

고온 균열성장 모델을 이용한 설비의 잔여수명평가

윤 기 봉
중앙대학교 기계설계학과

Residual Life Prediction of Plant Components Using High Temperature Crack Growth Model

Kee Bong Yoon
Chung Ang Univ.

1. 서론

고온에서 운용되는 가스터빈, 화력발전 설비의 증기터빈, 보일러 헤더, 원자력발전 설비의 원자로, 정유 및 석유화학설비의 반응기, 개질로, 가열로 등의 고온 후육부에 균열이 존재할 때에, 설비의 기동/사용/정지에 의한 피로하중 조건에서 기존 균열이 성장하는 속도를 예측할 수 있어야, 균열이 임계크기까지 성장하는 균열성장 수명을 예측하여 설비를 안전하고 효율적으로 사용할 수 있다.

지난 20여년간의 활발한 고온파괴역학 (TDFM, time dependent fracture mechanics) 분야의 연구결과, C_I 매개변수가 위와 같은 고온조건에서의 균열성장을 예측에 유용한 파괴 매개변수임이 알려져 있다⁽¹⁾. C_I 매개변수를 이용한 고온 균열성장을 평가 모델을 정립하기 위해서는, 우선 C_I 변수를 여러가지의 재료 구성방식 형태, 피로하중 형태, 균열체의 형상에 대하여 계산할 수 있는 평가식의 수립이 필요하며, 이는 크리프-피로 균열성장 시험 결과의 해석에 의해 유도된다. 지금까지는 재료의 크리프 특성변화 (1차 크리프, 2차 크리프 및 3차 크리프 거동재료), 재료의 소성특성 변화 등의 구성방식의 차이에 따른 C_I 평가식의 차이, 과하중의 존재여부, 하중증가 속도의 차이 등을 고려한 C_I 평가식 등이 연구되었다. 또한, 시간의존 균열성장 기구 중 크리프만 고려하지 않고 산화의 영향에 대한 고려하는 방법 및 용접부 균열에서의 C_I 평가식 등이 연구되고 있다.

본 논문에서는 고온용 재료중에서 오래전부터 사용되어 균열발생 및 균열성장이 자주 발생하는 저합금강(CrMo강 및 CrMoV강)에 대해 저자가 실험적으로 연구한 결과 들을 요약 설명하고, 실험결과를 근거로 적절한 C_r 평가식을 제안하였으며, 향후의 연구 방향에 대해서도 언급하였다. 고온 설비가 기동/사용/정지를 반복함에 따라 균열이 받는 피로하중은 사다리꼴 형태의 피로하중으로 단순화하는 것이 보통이므로, 주로 사다리꼴 파형 및 이를 약간 변형한 파형을 사용하여 크리프-피로 균열성장을 측정 실험을 수행하였으며, 실험 결과로부터 여러 가지 C_r 평가식을 제안하여 크리프-피로 균열성장을 예측 모델을 개선하는 방법에 대해 설명하였다.

2. 실험

2.1 기계적 물성 측정 시험

실험 연구에 사용된 재료는 1.25Cr-0.5Mo강 (사용재 및 신재), 1Cr-1Mo-0.25V강, 0.5Cr-0.5Mo-0.25V강(주조강) 재료이며, 재료의 사용 온도인 538°C에서 인장 및 크리프 특성을 우선 측정하여 C_r 매개변수 평가에 사용하였다. 재료의 소성상수 D 와 m 은 인장시험의 하중-변위 기록으로부터 진응력-진변형을 관계를 구한 후, 소성변형률, ϵ_p , 와 응력, σ , 사이의 지수 법칙을 $\epsilon_p = D \sigma^m$ 으로 가정하여 최소 자승법으로 결정하였다.

재료의 2차 크리프 상수 A 와 n 은 크리프 시험으로 측정된 시간-변위 곡선을 시간-변형률 곡선으로 변환한 후, 각 응력에서의 크리프 곡선으로부터 2차 크리프가 나타나는 부분만 선택해서 선형화 하여 크리프 변형속도 $\dot{\epsilon}_s$ 를 결정하였다.

2차 크리프 변형속도 $\dot{\epsilon}_s$ 와 응력 σ 사이의 지수법칙을 $\dot{\epsilon}_s = A \sigma^n$ 으로 가정하여, 최소자승법에 의해 A 와 n 을 결정하였다. 재료의 1차 크리프 상수, A_1 , n_1 및 p 는 재료의 1차 크리프 거동을 $\dot{\epsilon}_s = A_1 \sigma^{n_1} \epsilon^{-p}$ 으로 가정하여, 전체 크리프 변형율을 1차, 2차 변형율의 합인 $\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \epsilon^{-p} + A \sigma^n$ 으로 가정하여 마찬가지로 A_1 , n_1 및 p 를 최소 자승법으로 결정하였다.

