

# 9Cr강의 고온 균열성장 거동에 대한 연구

마영화 · 백운봉\* · 윤기봉\*\*

중앙대학교 대학원 기계공학과 · \*한국표준과학연구원 · \*\*중앙대학교 기계공학과

## 1. 서론

고온에서 균열체는 하중이 증가 또는 감소하는(이후, “부하 및 제하”라고 칭하기로 한다.) 동안 크리프 및 피로에 의한 균열성장 거동을 보이게 된다. 또한, 부하시 발생하는 균열선단의 되풀이 소성의 정도에 따라 크리프에 의한 균열성장률이 영향을 받게 된다.<sup>(1)</sup> 현재까지 연구된 재료들의 경우는 되풀이 소성 효과에 의한 크리프 역전(creep reversal) 현상 정도가 이상적인 가정에 일치하는 경우였다.<sup>(2-4)</sup> 하지만, 대부분의 재료들은 크리프 피로 균열성장(creep fatigue crack growth, CFCG) 거동이 완전히 크리프 역전이 발생하는 경우와 전혀 크리프 역전현상이 발생하지 않는 경우의 이상적인 두 경우의 중간 조건에 놓여지게 되므로 기존의 연구 모델을 수정하여야 한다. Grover는 이를 위해 크리프 역전 변수(creep reversal parameter),  $C_R$ 를 제안하였다.<sup>(5)</sup> 본 연구는 최근 고온재료로 널리 사용되는 9Cr강 재료에 대해 Gorver에 의해 제안된  $C_R$ 를 사용한 수정된 모델을 적용하였다.

## 2. 이론

### 크리프-피로 균열성장 거동

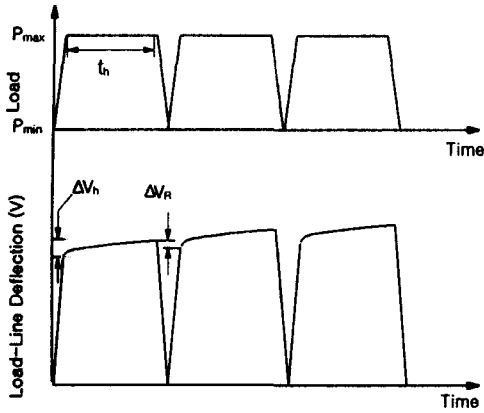
제하/부하 효과가 하중유지시간 동안의 균열선단 크리프 변형에 의해 이완된 응력장을 복구시키는 정도를 고려할 때 이상적인 거동은 제하/부하시 발생한 되풀이 소성의 영향이 균열선단 주위의 이완된 응력장에 전혀 영향을 주지 않는 경우와 이완된 균열선단 응력장을 완전히 처음 상태로 복구시키는 경우이다. 전자의 경우  $C_t$ 의 평균값은 식 (1)과 같이 정의되고,<sup>(6)</sup> 후자의 경우는 식 (2)로 정의 된다.<sup>(6)</sup>

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

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

여기서,  $t_h$ 는 하중유지시간이며,  $N$ 은 피로 사이클 수이다.

위에서 정의된 두 경우의 이상적인 거동의 중간 조건에 놓인 크리프-연성재료에 대한 균열성장 거동을 수정하기 위해 정의된 크리프 역전 변수,  $C_R$ 은 제하/부하 부분 동안 역전되는 하중점 처짐 변화의 크기,  $\Delta V_R$ 과 하중유지시간 동안 누적된 처짐 크기,  $\Delta V_c$  사이의 비로써 식 (3)과 같이 정의되며,<sup>(6)</sup> Fig. 1에 이를 도식화하였다.



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

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

여기서, 하중유지시간 동안의 모든 누적된 처짐량이 크리프에 기인한다고 가정하면  $\Delta V_c \approx \Delta V_h$  이다. 여기서,  $\Delta V_h$ 는 하중유지시간 동안의 하중점 변화량이다.

### 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 기계물성 측정을 위해 상온에서 인장 시험과 565°C 대

기 중에서 인장 시험 및 크리프 시험을 실시하였다. 시험결과는 Table 2, 3에 정리하였다.

