

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.12.1257>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

Grade 91 강의 크리프 균열성장 거동에 대한 천이영역과 정상상태영역의 상관 관계

박재영^{*†} · 김우곤^{**} · I.M.W. Ekaputra^{*} · 김선진^{*} · 김응선^{***}
* 부경대학교 기계설계공학과, ** 한국원자력연구원 원자력소재개발부,
*** 한국원자력연구원 수소생산원자로기술개발부

Correlation Between Transient Regime and Steady-State Regime on Creep Crack Growth Behavior of Grade 91 Steel

Jae-Young Park^{*}, Woo-Gon Kim^{**}, I.M.W. Ekaputra^{*}, Seon-Jin Kim^{*} and Eung-Seon Kim^{**}

^{*} Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

^{**} Korea Atomic Energy Research Institute.

(Received July 20, 2015 ; Revised August 18, 2015 ; Accepted September 4, 2015)

Key Words: Grade 91 Steel(Grade 91 강), Creep Crack Growth Rate(크리프균열성장속도), Transient Time(천이시간), C*-Parameter(C*-매개변수)

초록: 제 4 세대 원자로의 고온 구조재료로 사용되는 Grade 91 강의 크리프 균열성장 거동에 대한 천이 영역과 정상상태영역에서의 상관 관계를 조사하였다. 이를 위해 600°C의 동일한 온도 및 동일한 하중조건에서 1/2" CT 시편을 사용하여 크리프 균열성장 시험 데이터를 얻었다. 크리프 균열성장 속도식은 C*-과괴매개변수를 사용하여 천이영역과 정상상태영역에서의 평가 식을 각각 도출하였다. C*와 da/dt의 관계에서 천이영역의 크리프 균열성장 속도는 시험 데이터의 산포가 크지만 정상상태영역의 크리프 균열성장 속도와 비슷한 기울기로서 상관성이 있었으며 천이영역 균열성장속도는 정상상태 균열성장속도에 비해 약 5.6 배 낮았다. 본 결과를 이용하면 짧은 시간의 천이영역 균열성장속도로부터 장시간의 시험으로 얻을 수 있는 정상상태 균열성장속도를 예측할 수 있다.

Abstract: A correlation between the transient regime and steady state regime on the creep crack growth (CCG) for Grade 91 steel, which is used as the structural material for the Gen-IV reactor systems, was investigated. A series of CCG tests were performed using 1/2" CT specimens under a constant applied load and at a constant temperature of 600 °C. The CCG rates for the transient and steady state regimes were obtained in terms of C* parameter. The transient CCG rate had a close correlation with the steady-state CCG rate, as the slope of the transient CCG data was very similar to that of the steady state data. The transient rate was slower by 5.6 times as compared to the steady state rate. It can be inferred that the steady state CCG rate, which is required for long-time tests, can be predicted from the transient CCG rate obtained from short-time tests.

1. 서 론

Mod. 9Cr-1Mo(ASME Grade 91) 강은 오스테나이트계 316 스테인리스 강에 비하여 열팽창 계수가 낮고 열전도도가 높고, 우수한 피로강도를 갖기 때

문에 제 4 세대 원자로인 소듐냉각고속로(sodium-cooled fast reactor, SFR)의 증기발생기, 핵연료 피복관, 고온 배관 및 열 교환기로 사용되며, 또한 초고온가스로(very high temperature reactor, VHTR)의 압력용기 후보재료로 고려되고 있다.^(1~3) 이러한 원자로 사용되는 구조물들은 고온에서 60년 이상의 장기간 동안 사용되도록 설계되기 때문에 사용 중 재료 내에 내재된 결함이나 크리프 손상에 의하여 미소 균열들의 성장에 의해 발생하는 크리프

† Corresponding Author, jypark1208@kaeri.re.kr
© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

균열성장이 수명의 대부분을 차지 할 수 있기 때문에 크리프 균열성장속도(creep crack growth rate, CCGR)를 정확히 평가하는 것이 필요하다.⁽⁴⁻¹⁰⁾

크리프 균열성장을 평가하는 가장 일반적인 방법은 파괴역학 매개변수인 C^* 를 사용하는 것이며, C^* 와 균열성장속도(da/dt)의 관계를 멱급수(power law) 형태의 식으로 정의하여 크리프 균열성장 속도식을 얻는다. 그러나 C^* 매개변수는 초기시간의 천이영역(transient regime)의 거동을 제외하고 균열이 광범위한 영역으로 진전되는 정상상태영역(steady-state regime)에서의 균열성장 속도를 평가하는 것이다. 지난 수년간 C^* 에 의한 크리프 균열성장 속도의 평가에 있어서 정상상태 영역에 대한 연구는 다수 보고되어 있다.^(5,7,8,13) 그러나 초기 천이영역에서의 균열진전 거동과 정상상태영역과의 상호 관계를 다룬 연구는 없으며, 실제 균열성장 평가에 천이영역 데이터는 평가에 사용되지 않고 있다.

