초고온 가스로용 Alloy 617 의 장시간 크리프 강도 외삽법 검토

Overview on Long-term Creep Strength Extrapolation Methods of Alloy 617 for Very High Temperature Reactors

*#윤송남 [1], 김우곤 [1], 박재영 [2], 김용완 [1]

* S. N. Yin [1](yjsongnam@kaeri.re.kr), W. G. Kim[1], J. Y. Park[2] and W. Y. Kim[1]

[1] 한국원자력연구원, [2] 부경대학교 대학원

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

1. 서론

화석연료의 사용으로 인한 지구온난화 영향으로 새로운 친환경 에너지에 대한 관심이 점차 높아지고 있으며, 원자력에 의한 수소생산은 이러한 에너지 문제를 해결하는 하나의 대안으로 떠오르고 있다. 수소생산용 초고온가스로는 매우 높은 고온(>950°C)에서 30 년 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 장시간의 크리프 수명을 예측하는 것이 필요하다.[1, 2]

단시간의 크리프 자료를 이용하여 장시간 크리프 수명을 예측하기 위하여 다양한 방법들이 제안되어 왔다[3]. 이러한 방법들은 모두 크리프 속도와 응력사이의 관계식과 Monkman-Grant 식에 기초하여 제안된다. 한편 크리프 속도와 응력의 관계에 대하여 많은 모델이 제안되어 있으나 이들은 Norton[4]의 power law, Dorn[5]의 지수함수 및 McVetty 의 sinh 함수 등 3 가지 형태로 분류할 수 있다. 여기서 power law 의 경우 비교적 작은 응력 구간에서는 계수와 지수가 일정한 값으로 나타나지만 넓은 응력 구간에서는 이들 상수들의 값이 변하는 단점이 있다[6]. 하지만 비교적 좁은 응력 구간에서는 선형관계가 잘 나타남으로 다단계로 구간을 나누면 만족할만한 예측을 할 수 있다. McVetty 의 sinh 함수는 지금까지 제안된 식 중에서 가장 잘 맞는 식으로 보고되어지고 있으나 함수식의 복잡성으로 인한 상수값 결정에 어려움이 있다. 이에 비해 Dorn 의 지수함식은 sinh 함수와 비슷한 커브를 보이면서 수식적으로 간단함으로 복잡한 예측과정을 간편화할 수 있다.

본 연구에서는 alloy 617 합금의 크리프 수명을 예측하기 위하여 Dorn 의 모델에 의한 응력-온도 선형 모델(stress-temperature liner model, STLM)을 유도하였으며, 이 모델을 여러 문헌에서 얻은 alloy 617 의 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.

$$\varepsilon_c = f_1(\sigma) f_2(t) f_3(T) \tag{1}$$

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 있다. 이들 식들은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\varepsilon} = K\sigma^n \tag{2}$$

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon} = K_0(\exp(K_1\sigma) - 1) & (3) \\ \dot{\varepsilon} = K_0 \exp(K_1\sigma) & (4) \end{cases}$$

$$\dot{\varepsilon} = K_4 \sinh\left(\frac{K_5\sigma}{RT}\right)\exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \tag{5}$$

Fig. 1, Fig. 2 는 위의 모델식들을 비교하여 나타낸 것이다. Fig.1 에서 볼 수 있듯이 비교적 넓은 x 축의 구간에서 (2)식과 (3)~(5)식은 비교적 큰 차이를 보이지만 (3)~(5)은 거의 합치됨을 알 수 있다. 그러므로 (5)식을 (3), (4)식으로 대체하여 사용하여도 큰 오차가 없음을 알 수 있다. 하지만 Fig.2 와 같이 x 값이 비교적 작을 경우에는 비교적 큰 차이을 보이므로 예측결과에 일정한 차이를 보일 것으로 판단된다.

