

주증기관의 균열성장 수명평가 사례 연구

백운봉 · 이해무 · 박종서 · 윤기봉*

한국표준과학연구원 시설안전계측연구센터 · *중앙대학교 기계공학부

1. 서론

고온 고압 산업용 설비의 경우, 대부분 균열이 용접부위에서 가장 먼저 발생하여 성장한다⁽¹⁾. 그러나 용접부라고 하지만 장기간 사용에 의한 사용재 균열성장은 엄밀히 말하면 용접부와 모재부 사이의 열영향부이며 열영향부 중에서도 ICHAZ(Intercritical heat affected zone)에서 발생하는 TYPE IV 균열⁽¹⁾이라 하겠다. 따라서 용접부 균열에 대한 파괴거동을 연구하는 것은 고온고압 산업용 설비의 잔여 수명을 평가하는데 매우 중요하다.

그러나 기존의 연구^{(2),(3)}는 대부분 모재부에 대해서만 이루어 졌으며, 실제로 이러한 열영향부에 균열이 존재하는 경우 재료 물성과 기계적 성질에 대한 자료의 부재로 인하여 균열 성장에 대한 잔여수명평가가 곤란하였다. 따라서 최근 국내외에서 이러한 점을 고려하여 용접부에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾. 따라서 본 연구에서는 고온고압용기의 용접부에서 균열이 발생했을 경우 균열성장 수명평가의 사례에 대해서 살펴보았다. 이와 같은 고온 고압 설비의 균열성장 수명평가를 위해서는 크리프 물성이 필요한데 본 연구에서는 기존의 사용재를 회복 열처리를 통하여 만든 신재 모재부의 크리프 시험 결과를 이용하였을 경우와 실제 사용재를 그대로 실험하여 측정된 모재의 크리프 물성을 사용하였다^{(4),(5)}. 그리고 사용재를 용접하여 얻은 용접부 및 모사 열처리

Table 1 Chemical composition of 1Cr-0.5Mo steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Fe
wt. %	0.18	0.27	0.68	0.016	0.014	0.095	0.94	0.44	0.12	0.008	bal.

를 통하여 제작한 열영향부 크리프 물성을 사용한 경우에 대해서 비교하였다. 또한 균열의 위치와 방향에 따른 균열성장 속도를 비교하여 그에 따른 위험정도를 파악하고 위험성의 우선순위를 결정하며 모재부 물성을 열영향부에 적용하였을 경우 안전율을 산정하여 보았다.

Table 2 Creep properties of the 1Cr- 0.5Mo steel at 538°C

Material	Creep constant A (MPa ⁻ⁿ · hr ⁻¹)	n
Parent	1.235E-24	9.18
HAZ	1.787E-17	5.52
Weld	3.358E-30	10.70

2. 실험

2.1 실험재료

본 연구에서는 재료의 크리프 물성을 측정하기 위해 기존의 신재는 구하기 어려우므

* To whom correspondence should be addressed.
ubbaek@kriss.re.kr

로 회복열처리를 통하여 모사한 신재를 사용하여 실험하였으며, 사용재는 그대로 실험하여 재료물성을 측정하였다. 크리프물성 및 피로물성 크리프-피로 균열성장 특성 측정에 사용된 재료는 외경 310 mm, 내경 250 mm, 두께 30 mm로서 설계압력 10.4 MPa, 설계온도 515 °C에서 180,000시간 사용된 후 최근 폐기된 1Cr-0.5Mo강 고온용 압력용기의 모재 재료로서 용접부가 있는 부분은 구하지 못하였다. 따라서 용접부 생성을 위해 AWS규격 E8016-B2로 용접하였으며 모재의 화학성분은 Table 1과 같다. 또한 열영향부의 폭이 약 3 mm로 시험편을 제작하기에는 부족하므로 모재부를 사용하여 문헌⁽⁶⁾에 따라 모사 열처리를 통해 제작하였다. 본 실험은 실제 사용온도와는 달리 일반적으로 고온 사용온도로 많이 이용되는 538°C에서 용접부와 모재부 그리고 모사 열처리한 열영향부에 대한 크리프 시험을 실시하였으며, 시험편은 용기로부터 시편의 길이방향이 용기의 길이방향과 일치하도록 가공하였다.