본 연구에서는 Grade 91 강 CT 시편을 이용하여 600°C의 동일한 온도 및 5000N의 동일한 하중조건에서 크리프 균열성장 시험을 실시하여 총 5개의 시험 결과를 얻었다. 균열성장 시험 데이터를 이용하여 천이영역에서의 균열성장 속도식을 도출하고 정상상태 균열성장 속도와의 상관 관계를 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 Grade 91 강은 열간압연 후 1050°C/1min/mm 와 770°C/3min/mm 의 조건으로 소준(normalizing) 및 소려(tempering)되었고 화학적 조성은 Table 1에 나타내었다.

크리프 균열성장 실험은 ASTM E1457⁽¹¹⁾에 준하여 실시하였다. 본 실험에 사용한 시편은 Fig. 1과 같은 1/2" CT(compact tension) 시편을 사용하였으며 초기 균열비(a/W)는 약 0.45 가 되도록 하였다. 균열의 터널링 현상을 막기 위해 시편의 두께의 20%로 측면 홈(side groove)을 가공하였다. 예비균열은 방전가공(electro discharge machining) 방법으로 형성시켰다. 열전대는 시편의 온도를 측정하기 위해 시편 균열 면의 아래방향으로 2~5 mm 떨어진 비균열부에 부착하였다. 시험 중의 균열길이는 직류 전위차법(direct current potential drop, DCPD)으로 측정하였다. 이 방법은 8A 의 일정한 전류를 시편에 입력하고 균열성장에 따른 저항변화에 의한 전위차를 측정하는 것이다. 이 값을 다음의 Johnson⁽¹²⁾식에 대입하여 균열 길이로 환산하였다.

$$\frac{a}{W} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\frac{\cosh(\pi Y_0 / 2W)}{\cosh \left\{ \frac{V}{V_0} \cosh^{-1} \left(\frac{\cosh \pi Y_0 / 2W}{\cosh \pi a_0 / 2W} \right) \right\}} \right] \quad (1)$$

여기서 a 는 균열길이, W 는 시편의 너비, V_0 는 직류 전위차방법의 초기 전압, V 는 실험 중에 측정된 전압, Y_0 는 시편 앞쪽에 용접된 와이어 사이의 거리이다.

시험조건은 600°C 에서 5000N 의 동일한 하중조건에서 총 5 개의 시편에 대하여 실험을 실시하였다. 시험 종료시간은 C^* -매개변수의 유효성이 충족되는 $a/W=0.4-0.7$ 범위내 시간인 즉 균열길이가 약 1.5~2.5mm 진전되었을 때 정지하였으며, 시험이 종료된 시편은 액체질소에 담근 후 저온에서 파단 시켰다. 균열길이 측정은 파단 시편의 두께 방향으로 8 등분하여 9 점에서 균열길이를 측정하였다. 균열길이의 측정 결과 Johnson 식에 의한 예측균열길이(a_{pf})와 측정균열길이(a_{mf})가 ASTM E1457 요구조건의 오차범위(0.85~1.15) 내에 있음을 Table 3에 보인 것처럼 확인할 수 있다. 600°C 에서 고온 인장 및 크리프 시험으로 얻어진 Grade 91 강의 고온 재료물성 값은 Table 2에 정리하여 나타내었다. Table 2에서 나타낸 E 는 탄성계수, σ_y 는 항복강도, D 와 m 은 인장 시험에서 얻어진 소성 변형 상수이고, A 와 n 은 Norton 식에 의해 얻어진 크리프 상수이다. Table 3의 a 는 CT 시편에서 V-형태의 노치까지의 길이, a_0 는 방전가공에 의한 예비균열을 포함한 길이, W 는 시편의 너비, B 는 시편의 두께, B_N 은 측면 홈을 제외한 시편의 두께이다.

