용접부 계면균열의 크리프 균열성장 거동 모델링
(Modeling of Creep Crack Growth Behavior of Weld Interface Crack)

윤 기 봉* · 김 광 웅** · Fuzhong Shen***

* 중앙대학교 기계설계학과
**중앙대학교 대학원
***중국 남경화공대학 기계과

1.서론

고온에서 사용 중인 용접 요소에 처음 제작시 형성된 결함이나 온도 구배 및 산화에 의해 사용중 생긴 균열은 고온 크리프 조건하에서 취약한 HAZ부를 따라서 성장하게 된다. 시간이 충분히 지나 크리프 영역이 부재의 상당한 영역을 차지하고 크리프거동이 지배적인 재료거동으로 가정할 수 있을 때 C^*-적분은 이러한 균열의 성장거동을 특성화하는 좋은 파괴매개변수가 된다. 그러나, 소규모 크리프 영역 및 천이 크리프 영역에서 재료의 구성방정식은 크리프뿐 아니라 탄성거동도 고려한 탄성-1차-2차 크리프 거동재료로 가정되어야 하고, 탄성거동 후의 크리프에 의한 응력완화 때문에 C^*-적분의 경로독립성은 더 이상 존재하지 않아서, 새로운 파괴 매개변수가 정의되어야만 한다.

Saxena에 의해서 정의된 C_t매개변수는 다양한 실험을 통해 소규모 및 천이영역에서도 좋은 매개변수가 될 뿐만 아니라 C_t와 크리프 균열성장률과의 유일한 관계가 실험적으로 설명되고, 해석적으로 규명되었기 때문에, 실험실에서 작은 시편으로 구해진 결과를 실기의 커다란 부재에 적용할 수 있다. 또한 ASTM규격에서는 정상상태에 도달하기 전의 상태에서도 $C^*(t)$를 정의하여 C_t와 유사하게 사용하기도 한다. 따라서 본 논문은 용접부 계면균열의 고온 크리프 균열성장 실험 데이타를 해석하여 $C^*(t)$-적분 및 C_t매개변수와 균열성장률사이의 관계를 밝혀서 용접요소에 존재하는 실제 균열의 안전성 및 수명 평가에 활용할 수 있도록 모델을 제시하였다. 특히 Cr-Mo강의 경우 1차 크리프의 영향을 무시할 수 없을 정도로 중요하므로 2차 크리프만 고려[1]하지 않고 1차 크리프도 고려하여 모델을 개선하였다.

2. 실험

2.1 시편제작 및 크리프 균열성장 시험

본 연구에 사용된 재료는 1965년부터 폐기될 때까지 약 180,000시간 사용되었던 화력발전소 보일러 과열기 출구 헤더로 1Cr-0.5Mo 강이다. 크리프 균열성장실험에 사용된 SNS, NNN인 2가지 형태의 용접부 시편은 재질이 열화된 상태의 사용재(serviced material)를 S로 표기하고, 인성회복 열처리를 실시하여 신재(new material)로 가정된 재료를 N으로 표기한 경우, SNS는 사용된 모재에 새로이 용접을 실시해서 사용 중 설비에 실제 보수용접을 한 상태와 같은 조건이 되도록 한 것이며, NNN은 신재를 모재로 하여 그 사이를 동종재료로 용접한 시편이다.

시편 제작과 크리프 균열 성장시험은 ASTM E1457 규격에 제시된 실험방법을 기준으로 실시하였으며, SNS시편 4개 및 NNN시편 2개에 대해 균열성장시험을 하였다.

