

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.4.457

Taylor 급수를 이용한 617 합금의 장시간 크리프 수명 예측

윤송남[†], 김우곤*, 박재영**, 김선진**, 김용완*

* 한국원자력연구원, ** 부경대학교 기계공학과

Taylor Series-Based Long-Term Creep-Life Prediction of Alloy 617

Song-Nan Yin, Woo-Gon Kim, Jae-Young Park, Soen-Jin Kim and Yong-Wan Kim

* Korea Atomic Energy Research Institute,

** Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.,

(Received December 2, 2009 ; Revised February 17, 2010 ; Accepted February 17, 2010)

Key Words : Taylor Series Model(Taylor 급수 모델), Alloy 617(617 합금), Time to Rupture (파단시간), Hyperbolic Sine Function (sinh 함수), Very High Temperature Gas Reactor (초고온 가스)

초록: 본 연구에서는 McVetty 와 Monkman-Grant 의 모델에 기초하여 만들어진 새로운 크리프 수명예측 모델인 Taylor 급수(T-S) 모델을 제안하였다. 본 모델은 회귀분석에서 발생하는 오차를 줄이기 위하여 McVetty 모델에서 sinh 함수를 Taylor 급수에 의해 변환한 후 첫 3 개항을 취한 것으로서 모델중의 상수 값은 통계학적 방법인 최대가능성 기법을 이용하여 결정되었다. T-S 모델을 이용하여 Alloy 617 의 크리프 수명을 예측한 결과 Eno, 지수함수 및 Larson-Miller(L-M) 방법에 비해 더 정확한 예측을 하는 것으로 나타났다. 또한 T-S 모델은 특정 온도에서 크리프 수명 예측을 할 수 있는 등온 T-S(IT-S) 모델로 표현될 수 있었으며, IT-S 모델은 Alloy 617 의 장시간 크리프 수명예측에서 가장 좋은 예측을 하는 것으로 나타났다.

Abstract: In this study, a Taylor series (T-S) model based on the Arrhenius, McVetty, and Monkman-Grant equations was developed using a mathematical analysis. In order to reduce fitting errors, the McVetty equation was transformed by considering the first three terms of the Taylor series equation. The model parameters were accurately determined by a statistical technique of maximum likelihood estimation, and this model was applied to the creep data of alloy 617. The T-S model results showed better agreement with the experimental data than other models such as the Eno, exponential, and L-M models. In particular, the T-S model was converted into an isothermal Taylor series (IT-S) model that can predict the creep strength at a given temperature. It was identified that the estimations obtained using the converted IT-S model was better than that obtained using the T-S model for predicting the long-term creep life of alloy 617.

1. 서 론

크리프 수명은 고온구조물의 설계 및 사용중인 고온구조물의 잔여수명 평가에 있어서 매우 중요하다. 특히 수소생산용 초고온가스로는 매우 높은 고온(>950°C)에서 60년 이상의 장기간 사용되도록 설계되기 때문에 사용되는 구조재료의 장시간 크리프 강도에 대한 평가가 더욱 필요하다.⁽¹⁻⁴⁾

고온구조재료의 크리프 수명은 크리프 속도와 밀접한 관계가 있으므로 크리프 속도의 온도-의존성 및 응력-의존성 모델에 의하여 크리프 수명을

예측하는 방법이 주로 사용되어 왔다. 일반적으로 널리 사용되는 Larson-Miller(L-M), Orr-Sherby-Dorn(O-S-D), Manson-Hafner(M-H) 및 Manson-Succop(M-S) 파라미터 등 시간-온도 파라미터(TTP)법도 이러한 모델에 기초하여 개발된 것이다. TTP법은 온도와 파단시간을 하나의 파라미터로 통합하여 나타내고 이 파라미터와 응력 사이의 관계를 다항식으로 나타내는 방법이다. 그러나 TTP 법은 온도와 파단시간을 하나의 파라미터로 통합하는 과정에 여러 가지 구속조건이 따르게 되고, 또한 다항식에 의한 수명예측식은 외삽 특성이 좋지 못하므로 장시간 수명예측에 어려움이 있으며,⁽⁵⁻⁹⁾ 이런 다항식의 단점을 극복하기 위한 새로운 방법들이 개발되어지고 있다.⁽¹⁰⁾

현재 제안된 크리프 속도의 응력-의존성에 대한

[†] Corresponding Author, yjsongnan@yahoo.co.kr

모델 식들을 보면, McVetty⁽¹⁰⁾는 연속손상(continuous damage) 메커니즘에 기초하여 sinh함수(Hyperbolic Sine Function) 모델을 제안하였으며, Norton⁽¹¹⁾과 Dorn⁽¹⁰⁾은 실험을 통하여 power law와 지수함수 모델을 제시하였다. 하지만 power law 모델은 응력 따라 상수(n) 값이 변하기에 넓은 응력범위의 수명예측에서 비교적 큰 오차가 발생하고 Dorn의 지수함수 모델은 비교적 높은 응력에서 잘 맞지만 낮은 응력에서는 큰 오차가 발생한다.⁽¹⁰⁾ 한편 sinh함수 모델은 비교적 넓은 영역에서 응력과 크리프 속도의 관계를 잘 묘사하고 있지만 비선형식으로서 모델식이 복잡하므로 피팅 할 때 수렴하지 않거나 비교적 큰 피팅 오차가 발생한다. 이에 반해 sinh함수는 Taylor급수(Taylor Series, T-S)로 표현될 수 있으므로 적절한 변환을 거치면 만족할만한 정확도의 피팅 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 617합금의 크리프 수명을 예측하기 위하여 sinh함수를 Taylor급수를 이용하여 변환함으로써 Taylor 급수 모델(Taylor Series Model, T-S model)을 유도하였으며, 이 모델을 여러 문헌에서 얻은 617합금의 크리프 파단 자료에 적용시켜 신뢰성이 있는 크리프 수명을 예측하였으며, 그 결과를 L-M법 등 기타 모델에 의한 예측 결과와 비교 분석하였다.

