

보일러관의 수명에 부식이 미치는 영향에 대한 수치해석

홍성호* · 김종성*
(2000년 4월 14일 접수)

Numerical Analysis of Corrosion Effects on the Life of Boiler Tube

Sung Ho Hong and Jong Sung Kim

Key Words: Boiler Tube (보일러 관), Life Prediction(수명예측), Rupture Time(파단수명), Rupture Strain(파단변형률), Creep(크리프), Corrosion(부식)

Abstract

Several methods have been developed to predict the rupture time of the boiler tubes in thermal power plant. However, existing life prediction methods give very conservative value at operating stress of power plant and rupture strain cannot be well estimated. Therefore, in this study, rupture time and strain prediction method accounting for creep, corrosion and heat transfer is newly proposed and compared with the current research results. The creep damage evolves by continuous cavity nucleation and constrained cavity growth. The corrosion damage evolves by steam side and fire side corrosion. The results showed good correlation between the theoretically predicted rupture time and the current research results. And rupture strain may be well estimated by using the proposed method.

1. 서론

발전설비의 보일러관이나 주증기관 등과 같이 고온고압이 작용하는 설비에 대한 정확한 수명예측은 기기 설계시나 운영 및 보수시 매우 중요하다. 따라서 선행 연구에서 주증기관등과 같은 배관의 크리프 파단수명을 재료손상과 입계 미끄럼을 고려하여 예측하였다.⁽¹⁾

그런데 발전설비중 보일러관의 경우, 내부는 주증기관과 같이 고온고압의 증기가 작용하나, 외부는 석탄이나 기름 연소에 의한 고온의 부식성 화염이 작용하므로, 보일러관은 고온고압의 증기에 의한 크리프와 내외부 관 표면에서의 부식등에 의하여 동시에 손상되고 있다. 증기측 부식에 의한 산화는 관두께 손실이 비교적 작으나, 이들

산화막이 열전달을 방해하여 열효율을 저하시킬 뿐만 아니라 관벽 온도 증가를 가져와 수명을 단축시키는 역할을 한다. 따라서 이들의 영향을 설비의 수명평가나 설계시에 반영을 하고 있는데, 독일의 보일러 설계 규격⁽²⁾에서는 관벽 온도를 내부 증기온도보다 최대 50°C 정도 높게 예측하고 있다. 그러나 국내의 경우⁽³⁾ 관벽 온도를 내부 증기온도보다 약 100°C 정도 높게 예측하고 있어 잔존수명 평가나 설계시에 수명이 짧게 예측되는 문제점이 발생되고 있으나 이에 대한 분석은 미흡한 실정이다.

한편 보일러관은 상온에서의 파단 연신율이 14~30% 정도가 되는데도 불구하고 실제 현장에서는 관의 바깥 지름 팽창량이 2~5% 일 때 전 수명이 소비된 것으로 판단하여 교체하고 있다.^(3,4) 그러나 이것은 경험상의 수치값으로 현재까지 이론적으로 이를 뒷받침할 만한 해석이 이루어지지 않고 있다.

그리고 304 스테인레스강에 대하여 행하여진 크리프 및 부식 실험결과를 보면 온도가 낮은 경

* 회원, 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소
E-mail : PMAS@ns.kopec.co.kr
TEL : (031)289-4305 FAX : (031)289-4517

Table 1 Design parameter of boiler tube

Material	: 2¼Cr-1Mo Steel
Operating Pressure	: 46.9 MPa
Operating Temperature	: 550°C
Outer Diameter	: 38.1 mm
Thickness	: 6.35 mm

우 부식이 미치는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다.⁽⁵⁾ 이러한 현상은 온도가 낮은 경우 국부적인 고온부식이나 응력부식균열등에 의한 영향 증가로 분석되고 있으나 이것도 불확실한 면이 있다.

따라서 본 연구에서는 보일러관 재료인 2¼Cr-1Mo 강에 대하여 수치해석을 실시하여 부식으로 인한 열전달 변화 등이 보일러관의 파단수명과 파단변형률에 미치는 영향을 분석하였다. 이때 크리프 손상은 선행 연구와 같이 연속 공동 생성(cavity nucleation)과 성장모델⁽⁶⁾에 공동성장에 따른 입계에서의 재료손상률 증가와 공동생성에 미치는 입계 미끄럼(grain boundary sliding)의 영향을 고려하여 산출하였다.⁽⁷⁾ 이들 결과를 현재 수명예측에 가장 많이 사용되고 있는 Larson-Miller parameter⁽⁸⁾를 이용한 수명예측값과 최근에 발표된 Zarrabi⁽⁹⁾ 등의 연구결과와 비교하였다.

2. 크리프 현상을 고려한 보일러 튜브의 응력해석

보일러관은 운전온도가 높아 크리프 현상이 발생하므로 관벽의 응력은 시간에 따라 변하는데, 이때 변하는 정도는 초기응력분포, 관의 반경과 두께와의 비, 관벽에서의 온도, 관재질에 따른 크리프 거동 특성에 의하여 변한다.

따라서 본 연구에서는 균일 내압을 받는 보일러관에 대하여 크리프 현상을 고려하여 ABAQUS v5.8⁽¹⁰⁾을 사용한 비선형 유한요소 해석을 다음과 같이 수행하였다.

2.1 해석모델

해석모델은 Table 1과 같이 외경 및 두께가 각각 38.1mm과 6.35mm이고 길이가 100mm인 직관 형태의 보일러관으로 재료는 2¼Cr-1Mo강이다.

