

크리프 역전 변수 도입에 의한 9Cr강의 크리프 피로 균열성장 거동의 평가

마영화* · 백운봉** · 윤기봉*

(2002년 1월 5일 접수, 2002년 4월 2일 심사완료)

Evaluation of Creep Fatigue Crack Growth Behavior of 9Cr Steel Employing Creep Reversal Parameter

Young Wha Ma, Un Bong Baek and Kee Bong Yoon

Key Words: Creep Reversal Parameter(크리프 역전 변수), Creep(크리프), Fatigue(피로), Crack(균열), High Temperature(고온), C_r , C_f , CrMo Steel(크롬몰리강)

Abstract

Creep-fatigue crack growth models have been proposed employing $(C_t)_{avg}$ as a crack tip parameter characterizing the time-dependent crack growth. The basic assumptions made in these previous models were ideal creep reversal conditions such as no creep reversal and complete creep reversal condition. Due to this assumption, the applicability of the models was limited since they did not consider partial creep reversal condition which is usually observed in many engineering metals at high temperature. In this paper the creep reversal parameter, C_R , which was defined by Grover, is critically evaluated to quantify the extent of partial creep reversal at the crack tip. This approach does not rely on any simplifying assumptions regarding the extent of the amount of creep reversal during the unloading part of a trapezoidal fatigue cycles. It is shown that the $(C_t)_{avg}$ value calculated for 9Cr steel agrees well with the experimentally measured one. It is argued that the extent of improvement is not significant when the result is compared with that of the conventional model which has an assumption of full creep reversal behavior.

1. 서론

고온 설비의 기동/운전/정지를 모사한 사다리꼴 하중 과형에서 하중이 일정하게 유지되는 동안에 재료는 크리프에 의한 균열성장 거동을 보이며, 하중이 증가 또는 감소하는 동안(이후, "부하 및 제하"라고 칭하기로 한다.)에도 크리프 및 피로에 의한 균열성장 거동을 보이게 된다. 또한, 부하시

발생하는 균열선단의 되풀이 소성의 정도에 따라 크리프에 의한 균열성장률이 영향을 받게 된다.¹⁾

현재까지 연구된 재료들은 되풀이 소성 효과에 의한 크리프 역전(creep reversal) 현상이 완전히 발생하는 경우와 전혀 발생하지 않는 이상적인 경우로 가정되어 연구가 이루어졌다.²⁾ 그러나, 대부분의 재료들에서 크리프 피로 균열성장(creep fatigue crack growth, CFCG) 거동은 이상적인 두 경우의 중간 조건에 놓여지게 되므로 기존의 연구 모델을 수정하여야 한다. 이러한 수정을 위해 Grover³⁾는 Adefris⁴⁾의 이론을 근거로 실험적으로 측정할 수 있는 크리프 역전 변수(creep reversal parameter), C_R 를 제안하였으며, 이를 이용하여 균열선단 고온피로 매개변수, $(C_t)_{avg}$ 평가 모델을 개

* 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : kbyoon@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5328 FAX : (02)812-6474

* 회원, 중앙대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 한국표준과학연구원

간하였다. Grover의 수정된 모델에 대한 실험적 검증 및 신뢰성을 입증한 관한 연구결과가 보고 되어 있기 않으므로 고온 크리프소의 균열성장 수명을 정량화해 평가하기 위해서는 Grover에 의해 제안된 모델을 확인하여야 한다. 본 연구는 최근 고온재료로 널리 사용되는 9Cr강 재료에 대해 크리프 역전 변수를 사용한 Grover 모델을 적용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 크리프 피로 균열성장 거동

제하/부하 효과가 하중유지시간 동안의 균열선단 크리프 변형에 의해 이완된 응력장을 복구시키는 정도를 고려할 때 이상적인 거동의 첫 번째 경우는 제하/부하시 발생한 되풀이 소성의 영향이 균열선단 주위의 이완된 응력장에 전혀 영향을 주지 않는 경우이다. 이때에는 하중유지시간 동안 누적된 균열선단 크리프 변형률이 전혀 복구되지 않는다. 이 경우 C_t 의 평균값은 식 (1)과 같이 정의된다.¹⁾

$$(C_t)_{avg} = \frac{1}{t_h} \int_{(N-1)t_h}^{Nt_h} C_t dt \quad (1)$$

여기서, t_h 는 하중유지시간이며, N 은 피로 사이클 수이다.

