

고온 보일러 헤더의 잔여수명평가 사례 연구

백 운봉* · 이해무* · 박종서* · 김동진* · 윤기봉**

A Case Study of Remaining Life Assessment for Boiler Header

U. B. Baek, H. M. Lee, J. S. Park, D. J. Kim and K. B. Yoon

Key Words: Creep-Fatigue Crack growth(크리프-피로 균열성장), Weld Interface(용접계면), HAZ(열영향부), Life Assessment(수명평가), C_r , C^* .

Abstract

Creep-fatigue crack growth behavior was experimentally measured particularly when a crack was located in the heat affected region of 1Cr-0.5Mo steel. Load hold times of the tests for trapezoidal fatigue waveshapes were varied among 0, 30, 300 and 3,600 seconds. Time-dependent crack growth rates were characterized by the C_r -parameter. It was found that the crack growth rates were the highest when the crack path was located along the fine-grained heat affected zone(FGHAZ). Cracks located in other heat affected regions had a tendency to change the crack path eventually to FGHAZ. Creep-fatigue crack growth law of the studied case is suggested in terms of $(da/dt)_{avg}$ vs. $(C)_{avg}$ for residual life assessment.

1. 서론

변동 부하를 담당하는 화력 발전설비의 경우 기저 부하를 담당하는 설비와는 달리 크리프와 피로 하중을 동시에 받고 운전되고 있다. 따라서 이러한 변동 부하 상태에 있는 설비의 수명평가를 위해서는 크리프 및 피로 하중을 동시에 고려해야 한다. 따라서 최근 크리프-피로하의 균열성장평가에 대한 연구^{(1),(2),(3)}는 국내외에서 활발히 진행되고 있다.

또한 고온 고압 산업용 설비의 경우, 대부분 균열이 용접부위에서 가장 먼저 발생하여 성장한다^{(4),(5)}. 그러나 용접부라고 하지만 장기사용에 의한 균열성장은 엄밀히 말하면 용접부와 모재부 사이의 열영향

부이며 열영향부 중에서도 ICHAZ에서 발생하는 TYPE IV 균열이라 하겠다. 따라서 용접부 균열에 대한 파괴거동을 연구하는 것은 고온고압 발전설비의 잔여 수명을 평가하는데 매우 중요하다.

그러나 기존의 연구^{(6),(7)}는 대부분 모재부에 대해서만 이루어 졌으며, 실제로 이러한 열영향부에 균열이 존재하는 경우 재료 물성과 기계적 성질에 대한 자료의 부재로 인해 균열 성장에 대한 잔여수명평가가 곤란하였다. 따라서 최근 국내외에서 이러한 점을 고려하여 용접부에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{(3),(4),(5),(6)}. 실제 화력발전 설비에서 운전되는 조건과 같은 조건으로의 연구가 필요하며 그 차이를 확인해볼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 화력 발전소 보일러 헤더 용접부에서 균열이 발생한 경우 균열성장 수명평가사례에 대해서 기존의 모재부 재료 물성을 사용하였을 경우와 용접부 재료 물성을 사용한 경우 그리고 크리프 수명만 고려한 경우와 피로 수명만 고려한 경우 크리프-피로를 동시에 고려한 경우에 대해서 비교하여 그 정확성을 확인

* 회원, 한국표준과학연구원 산업측정표준부

E-mail : ubbaek@kriss.re.kr

TEL. : (042)868-5384 FAX : (042)868-5047

** 회원, 중앙대학교 기계공학부

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.

Table 2 Tensile properties of the 1Cr-0.5Mo steel at 24°C and 538°C

Material	Test Temp. (°C)	Yield Stress (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	D (MPa ^m)	m
Parent	24	291	477	35.6	72.8	4.481E-12	3.80
	538	214	344	32.9	78.9	2.797E-17	5.97
HAZ	24	387	573	33.1	73.3	5.393E-19	6.21
	538	323	461	28.0	75.5	1.091E-22	7.73
Weld	24	588	661	21.2	71.2	1.889E-26	8.58
	538	408	461	30.0	81.1	5.310E-46	16.29

하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 연구에 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 보일러 헤더 재료로서 AWS규격 E8016-B2로 용접하였으며 그 화학성분은 Table 1과 같다. 용접부와 모재부 그리고 모사 열처리한 열영향부에 대한 상온 및 고온에서의 기계적 물성 측정을 위해 상온에서 인장시험과 538°C에서 인장 시험 및 크리프 시험을 실시하였으며, 시험편은 후육 헤더로부터 시험편의 길이방향이 헤더의 길이방향과 일치하도록 가공하였다.

