

# 일정하중 및 일정 $C_t$ 에서 로터강의 크리프 균열전파특성

정순억\*, 이현식\*\*, 김영대\*\*

## Creep Crack Growth Properties of Rotor Steel under Constant Load and $C_t$ Condition

Soon-Uk Jeong, Hun-Sik Lee, Young-Dae Kim

**Key Words:** Creep Crack Growth Rate(크리프 균열전파속도), Steady State Creep(정상상태 크리프), Load Line Displacement Rate(하중선 변위속도), Creep-induced Displacement Rate(크리프 유도 변위속도)

### Abstract

The creep crack growth properties in 3.5NiCrMoV steel were investigated at 550°C by using CT specimen under constant  $C_t$  condition that was held during crack growth of 1mm distance.  $C_t$  rely on load line displacement rate and  $C^*$  usually increase with crack length though load is reduced in order to maintain constant  $C_t$  value as crack growth.

Fully coalesced area(FCA) ahead of crack tip tend to increase as  $C_t$  increase to the critical value, and after that value FCA decrease.

For the tertiary creep stage of crack growth test, the most of displacement is due to the steady state creep, except only small part due to the primary creep and other effects. Therefore, tests were mainly interrupted in the tertiary stage to obtain high value of  $C_t$ . At constant load and  $C_t$  region, crack growth slope was 0.900 and 0.844 each, on the other hand  $C^*$  slope was 0.480.

### 1. 서 론

고온, 고압 분위기에서 사용되는 발전설비 등의 부재는 고온 크리프 변형을 수반한다. 고온 부재의 수명은 균열발생(crack initiation)과 균열전파(crack propagation)로 구성되며<sup>1)</sup>, 상업용 제품들은 제작공정중이나 사용도중 균열이 내재될 가능성이 매우 높고, 이러한 균열의 선단에서는 상대적인 응력집중에 의해 공동의 생성, 성장과 결합 등으로 인한 균열의 급진전으로 파괴가 발생된다<sup>2)</sup>. 지금까지 크리프 균열전파속도(da/dt)를 예측하기 위한 파라미터<sup>3-6)</sup>로서 응력확대계수(K), J-적분,  $C^*$ -적분,  $C_t$  등이 있다. 고온강도가

높은 Ni-base 내열합금이나 크리프 취성이 강한 페라이트계강에서는 K가 적절한 파라미터인 것으로 알려져 있으며<sup>5)</sup>, 균열선단의 소성역이 큰 SUS316강 등에서는 J-적분이 하중변수로 적당한 것으로 보고되고 있다<sup>7,8)</sup>. 그리고, power law 크리프에 의한 광범위한 변형이 발생하여 HRR 응력장으로 변하는 재료는  $C^*$ -적분이 잘 적용된다<sup>9)</sup>. 그러나, K와 J-적분,  $C^*$ -적분 등은 시험편의 형상이나 크리프 영역에 따라 정반대의 상황을 보이기도 한다. 소규모 크리프(small creep)과 천이단계(transient stage)를 포함한 이러한 여러 환경에서의 da/dt를 예측하기 위해 최근  $C_t$ 가 제안되었다<sup>10)</sup>.

본 연구에서는 화력 발전소 저압 로터로 사용되고 있는 3.5NiCrMoV 강을 이용하여 일정하중 및 일정  $C_t$  조건하에서 실험을 통하여  $C^*$ -적분,

\* 정희원, 경상대학교 수송기계공학부  
\*\* 정희원, 경상대학교 대학원 기관공학과

**Table 1 Chemical composition of 3.5NiCrMoV steel.**

| C    | Si   | Mn   | Ni   | Cr   | Mo   | V    | P     | S     |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 0.28 | 0.25 | 0.35 | 3.28 | 1.34 | 0.29 | 0.09 | 0.005 | 0.003 |

**Table 2 Mechanical properties of 3.5NiCrMoV steel at room temperature**

| Tensile strength (MPa) | Yield strength (MPa) | Elongation (%) | Reduction of area (%) | Hardness (HRC) |
|------------------------|----------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| 856                    | 745                  | 10.8           | 21.8                  | 25             |

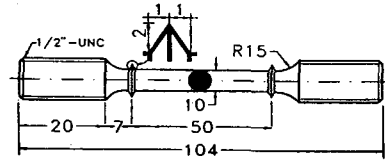
$C_t$  파라미터의 특성을 연구하고, 파단면 분석을 통하여  $C_t$ 에 따른 균열전파의 손상영역 변화 및 크리프 균열전파 특성 등을 조사하였다.

