

Alloy 617의 장시간 크리프 수명 예측을 위한 다중회귀 선형 모델의 제안 및 평가

윤송남[†] · 김우곤* · 정익희** · 김용완*

(2009년 1월 19일 접수, 2009년 2월 11일 수정, 2009년 2월 12일 심사완료)

Suggestion and Evaluation of a Multi-Regression Linear Model for Creep Life Prediction of Alloy 617

Song-Nan Yin, Woo-Gon Kim, Ik-Hee Jung and Yong-Wan Kim

Key Words : Alloy 617 (617 합금), Time-Temperature Parameter(시간-온도 파라미터, TTP), Stress-Temperature Linear Model(응력-온도 선형모델, STLM), Time to Rupture(파단시간), Standard Deviation(표준편차), Very High Temperature Reactor(초고온 가스로나, VHTR),

Abstract

Creep life prediction has been commonly used by a time-temperature parameter (TTP) which is correlated to an applied stress and temperature, such as Larson-Miller (LM), Orr-Sherby-Dorn (OSD), Manson-Haferd (MH) and Manson-Succop (MS) parameters. A stress-temperature linear model (STLM) based on Arrhenius, Dorn and Monkman-Grant equations was newly proposed through a mathematical procedure. For this model, the logarithm time to rupture was linearly dependent on both an applied stress and temperature. The model parameters were properly determined by using a technique of maximum likelihood estimation of a statistical method, and this model was applied to the creep data of Alloy 617. From the results, it is found that the STLM results showed better agreement than the Eno's model and the LM parameter ones. Especially, the STLM revealed a good estimation in predicting the long-term creep life of Alloy 617.

1. 서론

수소생산용 초고온가스로는 매우 높은 고온(>950°C)에서 30년 이상의 장기간 사용되도록 설계되기 때문에 사용되는 구조재료의 크리프 강도에 대한 평가가 매우 중요하다. 그러나 사용할 재료에 대하여 장시간 크리프 수명을 시험으로 일일이 정확히 확인한

후 사용한다는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 비교적 단시간의 크리프 파단 자료를 이용하여 설계 목적에 충분할 정도로 장시간의 크리프 수명을 예측하는 것이 필요하다.^(1,2)

단시간의 크리프 자료를 이용하여 장시간 크리프 수명을 예측하기 위한 유용한 방법으로 시간-온도 파라미터 (time-temperature parameter, TTP) 방법들이 전통적으로 널리 사용되어 왔다.^(3,4) TTP법은 크리프 시험에서 얻어지는 실험 온도와 파단시간을 하나의 파라미터로 통합하여 나타내고 이 파라미터와 응력사의 관계를 다항식 또는 예측 모델식에 의해 예측식을 구하는 방법이다. 그러나 TTP법은 온도와 파단시간을 하나의 파라미터로 통합하는 과정에 여러 가지 구속조건이 요구된다.⁽⁵⁻⁸⁾ 또한 다항식에 의한 크리프 수명예측은 데이터가 존재하지 않는 영역에서

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 (2008. 5. 29.-30., 충북대) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : yjsongnan@yahoo.co.kr

TEL : (042)868-8029 FAX : (042)868-8549

* 한국원자력연구원

** 부경대학교 대학원

다항식이 발산됨으로 수명예측에 어려움이 발생한다. 이런 다항식의 발산을 방지하기 위한 방법으로 선형식에 의한 예측법들이 개발되어지고 있다. 최근에는 Eno에 의해 모든 TTP 법을 하나의 선형식으로 표현할 수 있는 모델이 제안되었다.⁽⁹⁾ 하지만 이 모델은 응력과 파단시간을 대수로 나타냈을 때 선형관계를 나타낸다고 가정하였으므로 파단시간을 실제보다 크게 예측하게 된다.