두 번째 경우는 제하/부하 주기 동안 발생한 되풀이 소성이 크리프에 의해 이완된 균열선단 응력장을 완전히 처음 상태로 복구시키는 경우이다. 이때에는 하중유지시간 동안 누적된 크리프 변형률이 처음 상태로 완전히 복구된다. 이 경우 C_t 의 평균값은 식 (2)로 정의된다.²⁾

$$(C_t)_{avg} = \frac{1}{t_h} \int_0^{t_h} C_t dt \quad (2)$$

2.2 크리프 역전 변수, C_R

크리프 역전 변수, C_R 은 제하/부하 부분 동안 역전되는 하중집 처짐 변화의 크기, ΔV_R 과 하중유지시간 동안 누적된 처짐 크기, ΔV_C 사이의 비로써 식 (3)과 같이 정의된다.

$$C_R = \frac{\Delta V_R}{\Delta V_C} = \frac{\Delta V_R}{\Delta V_h} \quad (3)$$

ΔV_C 는 한 주기의 하중유지시간 동안 크리프 변형과 관계가 있고, ΔV_R 은 제하 부분동안 되풀이

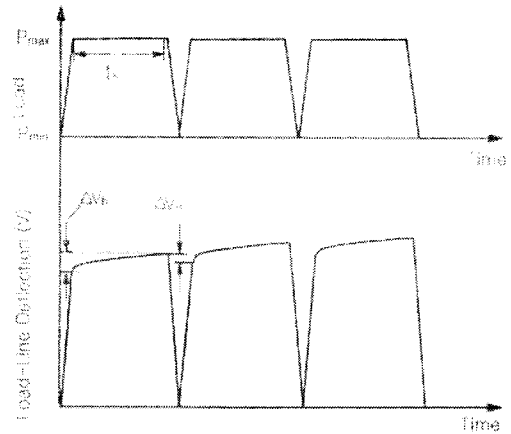


Fig. 1 Definition of the creep-reversal parameter, C_R and experimentally measured quantities required for calculating C_R

이 소성에 의해 역전된 크리프의 양과 관계가 있다. Fig. 1은 이를 도식화한 것이다. 크리프-역전 재료에 대해서 하중유지시간 동안의 모든 누적된 처짐량이 크리프에 기인한다고 가정하면 $\Delta V_C \approx \Delta V_h$ 이다. 여기서, ΔV_h 는 하중유지시간 동안의 하중집 변화량이다.

C_R 은 균열선단에서 되풀이 소성 영역과 크리프 영역의 상대적인 크기의 함수이다.³⁾ 다시 말하면, 크리프 영역 크기(r_{cr})가 되풀이 소성영역 크기(r_{cp})에 비해 월등히 큰 경우가 아니면 되풀이 소성이 크리프 변형률을 역전시킨다는 것을 고려할 때 C_R 은 r_{cr} 과 r_{cp} 의 관계로 표현되어질 수 있다. 따라서 C_R 의 해석적 표현식은 식 (4)로 유도된다.⁴⁾

$$C_R = P_R \left(\frac{r_{cp}}{r_{cr}} \right) = P_R \frac{1}{\xi^m} \left(\frac{m'+1}{m'-1} \right) \left(\frac{\sigma_{cy}}{(n+1)AENt_h} \right)^{\frac{1}{n}} \times \frac{I_R(1-R)^2}{4(\sigma_c)^2(1-\nu^2)} \quad (4)$$

여기서, P_R 은 크리프 역전과 관계된 비례상수, m' 은 되풀이 소성지수, σ_{cy} 는 되풀이 항복강도, R 은 하중비, ξ 는 평면응력 조건에서는 2π , 평면 변형률 조건에서는 6π 의 값을 갖는다. r_{cr} 은 Adefris에 의해 제안된 식을 사용하였다.⁵⁾ 식 (4)를 보면 C_R 은 부하 하중의 크기나 파괴매개변수와는 무관한 재료물성들만의 조합으로 표현되며

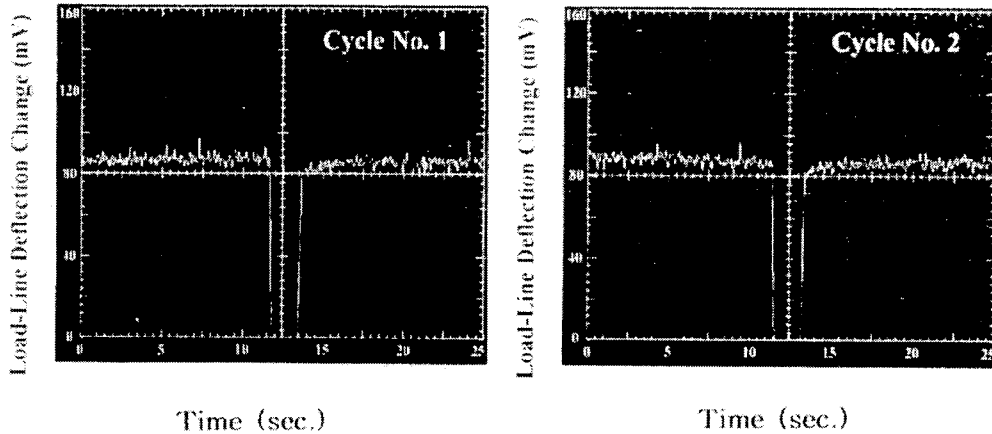


Fig. 2 Sample of load-line deflection measurement using the oscilloscope for CFCG test($t_h=600$ sec.)

