

〈論 文〉

재료손상과 입계 미끄럼을 고려한 증기배관의 크리프 파단수명 및 변형률 예측

홍 성 호*

(1994년 7월 28일 접수)

Prediction of Creep Rupture Time and Strain of Steam Pipe Accounting for Material Damage and Grain Boundary Sliding

Sung-Ho Hong

Key Words : Life Prediction(수명예측), Rupture Time(파단수명), Rupture Strain(파단변형률), Continuous Cavity Nucleation(연속공동생성), Grain Boundary Sliding(입계미끄럼), Material Damage(재료손상)

Abstract

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

1. 서 론

발전설비의 보일러 튜브, 헤더, 과열기, 재열기 및 주증기관 등과 같이 고온고압이 작용하는 설비에 대한 정확한 수명예측은 기기 설계시나 운영 및 보수시 매우 중요하다.

현재 배관의 수명예측을 위해서는 Larson-Miller Parameter⁽¹⁾ 또는 Minimum-Commitment Method⁽²⁾ 등과 같은 매개변수를 이용하여 수명을 예측하고 있다. 그러나 이 방법에 의한 결과는 너무 보수적

이며 다음과 같은 문제점들이 있다. 첫째가 일반적으로 실험은 일축인장(uniaxial tension) 조건의 높은 하중하에 실시되나 실제 운전중인 배관에서는 다축응력(multiaxial stress)과 비교적 낮은 응력이 작용하는 점이다. 따라서 현재 높은 응력조건에서의 실험결과를 이용하여 고온수명을 예측하는 매개변수를 발전설비 배관과 같이 낮은 응력에서 운전되는 기기에 사용할 경우에는 많은 문제점이 발생되고 있다.⁽³⁾ 둘째가 보통 보일러 튜브나 배관은 상온에서의 연신율이 14~30% 정도가 되는데도 불구하고 고온에서는 외경 팽창량이 2~5%일 때 전 수명이 소비된 것으로 판단하여 교체하고 있다.^(4,5) 그러나 이들은 경험상의 수치값으로 이론적으로는

*정회원, 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소

해석이 되지 않고 있다.

이러한 현상은 낮은 응력으로 갈수록 설비의 파괴현상이 전위(dislocation)의 이동보다는 입계(grain boundary)에서의 공동성장(cavity growth)에 의하여 발생하기 때문으로 알려지고 있다.⁽⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 비록 아직 실험실에서의 연구 단계이지만 수명예측 매개변수법보다는 비교적 정확한 방법인 연속공동생성(continuous cavity nucleation) 및 성장을 고려한 크리프 수명예측법^(7,8)을 배관의 수명예측에 도입하였다. 그런데 이들도 매개변수법보다는 정확하지만 낮은 응력으로 갈수록 크리프 파단수명의 예측값이 실험값보다 커지는 경향이 있다. 이러한 경향은 낮은 응력으로 갈수록 입계에서 공동 성장에 따른 내부의 재료손상과 공동 생성에 입계 미끄럼(grain boundary sliding)의 영향이 증가되어 크리프 파단수명의 실험값이 감소된 결과로 보여진다. 그러므로 본 연구에서는 발전설비의 주요 배관재료인 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강에 대하여 기존의 연속공동생성과 성장모델⁽⁷⁾에 재료손상 매개변수^(9,10)와 입계 미끄럼의 영향을 고려한 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하여 크리프 파단수명과 변형률을 예측한 후 기존의 실험결과⁽¹¹⁾와 비교하였다. 그리고 이들 결과를 이용하여 배관의 크리프 파단수명 및 변형률을 예측하였다.

한편 발전설비의 배관이나 튜브의 경우 용접열영향부에서 주로 파괴가 일어나는 것으로 알려져 있다. 그런데 용접열영향부의 가장 큰 특징은 결정립 조대화현상이다. 따라서 이들 현상이 크리프 파단수명과 변형률에 미치는 영향도 연구하였다.

2. 재료손상 매개변수의 종류

2.1 'A' 매개변수

Kachanov와 Rabotnov⁽¹²⁾는 재료가 크리프손상을 받을 때 내부에서의 손상정도를 나타내는 매개변수로 ω 를 정의하고, 손상속도 $\dot{\omega}$ 는 응력(σ)과 다음과 같은 관계가 있다고 하였다.

$$\dot{\omega} = \frac{D\sigma^x}{(1+\phi)(1-\omega)^\phi} \quad (1)$$

여기서, D , x 및 ϕ 는 재료상수 값이다. 식(1)은 재료가 손상됨에 따라 하중을 지지하는 내부 단면적의 감소를 고려한 수식이다.