한편 TTP법들은 Monkman-Grant 가 제안한 파단시간과 크리프 속도의 관계식에 기초하여 유도되었으며, 크리프 속도는 또한 응력의존성과 온도의존성으로 표현되었다. 크리프 속도의 응력-의존성에 대하여 많은 모델이 제안되어 있으나 이중에서 가장 많이 사용되는 것은 Norton⁽¹⁰⁾의 power law 와 Dorn⁽⁸⁾의 지수함수 식이다. 전자는 항복응력 이하의 낮은 응력에서 잘 맞으며, 후자는 항복응력 이상의 높은 응력에서 잘 맞는 것으로 보고되어있다.⁽⁸⁾ Alloy 617 합금의 경우 크리프 파단강도가 항복강도에 비해 큰 차이가 보이지 않으므로 대부분의 크리프 시험이 항복강도 부근에서 진행되기 때문에 Dorn의 지수함수 모델을 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

본 연구에서는 Alloy 617 합금의 크리프 수명을 예측하기 위하여 Dorn의 모델에 의한 응력-온도 선형 모델(stress-temperature liner model, STLM)을 유도하였으며, 이 모델을 여러 문헌에서 얻은 Alloy 617의 크리프 파단 자료에 적용시켜 정확한 크리프 수명을 예측하였으며, 그 결과를 Larson-Millar(L-M)법에 의한 예측 결과와 비교 분석하였다.

2. 응력-온도 선형모델

일반적으로 크리프 곡선은 Fig. 1 과 같이 3 개의 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 $f_1(\sigma)$, $f_2(T)$, $f_3(t)$ 는 각각 크리프 속도의 응력, 온도 및 시간 의존성 함수를 나타낸다. 이들 함수들에 대하여 여러 가지 모델이 제안되어 있는데 이들은 모두 일정한 물리적 및 실험적 근거를 기초로 하고 있다.

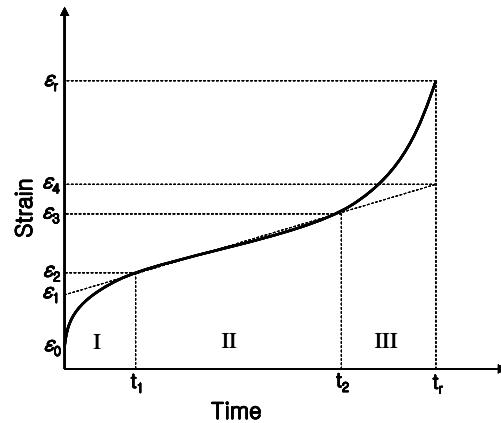


Fig. 1 Typical creep curve with three regions

2.1 크리프 속도의 온도 의존성

온도의존성 함수는 크리프 속도와 온도와의 관계를 나타내는 식으로서 크리프 메카니즘에 따라 여러 가지 함수가 제안되었다. Arrhenius는 $0.5T_m$ (용융온도)이상의 온도에서 열활성화 작용(thermally activated processes)에 의하여 확산-크리프가 주도하며 크리프 속도의 온도-의존성을 식 (2)와 같이 제안하였다.^(11~14)

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

2.2 크리프 속도와 파단시간 관계

Monkman과 Grant 은 많은 실험을 통해 파단시간과 크리프 속도를 곱한 값은 상수라고 주장하였다.^(8,12) 즉, Fig. 1 에서 정상상태의 크리프 속도의 연장선과 Y축 및 파단시간에서의 Y축의 절편값의 차이($\epsilon_4 - \epsilon_1$)가 많은 고온재료에서 일정한 상수값을 갖는다는 것을 실험을 통하여 제안하였다. 이를 수식으로 표시하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 이를 다시 쓰면 식 (4)와 같다. 식 (4)는 비록 이론적인 근거를 찾기는 힘들지만 공학적으로 크리프 파단수명을 예측하는데 많이 사용되는 유용한 식으로 알려져 있다.⁽⁸⁾

$$\frac{d\epsilon_c}{dt} = \frac{\epsilon_4 - \epsilon_1}{t_r} \quad (3)$$

$$t_r \left(\frac{d\epsilon_c}{dt} \right)_{\min} = C' \quad (4)$$

2.3 크리프 속도의 응력 의존성

크리프 속도와 응력 사이 관계에 대한 식으로 여러 가지 식들이 제안되고 있으나 이들 중에서 가장 많이 사용되고 있는 식은 Norton의 power law 식과 Dorn의 지수함수 식이다.⁽⁸⁾ 전자는 항복응력 이하의 낮은 응력에서 잘 맞으며, 후자는 항복응력 이상의 높은 응력에서 잘 맞는 것으로 보고되어 있다. 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon} = D\sigma^n \tag{5}$$

$$\dot{\epsilon} = D' \exp\left(\frac{\sigma}{\sigma_0(T)}\right) \tag{6}$$

여기서 σ , t , T , t_r , σ_0 는 각각 응력, 실험시간, 절대온도, 파단시간 및 항복강도이다.