Table 1 Chemical composition of the 9Cr steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V
0.11	0.35	0.52	0.015	0.003	8.6	0.91	0.21	0.009	0.19	0.226

로 재료물성으로 간주될 수 있다.

3. 실험 방법

본 연구에 사용된 재료는 560°C급 보일러의 헤더 및 고온 배관류에 주로 사용되고 있는 9Cr강 (ASTM A387 GR 91 CL 2)으로서 화학조성은 Table 1과 같다. 실험 재료의 상온 및 사용온도에서의 기계적 물성 측정을 위해 상온에서 인장 시험과 565°C 대기 중에서 인장 시험 및 크리프 시험을 실시하였다. 시편은 직경 6.35mm, 표집거리 25.4mm로 가공하였으며, 상온인장 시험은 ASTM E8, 고온인장 시험은 ASTM E21에 준하여 변위 제어 방식으로 1 mm/min 속도 조건에서 수행하였다. 크리프 시험은 레버타입 사하중식 크리프 시험기를 사용하여 일정하중 조건에서 ASTM E139 규격에 따라 실험하였다.

크리프 피로 균열성장 시험에서 사이클 수 의존 균열성장률을 결정하기 위해 하중유지시간이 없는 [하중증가시간][하중감소시간]이 1/1초인 삼각파형에서 ASTM E647에 따라 피로시험을 실시하였다.

균열길이는 직류전위차법을 사용하여 연속적으로 측정하였고, Johnson식을 사용하여 예측하였다.¹⁸⁾ 측정된 최종 균열길이를 예측된 값과 비교

하여 예측된 균열길이가 측정된 값과 상이할 때는 보정하였다.¹⁹⁾ 상세한 실험 방법은 이전 연구에 언급하였다.^{6,10-13)}

크리프 피로 균열성장 시험은 ASTM E1457에 준하여 수행하였다. 하중유지시간 동안의 시간의존 균열성장률을 측정하기 위해 [하중증가시간]/[하중유지시간][하중감소시간]이 1/60/1, 1/300/1, 1/600/1, 1/3600/1 (단위: 초, 시험편 번호 CF60, CF300, CF600, CF3600)인 사다리꼴 파형에서 각각 크리프 피로 균열성장 시험을 실시하였다. 하중점 처짐 변화와 제하 부분동안에 되풀이 소성의 영향에 의한 처짐의 역전량 측정으로부터 $(C)_{avg}$ 를 구하기 위해 IT-C(T)시험편에 고온용 클립-게이지를 부착하였고, 오실로스코프와 트리거(tigger)를 연결하여 하중유지시간 동안의 균열개구변위를 연속적으로 측정하였다. 오실로스코프로 하중점 처짐 변화 측정 예를 Fig. 2에 나타내었다.

4. 결과 및 토의

4.1 기계물성 측정

인장시험 결과인 하중-변위 기록으로부터 진용력-진변형을 관계를 구한 후, 소성변형률, ϵ_p 과 응력, σ 사이의 관계를 지수법칙, $\epsilon_p = D\sigma^m$ 으로 가정하여 재료의 소성상수 D 와 m 을 결정하고 인장 재료물성을 구하였다. 결과는 Table 2에 정리하였다.

크리프 시험 결과로부터 응력, σ 와 최소크리프

Table 2 Tensile properties of the 9Cr steel at room temperature and at 565°C

Test Temperature(°C)	24	565	
0.2% Yield Strength(MPa)	552.4	374.8	
Tensile Strength(MPa)	704.3	421.2	
Elongation(%)	23.8	28.7	
Reduction of Area(%)	69.6	80.5	
Young's Modulus(GPa)	224.0	145.6	
Plasticity Constants	$D(\text{MPa}^{-n})$	2.40×10^{23}	4.24×10^{26}
	m	8.16	24.19

