참조응력에 의한 장시간 크리프 수명 예측
Long-term Creep Life Extrapolation by Reference Stress

*#윤송남 [1], 김우곤 [1], 박재영 [2], 장진성 [1]
#*S. N. Yin[1](yjsongnam@kaeri.re.kr), W. G. Kim[1], J. Y. Park[2], J. Jang[1]
[1] 한국원자력연구원 원자력재료연구부, [2] 부경대학교 대학원

Key words : Creep life, Type 316LN stainless steel, Reference stress, Taylor series model, Tensile strength

1. 서론

제 4 세대 미래원전의 주요 구조부품들은 500 ºC 이상의 고온 영역에서 40 년 이상의 설계수명동안 안전하게 운전되어야 하므로 해당 재료의 장시간에 걸친 크리프 수명 예측은 매우 중요하다.(1) 고온구조 재료의 크리프 수명은 크리프 속도와 밀접한 관계가 있으므로 크리프 속도의 온도 의존성 및 응력 의존성에 의하여 크리프 수명을 예측하는 방법이 주로 사용되고 있다. 대표적 방법으로 Larson-Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D), Manson-Haferd (M-H) 및 Manson-Succop (M-S) 파라미터 방법이 사용되며, 이들은 모두 시간-온도 파라미터 (TTP) 법으로 온도 및 응력 의존성에 기초하여 개발된 것이다. TTP 법의 다항식에 의한 수명예측방법은 장시간의 수명예측 시 잘 맞지않는 어려움이 있으며 이러한 다항식의 단점을 극복하기 위하여 새로운 방법들이 개발되어지고 있다.(2, 3)

현재 제안된 크리프 속도의 응력-의존성에 대한 모델 식들을 보면 Norton(3)은 실험을 통하여 power law 와 지수함수 모델을 제시하였으나 Fig. 1 에서 나타낸 바와 같이 power law 모델은 응력구간에 따라 상수(n) 값이 변하므로 넓은 응력범위의 수명예측 시 비교적 큰 오차가 발생한다. 그리고 Dorn(3)의 지수함수 모델은 비교적 높은 응력에서는 잘 맞지만 낮은 응력에서는 큰 오차가 발생하며, McVetty(3)는 연속손상 메커니즘에 기초하여 비교적 넓은 구간에 크리프 속도를 잘 표현할 수 있는 sinh 함수(Hyperbolic Sine Function) 모델을 제안하였으나 sinh 함수는 비선형식으로서 비교적 큰 피팅 오차가 발생할 수 있다. 또한 Yin 등(4)은 sinh 함수를 Taylor 급수로 전화시킨 Taylor series (T-S) 및 isothermal T-S (IT-S) 모델을 사용하면 비교적 정확한 크리프 수명을 예측할 수 있음을 보여준 바 있다. 또한, Wilshire(5)는 ln (σ/σ_{TS})와 $t_r\exp(-Q/RT)$ 관계식이 power law 에 적합하다고 제안하였으며, Grade 91, Grade 92 등 여러 내열강의 크리프 수명 예측에 적합함을 보여주었다. 그러나 미래원전의 주요부품 소재로 널리 사용도리 것으로 예상되는 Type 316LN 스테인리스강의 크리프 수명예측에 적용한 결과 실제 인장강도(σ_{TS}) 값을 사용할 경우 비교적 큰 오차가 발생하였다. 이러한 문제점을 보완하는 방법으로 인장강도 값 대신에 매우 짧은 시간에서의 강도값을 참조응력으로 대체하는 참조응력 (reference stress, RS) 법을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 미래원전의 주요 구조 소재로 널리 활용될 것으로 예상되는 Type 316LN 스테인리스 강에 대하여 Wilshire 모델에서 인장강도 값을 참조응력으로 대체하여 크리프 수명을 예측하고 그 결과를 이미 알려져 있는 L-M, T-S, IT-S 모델들에 의한 예측결과와 비교하여 적합도 정도를 비교 분석하였다.

2. 참조응력 법

참조응력 법의 기초가 되는 Wilshire 모델은

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{TS}}\right)=\exp\left\{-K_1\left[t_r\exp\left(-Q/RT\right)\right]^u\right\} \qquad (1)$$

이며, 여기에서 σ 는 응력, T 는 절대온도, t_r 은 파단 시간, K_1, u 는 재료상수이다. 또한 Q 는 활성화 에너지로서 일반적인 합금에서는 300 [KJ/mol] 이며, R 은 기체상수로서 8.314 [J/ mol·K] 이다. σ_{TS} 는 파단시간이 0 에 가까울 때 응력 값으로서 인장강도이다. 하지만 316LN 강의 경우 실제 재료의 인장강도 값을 사용하면 비교적 큰 오차가 발생하였으며 이를 보완하기 위하여 참조응력 개념을 도입하였다.

