

용접부 균열의 고온 균열성장 수명평가를 위한 파괴매개변수의 수치해석적 연구

A Numerical Study on Fracture Parameter for Elevated Crack Growth Life Prediction of Weld Fusionline Crack

윤기봉*, 이진상**, 심현우***, 신영의*

* 중앙대학교 기계공학부, **중앙대학교 대학원, *** 한국타이어 중앙연구소

1. 서론

고온 설비의 균열성장에 의한 파괴는 특히 용접으로 제작되어 있는 요소들에서 자주 발생하고, 용접요소의 균열은 모재(matrix) 및 용접재(weld) 사이의 취약한 열영향부와 용선(fusion line)을 따라서 발생, 성장하는 경향이 있다. 따라서, 용접부 모재와 용접재 사이의 용접 계면균열에 대한 파괴 거동을 연구하는 것은 고온설비의 균열성장 수명을 평가하는데 중요하다. 최근 고온 파괴역학 연구에서는 크리프 균열성장률을 특성화할 때에 C_t 매개변수가 널리 사용되고 있다. 하지만, 용접부 또는 접합부 균열과 같이 경계면을 가지고 있는 이종재료 사이에 계면균열(interface crack)이 존재할 경우에는 기존의 동질 재료에 대한 C_t 평가식으로는 용접부 균열의 크리프 거동을 설명하기에 불충분하다.

따라서, 본 연구에서는 유한요소 해석법으로 용접부의 계면균열을 모델링하여 Mode I 하중조건에서 탄성-크리프 변형거동을 가정하고, 용접재와 모재의 크리프 상수를 여러 가지 경우의 조합조건으로 변화시키면서 부하후 경과 시간에 따른 균열의 C_t 값 변화를 해석하였다. 즉, 1Cr-0.5Mo 강 모재와 용접재가 결합된 재료의 계면에 균열이 존재할 때 탄성-2차 크리프 거동으로 가정하고 정하중 조건에서의 균열 선단 변형을 모사(simulation)하였다. 해석 결과로부터 용접계면에 균열이 존재하는 균열체가 고온에서 크리프 변형을 일으킬 때에 C_t 매개변수의 크리프 상수의 변화에 따른 값의 변화를 관찰하였고, 관찰된 규칙성을 이용하여 계면균열의 C_t 의 근사 평가식을 제안하였다.

2. 이론적 배경

재료가 탄성-2차 크리프 거동을 보이고 Mode I 균열을 가정하면, 재료의 구성방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + A\sigma^n \quad (1)$$

소규모 크리프 조건에서 C_t 는 정의에 따라 실험적으로 측정 가능한 \dot{V}_c 의 향으로 (2)식과 같이 표현할 수 있다.

$$C_t = \left(\frac{F'}{F} \right) \frac{P\dot{V}_c}{BW} \quad (2)$$

전반적 크리프 조건에서 C_t 는 (3)식의 C^* 와 같아지므로,

$$C^* = \eta \frac{P\dot{V}_c}{BW} \quad (3)$$

소규모 크리프 조건에서 전반적 크리프 조건까지 전영역에서의 C_t 는 (2)식과 (3)식을 조합하여 (4)식으로 표현된다.

$$C_t = \frac{P\dot{V}_c}{BW} \frac{F'}{F} - C^* \left(\frac{F'}{F} \frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (4)$$

(2)식의 η (a/W)는 문헌의 정의를 따른다.