Table 1 Chemical composition of the Grade 91 steel

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni
0.115	0.415	0.012	0.0014	0.230	0.038	0.220
Cr	Mo	Al	Nb	V	Ti	N
8.9	0.869	0.020	0.073	0.194	0.003	0.0513

Table 2 Mechanical properties of the Grade 91 steel

Temp. (°C)	E (GPa)	σ_y (MPa)	$\epsilon_p = D(\sigma/\sigma_y)^m$		$\dot{\epsilon}_{ss} = A\sigma^n$	
			D	m	A	n
600	164	247.5	0.0017	6.4	1.28E-27	9.98

Table 3 Crack size and specimen dimension of creep crack growth tests

Specimen No.	a (mm)	a_0 (mm)	a_{pf} (mm)	a_{mf} (mm)	B (mm)	B_N (mm)	W (mm)	$0.85 \leq (\delta a_{pf}) / (a_{mf} - a_0) \leq 1.15$
G91-4	10.022	11.669	13.086	13.283	10.119	12.654	25.299	0.878
G91-8	10.102	11.456	13.624	13.694	10.161	12.688	25.400	0.968
G91-9	10.077	11.378	13.690	13.726	10.168	12.655	25.345	0.984
G91-16	10.086	11.614	14.224	14.355	10.179	12.68	25.396	0.952
G91-17	10.075	11.605	13.436	13.283	10.172	12.67	25.346	1.091

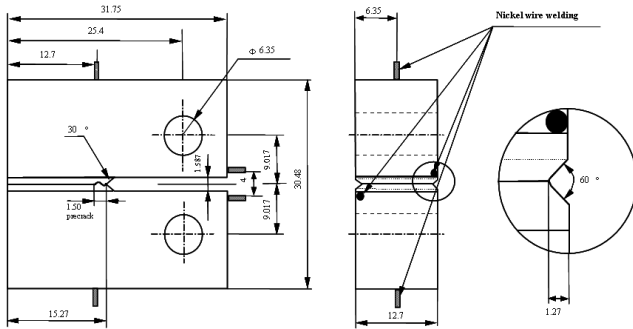


Fig. 1 Geometry of 1/2" CT specimen

3. 결과 및 고찰

3.1 파괴역학 매개변수 C^* 의 계산⁽¹¹⁾

C^* 는 크리프 영역이 2차 정상상태 크리프가 지배적인 경우에 유용한 파괴역학 매개변수로 사용된다. 크리프 변형률 속도($\dot{\epsilon}_{ss}$)는 식(2)와 같으며 크리프 균열성장 속도와 C^* 의 관계는 식(3)과 같이 표현이 된다.

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A\sigma^n \quad (2)$$

$$\dot{a} = B(C^*)^q \quad (3)$$

여기서 B 와 q 는 재료상수로 $\log da/dt - \log C^*$ 의 관계로 나타낼 때 절편과 기울기 값이 되며, n 은 크리프 지수이다.⁽¹³⁾

CT 시편에서 C^* 값은 식 (4)로 계산되고, 크리프에 의한 변위속도(\dot{V}_C)는 하중-선 변위속도(\dot{V})에서 균열성장 속도(\dot{a})에 따른 재료의 탄성 및 소성변형의 증가분을 뺀 것으로써 식 (5)로 구해

진다.

$$C^* = \frac{P\dot{V}_C}{B_N(W-a)} \cdot \frac{n}{n+1} \quad (2.20) \quad (4)$$

$$\dot{V}_C = \dot{V} - \frac{\dot{a}B_N}{P} \left[\frac{2K^2}{E'} + (m+1)J_P \right] \quad (5)$$

여기서 P 는 하중, V 는 하중선 변위(load-line displacement, LLD), B_N 은 시편의 유효두께, W 는 시편의 폭, a 는 균열길이, E' 는 평면 변형률 상태에서의 탄성계수, 그리고 K 는 응력확대계수이다. J_P 는 J -적분의 완전 소성 부분이다.

이렇게 계산된 C^* 는 천이시간(t_T)에 의해 소규모 크리프 영역과 정상상태를 구분하게 된다. ASTM 규정에서 천이시간은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$t_T = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E(n+1) \cdot C^*} \quad (6)$$

3.2 크리프 균열성장 거동

크리프 균열 성장 시험을 통해 크리프 균열 성장 거동을 평가하기 위해 각 시편들의 시간에 대한 균열 길이(Δa)의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 600°C의 동일한 온도에서 동일한 하중 조건인 5000N에서 실험하였으나 균열성장 곡선의 모양이 시편 별로 약간씩 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 크리프 균열성장 거동이 변동성을 지닌 하나의 확률적 과정임이 판단된다. 따라서 이를 평가하기 위해서는 각 시험시간을 전체 시험시간 즉 시험종료(t_f)로 나누는 정규화 시간(normalized time, t/t_f)에 대하여 균열성장 곡선 변화를 고찰하는 것이 같은 조건에서

