

< 논 문 >

표면균열을 갖는 원형봉재 시편을 이용한 고온 피로균열성장 연구

소태원* · 윤기봉** · 정세희***

(1995년 11월 23일 접수)

A Study on Elevated Temperature Fatigue Crack Growth Using Round Bar Specimen with a Surface Crack

Tae Won So, Kee Bong Yoon and Se Hi Chung

Key Words : Fatigue(피로), Crack Growth(균열성장), Surface Crack(표면균열), DC Electric Potential Method(직류전위차법), Round Bar Specimen(원형봉재 시편), Cr-Mo Steel(Cr-Mo강)

Abstract

The compact tension specimen geometry has been widely used for measuring fatigue crack growth rates at elevated temperature when the fatigue load is under tension/tension condition. However, most of the elevated temperature components which have significant crack growth life experience fatigue load under tension/compression conditions. Thus, test techniques are required with a new specimen geometry which enables tension/compression fatigue crack growth testing since the compact tension specimen cannot be used for tension/compression loading. In this paper, a simplified test procedure for measuring fatigue crack growth rates is proposed, which employs a round bar specimen with a small surface crack. Fatigue crack growth rates under tension/tension loading conditions at elevated temperature were measured according to the proposed procedure and compared with those previously measured by C(T) specimens. Since both the measured crack growth rates were comparable, the fatigue crack growth rates under tension/compression load can be reliably measured by the proposed procedure. For monitoring crack depth, DC electric potential method is employed and an optimal probe location and current input conditions were also proposed.

1. 서 론

고온에서 사용되는 대형 플랜트 후유부 요소인 증기터빈 로터, 보일러 헤더, 정유/석유 플랜트의

반응로 등에 사용되는 금속재료는 사용 중에 취약 부에서 피로 및 국부적 크리프 손상 등의 원인으로 균열이 발생된 후, 이 균열이 성장하여 최종 파괴에 이르게 된다. 따라서 이들의 사용수명을 평가하기 위해서는 고온에서 피로균열성장속도를 예측할 수 있는 모델 및 피로균열성장속도 데이터의 측정이 필요하다.

일반적으로 C(T) 시편을 이용한 시험법으로 피

*대우상용차(주) 군산공장

**회원, 중앙대학교 기계설계학과

***회원, 전북대학교 정밀기계공학과

로 균열성장속도를 측정하여 고온구조물 요소의 균열성장 수명평가에 적용하여 왔다.⁽¹⁾ 그러나, 많은 경우 후속부 요소가 플랜트의 기동/사용/정지 중에 받는 하중은 인장응력외에 압축응력도 함께 받게 된다. 따라서, 고온 구조물요소에서의 균열성장속도를 정확히 예측하려면 인장/인장 피로하중 외에 인장/압축 피로하중 조건에서 균열의 성장속도도 측정하여야 한다. C(T) 시편을 이용한 시험방법으로는 인장/인장 피로하중조건에서의 균열성장속도 측정은 용이하지만, 인장/압축 피로하중조건에서는 균열성장속도를 측정할 수 없으므로 다른 시편 형상을 이용한 피로시험법이 연구 되어왔다. 즉, 전 원주방향의 균열을 갖는 원형봉재 시편(circumferentially cracked cylindrical specimen)⁽²⁾과 수정된 C(T)형 시편(modified compact specimen)⁽³⁾을 이용한 시험법 등이 시도되었다.

본 연구에서는 이상의 기존 시험방법 외에 적용 가능한 새로운 시험절차로서 표면 균열을 갖는 원형봉재 시편(surface cracked round bar specimen)을 이용한 피로시험법에 대해 제안하였다. 본 논문에서 제안한 시험절차로 인장/인장 피로하중조건에서 측정된 균열성장속도가 C(T) 시편을 이용한 시험법으로 측정된 균열성장속도와 일치하는지 검사함으로써, 새로 제안한 방법이 기존의 C(T) 시편을 이용한 방법과 호환성이 있는지 검토하였다. 즉, C(T) 시편을 이용하여 538°C에서 측정된 1.25Cr-0.5Mo강의 피로균열성장속도를 본 논문에서 새로 제안한 시험법으로 측정된 실험결과와 비교하여 서로 일치하면, 이 방법을 인장/압축 하중조건에서 사용하여 신뢰성있는 피로균열성장속도 데이터를 얻을 수 있을 것이다. 원형봉재 시편의 경우 균열깊이(crack depth)는 직류전위차법(DC electric potential drop method)^(4,5)을 이용하여 정량적으로 모니터링 하였다.