2.2 인장시험

인장시험은 직경 6.25 mm인 시험편을 사용하였으며, 상온 인장시험은 ASTM E8 규격에 준하여 실시하였고, 고온 인장시험은 ASTM E21규격에 준하여 변위 제어 방식으로 시험하였다.

인장시험의 하중-변위 기록으로부터 진응력-진변형률 관계를 구한 후, 소성변형률, ϵ_p 와 응력, σ 사이의 지수 법칙을 $\epsilon_p = D\sigma^m$ 으로 가정하여 최소자승법에 의해 재료의 소성상수 D 와 m 을 결정하여 Table 2에 함께 정리하였다.

2.3 크리프 시험

사하중식 크리프 시험기를 사용하여 ASTM E139 규격에 따라 538 °C에서 실험하였다. 크리프 시험편의 변위 측정을 위해 신장계를 시험편에 부착하였

고, 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 A 와 n 을 결정하였으며, 측정결과는 Table 3에 정리하였다.

2.3 크리프-피로 균열성장 시험

크리프-피로 균열 성장시험을 위한 C(T) 시험편은 균열성장 방향이 모재의 반경방향과 일치하고 열영향부를 따라서 성장하도록 가공하였다. 기계가공을 한 시험편은 예비균열을 초기균열비가 0.5가 되도록 만든 다음 시험편 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 균열성

Table 3 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

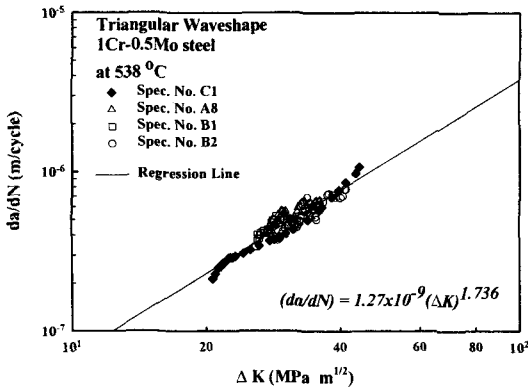


Fig. 2 Regression results of fatigue crack growth rates for 1Cr-0.5Mo steel at 538°C under triangular waveshapes.

장률을 측정하여 주기의존 균열 성장률을 결정하기 위해, [하중증가시간]/[하중감소시간]이 1/1(단위:초)인 삼각파형에서 4개의 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.

3. 결과

3.1 삼각파형의 피로 균열성장

하중 유지시간이 없는 삼각파형의 피로 균열성장 시험으로 측정된 균열성장률 da/dN 을 ΔK 로 정리하여 Fig. 2에 나타내었다. 이때 응력확대계수 범위 ΔK 는 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B_N \sqrt{W}} \cdot F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

여기서, $C(T)$ 시험편의 경우에는 식 (2)를 이용하여 $F(a/W)$ 를 계산하였으며 a 는 균열길이, W 는 시험편폭, B_N 은 유효시험 두께, ΔP 는 하중범위이고, 식 (2)는 $a/W > 0.2$ 범위에서 유효하다.

$$F\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{2 + a/W}{(1 - a/W)^{1.5}} \left[0.886 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (2)$$

Fig. 2의 실험결과에서 직선 회귀선을 구해 주기의존 균열성장률을 구하면 식 (3)과 같다.

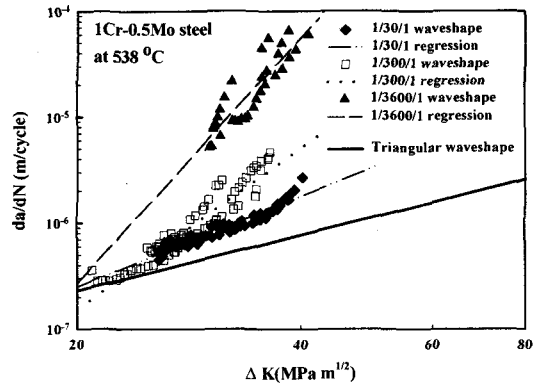


Fig. 3 Comparison of crack growth rates of 1Cr-0.5Mo steel at 538°C under trapezoidal and triangular waveshapes.

$$\frac{da}{dN} = 1.27 \times 10^{-9} (\Delta K)^{1.736} \quad (3)$$

여기서 da/dN 은 $m/cycle$, ΔK 는 $MPa(m)^{1/2}$ 이며, 회귀선은 Fig. 2에 실선인 직선으로 나타내었다. 삼각파형의 피로균열성장 시험결과는 Fig. 2에 보인 바와 같이 데이터의 산포가 적고 Paris 법칙을 매우 잘 만족시키고 있음을 알 수 있다.