Table 2 Material Properties of 2¼Cr-1Mo Steel

Elastic modulus (550°C)	: 157 GPa
Poisson's ratio (550°C)	: 0.304
n	= 7.79
B_o	= $3.157 \times 10^{-26} \text{ MPa}^{-n} \text{ sec}^{-1}$
Q	= 110,000 Cal/mole
$D_b \delta_b$	= $1.1 \times 10^{-12} e^{\left(\frac{-1.74 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}}{1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \cdot \text{mole} \cdot T}\right)} \text{ m}^3/\text{sec}$
γ_s	= 2.1 J/m ² , γ_b = 0.85 J/m ²
Ω	= $1.18 \times 10^{-29} \text{ m}^3$

2¼Cr-1Mo 강의 재료상수값은 Table 2^(11,12)와 같고 크리프거동 구성방정식은 식(1)과 같다.⁽⁷⁾

$$\dot{\epsilon} = B_o e^{-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - 1.233 \times 10^{-3}\right)} (f\sigma)^n \quad (1)$$

식 (1)과 Table 2에서 B_o 는 재료상수, Q 는 재료의 활성화에너지, R 은 기체상수, T 는 절대온도(K), Ω 는 원자의 부피(atomic volume), D_b 는 입계에서의 확산속도(grain boundary diffusivity), δ_b 는 입계의 두께, n 은 멱급수 크리프(power law creep)에서의 재료지수이고 γ_s 는 표면 자유에너지(surface free energy), γ_b 는 결정립계 자유 에너지(grain boundary free energy)이다. 그리고 f 는 재료지수 n 과 다음과 같은 관계가 있다.

$$f = \left[1 + \left(\frac{\pi}{8}\right) \sqrt{\frac{n}{3}}\right]^{1/n} \quad (2)$$

경계조건은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 균일 온도 550°C를 유지하면서 내압 p_i 가 46.9 MPa의 크기로 관 내면에 균일하게 작용하고 양단 면에서 관의 축 방향으로만 고정되어 있는 경우이다.

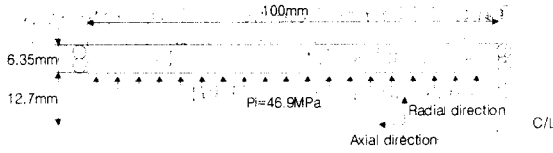


Fig. 1 Boundary conditions of analysis model

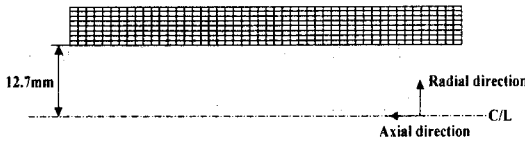


Fig. 2 Finite element model

유한요소 모델은 해석모델의 형상 및 경계조건이 축대칭이므로 Fig. 2에서와 같이 축대칭 모델을 사용하였다. 요소수와 절점수는 각각 640개와 2097개로서 요소특성은 축대칭 8절점 요소이다.

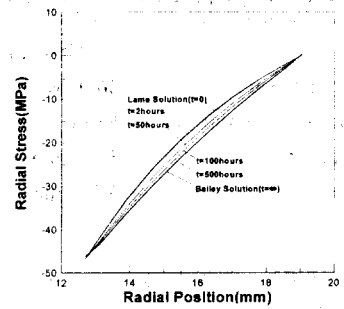
2.2 해석결과

크리프 해석은 상용 유한요소 패키지인 ABAQUS Ver.5.8⁽¹⁰⁾과 사용자 정의 보조 프로그램(User Subroutine Program)를 이용하여 수행하였다.

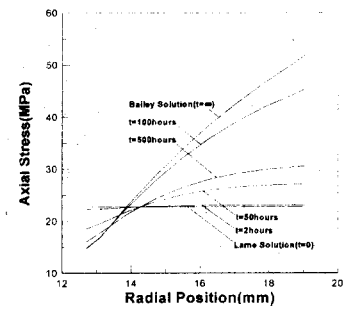
시간에 따른 관벽에서의 후프응력(σ_{θ}), 축응력(σ_{ax}), 반지름방향응력(σ_r) 및 von Mises 상당응력(σ_e) 변화는 Fig. 3 과 같다. Fig. 3을 보면 응력분포가 시간에 따라 변하고 있는데 특징은 다음과 같다.

- 후프응력은 초기에 관 내면에서 최고이나 크리프로 인한 응력 재분배로 시간이 경과함에 따라 관 외면에서 최고가 된다.
- 크리프로 인한 응력 재분배후 von Mises 상당응력 σ_e 는 관벽의 거리에 관계없이 비교적 일정하다.