식(1)과 공동의 구속성장(constrained growth) 모

델식⁽⁷⁾으로부터 Cane은 공동이 발생된 입계의 분률(number fraction of grain boundaries containing cavities), A 값으로부터 잔존수명을 예측하는 아래와 같은 A 매개변수⁽⁹⁾를 제안하였다.

$$A = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_f}\right)^{\frac{1-n}{n}} \quad (2)$$

여기서, t 는 가동시간, t_f 는 크리프 파단시간, n 는 재료가 멱급수 크리프거동(power law creep)을 할 때 변형률속도, $\dot{\epsilon}$ 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^n \quad (3)$$

그리고 λ 는 파단변형률(rupture strain: ϵ_f), 제1기 크리프변형률(primary creep strain: ϵ_p) 및 제2기 크리프변형률(secondary creep strain: ϵ_s)과의 함수로 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{\epsilon_f - \epsilon_p}{\epsilon_s} \quad (4)$$

그리고 A 매개변수를 이용한 재료손상을 고려할 때 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 는 다음과 같이 된다.⁽¹⁰⁾

$$\dot{\epsilon} = \frac{B\sigma^n}{(1-A)^n} \quad (5)$$

2.2 ρ 매개변수

A 매개변수는 입계에서의 공동 밀집도에 따라 오차가 발생한다. 이 점을 보완하기 위하여 다음과 같은 ρ 매개변수가 제안되었다.⁽¹⁰⁾ 크리프 수명소 비율(t/t_f)과 ρ 매개변수와의 관계는 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{t}{t_f} = \lambda\rho^{\lambda-1} - (\lambda-1)\rho^\lambda \quad (6)$$

그리고 ρ 매개변수를 이용한 재료손상을 고려할 경우, 변형률속도 $\dot{\epsilon}$ 는 다음과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\dot{\epsilon} = \frac{B\sigma^n}{1-\rho} \quad (7)$$

3. 일축 인장응력하에서 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강의 크리프 파단수명 및 변형률 예측

3.1 일축 인장응력하에서 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강의 크리프 파단수명 예측

일축 인장응력하에서 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강의 크리프 파단수명을 예측하기 위하여 먼저 Fig. 1과 같이 재

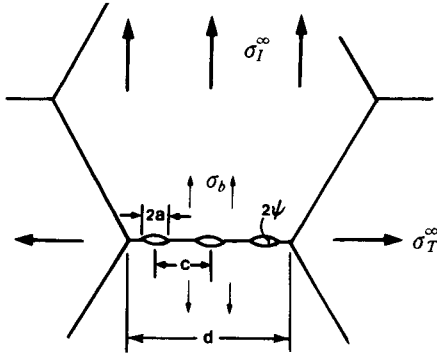


Fig. 1 Cavitating grain boundary facet

료의 입계에서 공동이 생성되어 성장될 때 시간 t 에서 공동의 크기를 구하면 다음과 같다.

$$a = a_0 + \int_{t_0}^t \dot{a} dt \quad (8)$$

여기서, a_0 는 공동의 초기 반경, t_0 는 공동의 생성 시간, \dot{a} 는 공동의 성장속도이다.

공동의 생성은 외부에서의 부과응력이 공동의 핵생성능력, σ_n 을 초과할 때 순간적으로 발생한다고 보았다. 따라서 본 연구에서 공동의 생성 시간, t_0 는 0으로 계산하였다. 그리고 공동의 초기반경 a_0 는 다음과 같이 구하였다.

$$a_0 = \frac{2\gamma_s}{\sigma_n} \quad (9)$$

공동의 핵생성능력은 재료의 탄성계수, E 의 1/100 정도이고⁽¹³⁾ 550°C에서 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강의 탄성계수는 157 GN/m²이므로⁽⁶⁾ a_0 는 약 3×10^{-9} m이다.