크리프-피로 균열성장 시험에서 주기의존 균열성장률 식을 결정하기 위해 [하중증가시간]/[하중감소시간]이 1/1초인 삼각파형에서 ASTM E647에 따라 피로시험을 실시하였다. 하중유지시간 동안의 시간의존 균열성장률을 측정하기 위해 [하중증가시간]/[하중유지시간]/[하중감소시간]이 1/60/1, 1/300/1, 1/600/1, 1/3600/1 (단위 : 초, 시편번호 CF60, CF300, CF600, CF3600)인 사다리꼴 파형에서 각각 크리프-피로 균열성장 시험을 실시하였다. 상세한 실험 방법은 이전 연구<sup>(4,6,7)</sup>에 언급하였다.

**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

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

Test temp (°C)	Yield stress(MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	E(GPa)	Plasticity Constants	
						$D(\text{MPa}^{-m})$	$m$
24	552.4	704.3	23.8	69.6	224.0	$2.40 \times 10^{-25}$	8.16
565	374.8	421.2	28.7	80.5	145.6	$4.24 \times 10^{-66}$	24.19

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

Creep Constants	$A(\text{MPa}^n \cdot \text{h}^{-1})$	$n$
		$1.35 \times 10^{-31}$

## 4. 실험 결과

### 크리프-피로 균열성장

크리프-피로 균열성장 시험에서 주기의존 균열성장율 식을 결정하기 위한 삼각파형에서의 피로 균열성장 시험으로 측정된 균열성장율,  $da/dN$ 을 Paris 법칙을 따라 식 (4)와 같이  $\Delta K$ 로 특성화하였다.

$$\frac{da}{dN} = 2.29 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2.78} \quad (4)$$

여기서  $da/dN$ 은 m/cycle,  $\Delta K$ 는  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 이다.  $\Delta K$ 계산식은 ASTM E647식을 따랐다.

하중유지시간 600초의 크리프-피로 균열성장 시험에서  $C_R$ 값의 측정 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 또, Fig. 2의 아래 부분에 표시된 데이터는 하중점 변화량  $\Delta V_h$  변화곡선이다.

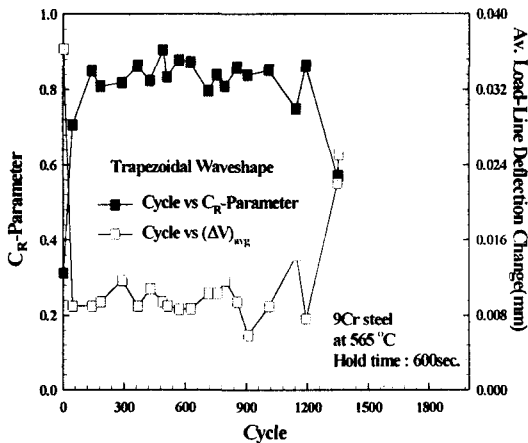


Fig. 2 Variation of  $C_R$  during a CFCG experiment for load hold time 600 sec.

$C_R$ 값은 600초 하중유지시간 실험에서 약 150회의 사이클수 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.<sup>(5)</sup> 본 실험결과를 통해 알 수 있는 것은 크리프 피로 하중이 부가된 시편들에 대해서,  $C_R$ 값은 최소한 시험편의 유효수명 동안은 일정한 값을 갖는다는 것이다. 실험적으로 측정된  $C_R$ 평균값은 0.87이었다.

### 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  $C_I$ 의 표현식은 각각 식 (2)와 식 (1)로 표현되었다.<sup>(2,3)</sup> 따라서,  $C_R$ 매개변수를 사용하여 일반적인 경우의  $(C_I)_{avg}$  계산식은 식 (5)와 같이 쓰여질 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$(C_I)_{avg} = (1 - C_R) \frac{1}{t_h} \int_{(N-1)t_h}^{Nt_h} C_I dt + C_R \frac{1}{t_h} \int_0^{t_h} C_I dt \quad (5)$$

탄성-2차 크리프 재료로 가정했을 때 식 (5)는 식 (6)으로 유도된다.

$$(C_t)_{avg} = \frac{2\alpha\beta \tilde{r}_c}{EW} (1-\nu^2)\Delta K^4 \frac{F'}{F} (EA)^{\frac{2}{(n-1)}} \left[ C_R + \frac{2(1-C_R)N^{-\frac{n-3}{n-1}}}{n-1} \right] (t_h)^{-\frac{n-3}{n-1}} + C^* \quad (6)$$

식 (6)을 사용하면  $0 \leq C_R \leq 1$ 인 모든 영역에 대해서  $(C_t)_{avg}$ 의 값을 계산할 수 있다.