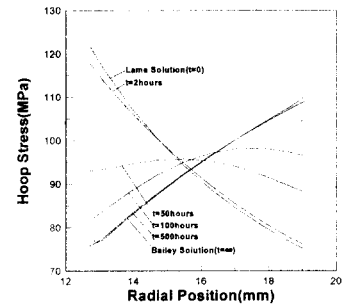
3. 부식의 영향을 고려한 2¼Cr-1Mo 보일러관의 크리프 파단수명 및 파단변형을 예측



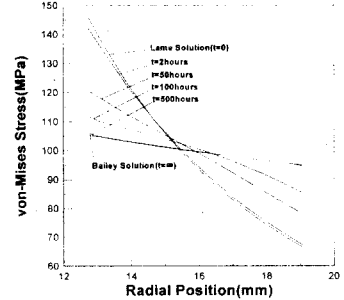
(a) Radial stress



(b) Axial stress



(c) Hoop stress



(d) von-Mises stress

Fig. 3 Various calculated stress values for 38.1mm outside diameter by 6.35mm wall tube with an internal pressure of 46.9 MPa and a uniform temperature of 550°C

3.1 부식의 영향을 고려한 2¼Cr-1Mo 보일러관의 크리프 파단수명 예측

3.1.1 공동의 생성과 성장을 고려한 보일러관의 크리프 파단수명에 부식이 미치는 영향

부식의 영향을 고려한 2¼Cr-1Mo 보일러관의 크리프 파단수명 예측은 기존의 공동 생성과 성장을 고려한 보일러관의 크리프 파단수명 예측 결과⁽¹⁾에 산화막 성장에 따른 두께 감소를 고려하여 산출하였다. 단, 본 연구에서는 관에서의 응력을 크리프 현상으로 인한 응력완화를 고려한 FEM 해석을 실시하여 선행 연구⁽¹⁾를 보완하였다.

먼저 공동의 생성과 성장을 고려한 보일러관의 크리프 파단수명 예측 방법을 설명하면 다음과 같다.⁽¹⁾

보일러관의 크리프 파단수명, t_f 를 예측하기 위해서 먼저 Fig. 4와 같은 재료의 입계에서 공동이 생성되어 성장될 때 시간 t 에서 공동의 반경 a 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$a = a_0 + \int_{t_0}^{t_f} \dot{a} dt \tag{3}$$

여기서 a_0 는 공동의 초기 반경, t_0 는 공동의 생성시간, \dot{a} 는 공동의 성장속도이다. 공동의 생성은 외부에서의 부과 응력이 공동의 핵생성 응력, σ_n 을 초과할 때 순간적으로 발생한다고 보았다. 따라서 본 연구에서 공동의 생성시간, t_0 는 0 으로 계산하였다. 그리고 공동의 초기 반경 a_0 는 다음과 같이 구하였다.

$$a_0 = \frac{2\gamma_s}{\sigma_n} \tag{4}$$

공동의 핵생성 응력은 재료의 탄성계수, E 의 1/100 정도이고⁽¹³⁾ 550°C에서 2¼Cr-1Mo 강의 탄성계수는 157 GN/m² 이므로⁽¹⁴⁾ a_0 는 약 $3 \times 10^{-9}m$ 이다.

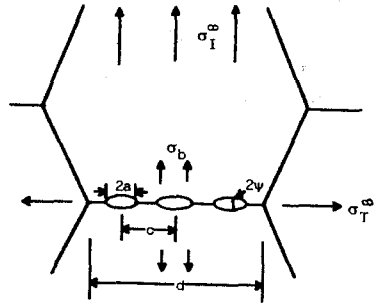


Fig. 4 Cavitating grain boundary facet

그리고 공동의 성장속도 \dot{a} 는 Fig. 4와 같은 외부 응력장하에서 공동이 구속성장될 때 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$\dot{a} = \frac{\sigma_I - (1-\omega)\sigma_o}{k(\psi) a^2 \left[\frac{q(\omega)kT}{2\Omega D_b \delta_b} + \frac{q'\sigma_e}{\epsilon_e c^2 d} \right]} \tag{5}$$

여기서 σ_I 는 외부에서 부과된 주응력, σ_e 는 von Mises 상당응력(equivalent stress), σ_o 는 공동의 sintering 응력, k는 Boltzmann 상수, c는 공동간의 간격, d는 결정립계의 크기이다. 그리고 ϵ_e 는 등가 변형률 속도(equivalent strain rate)로 σ_e 및 재료지수 n 과 멱급수 크리프(power law creep) 관계가 있다. 한편 ψ 는 공동 끝단에서의 각도로 표면 자유에너지(γ_s) 및 결정립계 자유에너지(γ_b)와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\cos \psi = \frac{\gamma_b}{2\gamma_s} \tag{6}$$

그리고 ω 는 입계에서 공동성장으로 인한 재료 손상량으로 다음과 같이 공동반경 a 와 공동간의 간격 c의 함수이다.

$$\omega = \left(\frac{2a}{c} \right)^2 \tag{7}$$

그리고

$$q' = \pi^2 \sqrt{1+3/n} \tag{8}$$

$$q(\omega) = -2 \ln \omega - (3-\omega)(1-\omega) \tag{9}$$

$$h(\psi) = \frac{1}{\sin \psi} \left(\frac{1}{1+\cos \psi} - \frac{\cos \psi}{2} \right) \tag{10}$$

이다.

보일러관에서는 다축응력이 작용하므로 식 (5)에서의 von Mises 상당응력, σ_e 는 다음과 같이 구하였다.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_H - \sigma_{ax})^2 + (\sigma_{ax} - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_H)^2]^{0.5} \tag{11}$$

여기서 σ_H 는 보일러관의 후프응력, σ_{ax} 는 축응력, σ_r 는 반지름방향 응력이다. 본 연구에서는 보일러관 벽의 중앙에 부과되는 응력값을 이용하여 수명을 산출하였다.

