

재료의 소성 거동을 고려한 용접 계면균열의 C_I 매개변수 평가

윤기봉* · 이진상**
(1999년 3월 10일 접수)

Evaluation of C_I -parameter for Weld Interface Crack Considering Material Plastic Behavior

Kee Bong Yoon and Jin Sang Lee

Key Words: Creep(크리프), Time Dependent Fracture Mechanics(고온파괴역학), C_I -parameter(C_I 매개변수), C^* -integral(C^* -적분), Weld(용접부), Fusion Line Crack(용융선균열)

Abstract

In this study, behavior of C_I which is a well-known fracture parameter characterizing creep crack growth rate, is investigated for weld interface cracks. Finite element analyses were performed for a C(T) specimen under constant loading condition for elastic-plastic-creeping materials. In modeling C(T) geometry, an interface was employed along the crack plane which simulated the interface between weld and base metals. The C_I versus time relations were obtained under various creep constant combinations and plastic constant combinations for weld and base metals, respectively. A unified C_I versus time curve is obtained by normalizing C_I with C^* and t with t_r for all the cases of material constant variations.

1. 서론

고온에서 발생하는 균열 성장에 의한 파괴는 용접으로 제작된 요소들에서 자주 발생하고, 특히 용접부의 모재 및 용접재 사이의 열영향부와 용융선을 따라서 균열이 발생, 성장하는 경향이 있다. 따라서, 고온 설비의 균열성장 수명을 평가하기 위해서는 용접부 모재와 용접재 사이의 용접 계면균열에 대한 파괴 거동을 연구하는 것이 중요하며, 이에 대한 연구가 국내외에서 진행되어 왔다.^(1~3)

고온 파괴역학에서는 C_I 매개변수가 크리프 균열성장률을 특성화하는 데 널리 쓰이고 있는데,

이전 연구⁽¹⁾에서는 유한요소해석 방법을 이용하여 재료가 탄성-2차 크리프 변형거동을 나타낼 때 용접계면에 균열이 존재하는 경우를 해석하여 각각 재료의 재료물성으로부터 C_I 매개변수를 계산할 수 있는 평가식을 제안하였다. 제안된 식은 하중유지시간이 비교적 긴 경우의 용접 계면균열의 크리프 균열성장률 특성화에 적용될 수 있다. 그러나 크리프-피로 균열성장률 특성화가 필요한 경우와 같이 하중유지시간이 짧은 때에는 부하 초기에 발생하는 균열선단 소성 영역이 하중유지 이후의 응력장 및 변형률장의 변화 거동에 영향을 주게 된다. 따라서, 탄성-크리프 거동재료에 대한 연구로부터 유도된 C_I 식을 사용하여 하중유지시간이 짧은 경우의 용접부 균열성장 거동을 특성화하면 큰 오차가 발생하게 된다.

본 연구에서는 재료의 소성거동을 고려하여 유한요소해석을 수행하였다. 즉, 용접부의 계면균열을 정지균열로 가정하고 모델링하여 Mode I 하중 조건에서 탄성-소성-크리프 거동 재료에 대해 해

* 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : kbyoon@cau.ac.kr

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

** 회원, 중앙대학교 대학원

Table 1 Material properties of base and weld metals

Material	Temp. (°C)	E (GPa)	ν	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	D (MPa ^{-m})	m	A (MPa ⁻ⁿ · hr ⁻¹)	n
Base	25	205	0.3	282.0	494.5	2.54E-13	4.68	-	-
Weld				198.0	382.0	2.65E-10	3.24	-	-
Base	538	175	0.3	258.8	308.0	4.95E-34	12.75	1.83E-24	9.03
Weld				136.0	235.0	4.03E-17	6.11	6.36E-23	9.36

석하였다. 용접재와 모재의 크리프 상수와 소성 상수를 각각 여러 가지 경우의 조합조건으로 변화시키면서 정하중 부하후 경과 시간에 따른 하중점의 변위속도(\dot{V}_c)값 변화를 관찰하였다. 본 연구결과는 크리프 특성 및 소성 특성이 서로 다른 재료 사이의 용접계면에 발생한 균열의 C_I 값을 평가하는데 적용할 수 있으며, 고온설비의 잦은 기동/정지에 따른 크리프-피로 균열성장거동을 예측하는데 응용할 수 있다.