그리고 공동의 성장속도 \dot{a} 는 Fig. 1과 같은 외부 응력장하에서 공동이 구속성장될 때 다음과 같다.⁽⁷⁾

$$\dot{a} = \frac{\sigma_I - (1-\omega)\sigma_e}{h(\phi)a^2[q(\omega)kT/(2\Omega D_b \delta_b) + q'\sigma_e/(\dot{\epsilon} \epsilon c^2 d)]} \quad (10)$$

여기서, σ_I 는 외부에서 부과된 주응력, σ_e 는 von Mises 상당응력(equivalent stress), σ_n 은 공동의 sintering응력, Ω 는 원자의 부피(atomic volume), $D_b \delta_b$ 는 입계에서의 확산속도(grain boundary diffusivity), δ_b 는 입계의 두께, k 는 Boltzmann 상수, T 는 절대온도, c 는 공동간의 간격, d 는 결정립계의 크기이다. von Mises 상당응력 σ_e 는 일축 인장응력 조건에서는 주응력 σ_I 과 동가이다. 그리고 $\dot{\epsilon}$ 는 등가 변형률속도(equivalent strain rate)로

σ_e 및 재료지수 n 과 식(3)과 같은 멱급수 크리프 관계가 있다. 한편 ϕ 는 Fig. 1과 같이 공동 끝단에서의 각도로 표현 자유에너지(surface free energy, γ_s) 및 결정립계 자유에너지(grain boundary free energy, γ_b)와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\cos \phi = \frac{\gamma_b}{2\gamma_s} \quad (11)$$

그리고 ω 는 입계에서 공동성장으로 인한 재료손상량으로 다음과 같이 공동반경 a 와 공동간의 간격 c 의 함수이다.

$$\omega = \left(\frac{2a}{c}\right)^2 \quad (12)$$

그리고

$$q' = \pi^2(1+3/n)^{1/2} \quad (13)$$

$$q(\omega) = -2 \ln \omega - (3-\omega)(1-\omega) \quad (14)$$

$$h(\phi) = \frac{1}{\sin \phi} \left(\frac{1}{1+\cos \phi} - \frac{\cos \phi}{2} \right) \quad (15)$$

이다.

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.⁽¹⁴⁾

$$N = \alpha \epsilon = \alpha \dot{\epsilon} t = 1/c^2 \quad (16)$$

여기서, α 는 공동의 생성계수로 페라이트계 강의 경우 $4 \times 10^{10} \sim 10^{12}/\text{m}^2$ 의 범위에 있다.⁽¹⁵⁾

재료의 손상을 고려하지 않고 공동의 연속 생성에만 고려할 경우, 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강의 크리프 파단수명은 식(3)의 변형률속도를 식(16)에 적용하여 공동간의 간격을 구한 후 Table 1의 재료상수값^(16,17)과

Table 1 Material parameters of 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel at 550°C

n	7.79
B	$1.093 \times 10^{-25} \text{ MPa}^{-n} \text{ sec}^{-1}$
$D_b \delta_b$	$1.1 \times 10^{-12} \exp\left(-\frac{1.74 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}}{1.38 \times 10^{-23} \text{ J}^\circ \text{K} \cdot \text{mole} \cdot \text{T}}\right) \text{ m}^3/\text{sec}$
γ_s	2.1 J/m ²
γ_b	0.85 J/m ²
Ω	$1.18 \times 10^{-29} \text{ m}^3$

식(10)으로부터 공동의 성장속도를 구하여 식(8)과 같이 수치해석적인 방법으로 산출하였다. 이때 크리프 파단수명 t_f 는 공동의 크기 a 가 공동간의 간격 c 와 같아질 때의 시간으로 보았다.

예측된 파단수명과 Needham에 의해 발표된 실험결과⁽¹¹⁾와 비교하면 Fig. 2와 같다. 그런데 Fig. 2를 보면 낮은 응력으로 갈수록 크리프 파단수명의 예측값이 실험값보다 커지는 것을 알 수 있다.

이러한 경향은 낮은 응력으로 갈수록 입계에서의 공동성장에 따라 재료손상의 영향이 증가된 결과로 보여진다. 따라서 낮은 응력에서 실험값과 예측값과의 차이점을 줄이고자 재료손상 매개변수 A 및 ρ 를 적용, 크리프 변형률속도를 수정한 후 크리프 파단수명을 산출하였다. A 매개변수를 적용할 경우 식(5)를 사용하였고 ρ 매개변수의 경우는 식(7)을 사용하였다. 이들 결과를 도시한 Fig. 2를 보면 재료의 손상을 고려한 경우가 고려하지 않을 경우보다는 실험치에 근접하는 것을 알 수 있다. 그러나 이 결과도 낮은 응력에서 크리프 파단수명의 예측값이 실험값보다 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 재료손상을 고려하더라도 낮은 응력에서는 다소 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