## 2. 실험방법

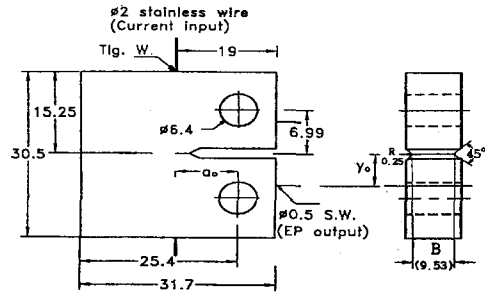
본 실험에 사용된 재료는 국내 H중공업에서 제작한 화력발전용 저압로터재인 3.5%NiCrMoV 강으로서 유도로(Toccol-227)에서 용해하여 단조한 후 1100°C에서 1시간 동안 어닐링한 후 오일 퀸칭하고, 690°C에서 5시간동안 템퍼링하여 최종 조직은 템퍼드 마르텐사이트(입계크기 ASTM No. 4) 조직을 나타냈다. 소재의 화학성분 및 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타냈다.

시험편은 0.5" CT(compact tension)형으로 Fig. 1과 같이 가공하였으며, DC 전위차법<sup>4,11)</sup>을 사용하여 균열전파길이를 측정하였으며, 균열길이의 검정을 위하여 20개의 예비시험편을 준비하여 시험도중 중단한 후 액체질소에서 취성과파사킨 후 ASTM E399의 규정에 따라 두께방향으로 8분할하여 예비균열과 최종균열길이를 0.1 μm 정밀도의 3차원 만능형상 측정기로 측정하였다.

전압 입출력단자는 고온으로 인한 산화를 가능한 막기 위해 스텐레스 와이어를 TIG 용접하였다. 그리고, 열기전력은 시험편에 따라 약간의 차이는 있으나 -10~-50 μV 정도로 나타났으며 시험개시 후 정기적(10분 간격)으로 전류를 차단



(a) uniaxial creep



(b) crack growth creep

**Fig. 1 uniaxial and Constant  $C_t$  creep specimen profile.**

하고 이를 고려하여 균열길이를 환산하였다. 시험편 균열방향은 소재의 단조방향과 균열면이 평행이 되도록 하여 ASTM E813규정에 따라 만능 피로시험기(Instron 1350)로서 최대하중 11kN, 최소하중 1.1kN하에서 7Hz의 사인파로 8mm의 예비균열을 낸후, 평면변형률(plain strain) 조건이 되도록 시험편 양쪽에 두께의 25% 깊이로 측면 그루브(side groove)를 가공하였다.

일정  $C_t$ 시험조건은 Table 3에 나타냈다. 일정  $C_t$ 시험을 위해서는 균열전파에 따라 연속적으로 하중을 감소시켜야 하므로 단식 레버형 크리프 시험기에 부착된 응력이완(stress relaxation) 시

**Table 3 Test condition of constant load and constant  $C_t$ .**

| Applied constant load (N) | Initial condition |   | Constant $C_t$ |                 |                |
|---------------------------|-------------------|---|----------------|-----------------|----------------|
|                           | Crack length (mm) | Stress intensity factor ( $MPa\sqrt{m}$ ) | Value (N/mhr)  | Start time (hr) | Hold time (hr) |
| 4,090                     | 12.70             | 24.86                                     | 300            | 18.1            | 17.5           |
|                           |                   |   | 1,000          | 35.4            | 6.3            |
|                           |                   |   | 2,000          | 54.3            | 4.5            |
|                           |                   |   | 4,000          | 61.5            | 2.5            |

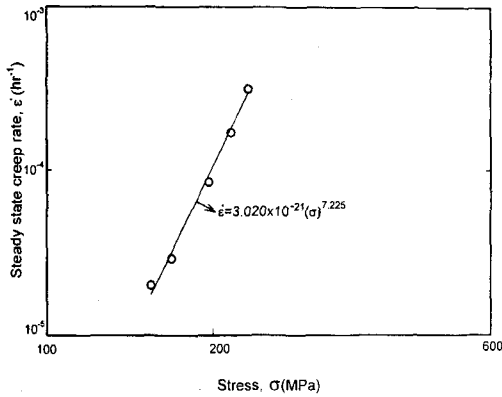


Fig. 2 Log-log plot of stress and steady static creep rate in uniaxial load.