한편 공동의 연속 생성시 공동간의 간격 c 는 상수가 아니라 계속 감소된다. 그러므로 공동간의 간격은 다음과 같은 공동의 밀도(cavity density), N 과 변형률과의 관계식으로부터 산출하였다.⁽¹⁵⁾

$$N = a\epsilon = a\epsilon t = \frac{1}{c^2} \tag{12}$$

여기서 a 는 공동의 생성계수로 일반적으로 $4 \times 10^{10} \sim 10^{12}/m^2$ 의 범위⁽¹⁶⁾에 있다. 그리고 입계에서의 공동성장에 따른 내부손상(internal damage)의 영향을 고려하여 식 (13)과 같이 ρ 매개변수를 적용, 크리프 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 를 수정한 후 크리프 파단수명을 산출하였다.⁽¹⁷⁾

$$\dot{\epsilon} = \frac{B_0 e^{-\frac{Q}{R}(\frac{1}{T} - 1.233 \times 10^{-3})} \sigma^n}{1 - \rho} \tag{13}$$

한편 입계 미끄럼에 의한 변형률의 변화는 식 (1)과 같이 구하였다.⁽⁷⁾

크리프 파단수명은 먼저 Table 2의 재료상수 값^(11,12)을 식 (5)에 대입하여 공동의 성장속도 \dot{a}

를 구한 후, 이를 식 (3)에 대입하여 시간 t 에서 공동의 반경 a 를 구하는 과정을 반복하여 구하는데 두 공동이 서로 만날 때 까지의 시간이 파단수명이 된다. 이렇게 산출된 크리프 파단수명은 Fig. 5의 실선과 같다.

2¼Cr-1Mo 강으로 제작된 보일러관의 크리프 파단수명에 부식이 미치는 영향은 산화막 성장에 따른 두께 감소를 고려하여 다음과 같이 산출하였다.

보일러관의 증기측 산화막 성장식은 여러실험결과⁽¹⁸⁾를 통계처리하여 얻은 다음과 같은 관계식을 사용하여 구하였다.

$$\log(x) = c_1 + \frac{9}{5} c_2 T + \frac{9}{5} c_3 T \log t \tag{14}$$

여기서 x 는 증기측 산화막 두께(mils), T 는 관벽의 평균 운전온도, t 는 시간(hours)이다. 그리고 c_1, c_2, c_3 는 그동안 발표된 여러 실험결과⁽¹⁸⁾로부터 통계처리하여 얻은 값으로 $c_1 = -6.839869, c_2 = 3.86 \times 10^{-3}, c_3 = 2.83 \times 10^{-4}$ 이다.

한편 보일러관의 외부부식은 연소가스의 조건에 따라 많은 차이가 있어 정확히 예측하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 수식을 사용하였다.⁽¹⁹⁾

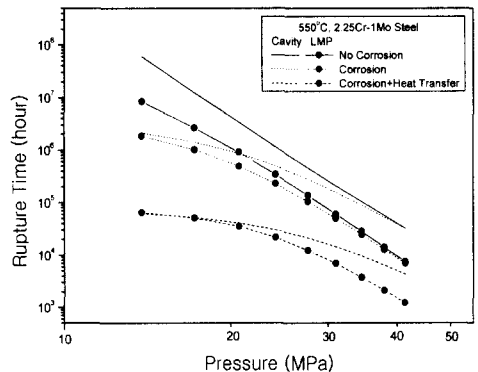


Fig. 5 Comparison of boiler tube rupture time between cavity growth simulation and Larson-Miller parameter method in 2¼Cr-1Mo boiler tube at 550°C

Table 3 Design parameter of boiler tube for comparison of several boiler tube life prediction methods

Material	: 2¼Cr-1Mo Steel
Pressure	: 16 MPa
Temperature	: 550°C
Outside Diameter	: 50 mm
Thickness	: 9 mm
Thinning Rate	: 2.5 ~ 50.0 nm/h

$$C = 2.54 \times 10^{-57} \left(\frac{9}{5} T_M - 460\right)^{12.8} \left(\frac{9}{5} T_G - 460\right)^{5.3} \quad (15)$$

여기서 C 는 부식률(mm/year), T_M 은 관벽의 금속온도, T_G 는 연소가스 온도이다. 식 (14)와 (15)로부터 각 시간에서의 관두께를 산출하여 관벽의 응력을 구한 후, 이들을 앞에서와 같은 방법으로 식 (5)에 대입하여 공동의 성장속도 \dot{a} 를 구한 후, 이를 식 (3)에 대입하여 부식 분위기하에서의 보일러관의 파단수명을 산출하고 Fig. 5에 짧은 점선으로 도시하였다.

Fig. 5를 보면 보일러관의 파단수명에 부식이 미치는 영향은 관의 내부압력이 감소할수록 증가하고 있다. 이러한 경향은 뒫⁽⁵⁾ 등에 의하여 행하여진 304 스테인리스강의 경우와 일치하고 있다.

본 연구결과를 Zarrabi의 연구결과⁽⁹⁾와 비교하기 위하여 Table 3 과 같은 제원의 보일러관을 대상으로 여러 부식률(2.5 ~ 50.0 nm/h) 조건에서 수명을 예측하면 Fig. 6과 같다.

본 연구결과는 Zarrabi 연구결과의 평균값과 비슷한 것을 알 수 있다.

3.1.2 Larson Miller Parameter 를 이용한

보일러관의 크리프 파단수명에 부식이 미치는 영향

앞에서 구한 결과와 현재 발전설비의 수명예측을 위하여 널리 사용되고 있는 Larson-Miller parameter(LMP)⁽⁸⁾를 이용한 수명예측 결과와 비교하기 위하여 다음과 같은 수식을 사용하였다.

