

◎ 論 文

화력 발전용 고압 로터강의 정하중 및 변동하중하의 고온 크립 균열전파 특성에 관한 연구

오 세 규* · 정 순 역**

(1991년 11월 15일 접수)

A Study on the High Temperature Creep Crack Growth Properties for Steam Turbine Rotor Steel under Static and Cyclic Loading Condition

S. K. Oh and S. U. Jeong

Key Words : Creep Crack Growth(크립 균열 성장 속도), Stress Intensity Factor(응력 확대 계수), Net Section Stress(정미 단면 응력), Transition Creep Region(전이 크립 영역), Steady State Creep Region(정상 상태 크립 영역)

Abstract

The crack length measurements by electrical potential(EP) method for 1% Cr-Mo-V and 12%Cr steel of 0.5T-CT specimen were performed at 500°C, 600°C and 700°C, and an applicability of stress intensity factor(K_I), net section stress(σ_{net}), C^* -integral and C_I parameter was studied to measure creep crack growth rate(da/dt) with side groove and without side groove under static and cyclic loading condition. The experimental result could be summarized as follows :

- 1) Crack measurement by EP method was available and coincided with the Johnson's analytical equation.
- 2) da/dt by K_I and σ_{net} was not adequate because of the wide scatter band according to load and temperature, but C^* -integral, except for transition region, was adequate.
- 3) C_I parameter showed the best fitted line through total creep region without relating with both temperature and load condition.
- 4) Under the cyclic loading condition, C_I parameter was proper to estimate da/dt .

And it was shown that da/dt for 1% Cr-Mo-V steel under the static condition($R=1$) was 1.16 times faster than the case under cyclic loading($R=0$), and for 12% Cr steel, 1.43 times.

+ 1991년 한국해양공학회 추계 학술대회 발표(1991년 11월)
 * 정회원, 부산수산대학교 공대 기계공학과
 ** 정회원, 부산수산대학교 대학원

1. 서 론

발전용 로터는 고온, 고압 조건하에서 운전되므로 정적 및 동적 크립 변형을 수반하는바, 신뢰성 향상 및 수명 예측을 위해서는 크립 균열 전파 속도(da/dt)에 대한 파괴역학적 검토가 필요하다.^{1,2)}

지금까지 제시된 천이 영역 및 정상 크립 영역에서의 균열 전파 거동을 지배하는 역학적 parameter로서 ① 응력 확대 계수(K_I), ② 正味단면 공칭응력(σ_{net}), ③ C^* -적분, ③ C_i 등을 고려할 수 있다.²⁾ Ni-base superalloy나 크립 취성을 보이는 저합금 ferrite steel에서는 K_I 및 σ_{net} 가 하중 변수로 적당하다고 알려져 있으며,³⁾ C^* -적분 및 C_i 는 power law 크립에 의한 광범한 크립 변형이 발생하여 균열 주위가 HRR 응력장으로 변하는 재료에 잘 적용된다고 보고되고 있다.⁴⁾

따라서, 본 연구에서는 현재 발전소에서 사용중인 1% Cr-Mo-V 로터강과 발전소 효율 향상을 위해 최근 국내 최초로 개발된 12% Cr 로터강에 대한 상기의 parameter를 적용하여 정적, 동적 고온 크립 균열 전파에 대한 최적의 모델식을 도출함과 아울러 양강종에 대한 균열전파 특성을 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편

시험편의 화학조성비 및 기계적성질은 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 본 시험에 사용된 시험편

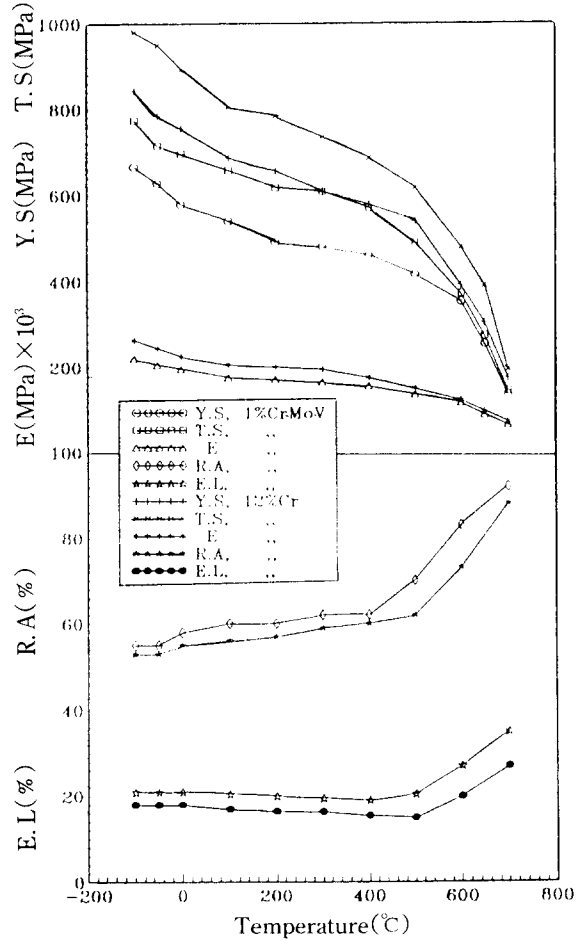


Fig. 1 Tensile test results of 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel

(Y.S: yield strength, T.S: tensile strength, E: elastic modulus, R.A: reduction of area and E.L: elongation)

Table 1 Chemical composition of 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel

1% Cr-Mo-V

Comp.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu
Wt. %	0.25	0.03	0.65	0.007	0.005	0.64	1.21	1.12	0.29	0.004	0.03

12% Cr

Comp.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb
Wt. %	0.16	0.24	0.67	0.005	0.003	0.58	11.01	0.92	0.23	0.05

은 0.5T-CT 시험편으로서 그 형상은 Fig.2에 나타냈으며, side groove(SG)는 두께비(Bn/B)가 0.75 되도록 가공하여, side groove가 없는 형태(NSG)와 균열진과 특성을 비교하였다.

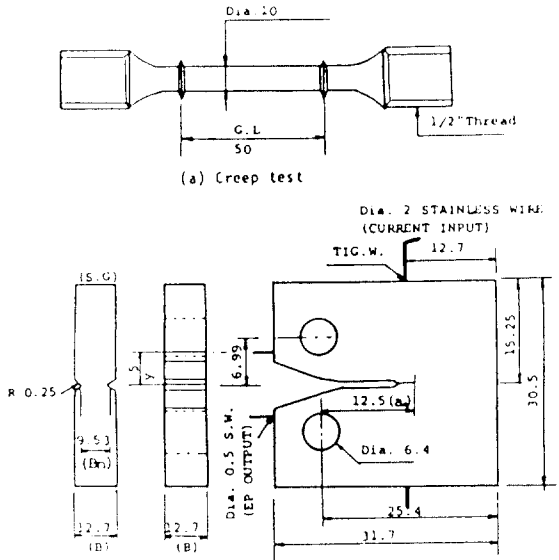


Fig. 2 Specimen geometries for (a) creep test, (b) creep crack growth rate(da/dt) test

2.2 실험 장치

Fig.3은 정하중하의 크립 균열 진과 시험장치를 나타내고 있다. 균열의 변위는 loading pin 사이의

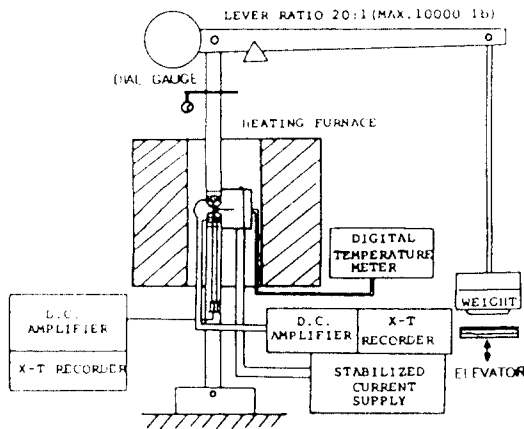


Fig. 3 Apparatus for creep crack growth testing

변위를 爐 외부에서 차동변압기(LVDT)로 측정하였다. 또한 Pull Rod 변위를 dial gauge로 측정하여 LVDT 값과 상호 비교 확인하여 가능한 한 오차를 줄였다.

균열 길이는 전기 potential법에 의하여 측정하였는데, 측정을 위한 전류공급용 lead선(SUS 304, 직경 2mm)은 TIG용접하고, 출력 lead선(SUS 304, 직경 0.5mm)은 은납으로 brazing하였다. 전기 potential법에 의한 공급 전류는 15A로 일정하게 유지하였으며, 균열 진전에 따른 전압 변화는 1000배의 직류 증폭기를 사용하여 X-T recorder에 기록하였다. 열기전력은 시험 개시점부터 정기적으로 전류를 차단하여 측정하였으며, 시험편 및 온도에 따라 약간의 차이는 있으나 $-10 \sim -150 \mu V$ 정도로 나타났고, 이를 고려하여 균열길이를 환산하였다. 실험 온도는 양강종에 대하여 500°C, 600°C, 700°C로 하고, 이 때 爐의 온도 변화를 $\pm 1^\circ C$ 이내로 유지하였다.