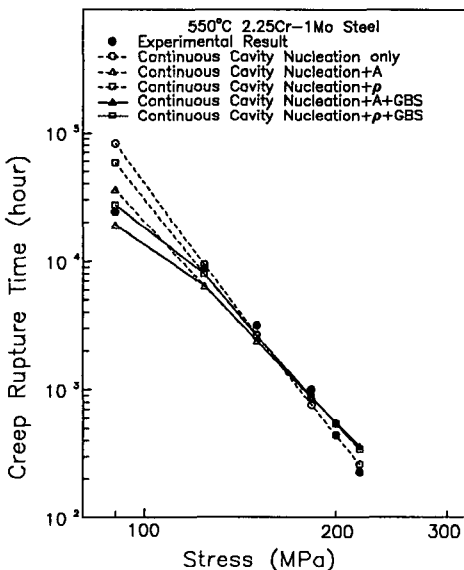


Fig. 2 Experimental and theoretical creep rupture time vs. stress for a $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel at 550°C. Theoretical curve predicted accounting for continuous cavity nucleation, the 'A' parameter, ρ parameter and grain boundary sliding

이러한 경향은 낮은 응력에서 크리프수명을 감소시키는 손상기구가 작용한 결과로 보여진다. 이들 손상기구를 규명하기 위해 여러 실험결과를 분석한 결과, 특정 응력이하에서는 전체 변형률에서 입계 미끄럼에 의한 변형률의 비율이 급격히 증가되는 것을 알 수 있었다.⁽¹⁸⁾

$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강의 경우, 550°C에서 입계 미끄럼의 영향이 증가하는 응력은 Ashby의 파괴기구도⁽⁶⁾로부터 구할 수 있는데 약 100 MPa 이하로 분석된다. 이때 입계 미끄럼에 의한 변형률의 크기는 다음과 같다.⁽¹⁹⁾

$$\dot{\epsilon} = B(f\sigma)^n \quad (17)$$

여기서, f 는 재료지수 n 과 다음과 같은 관계가 있다.

$$f = [1 + (\pi/8)(n/3)^{1/2}]^{1/n} \quad (18)$$

따라서 변형률속도를 식(17)과 같이 수정하여 식(16)으로부터 공동간의 간격을 구한 후, A 및 ρ 매개변수를 적용하여 크리프 파단수명을 산출하였다. 이들 결과를 Fig. 2에 도시하였는데 이를 보면 입계 미끄럼을 고려한 경우, 모든 응력조건에서 실험치와 예측치가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 특히 A 매개변수보다는 ρ 매개변수가 실험치에 더 근접하는 것을 알 수 있다. 그러므로 발전설비와 같이 낮은 응력조건에서 작동하는 기기의 크리프 파단수명 산출에는 입계 미끄럼의 영향이 매우 중요한 것을 알 수 있다.

3.2 일축 인장응력하에서 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강의 파단 변형률 예측

지금까지 크리프 파단변형률에 대한 이론적 예측은 거의 연구되지 않았다. 그런데 발전설비나 화학설비에서의 배관 등의 보수 유지를 위해서는 배관의 외경 팽창률 등이 매우 중요한 요소가 된다.

따라서 본 연구에서는 크리프 파단변형률을 다음과 같이 각 순간마다의 크리프 변형률을 구한 후 이를 파단수명 t_f 까지 적분하여 산출하였다.

$$\epsilon = \epsilon_o + \int_{t_o}^{t_f} \dot{\epsilon} dt \quad (19)$$

여러 응력조건에서 예측된 파단변형률과 Needham에 의해 발표된 실험결과⁽¹¹⁾와 비교하면 Fig. 3과 같다.