2. 이론적 배경

균일재의 경우 탄성-2차 크리프 거동을 보이는 재료의 C_I 식은 잘 알려져 있다.⁽⁴⁾ 즉, 식 (1)과 같이 균일재의 크리프 상수와 균열크기, 하중조건으로부터 C_I 를 구할 수 있으며,

$$C_I = \frac{4a\beta\tilde{r}_c(\theta, n)}{E(n-1)}(1-\nu^2)\frac{K^4}{W}\frac{F'}{F} \cdot (EA)^{\frac{2}{n-1}}t^{-\frac{n-3}{n-1}} + C^* \quad (1)$$

균열체의 하중점 변위속도가 알려진 경우에는 식 (2)로부터 C_I 를 구할 수 있다.

$$C_I = \frac{P\dot{V}_c}{BW}\frac{F'}{F} - C^*\left(\frac{F'}{F}\frac{1}{\eta} - 1\right) \quad (2)$$

식 (1) 및 식 (2)에서 각 기호는 문헌⁽⁵⁾의 정의를 따른다. 소성변형 모델을 멱급수법칙(power law plasticity model)에 따르는 모델로 가정하고, 재료의 소성 효과를 고려하면 재료에 하중이 가해진 직후에는 균열선단에서 크리프 영역에 의해서 응력이 완화되기 전에 이미 균열선단 소성의 영향으로 응력이 어느 정도 완화된다. 즉, 하중이 가해진 직후에 소성의 영향으로 C_I 값이 감소하

며, 이 영향을 고려하고자 t_{pl} 을 정의하였다.⁽⁵⁾ t_{pl} 은 탄성-2차 크리프 재료에서 크리프에 의한 균열선단 응력장의 세기가 탄성-소성-2차 크리프 재료에서 초기 소성에 의하여 형성된 응력장의 세기와 같아지는 데 필요한 시간으로 정의하며 다음 식으로 구할 수 있다.

$$t_{pl} = \frac{1}{EA} \left[\xi \left(\frac{m-1}{m+1} \right) \left(\frac{1}{2\sigma_{ys}} \right)^2 \frac{1}{a\tilde{r}_c(90^\circ, n)} \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (3)$$

여기서 m 은 소성상수, σ_{ys} 는 항복응력이며, ξ 는 소성 상수 m 값과 크리프 상수 n 값에 따라 변하는 재료의 상수이다. t_{pl} 을 고려한 C_I 식은 다음과 같이 식 (1)에 t 대신 $t+t_{pl}$ 을 대입함으로써 구할 수 있다.^(5,6)

$$C_I = \frac{4a\beta\tilde{r}_c(\theta, n)}{E(n-1)}(1-\nu^2)\frac{K^4}{W}\frac{F'}{F} \cdot (EA)^{\frac{2}{n-1}}(t+t_{pl})^{-\frac{n-3}{n-1}} + C^* \quad (4)$$

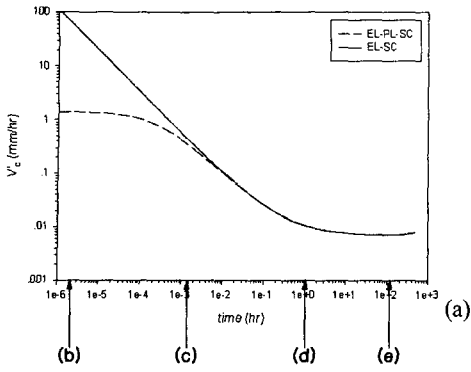
3. 유한요소해석

본 연구에서는 균열이 성장하지 않는 경우 2차 원 평면변형률 C(T)시편을 일정하중 조건에서 탄성-소성-2차 크리프 해석으로 하중선변위속도, \dot{V}_c 를 구하였다. 해석에 사용된 모재와 용접재의 재료물성 데이터는 Table 1에 나타낸 실제 강재의 물성 범위 내에서 임의로 가정하여 사용하였으며,⁽⁷⁻⁹⁾ 모델링 조건 및 기타 해석조건은 이전 연구에서 사용한 해석 조건⁽¹⁾을 그대로 사용하였다.

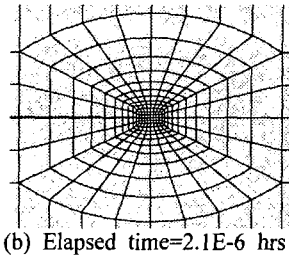
4. 결과 및 토의

4.1 소성 영역 및 크리프 영역의 변화

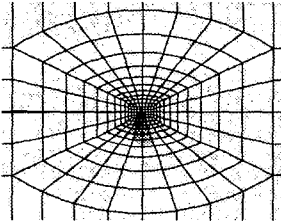
Fig. 1(a)에 탄성-크리프 모델에 대한 해석 결과와 탄성-소성-크리프 모델에 대한 해석 결과를



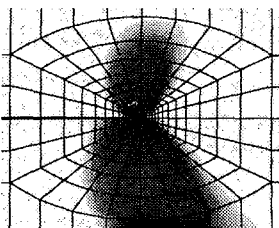
비교하여 나타내었다. 이때, 모재의 크리프 상수는 $A=1.27E-23 \text{ MPa}^{-n} \cdot \text{hr}^{-1}$, $n=9.36$, 용접재의 크리프 상수는 $A=1.27E-23 \text{ MPa}^{-n} \cdot \text{hr}^{-1}$, $n=9.36$ 을 사용하였으며, 소성상수는 모재와 용접재 모두 $D=4.95E-34 \text{ MPa}^{-m}$, $m=12.75$ 를 사용하였다. 탄성-소성-크리프 모델의 경우, 부하 초기의 소성 변형의 영향으로 하중 초기의 하중선 변위속도값이 탄성-크리프 모델의 경우보다 작은 일정한 값을 유지하다가 크리프가 진행됨에 따라 두 곡선이 일치해 가는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.