2.2 크리프-피로 균열성장 시험

크리프-피로 균열 성장 시험은 C(T) 시험편을 사용하였으며, 초기 균열비는 약 0.4이었으며, 고온 균열성장 시험시 발생하는 균열 터널링 현상을 방지하기 위해서 초기 피로균열 형성 후에 시험편 두께의 25%에 해당하는 측면홈을 가공한 다음 시험하였다. 균열길이를 연속적으로 모니터링하기 위해 직류전위차법을 사용

하였다. 실험은 균열길이가 7~10 mm 정도 진전되었을 때 정지하고, 시험편을 액체질소에 담근후 저온에서 파단시킨후 파면으로 부터 최종 균열성장량을 측정하였다. 측정된 최종 균열성장량을 직류 전위차법으로 예측된 균열성장량 값과 비교하여 만약 예측된 균열길이가 측정된 값과 상이할때는 오차가 균열성장량에 비례한다고 가정하여 보정하였다. 특히, 크리프-피로 균열성장 시험에서는 균열성장율의 정확한 측정이 매우 중요한데 균열성장량이 작으므로, 최종 파단이 발생하기전에 실험을 중단하여 위와 같이 균열길이를 실측하여 직류전위차법에 의한 균열 예측값을 보정하는 과정은 매우 중요하다. C_t 변수의 측정값은 고온 클립 게이지로 측정된 하중점 변위로 부터 구하였다.

3. 결과 및 토의

크리프-피로 균열성장을 예측 모델에서 시간의존(time-dependent) 균열성장율은 다음과 같이 표시된다.

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{avg} = b[(C_t)_{avg}]^q \quad (1)$$

이 식에서 b 와 q 는 실험에 의해 결정되는 재료상수이며 C_t 변수 여러가지 조건을 고려하여 다음에 설명한 식으로 계산된다.

3.1 재료의 크리프 거동의 영향

1.25Cr-0.5Mo 강의 크리프 실험 데이터를 재료의 크리프 구성방정식으로 나타낸 결과와 비교하여 Fig.1 및 Fig.2에 나타내었다. 크리프 거동을 2차 크리프만으로 가정한 경우를 Fig.1에, 1차 및 2차 크리프를 모두 고려하여 가정한 경우를 Fig.2에 나타내었다. 후자가 재료의 크리프 거동을 더 잘 표현하고 있음을 알 수 있다.

탄성-2차 크리프 거동 재료에 대해서 $(C_t)_{avg}$ 변수의 평가식은 (2)식과 같이 유도 되었고⁽²⁾, 탄성-1차크리프-2차크리프 거동 재료의 $(C_t)_{avg}$ 변수 평가식은 (3)식과 같이 유도되었다⁽³⁾.

$$(C_t)_{avg} = \frac{2\alpha\beta\tilde{\gamma}_c(\theta, n)}{E} (1-\nu^2) \frac{\Delta K^4}{W} \frac{F}{F} (EA)^{\frac{2}{n-1}} t_h^{-\frac{n-3}{n-1}} + C^* \quad (2)$$

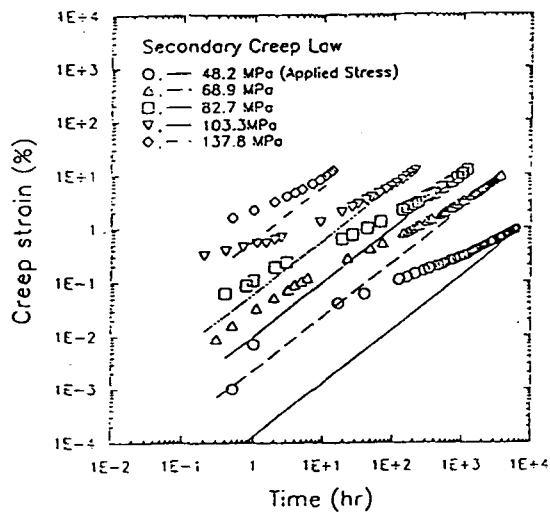


Fig.1 Comparison of creep data and secondary creep representation (1.25Cr-0.5Mo steel)

