우세하여 균열성장률이 재료의 크리프특성에 의해 지배된다는 것이다. 따라서 초기 천이거동이 나타날 때에 이 기본 가정이 성립되는지 검토해 볼 필요가 있다. 크리프-피로 균열성장 시험을 시작한 후 초기에 균열이 진전하여  $\Delta K$ 가 증가해도 균열성장률  $da/dN$ 이 감소하는 초기 천이현상이 나타날 때에 시험을 중단한 시편의 균열성장률을 Fig. 5에 사각형(■)으로 함께 표시하였으며 이 자료에서 초기 천이거동이 나타날 때  $(da/dt)_{avg}$ 가 매우 높음을 알 수 있다. 초기 천이거동은 일정한

$\Delta K$ 값 또는 일정한  $(C_t)_{avg}$  값에서 나타나는 것이 아니라  $\Delta K$ ,  $(C_t)_{avg}$  값과 관계없이 시험초기에만 나타난다. 따라서 Fig. 5의 ■데이터는 실험이 계속되면  $(da/dt)_{avg}$ 가 증가하여 실선으로 표시한 정상상태의 경향과 유사한 거동을 보이게 된다. 초기 천이거동의 원인을 규명하기 위하여 시편을 두께방향으로 절개하여 균열선단 주위를 관찰하여 손상유형을 Fig. 7(a) 및 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7(a)와 같이 초기 천이거동이 나타나는 때에는 균열면 부근의 산화층이 두껍고 균열선단에서도 산화의 영향이 크다. 또한, 균열선단 주위에서 크리프기공이 관찰되지 않았다.

Fig. 8은 Fig. 7(a)의 균열선단 부위를 확대하여 나타내었다. Fig. 8(a)는 시편을 절개하지 않은 상태에서 측면을 연마한 후 찍은 사진이고, Fig. 8(b)는 시편을 저온에서 절개한 후 균열선단 부위의 파면을 찍은 사진이다. Fig. 8(b)에서 모재의 취성파단면, 산화층선단의 취성파단면 및 피로시험시 발생한 파면이 뚜렷이 구별됨을 확인할 수 있

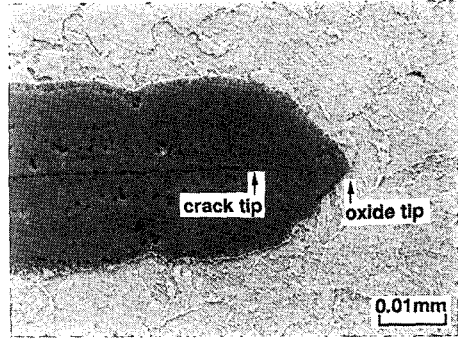


(a) Initial transient crack growth

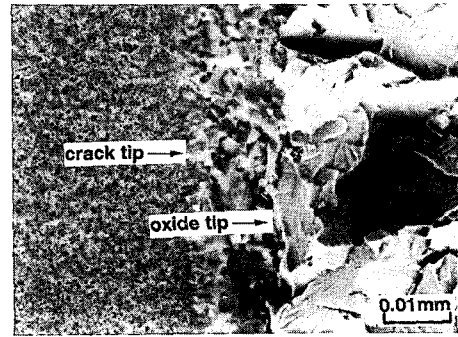


(b) Steady crack growth

Fig. 7 Crack Growth morphology of 1Cr-1Mo-0.25V steel at 538°C



(a) Side view

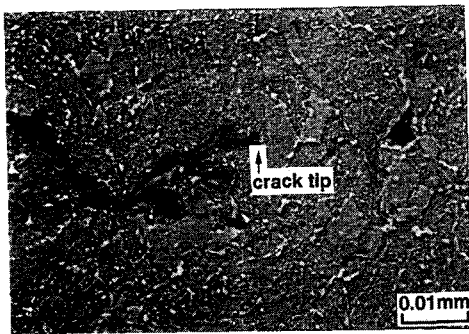


(b) Fracture surface

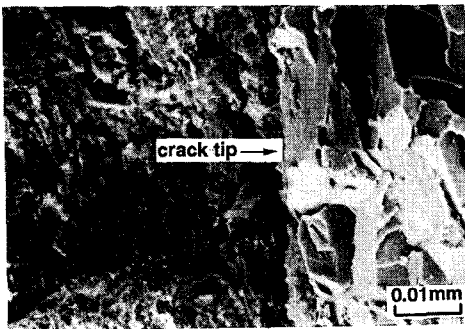
Fig. 8 Crack tip morphology of 1Cr-1Mo-0.25V steel during initial transient crack growth

다. 즉, 초기 천이거동이 나타날때에는 균열선단은 산화층 속에 묻혀 있었으며 피로시험 동안 산화층 선단(oxide tip)이 모재를 통해 성장하고 있었다. 따라서 실제 균열성장은 산화층의 성장에 의해 지배된다고 추측할 수 있다.

초기 천이거동이 지나고 균열성장속도가 증가할 때 시험을 중단한 시편의 균열성장률도 Fig. 5에 삼각형으로 함께 표시하였다. 이 경우  $(da/dt)_{avg}$  가 다른 시편의 정상상태 데이터의 경향과 유사하였다. 이 시편의 균열선단을 관찰하여 Fig. 7(b) 및 Fig. 9에 나타내었다. 산화층의 두께는 감소되었고 산화층선단이 아닌 균열선단이 모재를 통해 진전되고 있었다. Fig. 7(b)에서 같은 배율의 Fig. 7(a)와 비교해 산화층의 생성이 매우 작고, 균열선단에서 산화층이 거의 관찰되지 않음을 알 수 있다. Fig. 7(b)를 확대한 Fig. 9(a)와 저온 절개한 파면사진 Fig. 9(b)에서도 산화층의 영향은 작음을 확인할 수 있고, 반면에 균열선단 부근에서 많은 크리프기공들이 관찰되어 크리프변형이 우세함을 알 수 있다.