2. 실험방법

2.1 시편

시험재료는 1.25Cr-0.5Mo강으로 530~540°C에서 24년간 사용된 재료(material A) 및 신재(material B) 두 종류를 사용하였다. 화학적 성분을 Table 1에 나타내었고, 538°C에서의 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다.⁽⁶⁾ Fig. 1은 본 실험에 사용된 원형봉재 시편의 형상이다. 노치는 방전가공(EDM, electro discharge machining)으로 가공하였으며 형상은 노치선단이 현인 익현(chord)형상이다. 직류전위차법의 적용을 위해 시편에 공급하는 전류 입력선은 직경 1.5 mm의 스테인레스강 선이고, 전위출력선은 고온에서 사용가능한 직경 0.25 mm의 K형 열전대 선을 점용접(spot-welding)하여 사용하였다. Van Stone 등⁽⁷⁾에 의하면 익현(chord)형상의 노치는 반타원형(semi-elliptical) 노치에 비하여 균열 깊이에 대한 감수성이 좋은 것으로 알려져 있다.

2.2 예비피로균열 형성

익현 노치로부터 형성되는 피로균열의 형상은 Fig. 2에 점선으로 나타내었다. 예비피로균열(fatigue precrack)은 상온에서 항복응력보다 낮은 하중에서 5 Hz의 정현파형 하중을 이용하여 형성하였다. 노치로부터 형성되는 균열은 노치의 중앙부(Fig. 2의 (f))에서의 응력확대계수값이 양단(兩端)부(Fig. 2의 (e)와 (g))보다 크므로 활모양의 형상으로 성장된다.^(8,9) 균열이 성장됨에 따라 균열선단 원호의 곡률 반경은 줄어들게 되며, 원호의 중심이 원형봉재 시편의 표면으로부터 0.06D(Fig. 2의 (h))인 곳에 위치한 균열 형상으로 성장할 때까지는 피로균열은 노치의 양단부를 벗어나지 않는다.

Table 1 Chemical composition of the test material

(a) Material A

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
Wt(%)	0.1	0.45	0.013	0.013	0.63	1.19	0.61

(b) Material B

Element	C	Si	Mn	P	S	V	Cu	Nb	Ni	Mo	Cr
Wt(%)	0.16	0.74	0.59	0.005	0.001	<0.02	<0.02	<0.02	0.22	0.63	1.44

Table 2 Mechanical properties of the test material

(a) Material A

Test temp.	Young's modulus	0.2% Yield stress	Tensile strength	Elongation	Reduction of area
°C	GPa	MPa	MPa	%	%
24	206.8	211.6	454.3	36.9	71.0
538	140.6	131.0	223.0	49.0	84.8

(b) Material B

Test temp.	0.2% Yield stress	Tensile strength	Elongation	Reduction of area
°C	MPa	MPa	%	%
24	394.5	576.2	28.50	74.89
538	286.9	470.7	26.89	85.63
	298.3	458.4	29.49	88.83

다. 이와 같은 과정으로 예비피로균열은 피로균열이 노치의 양단부를 벗어나기 직전까지, 즉 a/D 가 약 0.1 정도가 될 때까지 형성시킨다. 이를 위해, 예비피로균열 형성시에 이동식 현미경을 사용하여 노치의 양단부인 Fig. 2의 (e)와 (g)점을 관찰하여 표면균열이 양단에서 벗어날 때 실험을 정지하였다. 이후, 고온 피로균열성장 시험을 실시하여 균열길이가 약 $0.2D$ 에 이를 때까지는 전 원호상에서 응력확대계수값이 거의 일정하므로⁽⁹⁾ 동심원 형