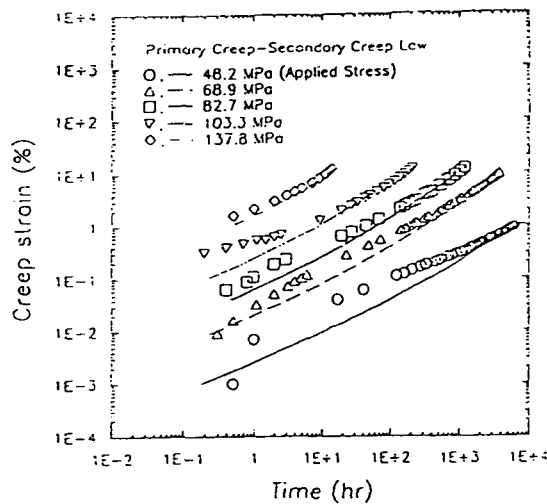


Fig.2 Comparison of creep data and primary-secondary creep representation (1.25Cr-0.5Mo steel)

$$(C_t)_{avg} = \frac{\Delta K^4(1-\nu^2)}{E\pi W} \beta \tilde{\gamma}_c(\theta, n) \frac{F}{F} [(n_1+1+p)A_1]^{\frac{2}{(1+p)(M-1)}} \left[\frac{I_M E}{2\pi(1-\nu^2)} \right]^{\frac{2}{M-1}} t_h^{\frac{2}{(1+p)(M-1)-1}} + C^* \left[(p+1) \left(\frac{t_2}{t_h} \right)^{\frac{p}{1+p}} + 1 \right] \quad (3)$$

(2), (3)식의 각 기호는 참고문헌의 정의에 따랐다.

1.25Cr-0.5Mo강의 경우 탄성-1차크리프-2차크리프 재료구성방정식이 재료거동을 잘 표현하므로 $(C_t)_{avg}$ 식으로 (3)식을 사용하는 것이 좋다. 그러나 이 식은 크리프 균열성장율(creep crack growth rate) 평가 등에는 정확하나, 크리프-피로 균열성장에는 적용시 오차가 수반된다. 이는 초기 하중부하시에 균열전단의 소성 변형에 의한 영향을 크리프 균열성장 시험에서는 무시할 수 있지만, 크리프-피로 균열성장 시험에서는 이를 무시하기 어렵기 때문이다.

3.2 재료의 소성거동의 영향

탄성-소성-2차 크리프 거동재료에서 균열체에 갑작스런 하중을 가하였을 때 균열전단에 형성된 소성영역을 마치 탄성-2차크리프 재료에서 하중유지 시간 t_{pl} 지난후에 균열전단에 형성된 크리프 영역과 같은 효과가 있다고 가정할 수 있다. 따라서, 탄성-소성-2차 크리프 거동재료를 해석할 때에 하중유지시간 t 대신, $t+t_{pl}$ 을 사용하면 3.1의 탄성-2차 크리프 거동재료에서 유도된 식을 그대로 적용할 수 있으며, $(C_t)_{avg}$ 식은 (4)와 같이 표현된다.

$$(C_t)_{avg} = \frac{2\alpha\beta\tilde{\gamma}_c(\theta, n)}{E} (1-\nu^2) \frac{\Delta K^4}{W} \frac{F}{F} (EA)^{\frac{2}{n-1}} \times \left[\frac{(t_h+t_{pl})^{\frac{2}{n-1}} - t_{pl}^{\frac{2}{n-1}}}{t_h} \right] + C^* \quad (4)$$

t_{pl} 의 값은 재료물성값으로부터 계산에 의해, 또는 실험적으로 측정할 수 있다⁽⁴⁾. 1.25Cr-0.5Mo강 사용재를 사용하여 넓은 범위의 하중유지시간에 대해 크리프-피로 균열성장율을 측정하여 (4)식의 $(C_t)_{avg}$ 로 실험결과를 특성화하여 Fig.3에 나타내었다⁽⁵⁾. 균열성장속도가 $(C_t)_{avg}$ 로 잘 특성화 됨을 알 수 있다.

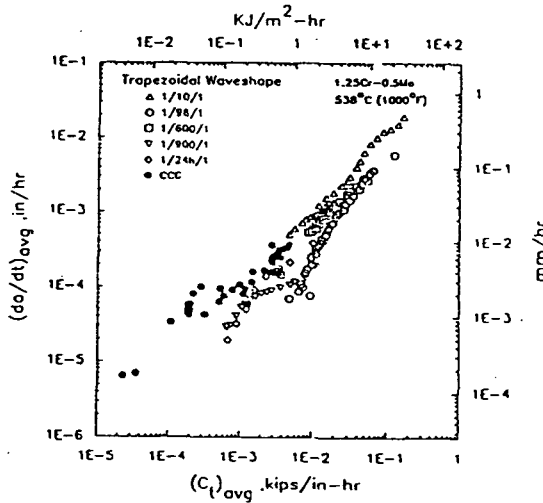


Fig.3 Characterization of creep-fatigue crack growth rates by $(C_t)_{avg}$ for elastic-plastic-creeping material

3.3 과하중의 영향

고온 후속부 균열발생부에서 기동/사용/정지중에 실제적으로 발생하는 피로하중형태는 사다리꼴 파형 전·후에 주기적으로 과하중이 존재하는 파형이다. Fig.4에 과하중이 있는 경우와 과하중이 없는 경우의 균열성장 실험 결과를 비교하였다⁽⁶⁾.