Table 3 Creep properties of the 9Cr steel at 565°C

Creep Constants	$A(\text{MPa}^n \cdot \text{h}^{-1})$	n
	1.35×10^{-14}	12.75

Table 4 Results of the measured mean creep reversal parameter at 565°C

Specimen No.	CF60	CF300	CF600	Aver.
Creep Reversal Parameter	0.89	0.88	0.84	0.87

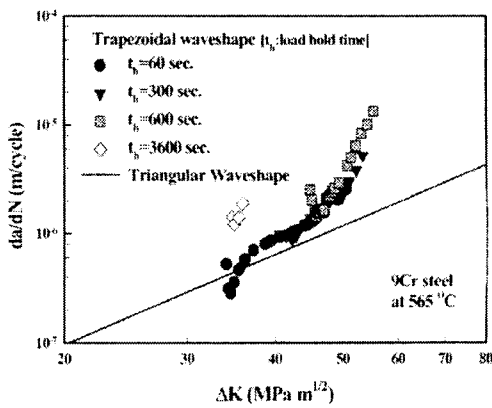


Fig. 3 The comparison of crack growth rates for the 9Cr steel at 565°C under trapezoidal and triangular waveshapes

변형률 속도, $\dot{\epsilon}_c$ 와의 관계를 지수법칙, $\dot{\epsilon}_c = A\sigma^n$ 으로 가정하여 크리프 상수 A 와 n 을 결정하여 Table 3에 나타내었다.

고온 피로 균열성장 시험결과로부터 균열성장 속도, da/dN 을 Paris 법칙을 따라 식 (5)와 같이 ΔK 로 특성화하였다.

$$\frac{da}{dN} = 2.29 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2.78} \quad (5)$$

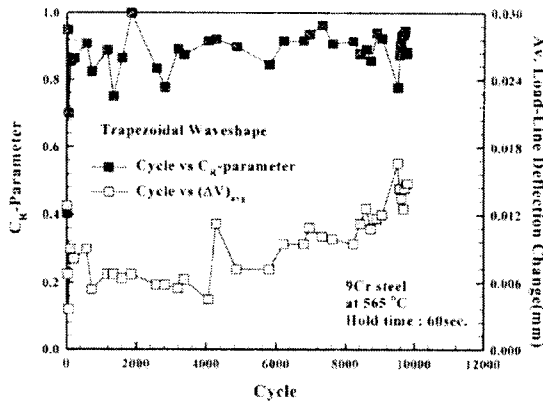
여기서 da/dN 은 m/cycle, ΔK 는 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 이다.

크리프 피로 균열성장 시험결과를 고온 피로균열 성장시험의 방법과 동일하게 da/dN 을 ΔK 로 정리하여 Fig. 3에 나타내었다. 실선은 고온 피로균열 성장시험의 결과로 구한 회귀선이다. Fig. 3의 결과를 보면 실험 초기에 ΔK 가 증가해도 균열성장률이 감소하는 초기 천이거동이 하중유지시간이 다른 모든 시험결과에서 나타남을 확인할 수 있다.¹⁶⁾ 이 원인에 대해서는 아직 논의의 대상이 되고 있으며 균열선단에서 되풀이 소성과 크리프의 상호작용에 의한 두 영역의 확장속도의 천이현상 때문으로 설명되기도 하고,¹⁷⁾ 균열성장속도가 초기에 산화층의 성장속도에 의해 지배되기 때문으로 설명되기도 한다.¹⁸⁾ 하중유지시간이 60초인 경우는 초기 천이거동이 발생하는 동안 균열성장률이 고온 피로균열 성장시험 결과보다 낮게 나타나고 있다. 이에 대해서는 실험초기에 부하 후 하중유지시간 동안에 발생한 크리프 변형에 의한 또는 이때 발생한 산화막의 영향에 의한 균열 닫힘(crack closure)현상이 발생하였기 때문으로 추측된다.

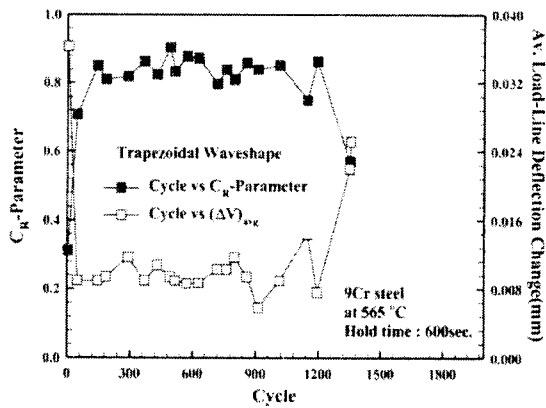
4.2 크리프 역전 변수 측정

Fig. 4는 하중유지시간 60초 및 600초 실험에서 C_R 값의 변화를 하중 사이클 수에 따라 도시한 것이다. 또 Fig. 4의 아래 부분에 표시된 데이터는 하중점 변화량 ΔV_h 변화곡선이다. C_R 값은 600초 하중유지시간 실험에서 약 150회의 사이클 수 경과 후에 일정한 값으로 안정되었다. C_R 값이 안정되는데 걸린 사이클 수는 하중유지시간이 긴 실험일수록 작았다. 또한, C_R 값은 실험의 종료 시점에서 급격히 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이것은 빠른 크리프 변형 누적을 의미하며, 래치팅(ratchetting)이나 빠른 균열성장으로 인한 것이다.¹⁹⁾ C_R 에 대한 상세한 측정결과는 이전 연구¹⁰⁾에 언급하였다.