한편, 변동하중의 크립 균열 측정 장치도 재반 실험장치는 동일하나 단지 하중을 사각 파형을 유지할 수 있도록 weight 하부의 elevator가 일정한 주기로서 상하운동이 가능하도록 한 것으로서, 본 실험의 경우 최대하중(P_{max})에서 30min, 최소하중(P_{min})에서 30min을 유지하였으며, 하중비($R = P_{min} / P_{max}$)는 0~1.0까지 변화시켰다. 이 경우의 크립 rate는 P_{max} 및 P_{min} 의 전체 시간을 고려하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열길이의 검증

전기 potential법을 고온 균열길이의 측정에 사용하기 전에 데이터의 검증을 행하였는데, 1% Cr-Mo-V 및 12% Cr강의 각각에 대하여 20개 정도의 0.5T-CT 시험편으로 500°C, 600°C, 700°C에서 시험을 중단하여 액체 질소에서 취성 파단시킨 후 두께 방향으로 8분할하여 예비 균열 및 크립 최종 균열 길이를 0.0001mm의 정확도를 가지는 3차원 만능 측정기(3-Axis universal measuring machine)로 측정하였다.

초기 전압(U_0)에 대한 전압변화($dU=U-U_0$)를 횡축으로 하고, 초기 균열길이(a_0)에 대한 균열변화($da=a-a_0$)를 종축으로 하여 plotting한 결과 Fig. 4와 같이 나타났다.

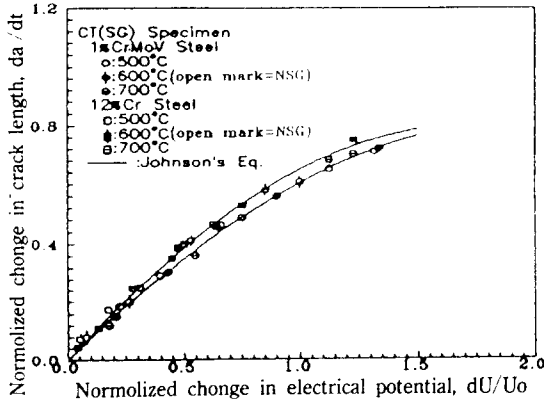


Fig. 4 Relationship between the change in crack length and the change in electrical potential for 0.5T-CT specimen of 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel at 500°C, 600°C and 700°C

H. H. Johnson에 의한 해석식²⁾은 다음과 같으며, 본 실험 결과를 이 식과 비교하면 잘 일치함을 알 수 있었다.

$$\frac{U}{U_0} = \frac{\cosh^{-1}\{\cosh(\pi y_0/2W)/\cos(\pi a/2W)\}}{\cosh^{-1}\{\cosh(\pi y_0/2W)/\cos(\pi a_0/2W)\}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, W =시험편 폭(mm), y_0 =전압 출력단자 거리의 1/2(mm)이다.

3.2 정 하중하의 고온 크립 균열 전파 시험결과

Fig. 5에 1% Cr-Mo-V 및 12% Cr강의 CT (SG, NSG) 시험편에 대한 시험시간과 하중선 변위 및 (1)식을 사용하여 계산한 균열길이의 관계를 표시하고 있다. LVDT에 의한 값과 dial gauge에 의한 측정값 사이에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

이상의 측정값으로 크립 균열 전파 속도 및 하

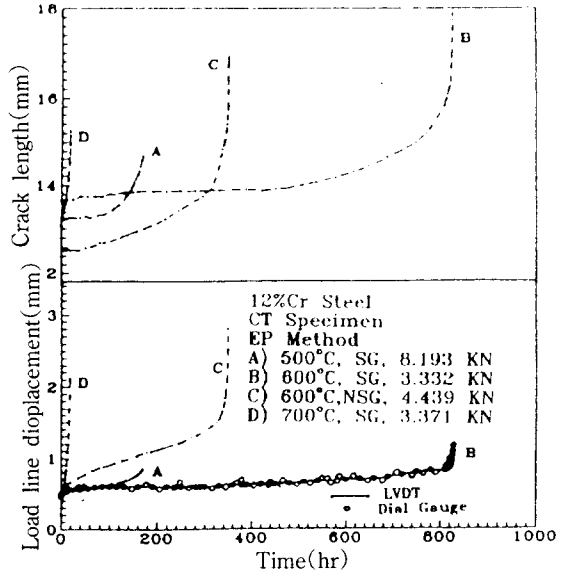


Fig. 5 Crack growth curves predicted by Johnson's eq. and the change in load line displacement during creep of the 12.7mm thick CT specimens at 500°C, 600°C and 700°C

중선 변위 속도를 7점 incremental-polynomial법⁶⁾으로 계산하였는데, K_I , σ_{net} , C^* 및 C_r 는 다음 식^{1,2)}을 사용했다.