본 연구에서는 참조응력의 결정에 다음과 같은 두가지 방법을 사용하였다. 크리프 데이터를 $\log t_r$-$\log\sigma$ 축과 $\log t_r$-σ 축으로 Fig. 2 와 Fig. 3 과 같이 각각 나타내면, Fig. 2 는 응력과 파단시간이 power law 관계에 있고, Fig. 3 은 지수관계임을 알 수 있다. 그림에서 직선은 1000 시간 이하의 크리프 데이터에 대한 선형회귀식에 의해 결정되었으며 매우 짧은 시간에서의 크리프 강도인 참조응력 값은 직선상에서 0.1 시간에 해당하는 응력 값으로 결정하였다.

Fig. 4 는 두 가지 방법으로 각각 결정된 참조응력값으로 Wilshire 모델의 인장강도를 대체하여 계산한 결과를 나타낸 것으로서 두가지 방법은 모두 비슷한 결과로 각 온도의 실험 데이터와 예측 값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 두가지 방법은 참조응력을 결정하는데 적합한 방법으로 판단된다.

3. 크리프 수명 예측 결과 및 토론

참조응력을 이용한 수명예측의 적합성을 판단하기 위하여 L-M, T-S 및 IT-S 모델들을 각기 비교 분석하였다.

T-S 와 IT-S 모델은 Taylor 급수를 이용한 수명예측 모델로서 파단시간은 다음 식으로 각각 표현된다.

$$\log t_r = A+\frac{B}{T}-m\log\left((\beta\sigma/T)+\frac{(\beta\sigma/T)^3}{3!}+\frac{(\beta\sigma/T)^5}{5!}\right) \qquad (2)$$

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

여기서 A, A', B, C, m, β는 재료 상수로서 최소자승법에 의해 결정되고 t_r, T, σ는 각각 파단시간, 절대온도, 응력이다.

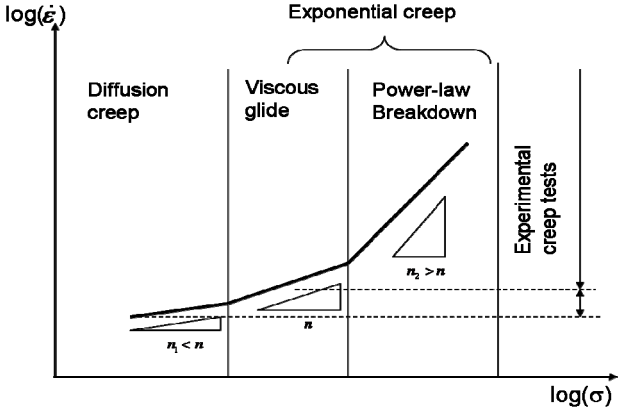

Fig. 1 Schematic illustration for stress dependence of the steady state creep rate

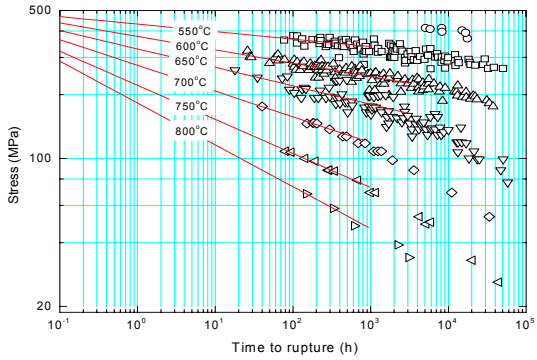

Fig. 2 linear fitting line and creep data for determination of reference stresses in power low relationship

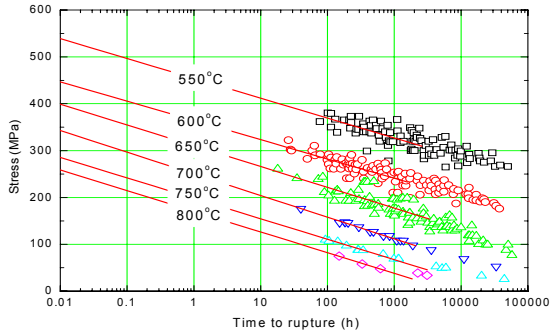

Fig. 3 linear fitting line and creep data for determination of reference stresses in exponential relationship

