

용접 계면균열의 크리프-피로 거동에 대한 수치해석적 연구

A Computational Study on Creep-Fatigue behavior of Weld Interface Crack

이진상*, 윤기봉**

*중앙대학교 대학원

**중앙대학교 기계공학부

ABSTRACT In this study, analysis of creep-fatigue behavior of low alloy steel weld was performed. An interface was employed along the crack plane to simulate the interface between base metal and weld metal. A trapezoidal waveshapes was loaded cyclically and analysis result was compared with that of monotonic load. The material was assumed as elastic-plastic-secondary creeping material. Because the isotropic hardening plasticity model used in the last study cannot simulate the behavior of material under cyclic load, the linear kinematic hardening plasticity model was used. The behavior of strain field and C_t parameter was obtained.

1. 서 론

고온에서 사용되는 설비의 경우 균열이 용접 열영향부(HAZ)와 용융선을 따라서 빈번하게 발생, 성장하는 것으로 널리 알려져 있으며, 이에 대한 연구가 국내외의 여러 기관에서 진행되어 왔다.¹⁻⁴⁾ 이전 연구¹⁾⁻²⁾에서는 유한요소법을 이용하여 용접계면에 균열이 존재하는 경우에 대하여 각각 재료의 탄성-2차크리프 변형거동과 탄성-소성-2차크리프 변형거동을 가정하여 모재와 용접재의 재료물성으로부터 C_t 매개변수를 계산할 수 있는 방법을 제안하였다. 전자의 경우 하중유지시간이 비교적 긴 경우의 용접 계면균열의 크리프 균열성장률 특성화에 적용될 수 있으며, 후자의 경우 부하 초기의 균열 선단 소성 영역의 영향을 고려하여 하중유지시간이 짧은 경우의 용접 계면균열의 크리프 균열성장률 특성화에 적용될 수 있다.

본 연구에서는 C(T)시편 유한요소모델에 사다리꼴 파형의 반복하중을 부하하는 방법으로 크리프-피로거동을 모사하여 고온설비의 잦은 기동/정지에 따른 재료의 거동을 특성화 할 수 있는 파괴 매개변수에 대해 연구하였다.

2. 이론 및 유한요소해석

균열체의 경우 탄성-2차 크리프 거동을 보이는 재료의 C_t 식은 잘 알려져 있다.⁵⁾ 즉, 식 (1)과 같이 균열체의 크리프 상수와 균열크기, 하중조건으로부터 C_t 를 구할 수 있으며,

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

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

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

식 (1) 및 식 (2)에서 각 기호는 문헌⁶⁾의 정의를 따른다.

본 연구에서 사용된 유한요소 모델은 폭 30mm, 두께 13mm, 균열비(a/W) 0.5인 C(T)시편이다. 3920N의 정하중을 하중핀이 시편과 접촉하는 부위에 분산하여 부하하였으며, 경계조건으로 균열면의 연장선 끝에 있는 절점을 고정하였다. 요소는 8-node plain strain reduced integration element를 사용하였으며 요소 수는 총 918개, 절점 수는 총 2941개가 사용되었다. 해석에 사용된 모재와 용접재

의 재료물성 데이터는 실제 강재의 물성⁸⁾⁻¹⁰⁾을 기초로 하여 임의로 가정된 값을 사용하였으며 Table 1에 나타내었다. 유한요소해석을 수행하여 하중점변위속도(\dot{V}_c)를 계산하였으며, (2)식의 관계에 의해 하중점변위속도는 C_t 매개변수와 선형적인 관계에 있으므로 이 값의 변화를 C_t 의 변화로 간주할 수 있다.

Table 1 Material properties used in analysis.

Material	Temp. (°C)	E (GPa)	ν	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	A (MPa ⁻ⁿ · hr ⁻¹)	n
Base	538	175	0.3	258.8	308.0	6.36E-24	9.03
Weld						6.36E-23	

3. 결과 및 토의

Fig.1에 해석 결과를 나타내었다. 그림에서 탄성-2차 크리프모델의 경우 시간이 경과함에 따라 각각 용접재(●)와 모재(◆)만으로 구성된 단일재 시편의 \dot{V}_c 값 사이로 이종재 접합시편(▲)의 \dot{V}_c 값이 변화해 가며, 탄성-소성-2차 크리프모델(▼)은 부하초기 소성의 영향으로 인한 초기응력의 완화로 \dot{V}_c 값이 낮게 나타난다. 반복하중의 경우 하중유지시간동안의 \dot{V}_c 값을 표시하였으며, 첫 번째 사이클(△)에서 두 번째(▽), 세 번째(◇) 사이클로 진행해 감에 따라 균열선단의 응력이 완화되어 \dot{V}_c 값이 낮아진다.

Fig.2에는 세 번째 사이클에서 하중유지시간이 각각 0.2초, 2571.4초인 순간에서 크리프 영역의 변화를, Fig.3에는 Fig.2와 동일한 시간에서 크리프 영역과 소성 영역을 더한 영역을 나타내었다. 즉, Fig.2의 안쪽 부분이 크리프변형률이 탄성변형률보다 큰 영역, Fig.3의 안쪽 부분이 크리프변형률과 소성변형률의 합이 탄성변형률보다 큰 영역이다. 그림에서 보면 부하초기에는 소성영역의 영향으로 \dot{V}_c 값이 탄성-2차크리프의 경우보다 작지만 점차 소성영역의 영향이 작아져서 Fig.1에서 탄성-2차 크리프, 탄성-소성-2차크리프, 반복하중 세 개의 곡선이 거의 일치하는 시간인 2571.4초에서는 소성영역의 영향이 거의 무시할 정도이다.