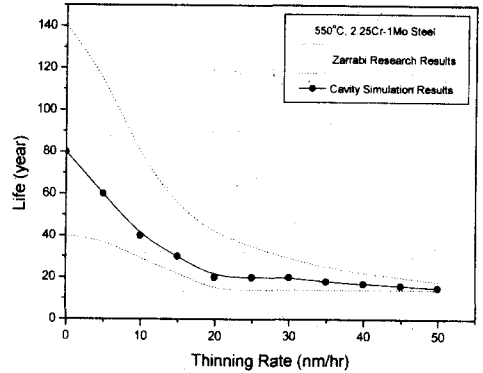


Fig. 6 Comparison of boiler tube life between Zarrabi research results and cavity simulation results in 2¼Cr-1Mo boiler tube at 550°C

$$LMP(\sigma) = T(20 + \log t_f) \times 10^{-3} \quad (16)$$

여기서 LMP(σ)는 Larson-Miller parameter, t_f는 크리프 파단수명(hour)이다.

일반적으로 LMP(σ)는 응력만의 함수로 응력 값이 같을 경우 일정하다. 그러나 최근 이들 값이 재질의 열화에 따라 변하는 것이 밝혀지면서 다음과 같은 수식이 사용되고 있다.⁽²⁰⁾

$$LMP(\sigma) = 40975 + 57(UTS \times TSRF) - 5225 \log \sigma - 2450 (\log \sigma)^2 \quad (17)$$

여기서 UTS 는 재료의 인장강도이고 TSRF (tensile strength reduction factor)은 재질열화에 따른 인장강도 감소율로 시간 및 온도와 다음과 같은 관계가 있다.⁽²⁰⁾

$$TSRF = 3.188 - 0.155 T(R)(10 + \log t)^{-3} + 0.002 [T(R)(10 + \log t)10^{-3}]^2 \quad (18)$$

여기서 T(R)은 Rankine 온도이다.

그리고 응력은 다음과 같은 평균경 후프응력 계산식 (mean-diameter hoop-stress formula)을 사용하여 구하였다.

$$\sigma_H = \frac{p_i(r_o + r_i)}{2(r_o - r_i)} \quad (19)$$

여기서 p_i 는 보일러관 내부의 증기압력이고, r_i 및 r_o 는 관의 내부반경과 외부반경이다.

보일러관의 크리프 파단수명을 내부 압력변화에 따라 산출하고 Fig. 5에 심볼있는 실선으로 표시하였다. Fig. 5를 보면 Larson-Miller parameter 법을 이용한 수명예측값이 공동의 성장을 이용한 예측값보다 작은 것을 알 수 있다. 즉, 공동의 연속 생성과 성장, 재료손상 매개변수 ρ 및 입계 미끄럼을 고려한 수명예측법이 현재 보일러관의 수명예측에 널리 사용되고 있는 Larson-Miller parameter법보다 긴 파단수명을 예측하고 있다. 이들 결과는 실제 수명보다 매우 보수적인 결과를 예측하는 Larson-Miller parameter법을 대체할 수 있는 가능성을 보여 주고 있다.

한편 Larson-Miller parameter를 이용한 보일러관의 크리프 수명예측에 부식이 미치는 영향을 분석하기 위하여 보일러관의 파단수명을 내부 압력변화에 따라 산출하면 Fig. 5에서의 심볼있는 짧은 점선과 같다. 이때 내부부식을 및 외부부식을은 앞에서와 같이 산출하였다. 이를 보면 보일러관의 파단수명에 부식이 미치는 영향은 공동의 성장을 이용한 예측법과 같이 운전압력이 감소할수록 증가하고 있다.

보일러관의 파단수명에 부식이 미치는 영향을 운전온도 변화에 따라 분석하면 Fig. 7과 같다. 이를보면 운전온도가 감소할수록 부식의 영향이 증가하여 수명 감소에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 304 스테인레스강의 실험결과⁽⁵⁾와 잘 일치하고 있다. 그러나 Fig. 7을 보면 304 스테인레스강에서의 경향은 뒀⁽⁵⁾ 등이 주장한 낮은 온도에서의 국부적인 고온부식이나 응력 부식균열 현상이 증가된 원인이외에도 온도가 낮을수록 크리프 현상이 감소하므로 부식의 영향이 상대적으로 증가하여 발생할 수도 있다는 것을 보여주고 있다.

3.2 부식의 영향을 고려한 2¼Cr-1Mo 보일러관의 크리프 파단변형률 예측

앞에서 사용한 Larson Miller parameter 법은 보일러관의 파단변형률을 예측할 수 없다. 따라서

보일러관의 파단변형률은 공동의 생성 및 성장을 고려하여 다음과 같이 산출하였다.

2¼Cr-1Mo 강의 보일러관에서 파단변형률은 식 (13)으로부터 각 순간에서의 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 를 구한 후, 이를 식 (20)과 같이 파단수명 t_f 까지 적분하여 산출하였다.

$$\epsilon = \epsilon_o + \int_{t_o}^{t_f} \dot{\epsilon} dt \quad (20)$$

보일러 관의 여러 내부압력 조건에서 예측된 파단변형률은 Fig. 8의 실선과 같다. Fig. 8을 보면 운전압력이 감소할수록 파단변형률이 감소하고 있어 실제 기기에서 발생하는 경향과 같은 것을 알 수 있다.