2.2 크리프 시험

사하중식 크리프 시험기를 사용하여 ASTM E139 규격에 따라 538 °C에서 실험하였다. 크리프 시험편의 변위 측정을 위해 신장계를 시험편에 부착하였고, 신장계와 연결된 전기로 밖의 변위계를 이용하여 변위 데이터를 측정하여 시간에 따라 컴퓨터에 저장하였다. 크리프 시험으로 측정된 시간-변위 곡선을 시간-변형률 곡선으로 변환한 후, 각 응력의 크리프 곡선에서 2차 크리프영역만 선택해서 선형화하여 정상상태에서의 크리프 변형속도를 결정하였다. 2차 크리프상태 변형속도 $\dot{\epsilon}_{ss}$ 와 응력 σ 사이의 지수법칙을 $\dot{\epsilon}_{ss} = A \sigma^n$ 으로 가정하여, 최소자승법에 의해 재료의 크리프 상수 A와 n을 결정하였으며, 측정 결과는 Table 2에 정리하였다. 또한 사용재를 이용하여 신재로 회복 열처리한 실험 자료는 문헌⁽⁷⁾을 통해 구하였으며, 2차 크리프 상수인 A는 1.83E-26이고 n은 9.03이었다.

2.3 크리프-피로 균열성장 시험

크리프-피로 균열 성장시험을 위한 C(T) 시험편은 균열성장 방향이 모재의 반경방향과 일치하고 열영향부를 따라서 성장하도록 Fig. 1과 같이 가공하였다. 기계가공을 한 시험편은 예비균열을 초기균열비가 0.5가 되도록 만든 다음 시편 측면을 연마하여 부식한 후 균열선단이 열영향부에 놓여 있음을 확인하였다. 크리프-피로 균열 성장 시험 시 발생하는 균열 터널링 현상을 방지하고 열영향부를 따라 균열이 성장하도록 하기 위해서, 예비 피로균열 형성 후 측면홈을 가공하여 시험하였다. 이때 균열길이를 연속적으로 측정하기 위해 직류 전위차법을 사용하였다.

하중유지시간이 없는 삼각파형으로 부터 균열성장률을 측정하여 주기의존 균열 성장률을 결정하기 위해, [하중증가시간]/[하중감소시간]이 1/1(단위:초)인 삼각파형에서 4

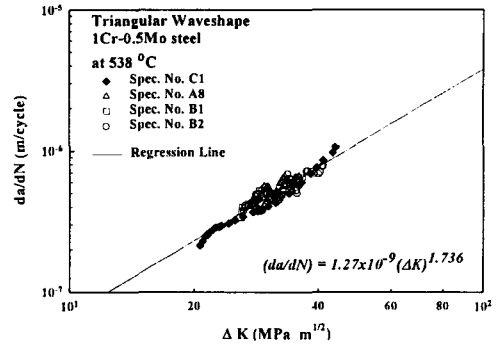


Fig. 1 Regression results of fatigue crack growth rates for 1Cr-0.5Mo steel at 538 °C under triangular waveshapes.

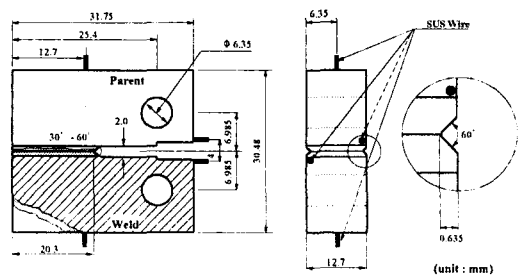


Fig. 2 Configuration of compact tension(C(T)) specimen with DC potential drop leads.

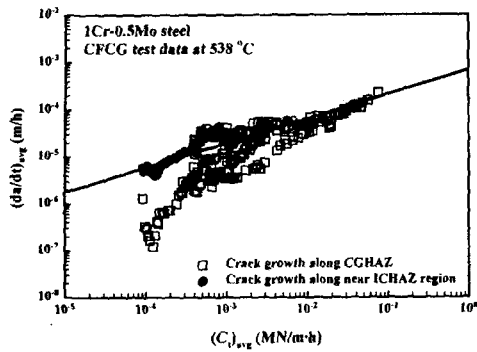


Fig. 4 Creep fatigue crack growth data when crack growth along ICHAZ.