하중유지 시간 동안의 시간의존 균열성장율을 (4)식의 $(C_t)_{avg}$ 로 특성화 할 수 있으며, 다만, 이때의 t_{pl} 은 과하중이 있는 경우 과하중의 ΔK_{max} 를 고려하여 (5)식으로 결정하여야 한다⁽⁷⁾.

$$t_{pl} = \frac{1}{EA} \left[\xi \left(\frac{m-1}{m+1} \right) \left(\frac{\Delta K_{max}}{\Delta K_{hold}} \right)^2 \left(\frac{1}{2\sigma_{ys}^c} \right)^2 \frac{1}{\alpha \tilde{\gamma}_c(\theta, n)} \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (5)$$

과하중이 없는데에는 t_{pl} 을 (6)식으로 결정하였다.

$$t_{pl} = \frac{1}{EA} \left[\xi \left(\frac{m-1}{m+1} \right) \left(\frac{1}{2\sigma_{ys}^c} \right)^2 \frac{1}{\alpha \tilde{\gamma}_c(90^\circ, n)} \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (6)$$

Fig.5의 실험 결과를 보면 과하중이 존재하는 경우에는 크리프 기공 발생율이 높

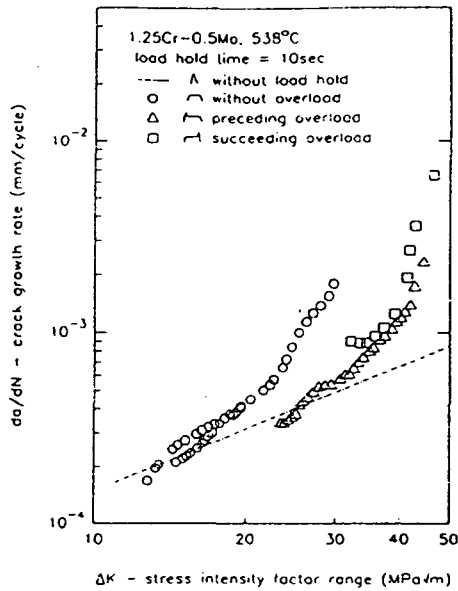


Fig.4 Fatigue crack growth rate with overload preceding or succeeding the load hold period.

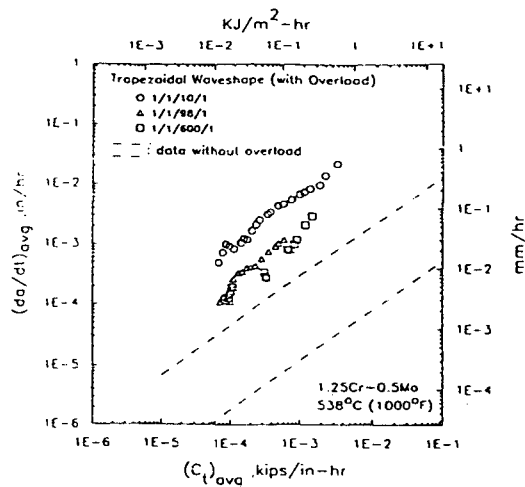


Fig.5 Time-dependent crack growth rate with overload preceding the load hold period.

아저 크리프 손상이 가속화됨으로써 균열성장 속도가 빨라지는 것을 볼 수 있다.
과하중 작용시에 ΔK_{max} 은 대개 탄성과피역학 적용 한도를 넘어가는 경우가 많

으므로, 이 때에는 ΔK 대신 ΔJ 를 주기의존 균열성장율을 특성화하는 파괴 매개 변수로 사용하게 된다. ΔJ -적분을 고온에서의 피로하중에 적용할 수 있는 이론적 근거는 확립되어 있다^(8,9).

