

응력-온도 선형모델에 의한 Alloy 617의 장시간 크리프 수명 예측 Long Creep-Life Prediction of Alloy 617 by Stress-Temperature Linear Model

*윤승남^{1#}, 김우곤¹, 정익희², 김용완¹

¹ S. N. Yin¹(yjsongnam@kaeri.re.kr), W. G. Kim¹, I. H. Jung² and W. Y. Kim¹

¹ 한국원자력연구원, ²부경대학교 대학원

Key words : Alloy 617, Time-Temperature Parameter (TTP), Time to Rupture, Stress-Temperature Linear Model (STLM), Very High Temperature Reactor (VHTR)

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 설계목적에 충분한 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⁾ TTP 법은 크리프 시험에서 얻어지는 크리프 응력과 파단시간의 관계를 나타내는 각 온도별 그래프 곡선의 기울기가 온도와 직선관계를 갖는 선형 파라미터 법이다.⁽⁴⁾ 이들 파라미터들은 Monkman-Grant의 관계식에 기초하여 유도되었으며 여기서 크리프 속도는 응력의존성과 온도의존성으로 표현되어 진다.

한편 크리프 속도의 응력-의존성에 대하여 많은 모델이 제안되어 있으나 이중에서 가장 많이 사용되는 것은 Norton⁽⁵⁾의 power law와 Dorn⁽⁴⁾의 지수함수 식이다. 전자는 $0.8\sigma_0$ (항복응력) 이하의 응력에서 잘 맞으며, 후자는 $1.2\sigma_0$ 이상에서 잘 맞는 것으로 보고되어 있다.⁽⁶⁾ Alloy 617 합금의 경우 파단강도에 비해 항복강도가 낮으므로 대부분의 크리프 시험이 항복강도 이상에서 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 선형모델의 유도

크리프 변형은 응력, 온도 및 시간의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_c = f_1(\sigma) f_2(t) f_3(T) \quad (1)$$

여기서 $f_1(\sigma)$, $f_2(t)$, $f_3(T)$ 는 각각 응력, 시간, 온도의 함수를 나타내며 특히 $f_1(\sigma)$ 는 크리프 변형률의 응력의존성을 나타내는 함수로서 많은 모델식이 제안되어 있지만 본 연구에서는 이들 중에서 Dorn의 지수함수 식을 사용하여 크리프 수명 예측식을 유도하고자 한다. Dorn의 식은 식(2)와 같이 표현되며 크리프 속도의 온도 의존성 함수는 Arrhenius의 식(3)을 사용하였다. 또한 Monkman과 Grant는 파단 시간과 크리프 속도를 곱한 값은 상수라고 제안하였다. 이들은 모두 크리프 수명을 예측하는 기초가 되는 식으로서 지금까지 제안된 수명예측 모델의 기초가 된다.

$$A = D' \exp\left(\frac{\sigma}{\sigma_0(T)}\right) \quad (2)$$

$$\frac{d\epsilon_c}{dt} = A(\sigma) \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \quad (3)$$

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

여기서 σ , t , T , t_r , σ_0 는 각각 응력, 실험시간, 온도, 파단 시간 및 항복강도이며 $A(\sigma)$ 는 응력에만 의존하는 상수이다. 식(3)을 식(4)에 대입하면 식(5)과 같이 Larson-Millar 파라미터식

$$P_{LM}(\sigma) = \frac{\Delta H}{2.3R} = T(C + \log t_r) \quad (5)$$

이 된다. 또한 식(3)에서 응력의존성 함수를 식(2)로 대체하고 \log 를 취하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\log t_r = A + \frac{B}{T} + \frac{\sigma}{\sigma_0(T)} \quad (6)$$

여기서 항복강도는 식(7a)와 (7b)과 같이 온도 및 온도의 역수와 선형관계가 있다고 가정하고 식(6)에 대입하면 식(8), 식(9), 식(10)과 같은 응력-온도 선형모델식이 얻어진다.

$$\frac{1}{\sigma_0(T)} = \frac{a}{T} + b \quad (7a), \quad \frac{1}{\sigma_0(T)} = aT + b \quad (7b)$$

$$\log t_r = A + \frac{B}{T} + b\sigma + \frac{a}{T}\sigma \quad (8)$$

$$\log t = A + BT + b\sigma + a\sigma T \quad (9)$$

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

이 모델들은 모두 선형 모델로서 선형 다중회귀법을 이용하면 상수값을 쉽게 구할 수 있으며 TTP 법과 같이 별도의 상수를 계산하지 않고도 정확한 수명예측하기에 절차가 간단하다.

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. 1~3은 본 모델을 다중회귀 기법을 이용하여 얻은 예측 결과를 나타내고 있다. 그래프에서 보여주듯이 예측값과 실험데이터는 잘 일치됨을 알 수 있으며, 응력-온도선형모델은 모든 상수

값을 통계적인 방법에 의해 얻어지므로 모든 실험데이터에 가장 적절한 값을 갖게 되며 장시간에서 예측값의 신뢰성이 높다.