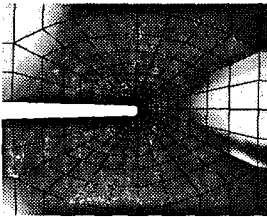
(b) Elapsed time=2.1E-6 hrs



(c) Elapsed time=1.5E-3 hrs

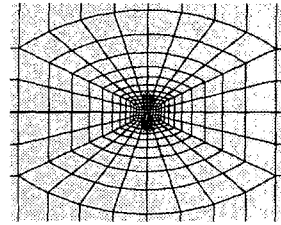


(d) Elapsed time=1.1E0 hrs

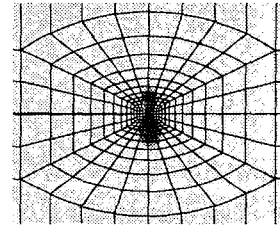


(e) Elapsed time=1.2E2 hrs

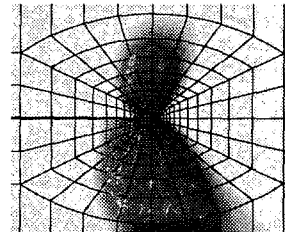
Fig. 1 Contour plots of creep zone evolution (black region: $\epsilon_c/\epsilon_e \geq 1$, white region: $\epsilon_c/\epsilon_e \leq 0.5$)



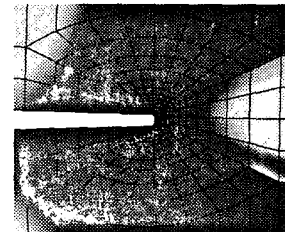
(a) Elapsed time=2.1E-6 hrs



(b) Elapsed time=1.5E-3 hrs



(c) Elapsed time=1.1E0 hrs



(d) Elapsed time=1.2E2 hrs

Fig. 2 Contour plots of plastic-creep zone evolution (black region: $(\epsilon_c + \epsilon_p)/\epsilon_e \geq 1$, white region: $(\epsilon_c + \epsilon_p)/\epsilon_e \leq 0.5$)

Fig. 1(b)-(e)에는 용접시편을 탄성-소성-크리프로 해석했을 때 Fig. 1(a)의 가로축에 표시한 시각에서의 크리프 영역의 변화를 나타내었다. 그림에서 검은색으로 보이는 부분이 크리프 영역, 즉 크리프 변형률이 탄성 변형률보다 큰 영역이고, 그 외부로 회색이 흐려짐에 따라 단계적으로 크리프 변형률이 탄성 변형률보다 작아지는 영역이다. 흰색 부분은 크리프 변형률이 탄성 변형률의 1/2 이하가 되는 영역이다. Fig. 1(b)에서와 같이 부하 초기에는 크리프에 의한 변형이 거의 나타나지 않으며, 시간이 지남에 따라 Fig. 1(c)와 같이 소규모 크리프가 발생하다가 천이시간 부근에서 Fig. 1(d)와 같이 크리프가 상당히 진행되어 크리프 영역이 커지고, 결국에는 Fig. 1(e)와 같이 용접재와 모재 모두 크리프에 의한 변형이 지배적이 된다. 크리프 영역의 크기는 상대적으로 크리프 강도가 약한 아래쪽 용접재의 크리프 영역이 위쪽 모재의 크리프 영역보다 훨씬 빠른 속도로 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 2에서는 Fig. 1에 나타난 시간과 동일한 시점에서의 크리프 변형률과 소성 변형률을 합하여 ($\epsilon_c + \epsilon_p$) 누적된 크리프 변형률인 것 같이 나타내었다. 그림에서 검은색으로 보이는 부분이 크리프 변형률과 소성 변형률을 합한 값이 탄성 변형률보다 큰 영역이고, 흰색 부분이 크리프 변형률과 소성 변형률의 합이 탄성 변형률의 1/2 이하가 되는 영역이다. Fig. 2(a)를 Fig. 1(b)와 비교해 보면 부하 초기에 균열 선단에 동일한 크기의 소성 영역이 형성되고, 이로 인해 부하 초기에 \dot{V}_c 값이 탄성-크리프 해석시의 값보다 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 2의 (c),(d)에 보인 바와 같이 시간이 지남에 따라 크리프 영역이 성장하고, 소성 영역의 영향은 무시할 만큼 작아져 Fig. 1의 (d),(e)와 거의 비슷한 형태를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

4.2 크리프 상수의 변화에 따른 용접시편의 \dot{V}_c 변화경향

이종재 용접시편의 경우에 시간에 따른 \dot{V}_c 의 변화 경향에 대한 크리프 상수의 영향을 알아보기 위해, Table 2, Table 3과 같이 모재의 크리프 계수 A 및 크리프 상수 n 을 변화시켜 가며 모재와 용접재 사이의 여러 가지 크리프 상수를 갖는