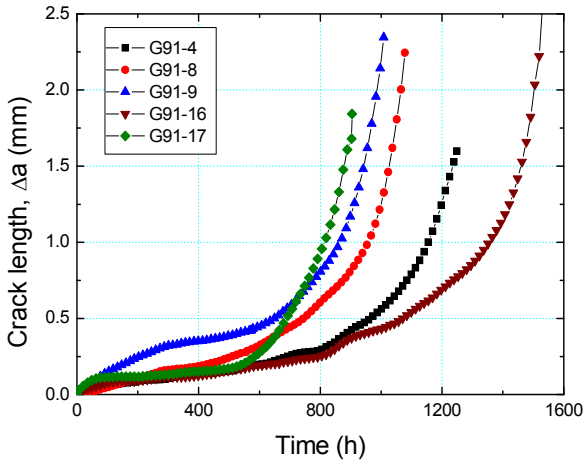


Fig. 2 Plot of crack length vs. time for Grade 91 steel

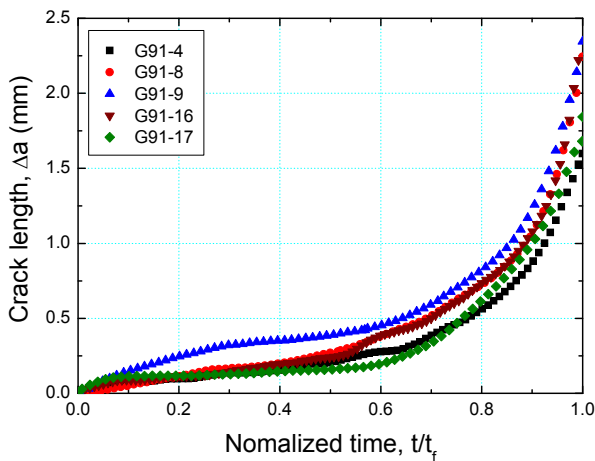


Fig. 3 Plot of crack length vs. normalized time for Grade 91 steel

균열성장 거동의 불확실성을 평가하는데 있어서 타당하다고 볼 수 있다.

Fig. 3 은 정규화 시간(normalized time) 에 대한 크리프 균열성장 곡선을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 5 개의 시편 모두 실험 전체 시간의 약 50%에 이르기까지 균열성장이 매우 느린 것으로 나타난다. 이는 실험 초기에는 균열 선단에서의 크리프 영역이 전체시편으로 확장되고 있는 천이 영역이기 때문에 균열성장이 느린 것으로 판단된다. 그 이후의 균열성장 곡선의 기울기가 가파르게 증가하게 되며, 이는 시편의 균열선단을 포함한 전 영역에 확장된 크리프 상태에 놓여지므로 균열이 빠르게 성장하는 것으로 판단된다.

3.3 초기 천이시간의 통계적 분석

크리프 균열성장 속도(da/dt)는 일반적으로 C^* 와 함께 나타내어 멱 급수 형태로 정의한다. 하지만 C^* 는 정상상태 영역에서의 크리프 균열성장을