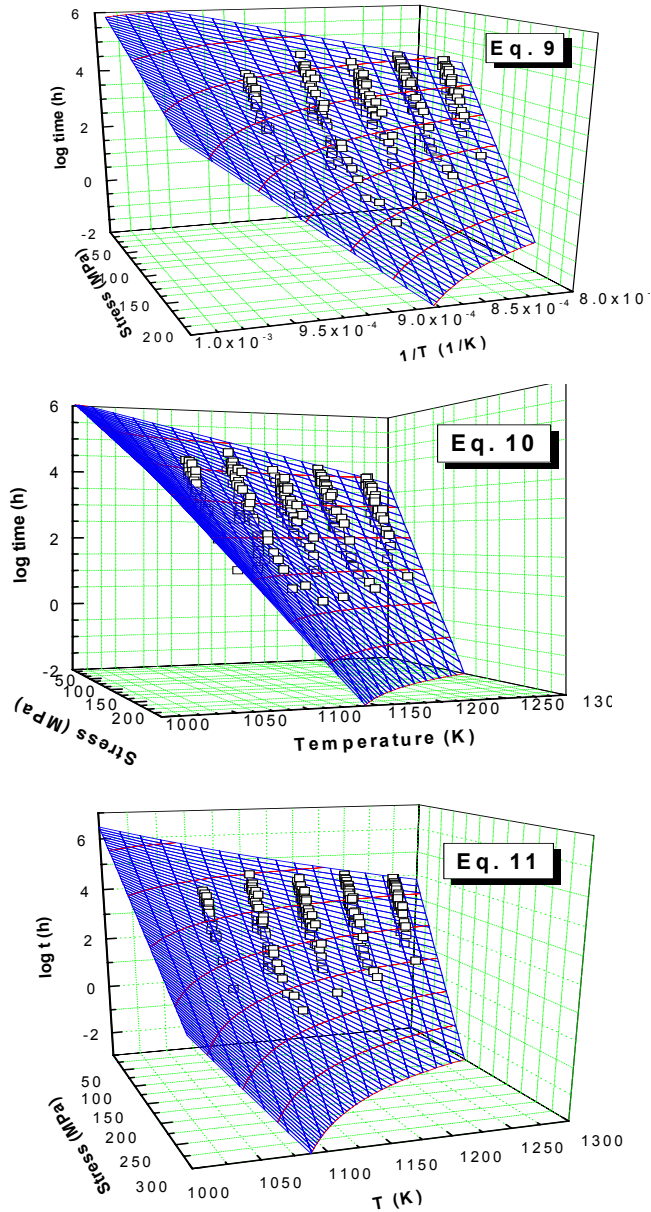


Fig. 1 Creep rupture life Multi-regression for eq. 9 ~11

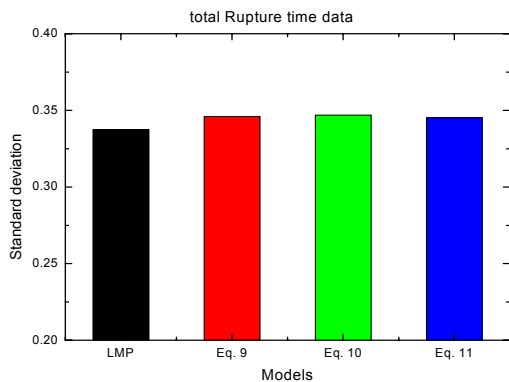


Fig. 2 Comparison between L-M and STLM method in standard deviation of total error

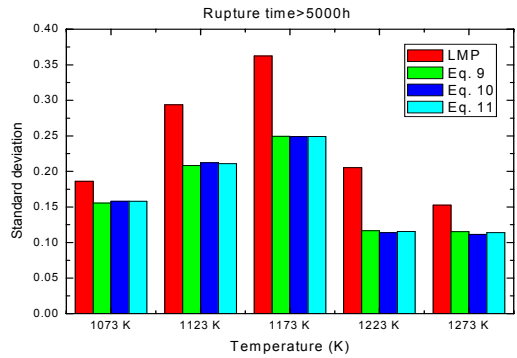


Fig. 3 Comparison between L-M and STLM method in standard deviation of long life error at each temperature

Fig. 2 와 Fig. 3 은 일반적으로 많이 사용되고 있는 L-M 법과 본 모델의 예측 오차를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 2 에서 볼 수 있듯이 전체 데이터에 대한 크리프 강도의 예측오차는 L-M 법이 가장 작은 것으로 나타내고 있다. 하지만 Fig. 3 과 같이 5000 h 이상의 장시간에서는 본 모델의 예측오차가 모든 온도에서 L-M 법에 비해 훨씬 작은 것으로 나타났다. 그러므로 본 모델은 장시간 크리프 수명예측에서 L-M 법에 비해 우수함을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 고온가스로의 구조재료로 사용되는 alloy 617 합금의 크리프 수명을 예측하기 위하여 Dorn 의 모델을 적용한 응력-온도선형모델(stress-temperature liner model, STLM)을 제안하고, Larson-Millar(L-M)법과 비교 분석한 결과 장시간 수명을 더 정확하게 예측함을 확인하였다. 또한 본 모델은 크리프 강도와 항복강도의 차이가 크지 않는 재료의 장시간 크리프 수명예측에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

후기

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. R.W. Swindemana and M. J. Swindemanb, "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, 2008.
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. R. K. Penny and D. L. Marriott, "Design for Creep" second edition, Chapman & Hall, London, pp. 8-42, 1995.
5. F. H. Norton, "The Creep of Steel at High Temperatures," McGraw-Hill, London, 1929.
6. H. J. Penkalla, H. H. Over and F. Schubert, "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, 1984.