3.4 하중증가 시간의 영향

앞절에서 고려한 사다리꼴 파형은 하중이 순간적으로 가해진다고 가정하였었다. 즉, 하중유지기 초기의 균열선단 응력장은 탄성(또는 탄소성) 특이응력장을 갖는다고 가정하고 $(C_I)_{avg}$ 식이 결정되었다. 그러나, 하중유지기 초기의 응력장은 하중증가 시간, t_r , 의 영향을 받으므로 t_r 의 크기에 따라 하중유지기 동안의 $(C_I)_{avg}$ 값이 변하게 된다. 하중증가시간이 0.5초에서 100초까지 변하는 조건에서의 크리프-피로 균열성장 실험을 통해 새로운 $(C_I)_{avg}$ 평가식이 (7)식과 같이 제안되었다^(10,11).

$$(C_I)_{avg} = \frac{2\alpha\beta}{E} \hat{r}_c(\theta, n) (1-\nu^2) \frac{\Delta K^4}{W} \frac{F^*}{F} (EA)^{\frac{2}{n-1}} \quad (7)$$

$$\left[\frac{\left(t_h + \frac{\delta}{1+2n} t_r\right)^{\frac{2}{n-1}} - \left(\frac{\delta}{1+2n} t_r\right)^{\frac{2}{n-1}}}{t_h} \right] + C^*$$

이때 하중증가시간의 변화에 대한 1Cr-1Mo-0.25V강의 거동을 Fig.6에 나타내었다. (7)식은 탄성-2차 크리프 거동 재료의 C_I 식에 t 를 $t + \delta t_r / (1+2n)$ 로 치환하여 얻은 식이다. 이 식은 하중 증가시기 t_r 동안의 크리프에 의한 응력완화 등의 변화 상태가 하중 유지기에 하중 유지시간이 $\delta t_r / (1+2n)$ 만큼 경과했을 때의 변화 상태와 동일함을 나타낸다. δ 는 상수로서 함수의존성 이외의 불확실성을 고려하여 도입되었는데 유한요소해석으로부터⁽¹²⁾ δ 를 결정하는 식이 유도될 수 있다.

3.5 산화의 영향

고온에서 저합금강의 시간의존 균열성장율에 영향을 주는 손상요인은 크리프 뿐이 아니라 산화도 크다⁽¹³⁾. Fig.7에 10^{-9} torr의 고온진공에서 측정된 크리프-피로 균열성장율을 공기중에서 결과와 비교하였다. 산화의 영향이 배제된 진공실험의 경우 균열성장율이 많이 감소되어 있음을 볼 수 있다⁽¹⁴⁾.

이러한 실험적 결과를 크리프-피로 균열성장 모델에 반영하기 위해서 Fig.8에 보인대로 산화의 영향을 고려하여 다음과 같은 모델을 가정할 수 있다. 즉, 균

열선단에서 포물선 형태의 산화가 발생한다고 가정하면, 산화에 의한 손상 누적 속도(즉, 산화에 의한 시간의존 균열성장 속도)는 피로주기 초기에는 크며, 시간이 지나면 점차 손상 누적속도가 떨어지며, 결국은 패시베이션(passivation) 효과에 의해 산화는 더 이상 발생하지 않게 된다. 새로운 피로 주기에서는 균열선단의 산화층이 깨어진다면 위의 손상기구는 반복되게 된다. 이와 같은 산화의 경우

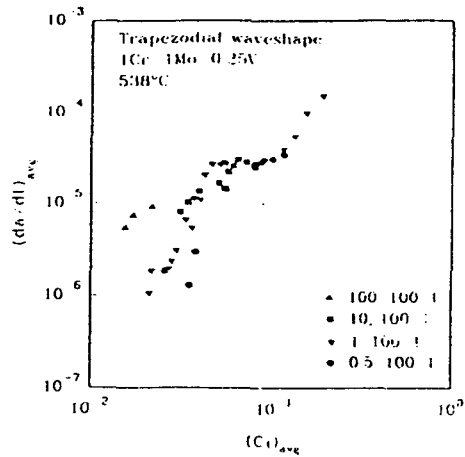


Fig.6 Time-dependent crack growth rate with various load increasing times.

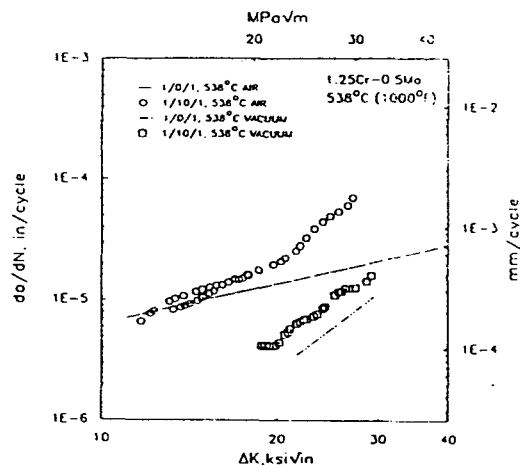


Fig.7 Time-dependent crack growth rate under vacuum conditions excluding oxidation effect.