2.4 시간-온도 파라미터(TTP)

크리프 수명은 일반적으로 TTP 법을 많이 사용되고 있다. 이들 파라미터법은 Arrhenius 의 온도의존성과 Monkman, Grant 의 크리프 속도와 파단시간의 관계식에 의해 제안되었다. 식 (2)에서 활성화 에너지 ΔH 를 응력에만 의존하는 상수라고 가정하고, 식 (2)를 식 (4)에 대입하면 식 (7)과 같은 전통적으로 많이 사용되는 Larson-Millar 파라미터식

$$P_{LM}(\sigma) = \frac{\Delta H}{2.3R} = T(C + \log t_r) \tag{7}$$

이 된다. 여기서 P_{LM} 은 파라미터이고 T 는 절대온도이다. 또한 식 (2)에서 A 를 응력만의 함수로 가정하면 Orr-Sherby-Dorn, Manson-Haferd, Manson-Succop 등 다른 TTP가 얻어진다.^(8, 15) 그러므로 식 (2)~(6)의 모델식들은 크리프 수명을 예측하는 기초가 되는 식으로서 지금까지 제안된 수명예측 파라미터의 기초가 된다.

2.5 응력-온도 선형 모델

본 연구에서는 Dorn 의 지수함수 식을 사용하여 크리프 수명 예측식을 유도하고자 한다. Dorn 의 식은 식 (6)과 같이 표현되며 또한 식 (2)에서 A 를 응력의 함수로 가정하고 응력의존성 함수 식 (6)으로 대체하고 로그를 취하면 다음과 같은 식 (8)이 얻어진다.

$$\log t_r = A + \frac{B}{T} + \frac{\sigma}{\sigma_0(T)} \tag{8}$$

여기서 항복강도 $\sigma_0(T)$ 는 온도에 의존하는 값으로서 식 (9a)와 (9b)과 같이 온도 또는 온도의 역수와 선형관계가 있다고 가정할 수 있으며 이를 식 (8)에 대입하면 식 (10), 식 (11), 식 (12)와 같은 응력-온도 선형모델식이 얻어진다.

$$\frac{1}{\sigma_0(T)} = \frac{a}{T} + b \tag{9a}$$

$$\frac{1}{\sigma_0(T)} = aT + b \tag{9b}$$

$$\log t_r = A + \frac{B}{T} + b\sigma + \frac{a}{T}\sigma \tag{10}$$

$$\log t_r = A + BT + b\sigma + a\sigma T \tag{11}$$

$$\log t_r = A + \frac{B}{T} + b\sigma + a\sigma T \tag{12}$$

이 모델들은 모두 선형 모델로서 선형 다중회귀법을 이용하면 모델의 계수값을 쉽게 구할 수 있으며 TTP 법과 같이 별도의 상수를 계산하지 않고도 정확한 수명예측하기에 절차가 간단하다. 또한 파단시간에 대한 온도 의존성과 응력의존성이 각각 독립적으로 작용됨으로 TTP 법에서 발생할 수 있는 통합하는 과정에 발생하는 오차를 줄일 수 있다.

이와 유사한 식으로 Eno가 제안한 통계적 선형모델 (statistical linear model)이 있다.⁽⁷⁾ 이는 일반적으로 많이 사용되는 TTP 법을 모두 통합하여 나타낼 수 있는 선형모델로서 다음과 같이 표현된다.

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

$$\log t_r = a + b \log \sigma + cT + d(\log \sigma)T \tag{14}$$

Eno 는 본 모델을 이용하여 Alloy617 의 크리프 수명 예측을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Alloy 617 합금의 크리프 수명을 예측하기 위하여 여러 문헌과 KAERI에서 얻은 800°C~1000°C의 크리프 파단 자료를 수집하여 사용하였다. Fig. 2 는 은 수집된 데이터를 y축을 선형 응력, x축을 로그파단시간으로 한 반로그좌표계(semi logarithm coordinate system)로 나타낸 것으로서 로그 파단시간과 응력 사이에는 선형관계를 잘 따르고 있

음을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 로그과 단시간과 응력사이 관계는 선형 관계를 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 또한 STLM에서 알 수 있듯이 로그과 단시간과 응력은 선형 의존성을 보이는 것으로 표현되고 있다. 그러므로 실험데이터는 본 연구에서 제안한 STLM 과 같은 응력의존성을 나타내고 있으므로 STLM은 Alloy 617의 수명예측에 적합한 모델이라고 판단된다.