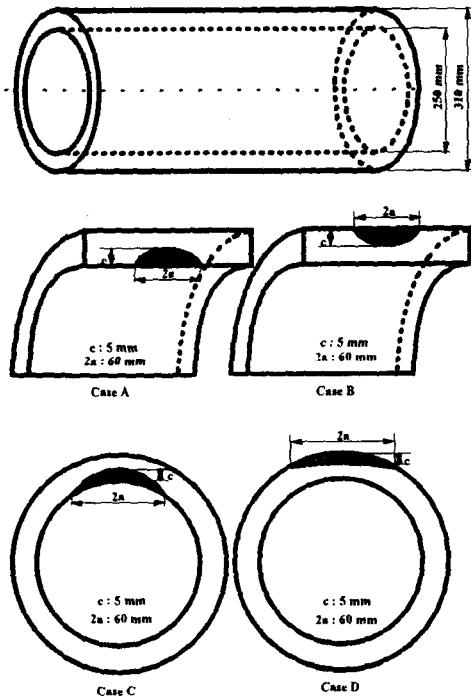


Fig. 5 Crack direction and location on the boiler header

시험결과로 빼주면 얻을 수 있다. 즉, 1/3600/1 데이터와 1/1 데이터의 균열성장률 차이가 하중 유지시간 3,600초 동안의 시간의존 균열성장률이다. Fig. 3으로부터 결정된 하중유지시간 동안의 시간의존 균열성장 거동을 탄성-2차 크리프 재료로 가정하고 고온 파괴역학에서 균열성장 거동 매개변수로 사용되는 $(da/dt)_{avg}$ 와 $(Ct)_{avg}$ 관계로 그리면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 ICHAZ를 따라서 성장한 균열의 성장 속도를 정리하면 식(2)와 같다.

개의 시험편을 사용하여 피로시험을 실시하였다. 또한 하중유지시간 동안의 시간의존 균열성장률을 측정하기 위해 30초, 300초, 3,600초의 하중 유지시간을 갖는 사다리꼴 파형 조건에서 9개의 시험편을 사용하여 피로균열성장시험을 실시하였다.

하중 유지시간이 없는 삼각파형의 피로 균열성장 시험으로 측정된 균열성장률 da/dN 을 ΔK 로 정리하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 실험결과에서 직선 회귀선을 구해 주기의존형 균열성장률을 구하면 식 (1)과 같다.

$$\frac{da}{dN} = 1.27 \times 10^{-9} (\Delta K)^{1.736} \quad (1)$$

여기서 da/dN 은 m/cycle, ΔK 는 $\text{MPa}(\text{m})^{1/2}$ 이며, 회귀선은 Fig. 2에 실선인 직선으로 나타내었다.

Fig. 3은 하중 유지시간이 각각 30, 300, 3,600초인 사다리꼴 파형의 피로시험 결과를 정리하여 da/dN 을 ΔK 로 도시하였다. Fig. 3에서 하중유지시간 동안의 시간의존형 균열성장률은 점선으로 각각 나타낸 사다리꼴 파형 피로시험결과를 굵은 실선으로 표시된 삼각파형

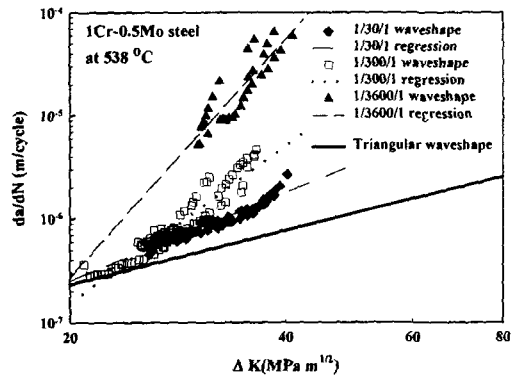


Fig. 3 Comparison of crack growth rates of 1Cr-0.5Mo steel at 538°C under trapezoidal and triangular waveshapes.

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{avg} = 6.132 \times 10^{-3} ((C_I)_{avg})^{0.791}$$

(2)

여기서 $(da/dt)_{avg}$ 는 (m/h), $\Delta(C_I)_{avg}$ 는 (MN/m.hr)이며, 회귀선은 Fig. 4에 실선인 직선으로 나타내었다.