험장치를 변경하여 1초 간격으로 DC 전위차법에 의해 균열길이를 계산한 후, 해당하는 하중을 입력하였다. 실험로는 3-zone 석면 저항로를 사용하여  $\pm 2^\circ\text{C}$  이내로 유지하였으며, 하중점 변위는 고온 신장계(extensometer)를 부착하여 측정하였다.

본 실험에서 일정  $C_t$ 값은 300, 1000, 2000, 4000N/mhr로 하였으며, 균열이 1mm정도 전과할 때까지 유지하고 하중을 제거한 후 side groove를 연삭가공 하고 광학현미경으로 공동을 관찰하였다. 남은 ligament는 액체질소 속에서 취성과파시켜서 균열선단과 파면을 SEM과 영상분석기(Image Analyzer)로 공동의 분포상황과 크기 등을 조사하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 일축크리프 실험

CT시험편에  $C^*$ 적분과  $C_t$  파라미터를 적용하기 위한 기초실험으로서 Power law 크리프 ( $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$ )의 지수 A와 n을 구하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 2의 (a)에 나타난 일축 크리프 시험편을 이용하여  $550^\circ\text{C}$ 의 공기중에서 155~235MPa(항복응력의 40~60%)의 응력범위에서 일축 크리프 실험을 하였다. 실험결과 크

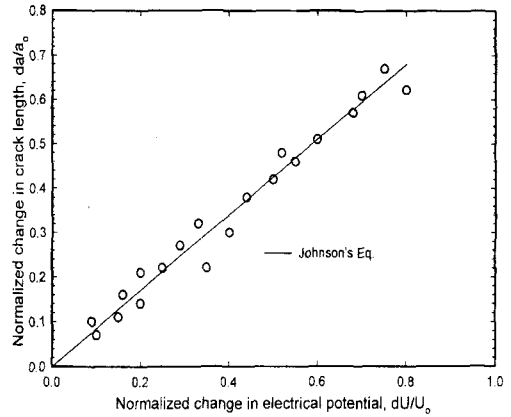


Fig. 3 Relationship between the change in crack length and the change in electrical potential for 0.5T-CT specimen at  $550^\circ\text{C}$ .

리프 응력과 변형률속도는 Fig. 2에 나타난 것처럼 양대수 그래프 상에서 선형적으로 나타났으며, 이때 크리프 지수  $A=3.020 \times 10^{-21}$ ,  $n=7.225$ 로 나타났다.

#### 3.2 크리프 균열길이의 검정

직류 전위차법을 본 재료의 크리프 균열길이의 측정에 사용하기 위해서 초기전압( $U_0$ )에 대한 전압변화( $dU=U-U_0$ )를 횡축으로 하고, 초기 균열길이( $a_0$ )에 대한 균열변화( $da=a-a_0$ )를 종축으로 하여 도시한 결과를 Fig. 3에 나타냈다. Johnson에 의한 이론적인 해석식<sup>4,11)</sup>은 다음과 같으며, 본 실험결과를 이 식과 비교하면 잘 일치함을 알 수 있다.

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

여기서, W는 시험편 폭(mm),  $a_0$ 는 초기균열길이(mm),  $y_0$ 는 전압 출력단자 거리(mm)의 1/2이다.

#### 3.3 $C^*$ 파라미터

$C^*$ -적분의 측정방법에는 복수 시험편에 의

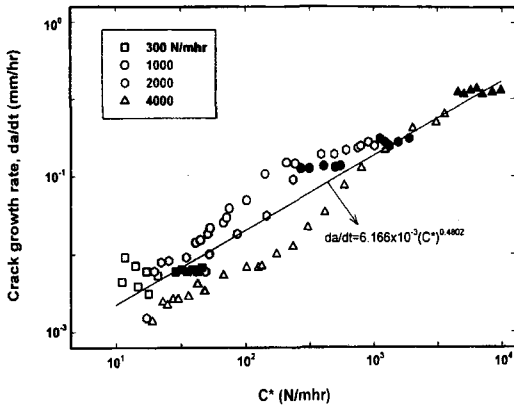


Fig. 4 Relationship between  $C^*$  and crack growth rate.