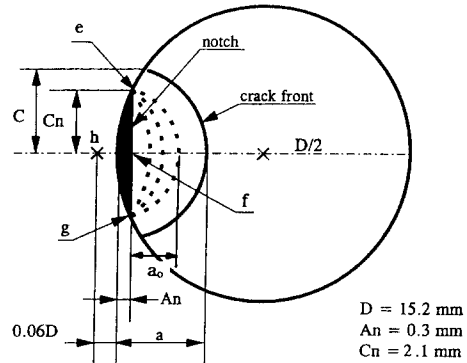


Fig. 2 Schematic diagram showing fatigue crack development

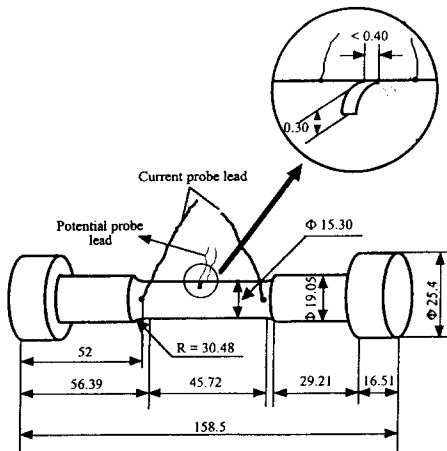


Fig. 1 Geometry of surface notched cylindrical specimen (unit : mm)

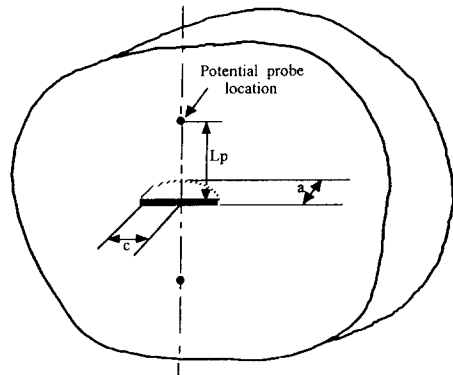


Fig. 3 Two-dimensional surface crack in an infinite plate

Table 3 Fatigue crack growth test conditions

Specimen number		Initial potential (mV)	Final potential (mV)	Max. load (kN)	Min. load (kN)	Total cycles (N)
Material A	1	0.361	0.649	36.90	1.85	7600
	2	0.357	0.640	36.90	1.85	5600
	3	0.376	0.613	30.75	1.54	9406
Material B	1	0.366	0.649	55.52	2.78	8500
	2	0.422	0.698	64.06	3.20	6100

태로 피로균열이 성장하게 된다. 따라서 고온 피로 균열성장 시험은 균열길이가 0.1 D~0.25 D인 범위에서 실시하였다.

2.3 균열길이 모니터링

균열길이는 Roe와 Coffin⁽¹⁰⁾이 제안한 식을 사용하여 직류전위차법으로 모니터링 하였다. 균일한 전류가 통과하는 상태의 무한평판에 Fig. 3에 보인 바와 같이 길이 a, 표면길이 2c의 표면균열이 존재할 때 원형봉재 시편 균열면의 중심선에서 균열면의 상하로 L_p의 거리만큼 떨어진 위치에서 측정된 전위는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$V = V_0 L_p \frac{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} \tan \theta}{E(k, \pi/2)} + E(k, \theta) \tag{1}$$

이 때,

$$k = \sqrt{\frac{c^2 - a^2}{c^2}}$$

$$E(\delta_1, \delta_2) = \int_0^{\delta_2} (1 - \delta_1^2 \sin^2 \phi)^{1/2} d\phi$$

$$\theta = \tan^{-1}(\sqrt{a})$$

$$a = \frac{1}{2} \left[\frac{L_p^2 - c^2}{a^2} + \sqrt{\left(\frac{L_p^2 - c^2}{a^2} \right)^2 + \frac{4c^2 L_p^2}{a^4}} \right] \tag{L_p > c \text{인 경우}}$$

$$a = \left[\frac{2c^2 L_p^2 / a^4}{\frac{c^2 - L_p^2}{a^2} + \sqrt{\left(\frac{c^2 - L_p^2}{a^2} \right)^2 + \frac{4c^2 L_p^2}{a^4}}} \right] \tag{L_p < c \text{인 경우}}$$

이다.

식 (1)에 의해 예측된 균열길이의 정확도와 적절한 전위측정위치(L_p)의 결정을 위해 Fig. 2에 보인 바와 같은 피로균열 형상으로 균열길이가 서로 다

른 실제 결함을 모사(simulation)하여 단계별로 방전가공된 시편을 준비하였다. 상온 및 538°C에서 L_p 위치를 네곳으로 변경하면서 전위차(V/V₀)와 균열 길이(a - a₀)를 측정하여 측정값과 식 (1)을 이용하여 계산한 이론값을 비교하였다. 초기 전위값 V₀는 초기 균열길이(a₀)가 1.47 mm 일때의 전위값으로 정의하였다.