Fig. 3을 보면 응력이 감소할수록 크리프 파단변

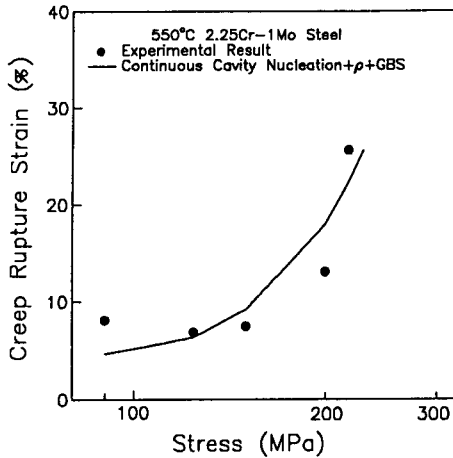


Fig. 3 Effect of stress on the creep rupture strain in $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel pipe at 550°C

형률이 감소하는데 예측값과 실험값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 크리프 파단변형률은 이론적으로도 상당히 정확한 예측이 가능한 것을 알 수 있다. 그리고 발전설비와 같이 비교적 낮은 응력에서 가동되는 설비는 외형적으로는 적은 변형이 발생하여도 파괴될 수 있다는 것을 보여준다.

3.3 크리프 수명소비율과 크리프 손상률과의 관계에 재료손상 매개변수가 미치는 영향

크리프 수명 소비율(t/t_f)과 크리프 손상률과의 관계는 많은 연구 대상이 되고 있다. 이에 550°C, $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강 of 크리프 수명소비율(t/t_f)과 크리프 손상률과의 관계에 A 매개변수 및 입계 미끄럼을 고려한 ρ 매개변수가 미치는 영향을 비교하면 Fig. 4와 같다. A 매개변수값과 입계 미끄럼을 고려한 ρ 매개변수값은 파단수명 산출시 응력이 90 MPa 일 때 계산된 수치해석 결과이다.

그리고 이들 결과를 최근에 제안된 CAF 매개변수⁽²⁰⁾와도 비교하여 보았다. 발전설비 재료와 같이 재료상수값 ϕ 가 큰 경우, CAF 매개변수는 다음과 같다.

$$CAF = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_f}\right)^{\frac{1}{1+\phi}} \quad (20)$$

$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강 of 재료상수값 $\phi = 5.5^{(21)}$ 를 사용하여 CAF 값을 구하여 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 수명소비율을 동일하게 놓을때 CAF 값과 입계 미끄럼을 고려한 ρ 매개변수값이 매우

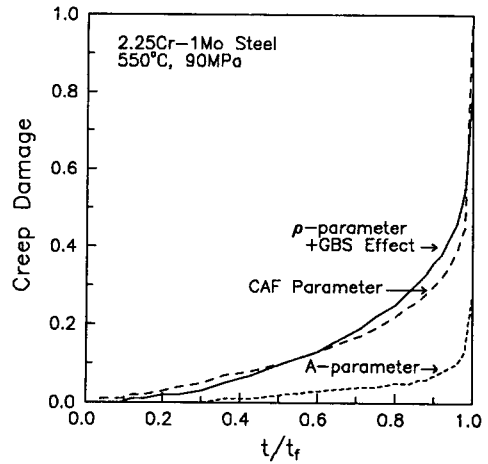


Fig. 4 Effect of 'A' parameter, CAF parameter, ρ parameter and grain boundary sliding on the t/t_f (expend creep life fraction) vs. the predicted creep damage

유사하고 A 매개변수값은 매우 작은 것을 알 수 있다. 그런데 ρ 매개변수는 A 매개변수와 다음과 같은 관계가 있다.⁽¹⁰⁾

$$\rho = \frac{0.6(n+1)}{(1+3/n)^{1/2}} A \quad (21)$$

따라서 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강 of 재료상수값 $n = 7.79^{(16)}$ 를 대입하면 ρ 는 A 의 4.48배가 되는데 이는 Fig. 4에서의 경향과 일치하는 것을 알 수 있다.

4. $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강 of 증기배관에 대한 파단수명과 변형률 예측

4.1 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강 of 증기배관에 대한 파단수명 예측

외경이 38.1 mm, 두께가 6.35 mm이고 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강으로 제작된 과열기 증기배관에 대한 크리프 파단수명은 앞에서와 같이 식(10)에 Table 1의 재료상수 값을 대입하여 공동의 성장속도를 구한 후 식(8)과 같이 수치해석적인 방법을 사용하여 구하였다. 그러나 배관에서는 다축응력이 작용하므로 식(10)에서의 von Mises 상당응력, σ_e 는 다음과 같이 구하였다.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_H - \sigma_{ax})^2 + (\sigma_{ax} - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_H)^2]^{1/2} \quad (22)$$