2. 크리프 수명예측 모델 유도

일반적으로 크리프 곡선은 Fig. 1과 같이 3개의 크리프 영역으로 나누어 지며 정상상태의 크리프 속도는 응력, 온도 및 시간의 함수로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_c = f_1(\sigma) f_2(T) f_3(t) \quad (1)$$

여기서 $\dot{\epsilon}_c$ 는 크리프 속도이고, $f_1(\sigma)$, $f_2(T)$, $f_3(t)$ 는 각각 응력, 온도 및 시간 의존성 함수를 나타낸다. 이들 함수들에 대하여 여러 가지 모델이 제안되어 있는데 이들은 모두 일정한 물리적 및 실험적 근거를 기초로 하여 개발되었다.

2.1 크리프 속도의 온도 의존성

크리프 속도의 온도 의존성은 크리프 메커니즘에 따라 여러 가지 함수가 제안되었다. Arrhenius는 $0.5T_m$ (용융온도) 이상의 온도에서 열 활성화 작용에 의하여 확산 크리프(diffusion creep)가 주도하며 크리프 속도의 온도-의존성을 식 (2)와 같이 제안하였다.^(12~15)

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon_c}{dt} = A_0 \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서 ΔH 는 활성화 에너지, T 는 절대온도, R 은 기체상수, A_0 는 재료상수이다.

2.2 크리프 속도와 파단시간 관계

Monkman과 Grant는 많은 실험을 통해 파단시간과 크리프 속도를 곱한 값은 상수라고 주장하였다.^(11,13) 즉, Fig. 1에서 정상상태의 크리프 속도의 연장선과 Y축 및 파단시간에서의 Y축의 절편 값의 차이($\epsilon_4 - \epsilon_1$)가 많은 고온재료에서 일정한 상수 값을 갖는다는 것을 실험을 통하여 제시하였다. 이를 수식으로 표시하면 식 (3)와 같이 나타낼 수 있으며 이를 간단히 쓰면 식 (4)와 같다. 식(4)는 비록 이론적인 근거를 찾기는 어렵지만 공학적으로 크리프 파단수명을 예측하는데 많이 사용되는 유용한 식으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾

$$\left(\frac{d\epsilon_c}{dt}\right)^m = \frac{\epsilon_4 - \epsilon_1}{t_r} = \frac{\epsilon^*}{t_r} \quad (3)$$

$$t_r \left(\frac{d\epsilon_c}{dt}\right)^m = \epsilon^* \quad (4)$$

여기서 t 는 실험시간, t_r 은 파단시간, m 과 ϵ^* 는 재료상수 있다.

2.3 크리프 속도의 응력 의존성

크리프 속도의 응력 의존성에 대하여 McVetty는 연속손상 메커니즘에 기초하여 sinh함수 모델을 제안하였으며, Norton과 Dorn은 실험을 통하여 power law와 지수함수 모델을 제시하였다.

$$\dot{\epsilon} = D\sigma^n \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon} = K_0 \exp(K_1\sigma) \quad (6)$$

$$\dot{\epsilon} = K_0(\exp(K_1\sigma) - 1) \quad (7)$$

$$\dot{\epsilon} = K_2 \sinh\left(\frac{K_3\sigma}{RT}\right) \quad (8)$$

여기서 σ , T 는 각각 응력, 절대온도이며 D , K_0 , K_1 , K_2 , K_3 , n 는 재료상수이다.