2.4 고온 피로균열성장 시험

고온 피로균열성장속도를 측정하기 위해 원형봉재 시편을 사용하여 Table 3에 보인 바와 같은 여러 하중소간에서 하중비(R)가 0.05이고, 하중증가 시간 및 하중감소 시간이 각각 1초인 삼각파형으로 실험하였다. 직류전위차값으로부터 계산되어진 균열길이(a/D)의 비가 0.25가 될 때까지 실험한 후, 시편을 액체질소로 냉각시켜 시온에서 파단시켜 파단면을 관찰하였다. 원형봉재 시편으로 측정된 균열성장속도와 C(T) 시편을 사용하여 측정된 고온 피로균열성장속도^(11,12)를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 균열길이 모니터링

Fig. 4는 상온에서 측정된 V/V₀값과 방전가공된 균열 길이의 관계를 보여준다. 전위측정위치(L_p)는 1, 2, 3 및 4 mm로 하였다. 이 데이터로부터, 원형봉재 시편에 부착되는 전위측정용 선(potential probe)의 적정위치를 2 mm로 결정하였다. 균열면으로부터 2 mm떨어진 위치에 전위측정용 선을 부착하는 경우, 선을 점용집으로 부착할 때 발생하는 용접위치의 오차에 따른 측정전위의 오차가 L_p < 2 mm인 경우 보다 매우 작다. 또한, 균열길이에 대

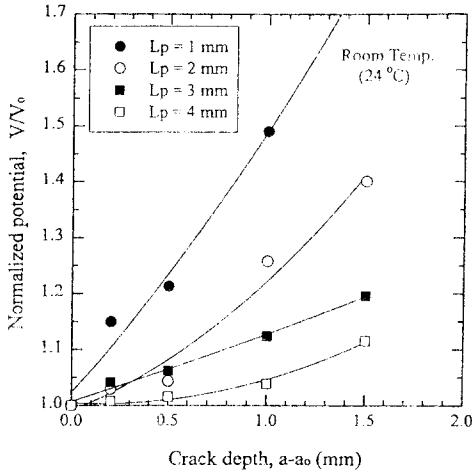


Fig. 4 Relations between normalized potential output and crack depth at different lead wire location (L_p)

한 측정감도가 다른 위치($L_p > 2$ mm)에 선을 부착하는 경우보다 높게 된다. Fig. 5는 실험온도, 538°C에서 측정된 V/V_o 값과 방전가공된 균열길이의 관계를 보여준다. 이 때 L_p 는 2 mm이고, 전류 입력값이 15A, 20A 두 조건에서 균열길이 감수성(sensitivity)이 좋은 20A를 사용하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 균열길이 $a - a_0$ 가 0~1.0 mm 범위에서는 측정된 V/V_o 값이 식 (1)로 예측한 V/V_o 값과 일치하지만, 균열길이 $a - a_0$ 가 1.0~1.5 mm인 범위에서는 식 (1)로 균열길이를 예측하면 실제 균열보다 작게 평가됨을 알 수 있다. 또한, 식 (1)을 이용한 해석적인 방법으로 얻어진 균열길이값을 같은 그림에 실선으로 표시하였다. 따라서, 균열길이는 실측한 데이터로부터 구한 회귀선, 식 (2)로 계산하는 것이 더욱 정확하다. 이 회귀선을 Fig. 5에 점선으로 표시하였다.

$$\frac{V}{V_o} = 0.415(a - a_0)^2 - 0.0573(a - a_0) + 1.0268 \quad (2)$$

Roe와 Coffin이 제안한 식 (1)의 함수형태를 유지하면서 $a - a_0$ 가 1.5 mm인 경우 측정된 V/V_o 값(1.905)이 되도록 식 (1)에 보정계수를 곱하면, 수정된 Roe와 Coffin식의 보정계수는 1.309가 된다. 수정된 식으로 계산한 (V/V_o) 대 $(a - a_0)$ 관계는 Fig. 5에 일점쇄선(- · -)으로 표시하였다. 그림에서 수정된 Roe와 Coffin식으로 균열길이를 정확히 보