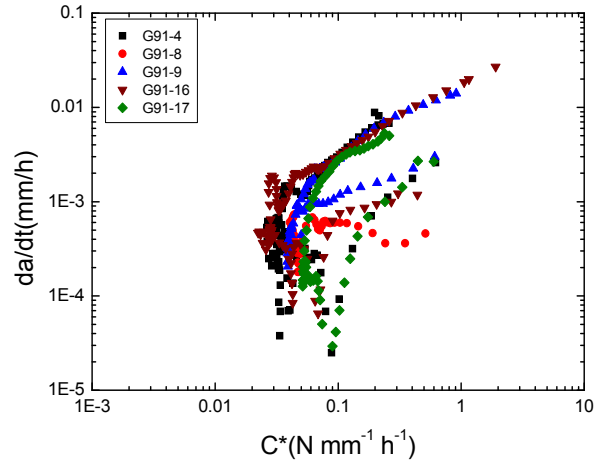


Fig. 4 Plot of da/dt vs. C^* for all data of Grade 91 steel

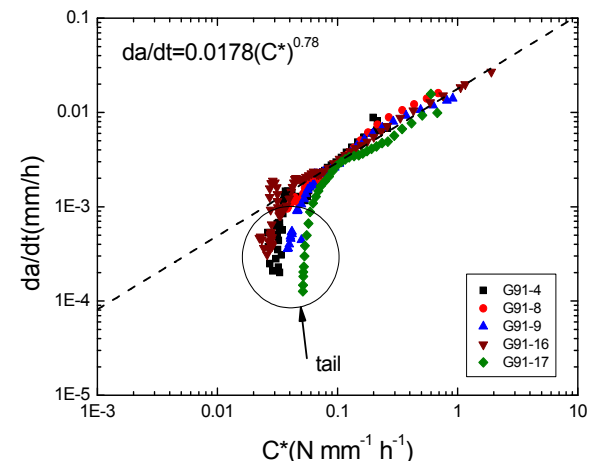


Fig. 5 Plot of da/dt vs. C^* for steady state CCGR of Grade 91 steel

설명하는 파괴역학 매개변수로서 초기 천이거동을 포함하지 않는다. 초기 천이거동이 발생하는 이유로서는 균열선단의 소규모 크리프 조건(small scale creep condition)이 확장 크리프 조건(extensive creep condition)으로 발전하는 사이에 나타난다고 알려져 있다.⁽¹⁵⁾ 따라서 일반적으로 t_f 의 최대값을 기준으로 그 이후의 데이터를 사용하여(초기 천이거동을 제외) da/dt 와 C^* 의 log-log 관계로 정식화한다.

Fig. 4 는 초기영역 및 정상상태 영역 모두를 포함한 데이터를 나타낸 것이며, Fig. 5 는 초기 천이 영역을 제외한 정상상태영역 부분에 대하여 da/dt 와 C^* 의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보인 것처럼 초기 천이거동의 마지막 부분에 “꼬리(tail)” 형태의 데이터가 남아 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 크리프 연성 재료에서 전형적으로 관찰되는 초기 천이영역에서의 거동을 보여주는 예이며, 소규모 크리프 영역에서의 응력완화 거동에 의한 현상, 산화의 영향, 소성역의 영향 등 여러 원인에

의한 것으로 보고되고 있다.⁽¹⁴⁾ Tail 거동에 대한 상세 내용은 3.4 절에서 기술한다.

각 시편의 꼬리 형태는 천이시간의 값에 따라 시작점이 달라지게 되는 데 천이시간이 동일조건에서 실험한 각 시편에 대해 불확정성이 존재하므로 이를 평균(average, \bar{X}), 표준편차(standard deviation, SD), 변동계수(coefficient of variation, CV)의 통계량을 적용하여 분석한다. 각 통계량은 다음의 식으로 표현이 된다.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (7)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (8)$$

$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \quad (9)$$

여기서 N 은 표본의 모수, X_i 는 표본값을 나타낸다. Table 4 에서처럼 천이시간은 평균적으로 약 512.6 시간 정도이며 이는 전체 실험 시간에 약 45% 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 천이시간의 표준편차는 73.7 로 천이시간의 산포도가 크게 나타나는 것으로 보이나 실제 변동계수는 약 14% 정도로 동일한 하중 조건에서의 변동성은 그리 크지 않다. 각 천이시간에서의 균열길이는 0.147 ~ 0.366 mm 정도로 진전되었으며 변동계수는 약 39.7% 로 천이시간에 따른 균열길이의 변동양상이 큰 것으로 나타났다. 각 시편의 균열길이가 다소 차이를 보이는 것은 재료 내부의 불균질성 및 여러 요인에 기인한 실험적 오차에 의하여 항상 불확정성(uncertainty)을 내포하고 있기 때문이다.

3.4 크리프 균열성장 속도의 천이영역과 정상상태영역의 상관 관계

천이 영역을 제외한 정상상태 영역만의 데이터를 최소자승법으로 피팅하여 나타내면 Fig. 5 와 같이 정상상태의 균열성장속도를 식 (10)과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{a}_{SS} = 1.78 \times 10^{-2} (C^*)^{0.78} \quad (10)$$

한편, 앞서 기술한 것처럼 Grade 91 강은 초기 천이영역에서 “꼬리” 거동을 보였다. 크리프 균열성장 시험에서 대표적으로 관찰되는 꼬리 모양의 곡선을 도식적으로 나타내면 Fig. 6 에서와 같이 “Type-I” 과 “Type-II”의 두 가지 곡선 형태로 나타낼 수 있다.⁽¹⁶⁾ Type-1 곡선의 경우는 균열선단에서

Table 4 Result value for transient time

Sp. no.	Test time, t_f (h)	t_T (h)	t_T/t_f	Δa_T (mm)
G91-4	1249.8	553	0.442	0.182
G91-8	1078.2	575	0.533	0.294
G91-9	1008.7	455	0.451	0.366
G91-16	1531	567	0.370	0.178
G91-17	909.3	413	0.455	0.147
\bar{X}	1155.4	512.6	0.450	0.2334
SD	243.9	73.7	0.0578	0.0927
CV	0.211	0.143	0.128	0.397