식 (7)을 사용하여 계산된  $(C_t)_{avg}$ 와 Fig. 1에서의  $\Delta V_h$ 의 측정을 통한 실험적으로 측정

된  $(C_t)_{avg}$ 의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 이와 같이 실험적으로 측정된  $(C_t)_{avg}$ 값과 이론식으로 계산된  $(C_t)_{avg}$ 값이 비교적 잘 맞음을 알 수 있다.  $C_R$ 을 사용함으로써  $(C_t)_{avg}$  평가 모델의 개선정도를 파악하기 위해 이상적인 두 가지 경우로 가정한 기존 모델을 사용한 결과를 Fig. 4과 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 4은  $C_R=0$ 인 경우로써 실험적으로 측정된  $(C_t)_{avg}$ 와 이론식으로 계산된  $(C_t)_{avg}$ 의 차이가 현저함을 확인할 수 있다. 따라서, 9Cr강의 재료에 대해서는 이 모델이 부적절함을 알 수 있다. 반면에 Fig. 5은  $C_R=1$ 로 가정한 경우로써 비교적  $(C_t)_{avg}$ 값들이  $y=x$  선상에 잘 분포되어 있음을 알 수 있다. 즉,

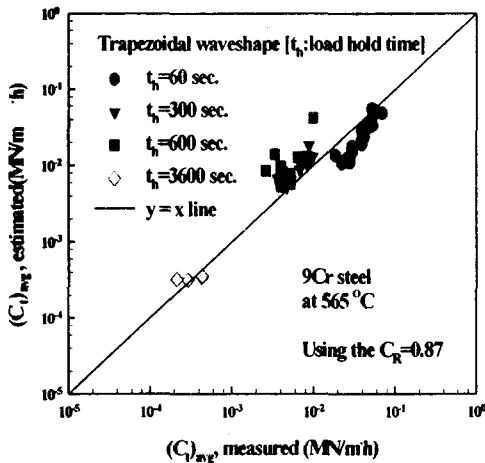


Fig. 3 The comparison of measured and estimated  $(C_t)_{avg}$  of the 9Cr steel when  $C_R=0.87$

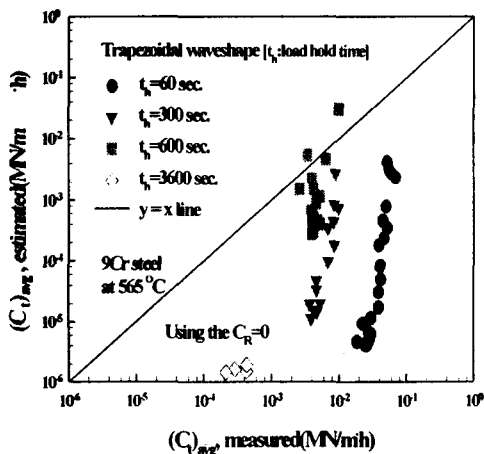


Fig. 4 The comparison of measured and estimated  $(C_t)_{avg}$  of the 9Cr steel when  $C_R=0$

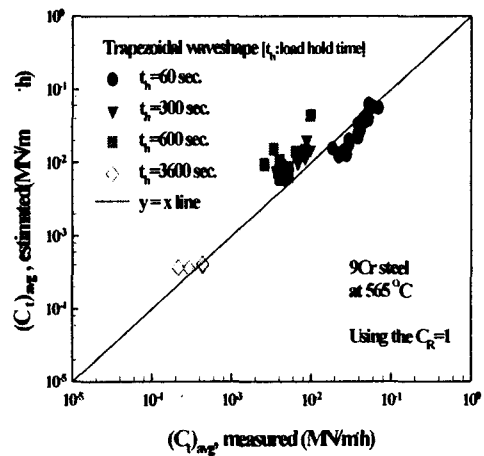


Fig. 5 The comparison of measured and estimated  $(C_t)_{avg}$  of the 9Cr steel when  $C_R=1$

크리프 역전 변수를 도입한  $(C_t)_{avg}$  평가 모델이 다소 개선된 결과를 보여주고는 있지만, 9Cr강의 경우, 되풀이 소성에 의한 크리프 변형의 완전 역전현상을 가정한 기존의 이상적인  $(C_t)_{avg}$  평가의 모델을 사용해도 큰 차이는 없다고 볼 수 있다. 하지만, 보다 정확한  $(C_t)_{avg}$  평가를 위해 본 논문에서는 크리프 역전 변수를 도입한 (6)식을 사용하였다.