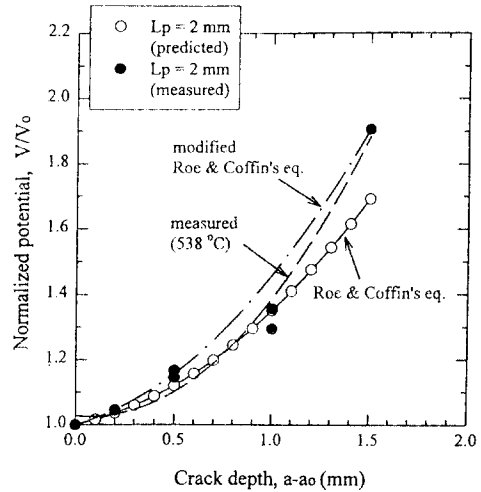


Fig. 5 Relations between calculated and measured normalized potential as a function of crack depth

나터링할 수 있음을 알 수 있다.

2.2절에서 설명한 대로 예비균열 형성후의 균열 성장이 동심원 형상으로 발생한다고 가정하면 표면 균열길이($2c$)와 균열길이(a)의 상관관계는 균열길이가 증가함에 따라 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$c = [58.5225 - ((5.83567 \times 10^{-2} a^2) + (1.07143 \times 10^{-1} a) - 7.65)]^{1/2} \quad (3)$$

Table 4에 파단된 시편으로부터 측정된 초기 및 최종 균열길이, 표면균열 길이값을 나타내었다. 표면균열의 측정값(C_m)은 식 (3)에 의한 예측 값과 비교하면 최대 오차가 2.8% 정도로서 2.2절에 가정한 형태로 균열이 성장함을 알 수 있다. 따라서, 균열성장시에 표면균열의 길이는 식 (3)과 수정된 Roe와 Coffin식으로 평가된 균열 길이값으로부터 예측할 수 있다. Fig. 6에 재료(A)의 1번 시편의 파단면 사진을 보였다. Fig. 2에서 예측한 균열 성장의 형상대로 균열길이와 표면균열이 성장하였음을 알 수 있다. 즉, 방전가공한 노치, 예비피로균열 그리고 고온 피로균열성장 부분이 Fig. 2에서 가정한 것과 유사하다.

3.2 고온 피로균열성장 시험결과

앞 절에서 보였듯이 고온 피로균열성장 시험에서 균열길이의 평가는 수정된 Roe와 Coffin식, 또는 식 (2)를 사용하면 된다. Fig. 7은 피로균열성장

Table 4 Measured values of surface crack and crack depth

Specimen number	$a_{mi}^{(1)}$ (mm)	$a_{mf}^{(2)}$ (mm)	$c_{mi}^{(3)}$ (mm)	$c_{mf}^{(4)}$ (mm)	$c_{pr}^{(5)}$ (mm)	Difference between ⁽⁴⁾ and ⁽⁵⁾ (%)	
Material A	3	1.49	3.50	2.34	4.18	4.07	2.6
Material B	1	1.76	3.59	2.28	4.06	4.01	1.2
	2	1.67	4.33	2.11	4.54	4.63	1.9

(Note) Crack depth could not be measured since spec. 1, 2 of material A was broken during crack growth testing.

- (1) Measured initial crack depth(mm).
- (2) Measured final crack depth(mm).
- (3) Measured initial surface crack(mm).
- (4) Measured final surface crack(mm).
- (5) Predicted final surface crack(mm) : Eq. (3).

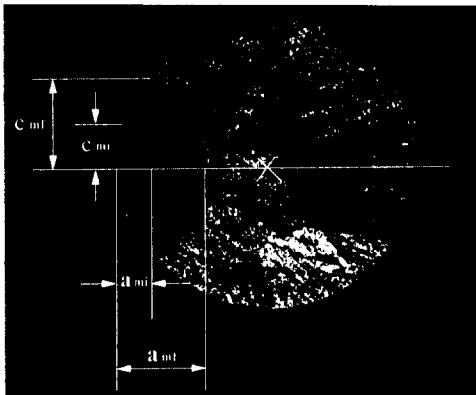


Fig. 6 Photograph of fractured cross section showing fatigue crack development

시험중에 측정된 직류전위차값으로부터 평가된 균열깊이를 수정된 Roe와 Coffin식을 사용한 경우와 식 (2)를 사용한 경우에 대해 비교한 그림이다. 유효깊이가 1.5~3.0 mm인 범위에서 두 경우의 평가값이 2.0~3.7%의 오차내에서 일치함을 볼 수 있다. 따라서 수정된 Roe와 Coffin의 식을 사용하여 균열깊이를 계산하였다.