한편 2¼Cr-1Mo 강 보일러관의 파단변형률에 부식이 미치는 영향은 식 (14)와 (15)에 의한 관 두께 감소에 따른 응력 증가를 고려하여 식 (13)으로부터 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 를 구한 후, 이를 식 (20)과 같이 적분하여 산출하면 Fig. 8의 짧은 점선과 같다. Fig. 8을 보면 부식을 고려하지 않았을 때와 같은 경향을 보이고 있으나 전반적으로 파단변형률은 작아지는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 8은 부식 분위기에서는 크리프 파단변형률이 감소할 수 있다는 것을 예측하고 있는데 실제 설비에서도 같은 경향을 보이고 있다.

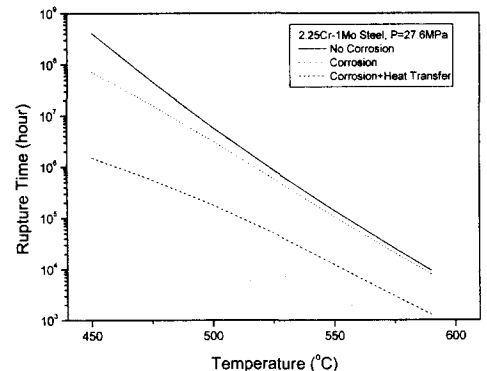


Fig. 7 Effect of corrosion on the creep rupture time under varying temperature in 2¼Cr-1Mo boiler tube. Creep rupture time predicted by Larson-Miller parameter.

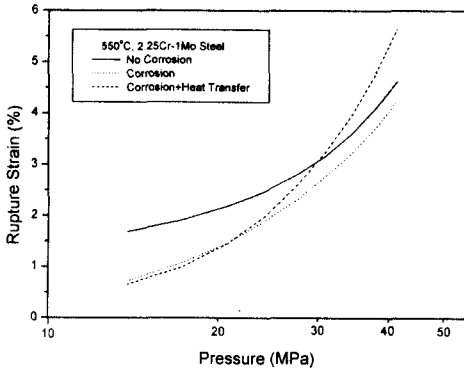


Fig. 8 Variations of the creep rupture strain with operating pressure in 2¼Cr-1Mo boiler tube at 550°C

4. 산화막 성장에 따른 열전달 변화를 고려한 2¼Cr-1Mo 보일러관의 파단수명 및 파단변형을 예측

보일러관의 내외부에서 부식이 발생할 때 산화막은 열전달을 방해하여 관벽의 온도를 변화시킨다. 이러한 온도변화는 보일러관의 수명에 커다란 영향을 줄 수 있다. 이에 이들에 대하여 분석하면 다음과 같다.

일반적으로 보일러관의 내외부에서 부식이 발생할 때 관벽의 온도 분포 변화를 보면 Fig. 9와 같다.

여기서 T_G : 연소가스의 온도
 T_{GFO} : 연소가스와 화염측 산화막과의

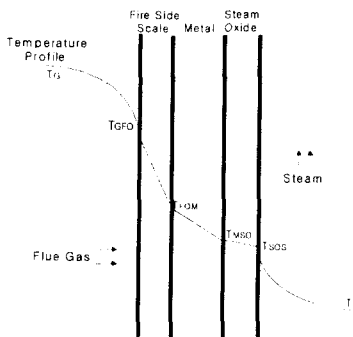


Fig. 9 Schematic of a boiler tube with its associated steamside and fireside oxide

경계선 온도

T_{FOM} : 화염측 산화막과 보일러 관벽과의 경계선 온도

T_{MSO} : 보일러 관벽과 증기측 산화막과의 경계선 온도

T_{SOS} : 증기측 산화막과 증기와의 경계선 온도

T_S : 보일러관 내부의 증기 온도

h_G : 연소가스의 열전달계수 (heat transfer coefficient)

k_{FO} : 화염측 산화막의 열전도계수(thermal conductivity)

k_M : 보일러관의 열전도계수

k_{SO} : 증기측 산화막의 열전도계수

h_S : 증기의 열전달계수

Fig. 9를 보면 관벽의 온도는 관의 내외부에서 발생하는 산화 스케일과 연소가스 온도 및 내부 증기온도와 함수관계인 것을 알 수 있다. 따라서 관벽의 온도를 다음과 같이 구하였다.

일반적으로 기체에서의 열전달은 다음과 같다.

$$q' = h \Delta T \tag{21}$$

여기서 q' 는 총열량이고 h 는 기체의 열전달 계수로 연소가스의 경우 h_G , 증기의 경우 h_S 이다. 그리고 ΔT 는 열전달을 발생시키는 온도 기울기이다.

한편 연소가스측 산화막, 보일러관 벽과 증기측 산화막과 같은 고체에서의 열전달은 다음과 같다.⁽²¹⁾

$$q' = -k \frac{dT}{dX} \tag{22}$$

여기서 k 는 고체의 열전도계수로 화염측 산화막은 k_{FO} , 보일러관은 k_M , 증기측 산화막은 k_{SO} 이다. dT 는 열전달을 발생시키는 온도 기울기, dX 는 고체의 두께로 여기서는 연소가스측 산화막 및 보일러관 벽과 증기측 산화막 두께이다. 그리고 일반적인 설계조건의 경우, 재열기(reheater)의 열유속(heat flux)은 다음과 같다.⁽²¹⁾

$$q' = 12.4 \text{ BTU/hr} \cdot \text{cm}^2 \tag{23}$$

따라서 식 (21), (22) 및 (23)과 Table 4와 같은 연소가스, 증기, 산화막과 금속의 열전달 및 열전도 계수⁽²²⁾를 이용하여 관벽온도를 구한 후, 식 (14) 및 (15)로부터 온도에 따른 부식률을 산출하였다. 이들 부식률을 가지고 보일러관의 크리프 파단수명을 공동의 생성과 성장을 고려하여 산출하면 Fig. 5의 긴 점선과 같고 Larson Miller Parameter를 이용하여 산출하면 Fig. 5의 심볼있는 긴 점선과 같다.