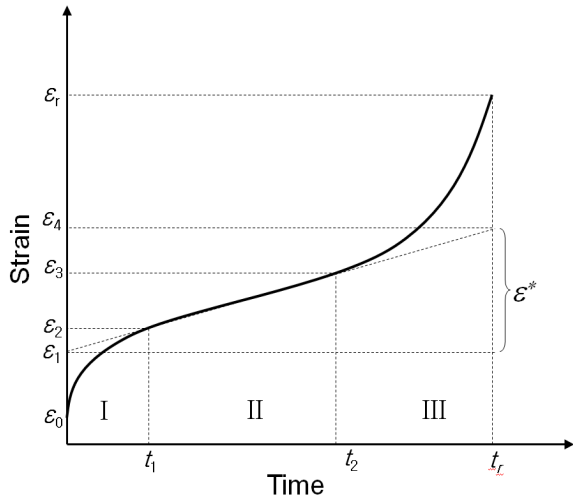


Fig. 1 Typical creep curve with three regions

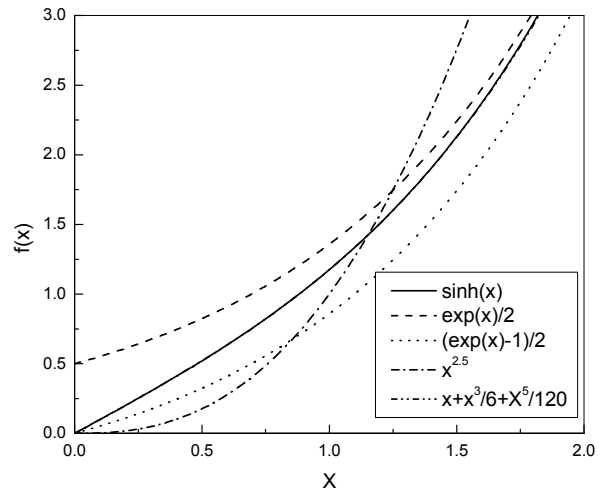


Fig. 3 Comparisons of each function in a small range of x-value

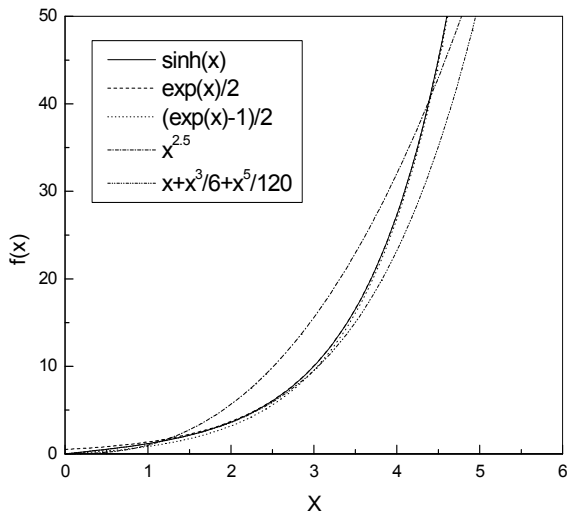


Fig. 2 Comparisons of each function in a large range of x-value

이들 모델식들 사이의 차이는 Fig. 2 및 Fig. 3에서 표시되었다. Fig. 2에서 보여주듯이 x값이 클 경우 식 (5)를 제외한 식 (6)~(8)은 거의 차이가 없는 것으로 나타나나, Fig. 3과 같이 x값이 비교적 작을 경우에는 명확한 차이가 있음을 알 수 있다. 또한, 크리프 수명 예측은 높은 응력의 실험으로부터 낮은 응력에서의 파단시간을 예측하는 것이므로 작은 x값에서의 차이는 장시간 수명예측에 매우 큰 영향을 미치게 된다.

Fig. 4는 크리프 속도와 응력 사이 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주듯이 power law 모델은 응력 범위에 따라 상수 n값이 여러 단계로 변하기에 넓은 응력범위의 수명예측에서 하나의 n값을 사용할 경우 비교적 큰 오차가 발생한다. Dom의 지수함수 모델은 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 x값이 작아짐에 따라 함수 값은 0.5에 접근하기 때문에 높은 응력측에서는 잘

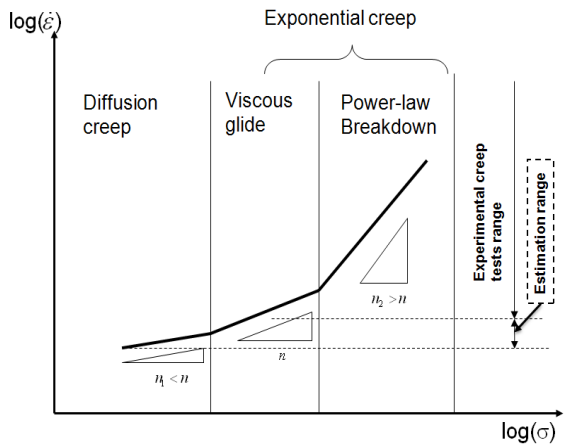


Fig. 4 Schematic illustration for stress dependence of the steady state creep rate [Ref.(16)]

맞지만 낮은 응력에서는 응력과 크리프 속도의 관계를 잘 묘사하지 못한다. 그러므로 지수함수 모델은 장시간 수명 예측에 비교적 큰 오차가 발생할 수 있다.^(10,11,16) 그리고 sinh함수 모델은 두 개의 지수함수 항을 포함한 비선형식으로서 모델식이 복잡하므로 피팅할 때 파라미터 값이 수렴되지 않거나 피팅 오차가 비교적 크다. 이에 반해 sinh함수는 식 (9)에서 표시한 Taylor급수로 표현될 수 있으므로 적절한 변환을 거치면 정확한 피팅이 가능하게 된다.

sinh함수를 Taylor급수로 전개하면 아래와 같이 표현된다.

$$\sinh(\alpha x) = \alpha x + \frac{(\alpha x)^3}{3!} + \frac{(\alpha x)^5}{5!} + \dots + \frac{(\alpha x)^{2n+1}}{(2n+1)!} \quad (9)$$

(n=1,2,3...)

윗식에서 보여주듯이 x 값이 작을 경우 뒷항은 무시되므로 선형에 가까워지고 이는 확산 크리프를 잘 표현하고 있으며, 반면 x 값이 커짐에 따라 3 차, 5 차, 7 차... power law 함수로 변화하게 되는데 이는 power law 크리프 거동과 일치하게 된다. 즉, T-S 에 의한 변환은 Fig. 4 에 나타낸 크리프 속도와 응력 사이의 관계를 넓은 구간에서 포괄적으로 잘 표현할 수 있을 것이다.

또한 T-S는 일반 다항식과는 달리 단 한 개의 미지수만을 포함하고 있으므로 회귀법을 사용하면 비교적 정확한 외삽을 할 수 있으며 이는 장시간 크리프 수명 예측에 매우 적합할 것으로 판단된다.