3.2 사다리꼴 파형의 피로 균열성장

Fig. 3은 하중 유지시간이 각각 30, 300, 3,600 초인 사다리꼴 파형의 피로시험 결과를 정리하여 da/dN 을 ΔK 로 도시하였다. Fig. 3에서 하중유지시간 동안의 시간의존형 균열 성장률은 점선으로 각각 나타난 사다리꼴 파형 피로시험결과를 굵은 실선으로 표시된 삼각파형 시험결과로 빼주면 얻을 수 있다. 즉, 1/3600/1 데이터와 1/1 데이터의 균열성장률 차이가 하중 유지시간 3,600초 동안의 시간의존 균열성장량이다.

Fig. 3으로부터 결정한 하중유지시간 동안의 시간의존 균열성장 거동은 $(da/dt)_{avg}$ 를 $(C)_{avg}$ 로 정리하여 Fig. 4(a)~(c)에 나타내었다. Fig. 4(a)에는 하중 유지시간이 30초인 3개 시험편의 시험결과를 나타내었고, Fig. 4 (b)에는 하중유지시간 300초, Fig. 4 (c)에는 하중유지시간 3,600초의 실험 결과를 각각 도시하였다. 이때 $(da/dt)_{avg}$ 는 단위시간당 하중 유지기 동안 균열성장률로서 식 (4)와 같이 정의되며, $(C)_{avg}$ 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{avg} = \frac{1}{t_h} \left(\frac{da}{dN}\right)_{hold} \quad (4)$$

$$(C_t)_{avg} = \frac{1}{t_h} \int_0^{t_h} C_t dt \quad (5)$$

여기서 t_h 는 하중유지시간이다.

매개변수 $(C_t)_{avg}$ 는 시험중 기록한 하중, 균열 길이 및 재료의 크리프 상수로부터 식 (6)을 사용하여 계산하였다. 식 (6)은 탄성-2차 크리프 거동 재료에서 유효한 $(C_t)_{avg}$ 평가식이다.

$$(C_t)_{avg} = \frac{2\alpha\beta}{E} \frac{\hat{r}_c(\theta, n)}{W} (1-\nu^2) \frac{\Delta K^4}{W} \quad (6)$$

$$\frac{F}{F} (EA)^{\frac{2}{n-1}} t_h^{-\frac{n-3}{n-1}} + C^*$$

여기서,

$$\alpha = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{(n+1)^2}{2n\alpha^{\frac{n+1}{n}}} \right]^{\frac{2}{n-1}}, \alpha_n^{n+1} = \frac{n+1}{n} \frac{\pi(1-\nu^2)}{I_n}$$

$$\beta = 1/3, \hat{r}_c(90^\circ, n) \approx 0.38$$

이며, t_h 는 하중유지시간, I_n 은 n 에 따른 무차원 함수이다.⁽⁸⁾ C^* 는 알려진 J -적분 해를 이용하여 계산하였으며, 평면 변형을 조건에서 $C(T)$ 시험편의 경우에는 식 (7)로 표현된다.

$$C^* = \frac{A}{(W-a)^n} h_1 \left(\frac{a}{W}, n \right) \left(\frac{P}{1.455 \zeta B} \right)^{n+1} \quad (7)$$

이때,

$$\zeta = \left[\left(\frac{2a}{W-a} \right)^2 + 2 \left(\frac{2a}{W-a} \right) + 2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{2a}{W-a} \right) - 1$$

이며, P 는 하중 유지시간 동안의 하중의 크기, h_1 은 n 에 따른 함수로서 1Cr-0.5Mo강 모재인 경우 n 은 9.18이므로 J -Handbook으로부터 h_1 함수는 식 (8)로 표현된다. 이때, 식 (8)은 $0.375 \leq (a/W) \leq 1$ 에서 유효하다.