본 실험결과를 통해 알 수 있는 것은 크리프 피로 하중이 부가된 시편들에 대해서, C_R 값은 최소한 시편의 유효수명 동안은 일정한 값을 갖는다는 것이다. 따라서, 주기적으로 안정된 재료 즉, 되풀이소성 영역과 크리프 영역의 크기의 비가 일정한 값을 갖는 재료에 대해서, C_R 이 재료 상수라고 가정하는 것이 타당하다고 판단된다. 실험적으로 측정된 C_R 값은 Table 4에 정리하였다.



(a) Load hold time 60 sec.



(b) Load hold time 600 sec.

Fig. 4 Variation of C_R during a creep fatigue crack growth experiment

3600초 하중유지시간 실험 결과에서 얻어진 C_R 값은 데이터의 산포가 심하여 평균값 계산에서 제외하였다.

4.3 탄성-2차 크리프 모델에 의한 균열성장률 평가
 재료가 완전한 크리프 역전 현상을 보여줄 때 $C_R=1$ 이고 누적된 크리프의 역전 현상이 전혀 없을 때 $C_R=0$ 이다. 이 조건에서 C_t 의 표현식은 각각 식 (2)와 식 (1)로 표현되었다.⁽²⁴⁾ 따라서, C_R 개변수를 사용한 일반적인 경우의 $(C_t)_{avg}$ 계산식은 식 (6)과 같이 쓰여질 수 있다.⁽²⁵⁾

$$(C_t)_{avg} = (1 - C_R) \frac{1}{t_h} \int_{(N-1)t_h}^{Nt_h} C_t dt + C_R \frac{1}{t_h} \int_0^{t_h} C_t dt \quad (6)$$

탄성-2차 크리프 재료로 가정했을 때 식 (6)은 식 (7)로 유도된다.⁽²⁶⁾

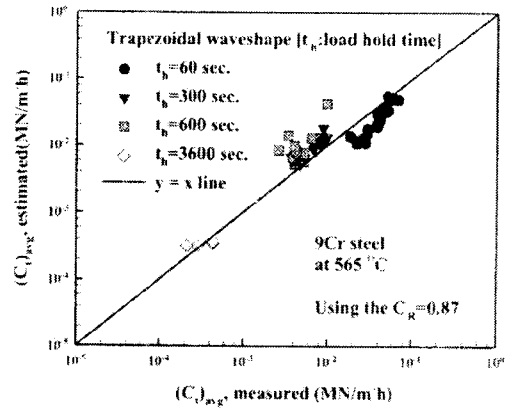


Fig. 5 The comparison of measured and estimated $(C_t)_{avg}$ of the 9Cr steel when $C_R=0.87$

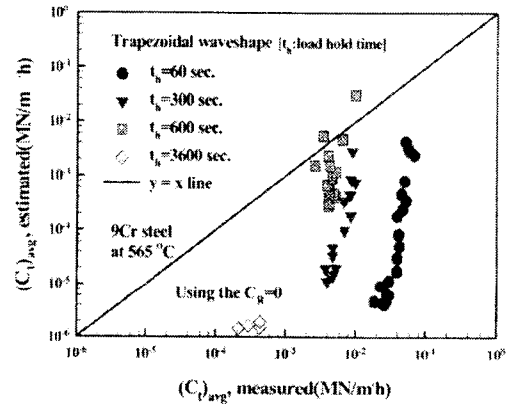


Fig. 6 The comparison of measured and estimated $(C_t)_{avg}$ of the 9Cr steel when $C_R=0$

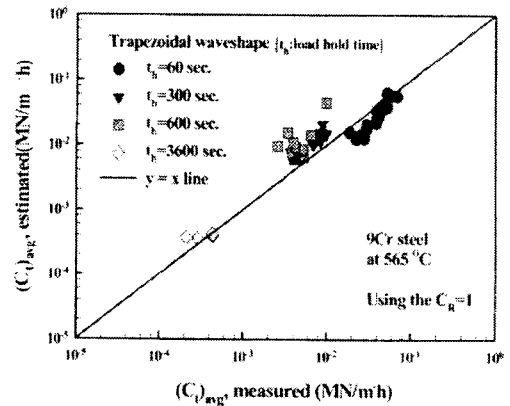


Fig. 7 The comparison of measured and estimated $(C_t)_{avg}$ of the 9Cr steel when $C_R=1$