3. 잔여수명 평가사례

이상의 실험 결과를 이용하여 본 연구에서 수명평가를 수행한 모델은 보일러 실린더형 용기 또는 배관 등의 고온 고압 설비가 원주방향 용접부를 가지고 있거나 길이방향 용접부를 가지고 있는 경우에 대해서 Fig. 5에서 보인바와 같이 균열이 내부에 존재하는 경우와 외부에 존재하는 경우를 비교하였다. 문제를 단순화시키기 위하여 대상모델이 538°C에서 50MPa의 내압을 받고 있다고 가정하고 외부요인에 의한 2차 응력은 고려하지 않았다. 그리고 균열형상은 균열길이 60 mm, 균열깊이 5 mm인 반 타원형으로 통일하였다

먼저 대상이 모재부라고 가정하고 균열이 존재하는 방향과 위치가 Fig. 5의 Case A~Case D인 경우에 대해서 균열성장시간과 균열깊이와의 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 균열이 용기의 길이방향으로 외부에 존재하는 경우가 가장 잔여 수명이 짧음을 알 수 있다. 이는 용접부와 열영향부에서도 같은 결과를 얻었다. 이는 용기에 내압만이 존재하고 2차 응력을 고려하지 않은 경우로 길이 방향의 응력이 원주방향의 응력 보다 낮기 때문이다. 다음은 Case D의 경우에 사용재 모재부와 용접부 그리고 열영향부에 균열이 존재할 경우 잔여수명을 계산하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는바와 같이 이 경우는 열영향부에 균열이 발생한 경우가 잔여수명이 가장 짧게 나타났다. 즉 열영향부에 균열이 발생한 경우 기존의 방식대로 사용재 모재부의 크리프 물성을 사용하여 균열 성장률을 계산한다면 계산된 잔여수명보다 일찍 용기는 파손될 것이다. 즉 용기의 원주방향 용접 열영향부에

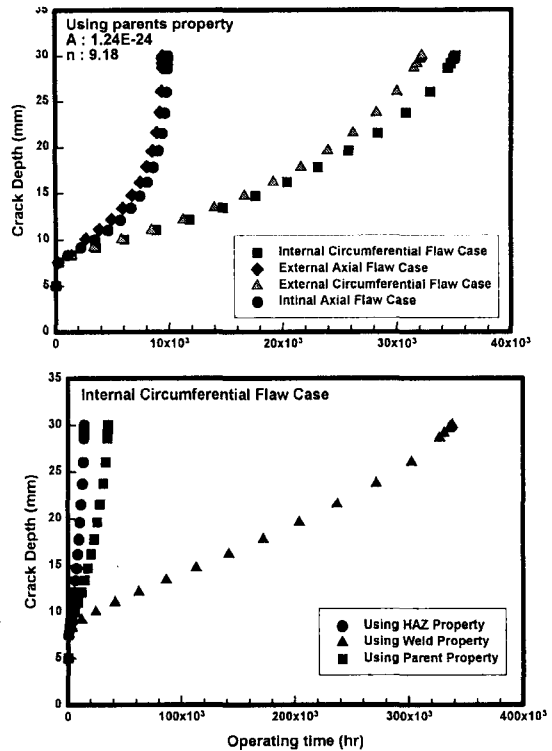


Fig. 7 Calculated creep crack growth life for various material properties

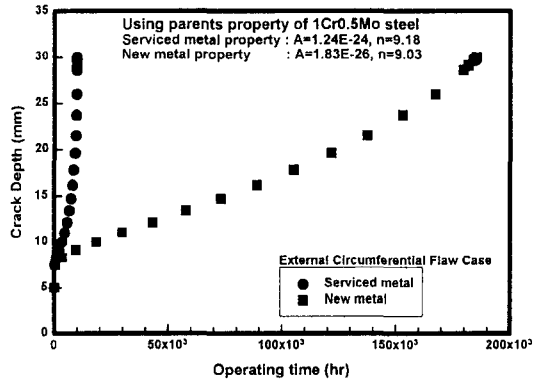


Fig. 8 Comparison of creep crack growth life for new and serviced materials property

외부균열이 발생한 경우 사용재 모재의 크리프 물성을 사용하여 계산된 수명보다 2.5배 일찍 파손됨을 알 수 있다. 만약 신재 모재의 크리프 물성을 사용하면 14.2배 일찍 파손됨을 알 수 있다. 또한 균열이 원주방향으로 용기의 외부에 존재하는 경우 사용재 모재와 신재 모재의 크리프 물성을 사용하여 크리프 균열성장 속도를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 사용재의 균열성장속도가 신재의 그것보다 훨씬 빠름을 알 수 있다. 따라서 장기 사용한 고온 용기에서 균열이 발생하였을 경우 제작 당시의 재료물성을 이용하여 균열성장 수명을 평가하는 것은 매우 위험하다는 것을 알 수 있으며 더구나 균열이 열영향부에 있는 경우에 제작 당시의 모재 물성을 이용하여 균열성장 속도를 평가한다는 것은 더욱 위험하다는 것을 알 수 있다. 또한 장기사용 한 고온 설비의 원주방향 용접 열영향부 내부에 균열이 발생한 경우 신재 모재부 물성을 사용한다면 실제 수명보다 15배 이상 일찍 파손됨을 알 수 있다.