$$h_1 \left(\frac{a}{W}, 9.18 \right) = 12.86 - 99.65 \left(\frac{a}{W} \right) + 311.04 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \quad (8)$$

$$- 472.96 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 353.31 \left(\frac{a}{W} \right)^4 - 103.62 \left(\frac{a}{W} \right)^5$$

4. 토 의

하중유지시간 조건이 30초, 300초, 3,600초인 각각의 경우에 $(da/dt)_{avg}$ 는 Fig. 4(a)~(c)에 보인바와 같이 $(C_t)_{avg}$ 로 잘 특성화 될 수 있다. 그러나 이들 모두를 한 그래프에 나타낸 Fig. 5를 보면 각각의 데이터간에 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 하중유지시간 30초인 경우의 균열성장 관계인 $(da/dt)_{avg}$ 대 $(C_t)_{avg}$ 곡선의 기울기는 약 0.382로 하중유지시간 300초, 3,600초인 경우의 기울기인 1.103와 0.791에 비해 약

1/3정도로 작다. 그러나 하중유지시간 300초인 경우의 관계식 기울기는 3,600초인 경우의 관계식 기울기와 거의 동일하다. 따라서 전자의 경우 시간의존 균열성장기구와 후자의 시간의존 균열성장 기구는 서로 상이할 수 있다. 전자의 경우에는 크리프-피로 균열성장 시험시작 전에 균열선단의 위치가 용접재, 열영향부, FGHAZ(fine grain heat affected zone), 모재, 어떤 곳에 위치해 있던지 상관없이 원래 피로예비균열 성장방향과 일치하는 방향으로 일관성 있게 균열이 성장하였다. 이는 삼각파형에 의한 피로균열성장 시험시 관찰되었던 결과와 유사하다. Fig. 6(a)는 삼각파형 시험시편인 C1시편의 실험종료 후 측면조직 사진이다. 그림에서 알 수 있듯이 초기예비균열의 균열선단은 용접 용융선 근처에 위치하였으나, 균열성장은 용융선을 지나 열영향부 쪽으로 거의 일직선 형태로 발생하였음을 알 수 있다. 하중유지시간 30초인 경우에도 하중 유지기 동안 발생한 시간의존 균열 성장량이 제하/부하(unload/reload)중에 발생한 주기의존 균열성장량에 비해 매우 작으므로, 균열성장 경로는 삼각파형 시편의 균열성장 경로 형태와 유사하다. 하중유지시간이 300초, 3,600초인 경우에는 시간의존 균열성장은 크리프 변형 및 크리프손상에 의해 발생하므로 균열선단부위 영역에서 크리프 기공이 관찰된다. Fig. 7에는 (a)에 하중유지시간 30초인 C1 시편의 균열선단 부위를 표시하였고, (b)에 하중유지시간 300초인 C5 시편, (c)에 하중유지시간 3,600초인 C11 시편의 균열선단 부위를 나타내었다. (a)에서는 크리프 기공이 관찰되지 않았지만 (b), (c)에서는 많은 크리프 기공이 관찰되고 있다. 즉 전자와 후자는 시간의존 균열성장 기구가 상이하며, 이 차이점이 Fig. 5에 보인 $(da/dt)_{avg}$ 대 $(C_t)_{avg}$ 관계선의 기울기 차이로 나타나고 있다.

하중유지시간이 300초 이상인 경우에 균열은 크리프 손상에 의해 성장하다가 균열성장경로가 HAZ 부를 지나 FGHAZ쪽으로 형성되며, 일단 FGHAZ에 균열선단이 도달하면 이후에는 FGHAZ를 따라 균열성장이 발생한다. 즉 본 용접 시편의 경우 크리프-피로 균열성장에 가장 취약한 부위는 용접 용융선, 열영향부, 모재부 등이 아니고 FGHAZ부임을 추측할 수 있다. 본 연구에서 300초 하중유지시간을 갖는 3개의 실험결과는 모두 HAZ부를 따라 균열이 성장하다가, 시험 거의 종료기에 가서야 FGHAZ부에 균열이 도달하였으므로, 대부분의 실험결과는 HAZ부내에서의 크리프-피로 균열성장률을 나타낸다. 하중