$$K_I = \frac{P}{\sqrt{B \cdot B_n} \cdot \sqrt{W}} f(a/W) \dots\dots\dots (2)$$

$$f(a/W) = \frac{(2+a/W)}{(1-a/W)^{3/2}} \times \{0.886 + 4.64(a/W) - 13.32(a/W)^2 + 14.72(a/W)^3 - 5.6(a/W)^4\}$$

$$\sigma_{net} = \frac{P}{\sqrt{B \cdot B_n}(W-a)} \left\{ 1 + \frac{3(W+a)}{W-a} \right\} \dots (3)$$

$$C^* = \frac{n}{n+1} \frac{P \cdot \dot{V}}{B(W-a)} \left\{ \gamma - \frac{\beta}{n} \right\} \dots (4)$$

$$\gamma = \frac{2(1+\alpha)(1+a/W)/(1+\alpha^2) + \alpha(1-a/W)}{(1+a/W) + \alpha(1-a/W)}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{\alpha + (1+a/W)/(1-a/W)}$$

$$\alpha = \sqrt{[2a(W-a)]^2 + 2[2a/(W-a)] + 2} - [2a/(W-a) + 1]$$

$$C_1 = \frac{P\dot{V}_c}{BW} \frac{F'}{F} \dots\dots\dots (5)$$

$$V = \frac{\dot{a}B}{P} \left\{ \frac{2K^2}{E} \right\} + \dot{P}C + \dot{V}_c$$

여기서, P : 작용하중, n : 크립 지수(Fig. 6, 7참조), \dot{V} : 하중선 변위속도, \dot{V}_c : creep-induced 변위속도, B : 시험편 두께, $F = (K/P)BW$, $F' = dF/d(a/W)$ 이며, 또한 본시험의 경우 $\dot{P} = 0$ 이고, SG인 경우는 $B \rightarrow Bn$ 이 된다.

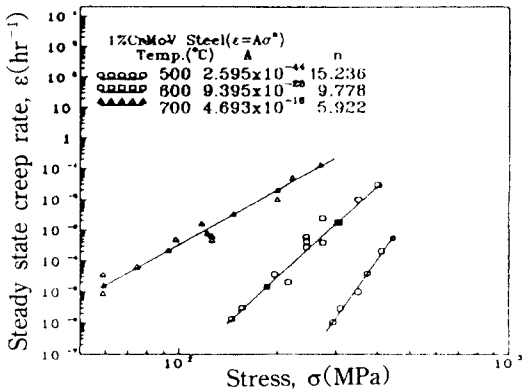


Fig. 6 Log-log plot of stress and steady state creep rate for 1% Cr-Mo-V steel(round-bar specimen).

Fig. 8은 600°C에서 양강종에 대한 $K_I - da/dt$ 관계를 나타내고 있는데 동일한 K_I 에서 12% Cr강의 균열 전파속도가 1% Cr-Mo-V 강보다 빠르고,

SG보다는 NSG의 경우가 시험편 중앙에서 Plane strain 조건을 만족하므로 전파속도가 빠름을 알 수 있다.(photo. 1참조)

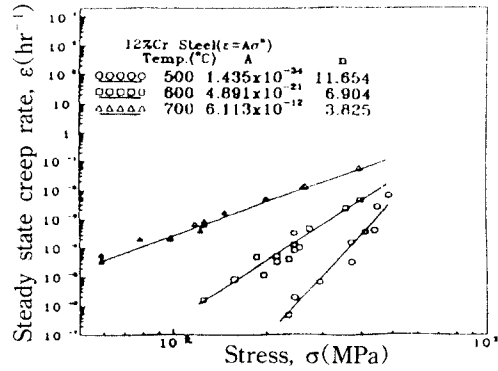


Fig. 7 Log-log plot of stress and steady state creep rate for 12% Cr steel(round-bar specimen)

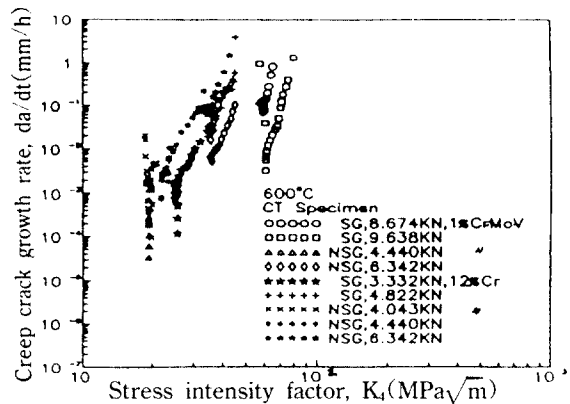
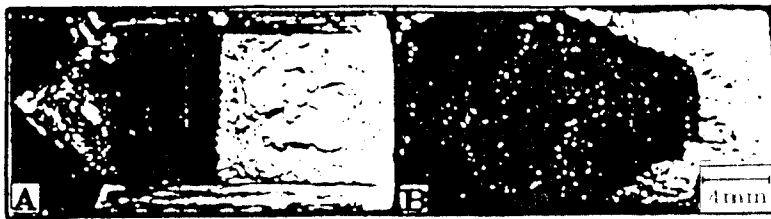