여기서, σ_H 는 후프응력, σ_{ax} 는 축응력, σ_r 는 반지름방향응력으로 내부반경 및 외부반경이 각각 r_i , r_o 이고, 내부압력이 p_i 인 배관에서 크리프현상이 발생할 때는 다음과 같다.⁽²²⁾

$$\sigma_H = p_i \left[\left(\frac{2-n}{n} \right) \left(\frac{r_o}{r} \right)^{2/n} + 1 \right] / \left[\left(\frac{r_o}{r_i} \right)^{2/n} - 1 \right] \quad (23)$$

$$\sigma_{ax} = p_i \left[\left(\frac{1-n}{n} \right) \left(\frac{r_o}{r} \right)^{2/n} + 1 \right] / \left[\left(\frac{r_o}{r_i} \right)^{2/n} - 1 \right] \quad (24)$$

$$\sigma_r = -p_i \left[\left(\frac{r_o}{r} \right)^{2/n} - 1 \right] / \left[\left(\frac{r_o}{r_i} \right)^{2/n} - 1 \right] \quad (25)$$

이와 같은 방법으로 예측된 내부압력 변화에 따른 크리프 파단수명의 변화는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5를 보면 압력이 낮아질수록 크리프 파단수명이 증가함을 알 수 있다. 그런데 이들 결과와 비교하기에 적합한 실험결과를 얻을 수가 없었다. 따라서 이들을 배관의 수명예측에 자주 사용되는 다음과 같은 Larson-Miller parameter(LMP)⁽¹¹⁾를 이용하여 예측된 크리프 파단수명과 비교하였다.

$$LMP(\sigma) = T(20 + \log t_r) \times 10^{-3} \quad (26)$$

여기서, $LMP(\sigma)$ 는 Larson-Miller parameter, t_r 는 크리프 파단수명(hour)이고 T 는 온도이다. 그리고 응력은 다음과 같은 평균경 후프응력 계산식(mean-diameter hoop-stress formula)을 사용하여 구하였다.

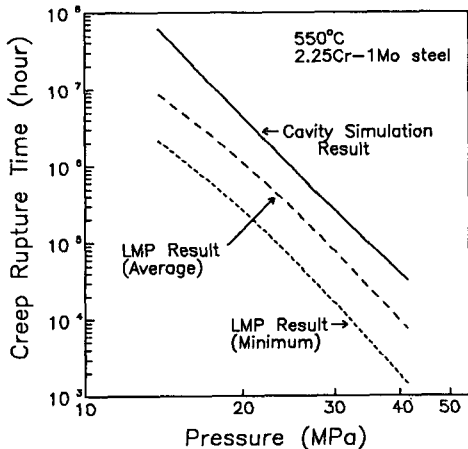


Fig. 5 Comparison of predicted creep rupture time between cavity growth simulation and Larson-Miller Parameter(LMP) method in $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel pipe at 550°C

$$\sigma_H = \frac{p_i}{2} \frac{r_o + r_i}{r_o - r_i} \quad (27)$$

Fig. 5를 보면 재료손상과 입계 미끄럼을 고려하여 예측된 파단수명이 LMP를 이용한 것보다 긴 수명을 예측하는 것을 알 수 있다. 만일 LMP의 최저값이 아닌 평균값을 사용하더라도 수치해석 방법에 의한 파단수명보다 길어지지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구에 사용한 수치해석 방법이 LMP를 사용한 수명예측방법보다 크리프 파단수명을 보다 길게 예측할 수 있다. 이 결과는 지금까지 크리프 수명예측에 사용된 LMP가 너무 보수적인 결과를 가져오는 문제점을 해결하는데 도움이 될 것으로 예측된다.

4.2 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강 of 증기배관에 대한 파단변형률 예측

$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강으로 제작된 보일러 튜브 및 증기 배관에서의 파단변형률은 식(19)와 같이 파단수명 t_r 까지의 변형률속도를 적분하여 산출하였다. 여러 운전압력조건에서 예측된 파단변형률은 Fig. 6과 같다.