그리고 이때 보일러 관벽온도와 내부 증기온도와의 차이(ΔT)를 운전 압력 변화에 따라 산출하면 Fig. 10(a)와 같고 운전 온도에 따라서는 Fig. 10(b)와 같다.

Fig. 10을 보면 운전압력이 낮을수록 또는 운전 온도가 높을수록 산화 스케일에 의한 관벽 온도의 증가량이 커지는 것을 알 수 있고, Fig. 5를 보면 이들 관벽온도 증가가 보일러관의 수명을 현저히 감소시키는 것을 알 수 있다. 이들 관벽온도 증가는 내부 산화스케일의 성장이 열전달을 방해하여 내부 증기까지 열이 전달되지 않아 발생하고 있다. Fig. 10에서 관벽 온도가 운전 조건에 따라 10~50°C 정도 상승할 수 있다는 것은 독일의 보일러 설계 규격⁽²⁾에서는 관벽온도를 내부 증기온도보다 최대 50°C 정도 높게 예측하고 있는 것에 대한 정량적인 분석이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

2¼Cr-1Mo 강 보일러관의 파단변형률에 부식 및 열전달 변화가 미치는 영향을 보일러관의 여러 내부압력 조건에서 예측하면 Fig. 8의 긴 점선과 같다. Fig. 8을 보면 보일러관의 파단변형률에 부식 및 열전달이 미치는 영향은 운전압력이 낮아질수록 증가하여 파단변형률을 대폭 감소시키는 것을 알 수 있다. 그런데 Fig. 8을 보면

Table 4 Heat transfer coefficient and thermal conductivity of gas steam, oxide and metal

$h_G=0.017 \text{ Btu/hr-cm}^2-\text{ }^\circ\text{F}$
$h_S=0.267 \text{ Btu/hr-cm}^2-\text{ }^\circ\text{F}$
$k_{FO}=0.011 \text{ Btu/hr-cm-cm}^\circ\text{F}$
$k_M=0.607 \text{ Btu/hr-cm-cm}^\circ\text{F}$
$k_{SO}=0.011 \text{ Btu/hr-cm-cm}^\circ\text{F}$

높은 운전압력에서는 열전달을 고려할 경우 파단변형률이 오히려 약간 증가되는 경향을 보이고 있다. 이는 높은 압력에서는 부식에 의한 영향이 감소하면서 열전달에 의한 관벽온도 증가가 큰 영향을 미쳐 파단변형률을 증가시킨 결과로 분석된다. 이들 결과는 보일러관의 운전압력이 25~40 MPa인 것을 고려하면 고온에서 외경 팽창량이 2~5% 일 때 전 수명이 소비된 것으로 보는 경험적 방법^(3,4)이 이론적으로도 규명이 가능한 것을 보여 주고 있다.

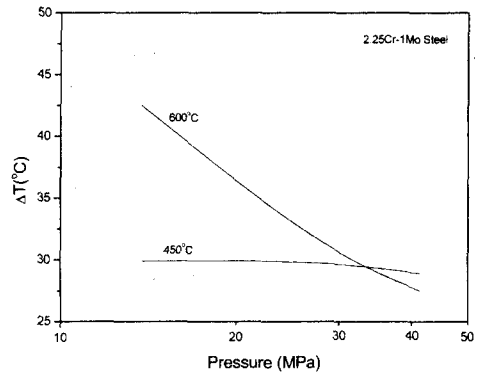


Fig. 10(a) Variations of boiler tube wall temperature increment(ΔT) with operating pressure. Boiler tube life predicted by Larson-Miller parameter

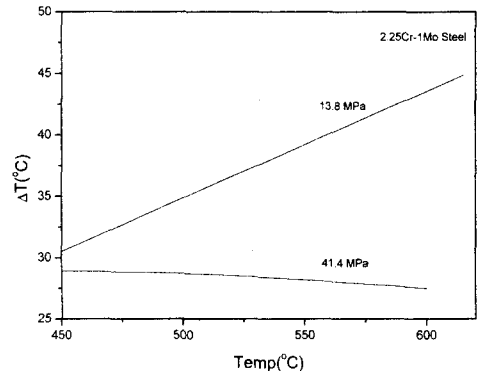


Fig. 10(b) Variations of boiler tube wall temperature increment(ΔT) with operating temperature. Boiler tube life predicted by Larson-Miller parameter

5. 결 론

보일러관의 운전시 내외부에서 발생하는 산화 스케일이 보일러 관벽 온도의 변화와 크리프 파단수명에 미치는 영향을 분석하고, 보일러관의 파단변형률을 예측하고자 2¼Cr-1Mo 강을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 실시한 결과는 다음과 같다.