유지시간이 3,600초인 경우에는 Fig. 6 (b)에 보인바와 같이 균열성장 초기에 성장 경로가 FGHAZ쪽으로 형성되어 실험 초기부터 FGHAZ부의 크리프-피로 균열성장률이 측정되게 되므로, 하중 유지시간 3,600초인 본 연구에서 실험결과는 균열이 FGHAZ

부에 있는 경우의 크리프-피로 균열성장률을 나타낸다. FGHAZ부가 고온 균열성장 저항성이 가장 작으므로 Fig. 5에 보인바와 같이 $(da/dt)_{avg}$ 대 $(C)_{avg}$ 관계 곡선이 가장 상부에 위치하게 되며, 같은 $(C)_{avg}$ 값이라도 이때의 균열성장률이 가장 크게 된다. 따라서 1Cr-0.5Mo강 용접 열영향부 근처에 균열이 존재하는 경우에 고온 균열성장에 의한 수명평가를 위해서는, FGHAZ부를 따라 균열이 성장하는 경우 데이터의 상부 분산폭의 경계선인 식 (9)를 사용하여 균열성장률을 예측하여야 한다.

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{avg} = 6.132 \times 10^{-3} ((C)_{avg})^{0.791} \quad (9)$$

만약 하중유지시간이 300초인 경우에 초기 균열 선단이 정확히 FGHAZ부에 위치해 있다면, 크리프-피로 균열성장률이 균열선단이 HAZ 중앙부에 있는 경우 보다 높을 것이다. 이의 검증을 위해 노치 가공시 예비피로균열이 정확히 모재와 HAZ부의 경계면인 FGHAZ부에 위치하도록 추가 시편을 제작하여 하중유지시간 300초인 조건에서 실험하여 균열성장률을 측정하였다. Fig. 8에 보인바와 같이 예비 피로 균열 선단에서 일직선으로 크리프-피로 균열성장이 발생하여 FGHAZ부를 따라 진전하였으며, 이때 균열성장률은 Fig. 5에 ●로 나타낸바와 같이 하중유지시간 3,600초의 실험결과와 동일한 균열성장률을 보여 주었다. 따라서 앞서 토의한 논리가 맞음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

1Cr-0.5Mo강 용접부의 HAZ부위에 균열을 형성시켜 크리프-피로 균열성장거동에 대해 실험적으로 연구하였으며, 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 기계적 피로에 의한 균열성장이 주로 발생할 때 균열 성장경로는 금속 조직과 무관하다.
- (2) 크리프에 의한 균열성장이 주로 발생하는 경우에는 초기 균열선단의 위치와 상관없이 균열성장경로는 FGHAZ를 따라 형성된다.

- (3) FGHAZ부에서의 크리프-피로 균열성장율이 다른 HAZ부에서의 균열성장율보다 높다.
- (4) 따라서 용접부의 크리프-피로 균열성장율을 예측하여 잔여수명을 평가할 때는 FGHAZ부의 균열성장율 관계식을 사용하여야 한다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 산업측정표준부 방재기술연구센터의 1999년도 출연연구 "Cr-Mo계 배관의 균열형 열화 평가기술 신뢰성 향상 과제" 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 윤기봉, 김광웅, 백운봉, 1998, "저합금강 용접부의 크리프 균열성장거동 모델링," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제12호, pp. 2153~2162.
- (2) 윤기봉, 심현우, 신영의, 1998, "고온크리프 조건에서 용접계면 균열의 Ct 매개변수에 대한 수치해석적 연구," 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제12호, pp. 2239~2246.
- (3) Saxena, A., Creteigny, 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.
- (4) 백운봉, 이해무, 2000, 99 시설안전 계측 기술 개발사업 연구 8장, 한국표준과학연구원, KRISS/IR 2000~014.
- (5) Saxena, A., 1980, "Electrical Potential Technique for Monitoring Subcritical Crack Growth at Elevated Temperature," Engineering Fracture Mechanics, No.13, pp. 741~750.
- (6) Johnson. H. H., 1965, "Calibrating the Electrical Potential Method for Studying Slow Crack Growth," Material Research and Standard, Vol.5, No.9, pp. 442~445.
- (7) Saxena, A., and Han, J., 1986, "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.

- (8) Shih C. F., 1983, Tables of Hutchinson-Rice
-Rosengren Singular Field Quantities, Brown
University.