(a) Side view



(b) Fracture surface

Fig. 9 Crack tip morphology of 1Cr-1Mo-0.25V steel during steady crack growth

이상의 관찰결과로부터 다음과 같은 추론이 가능하다. 즉, 1Cr-1Mo-0.25V강에서의 초기 천이거동은 균열선단에서 산화에 의해 지배되는 균열성장 기구가 우세하기 때문에 나타난다. 따라서, 크리프 변형이 우세할 때에만 적용 가능한  $(C^t)_{avg}$  매개변수로 균열성장률을 특성화할 수 없다. 반면에 초기 천이거동이 지나고 정상적 균열성장 거동을 나타낼 때에는  $(C^t)_{avg}$  매개변수를 사용하여 균열성장률을 특성화할 수 있다.

#### 4. 결 론

1Cr-1Mo-0.25V강을 사용하여 538°C 대기중에서 크리프-피로 균열성장시험을 실시하여 균열성장 초기에  $\Delta K$ 가 증가해도 균열성장률  $da/dN$ 이 감소하는 초기 천이거동이 나타남을 확인하였다. 1Cr-1Mo-0.25V강의 경우, 초기 천이거동의 발생 원인이 초기에 균열선단에서의 크리프조건이 소규모 크리프조건이어서  $(C_t)_{avg}$  값이 크기때문이 아님을 보여 주었다.

균열선단 관찰결과, 초기 천이거동이 나타나는 동안은 균열선단은 산화층 속에 묻혀 있으며 산화층 선단이 균열진전보다 앞서 진전하여, 균열성장 속도는 산화층의 성장속도에 의해 지배됨을 알 수 있었다. 초기 천이거동 후에 정상적 균열성장 거동이 나타날 때에는, 균열선단 주위의 크리프 기공이 많이 관찰되므로 크리프변형이 우세하여 균열성장 속도는  $(C_t)_{avg}$  매개변수로 특성화하는 것이 타당하다. 결론적으로 본 연구재료의 경우에 크리프-피로 균열성장에서 초기 천이거동은 균열성장기구 (crack growth mechanism)의 차이때문에 발생된다.

#### 후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 소재특성평가센터의 1993년도 출연연구, “고온 균열성장률 예측 일반모델개발 과제” 연구비 지원으로 수행되었습니다. 본 연구를 수행하는 동안 실험에 많은 도움을 주신 김시천씨에게 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 서창민, 신형섭, 권영태, 1987, “304 스테인리스

- 스강의 고온에서의 표면 균열성장 특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제11권 제3호, pp. 355~361.
- (2) 오세욱, 박경동, 강상훈, 박인석, 1988, "2024 Al합금의 고온 전상 크리프 변형속도와 크리프 파단수명에 관한 연구," 대한기계학회논문집 제 12권 제3호, pp. 513~519.
- (3) 권재도, 1989, "재질열화가 표면 균열진전에 미치는 영향과 수명예측에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제13권 제5호, pp. 921~927.
- (4) 조판근, 정순호, 장윤석, 이치우, 1986, "1% Cr-Mo-V강 회전자 축의 크리프 특성과 수명예측에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제10권 제4호, pp. 519~528.
- (5) Yoon, K. B., Saxena, A. and Liaw, P. K., 1993, "Characterization of Creep-Fatigue Crack Growth Behavior under Trapezoidal Waveshape Using C-Parameter," *International Journal of Fracure*, Vol. 59, pp. 95~114.
- (6) Saxena, A. and Gieseke, B., 1987, "Transients in Elevated Temperature Crack Growth," *EGF-6, Elsevier Publications*, Vol. III, pp. 19-36.
- (7) Saxena, A., 1993, "Fracture Mechanics Approaches for Characterizing Creep-Fatigue Crack Growth," *JSME International*, Series A, Vol. 36, No.1, pp. 1~20.
- (8) Ryder, R. H., et. al, 1993, *An Integrated Approach to Life Assessment of Boiler Pressure Parts*, EPRI Research Project 2253-10 Final Report, General Atomics.
- (9) Saxena, A. and Han, J., 1986, *Evaluation of Crack Tip Parameters for Characterizing Crack Growth Behavior in Creeping Materials*, ASTM Task Group Report E 24.08.07/E24.04.08.
- (10) 윤석호, 윤기봉, 김승태, 서창민, 1992, "열화된 Cr-Mo-V강의 고온 파괴인성값  $J_{IC}$ 의 평가," '92 대한기계학회 춘계학술대회논문집(I) pp. 244~249.
- (11) 최영환, 방종명, 엄윤용, 송지호, 1989, "균열진전의 효과를 고려한  $C^*$  적분의 수정," 대한기계학회논문집, 제13권 제1호, pp. 77~86.
- (12) Shih, C. F., 1983, *Tables of Hutchinson-Rice-Rosengren Singular Field Quantities*, Brown University.
- (13) Adefris, N., Saxena, A. and McDowell, D. L., 1993, "Creep-Fatigue Crack Growth Behavior in 1Cr-1Mo-0.25V Steels I: Estimation of Crack Tip Parameters," *Journal of Fatigue of Materials and Structures*. (To be published)
- (14) Kumar, V, German, M. D. and Shih, C. F. 1981, *An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis*, Electric Power Research Institute NP-1931