한 도식법<sup>12)</sup>, J-적분 해석법<sup>13)</sup>, 면적법<sup>14)</sup> 등이 있다. Saxena<sup>3)</sup> 및 Fuji 등<sup>4)</sup>은  $C^*$ -적분이 순수급힘과 인장을 동시에 고려한 소성변형을 포함하기 때문에 예비균열을 도입한 CT시험편의 경우 작용하중(P)과 하중선 변위속도( $\dot{\Delta}$ )를 측정하고 구한 다음 식이 유효하다고 보고하였다.

$$C^* = \frac{n}{n+1} \frac{P\dot{\Delta}}{B(W-a)} \left[ \gamma - \frac{\beta}{n} \right] \quad \text{-----}(2)$$

여기서, n은 크리프 지수이며,  $\alpha$ 와  $\beta$  및  $\gamma$ 는 재료정수로서

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

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

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

이다.

본 실험의 경우 시간에 따른 식 (2)의  $C^*$  파라미터의 변화를 Fig. 4에 나타냈다.  $C^*$  파라미터는 하중선 변위의 함수이므로 일정  $C_I$  조건에서도  $C^*$ 값은 점차 증가하는 양상을 보였다. 그 이유는 3기 크리프 단계에서는  $\dot{\Delta}$ 가 급격히 증가하기 때문으로 사료된다.

일정  $C_I$ 구간을 제외한 경우 선형회귀분석에 의한  $da/dt$ 와  $C^*$ 의 상관관계 실험식은

$$da/dt = 6.166 \times 10^{-3} (C^*)^{0.4802} \quad \text{-----}(3)$$

으로 나타났으며, Fig. 4에 보이는 것처럼 작용하중에 따라 데이터의 밴드가 상당히 심함을 알 수 있다. 따라서,  $C^*$ 는 본 재료의  $da/dt$ 를 예측하는 데 적절한 파라미터가 되지 못하는 것으로 사료된다. 이 결과는 Hour<sup>17)</sup>가 800H합금강의 650°C  $da/dt$  실험에서 응력비(stress ratio), 주파수(frequency)등을 변화시켰을 경우  $C^*$ 의 적용은  $\Delta K$ 와  $K_{max}$ 보다는 데이터의 scatter band가 줄어들었으나 하나의 직선상에는 군집되지 않고 그 영향이 나타난다는 보고결과와 일치하였다.

#### 3.4 $C_I$ 파라미터

$C^*$ -적분은  $\dot{\Delta}$ 만 고려하고 이로 인한 크리프 유도 변위속도(creep-induced displacement rate,  $\dot{V}_c$ )를 고려하지 않기 때문에 재료에 따라서는 정상 크리프 이외의 영역에서  $da/dt$  예측 파라미터로 적절하지 않을 경우도 있다. 이를 보완하기 위해 천이영역을 포함한 크리프 균열 해석법으로 Saxena<sup>3)</sup>에 의해 제안된  $C_I$ 는 다음과 같다.

$$C_I = \frac{P \dot{V}_c}{BW} \frac{F'}{F} + C^* \left[ 1 - \frac{F'/F}{\eta} \right] \quad \text{---}(4)$$

여기서,

$$\dot{V}_c = \frac{4\zeta(1-\nu^2)}{E(n-1)} \left( \frac{P}{B} \right)^3 \frac{F^4}{W^2} t^{3-n/n-1} (EA)^{2/(n-1)}$$

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{(n+1)^2}{2n \cdot \beta^{n+1}} \right]^{2/(n-1)}$$

이며, P는 작용하중,  $V_0$ 는 순간변위,  $V^0$ 는 전변위, C는 탄성 compliance이다. 그리고,  $F = F(a/W) = (K/P)BW^{1/2}$ 으로서 K - calibration factor<sup>3)</sup>이며,  $F'$ 는  $dF/d(a/W)$ 를 의미하고  $\eta$ 는 n에 의존하는 calibration factor이다.  $\nu$ 는 프와송 비, A는 크리프 지수, E는 탄성계수이다. 그리고,  $\beta^{n+1}$ 의 값은  $3 \leq n \leq 10$ 에서 0.69정도