Table.1 Tensile properties of test material at room temperature and 538 °C

Material	Temperature (°C)	Young's Modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	D(Plastic coefficient)	m(Plastic exponent)
New	25	210	412.5	541.0	5.89E-18	5.86
Serviced			282.0	494.5	2.54E-13	4.68
New	538	147	338.0	445.0	6.46E-25	8.62
Serviced			258.8	308.0	4.95E-34	12.75

Table.2 Primary and secondary creep constants of test material at 538 °C

Material	$A((MPa)^n \cdot hr^{-1})$	n	$A_1((MPa)^{-n1} \cdot hr^{-1})$	n_1	p
New	1.8268e-24	9.034	9.53127e-28	10.2939	0.4831
Serviced	3.8562e-23	9.361	1.31886e-17	5.62239	0.8001

2.2 기계적 물성 측정

재료의 사용 온도인 538 °C에서 인장 및 크리프 특성을 측정하여 $C^*(t)$-적분 및 C_t매개변수 평가에 사용하였다. 인장 기계 물성치는 문헌[2]에서 발췌하였고 Table.1과 같다.

크리프 기계 물성치를 측정하기 위하여 신재와 사용재에 대한 크리프 시험을 실시하였다. 최소자승법에 의해 구해진 1차,2차 크리프 상수는 Table.2와 같다.

3. 해석 및 결과

3.1 $C^*(t)$-적분과 크리프 균열 성장률

크리프가 균열체의 많은 부분에 퍼질만큼 충분한 시간동안 하중이 가해지고 2차 크리프가 지배적인 영역이 시편의 대부분을 차지하는 정상상태 크리프일 때 C^*-적분은 고온파괴 매개변수로서의 충분한 역할을 한다. 그러나 대부분의 경우 정상상태 크리프 조건을 만족하기 어려우므로 C^*를 변형한 $C^*(t)$변수를 사용한다. 다른 두개의 시편종류(NNN 및 SNS시편)에 대해 크리프 균열 성장 거동의 차이가 크지 않으므로 이를 한 그래프에 표시하여 관계식을 찾아보면 Fig.1에 보인 바와 같다.

따라서, 두 시편의 경우 모두 다음 모델식(1)으로 크리프 균열성장율을 계산할 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = 1.042 \times 10^{-2} [C^*(t)]^{0.7728} \quad (1)$$

3.2 1차 크리프 영향을 고려한 C_t매개변수와 크리프 균열 성장률

실기 부재의 경우 균열에 비해 비균열부위(uncracked ligament)의 크기가 상당하기 때문에 소규모 및 천이크리프 영역이 많은 부분을 차지한다. 따라서 파괴매개변수로 C_t매개변수를 사용하는 것이 $C^*(t)$-적분을 사용하는 것보다 정당하다. 균열성장률과 1차 크리프 영향을 고려한 C_t와의 관계를 나타낸 Fig.2를 관찰하면 두 종류의 시편에 대해 크리프 거동의 차이가 없으므로 하나의 모델식(2)으로 표현이 가능하다.[3]