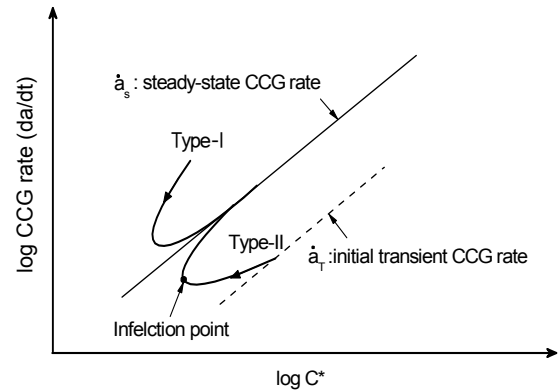


Fig. 6 Schematic illustration of “tail” shapes observed experimentally in the plot of da/dt vs. C^*

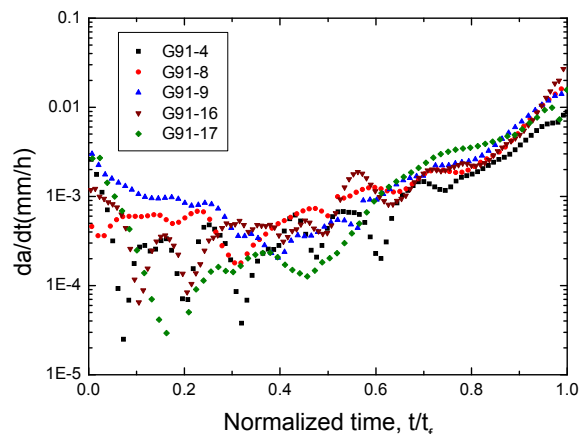


Fig. 7 Plot of $\log da/dt$ vs. normalized time for Grade 91 steel

응력 재분배가 일어나기 전에 균열진전을 시작하는 재료인 경우에 쉽게 일어난다. 초기에 균열속도가 감소하는 것은 응력 재분배 과정 중에 응력이완이 일어나는 균열선단 영역에서 이미 균열을

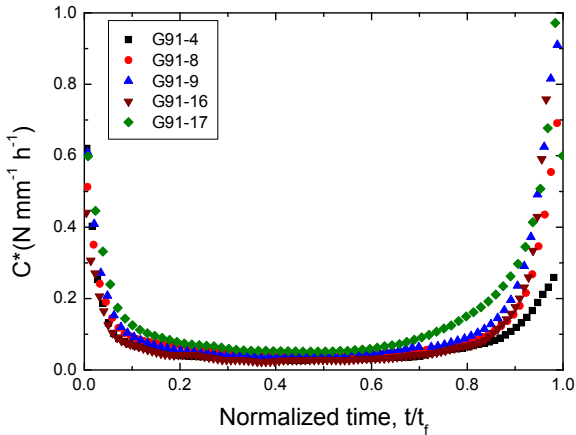


Fig. 8 Plot of C^* vs. normalized time for Grade 91 steel

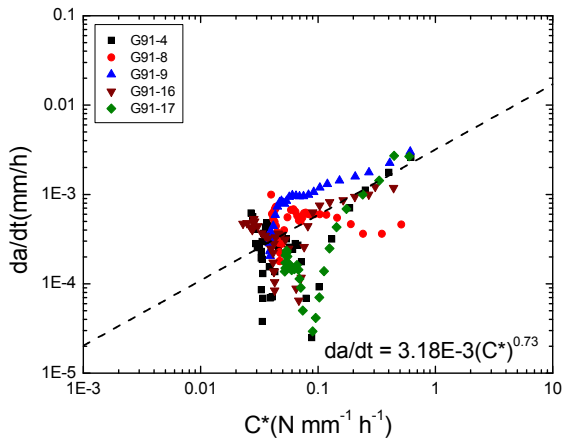


Fig. 9 Plot of da/dt vs. C^* for transient CCGR of Grade 91 steel

일으키기 때문이다. Type-I 곡선의 경우는 크리프 균열성장속도를 C_t 나 $C_{(t)}$ 파괴 매개변수로 평가되어야 한다.⁽¹⁶⁾ 위의 두 파괴매개변수는 1 차의 천이영역을 포함하기 때문에 C^* 매개변수 보다 높은 보수적인 균열성장속도를 평가하며 꼬리 거동은 정상상태 균열성장속도에 가깝도록 평가한다.