2.4 크리프 수명 예측 모델

2.4.1 지수함수 선형 모델

Dom은 크리프 속도의 응력 의존성을 지수함수로 제시하였으며, Bailey⁽¹¹⁾는 지수함수를 이용한 수명 예측 모델을 제시하였고, Yin⁽¹⁷⁾은 Bailey의 모델에서 항복응력 $\sigma_0(T)$ 를 온도의 선형함수로 가정하여 지수함수를 이용한 응력-온도 선형모델인 지수함수모델(exponential model, Exp. Model)을 제시하였다. 이 모델은 다음과 같은 3가지 식으로 각각 표현된다.

$$\log t_r = C_1 + \frac{C_2}{T} + C_3\sigma + \frac{C_4}{T}\sigma \quad (10)$$

$$\log t_r = C_1 + C_2T + C_3\sigma + C_4T\sigma \quad (11)$$

$$\log t_r = C_1 + \frac{C_2}{T} + C_3\sigma + C_4T\sigma \quad (12)$$

여기서 C_1, C_2, C_3, C_4 는 재료상수로서 최소자승법(least square method)에 의하여 구해진다. 이 모델들은 모두 선형 모델로서 선형 다중회귀법을 이용하면 모델의 계수 값을 쉽게 구할 수 있으나 비교적 높은 응력의 데이터에서 잘 맞는 것으로 보고 되었다.^(11,18)

Eno⁽¹⁸⁾는 power law를 이용하여 일반적으로 많이 사용되는 TTP 법을 모두 통합하여 나타낼 수 있는 통계적 선형모델(statistical linear model)을 제안하였다.⁽¹¹⁾ 이는 일반적으로 많이 사용되는 TTP 법을 모두 통합하여 나타낼 수 있는 선형모델로서 다음과 같이 표현된다.

$$\log t_r = a + b \log \sigma + c/T + d(\log \sigma)/T \quad (13)$$

$$\log t_r = a + b \log \sigma + cT + d(\log \sigma)T \quad (14)$$

Eno는 이 모델을 이용하여 617 합금의 크리프 수명 예측을 수행한 바 있으나 장시간 수명예측 값이 실험 데이터에 비해 높게 나타났다.⁽¹⁸⁾ 이는 이 모델이 $\log \sigma$ 에 대한 선형모델이므로 장시간 측에서 파단 시간이 $\log \sigma$ 에 따라 비선형으로 작아지는 것을 반영하지 못하기 때문이다. 그러나 이러한 다중회귀모델은 TTP법과 같이 별도의 파라미터와 상수를 계산하지 않고도 수명예측하기에 절차가 간단하고, 파단시간에 대한 온도-의존성과 응력-의존성이 각각 독립적으로 작용됨으로 TTP법처럼 통합하는 과정에 발생하는 오차를 줄일 수 있다.

2.4.2 Taylor 급수 모델

McVetty는 크리프 속도의 응력의존성을 연속손상 메커니즘으로부터 쌍곡선함수 모델을 제시하였다. 하지만 sinh함수 모델은 비선형 모델 식으로서 파단데이터를 모델링함에 있어서 모델식의 파라미터 값을 결정하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 sinh함수를 T-S로 전환하고 처음 3항까지 취하여 크리프 수명 예측식을 유도하고 이를 이용하여 617 합금의 장시간 크리프 수명을 예측하고자 한다.

McVetty의 식은 식 (8)과 같이 표현되며 또한 식 (2)에서 A_0 를 응력의 함수로 가정하고 응력의존성 함수 식 (8)로 대체하고 로그를 취하면 다음과 같은 식 (15)가 얻어진다.

$$\log t_r = A + \frac{B}{T} - m \log \left(\sinh \left(\frac{C\sigma}{RT} \right) \right) \quad (15)$$

윗식의 sinh 함수를 T-S 의 처음 3 개 항으로 대체하면 아래의 식 (16)과 같은 T-S 모델이 얻어진다.

$$\log t_r = A + \frac{B}{T} - m \log \left((\beta\sigma/T) + \frac{(\beta\sigma/T)^3}{3!} + \frac{(\beta\sigma/T)^5}{5!} \right) \quad (16)$$

여기서 $\beta = C/R$ 이다.

윗식은 식 (9)에서 논의한 바와 같이 넓은 구간의 $(a\sigma/T)$ 값에 대하여 크리프 속도 변화를 잘 묘사할 수 있으며 특히 장시간 낮은 응력에서는 sinh 함수와 아주 잘 일치함으로 T-S 모델은 넓은 구간에서도 크리프 속도와 응력 관계를 잘 표현할 수 있다. 따라서 비교적 짧은 시간의 크리프 데이터로부터 장시간 크리프 수명을 예측하는데 아주 적합 모델이 될 수 있다.

Table 1 Model constants and standard deviation estimated by using Eq. 10, Eq. 14 and Eq. 16

	P_1	P_2	P_3	P_4	SD
Exp. Model (Eq. 10)	1.361E+01	1.333E-01	-7.490E-03	-1.478E-04	0.34976
T-S model (Eq.16)	-17.233	24217.18	1.28541	29.18308	0.34179
Eno's model (Eq. 14)	4.525E+01	-1.407E+01	-2.970E-02	8.150E-03	0.34738

$$\text{Model 1 : } \log t_r = P_1 + P_2 / T + P_3 \sigma + P_4 \sigma / T$$

$$\text{Model 2 : } \log t_r = P_1 + \frac{P_2}{T} - P_3 \log \left((P_4 \sigma / T) + \frac{(P_4 \sigma / T)^3}{3!} + \frac{(P_4 \sigma / T)^5}{5!} \right)$$

$$\text{Model 3 : } \log t_r = P_1 + P_2 \log \sigma + P_3 / T + P_4 (\log \sigma) / T$$

※ P_1, P_2, P_3 and P_4 are the model constants determined by multi-regression method

3. 결과 및 고찰

3.1 다중회귀법

본 연구에서는 617합금의 크리프 수명을 예측하기 위하여 여러 문헌과 당 연구실에서 실험으로 획득한 800°C~1000°C의 크리프 파단 자료를 수집하였으며 Fig. 5는 수집된 파단시간과 응력 데이터를 나타낸 것이다.