Fig. 8 Relations between stress intensity factor and creep crack growth rate for 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel at 600°C



A : SG, 500°C, 8.193KN, 170hrs B : 600°C, NSG, 4.440KN, 350hrs

Photo. 1 Examples of fracture surface for 12% Cr steel of 12.7mm thick CT specimens A with and B without side grooves

Fig. 9는 $\sigma_{net} - da/dt$ 관계를 나타내는데 전자와 유사한 양상을 보였으며, 하중변화에 대한 데이터의 Scatter가 심함을 알 수 있다.

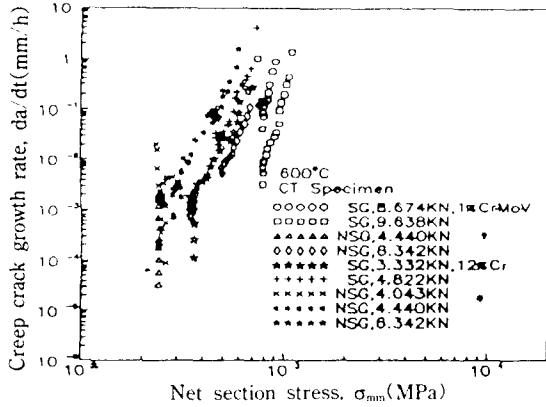


Fig. 9 Relations between net section stress and creep crack growth rate for 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel at 600°C

Fig. 10은 양강종에 대한 온도변화(500°C~700°C)에 따른 균열 전파 속도를 나타내고 있는데, 양강종 모두 scatter band가 넓기 때문에 K_I 및 σ_{net} 는 적절한 parameter가 되지 못함을 알 수 있으며, 천이 영역에서는 급격히 감소하다 정상 상태에서는 대체로 선형적으로 증가하는 양상을 보이고 있다.

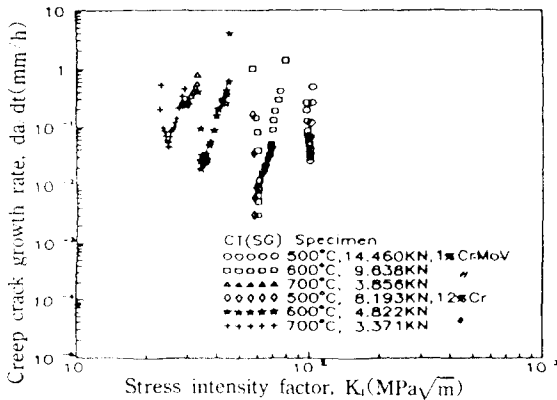


Fig. 10 Relations between stress intensity factor and creep crack growth rate for 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel at 500°C, 600°C and 700°C

Fig. 11은 C^* -적분을 적용했을 경우이며, 정상 상태에서는 하중에 관계없이 선형적이나 천이 영역에서는 감소하였다가 증가하는 것을 알 수 있다.

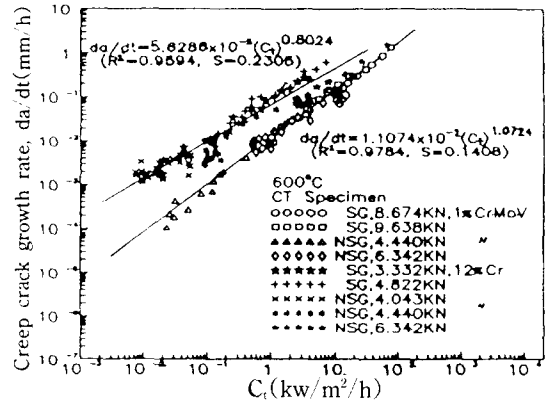


Fig. 11 Relations between C^* -integral and creep crack growth rate for 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel at 600°C

Fig. 12는 600°C에서 C_I 를 적용했을 경우인데, 전 구간에서 하중에 관계없이 대체로 선형적임을 알

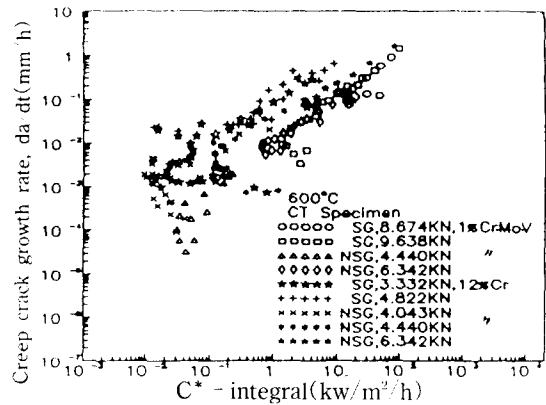


Fig. 12 Relations between C_I and creep crack growth rate for 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel at 600°C