측정된 V/V_0 값과 수정된 Roe와 Coffin의 식을 사용하여 평가되어진 균열 길이값과 피로 싸이클수로부터 균열성장속도 (da/dN)을 ASTM E647의 7-point polynomial법으로 결정하였다. 이때 응력 확대계수범위 ΔK 는 Ng와 Fenner⁽⁹⁾가 유도한 식 (4), Newman⁽¹³⁾이 사용한 식 (5)를 이용하여 계

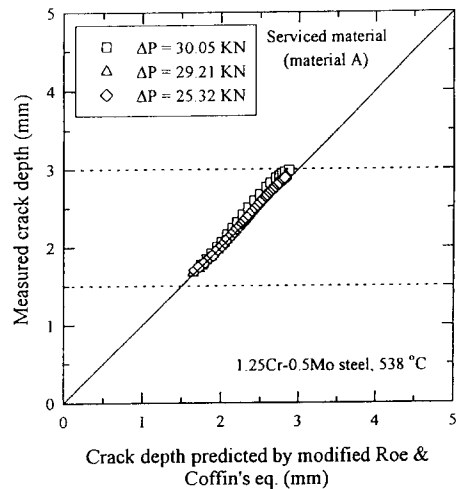


Fig. 7 Comparison between crack depths predicted by modified Roe & Coffin's Eq. and those polynomial regression eq. obtained from calibration specimens

산하였다.

$$\Delta K = \left[0.73 - 0.643 \left(\frac{a}{D} \right) + 3.55 \left(\frac{a}{D} \right)^2 \right] \times \frac{4\Delta P}{\pi D^2} \sqrt{\pi a} \tag{4}$$

단, a 는 균열깊이, D 는 시편의 직경이다.

$$\Delta K = \frac{4\Delta P}{\pi D^2} \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \tag{5}$$

단, Q 는 다음과 같이 정의된 형상계수(shape factor)이다.

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65}, \quad \frac{a}{c} \leq 1 \text{인 경우}$$

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{c}{a} \right)^{1.65}, \quad \frac{c}{a} > 1 \text{인 경우}$$

Ng와 Fenner의 식 (4)는 피로균열성장장 Fig. 2에 보인 바와 같이 동심원 형태로 발생한다고 가정했을때의 ΔK 계산식이며 따라서 ΔK 계산에 표면 균열 길이(c)의 정보가 필요없다. Newman의 식 (5)는 피로균열성장시 형상계수가 변할때 ΔK 를 평가할 수 있는 식이다. 따라서, 식 (5)를 ΔK 계산식으로 사용할 때에는 식 (3)을 사용하여 표면 균열길이(c)를 미리 계산하여야 한다.

Fig. 8에 고온 피로균열성장 시험으로 측정된 B 재료의 da/dN 대 ΔK 관계를 나타내었다. 이때 ΔK 의 관계는 식 (4)의 Ng와 Fenner의 식을 사용하였다. 원형봉재 시편으로 측정된 결과는 ○ 및 □으로, C(T) 시편으로 측정된 결과⁽¹²⁾는 ● 및 ■으로 표시하였다. 원형봉재 시편의 경우 전 시험영역에서 비균열 단면(uncracked ligament)의 탄성이 유지되도록 낮은 하중조건에서 실험하였다. 따라서, 그림에서 보는 바와 같이 원형봉재 시편 시험 결과의 ΔK 범위가 C(T) 시편 시험결과와 ΔK 범위보다 작은 곳에 형성되었다. 그러나, ΔK 의 범위가 일치하지 않더라도 Fig. 8에서 보듯이 da/dN 대 ΔK 의 경향이 서로 일치하고 있음을 추측할 수 있다. Fig. 8의 ΔK 의 계산에 식 (4) 대신 Newman의 식 (5)를 사용하여도 결과는 동일하였다.

