

크리프 수명 예측에 미치는 마스터 커브 회귀식의 영향

Effect of Master-Curve Regression Equation in Creep-Life Prediction

*윤송남¹, 김우곤¹, 박재영², 장진성¹

*S. N. Yin¹(yjsongnam@kaeri.re.kr), W. G. Kim¹, J. Y. Park², J. Jang¹

¹ 한국원자력연구원, ²부경대학교 대학원

Key words : Sodium cooled fast reactor, Creep rate, Creep life, Taylor series model, Standard error

1. 서론

소듐냉각고속로 (sodium cooled fast reactor, SFR) 등의 제4세대 미래원전의 주요 구조 부품들은 550°C의 고온에서 60년 동안의 수명을 목표로 하여 설계되기 때문에 사용 재료의 장시간 크리프 변형 및 수명 예측은 매우 중요하다.⁽¹⁾

고온용 재료에 대한 단시간의 크리프 자료를 이용하여 장시간의 크리프 수명을 예측하기 위하여 일반적으로 시간-온도 파라미터 (time-temperature parameter, TTP) 방법이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 온도와 시간을 하나의 파라미터로 통합하고 파라미터와 응력 사이의 관계를 하나의 마스터 커브 회귀식으로 표현하는데 일반적으로 다항식을 사용한다. 그러나 이러한 다항식은 차수에 따라 예측 값이 변하며, 특히 고차다항식의 경우 쉽게 발산되기에 장시간 수명예측에 적합하지 않다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 Eno⁽²⁾는 선형통계모델을 제안했으나 비교적 큰 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 Wilshire⁽²⁾는 로그함수를 이용한 직선회귀 모델을 제안하였으며 Yin-Kim⁽²⁾은 Taylor Series(T-S)를 이용한 T-S 모델과 IT-S (Isothermal Taylor Series) 모델을 제안한바 있다.

본 연구에서는 소듐냉각고속로의 중간열교환기 후보재료로 연구되고 있는 316LN 스테인리스강의 장시간 크리프 수명을 예측하기 위하여 500°C ~ 700°C의 크리프 파단자료를 실험 및 문헌으로부터 수집하여 다항식, Wilshire, T-S, IT-S 등의 모델들을 이용하여 장시간 수명을 예측하였다. 또한 이들 회귀식이 예측결과에 미치는 영향을 표준오차를 통하여 비교 분석하였다..

2. 시간-온도 파라미터 해석

Fig. 1과 같이 재료에 일정한 응력이 작용하면 원자들의 활성화 에너지는 변화한다. 이는 원자를 한 방향으로 이동시키고 이 때문에 크리프 변형이 발생하는데 수식을 나타내면 다음과 같다.⁽³⁾

$$\dot{\epsilon} = A \sinh\left(\frac{a\sigma}{RT}\right) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

또한 Monkman-Grant의 $t_r \dot{\epsilon} = C$ 를 이용하면

$$P_D = t_r \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = \frac{D}{A} \sinh\left(\frac{a\sigma}{RT}\right) \quad (2)$$

이 되며 이는 Orr-Sherby-Dorn 파라미터가 된다. 여기서 σ 는 응력, $\dot{\epsilon}$ 는 크리프 속도, A 및 C 는 재료상수, T 는 절대온도 그리고 Q 는 활성화 에너지로서 일반적인 고온 합금에서는 300 [KJ/mol]이며, R 은 기체상수로서 8.314 [J/ mol·K]이다.

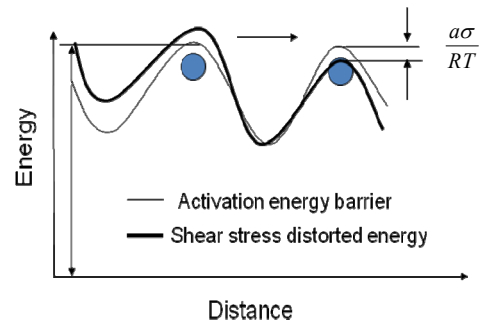


Fig. 1 Bias applied to activation energy barriers by superimposed stress

3. 결과 및 고찰

3.1 마스터 커브 회귀식

마스터 커브의 회귀식은 다항식이 일반적으로 많이 사용된다. 그러나 외삽 특성이 좋지 못하므로 이러한 단점을 보완하기 위하여 다음의 식들이 제안되고 있다.