수 있고, 3개 온도 모두를 고려하면 Fig. 13, 14에서 보이는 것과 같이 양강종 모두 온도 및 하중에 무관하게 한 직선상에 군집하는 형태로서 C_I 가 da/dt 를 예측하는 가장 적절한 parameter라는 것을 알 수 있으며, 이 경우 다항 회귀 분석법⁷⁾에 의한

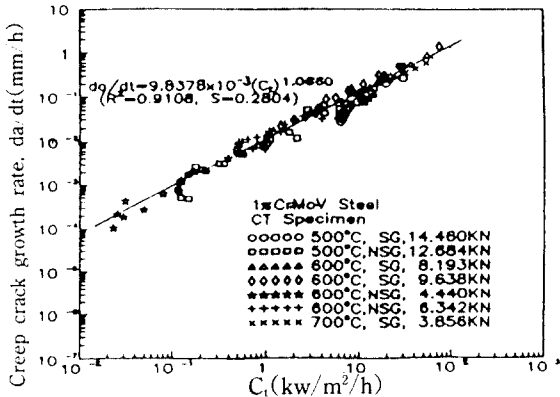


Fig. 13 Relations between C_t and creep crack growth rate for 1% Cr-Mo-V steel at 500°C, 600°C and 700°C

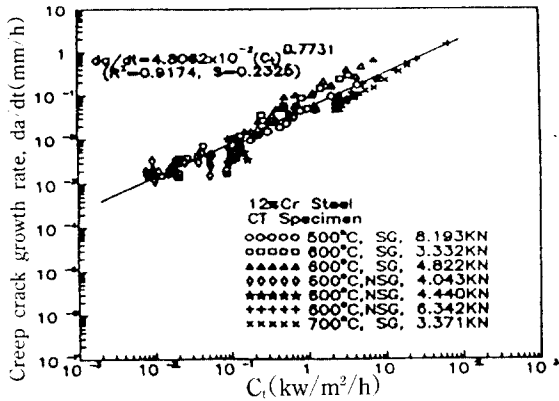


Fig. 14 Relations between C_t and creep crack growth rate for 12% Cr steel at 500°C, 600°C and 700°C

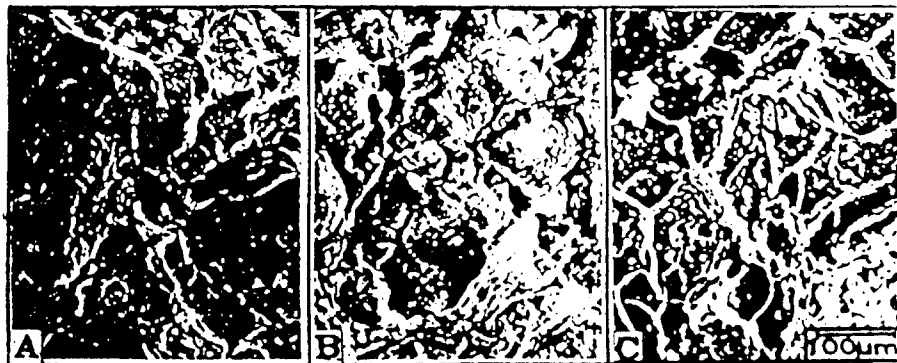
수명식은 다음과 같다.

$$1\% \text{ Cr-Mo-V} : da/dt = 9.8378 \times 10^{-3} (C_t)^{1.0660} \\ (R^2 = 0.9108, S = 0.2804) \dots \dots \dots (6)$$

$$12\% \text{ Cr} : da/dt = 4.8062 \times 10^{-2} (C_t)^{0.7731} \\ (R^2 = 0.9174, S = 0.2326) \dots \dots \dots (7)$$

여기서, R^2 : 상관계수(correlation coefficient), S : 표준편차(standard deviation)이다.

한편, 500°C, 600°C 및 700°C에서 시험한 시험편 표면을 피로균열 선단 3~5mm 지점에서 SEM으로 관찰해 본 결과 Photo.2에서 보이는 바와 같이 cavity 성장에 의한 intergranular 크립 파면을 보였는데, cavity 생성 기구로서는 vacancy 응집, 입계활주, 전위집적 등을 고려할 수 있는데, 온도가 낮고 하중이 높은 사진 A의 경우는 파면상의 요철이 심하고, 입계의 윤곽이 뚜렷한 점으로 보아 장시간 크립 하중으로 입계 삼중점(triple point)에서의 응력 집중에 의한 cavity 발생 및 이들의 성장에 의한 파괴인 것으로 사료되며, 비교적 고온 저하중인 사진 B와 C의 경우는 A에 비하여 요철이 적고 입계면에 소수의 dimple상이 존재하는 것을 알 수 있으며, 파괴기구는 고온에 의한 계면의 탄화물 석출과 입계 slip에 의한 vacancy 생성 및 확산에 의해 균열전파가 더욱 촉진된 것으로 판단된다.