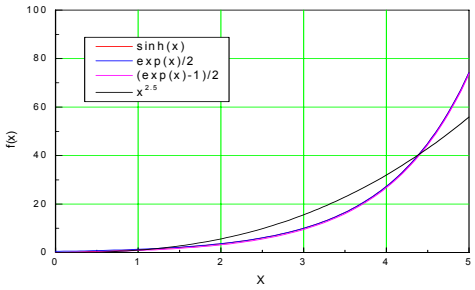

Fig. 1 apparent coincidence of the eq. (3)~(5) and divergence of the eq. (2) at large value of x

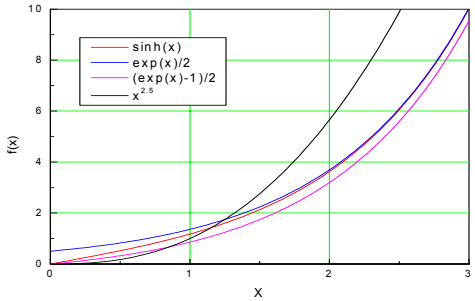

Fig. 2 Divergence of the four functions at small value of x

본 연구에서는 Dorn 의 식은 식(4)와 Arrhenius 의 식(6)을 Monkman-Grant 의 파단 시간과 크리프 속도 관계식에 적용하여 크리프 수명 예측식을 유도하고자 한다. 이들은 모두 크리프 수명을 예측하는 기초가 되는 식으로서 지금까지 제안된 수명예측 모델의 기초가 된다.

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

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = A(\sigma)\exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right) \tag{7}$$

$$t_r \left(\frac{d\varepsilon_c}{dt} \right)_{\min} = C' \tag{8}$$

여기서 σ, t, T, t_r σ_0는 각각 응력, 실험시간, 온도, 파단시간 및 항복강도이며 $A(\sigma)$는 응력에만 의존하는 상수이다. 식(6)을 식(7)에 대입하면 식(9)과 같이 Larson-Millar 파라미터식

$$P_{LM}(\sigma) = \frac{\Delta H}{2.3R} = T(C + \log t_r) \tag{9}$$

이 된다. 또한 식(6)에서 응력의존성 함수를 식(4)로 대체하고 log 를 취하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\log t_r = A + \frac{B}{T} + \frac{\sigma}{\sigma_0(T)} \tag{10}$$

여기서 항복강도는 식 (11a)와 (11b)과 같이 온도 및 온도의 역수와 선형관계가 있다고 가정하고 식(10)에 대입하면 식(12), 식(13), 식(14)와 같은 응력-온도 선형모델식이 얻어진다.

$$\frac{1}{\sigma_0(T)} = \frac{a}{T} + b \quad \text{(11a)}, \qquad \frac{1}{\sigma_0(T)} = aT + b \quad \text{(11b)}$$

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

$$\log t = A + BT + b\sigma + a\sigma T \tag{13}$$

$$\log t_r = A + \frac{B}{T} + b\sigma + a\sigma T \tag{14}$$

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 KAERI 에서 얻은 800°C~1000°C 의 크리프 파단 자료를 수집하여 사용하였다.

Fig. 3 와 Fig. 4 는 일반적으로 많이 상용되고 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.

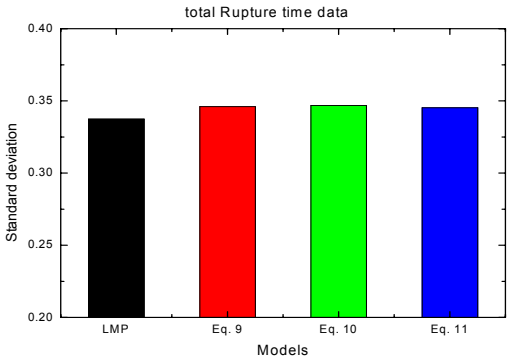

Fig. 3 Comparison between L-M and STLM method in standard deviation of total error

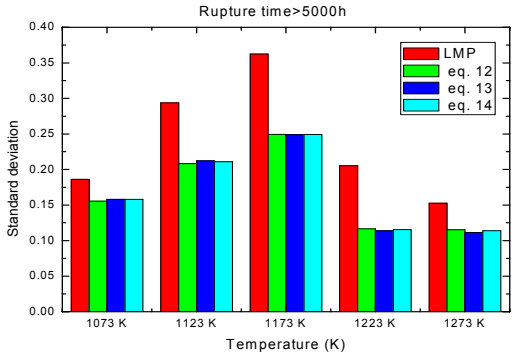

Fig. 4 Comparison between L-M and STLM method in standard deviation of long life error at each temperature

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. F. H. Norton, “The Creep of Steel at High Temperatures,” McGraw-Hill, Londdon, 1929.
5. R. K. Penny and D. L. Marriott, “Design for Creep” second edition, Chapman & Hall, London, pp. 8-42, 1995.
6. G. Dimmler, P. Weinert and H. Cerjak, “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, 2008.
7. 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.