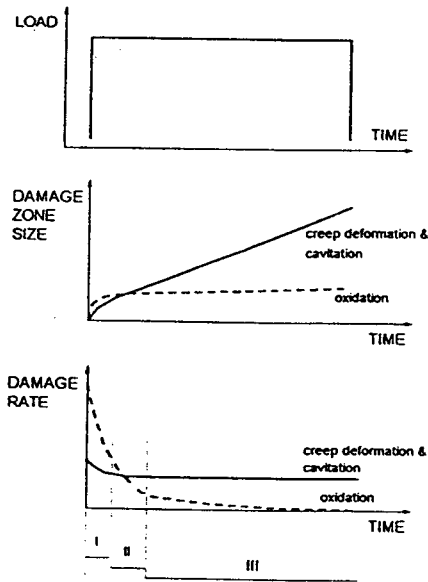


Fig.8 Schematics showing transition of dominant damage mechanism from oxidation to creep.

와는 달리 크리프에 의한 손상(크리프 변형 및 크리프 기공 손상)은 크리프 변형량과 비례하여 발생할 것이다. 즉, 피로주기가 길어짐에 따라, 주요손상이 산화손상에서 크리프 손상으로 변해 간다고 볼수 있으므로, 크리프-피로 파형의 주기 길이에 따라 산화손상이 우세한 영역(영역 I), 크리프 손상이 우세한 영역(영역 III) 및 천이영역(영역 II) 등으로 나눌수 있다. 앞 절에서의 설명한 실험결과 들은 대부분이 영역 II 및 III에서 얻어진 것이므로 크리프 변형이 시간의존 균열성장율에 영향을 주는 주요인이므로 C_f 를 파괴 매개변수로 사용할 수 있다.

만약 산화가 우세한 경우에는 전체 피로균열성장율을 (8)식과 같이 나타낼 수 있고, 산화에 의한 da/dN 은 C_f 대신 균열선단의 응력상태를 나타내는 $C(t)$, K , ΔK 등으로 특성화하여야 할 것이다⁽¹⁴⁾.

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN}\right)_{cycle} + \left(\frac{da}{dN}\right)_{creep} + \left(\frac{da}{dN}\right)_{oxidation} \quad (8)$$

4. 향후 연구 방향

Cr-Mo-V강⁽¹³⁾ 및 Cr-Mo강⁽¹⁶⁾ 모두의 경우에 크리프-피로 균열성장 실험중에

균열선단에 부하된 K값이 작을 때 또는 시험초기에, 균열성장율이 매우 작아서 산화에 의해서만 균열이 성장하는 것으로 판단되는 현상을 보인다. 1Cr-1Mo-0.25V강의 경우⁽¹¹⁾와 유사하게 0.5Cr-0.5Mo-0.25V 주철강재에서도 Fig.9에 보인 바와 같은 현상이 관찰되었다. 따라서 이와 같은 현상이 어떤 특정한 조건에서 발생하는 지에 대한 연구가 필요하다.

한 주기당 균열성장율이 주기의존 균열성장율 및 시간의존 균열성장율의 합으로 나타난다면, 하중유지시간이 있는 사다리꼴 피로 파형을 사용하여 측정된 균열성장율은 시간의존 성장율의 기여 때문에 삼각파형으로 측정된 균열성장율보다 커야한다. 그러나 하중이 높은 경우 또는 하중은 낮으나 하중유지시간이 긴 경우의 크리프-피로 균열성장 실험 결과중 일부에서는 사다리꼴 파형에서 측정된 균열성장율이 삼각파형의 것 보다 오히려 낮은 경우가 발생한다. Fig.10, Fig.11에 1.25Cr-0.5Mo강⁽¹⁶⁾ 및 0.5Cr-0.5Mo-0.25V⁽¹⁵⁾ 주강의 실험 결과를 각각 나타내었다. 이는 균열단합(crack closure)현상과 관계가 있다고 생각되며, 균열단합은 하중유지기 동안 균열선단에 발생한 크리프 영구변형량과 관계가 있을 것이다. 이는 실험 초기에 이와 같은 현상이 나타나다가 후기에 없어지는 것으로 보아 추측될 수 있다.

실 구조물에서의 균열 발생은 대개 용접부의 열영향부(HAZ, heat affected zone) 또는 용선에서 발생하므로 열영향부에서 균열이 성장할 때의 균열성장율 평가 모델에 대한 연구가 필요하다. C(T) 시편을 사용하여 용접부의 균열성장 시험을 수행하기 위해서는 Fig. 12와 같이 균열선단 및 균열성장 방향이 HAZ에

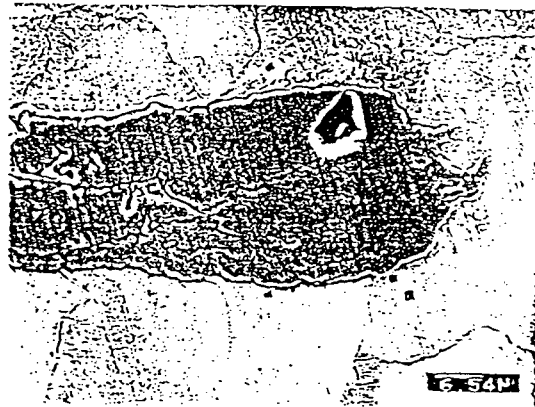


Fig.9 Crack growth by oxidation of 0.5Cr-0.5Mo-0.25V casting steel.