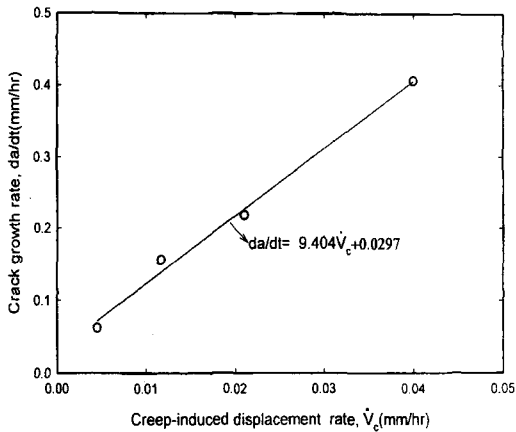


Fig. 5 Relationship between creep-induced displacement rate and crack growth rate.

를 나타낸다<sup>15)</sup>고 보고되고 있다.

da/dt와  $\dot{V}_c$ 의 상관관계를 Fig. 5에 나타냈으며 기울기는 9.404로 나타났다. 일정  $C_t$ 에서는 일정  $\dot{V}_c$ 가 얻어지므로 일정  $C_t$ 에서는 일정 da/dt가 얻어짐을 간접적으로 알 수 있다.

일정하중 및 일정  $C_t$  조건에서 크리프 시간에 따른  $C_t$ 의 변화를 Fig. 6에 나타냈다. 시험초기 천이영역에서 크리프 균열전파속도(da/dt)가 점차 낮아지는 이유는 하중부가 직후 변형에 의한 가공경화 현상 때문이며, 시간의 경과에 따라 균열 주위의 탄성변형은 크리프 변형에 의해 점차 해소되고, 시간변화와 더불어 안정된 상태에 도달된다. 따라서, 이때에 da/dt와  $\dot{V}_c$ 는 일정한 경향을 보이는 것으로 사료된다.

본 실험의 경우  $C_t = 300, 1000, 2000, 4000$ (N/mhr)에서 약 1mm의 균열을 진전시키는데 각 경우에 17.5, 6.3, 4.5, 2.5hr가 소요되었다. 1mm정도의 균열전파는 전체균열길이(5~6mm)의 20% 정도로서 일정하중하의 시험영향을 제거하기 위한 충분한 길이로 판단된다. Hong 등<sup>16)</sup>의 연구에 의하면 일정하중하의  $C_t = 50 \sim 5500$ (N/mhr) 시험에서 손상(damage) 영역크기가 약 200  $\mu\text{m}$  이하라고 보고하였다.

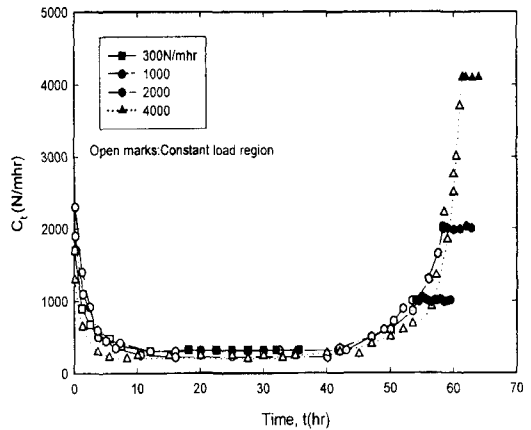


Fig. 6 The variation of  $C_t$  with time under constant load and constant  $C_t$ .

4종류의 일정  $C_t$  조건에서 da/dt의 실험결과를 Fig. 7에 나타냈다. 일정  $C_t$ 와 da/dt는 선형적인 상관성이 존재하였으며, 다음과 같이 표시할 수 있었다.

$$da/dt = 3.420 \times 10^{-4} (C_t)^{0.844} \quad \text{-----(5)}$$

한편, 일정  $C_t$  조건에서의 실험데이터를 제외한 일정하중하의 실험데이터 만으로 회귀분석에 의한 선형 실험식으로 나타내면

$$da/dt = 2.004 \times 10^{-4} (C_t)^{0.900} \quad \text{-----(6)}$$

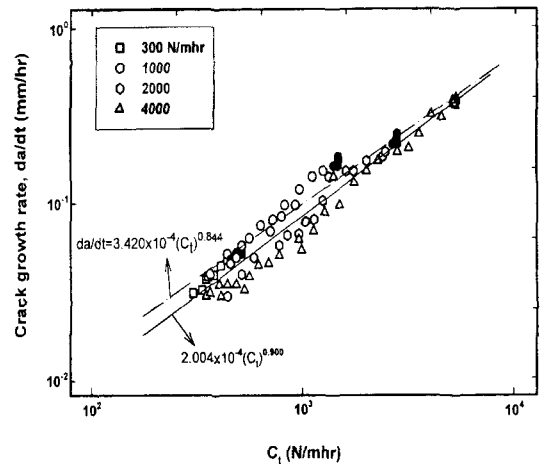


Fig. 7 Relationship between  $C_t$  and crack growth rate.