조합에 대해 해석하여 \dot{V}_c 의 변화 경향을 관찰하였다. 이때, 소성상수의 변화에 따른 영향을 배제하기 위하여, 모재와 용접재 모두 동일한 소성상수($D=4.95E-34 \text{ MPa}^m, m=12.75$)를 사용하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 Table 2와 Table 3의 조건에서 동질재 시편 및 이종재 용접시편을 해석하여 시간에 따른 \dot{V}_c 의 변화경향을 나타낸 것으로, 크리프에 상대적으로 약한 재료인 용접재가 그래프에서 위쪽에 나타나고, 크리프에 상대적으로 강한 모재는 그래프의 아래쪽에, 이 두 재료를 접합한 재료는 위의 두 가지 경우의 사이값을 유지하면서 변하고, 시간이 충분히 경과하면 \dot{V}_c 값은 더 이상 변하지 않는 정상상태값에 도달하는 것을 알 수 있다.

식 (2)에서 보듯이 정지균열 조건에서 \dot{V}_c 는 C_I 와 선형적인 관계가 있으므로 Fig. 3과 Fig. 4는 C_I 시간 곡선으로도 볼 수 있다.

4.3 크리프 상수가 변화할 때 \dot{V}_c 변화경향의 무차원화

앞에서 보인 이종재 용접시편과 동질재 시편의 \dot{V}_c 변화를 서로 비교해 보기 위해 하중 부과 후 경과시간(t)을 천이시간(t_T)으로, 경과시간에서의 하중선변위속도, \dot{V}_c 를 정상상태에서의 \dot{V}_{ss} , 즉, \dot{V}_{ss} 로 나누어 무차원화(normalization)하였다. 천이시간은 이전연구⁽¹⁾의 식 (7)에서 정의된 바와 같다. Fig. 5에서와 같이 모재만으로 이루어진 동질재 시편과 용접재만으로 이루어진 동질재 시편, 이종재 용접시편의 무차원화된 하중선변위속도는 하중 초기의 소성 변형이 우세한 구간에서는 약간의 차이를 보였으나, 하중 후반부의 크리프 변형이 우세한 구간에서는 무차원화된 곡선이 거의 일치하였다. 이러한 경향은 A 만 다른 경우, n 만 다른 경우, A 와 n 이 모두 다른 경우에서 모두 일관성 있게 나타났다.

이때 부하 초기의 소성 효과에 의한 하중선변위속도의 차이는 t_{pl} 의 개념을 적용하여 보정하였다. 즉, t_{pl} 이 원래 탄성-크리프 재료의 부하 초기 소성효과에 의한 응력 완화를 반영하기 위해서 정의된 개념이므로 탄성-소성-크리프 재료에 (2)식에서 정의한 t_{pl} 을 사용하면 탄성-크리프 재료인 경우의 시간-하중선변위속도 곡선과 유사한 형태

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

Analysis		A (MPa ⁿ · hr ⁻¹)	n
Welded Specimen 1	Weld 1	6.36E-23	9.36
	Base 1	1.27E-23	9.36
Welded Specimen 2	Weld 2	6.36E-23	9.36
	Base 2	6.36E-24	9.36
Welded Specimen 3	Weld 3	6.36E-23	9.36
	Base 3	1.27E-24	9.36

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

Analysis		A (MPa ⁿ · hr ⁻¹)	n
Welded Specimen 4	Weld 4	6.36E-23	9.36
	Base 4	6.36E-23	9.03
Welded Specimen 5	Weld 5	6.36E-23	9.36
	Base 5	6.36E-23	8.70
Welded Specimen 6	Weld 6	6.36E-23	9.36
	Base 6	6.36E-23	8.37