3. 유한요소해석

본 연구에서는 2차원 평면변형률 C(T)시편을 일정하중 조건에서 해석하였다. C(T)시편 형상은 이전 실험연구에 사용된 시편을 모델링하였다. 즉, 폭 30 mm, 두께 13 mm, 균열비 (a/W) 0.5인 시편이 모델링되었고, 3920 N의 정하중을 주었다. 유한요소해석으로 계산된 하중점 변위속도의 결과를 사용하여 C_t 를 평가하였다. 이는 실험적으로 하중점 변위속도를 측정하여 C_t 매개변수를 평가하는 과정과 동일하다. 해석에 사용된 재료물성 데이터는 실험으로 측정된 1Cr-0.5Mo강의 데이터를 모재 물성으로 사용하였고, 문헌상에 보고된 1.25Cr-0.5Mo용접재의 크리프 데이터를 용접재 물성 데이터로 사용하였다. 동질재료로 제작된 동질재 C(T)시편의 거동과 모재와 용접재가 용접되어 제작된 이종재 C(T)시편의 거동과의 차이점을 비교하기 위해, 동질재 시편 및 이종재 시편 두 가지 시편 모두를 각각 모델링하여 해석하였다. 동질재 C(T)시편은 모재만으로 C(T)시편이 형성된 경우와 용접재만으로 C(T)시편이 형성된 경우 모두를 해석하였다. Table 1에 용접재 및 모재의 인장 물성값과 크리프 상수를 나타내었다.

Table 1 Tensile and creep properties of matrix and weld metals.

Material	Temp. (°C)	A (MPa ⁻ⁿ · hr ⁻¹)	n	E (GPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
Matrix	25	-	-	205	282	495
Weld		-	-		198	382
Matrix	538	$1.83 \cdot 10^{-24}$	9.03	175	258	308
Weld		$6.36 \cdot 10^{-24}$	9.36		136	235

4. 결과 및 토의

이종재 용접시편의 C_t 변화경향

Fig.1은 Table 1의 재료물성을 사용하여 동질재 시편 및 이종재 용접시편의 경우에 부하 후 시간 경과에 따른 C_t 값의 변화를 나타낸 그래프이다. 모재만을 사용한 동질재 시편의 해석 결과는 긴 점선(---)으로, 용접재만을 사용한 동질재 시편의 해석 결과는 실선(—)으로, 모재와 용접재를 모두 사용한 이종재 용접시편은 점선(·····)으로 Fig.1에 함께 나타내었다. C_t 값은 유한요소해석 결과로부터 하중선에서의 크리프에 의한 변위증분 속도를 결정하여 식 (2)를 이용하여 계산하였다. 소규모크리프 조건뿐 아니라 전 크리프 조건에서 C_t 값의 더욱 정확한 계산은 (4)식을 사용하여 계산하여야 하나 이종재 용접시편의 경우 C^* 값의 식이 해석적으로 정의되어 있지 않아 계산이 어려우므로, (2)식을 사용하여 근사적으로 C_t 값을 계산하였다. Fig.1에 보였듯이 동질재 시편 및 이종재 용접시편 모두 부하 후 일정 시간이 경과하면 C_t 값은 더 이상 변하지 않는 값에 도달한다. 이 정상상태의 값은 동질재 시편의 경우 C^* 값에 해당한다. 단, Fig.3에 나타난 값은 (3)식 대신 (2)식을 사용한 값이므로 F/F'와 η 의 차이만큼 다르게 된다. 본 해석의 경우 이 두 무차원 함수 값의 차이는 크지 않다. 이종재

Table 2 Creep properties for welded specimen analysis with various A values.

Analysis		A (MPa ⁻ⁿ · hr ⁻¹)	n
Weld 1	Weld 1	$6.36 \cdot 10^{-23}$	9.36
	Parent 1	$1.27 \cdot 10^{-23}$	9.36
Weld 3	Weld 3	$6.36 \cdot 10^{-23}$	9.36
	Parent 3	$1.27 \cdot 10^{-24}$	9.36

Table 3 Creep properties for welded specimen analysis with various n values.

Analysis		A (MPa ⁻ⁿ · hr ⁻¹)	n
Weld 4	Weld 4	$6.36 \cdot 10^{-23}$	9.36
	Parent 4	$6.36 \cdot 10^{-23}$	9.03
Weld 6	Weld 6	$6.36 \cdot 10^{-23}$	9.36
	Parent 6	$6.36 \cdot 10^{-23}$	8.37

용접시편에 대한 정상상태의 C_i 값은 모재 및 용접재 시편의 어느 한 쪽의 C_i 에 따르는 것이 아니라 그 사이의 값을 유지하면서 변하는 것을 알 수 있다.