$$\text{General; } P_D(\sigma) = a_0 + a_1 \log \sigma + a_2 (\log \sigma)^2 + \dots + a_n (\log \sigma)^n \quad (3)$$

$$\text{T-S; } P_D(\sigma, T) = C \left((\alpha\sigma/T) + \frac{(\alpha\sigma/T)^3}{3!} + \frac{(\alpha\sigma/T)^5}{5!} \right)^{-m} \quad (4)$$

$$\text{IT-S; } \log t_r = C' \left((\alpha\sigma) + \frac{(\alpha\sigma)^3}{3!} + \frac{(\alpha\sigma)^5}{5!} \right)^{-m} \quad (5)$$

$$\text{Wilshire; } \ln P_D(\sigma, T) = \frac{1}{u} \left[\ln \left(-\ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_{TS}} \right) \right) - \ln(K_1) \right] \quad (6)$$

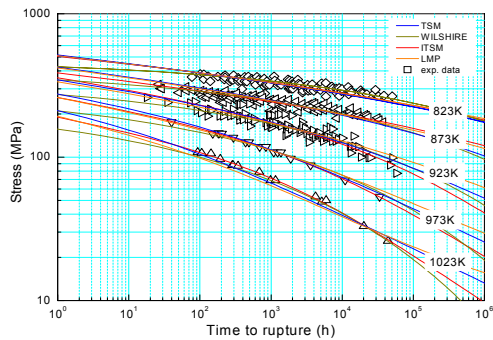


Fig. 2 Comparisons of the experimental data and prediction result for T-S, IT-S, L-M, and Wilshire methods at each temperature

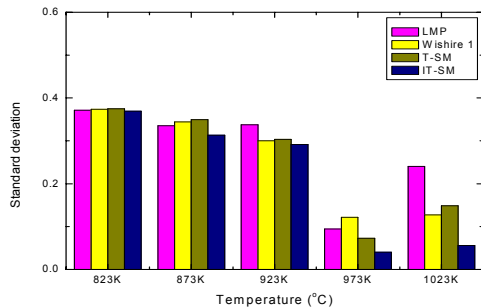


Fig. 3 Standard deviations of error estimated by T-SM, IT-SM, L-M and Wilshire methods at each temperature

3.2 예측 결과 분석

Fig. 2는 316LN 강의 각 온도에서 실험데이터와 식(3)~(6)의 회귀식을 이용하여 예측한 결과 및 L-M 법을 이용하여 얻은 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 장시간 수명 예측에 있어서 L-M 법은 비교적 높은 예측 값을 나타내며 Wilshire 법은 비교적 작은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 T-S, IT-S 모델은 중간 값으로 예측하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 3에서 각 온도에서의 표준오차는 L-M 법이 가장 큰 것으로 나타났으며 IT-S 모델이 가장 작은 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 316LN 스테인리스강의 장시간 수명 예측을 수행하기 위하여 500°C ~ 700°C의 수집하였으며 다항식, Wilshire, T-S, IT-S 등 모델식을 사용하여 장시간 수명을 예측 수행하였다. L-M 법은 비교적 높은 예측 값을 나타내었으며, Wilshire 법은 상대적 작은 값을 나타내었으며, T-S, IT-S 모델은 중간 값을 보이는 것으로 나타났다. 수명예측 결과에 대한 표준오차 분석 결과 L-M 법이 가장 큰 오차가 발생하였으며, IT-S 모델이 가장 작은 표준오차를 갖는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Kim, W. G. and Ryu, W. S., "Usefulness of the Creep Work-Time Relation for Stress Intensity Limits," *Key Engineering Materials*, Vols. 261-263, pp. 1103-1108, 2004.
2. 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, pp.457-465, 2010.
3. Penny, R. K. and Marriott, D. L., 1995, "Design for Creep," Second Edition, *Chapman & Hall*, London, pp. 8~42, 140~145.