(1) 보일러관의 파단수명에 부식이 미치는 영향은 관의 운전압력과 운전온도가 감소할수록 증가하고 있다. 이러한 경향은 산화 스케일의 성장에 따른 온도 변화를 고려시 더욱 증가되는 경향을 보이고 있다. 한편 공동의 생성과 성장을 이용한 보일러관의 수명예측법이 현재 발전설비 수명평가에 널리 사용되고 있는 Larson-Miller parameter법보다 긴 수명을 예측하고 있다. 이는 실제 기기에서 너무 보수적인 결과를 예측하는 Larson-Miller parameter법을 대체할 수 있는 가능성을 보여 주고 있다.

(2) 보일러관등은 외부에 고온의 화염이 접촉하므로 관벽의 온도가 내부 증기온도보다 매우 높아진다. 본 연구결과는 관벽 온도가 운전 압력이나 온도조건에 따라 10~50°C 정도 상승할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 이는 독일의 보일러 설계 규격에서 관벽온도를 내부 증기온도보다 최대 50°C 정도 높게 예측하고 있는 것에 대한 정량적인 분석이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

(3) 보일러관의 내부압력이 감소할수록 보일러관의 파단변형률은 감소하는데, 부식 및 열전달을 고려할 경우 이러한 경향은 더욱 증가되고 있다. 이들 결과는 고온에서 외경 팽창량이 2~5%일 때 진 수명이 소비된 것으로 보는 경험적 방법에 대한 이론적 규명이 가능한 것을 보여 주고 있다.

참고문헌

(1) 홍성호, 1995, "재료손상과 입계 미끄러움을 고려한 증기배관의 크리프 파단수명 및 변형률 예측," 대한기계학회논문집, 제19권, 제5호, pp. 1182~1189.
 (2) Calculation of boiler strength, TRD 300 Design, pp. 1~5.
 (3) 김재철, 김의현, 1986, "보일러 튜브 수명관

리 연구," 한국전력공사 연구 보고서, KRC-84G-S05, pp. 41~43.
 (4) 문경태, 1994, "가열로 튜브의 수명예측 기법," 대한기계학회 1994년도 Workshop, "석유 화학설비의 안전성 확보대책," pp. 53~58.
 (5) 오세욱, 박인석, 강상훈, 1989, "보일러 관재료의 크리프 파단특성에 미치는 고온부식의 영향," 대한기계학회논문집 제13권 제2호, pp. 236~242.
 (6) Dyson, B.F., 1976, "Constraints on Diffusional Cavity Growth Rates," *Metal Science*, Vol. 10, pp. 349~353.
 (7) Riedel, H., 1987, *Fracture at High Temperatures*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 8~11.
 (8) Larson, F.R. and Miller, J., 1952, "Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses," *Trans. ASME*, Vol. 74, pp. 765~775.
 (9) Zarrabi, K., 1994, "A Comparison of Several Boiler Tube Life Prediction Methods," *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 58, pp. 197~201.
 (10) HK&S Inc., 1998, *ABAQUS User's Manual, Version 5.8*.
 (11) Roberts, D.I., Saxena, A. Han, J. and Banerji, K., 1988, "Creep Crack Growth in Boiler and Steam Pipe Steels," EPRI Report CS-5585, pp. 3~4.
 (12) Riedel, H., 1987, *Fracture at High Temperatures*, Springer-Verlag, Berlin, Hidelberg, pp. 389~390.
 (13) Nix, W.D., 1988, "Mechanisms and Controlling Factors in Creep Fracture," *Materials Science and Engineering*, Vol. A103, pp. 103~110.
 (14) Fields, R.J., Weerasooriya, T., and Ashby, M.F., 1980, "Fracture-Mechanisms in Pure Iron, Two Austenitic Steels, and One Ferritic Steel," *Metall. Trans. A*, Vol. 11, pp. 333~347.
 (15) Riedel, H., 1987, *Fracture at High Temperature*, B.Ilschner(Ed.),Springer-Verlag, Berlin, pp. 62~66.

- (16) Riedel, H., 1985, "Continuous Nucleation of Grain Boundary Cavity in Creep Rupture," *Z. Metallkde*, Vol. 76, pp. 669~675.
- (17) Riedel, H., 1989, "Life Prediction Method for Constrained Grain Boundary Cavitation," *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 39, pp. 119~134.
- (18) Viswanathan, R., Foulds, J.R. and Roberts, D. I., 1987, "Methods for Estimating the Temperature of Reheater and Superheater Tubes in Fossil Boilers," *Conference Proceedings "Boiler Tube Failures in Fossil Power Plants,"* EPRI, pp. 3-35~3-53.
- (19) N.Bhamidipati, V., McIlvaine, H. and Boylan, R.J., 1987, "Superheater and Reheater High Temperature Coal-ash Corrosion at B.L. England Generating station," *Conference Proceedings "Boiler Tube Failures in Fossil Power Plants,"* EPRI, pp. 2-199~2-215.
- (20) Viswanathan, R., Paterson, S.R., Grunloh, H. and Gehl, S., 1994, "Life Assessment of Superheater/Reheater Tubes in Fossil Boilers," *Transactions of the ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 116, pp. 1~16.
- (21) Clark, K.J., Paterson, S.R. and WRettig, T., 1988, "Remaining Life Assessment of Superheater and Reheater Tubes," *EPRI Report CS-5564*, pp. 7-1~7-24.
- (22) ASME Boiler and Pressure Vessel Code: Sec. II, 1992, *Materials part D-properties*, p. 651.