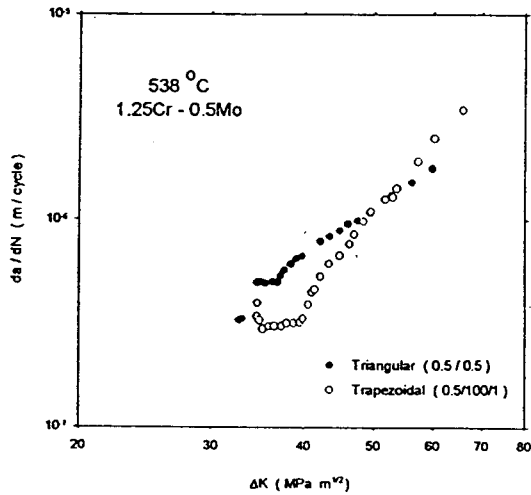


Fig.10 Observed crack growth retardation under trapezoidal waveshape for 1.25Cr-0.5Mo steel.

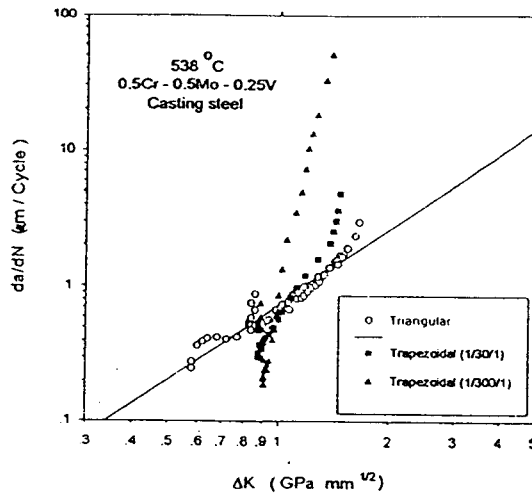


Fig.11 Observed crack growth retardation under trapezoidal waveshape for 0.5Cr-0.5Mo-0.25V casting steel.

위치한 형태의 시편의 준비가 필요하다⁽¹⁷⁾. 이때, 균열면을 경계로 양면의 크리프 특성이 다르므로 C_t -매개변수를 균열성장파괴 변수로 사용할 수 있는지 C_t 의 물리적 의미에 대한 검토가 필요하며, 용접부 균열의 C_t -평가식의 유도가 필요하다

다.

현재의 크리프-피로 균열성장 모델은 매 주기마다 크리프 영역의 크기가 초기 상태에서 다시 시작한다고 가정하고 있지만, 크리프-피로 실제 실험 결과에서는 피로 횟수가 누적됨에 따라 일부의 크리프 변형량이 누적됨을 볼 수 있으므로 이 가정에 대한 검토가 필요하다⁽¹⁸⁾.

5. 결론 및 요약

본 글에서는 저합금강인 1.25Cr-0.5Mo강(신재 및 사용재), 1Cr-1Mo-0.25V강, 0.5Cr-0.5Mo-0.25V주강 등으로 수행한 크리프-피로 균열성장 실험연구 결과에 대해 토의하였다. 실험 결과로부터 C_1 매개변수를 이용한 고온 균열성장을 평가 모델에서 여러가지의 재료 구성방정식 형태 (탄성-2차크리프 거동재료, 탄성-1차크리프-2차크리프 거동 재료, 탄성-소성-2차 크리프 거동 재료), 여러 가지 사다리꼴 피로하중 형태 (과하중의 존재 여부, 하중증가 시간의 변동)를 고려한 C_1 변수 평가식에 대해 제안하였다. 제안된 C_1 매개변수 평가식을 이용한 크리프-피로 균열성장 모델로써 고온설비의 균열성장수명을 예측할 수 있다. 또한, 크리프-피로 균열성장 모델에서의 산화의 영향, 균열 단합 현상, 용접부 균열 등에 대해서도 향후 연구 방향에 대해 토의 하였다.