본 연구에서 제안한 모델은 다중변수가 포함된 모델로서 모델 상수는 다중회귀법(multi-regression method)을 이용하여 얻어진다. 다중회귀법은 하나의 종속변수와 여러 개의 독립변수 사이의 관계를 분석할 때 사용되는 회귀법으로서 다음과 같이 표현된다.

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n \quad (17)$$

여기서 Y 는 종속변수, X_1, X_2, \dots, X_n 은 독립변수이다. 예측된 상수 값은 최대가능성예측 (maximum likelihood estimate)법을 이용하여 얻어진다.

최대가능성예측법에서 오차는 정규분포를 가진다고 가정하여 계산되므로 예측 오차는 평균이 0인 정규분포를 가지게 된다. 그러므로 각 온도에서의 표준편차(SD)는 다음의 식 (18)에 의해 계산된다.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-1}} \quad (18)$$

여기서 Y_i 는 각 실험값이고 \hat{Y}_i 는 예측값이며 n 은 데이터 개수이다.

Table 1은 3가지 모델을 이용하여 다중회귀 분석한 결과 얻은 모델 상수 값과 표준편차를 나타내고 있다. 표준편차 값은 약 0.34~0.35의 비교적 큰 값으로 나타나고 있는데 이는 여러 문헌에 수집된 데이터가 비교적 큰 산포를 갖고 있기 때문이다. 하지만 본 연구에서 유도한 T-S 모델이 다

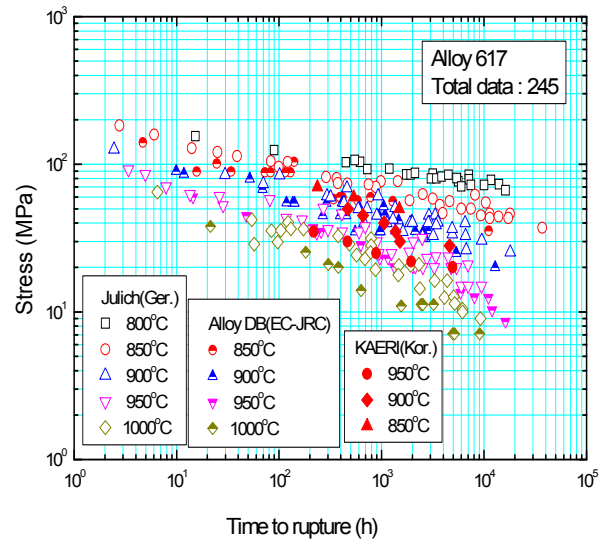


Fig. 5 Creep data collected from literature survey and KAERI effort for Alloy 617

소 작은 표준편차를 나타내고 있다. 이는 수명 예측에서 정확한 실험이 오차에 매우 큰 영향을 미치지만 적절한 모델의 선택도 오차를 줄일 수 있음을 보여준다. 본 표에서 제시한 상수 값에 의해 임의의 온도 및 응력에서 크리프 파단시간을 예측할 수 있다.

Fig. 6은 본 모델을 다중회귀 기법을 이용하여 회귀분석하여 얻은 상수 값들을 이용하여 수명 예측한 결과를 나타내고 있다. 여기서 Eno, Exp., T-S 모델은 다중회귀법을 이용하여 상수 값을 결정하였으며 L-M 법은 3차 다항식을 이용하여 예측하였다. 그림에서 보여주듯이 지수함수 모델은 높은 응력에서는 실험 데이터와 잘 일치하지만 낮은 응력에서는 예측된 강도 값이 급격히 떨어지면서 장시간 크리프 수명 예측에 비교적 큰 오차를 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 지수함수의 경우 응력이 0일 때 함수 값이 0이 되지 않으므로 매우 낮은 응력에서 파단