$(da/dt)_{avg}$ 와  $(C_t)_{avg}$ 관계의 실험결과를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6은 식 (6)과  $C_R$  평균값 0.87을 사용하여 계산된  $(C_t)_{avg}$ 를 사용하였다.

시간의존 균열성장률 모델 식을 구하기 위하여 Fig. 6을 선형회귀 분석하여 식 (7)의 탄성-2차 크리프에 대한 평균균열성장률 식을 구하였다.

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{avg} = 9.831 \times 10^{-4} [(C_t)_{avg}]^{0.809} \quad (7)$$

구조물의 균열성장 수명을 평가할 때에는 Fig. 6의 데이터 산포의 상한선인 다음 (8)식을 사용한다.

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{avg} = 2.403 \times 10^{-3} [(C_t)_{avg}]^{0.809} \quad (8)$$

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

균열성장 거동을 최적상태로 모델링한 식은 피로 균열성장 및 크리프 피로 균열성장 시험 결과에서 얻은 주기의존 균열성장률 식 (4)와 시간의존 균열성장률 식 (7)을 합하여 식 (9)로 표현된다. 이식은 평균 균열성장 거동을 나타낸다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = 2.29 \times 10^{-11} (\Delta K)^{2.778} + 9.831 \times 10^{-4} [(C_t)_{avg}]^{0.809} \cdot t_h \quad (9)$$

## 5. 결론

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

(1) 본 논문의 크리프-피로 균열성장 시험 결과로부터 9Cr강의 실제 균열성장 거동은 이상적인 경우로 가정한 기존의 모델과는 다르다는 것을 확인하였다. 따라서, 균열 선단의 크리프 영역과 되풀이 소성 영역의 상호작용 정도를 정량적으로 나타내 줄 수 있

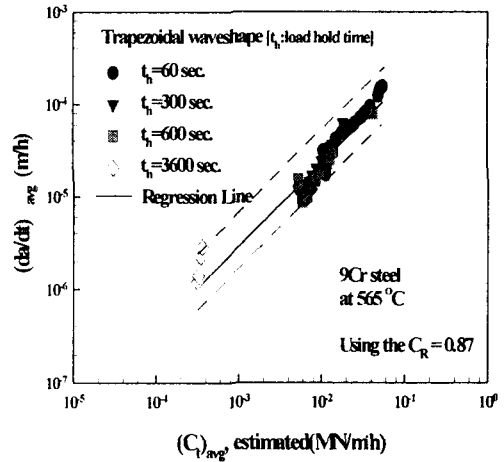


Fig. 6  $(da/dt)_{avg}$  vs. estimated  $(C_t)_{avg}$  when  $C_R=0.87$

는 크리프 역전 변수의 도입이 필요하다.

(2)  $C_R$ 의 측정결과를 통해 Grover에 의해 제안된  $C_R$ 이 시험편의 유효수명 동안 일정한 값을 갖는 것을 확인하였다. 따라서,  $C_R$ 은 고온파괴 매개변수  $(C_t)_{avg}$ 를 평가하는데 유용한 변수로 사용되어 질 수 있다.

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

## 참고문헌

- (1) H. Riedel, Fracture at High Temperature. Springer-Verlag., 1987
- (2) K. B. Yoon, A. Saxena, and D. L. McDowell, "Influence of Crack Tip Cyclic Plasticity on Creep-Fatigue Crack Growth," ASTM STP 1131, pp. 367~392, 1992
- (3) N. Adefris, "Creep-Fatigue Crack Growth Behavior of 1Cr-1Mo-1/4V Rotor Steel," Doctoral Thesis, School of Materials Science and engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA., 1993
- (4) 윤기봉, 김광웅, 백운봉, "저합금강 용접부의 크리프 균열성장거동 모델링," 대한기계학회논문집 22권 12호, pp. 2153~2162, 1998
- (5) P. S. Grover, "Creep-Fatigue Crack Growth in Cr-Mo-V Base Material and Weldments," Doctoral Thesis, School of Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA., 1996
- (6) 백운봉, 남승훈, 서창민, 윤기봉, "크리프-파로 균열성장에서의 초기 천이거동에 대한 연구," 대한기계학회논문집 18권 7호, pp. 1722~1729, 1994
- (7) 마영화, 백운봉, 윤기봉, "고온파로균열성장 수명평가 모델 개선을 위한 크리프-역전 변수 도입," 대한기계학회 2001년도 제2차 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp. 265~271, 2001.