Fig. 3은 본 모델을 다중회귀 기법을 이용하여 예측한 결과를 나타내고 있다. 다중 회귀법(multi-regression method)은 하나의 종속변수와 여러 개의 독립변수 사이의 관계를 분석할 때 많이 사용되는 방법으로서 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \quad (15)$$

여기서 Y 는 종속변수, X_1, X_2, \dots, X_n 은 독립변수이다. 예측된 상수 값은 최대가능성예측(maximum likelihood estimate)법을 이용하여 얻어진다. 즉, 예측오차(error of estimation)의 제곱합이 제일 작을 때 얻어지는 상수값으로서 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$res_i = y_i - (a_0 + a_1X_{1i} + a_2X_{2i} + \dots + a_nX_{ni}) \quad (16)$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N res_i^2 \quad (17)$$

여기서 χ^2 은 예측오차의 제곱합이고, res_i 는 i 번째 데이터에 대한 예측오차 값이다.

Fig. 3의 (a), (b), (c)는 각각 STLM1, 2, 3을 이용하여 다중회귀법에 의해 예측된 결과를 나타낸 것이다.

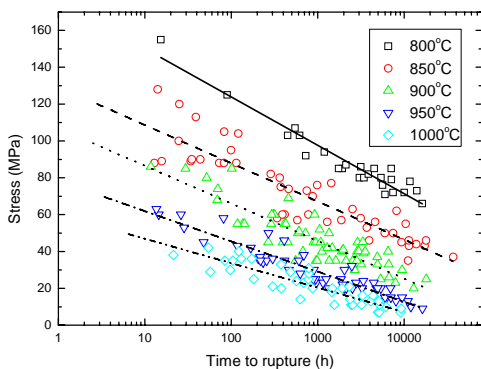


Fig. 2 Relationship between the stress and time to rupture at each temperature

그림에서 망사형 곡면은 예측 값이고 사각형점은 실험데이터이다. 그림에서 보여주듯이 파단시간은 온도 및 응력에 각각 선형관계를 유지한다. 그림

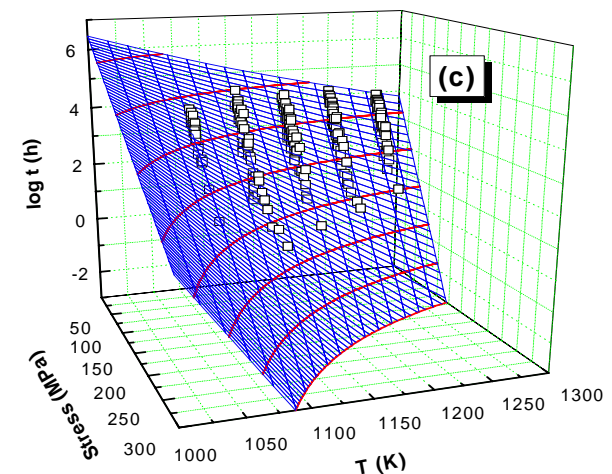
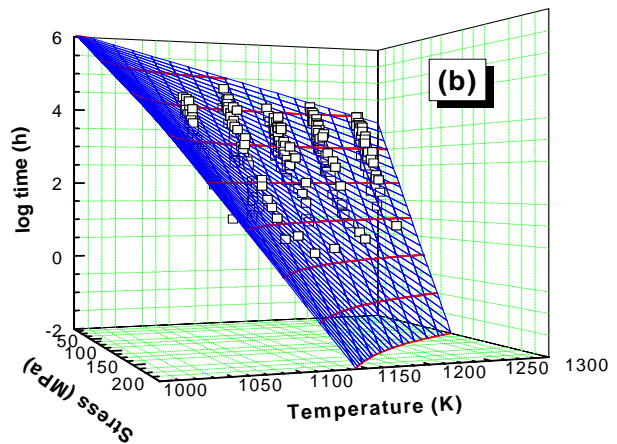
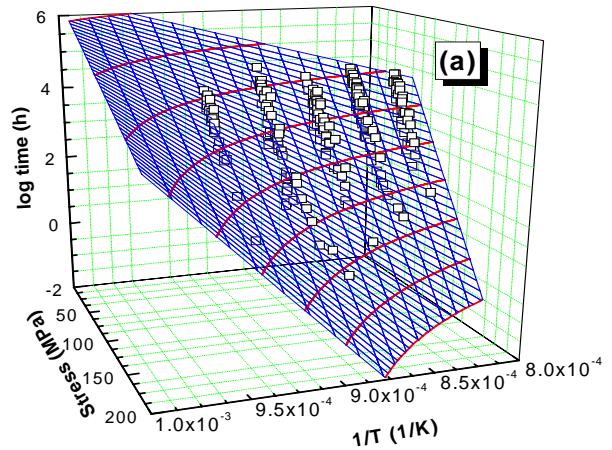