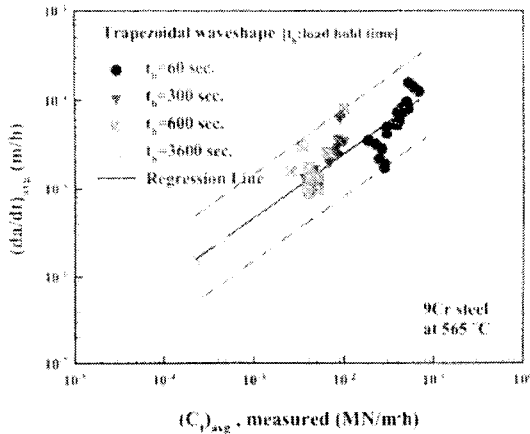


Fig. 8 $(da/dt)_{avg}$ vs. measured $(C)_{avg}$

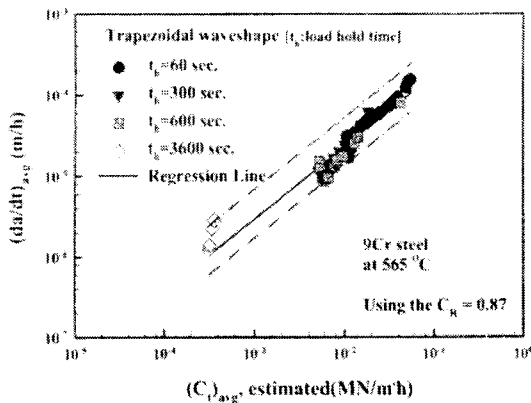


Fig. 9 $(da/dt)_{avg}$ vs. estimated $(C)_{avg}$ when $C_R=0.87$

$$(C)_{avg} = \frac{2a\beta \dot{r}_c}{EW} (1 - \nu^2) \Delta K^4 \frac{F^2}{F} (EA)^{-\frac{2}{n-1}} \times \left[C_R + \frac{2(1 - C_R)N}{n-1} \right] (t_h)^{-\frac{n-3}{n-1}} + C' \quad (7)$$

식 (7)을 사용하면 $0 \leq C_R \leq 1$ 인 모든 영역에 대해서 $(C)_{avg}$ 의 값을 계산할 수 있다. 식 (7)을 사용하여 계산된 $(C)_{avg}$ 와 Fig. 1에서의 ΔV_h 의 측정을 통한 실험적으로 측정된 $(C)_{avg}$ 의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 이와 같이 실험적으로 측정된 $(C)_{avg}$ 값과 이론식으로 계산된 $(C)_{avg}$ 값이 비교적 잘 맞음을 알 수 있다. C_R 를 사용함으로써 $(C)_{avg}$ 평가 모델의 개선정도를 파악하기 위해 이상적인 두 가지 경우로 가정한 기준 모델을 사용한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 6은 $C_R=0$ 인 경우 즉, 되풀이 소성에 의한 크리프 변형의 역전 현상이 전혀 발생하지 않는 경우로서 실험적으로 측정된 $(C)_{avg}$ 와 이론식으로 계산된 $(C)_{avg}$ 의 차이

가 현저함을 확인할 수 있다. 따라서, 9Cr강의 재료에 대해서는 이 모델의 부적합함을 알 수 있다. 반면에 Fig. 7은 $C_R=1$ 로 가정한 경우로써 비교적 $(C)_{avg}$ 값들이 $y=x$ 선상에 잘 분포되어 있음을 알 수 있다. 즉, 크리프 역전 변수를 도입한 $(C)_{avg}$ 평가 모델이 다소 개선된 결과를 보여주고는 있지만, 9Cr강의 경우, 되풀이 소성에 의한 크리프 변형의 완전 역전현상을 가정한 기준의 이상적인 $(C)_{avg}$ 평가의 모델을 사용해도 큰 차이는 없다고 볼 수 있다. 하지만, 보다 정확한 $(C)_{avg}$ 평가를 위해 본 논문에서는 크리프 역전 변수를 도입한 식 (7)을 사용하였다.

$(da/dt)_{avg}$ 와 $(C)_{avg}$ 관계의 실험결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 8은 실험적으로 측정된 $(C)_{avg}$ 를 사용하였고, Fig. 9는 식 (7)과 C_R 평균값 0.87을 사용하여 계산된 $(C)_{avg}$ 를 사용하였다.