4. 결 론

본 연구에서는 모재와 용접재가 용접된 용접계면에 균열이 존재하는 유한요소모델에 반복하중을 부하하여 크리프-피로거동을 연구하였으며, 하중이 반복됨에 따라 부하초기 소성영역의 영향으로 하중점변위속도값이 낮아지는 경향이 있음을 알 수 있었다.

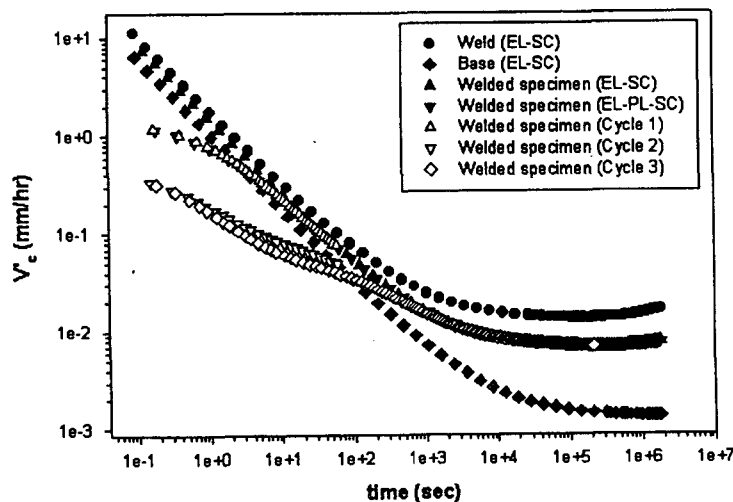
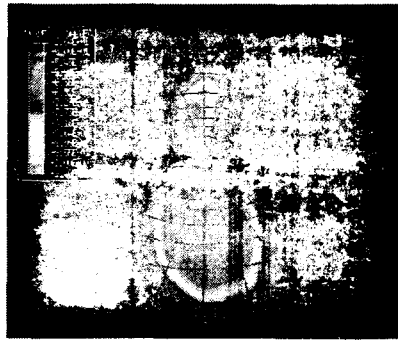
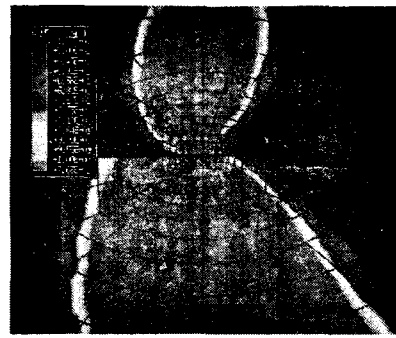


Fig.1 Variations of \dot{V}_c for the welded specimen analysis



(a) elapsed time = 0.2sec

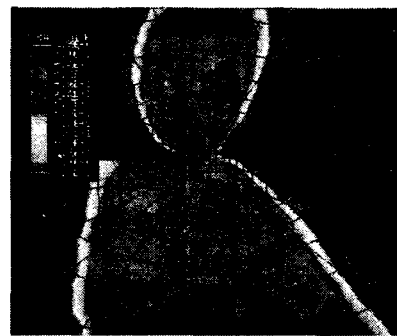


(b) elapsed time = 2571.4sec

Fig.2 Contour plot of creep zone



(a) elapsed time = 0.2sec



(b) elapsed time = 2571.4sec

Fig.3 Contour plot of plastic-creep zone

후 기

본 연구는 '98년도 한국학술진흥재단 중점연구과제의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 윤기봉, 심현우, 신영의 : 고온크리프 조건에서 용접계면 균열의 C_t 매개변수에 대한 수치해석적 연구, 대한기계학회논문집A, 22-12(1998) pp2239~2246
2. 윤기봉, 이진상 : 재료의 소성 거동을 고려한 용접 계면균열의 C_t 매개변수 평가, 대한기계학회논문집A, 24-3(2000) pp676~684
3. Saxena, A., Creteigny, L., Grover, P.S. and Norris, R.H. : Modeling of Fracture and Crack Growth in Weld Operating at High Temperature, Proceedings of Int. HIDA Conference (1998)
4. 윤기봉, 김광웅, 백운봉 : 저합금강 용접부의 크리프 균열성장거동 모델링, 대한기계학회논문집A, 22-12(1998), pp2153~2162
5. Saxena, A. : Creep Crack Growth under Non-Steady State Conditions, ASTM STP 905(1986), pp185~201
6. Yoon, K.B., Saxena, A. and McDowell, D.L. : Influence of Crack-tip Cyclic Plasticity on Creep-Fatigue Crack Growth, ASTM STP 1131(1992), pp367~392
7. Yoon, K.B., Saxena, A. and Liaw, P.K. : Characterization of Creep-Fatigue Crack Growth Behavior under Trapezoidal Waveshape Using C_t -parameter, Int. J. of Fracture, 59-2(1993), pp95~114
8. 신규인, 윤기봉, 최현창, 박재학, 이해무 : 1Cr-0.5Mo강 용접부 균열의 고온파괴거동 연구, 한국산업안전학회지 12-2(1997), pp45~56
9. 윤기봉, 김광웅, 정용근 : 용접계면균열의 크리프 균열성장 거동에 관한 연구, 대한용접학회지 16-4(1998), pp339~347
10. Liaw, P.K., Rao, G.V., Burke, M.G. : Creep Fracture Behavior of 2.25Cr-1Mo Welds from a 31-year-old Fossil Power Plant, Materials Science and Engineering, A131(1991), pp187~201