Fig. 3 Multi-regression result and experimental data, (a) for eq. 10, (b) for eq. 11 and (c) for eq. 12

Table 1 Model constants and standard deviation of estimation for eq. 10, eq. 11 and eq. 12

	A	B	a	b	SD
STLM 1 (eq. 10)	1.361E+01	1.333E-01	-7.490E-03	-1.478E-04	0.34976
STLM 2 (eq.11)	-5.226E+00	-1.836E-01	1.176E+04	1.685E+02	0.35046
STLM 3 (eq. 12)	-4.826E+00	1.176E-01	1.130E+04	-1.344E-04	0.34738
Model 1 :	$\log t_r = A + B / T + b\sigma + a\sigma / T$				
Model 2 :	$\log t_r = A + BT + b\sigma + a\sigma T$				
Model 3 :	$\log t_r = A + B / T + b\sigma + a\sigma T$				

※ A, B, a and b are constants of the models determined by multi-regression method

Table 2 Model constants and standard deviation for eq. 13 and eq. 14

	a	b	c	d	SD
Eno's model 1 (eq. 13)	4.525E+01	-1.407E+01	-2.970E-02	8.150E-03	0.39591
Eno's model 2(eq. 14)	-3.051E+01	8.345E+00	4.816E+04	-1.518E+04	0.37874
Model 1:	$\log t_r = a + b \log \sigma + c/T + d(\log \sigma)/T$				
Model 2:	$\log t_r = a + b \log \sigma + cT + d(\log \sigma)T$				

※ Where a, b, c and d are constants of the models determined by multi-regression method

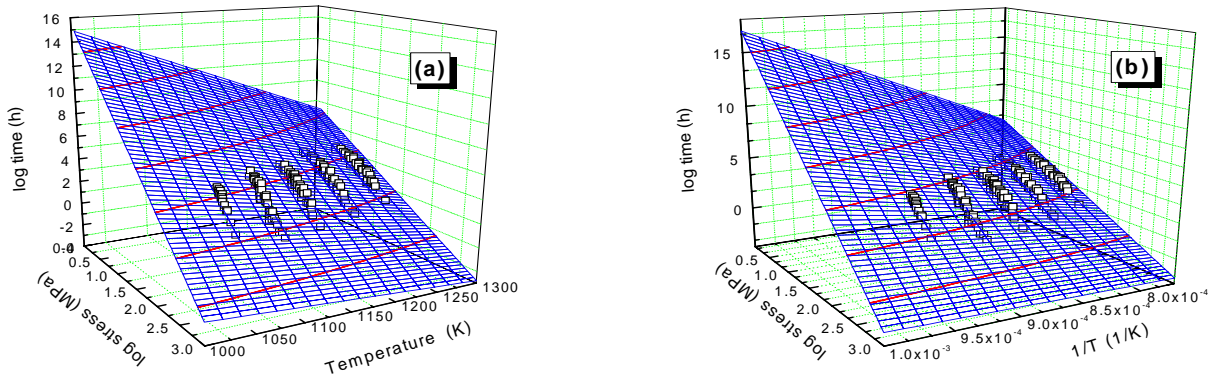


Fig. 4 Prediction result for eq. 13 and eq. 14 using multi-regression method

의 횡방향의 빨간색 선은 일정한 파단시간에서 응력과 온도와의 관계를 나타내는 것으로서 비선형 관계를 나타내고 있음 보여주고 있다. 또한 예측값과 실험데이터는 잘 일치됨을 알 수 있으며, 응력-온도선형모델은 모든 상수값을 통계적인 방법에 의해 얻어지므로 모든 실험데이터에 가장 적절한 값을 갖게 되며 선형관계로 장시간 파단시간을 예측함으로 예측 함수의 발산이 없으므로 신뢰성이 높은 예측을 할 수 있다.