크리프 상수의 변화에 따른 이중재 용접시편의 C_i 변화경향

이중재 용접시편의 경우에, 시간에 따른 C_i 의 변화 경향에 대한 크리프 상수의 영향을 알아보기 위해, 모재와 용접재 사이의 여러 가지 크리프 상수를 갖는 조합에 대해 해석하여 C_i 의 변화 경향을 관찰하였다. 크게 두 가지 경우에 대하여 해석하였으며, 용접재의 크리프 상수(크리프 계수, A, 및 크리프 지수, n)는 항상 같은 값을 사용하고, 모재의 크리프 상수를 변화시키면서 해석하였다. 첫째의 경우는 크리프 계수 A가 이중재 용접시편의 C_i 변화경향에 미치는 영향을 알기 위해 Table 2에 보인 바와 같이 모재의 A값을 1.27×10^{24} , 1.27×10^{23} MPaⁿhr⁻¹의 2단계로 변화시키면서 해석하였고, 둘째의 경우는 크리프 상수 n의 영향을 알아보기 위해 Table 3에 보인 바와 같이 모재의 n값을 8.37, 9.03의 2단계로 변화시키면서 이중재 용접시편을 해석하였다. Fig.1, Fig.2에는 각각 Table 2, Table 3의 조건에서 동질재 시편 및 이중재 용접시편을 해석하여 시간에 따른 C_i 값의 변화경향을 나타내었다. Fig.1의 결과를 살펴보면 점선으로 표시된 용접시편의 C_i 는 모재부의 변화경향 보다는 용접재의 변화경향에 가까움을 알 수 있다. 즉, Fig.1에서 C_i 값이 감소하는 소규모 크리프 조건과 C_i 값이 일정한 전반적 크리프 조건의 경계인 천이시간(transition time)을 대략적으로 알 수 있는데, 이중재 용접시편의 천이 시간은 모재보다는 용접재의 천이시간에 가까움을 알 수 있다. 또한 정상상태에 도달했을 때의 용접시편의 C_i 값도 용접재 동질재 시편의 값에 가깝다. 이러한 경향은 Fig.2에서도 동일하게 관찰된다.

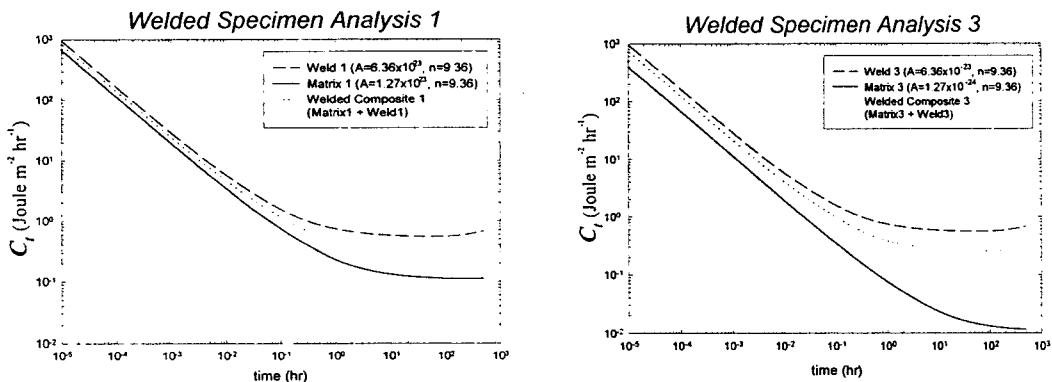


Fig. 1 C_i variation for welded specimen analysis with various creep coefficient(A) values.