$$\frac{da}{dt} = 1.295 \times 10^{-2} (C_t)^{0.7584} \quad (2)$$

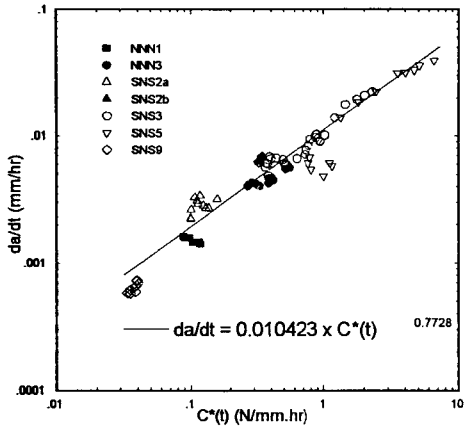

Fig.1 da/dt vs $C^*(t)$ relationship of 1Cr-0.5Mo steel weld

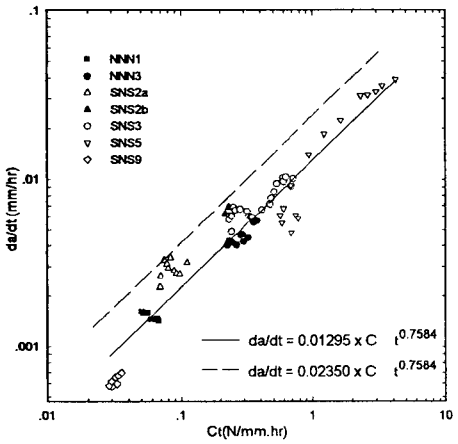

Fig.2 da/dt vs C_t relationship of 1Cr-0.5Mo steel weld

그래프에서 분산폭의 상부경계를 나타내는 식은 (3)식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = 2.350 \times 10^{-2} (C_t)^{0.7584} \tag{3}$$

구조물 균열의 C_t값은 탄성-1차-2차 크리프 재료거동을 보이는 재료의 경우 다음식(4)으로 평가할 수 있다.

$$C_t = \frac{K^4(1-\nu^2)}{E\pi W}\beta\tilde{r}_c(\theta, M)\frac{F'}{F}[(n_1+1+p)A_1]^{\frac{2}{(1+p)(M-1)}}\frac{2}{(1+p)(M-1)} \left(\frac{I_M E}{2\pi(1-\nu^2)}\right)^{\frac{2}{M-1}} t^{\left[\frac{2}{(1+p)(M-1)}-1\right]} + C^*\left[\left(\frac{t_2}{t}\right)^{\frac{p}{p+1}} + 1\right] \tag{4}$$

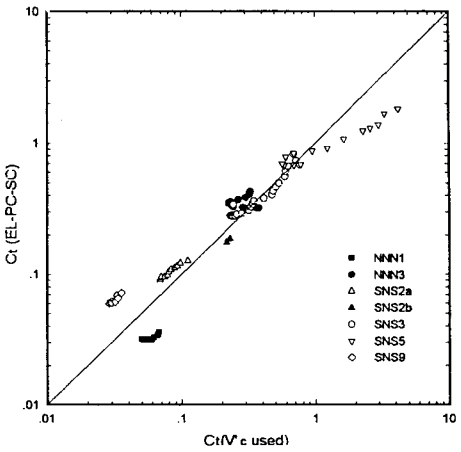

Fig3. Relations between C_t by analytical method and C_t obtained from exprimental method

한편, 1차 크리프를 고려한 일반식(4)에 의해 얻어진 C_t와 하중선 변위측정으로부터 구해진 C_t와의 관계를 Fig.3에 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 고온 헤더에 많이 사용되는 1Cr-0.5Mo 강을 대상으로 하여, 용접부에 균열이 존재하는 경우에 정하중 크리프 조건에서 균열 성장에 따른 잔여수명평가 해석을 수행하기 위하여 균열 성장속도와 C_t매개변수 및 $C^*(t)$-적분과의 관계를 규명하였다. 소규모 크리프 및 천이 크리프를 무시할 수 없는 실기부재에 적용하기 위해서 (2)식을 사용하는 것이 좋고 상부 경계를 고려한 (3)식은 보수적인(conservative) 잔여 수명 평가에 유용하다. Cr-Mo 강의 경우 1차크리프의 영향이 중요하므로, 실제 구조물의 C_t값은 (4)식을 사용하여 평가하여야 한다.

5. 참고문헌

(1) 김광웅, 윤기봉, 최현창, 정용근, "1Cr-0.5Mo강 용접부의 크리프 균열성장거동", to be submitted.

(2) 윤기봉, 신규인, 정용근, 이해무 "Cr-Mo강 용접열영향부에서의 고온 균열성장거동 연구", 용접학회 춘계학술발표 개요집, pp. 65~68, 1997.

(3) C. P. Leung , D. L. McDowell, "Inclusion of Primary Creep in the Estimation of the C_t Parameter", International Journal of Fracutre, Vol.46, pp. 81-104, 1990.