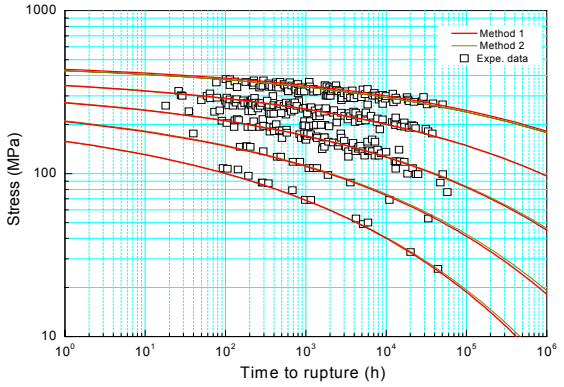

Fig. 4 The result of creep life prediction by tow method of reference stress

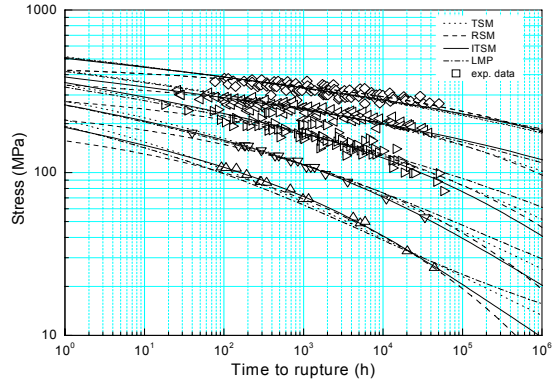

Fig. 5 Comparison of the experimental data and prediction result for T-S, IT-S, L-M and RS method at each temperature

Fig. 5 는 316LN 스테인리스강의 크리프 데이터에 각 모델을 적용하여 수명 예측을 실행한 결과이다. 그림에서 L-M 법은 장시간 수명예측에 있어서 실험 데이터에 비해 큰 값으로 예측되고 있다. 이는 L-M 법의 단점으로서 다른 재료에서도 비슷한 결과로 나타내고 있다.[1] 또한 T-S, RS 및 IT-S 법은 실험 데이터에 아주 잘 일치함을 보여 주고 있으므로 316LN 강의 수명예측에 적합한 모델임을 알 수 있다.

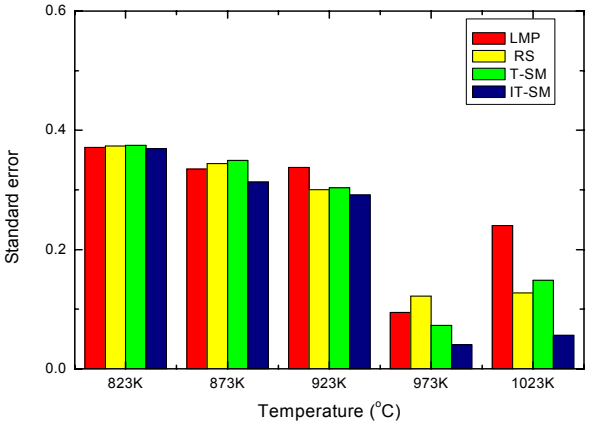

Fig. 6 Standard error determined from L-M, T-S, RS, IT-S method at each temperature

Fig. 6 는 각 온도에서 상술한 모델들에 의해 예측된 결과와 실험 데이터 사이의 차이를 나타내는 표준오차를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보여주듯이 823K, 873K, 923K 등 낮은 온도에서는 모든 모델이 비슷한 값으로 나타나고 있으나 973K 와 1023K 의 높은 온도에서는 L-M 법이 상대적으로 큰 값으로 나타나며 IT-S 모델이 상대적으로 작은 값으로 나타나고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 316LN 스테인리스 강에 대하여 Wilshire 의 모델에서 인장강도 값을 참조응력으로 대체하여 크리프 수명을 예측하고 그 결과를 L-M, T-S 및 IT-S 모델에 의한 예측결과와 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Wilshire 모델에서 참조응력으로 인장강도를 대체하여 수명 예측한 결과 높은 정확성을 보였다.
2. 참조응력을 결정함에 있어서 1000 시간 이하의 비교적 짧은 시간의 크리프 데이터로부터 참조응력을 결정할 수 있는 두가지 방법을 제안하였다.
3. RS 법에 의한 예측결과는 T-S 법과 비슷한 결과로 크리프 수명을 비교적 잘 예측하는 것으로 나타냈다.

참고문헌

1. Yin, S. N., Kim, W. G., Ryu, W. S. and Yi, W., “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, 2007.
2. Manson, S. S., and Ensign, C. R., “Interpolation and Extrapolation of Creep Rupture Data by the Minimum Commitment Method-Part 2,” *ASME MPC-7*, New York, pp. 299~ 398, 1978.
3. Penny, R. K. and Marriott, D. L., 1995, “Design for Creep” second edition, *Chapman & Hall*, London, pp. 8~42.
4. Yin, S. N., Kim, W. G., Park, J. Y, Kim, S. J., and Kim, Y. W., “Long-term Creep Life Prediction of Alloy 617 Using Taylor Series,” *Trans. of the KSME* (A), Vol.34. No.4, 2009. In Press.
5. Wilshire B. and Scharning P.J. “Long-term Creep Life Prediction for a High Chromium Steel” Scripta Materialia, Vol. 56, pp 701-704, 2007.