Fig. 9에 A 재료의 da/dN 대 ΔK 측정 결과를 나타내었다. Fig. 8에 보인 경우와 달리, C(T) 시편 시험결과와 ΔK 범위와 원형봉재 시편 시험 결과의 ΔK 범위가 서로 겹치도록 하기 위해서 원형봉재 시편의 시험하중을 Table 3에 보인 바와 같이 증가시켜 실험하였다. 따라서, ΔK 값이 10~20 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 인 범위에서 균열성장속도 데이터가 C(T) 시편으로 측정된 경우와 원형봉재 시편으로 측정된 경우가 서로 잘 일치하였다. 하중이 높은 경우 원형봉재 시편에서 균열길이가 증가할수록 비균열부위의 단면이 감소되고 응력이 증가하므로 식 (4) 또는 식 (5)의 ΔK 계산식에 원형봉재 시편의 직경 D 를 식 (6)과 같이 같이 수정하여 계산하였다.

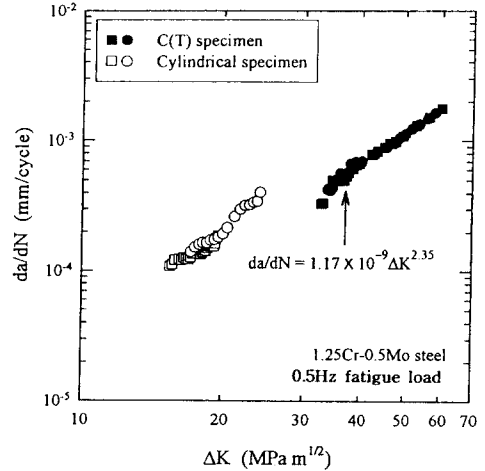


Fig. 8 Da/dN - ΔK relations of material B(new 1.25Cr-0.5Mo material)

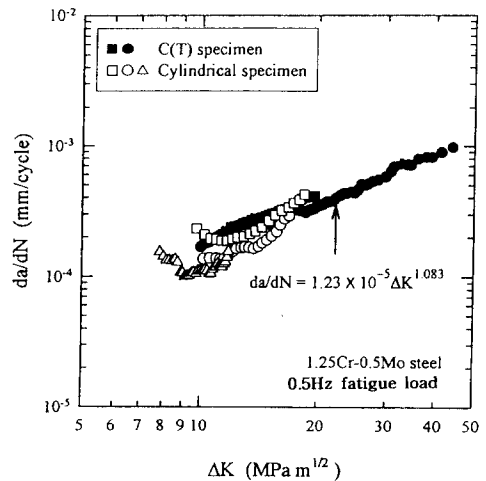


Fig. 9 Da/dN - ΔK relations of material A(serviced 1.25Cr-0.5Mo material)

$$D' = D_o + (D_f - D_o) \times \frac{(a^2 - a_o^2)}{(a_f^2 - a_o^2)} \quad (6)$$

단, D_o 는 초기 시편직경, D_f 는 최종 파단시의 시편의 감소된 직경, a_o 는 초기 균열길이, a_f 는 최종 균열길이, a 는 성장 진행되는 균열길이, 그리고 D' 는 수정된 직경이다.

Fig. 8과 9에서 보였듯이 표면균열을 갖는 원형봉재 시편(surface cracked round bar specimen)을 사용하여 본 논문에서 제안한 방법으로 균열성장속도를 측정하는 경우, ASTM⁽¹⁾ 규격 등에 명시한 C(T) 시편을 이용한 균열성장속도 측정결과와 동

일한 결과를 얻을 수 있다. 따라서, C(T) 시편을 사용할 수 없는 인장/압축 피로하중조건에서 균열성장속도를 측정할 경우에, 본 논문에서 제안한 원형봉재 시편을 사용하면 버튼형 치구(button end type grip)를 사용하여 쉽게 인장/압축 피로하중조건에서 균열성장속도의 측정시험을 할 수 있을 것이다. 또한, 용접재의 열영향부에서와 같이 균열성장속도 측정부위가 한정되어 있을 때에도 C(T)형 시편보다 원형봉재 시편을 사용하여 균열성장속도를 측정할 수 있다.

4. 결 론

C(T) 시편을 이용한 기존 고온 피로균열성장 시험법과 호환성이 있는 새로운 시험방법으로써, 표면균열을 갖는 원형봉재 시편(surface cracked round bar specimen)을 이용한 피로균열성장 시험법에 대해 제안하였다. 또한, 제안된 시험방법으로 538°C에서 2종의 1.25Cr-0.5Mo에 대해 인장/인장 피로하중조건에서 측정된 균열성장속도가 C(T) 시편을 이용한 시험법으로 측정된 균열성장속도와 일치함을 보여주었다. 세부 결과는 다음과 같다.