Fig. 6은 운전압력이 감소할수록 파단변형률이 감소하는 것을 보이고 있다. 한편 배관의 운전압력이 20~40 MPa인 것을 고려하면 고온에서 외경 팽창량이 2~5%일 때 전 수명이 소비된 것으로 보는 경험적 방법^(4,5)이 이론적으로도 규명이 가능한 것을 알 수 있다. 물론 이들 수치는 부식 등의 영향

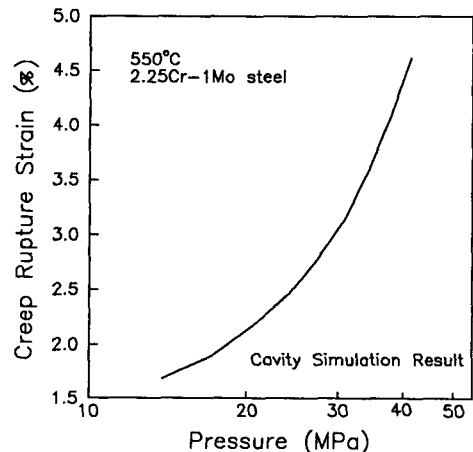


Fig. 6 Effect of internal pressure on the creep rupture strain in $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel pipe at 550°C

에 의하여 다소 감소될 수 있으나 부식 등의 영향이 적은 경우에는 본 연구결과를 운전압력에 따른 튜브의 정확한 교체시기를 결정하는 기준으로 볼 수 있다.

5. 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강으로 제작된 증기배관의 파단수명 및 변형률에 결정립 크기 변화가 미치는 영향

발전설비의 보일러 튜브, 헤더 또는 증기배관은 용접과정 중 열영향부에서 결정립 조대화현상이 자주 발생한다. 이들 결정립 조대화가 크리프 파단수

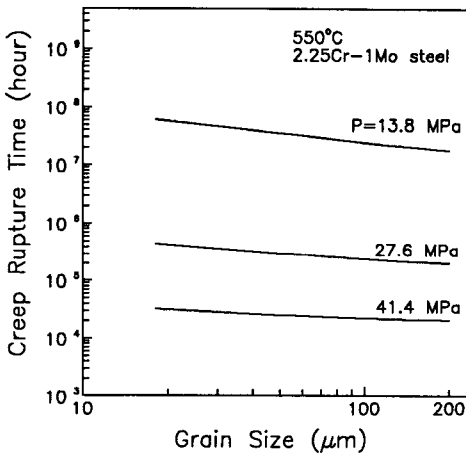


Fig. 7 Effect of grain size on the creep rupture time in 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel pipe at 550°C

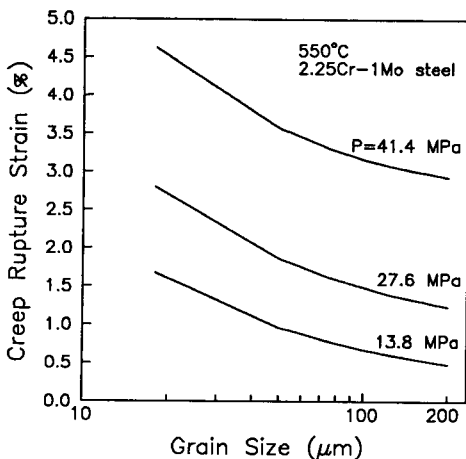


Fig. 8 Effect of grain size on the creep rupture strain in 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel pipe at 550°C

명 및 변형률에 미치는 영향을 분석하기 위하여 공동의 성장속도식 (10)에서의 결정립 크기를 변화시켜 파단수명과 변형률을 예측하였다. 내압이 13.8, 27.6 및 41.4 MPa일 때 크리프 파단수명과 변형률에 결정립 크기 변화가 미치는 영향은 Fig. 7 및 8과 같다. 이를 보면 결정립 조대화가 크리프 파단수명 및 변형률을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 용접과정에서 결정립 크기의 억제는 매우 중요하다고 볼 수 있다.

6. 결 론

2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 강으로 제작된 발전설비 보일러 튜브 및 증기배관과 같이 낮은 응력조건에서 운전되는 설비의 크리프 파단수명과 변형률을 예측하기 위하여 재료손상 매개변수와 입계 미끄럼을 고려한 컴퓨터 시뮬레이션을 실시한 결과는 다음과 같다.

(1) 재료손상 매개변수 ρ 와 입계 미끄럼의 영향을 고려한 수명예측법은 연속공동생성만을 고려한 기존의 수명예측방법보다 정확한 수명예측이 가능하다.

(2) 크리프 파단변형률은 응력이 감소할수록 작아지며 이는 ρ 매개변수와 입계 미끄럼의 영향을 고려하면 이론적으로도 상당히 정확한 예측이 가능하다.

(3) 공동의 연속 생성과 성장, 재료손상 매개변수 및 입계 미끄럼을 고려한 수명예측법이 현재 배관의 수명예측에 널리 사용되고 있는 Larson-Miller parameter법보다 덜 보수적인 결과를 가져온다.