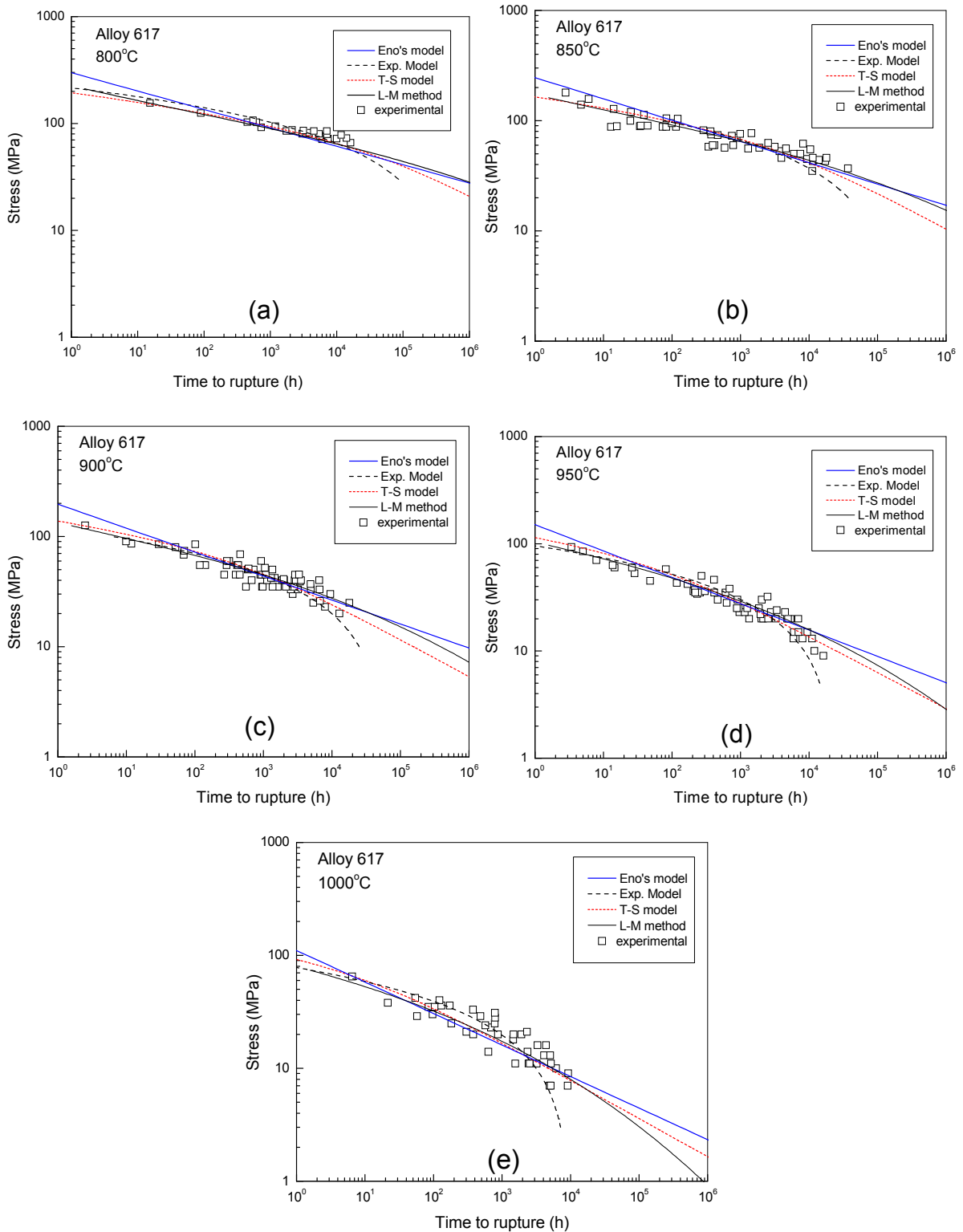


Fig. 6 Comparison of the experimental data and the prediction results of Eno, exponential, L-M, and T-S models at each temperature, from (a) 800°C to (e) 1000°C

시간이 무한히 커지는 현상을 반영하지 못하기 때문이다. 또한 Eno의 모델은 전 구간에서 $\log \sigma$ 에 대해 직선으로 예측되기에 실제 장시간에서 비선형적

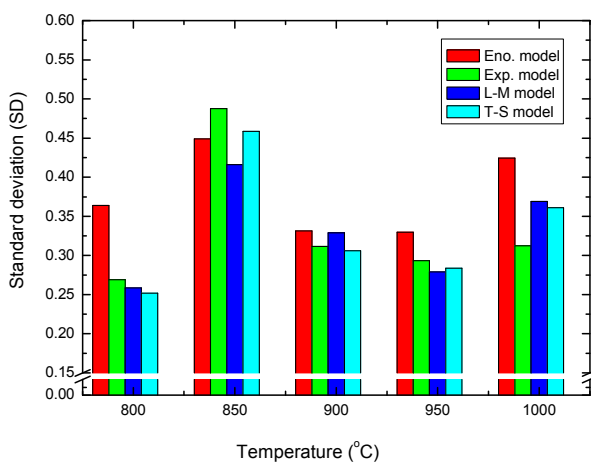
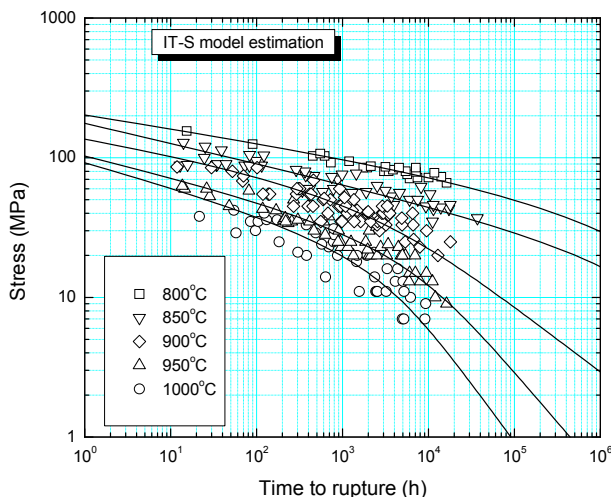
으로 감소하는 데이터를 나타내는데 어려움이 있다. 또한 L-M 법은 T-S 모델과 비슷한 결과를 보이고 있지만 사용된 다항식의 차수에 따라 예측결과가 변하고 또한

Table 2 Model constants and standard deviation estimated at each temperature

	1073K	1123K	1173K	1223K	1273K
P_1	6.76851	7.047	4.04274	3.87145	4.25903
P_2	0.94048	0.6129	0.92362	0.51753	0.60348
P_3	0.05253	0.14651	0.04108	0.12255	0.10019

$$\log t_r = P_1 - P_2 \log \left((P_3 \sigma) + \frac{(P_3 \sigma)^3}{3!} + \frac{(P_3 \sigma)^5}{5!} \right)$$