(A) 500°C, 8.193KN (B) 600°C, 4.822KN (C) 700°C, 3.371KN

Photo. 2 SEM photographs of creep fracture surface for 12% Cr steel

3.3 변동하중 하의 고온 크립 균열전파 시험 결과

Fig. 15, 16은 양강종의 경우 600°C에서 하중비 ($R=P_{min}/P_{max}$)에 따른 K_I - da/dt 관계를 나타내고 있는데, R 값이 증가함에 따라 da/dt 값이 상승함을 알 수 있으며, 1% Cr-Mo-V강보다 12% Cr강이 그 경향이 심하다. 그리고 1% Cr-Mo-V강에서 NSG의 경우가 SG보다 R의 영향은 적으나, da/dt 는 높게 나타났는데 이는 정하중의 경우와 동일한 양상을 보였다.

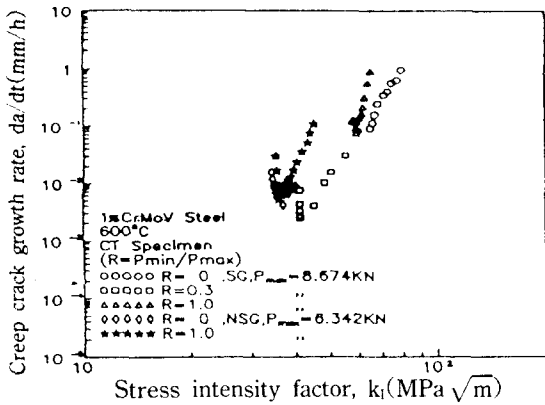


Fig. 15 Relations between stress intensity factor and creep crack growth rate for 1% Cr-Mo-V steel under cyclic load at 600°C

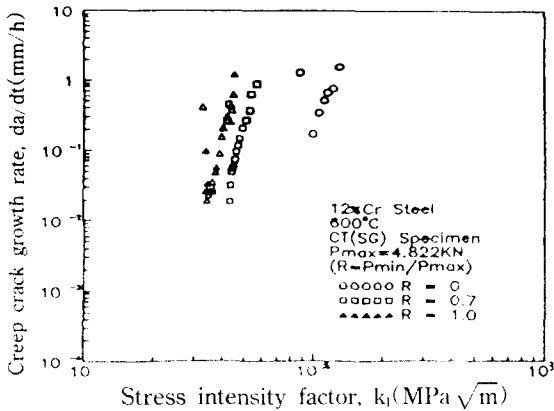


Fig. 16 Relations between stress intensity factor and creep crack growth rate for 12% Cr steel under cyclic load at 600°C

그러나, R변화에 따라 scatter band가 심하여 K_{Ic} 는 역시 변동하중하의 da/dt 를 예측하는데 적절한 parameter가 되지 못함을 알 수 있었다. Fig. 17, 18은 양강종의 경우 C_I parameter를 사용한 경우

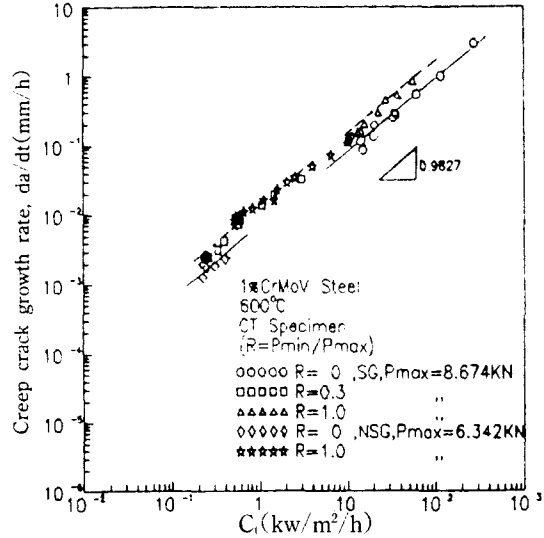


Fig. 17 Relations between C_I and creep crack growth rate for 1% Cr-Mo-V steel under cyclic load at 600°C