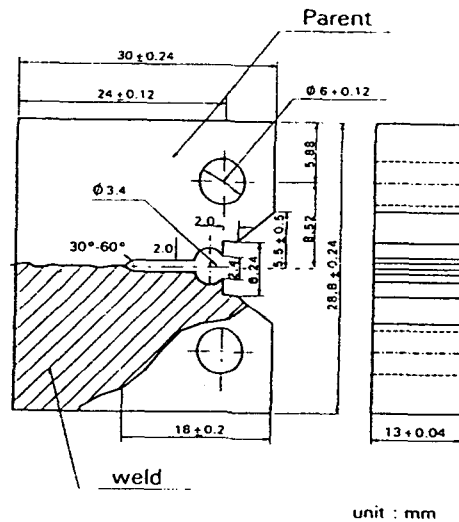


Fig. 12 Weld specimen for creep-fatigue crack growth testing.

6. 참고 문헌

- (1) Saxena A., Gieseke B., Yoon K. B., Norris R. H. and Banerji K, "Applicatin of C_t in Characterizing Elevated Temperature Crack Growth During Hold Time", 1
- (2) Saxena, A. and Gieseke, B., "Transients in elevated temperature crack growth", *Proceedings of MECAMET, Vol. III pp.19-36, 1987*
- (3) 윤기봉, Saxena, A., 이해무, "C_t-매개변수를 이용한 탄성-소성-크리프 변형 재료의 크리프-피로 균열성장 모델" 제5회 재료강도 심포지움, pp17-26, 1991
- (4) Yoon, K. B., Saxena A. and McDowell D., "Influence of Crack Tip Cyclic Plasticity on Creep-Fatigue Crack Growth", *Fracture Mechanics, American Society for Testing Materials STP 1131 Vol. I, pp.367-392, 1992*
- (5) Yoon, K. B., Saxena A. and Liaw P. K., "Characte rization of Creep-Fatigue Crack Growth Behavior Under Trapezoidal Waveshape Using C_t-Parameter", *Int. J. of Fracture 59, pp 95-114, 1993*
- (6) Yoon, K. B., Huh, Y. H. and Saxena A., "Creep Fatigue Crack Growth Behavior During Load Hold Period with Preceding and Succeeding Cyclic Overload", *FATIGUE 93 Vol. II pp 891-896, 1993*
- (7) Yoon, K. B., Saxena, A. and McDowell, D., "Effect of Cyclic Overload on the Crack Growth Behavior During Hold Period at Elevated Temperature", *Int. J. of Fracture 59, pp 199-211, 1993*
- (8) Yoon, K. B., and Saxena A., "An Interpretation of ΔJ for Cyclically Unsaturated Materials", *Int. J. of Fracture, Vol.49, No.1, pp. R3-R9, 1991*
- (9) 김태순, 박재학, 윤기봉, "ΔJ 적분의 경로 독립성에 관한 연구" 한국산업안전학회지 제11권 제2호 pp.16-24, 1996
- (10) 윤기봉, 백운봉, 이해무, "하중증가 시간이 다른 사다리꼴 파형에서의 Cr-Mo-V강의 크리프-피로 균열성장 거동, 대한금속학회지 제32권, 제4호, pp. 496-502, 1994
- (11) Yoon, K. B. Baek, U. B. and Suh, C. M., "Effects of Loading Rate on Creep Crack Growth During the Succeeding Load-Hold Period Under Trapezoidal Fatigue Waveshape", *Elevated Temperature Effects on Fatigue and Fracture, ASTM STP 1297 pp. 102-116, 1997*
- (12) 이진호, 김영진, 윤기봉, "하중증가 시간동안 균열성장거동에 미치는 크리프-피로 상호작용의 영향", unpublished research

- (13) 백운봉, 남승훈, 서창민, 윤기봉, “크리프-피로 균열성장에서의 초기 천이거동에 대한 연구”, *대한기계학회논문집 제18권, 제7호, pp.1722-1729, 1994*
- (14) 윤기봉, “산화를 고려한 크리프-피로 균열성장 모델에 대한 연구”, *to be submitted.*
- (15) 윤기봉, 권진오, 이해무 “터빈케이싱 재료의 크리프 피로 균열성장 거동”, 전력기술연구원, unpublished research
- (16) 윤기봉, 백운봉, 신규인, *고온균열성장을 예측 일반모델 개발 (2차년도)*, 과학기술처, KRISS-95-075-IR
- (17) 윤기봉, 신규인, *1Cr-0.5Mo강 용접부의 균열성장 수명평가 기술개발*, 한국중공업 기술연구소 연구보고서, 1996
- (18) Adefris, N. B., McDowell, D. L. and Saxena, A., “An Alternative Definition of the Creep Zone and Associated Analytical Approximations of the Ct Parameter”, *submitted for publication*