C_i 변화 경향의 표준화

Fig.1과 Fig.2에서 보였듯이 이중재 용접시편의 C_i 변화 값은 모재의 크리프 상수를 사용하여 해석한 동질재 시편 및 용접재의 크리프 상수를 사용하여 해석한 동질재 시편의 C_i 변화값의 사이 값을 유지하면서 시간에 따라 변하고 있다. 이러한 이중재 용접시편과 동질재 시편의 C_i 의 변화를 상호 비교하기 위해, 부하 후 경과시간(t)을 천이시간(transition time, t_T)으로, 또한 경과시간, t, 에서의 C_i 를 정상상태에서의 C_i 인 $(C_i)_{ss}$ 로 (동질재 시편의 경우에는 C^* 에 해당함) 각각 나누어 무차원화(normalize)하여 서로 비교하여 Fig.3에 나타내었다. 천이시간은 (5)식으로 구하였다.

$$t_T = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{(n+1) E (C_I)_{ss}} \quad (5)$$

Fig.3에서 볼 수 있듯이 모재 및 용접재의 동질재시편 및 이종재 용접시편의 무차원화된 C_I 곡선이 거의 일치하였고, 이러한 현상은 크리프 계수 A만 서로 다른 재료의 경우, 크리프 지수 n만 다른 재료의 경우 및 크리프 상수 A, n이 모두 다른 재료의 경우 (Fig.3에 보인 두 가지 경우) 해석결과 모두에서 일관성있게 나타났다. 또한 A 및 n의 차이가 커지더라도 같은 결과를 얻을 수 있었다.

고온 크리프 조건에서 C_I 매개변수는 크리프 균열성장률 da/dt 와 다음의 관계식으로 표현된다⁽⁴⁾.

$$\frac{da}{dt} = B(C_I(t))^P \quad (6)$$

따라서,

$$\Delta a = B \int_0^t (C_I(\tau))^P d\tau \quad (7)$$

이다. 동질재 시편의 경우를 고려해 보면 주어진 균열 크기에서는, C^* 와 t_T 는 상수이므로 식 (9)는 무차원화된 C_I/C^* 와 t/t_T 로 (10)식과 같이 전개할 수 있다.

$$\Delta a = t_T B (C^*)^P \int_0^{t/t_T} \left(\frac{C_I(t_T \tau)}{C^*} \right)^P d\tau \quad (8)$$

따라서, 이상에서 동질재 균열체의 C_I 와 부하후 경과시간과의 관계를 알면 이 관계를 C^* 및 t_T 로 무차원하여 사용하는 경우 그대로 이종재 용접체의 경우에도 적용될 수 있다는 것을 유한요소해석으로 알았으므로, 식(8)을 용접부 계면균열을 갖는 고온구조물의 크리프 균열성장 수명평가에 활용할 수 있다. 다만, 이때 이종재 용접체의 경우 동질체 균열체의 C^* 에 해당하는 정상상태의 $(C_I)_{ss}$ 를 결정하는 방법에 대한 연구가 선행되어야 하며, 우선 $(C_I)_{ss}$ 의 근사값으로 모재 및 용접재 물성을 사용한 동질재 균열체의 C^* 값의 평균값을 사용할 수 있을 것이다.