Fig. 9에서 하중유지시간 3600초의 $(C)_{avg}$ 값 계산은 다른 실험결과들에서 얻어진 C_R 평균값을 사용하여 계산하였다.

시간의존 균열성장률 모델식을 구하기 위하여 Fig. 9를 선형회귀 분석하여 식 (8)의 탄성-2차 크리프에 대한 평균 균열성장률 식을 구하였다.

$$\left(\frac{da}{dt} \right)_{avg} = 9.831 \times 10^{-4} [(C)_{avg}]^{0.885} \quad (8)$$

구조물의 균열성장 수명을 평가할 때에는 Fig. 8의 데이터 산포의 상한선인 다음 (9)식을 사용한다.

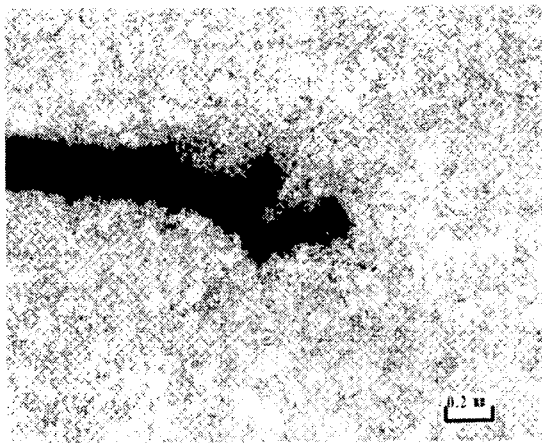
$$\left(\frac{da}{dt} \right)_{avg} = 2.263 \times 10^{-3} [(C)_{avg}]^{0.723} \quad (9)$$

여기서, $(da/dt)_{avg}$ 의 단위는 m/h이고, $(C)_{avg}$ 의 단위는 MN/m²·h이다.

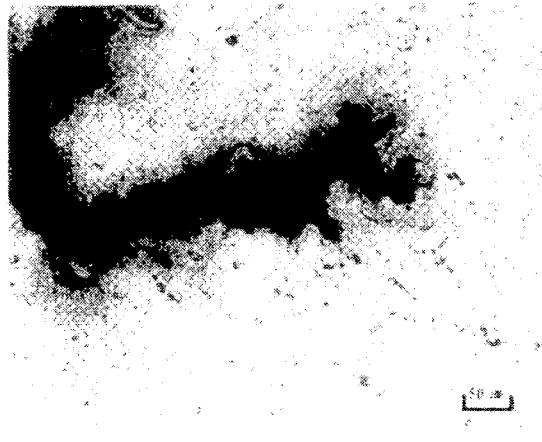
균열성장 거동을 최적상태로 모델링한 식은 피로 균열성장 및 크리프 피로 균열성장 시험 결과에서 얻은 주기의존 균열성장률 식 (5)와 시간의존 균열성장률 식 (8)을 합하여 식 (10)으로 표현된다. 이식은 평균 균열성장 거동을 나타낸다.

$$\left(\frac{da}{dN} \right) = 2.29 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2.778} + 9.831 \times 10^{-4} [(C)_{avg}]^{0.885} \cdot t_h \quad (10)$$

평면변형을 조건 하에 있는 시편 중심부의 균열손상 분석을 위해 하중유지시간이 3600초인 시험편에 대해 두께 방향에 수직인 방향으로 절단하여 12mm까지 연마 후 부식하여 균열선단을 관찰한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.



(a) Crack growth path



(b) Creep damage at the crack tip region

Fig. 10 Photomicrograph for load hold time 3600 sec. specimen under 565 °C trapezoidal waveshape

결과로부터 균열 주위에서 많은 크리프 기공과 미소균열이 관찰되었다. 따라서, 9Cr강의 균열성장과정은 크리프에 지배적인 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 9Cr강으로 제작된 고온설비 요소의 균열이 크리프 피로 하중에 의해 성장할 때에 균열성장률을 특성화하는데 필요한 $(C)_{avg}$ 매개변수의 평가식에 대해 연구하였다. 주요 연구 내용 및 결론은 다음과 같다.

(1) 사다리꼴 하중 파형의 크리프 피로 균열성

장 시험 결과로부터 이상적인 경우로 가정하여 유도된 기존의 균열성장 거동 특성화 모델은 9Cr강의 실제 거동과는 다르다는 것을 확인하였다. 따라서, 균열 선단의 크리프 영역과 피로이 소성 영역의 상호작용 정도를 정량적으로 나타내 줄 수 있는 크리프 역전 변수의 도입이 필요하다.