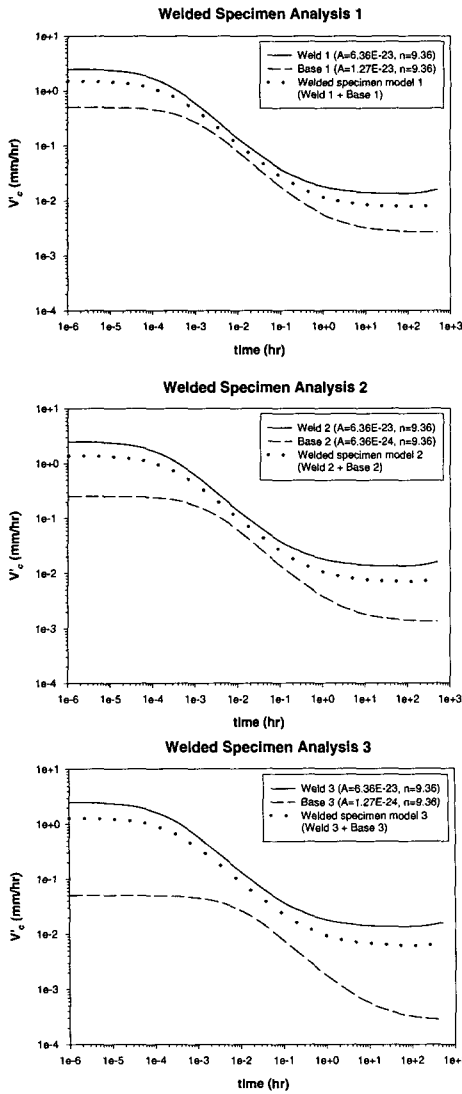


Fig. 3 \dot{V}_c variations for welded specimen analysis with various creep coefficient(A) values

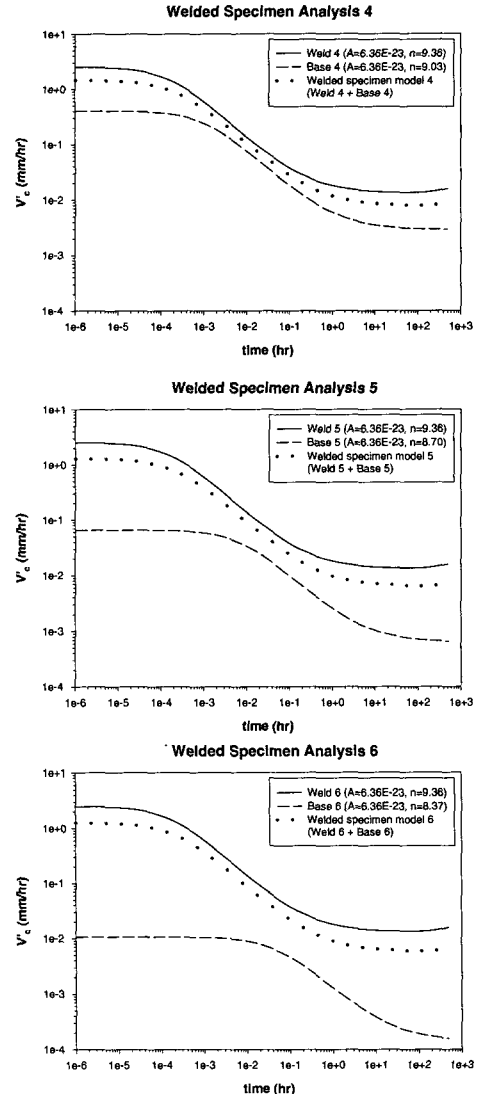


Fig. 4 \dot{V}_c variations for welded specimen analysis with various creep exponent(n) values

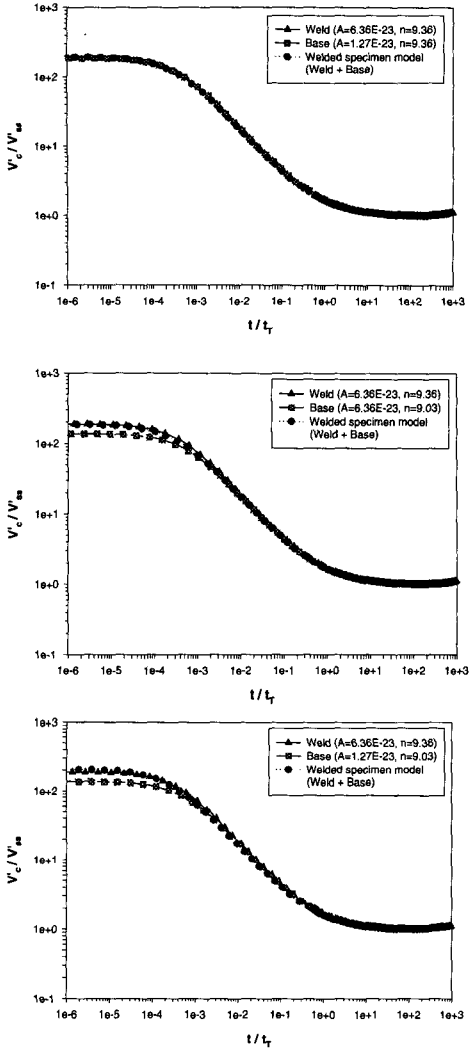


Fig. 5 Normalized \dot{V}_c curves for welded specimen analysis with various creep properties

로 나타낼 수 있다. 이와 같은 방법으로 하나의 그래프에 세개의 곡선을 나타내었다. 이때 이중재 용접시편의 t_{pl} 값은 각각 모재와 용접재만으로 이루어진 동질재 시편의 두 t_{pl} 값의 대수평균값을 사용하였다. 이는 이전연구⁽¹⁾에서 이중재 용접시편의 정상상태 C_I 값이 모재와 용접재의 C^* 값의 대수평균값으로 근사화 할 수 있었기 때문이다. Fig. 6에서 보면 A 값과 n 값이 각각 서로 다른 모재와 용접재의 동질재는 거의 한 곡선으로 일치하고, 이중재 용접시편의 경우에는 부하초기 아주 짧은 시간 동안에는 약간의 차이가 있지만 시간이 지남에 따라 일치하는 경향을 보이는 것을