※ $P_1, P_2,$ and P_3 are the model constants determined by isothermal fitting

**Fig. 7** Comparison of a standard deviation (SD) for Eno, exponential, L-M, and T-S models for total data**Fig. 8** Comparison of the experimental data and prediction results of IT-S model at each temperature

고차 다항식은 외삽특성이 좋지 않기 때문에 장시간 수명예측의 신뢰성이 떨어지며, 또한 장시간

예측에서 상대적으로 큰 값으로 예측되는 단점이 있다. 이에 반해 T-S 모델은 전 구간에서 실험 데이터에 잘 일치하였으며 다중회귀모델과 TTP 법의 단점을 극복하고 장점을 채택할 수 있는 모델로서 비교적 정확한 예측 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 7 은 4 가지 모델에 의해 예측된 오차의 표준편차를 각 온도에서 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보여주듯이 표준오차 값은 L-M 과 T-S 모델이 모든 온도에서 비교적 작은 표준편차를 나타나고 있으므로 예측 정확도가 우수하다는 것을 알 수 있다. 이는 L-M 및 T-S 모델에서 응력과 과단시간 사이의 관계가 T-S 및 3 차 다항식에 의해 잘 묘사되기 때문이다. 하지만 3 차 다항식의 경우 낮은 응력에서 외삽 특성이 좋지 못하므로 장시간 수명예측에 적합하지 않다.

3.2 등온 수명 예측

위에서 서술한 식(16)에서 온도(T)를 상수로 가정하면 다음과 같은 등온 T-S 모델(isothermal T-S model, IT-S model)을 얻을 수 있다.

$$\log t_r = A' - m \log \left((C\sigma) + \frac{(C\sigma)^3}{3!} + \frac{(C\sigma)^5}{5!} \right) \quad (19)$$

여기서, $A' = A + B/T$, $C' = \beta/T$ 이다. 이 등온 예측식은 온도의 영향이 고려되지 않은 과단시간과 응력 사이의 관계식으로서 특정 온도의 데이터를 피팅하여 장시간 수명을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다.

Table 2 는 각 온도에서 각각 피팅하여 얻은 상수 값들 정리하여 나타낸 것이다. 여기서 얻은 상수 값들에 의한 장시간 수명은 Fig. 8 에서 나타낸 바와 같이 실험 데이터와 예측 값은 아주 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 9 는 T-S, L-M 및 IT-S 모델의 예측 오차를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주듯이 IT-S 모델의

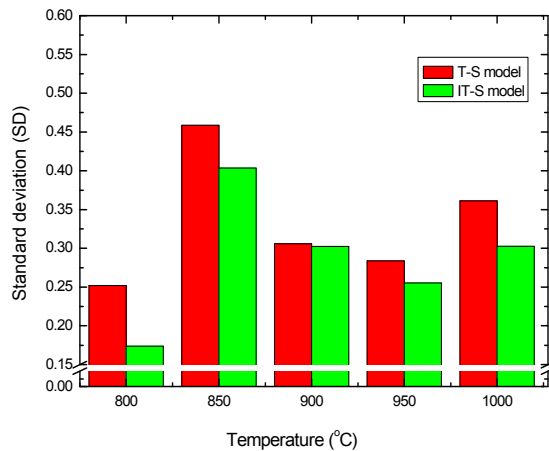


Fig. 9 Comparison of a standard deviation (SD) for T-S, L-M and IT-S models for total data

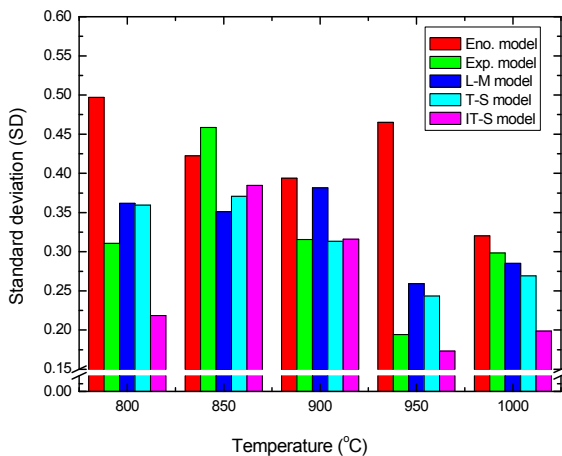


Fig. 10 Comparison of a standard deviation (SD) for Eno., Exp., T-S, L-M and IT-S models at each temperature for over 5000h data

표준편차 값이 다중회귀 모델이나 L-M 법에 비해 작은 것으로 나타나고 있다. 등은 수명예측 T-S 모델이 정확한 수명 예측을 할 수 있는 원인은 첫째, 등은 예측식이 온도 의존성의 영향을 받지 않기에 크리프 속도의 온도 의존성의 오차가 제거 되었으므로 각각의 온도에서 더 정확하게 데이터를 반영할 수 있기 때문이며, 둘째, T-S 가 넓은 구간에서 크리프 속도의 응력 의존성을 아주 잘 묘사하고 있기 때문에 응력만의 의존성에서는 정확한 파단시간을 예측할 수 있었으며 셋째, 일반적인 다항식에 비해 모델 상수의 갯수가 적기에 피팅 오차를 줄일 수 있었기 때문이다. 그러므로 본 모델은 단일 온도에의 수명예측에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10 은 5000h 이상의 장시간 수명 예측에 대한 각각 모델의 표준편차를 나타낸 것이다.