이에 대하여 Type-II 곡선은 손상이 균열선단에서 누적되는 동안 1 차 크리프 효과에 기인하여 발생된다. C^* 값은 1 차 크리프 시간에서 크리프 속도가 감소하는 시간영역에서 감소하며 이후의 균열진전 속도는 정상상태 조건에 점진적으로 접근하게 된다. Grade 91 강은 Type II 곡선에 해당되고 있음을 시험 결과로부터 확인할 수 있다. Grade 91 강에서의 꼬리 발생은 Fig. 2 및 3 에서 보인 시간변화에 따른 균열성장 곡선과 밀접한 관계가 있다. 균열성장 곡선은 크리프 곡선과 마찬가지로 균열성장길이 시간이 따라서 클 경우 Type II 의 거동을 잘 보이게 된다. Grade 91 강은 Fig. 7 에서 보인 것처럼 정상적인 속도에 도달하기 전 1 차의 천이영역($t_T=0.45$ 이하)에서 빠른 균열속도의

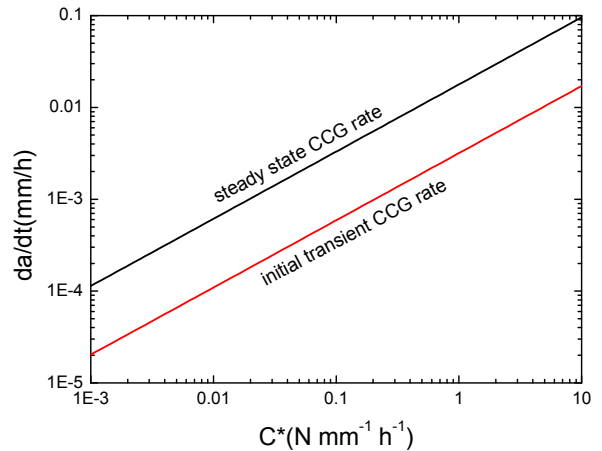


Fig. 10 Comparison of initial transient CCGR line and steady-state CCGR line

감소를 보인다. 또한 C^* 값도 Fig. 8 에 서처럼 초기 천이영역에서 급격한 감소를 보이고 있음을 볼 수 있다. 이러한 천이영역에서의 균열속도 및 C^* 의 감소는 초기 탄성상태에서부터 정상상태 크리프에 도달까지 균열선단의 응력 재분배와 1 차 크리프 효과에 기인된다.

Grade 91 강은 초기천이영역에서 꼬리거동으로부터 변곡점(inflexion point) 이하의 초기 천이영역 균열성장속도를 Fig. 6 에 나타낸 것처럼 시험 데이터로부터 예측할 수 있다. Fig. 4 의 전체 CCG 데이터에 대하여 식 (6)에 의해 계산된 천이시간 (t_T) 이하의 영역 데이터만 나타내면 Fig. 9 의 천이영역 데이터가 얻어진다. 그림에서처럼 초기 천이영역의 데이터는 매우 불안정하고 산포도가 크지만 최소자승법으로 회귀선을 구하면 다음과 같은 균열성장 속도 예측식을 얻을 수 있다.

$$\dot{a}_T = 3.18 \times 10^{-3} (C^*)^{0.73} \quad (11)$$

식 (11)에서 얻은 천이영역 결과를 정상상태 영역 속도식과 비교하면, 기울기에 해당하는 q 의 경우 천이영역은 0.73 으로 정상상태 영역의 기울기 0.78 과 거의 같은 값을 갖는다. 그리고 절편에 해당하는 B 의 경우, 천이영역 값은 정상상태 영역 값에 비하여 약 5.6 배 낮은 결과를 보였다. Grade 91 강의 크리프 균열성장 속도에 대한 실험 결과의 정량적 차이를 이용하여 천이영역과 정상상태 영역에서의 균열성장 속도의 상관 관계식은 최종적으로 식 (12)로 나타낼 수 있으며, 그 비교 결과를 Fig. 10 에 나타내었다.

$$\dot{a}_T = \frac{1}{5.6} \times \dot{a}_s \quad (12)$$

대부분 재료들의 경우 초기 균열성장속도는 정상상태 해석으로부터 예측되는 것 보다 약 1-order 정도 낮게 예측되는 것으로 보고되는데,⁽¹⁶⁾ 본 결과 또한 약 1-order 정도 이내로 보고된 결과와 유사한 결과를 보이고 있다. 결국 Grade 91 강은 초기 천이영역의 균열성장 속도와 정상상태영역의 균열성장 속도는 같은 기울기로 상관 관계를 가지고 있기 때문에 짧은 시간의 초기 천이영역의 데이터부터 장시간 시험으로 얻어지는 정상상태 크리프 균열성장 속도를 추론할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 Grade 91 강의 크리프 균열성장 실험을 통하여 천이영역 균열성장속도와 정상상태영역 균열성장 속도 평가식을 얻고 이들의 상관관계를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Grade 91 강의 크리프 균열성장은 꼬리 거동은 초기 탄성상태에서부터 정상상태 크리프에 도달하기까지 균열전단의 응력 재분배와 1 차 크리프 효과에 기인되어 나타났다.