(1) 1.25Cr-0.5Mo강의 경우, 본 논문에서 제안한 표면균열을 갖는 원형봉재 시편을 사용하여 538°C에서 사이클 주기가 2초(0.5 Hz)인 삼각파형의 피로 시험을 실행하여 측정된 균열성장속도는 C(T) 시편으로 측정된 피로균열성장속도(da/dN)와 동일하였다. 따라서, 새로 제안한 시험방법의 유효성이 입증되었다.

(2) 직류전위차법을 이용하여 표면균열 및 균열 깊이를 정량적으로 평가하기 위해 Roe & Coffin이 제안한 식에 보정계수(1.309)를 도입하여 균열 깊이를 모니터링 하였다.

(3) 본 논문에서 제안한 시편 형상을 이용한 시험법을 사용하면, C(T) 시편 형상으로 열기 어려운 인장/압축 하중조건에서 균열성장속도를 측정 또는 측정할 균열성장 부위가 한정되어 있는 용접부에서 균열성장속도의 측정 등을 용이하게 수행할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 1995년도 전력기술 기초연구 과제(No. 95-86) 연구결과로서, 한국전력공사의 지원

에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었습니다. 또한, 본 연구를 수행하는 동안 실험 장비 사용을 지원해 준 한국표준과학연구원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) *ASTM Standard*, 1993, E 647-93, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates."
- (2) Bensussan, P., Piques, R. and Pineau, A., 1989, "A Critical Assessment of Global Mechanical Approaches to Creep Crack Initiation and Creep Crack Growth in 316L Steel," *Nonlinear Fracture Mechanics: Vol 1 - Time - Dependent Fracture*, ASTM STP 995, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 27 ~ 54.
- (3) Newman, J. C. Jr., 1981, "Stress Intensity Factors and Crack-Opening Displacements for Round Compact Specimens," *Int. J. Frac.*, Vol. 17, No. 6, pp. 567 ~ 578.
- (4) Johnson, H. H., 1965, "Calibrating the Electrical Potential Method for Studying Slow Crack Growth," *Materials Research & Standards*, 5(7), pp. 442 ~ 445.
- (5) Schwalbe, K. H. and Hellmann, D., 1981, "Application of the Electrical Potential Method to Crack Length Measurements Using Johnson's Formula," *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol. 9, No. 3, pp. 218 ~ 221.
- (6) Saxena, A. and Liaw, Peter K., 1986, "Remaining Life Estimation of Boiler Pressure Parts-Crack Growth Studies," *Final Report EPRI Contract RP 2253-7*.
- (7) Van Stone, R. H., Krueger, D. D. and Duvelius, L. T., 1983, "Use of a DC Potential Drop Crack Monitoring Technique in the Development of Defect Tolerant Disk Alloys," *Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium-Volume II: Testing and Applications*, ASTM STP 791, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 553 ~ 578.
- (8) Athanassiadis, A., Boissenot, J. M., Brevet, P.,

- Francis, D. and Raharinaivo, A., 1981, "Linear Elastic Fracture Mechanics Computations of Cracked Cylindrical Tensioned Bodies," *International Journal of Fracture*, 17, pp. 553~566.
- (9) Fenner, D. N. and Ng, C. K., 1988, "Stress Intensity Factors for an Edge Cracked Circular Bar in Tension and Bending," *International Journal of Fracture*, 36, pp. 291~303.
- (10) Gangloff, R. P., 1981, "Electric Potential Monitoring of Crack Formation and Subcritical Growth From Small Defects," *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, 4(1) pp. 15~33.
- (11) Yoon, K. B., 1990, "Characterization of Creep Fatigue Crack Growth Behavior Using the Ct Parameter," Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- (12) Yoon, K. B., Baek, U. B. and Shin, K. I., 1995, "Development of a General Model for Predicting Crack Growth Rates At High-Temperature," 2nd Year, *KRISS-95-075-IR*.
- (13) Newman, J. C., 1978, "A Review and Assessment of the Stress-Intensity Factors for Surface Cracks," *NASA Technical Memorandum 78805*, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, Hampton, Va