로 나타났다. 일정하중 및 일정  $C_t$  실험결과가 유사하게 나타남을 알 수 있으며, 따라서, 일정  $C_t$  실험은 일정하중 실험의 연장선상에 존재하며, 일정하중 실험에서도  $C_t$ 의 적용이 유효함을 알 수 있다. 이 결과는 Saxena<sup>3)</sup>가 482°C 및 538°C의 공기중에서 1%CrMoV강의 da/dt 실험에서  $C_t$ 가 작용하중, 온도, 하중선 변형속도에 관계없이 한 직선상에 군집한다고 보고한 결과와 잘 일치하였다.

#### 4. 결론

화력발전용 저압 로터강인 3.5NiCrMoV강에 대한 일정하중 및 일정  $C_t$ 하에서 균열전파(da/dt) 실험결과는 다음과 같다.

- 1)  $C_t$ 는 크리프 유도 변위속도와 밀접한 상관성을 가졌으며, 일정  $C_t$ 에서도  $C^*$ 는 점차 증가하였다.
- 2)  $C^*$ 에 의한 da/dt의 예측은 작용하중의 영향이 뚜렷하게 나타나서 da/dt의 예측으로 적절하지 않았다.
- 3)  $C_t$ 에 의한 da/dt는 작용하중에 관계없이 동일한 직선상에 군집하였으며, 일정  $C_t$ 에서의 da/dt도 한직선상에 군집하는 양상을 보였다.
- 4) 일정  $C_t$  실험결과  $C_t=2000\text{N/mhr}$ 에서 공동 크기와 손상영역이 가장 크게 나타났으며, 이들은 상호 밀접한 연관성을 나타냈다.

#### 참고문헌

- (1) Sellars, C. M., 1974, "Creep Strength in Steel and High Temperature Alloys", p.20.
- (2) Weiz, D. A., 1976, "Analysis of the Tennessee Valley Authority", Gallatine Unit No. 2 Turbine Rotor Burst II Mechanical Analysis Winter Annual Meeting.
- (3) Saxena, A., 1986, "Creep Crack Growth under NonSteady State

Conditions", Fracture Mechanics, ASTM STP 905, pp.185~201.

(4) Fuji, A. and Yamaya, I., 1987, "Application of the Electrical Potential Method to Measurement of Tunnelled Creep Crack Growth of 2.25Cr-1Mo Steel", 鐵と鋼, pp.142~149.

(5) Radhakrishnan, V. M. and Kamaraj, K., 1989, "Crack Propagation in Creep", Transactions of the Indian Institute of Metals, Vol.42, pp.S107~S121.

(6) 平 修二, 大谷隆一, 1980, "材料の高温強度論", オーム社, pp.8~21, pp.111~124, pp.161~171, pp.209~213.

(7) Taira, S., Ohtani, R. and Komatsu, T., 1979, "Application of J-Integral to High Temperature Crack Propagation(Part I - Creep Crack Propagation)", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.101, pp.154~161.

(8) Taira, S., Ohtani, R. and Komatsu, T., 1979, "Application of J-Integral to High-Temperature Crack Propagation(Part II-Fatigue Crack Propagation)", Journal of Engineering Materials and Technology Vol.101, pp.162~167.

(9) Hutchinson, J. W., 1968, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.16, pp.337~347.

(10) Saxena, A., Han, J. and Banerji, K., 1988, "Creep Crack Growth Behavior in Power Plant Boiler and Steam Pipe Steels", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.110, pp.137~146.

(11) Schwalbe, K. H. and Hellmann, D., 1981, "Application of the Electrical Potential Method to Crack Length Measurements Using Johnson's Formula", JTEVA, Vol.9, No.3, pp.218~221.