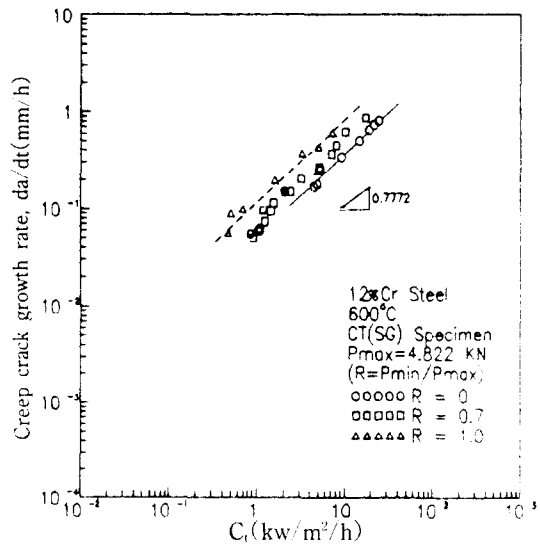


Fig. 18 Relations between C_I and creep crack growth rate for 12% Cr steel under cyclic load at 600°C

로서 R의 변화에 관계없이 선형 관계가 잘 적용됨을 알 수 있으며, 정하중(R=1.0) 크립인 경우를 변동하중(R=0) 크립의 경우와 비교하면 1% Cr-Mo-V 및 12% Cr강 모두 slope는 거의 변화가 없으며 절편값만 전자의 경우 1.16배, 후자의 경우 1.43배정도 증가하여 크립 균열전파 속도가 빨라짐을 알 수 있으며, Fig. 12에 도시한 양강종의 여러 하중 조건하에서의 실험 결과와 비교해도 slope가 잘 일치함을 알 수 있다. 여기서, 정하중(R=1.0) 크립일 경우의 da/dt값이 변동하중(R=0) 크립 경우보다 높은 이유는 R값이 증가함에 따라서 단위 시간당 시험편에 작용되는 전체 부하 하중이 증가하므로 입계 slip이 촉진되어 고온 크립 변형속도가 상승하며, 특히 R=0인 경우 30min의 unloading 시간중의 의탁성 회복(unelastic recovery) 현상 때문에 da/dt값이 낮아진 것으로 판단된다.

4. 결 론

화력 발전용 로터(1% Cr-Mo-V, 12% Cr)강의 정하중 및 동하중하의 고온(500°C, 600°C, 700°C) 크립 균열 전파(da/dt)시험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 전기 potential법에 의한 고온 크립 균열길이 측정법이 유효하였으며, H.H. Johnson 해석식과 잘 일치하였다.

2) 정하중 크립하의 K_I , σ_{net} 에 의한 da/dt의 정리는 side groove 및 온도의 영향이 뚜렷하여 역학적 parameter로서 유효하지 못하였다. 한편, C^* - 적분은 정상상태에서의 da/dt 예측 parameter로는 적절하나 천이 영역에서는 data의 scatter band가 심하게 나타났다.

3) 정하중 크립하의 C_I 는 온도변화에 관계없이 천이 영역을 포함한 전체 구간에서 da/dt의 예측 parameter로서 가장 적절하였으며, 균열 전파속도

식은 다음과 같이 나타났다.

$$1\% \text{ Cr-Mo-V} : da/dt = 9.8378 \times 10^{-3} (C_I)^{1.0660}$$

$$12\% \text{ Cr} : da/dt = 4.8062 \times 10^{-2} (C_I)^{0.7731}$$

4) 600°C 변동하중 크립하에서도 C_I 는 하중비(R)의 변화에 관계없이 전체 구간에서 da/dt와 선형 관계가 잘 적용 되었으며, 정하중(R=1)의 경우가 변동하중(R=0)일 때보다 1% Cr-Mo-V강의 경우 1.16배, 12% Cr강의 경우 1.43배 정도 균열 전파속도가 빨라짐을 알 수 있었다.

5. 참고 문헌

- 1) Ashok Saxena, "Creep Crack Growth under Non-Steady State Conditions", Fracture Mechanics, ASTM STP 905, pp. 185~201, 1986
- 2) Akio Fuji and Isamu Yamaya, "Application of the Electrical Potential Method to Measurement of Tunnelled Creep Crack Growth of 2.25 Cr-1Mo Steel", 鐵と鋼, pp. 142~149, 1987
- 3) Sadananda, K. and P. Shahinian, "Met. Trans", 8A, pp. 439, 1977
- 4) Riedel, H., "Fracture at High Temperatures", pp. 263~271, 1986
- 5) Wilkowski, G. M. and W. A. Maxey, "Review and Applic. of the Electric. Potent. Method for Measuri. Crack Growth in Specimens, Flawed Pipes, and Pressure Vessels", ASTM STP 791, pp. 266~294
- 6) "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rate", ASTM E647-88, pp. 636~645, 1988
- 7) Brice Carnahan, H. A. Luther and James O. Wilkes, "Applied Numerical Method, John Wiley & Sons, Inc., pp. 579~584, 1969