앞에서 가정한 모든 경우에 대해서 크리프 균열성장에 의한 잔여수명을 계산하면 Table 3에 보인 바와 같다. Table 3에서 알 수 있듯이 균열이 내부에 있는 경우보다 외부에 있을 경우가 잔여수명이 짧으며 열영향부에 균열이 존재할 경우가 가장 수명이 짧게 나타난다.

4. 결 론

1Cr-0.5Mo강 사용재와 신재 모재부, HAZ부, 용접부의 재료물성을 이용하여 고온 용기나 고온배관에서 각 위치별로 균열이 발생하였을 경우에 대한 크리프 균열성장 시간을 평가 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 신재 모재부의 크리프물성을 이용한 경우보다 사용재 모재의 물성을 이용한 경우가 수명이 짧게 나타났다.
- (2) 모재부와 용접부 그리고 열영향부중 균열성장 속도는 열영향부에 균열이 발생한 경우가 가장 수명이 짧게 나타났다.
- (3) 고온설비에서 내압만 고려할 경우 균열이 길이방향으로 발생한 경우가 원주방향으로 발생한 경우보다 균열성장속도가 빠르며 내부균열보다 외부균열이 성장속도가 빠르다.
- (4) 원주방향 열영향부에 외부균열이 발생한 경우 사용재 모재부의 재료물성을 사용할 경우에는 본 연구 Case에 대해 2.5배 이상의 안전율을 고려해야한다. 만약 신재 모재의 크리프 물성을 사용한다면 14.2배 이상의 안전율을 고려하여야 할 것이다.
- (5) 따라서 장기사용으로 용접 열영향부에 균열이 발생하였을 경우 신재 또는 사용재 모재의 크리프 물성으로 평가해서는 안되며 부득이 사용재 모재의 물성을 사용한다면 본 연구 Case의 경우 2.5배 이상, 신재 모재의 크리프 물성을 사용한다면 14.2배 이상의 안전율을 고려하여야한다.

Table 3 Failure time for various crack location and directions.

Remaining Life		Case			
		Case A	Case B	Case C	Case D
Remaining Life (hr)	Serviced Metal Parent Property	10,427	9,886	35,193	32,210
	New Metal Parent Property	73,472	68,257	208,500	185,488
	HAZ Metal Property	6,748	6,368	14,261	13,110
	Weld Metal Property	116,814	107,696	338,529	296,955

본 연구는 한국표준과학연구원 산업측정표준부의 2001년도 출연연구 “재질형열화 평가 기술 개발 과제” 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) 백운봉, 이해무, 99 시설안전 계측 기술개발사업 연구 8장, 한국표준과학연구원, KRISS/IR 2000~014., 2000.
- 2) Saxena, A., and Han. J, "Evaluation of Crack Tip Parameters for Characterizing Crack Growth Behavior in Creeping Material," ASTM, Task Group Report, Joint Task Group E24.08.07/E24.04.08., 1986.
- 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, Paris, France 15~17 April, 1998.
- 4) 백운봉, 윤기봉, 서창민, 이해무, "용접부의 고온 재료물성에 대한 실험적 연구", 대한기계학회 논문집 A권 제 24권 제12호 pp. 3096-3103, 2000.
- 5) 백운봉, 윤기봉, 이해무, 서창민, "CrMo강 용접계면균열의 크리프-피로 균열성장거동", 대한기계학회 논문집 A권 제24권 12호, pp. 3088-3095, 2000.
- 6) Shamms M. S., "Metallographic Methods for Predicting the Remanent Life of Ferritic Coarse-Grained Weld Heat Affected Zones Subject to Creep Cavitation," Int. Conf. on Life Assessment and Extension, Hauge, Netherlands, 1998.
- 7) 윤기봉, 김광웅, 백운봉, "저합금강 용접부의 크리프 균열성장거동 모델링," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제12호, pp. 2153~2162, 1998.