Fig. 4 는 Eno의 선형모델을 이용하여 다중회귀 분석한 결과이다. 이 결과와 SMLM의 결과를 비교하면 예측곡면이 볼록한 방향이 다르게 나타나고 있는데 이는 응력축의 스케일이 다르기 때문이다. 즉 SMLM에서는 응력축이 선형인 반면 Eno의 모델에서는 로그 스케일로 나타냈기 때문이다. Table 1 및 2는 STLM과 Eno의 모델을 이용하여

다중회귀 분석한 결과 얻은 모델 상수값과 표준편차를 나타내고 있다. 여기서도 보여주듯이 STLM의 표준편차가 Eno의 모델에 비해 작게 나타나고 있다. 또한 Table에서 제시한 상수값에 의해 임의의 온도 및 응력에서 크리프 파단시간을 예측할 수 있다.

Fig. 5 과 Fig. 6 은 두 개의 모델에 의해 예측된 오차의 표준편차를 각 온도에서 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보여주듯이 표준오차 값은 STLM이 1123K를 제외한 모든 온도에서 Eno의 선형모델에 비하여 작게 나타나고 있다. 그러므로 STLM이 Eno의 모델에 비해 예측 정확도가 우수하다는 것을 알 수 있다. 이는 응력과 파단시간 사이의 관계가 x축을 로그 응력축으로 했을 때보다 선형 응력축으로 했을 때 선형관계가 더 잘 맞기 때문이라고 판단된다.

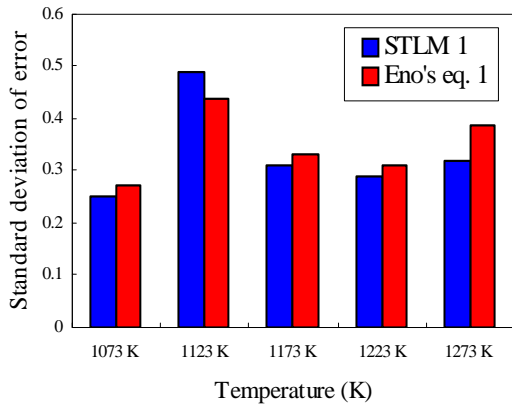


Fig. 5 Comparison of prediction result between eq.10 and eq. 13

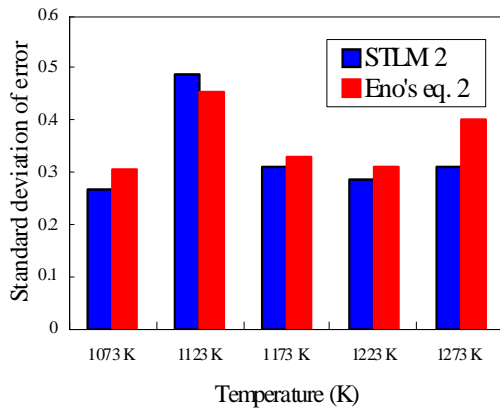


Fig. 6 Comparison of prediction result between eq.11 and eq. 14

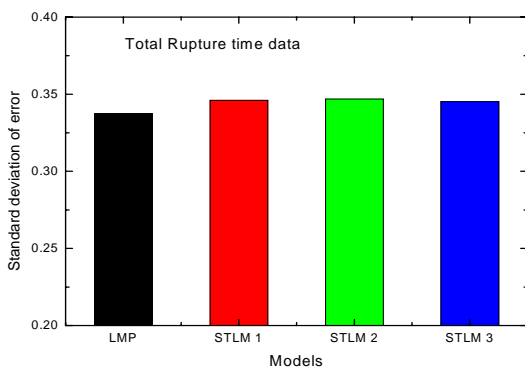


Fig. 7 Comparison of standard deviation between L-M and STLM methods for total data