그림에서 보여주듯이 높은 온도, 장시간 수명 예측에서 T-S 모델과 IT-S 모델의 표준편차가 다른 모델에 비해 작은 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고온가스로의 구조재료로 사용되는 617 합금의 신뢰성이 높은 크리프 파단수명을 예측하기 위하여 T-S 모델을 제안하였다.

(1) T-S모델은 McVetty의 sinh함수 모델과 Arrhenius의 모델을 Monkman-Grant의 모델에 적용하고 sinh함수를 T-S로 변환하여 얻어졌다. T-S모델은 다중회귀모델과 TTP법의 장점을 통합하고 단점은 제거된 모델로서 장시간 수명 예측에 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

(2) 표준오차를 사용하여 T-S모델의 정확성을 Eno의 모델, 지수함수 모델 및 L-M법과 비교 분석한 결과 T-S모델과 L-M법이 좋은 예측 결과를 보여주고 있으며 T-S모델은 장시간 수명 예측에서 선형으로 예측됨으로 L-M에 비해 신뢰성이 높음을 확인하였다.

(3) T-S모델은 높은 응력에서는 고차의 곡선으로 낮은 응력에서 $\log \sigma$ 대해 선형으로 예측되기예 특히 장시간 크리프 수명예측에서 재료의 거동을 잘 묘사하는 모델로서 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

(4) 등은 수명 예측 모델은 T-S모델로부터 유도 되었으며 단일 온도의 수명 예측을 수행한 결과 더 정확한 예측 값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력연구 개발 사업중 초고온가스로 요소기술개발 과제 (과제 관리 번호: M20701002 - 08M0101 - 00110)에서 수행한 것 입니다.

참고문헌

- (1) Kim, W. G., Yin, S. N., Ryu, W.S. and Yi, W., 2004, "Creep-life Prediction and Standard Error Analysis of Type 316LN Stainless by Time-Temperature Parametric Methods," *Trans. of the KSME, A*, Vol.29. No.1, pp.74~80.
- (2) Lee, H. Y., Kim, Y. W. and Song, K. N., 2008, "Preliminary Application of the Draft Code Case for Alloy 617 for High Temperature Component," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 856~863.

- (3) Kim, W. G., Yin, S. N., Jung, I. H. and Kim, Y. w., 2008, "Modeling of a Long-term Creep Curve of Alloy 617 for a High Temperature Gas-cooled Reactor," *Key Engineering Materials*, Vols. 385-387, pp. 693~696.
- (4) Swindemana, R.W. and Swindemanb, M. J., 2008, "A Comparison of Creep Models for Nickel Base Alloys for Advanced Energy Systems," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, pp. 72~79.
- (5) Manson, S. S., and Ensign, C. R., 1978, "Interpolation and Extrapolation of Creep Rupture Data by the Minimum Commitment Method-Part 2," *ASME MPC-7*, New York, pp. 299~398.
- (6) Yin, S. N., Kim, W. G., Ryu, W. S. and Yi, W., 2007, "Creep-Life Prediction and Its Error Analysis by the Time Temperature Parameters and the Minimum Commitment Method" *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 31, No. 2, pp. 160~165.
- (7) Manson, S. S. and Ensign, C. R., 1971, "Specialized Model for Analysis of Creep Rupture Data by the Minimum Commitment Method, Station-Function Approach," *NASA TM, X-52999*, pp. 1~14.
- (8) White, W. E. and Iain Le May, 1978, "On the Minimum-Commitment Method for Correlation of Creep-Rupture Data," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 100, pp. 333~335.
- (9) Le May, I., 1979, "Developments in Parametric Methods for Handling Creep and Creep-Rupture Data," *Transactions of the ASME*, Vol. 101, pp. 326~330.
- (10) Penny, R. K. and Marriott, D. L., 1995, "Design for Creep" second edition, *Chapman & Hall*, London, pp. 8~42.
- (11) Norton, F. H., 1929, "The Creep of Steel at High Temperatures," *McGraw-Hill*, Londdon.
- (12) Penkalla, H. J., Over, H. H. and Schubert, F., 1984, "Constitutive Equations for the Description of Creep and Creep Rupture Behavior of Metallic Materials at Temperatures Above 800°C," *Nuclear Technology*, Vol. 66, pp. 685~692.
- (13) Garofalo, F., "Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals," *The Macmillan Co.*, New York, 1966, pp. 1~21 and pp. 200~220.
- (14) Kim, W. G., Kim, S. H. and Ryu, W. S., 2002, "Evaluation of Monkman-Grant Parameters for Type 316LN and Modified 9Cr-Mo Stainless Steels," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 16, No. 11, pp. 1420~1427.
- (15) Kim, W. G., Kim, S. H. and Ryu, W. S., 2001, "Creep Characterization of Type 316LN and HT-9 Stainless Steels by the K-R Creep Damage Model," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 15, No. 11, pp. 1463~1471.
- (16) Dimmler, G. Weinert, P. Cerjak, H., 2008. "Extrapolation of Short-term Creep Rupture Data-the Potential Risk of Over-Estimation," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.85, pp.55~62.
- (17) Yin, S. N., Kim, W. G., Jung, I. H. and Kim, Y. W., 2009, "Suggestion and Evaluation of a Multi-Regression Linear Model for Creep Life Prediction of Alloy 617," *Trans. of the KSME (A)*, Vol.33. No.4, pp.366~372.
- (18) Eno, D. R., Yong, G.. A. and Sham, T. L., 2008, "A Unified View of Engineering Creep Parameters," *Proceedings of PVP2008*, pp. 1~16.