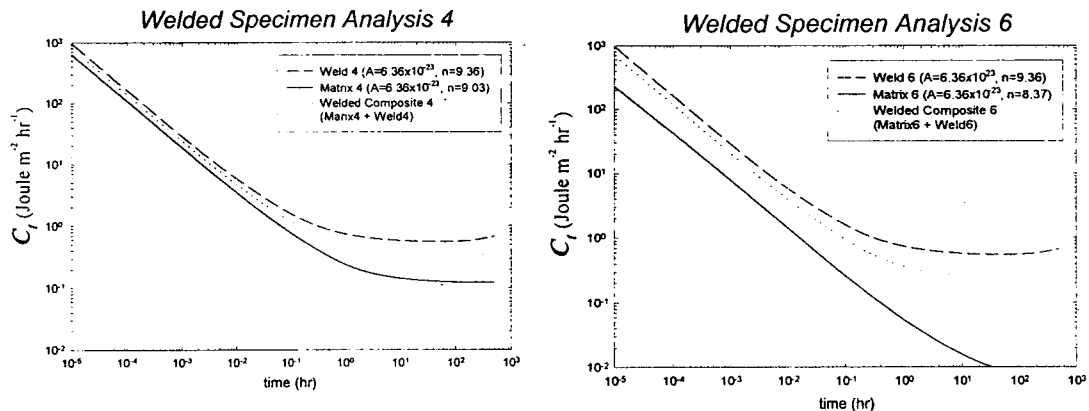


Fig. 2 C_I variation for welded specimen analysis with various creep exponent(n) values.

5. 결론

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 크리프 상수가 서로 다른 두 재료가 용접된 계면에 균열이 존재하고 재료가 크리프

거동을 할 때, 균열선단에서의 크리프 영역의 크기는 크리프 상수의 차이에 따라 크리프 강도가 약한 재료에서 현저히 빨리 증가하여 전반적인 크리프 조건에 이른다. 따라서 이중재 용접시편의 C_t 변화 경향은 용접재만의 동질재 시편의 C_t 변화 경향에 더 가깝다.

(2) 크리프 상수 A 및 n을 변화시켜 해석한 결과 이중재 용접시편 계면균열의 C_t 변화곡선을 정상상태의 $(C_t)_{ss}$ (동질재 시편의 경우 C^*) 값과 천이시간 t_T 로 무차원화 시켰을 때, 이중재 용접시편 및 동질재 시편 모든 경우의 C_t 변화곡선이 일치하였다.

(3) 따라서, 동질재 균열체의 $da/dt-C_t$ 관계식으로부터 이중재 용접 균열체의 $da/dt-C_t$ 관계식을 추측하여 크리프 균열성장량을 평가할 수 있는 절차를 제안하였다.

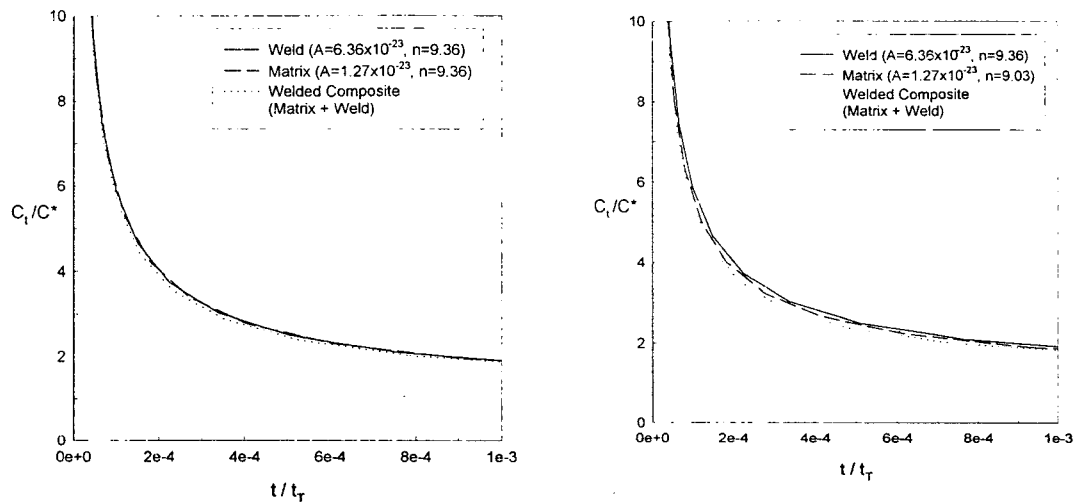


Fig. 3 Normalized C_t curves for welded specimen analysis with various creep properties (A and n).