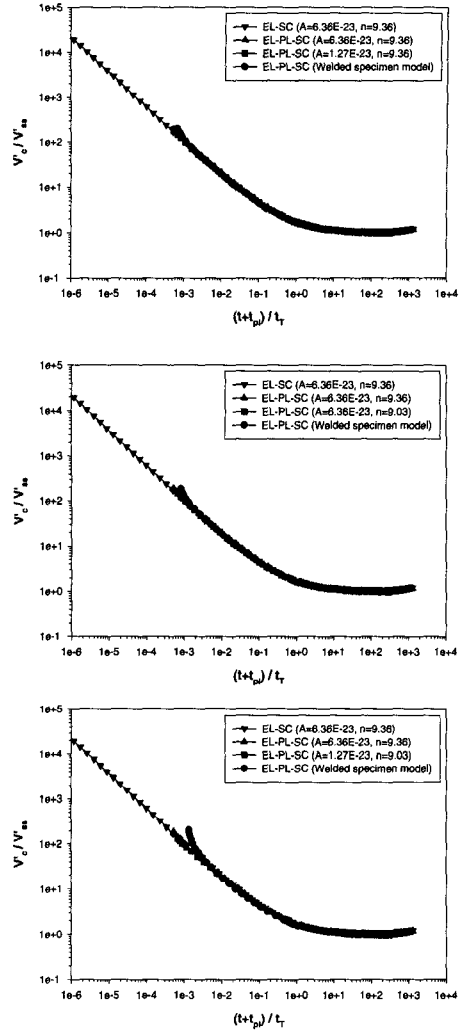


Fig. 6 Normalized \dot{V}_c curves for welded specimen analysis with various plastic properties

알 수 있다. 이때 부하 초기에 이중재 용접시편의 \dot{V}_c 값이 차이가 나는 것은 소성영역 내의 응력장의 형상과 크리프 영역 내의 응력장의 형상의 차이에 의해서 발생하는 것이라고 생각된다.

4.4 소성 상수의 변화에 따른 용접시편의 \dot{V}_c 변화경향

시간에 따른 이중재 용접시편의 \dot{V}_c 의 변화 경향에 대한 소성 상수의 영향을 알아보기 위해 Table 4, Table 5와 같이 모재의 소성 계수 D 와 소성 상수 m 을 각각 변화시켜 가며 모재와 용접

Table 4 Plastic properties for welded specimen analysis with various D values

Analysis		D (MPa ^{-m})	m
Welded Specimen 7	Weld 7	4.95E-34	12.75
	Base 7	4.95E-32	12.75
Welded Specimen 8	Weld 8	4.95E-34	12.75
	Base 8	4.95E-30	12.75

Table 5 Plastic properties for welded specimen analysis with various m values

Analysis		D (MPa ^{-m})	m
Welded Specimen 9	Weld 9	4.95E-34	12.75
	Base 9	4.95E-34	12.00
Welded Specimen 10	Weld 10	4.95E-34	12.75
	Base 10	4.95E-34	11.25

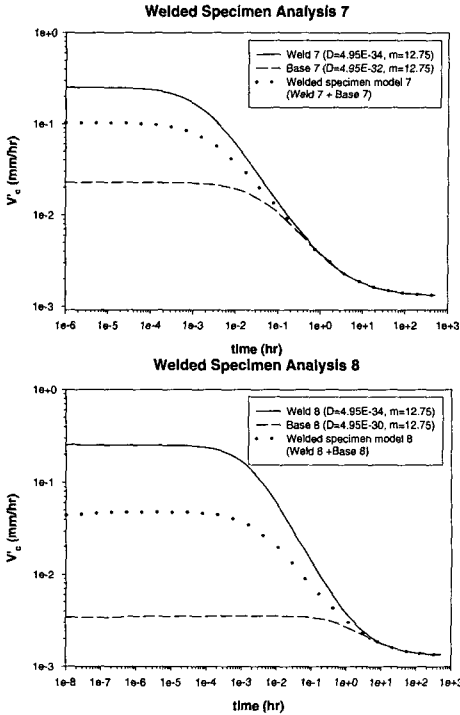


Fig. 7 \dot{V}_c variation for welded specimen analysis with various plastic coefficient(D) values

재 사이의 여러 가지 소성 상수를 갖는 조합에 대해 해석하여 \dot{V}_c 의 변화 경향을 관찰하였다. 이때 크리프 상수와 용접재의 소성 상수는 항상 같은 값($A=6.36E-24$ MPaⁿ·hr⁻¹, $n=9.36$)을 사용하였고, 모재의 소성 상수만을 변화시키면서 해석하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 Table 4와 Table 5의 조건에서 동질재 시편 및 이종재 용접시편을 해석하여 시간에 따른 \dot{V}_c 의 변화경향을 나타낸 것이다.