(4) 배관의 파단변형률은 공동의 연속 생성과 성장, 재료손상 매개변수 및 입계 미끄럼 등을 고려할 때 배관의 운전압력 부근에서 2~5%로 매우 작게 예측된다. 이것은 현재 외경 팽창량을 기준으로 배관을 교체하는 경험적 방법에 대한 이론적 근거를 제시하여 주고 있다.

(5) 결정립 크기의 조대화는 크리프 파단수명 및 변형률을 현저히 감소시킬 수 있으므로 용접 열영향부에서 발생하는 결정립 조대화에 대한 억제는 설비의 안전성 확보를 위해 매우 중요하다.

참고문헌

(1) Larson, F. R. and Miller, J., 1952, "Time-

- Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses," *Trans. ASME*, Vol. 74, pp. 765~775.
- (2) Manson, S. S. and Ensign, C. R., 1971, "A Specialized Model for Analysis of Creep Rupture Data by the Minimum-Commitment Method," *NASA T. M. X-52999*, pp. 1~14.
- (3) Yusuke, M., Yoshito, I. and Takemi, Y., 1991, "Application of Aged $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Data to Estimation of Remaining Life for Boiler Tubes," *The Thermal and Nuclear Power*, Vol. 42, No. 1, pp. 103~111.
- (4) 김재철, 김의현, 1986, "보일러 튜브 수명관리 연구," 한국전력공사 연구보고서, KRC-84G-S05, pp. 41~43.
- (5) 문경태, 1994, "가열로 튜브의 수명예측 기법," 대한기계학회 1994년도 Workshop, "석유·화학설비의 안전성 확보대책," pp. 53~58.
- (6) 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.
- (7) Dyson, B. F., 1976, "Constraints on Diffusional Cavity Growth Rates," *Metal Science*, Vol. 10, pp. 349~353.
- (8) Riedel, H., 1987, *Fracture at High Temperature*, B. Ilschner (Ed.), Springer-Verlag, Berlin, pp. 227~238.
- (9) Cane, B. J. and Shammas, M. S., 1984, "A method for Remanent Life Estimation by Quantitative Assessment of Creep Cavitation on Plant," *CEGB Report TPRD/L/2645/N84*.
- (10) Riedel, H., 1984, "A Life Prediction Method for Constrained Grain Boundary Cavitation," In: *Fundamentals of Deformation and Fracture*, Bilby, B. A., Miller, K. J. and Willis, J. R., Eds., Cambridge University Press, Cambridge, pp. 601~608.
- (11) Needham, N. G. and Cane, B. J., 1983, "Creep Strain and Rupture Predictions by Cavitation Assessment in $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel Weldments," *ASME International Conference on Advances in Life Prediction Methods, The Materials Conference Albany*, New York, April 18, pp. 65~73.
- (12) Kachanov, L. M., 1960, *The Theory of Creep*, Kennedy (Ed.), A. J., Boston Spa, Wetherby.
- (13) Nix, W. D., 1988, "Mechanisms and Controlling Factors in Creep Fracture," *Materials Science and Engineering*, Vol. A103, pp. 103~110.
- (14) Riedel, H., 1987, *Fracture at High Temperature*, Ilschner (Ed.), B., Springer-Verlag, Berlin, pp. 62~66.
- (15) Riedel, H., 1985, "Continuous Nucleation of Grain Boundary Cavity in Creep Rupture," *Z. Metallkde*, Vol. 76, pp. 669~675.
- (16) 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.
- (17) Riedel, H., 1987, *Fracture at High Temperatures*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 389~390.
- (18) Beere, W., 1982, "Stress Redistribution due to Grain Boundary Sliding During Creep," *Metal Science*, Vol. 16, pp. 223~227.
- (19) Riedel, H., 1987, *Fracture at High Temperature*, Ilschner (Ed.), B., Springer-Verlag, Berlin, pp. 8~11.
- (20) 홍성호, 1991, "공동의 면적에 의한 크리프 수명예측법," 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, pp. 1455~1461.
- (21) Riedel, H., 1987, *Fracture at High Temperatures*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 350~351.
- (22) Bailey, R. W., 1956, "Creep Relationship and their Application to Pipes, Tubes and Cylindrical Pats under Internal Pressure," *Proceeding Institute of the Mechanical Engineers*, Vol. 164, pp. 324.