(2) 크리프 역전 변수의 실험적 측정을 위한 새로운 실험 장치를 구성하였다. 이 장치를 사용한 C_R 의 측정결과를 통해 Grover에 의해 제안된 C_R 이 부하된 하중과 균열선단 파괴매개변수에 독립적이라는 이론을 입증하였다. 따라서, C_R 은 재료 상수로서 간주될 수 있으며, 전체 크리프-연성재료들에 대해 균열선단 고온피로 매개변수 $(C)_{avg}$ 를 평가하는데 유용한 변수로 사용되어 질 수 있다.

(3) C_R 을 도입한 이론적으로 계산된 $(C)_{avg}$ 와 실제 시험편의 하중점 범위에서 측정된 $(C)_{avg}$ 가 만족할 만한 수준의 일치율을 보였다. 하지만 완전 크리프 역전이 발생하는 이상적인 경우의 모델과 비교한 경우 두 값의 차이가 크지 않으므로 9Cr강의 경우에는 완전 크리프 역전이 발생하는 이상적인 경우의 모델을 사용해도 공학적 수명평가 모델로서는 만족할 만한 결과를 줄 수 있다.

후 기

본 논문은 과기부 2001년 인위재해방재기술개발사업인 "산업 및 에너지시설의 예방안전관리시스템개발" 과제의 "고온용 산업설비의 잔여수명평가 소프트웨어 개발" 의 연구비 지원에 의해 이루어진 연구 결과이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Riedel, H., 1987, "Fracture at High Temperature," Springer-Verlag.
- (2) Yoon, K. B., Saxena, A. and McDowell, D. L., 1992, "Influence of Crack Tip Cyclic Plasticity on Creep-Fatigue Crack Growth," *ASTM STP 1131*, pp. 367~392.
- (3) Yoon, K. B., Saxena, A. and Liaw, P. K., 1993, "Characterization of Creep-Fatigue Crack Growth Behavior under Trapezoidal Waveshape

- using Ct-Parameter," *International Journal of Fracture* Vol.59, pp. 95~114.
- (4) Adefris, N., 1993, "Creep-Fatigue Crack Growth Behavior of 1Cr-1Mo-1/4V Rotor Steel," Ph. D. Thesis, School of Materials Science and engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- (5) Yoon, K. B. and Lee, J. S., 2000, "Evaluation of Ct-parameter for Weld Interface Crack Considering Material Plastic Behavior," *Transaction of the KSME*, Vol. 24, No. 3, pp. 676~684.
- (6) Yoon, K. B., Kim, K. W. and Baek, U. B., 1998, "Modeling of Creep Crack Growth Behavior of Low-Alloy Steel Weld," *Transaction of the KSME*, Vol. 22, No. 12, pp. 2153~2162.
- (7) Grover, P. S., 1996, "Creep-Fatigue Crack Growth in Cr-Mo-V Base Material and Weldments," Ph. D. Thesis, School of Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- (8) 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.
- (9) Saxena, A., 1980, "Electrical Potential Technique For Monitoring Subcritical Crack Growth at Elevated Temperature," *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 13, No. 4, pp. 741~750.
- (10) Baek, U. B., Nahm, S. H., Suh, C. M. and Yoon, K. B., 1994, "A Study on initial Transient Behavior in Creep-Fatigue Crack Growth," *Transaction of the KSME*, Vol. 18, No. 7, pp. 1722~1729.
- (11) Baek, U. B., Yoon, K. B., Lee, H. M. and Suh, C. M., 2000, "Creep-Fatigue Crack Growth at CrMo Steel Weld Interface," *Transaction of the KSME A*, Vol. 24, No. 12, pp. 3088~3095.
- (12) Baek, U. B., Yoon, K. B., Suh, C. M. and Lee, H. M., 2000, "An Experimental Study on High Temperature Material Properties of Welded Joint," *Transaction of the KSME A*, Vol. 24, No. 12, pp. 3096~3101.
- (13) Yoon, K. B., Baek, U. B. and Suh, C. M., 1997, "Effects of Loading Rate on Creep Crack Growth During the Succeeding Load-Hold Period under Trapezoidal Fatigue Waveshapes," *Elevated Temperature Effects on Fatigue and Fracture, ASTM STP 1297*, pp. 102~116.
- (14) Ma, Y. W., Baek, U. B. and Yoon, K. B., 2001, "Introduction of Creep-Reversal Parameter for Improving Fatigue Crack Growth Life Assessment Model at High Temperature," *Proc. 2nd Conf. for Mat. & Fract. in 2001. KSME*, pp. 265~271.
- (15) Baek, S. G., Song, G. W. and Hyun, J. S., 1998, "Low Cycle Creep-Fatigue Life Prediction 1Cr-0.5Mo Pipe Steel with Hold Time Effects by Using the Plastic Strain Energy," *Transaction of the KSME A*, Vol. 22, No. 12, pp. 2093~2099.