크리프 상수를 변화했을 때의 거동과 마찬가지로 이종재 용접시편의 \dot{V}_c 값은 모재와 용접재의 동질재 시편의 사이값을 유지하며 변화하다가, 부하후 시간이 충분히 경과하여 크리프에 의한

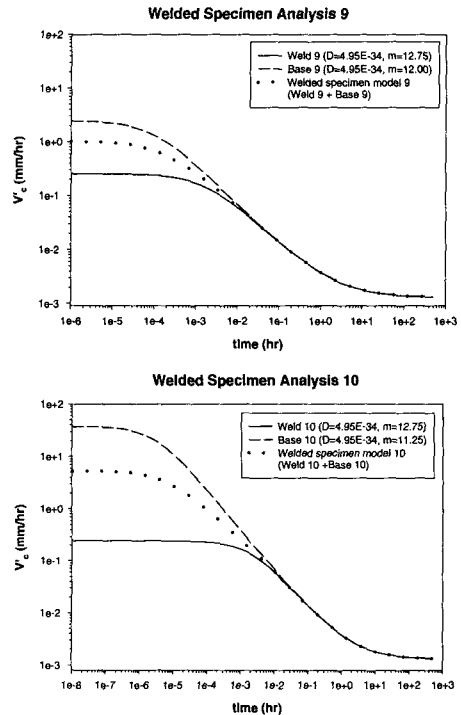


Fig. 8 \dot{V}_c variation for welded specimen analysis with various plastic exponent(m) values

변형이 지배적인 구간에서는 하나의 곡선으로 일치하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다.

4.5 소성 상수가 변화할 때 \dot{V}_c 변화경향의 무차원화

이종재 용접시편과 동질재 시편의 \dot{V}_c 변화를 특성화하기 위해 앞에서와 같은 방법으로 시간-하중선변위속도 곡선을 무차원화(normalization)하고, t_{pl} 의 개념을 적용하여 Fig. 9에 나타내었다. 이때 이종재 용접시편의 t_{pl} 값은 각각 모재와 용접재만으로 이루어진 동질재 시편의 두 t_{pl} 값의 대수평균값을 사용하였다. Fig. 9에서 보면 D 값과 m 값이 각각 서로 다른 모재와 용접재의 동질재는 거

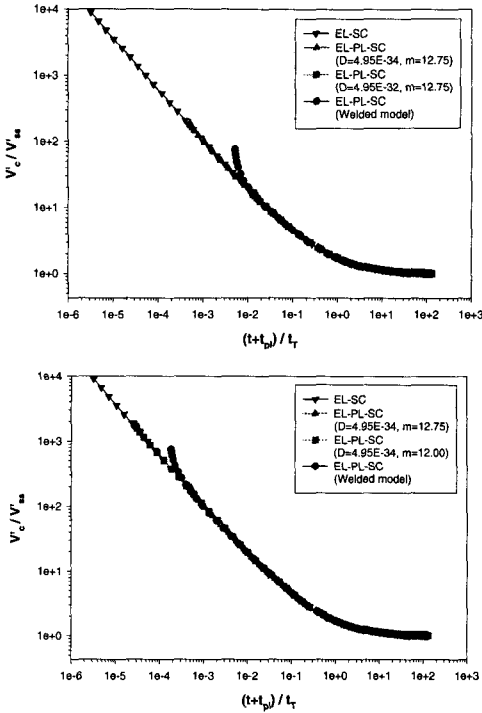


Fig. 9 Normalized \dot{V}_c curves for welded specimen analysis with various plastic properties

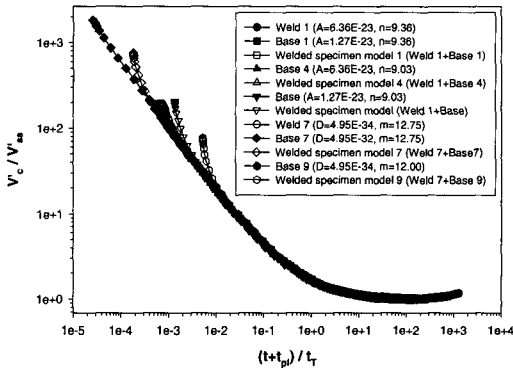


Fig. 10 Normalized \dot{V}_c curves for welded specimen analysis with various creep and plastic properties

의 한 곡선으로 일치하고, 이중재 용접시편의 경우에는 부하초기에는 약간의 차이가 있지만 시간이 지남에 따라 일치하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이때 부하 초기에 이중재 용접시편의 \dot{V}_c 값이 차이가 나는 것은 소성영역 내의 응력장의 형상과 크리프 영역 내의 응력장의 형상의 차

이에 의해서 발생하는 것이라고 생각된다.