Fig. 7 과 Fig. 8 은 전통적으로 많이 상용되고 있는 L-M 법과 본 모델의 예측 오차를 비교하여 나타난 것이다. Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 전체 데이터에 대한 크리프 수명의 예측오차는 L-M 법이 가장 작은 것으로 나타나고 있다. 하지만 Fig. 8 과

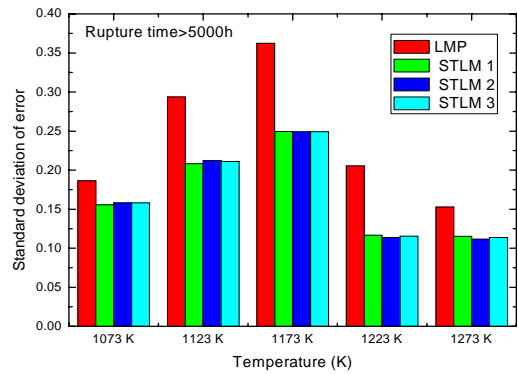


Fig. 8 Comparison of standard deviation between L-M and STLM method for over 5000h data at each temperature

같이 5000h 이상의 장시간에서는 STLM 의 예측오차가 모든 온도에서 L-M 법에 비해 훨씬 작은 것으로 나타났다. 이는 L-M 법의 경우 상수값 C 의 값에 따라 예측값이 달라지고 일반적으로 많이 사용되고 있는 C=20 을 사용하였을 때 실제값에 비하여 크게 예측되기 때문이다. 하지만 STLM 은 별도의 상수값을 사용하지 않으므로 장시간에서도 데이터에 가장 잘 맞는 회귀값을 얻을 수 있다. 따라서 본 모델은 장시간 크리프 수명예측에서 L-M 법에 비해 우수하게 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온가스로의 구조재료로 사용되는 alloy 617 합금의 크리프 수명을 예측하기 위하여 여러 문헌 및 한국원자력연구소에 얻은 데이터를 수집 하였으며 정확한 파단수명을 예측하기 위하여 STLM 을 제안하였다.

- (1) STLM 은 Dorn 과 Arrhenius 의 모델을 적용하여 유도되었으며 본 모델에서 파단시간과 응력 및 온도 사이 관계는 선형으로 표현되므로 장시간 예측의 신뢰성이 높다.
- (2) 오차의 표준편차를 사용하여 STLM 의 정확성을 Eno 의 모델과 L-M 법과 비교 분석한 결과 STLM 이 우수하다는 것을 확인하였다.
- (3) STLM 을 L-M 법과 비교 분석한 결과 전체 데이터에서는 큰 차이가 없었지만 장시간 수명 예측에서는 모든 온도에서 STLM 이 훨씬 정확하게 예측함을 확인하였다.
- (4) STLM 은 크리프 강도와 항복강도의 차이가 크지 않는 재료의 장시간 크리프 수명예측에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 연구개발 사업 중 초고온가스로 요소기술개발 과제에서 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," *Transactions of the KSME, A*, Vol.29. No.1, pp.74~80.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Le May, I., 1979, "Developments in Parametric Methods for Handling Creep and Creep-Rupture Data," *Transactions of the ASME*, Vol. 101, pp. 326~330.
- (8) Penny, R. K. and Marriott, D. L., 1995, "Design for Creep" second edition, *Chapman & Hall*, London, pp. 8~42.
- (9) Eno, D. R., Yong, G. A. and Sham, T. L., 2008, "A Unified View of Engineering Creep Parameters," *Proceedings of PVP2008*, pp. 1-16.
- (10) Norton, F. H., 1929, "The Creep of Steel at High Temperatures," *McGraw-Hill*, Londdon.
- (11) 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.
- (12) Garofalo, F., 1966, "Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals" *The Macmillan Co.*, New York, pp. 1~21 and pp. 200~220.
- (13) 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," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 11, pp. 1420~1427.
- (14) 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," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 11, pp. 1463~1471.
- (15) Larson, F. R. and Miller, J., "A Time-Temperature Relationship for rupture and creep Stresses," *Trans., ASME-174*(No.2)