(2) 천이시간은 전체 실험시간의 약 45% 정도 차지하는 것으로 확인되었으며 각 시편에 대한 천이시간의 변동성은 크지 않았다.

(3) C^* 와 da/dt 의 관계에서 천이영역의 크리프 균열성장 속도는 시험 데이터의 산포가 크지만 정상상태영역의 크리프 균열성장 속도와 같은 기울기로 상관성이 있으며 초기 천이영역 균열성장속도는 정상상태영역 균열성장속도에 비해 약 5.6 배 정도 낮은 결과를 보였다.

(4) 본 결과를 이용하면 짧은 시간의 천이영역 균열성장속도로부터 장시간의 시험으로 얻어지는 정상상태 균열성장속도를 추론할 수 있다.

후 기

본 연구는 2015 년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 원자력 연구 개발 사업임(2012M 2A8A2025682).

참고문헌

(References)

- (1) Orr, J. and Burton, D., 1994, "Improving the Elevated Temperature Strength of Steel 91 (9%CrMoNbVN)," *Materials for Advanced Power Engineering*, Vol. 1, pp. 263~280.
- (2) Cadek, J., Sustek, V. and Pahutova, M., 1997, "An Analysis of Set of Creep Data for a 9Cr-1Mo-0.2V

- (P91 type) Steel," *Material Science and Engineering A*, Vol. 225, pp. 22~28.
- (3) Kim, W. G., Kim, S. H. and Ryu, W. S., 2001, "Creep Characterization of Type 316LN and HT-9 Stainless Steels by the K-R Creep Damage Model," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 11, pp. 1463~1471.
- (4) Anderson, T. L., 1995, *Fracture Mechanics*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, pp. 226~228.
- (5) Nikbin, K. M., Smith, D. J. and Webster, G. A., 1986, "An Engineering Approach to the Prediction of Creep Crack Growth," *Trans. of the ASME*, Vol. 108, pp. 186~191.
- (6) Saxena, A., 1997, *Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers*, CRC Press, NY, pp. 363~377.
- (7) Kim, W. G., Kim, H. H., Yoon, K. B. and Ryu, W. S., 2005, "Application of Creep Ductility Model for Evaluating Creep Crack Growth Rate of Type 316SS Series," *Material Science Forum*, Vol. 475-479, pp. 1433~1436.
- (8) Kim, W. G., Yoon, S. N., Ryu, W. S., Kim, S. J. and Yi, W., 2006, "Probabilistic Analysis of the Creep Crack Growth Rate of Type 316LN Stainless Steel by the Monte Carlo Simulation," *Journal of ASTM International*, Vol. 35, STP 1480, pp. 71~80.
- (9) Kim, W. G., Yin, S. N., Ryu, W. S. and Chang, J. H., 2006, "Creep Properties of Hastelloy-X Alloy for the High Temperature Gas-Cooled Reactor," *Key Engineering Material*, Vol. 326~328, pp. 1105~1108.
- (10) Kim, W. G., Kim, S. H. and Ryu, W. S., 2002, "Evaluation of Monkman-Grant Parameters for Type 316LN and Modified 9Cr-Mo Stainless Steels," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 11, pp. 1420~1427.
- (11) 2007, "Standard Test Method for Measurement of Creep Crack Growth Rates in Metals," *ASTM E1457-07*.
- (12) Johnson, H. H., 1965, "Calibrating the Electrical Potential Method for Studying Slow Crack Growth," *Material Research and Standard*, Vol. 5, No. 9, pp. 442~445.
- (13) Ryu, W. S., Kim, W. G. and Lee, K. Y., 2003, "Evaluation of Creep Crack Growth Behavior of Type 316LN Stainless Steel," *SMIRT-17*, Paper No. F05-4.
- (14) A. Saxena, D. E. Hall and D. L. McDowell, 1999, "Assessment of Deflection Rate Partitioning for Analyzing Creep Crack Growth Data," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 62, Issue 1, pp. 111~122.
- (15) A. Saxena., 1993, "Fracture Mechanics Approached for Characterizing Creep-Fatigue Crack Growth," *JSME international*, Series A, Vol. 36, No.1, pp.1~20.
- (16) Webster, G.A. and Ainsworth, R.A., 1994, *High Temperature Component Life Assessment*, Chapman & Hall, London. pp. 132~162.