Fig. 10은 Fig. 6과 Fig. 9에 나타난 곡선을 하나의 그래프에 나타낸 것으로, 크리프 상수가 서로 다른 이중재간의 용접시편과 소성 상수가 서로 다른 이중재간 용접시편의 시간-하중선변위속도 곡선이 무차원화하면 모두 하나로 일치한다는 것을 알 수 있다.

고온 크리프 조건에서 동질재의 경우 해석적인 방법으로 C_I 를 알 수 있고, 여기에 t_{pl} 을 적용하여 동질재 균열체에서 상수인 C^* 와 t_T 를 이용하여 무차원화하면 이중재 용접시편의 C_I 를 구할 수 있을 것이다. 위와 같은 방법으로 계면균열이 있는 이중재 용접시편의 C_I 를 평가하면 용접 균열체의 균열성장률을 특성화할 수 있으며, 이를 고온 구조물의 크리프 또는 크리프-피로 균열성장 수명평가에 활용할 수 있다. 다만, 이때 이중재 용접체의 경우 식 (3)의 ξ 를 결정하는 방법에 대한 연구가 선행되어야 한다. 또한, t_{pl} 을 사용하여 소성 구간에서의 크리프 변화거동을 예측하기 위해서는 다양한 m 과 n 의 조합에 대한 ξ 값의 자료에 대한 연구도 선행되어야 할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 모재와 용접재가 용접된 용접면에 균열이 존재할 때 크리프 균열성장 거동을 특성화할 수 있는 방법을 \dot{V}_c 의 변화거동을 통해 연구하였다. 재료의 거동을 탄성-소성-2차 크리프 거동으로 가정하고 유한요소법을 사용하여 정하중에서의 $C(T)$ 시편의 거동을 여러 경우의 크리프 상수 및 소성 상수에 대해 해석하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 크리프 상수 A 와 n 을 변화시켜 해석한 결과 이중재 용접시편 계면균열의 시간에 따른 \dot{V}_c 변화곡선을 \dot{V}_{SS} 값과 천이시간 t_T 로 무차원화하고, t_{pl} 의 개념을 적용하면 이중재 용접시편과 동질재 시편 모든 경우의 \dot{V}_c 변화곡선이 일치하였다.

(2) 소성 상수 D 와 m 을 변화시켜 해석한 결과 이중재 용접시편 계면균열의 시간에 따른 \dot{V}_c 변화곡선을 \dot{V}_{SS} 값과 천이시간 t_T 로 무차원화하고, t_{pl} 의 개념을 적용하였을 때(이중재 용접시편의 경우 동질재 시편값의 대수평균값을 적용) 이중재

용접시편과 동질재 시편 모든 경우의 \dot{V}_c 변화곡선이 일치하였다.

(3) 따라서, 동질재 균열체의 \dot{V}_c 변화곡선으로부터 소성 상수와 크리프 상수가 서로 다른 이종재 용접시편의 \dot{V}_c 변화곡선을 예측하여 이종재 용접시편의 고온파괴 매개변수인 C_1 매개변수를 평가하고, 실험적으로 측정된 $da/dt-C_1$ 관계식을 적용하면 크리프 균열성장량을 예측할 수 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비안전성평가 연구센터(SAFE)의 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 윤기봉, 심현우, 신영의, 1998, "고온크리프 조건에서 용접계면 균열의 C_1 매개변수에 대한 수치해석적 연구," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제12호, pp. 2239~2246.
- (2) Saxena, A., Cretegny, L., Grover, P.S. and Norris, R.H., 1998, "Modeling of Fracture and Crack Growth in Weld Operating at High Temperature," *Proceedings of Int. HIDA Conference*, Paris, France 15-17 April.
- (3) 윤기봉, 김광웅, 백운봉, 1998, "저합금강 용접부의 크리프 균열성장거동 모델링," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제12호, pp. 2153~2162.
- (4) Saxena, A., 1986, "Creep Crack Growth under Non-Steady State Conditions," *ASTM STP 905*, pp. 185~201.
- (5) 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.
- (6) Yoon, K.B., Saxena, A. and Liaw, P.K., 1993, "Characterization of Creep-Fatigue Crack Growth Behavior under Trapezoidal Waveshape Using C_1 -parameter," *Int. J. of Fracture*, Vol. 59, No. 2, pp. 95~114.
- (7) 신규인, 윤기봉, 최현창, 박재학, 이해무, 1997, "1Cr-0.5Mo강 용접부 균열의 고온파괴거동 연구," 한국산업안전학회지 제12권 제2호, pp. 45~56.
- (8) 윤기봉, 김광웅, 정용근, 1998, "용접계면균열의 크리프 균열성장 거동에 관한 연구," 대한용접학회지 제16권 제4호, pp. 339~347.
- (9) Liaw, P.K., Rao, G.V., Burke, M.G., 1991, "Creep Fracture Behavior of 2.25Cr-1Mo Welds from a 31-year-old Fossil Power Plant," *Materials Science and Engineering*, A131, pp. 187~201.