

변형률 에너지를 이용한 크리프 속도 및 수명 예측 Creep Rate and Creep-Life Prediction Using Strain Energy

*#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 : Strain energy density, Creep rate, Creep life, Taylor series model, Stress-strain curve

1. 서론

소듐냉각고속로 (sodium cooled fast reactor, SFR) 등의 제4세대 미래원전의 주요 구조 부품들은 600°C 이상의 고온에서 60년의 수명을 목표로 설계되기 때문에 사용 재료의 장시간 크리프 변형 및 수명 예측은 매우 중요하다.⁽¹⁾ 고온재료의 크리프 변형과 파단 수명은 크리프 속도와 밀접한 관계가 있으므로 크리프 속도의 온도 및 응력 의존성을 정확히 예측하는 것이 필요하다.

현재 제안된 크리프 속도의 응력-의존성에 대한 모델 식들을 보면 Norton⁽²⁾과 Dorn⁽²⁾은 실험을 통하여 power law와 지수함수 모델을 제시하였으나 이 모델들은 비교적 좁은 응력 구간에서는 잘 맞지만 넓은 구간에서는 비교적 큰 오차가 발생한다. McVetty⁽²⁾의 비교적 넓은 구간에서 크리프 속도를 잘 표현할 수 있는 sinh (σ/σ_0) 함수 모델 (Hyperbolic Sine Function), Yin 등⁽³⁾은 sinh 함수를 Taylor 급수로 전환시킨 Taylor Series 모델 (T-S)을 제안하였다. 이들 모델들은 장시간 크리프 수명을 예측하는데 잘 맞지만, 매우 낮은 응력의 장시간 크리프 속도를 예측하는데 있어서는 한계가 있다.

본 연구에서는 크리프 속도를 변형률 에너지 밀도(strain energy density, SED)에 의존한다고 가정하고, SFR 주요 구조 소재로 널리 사용되는 G91 (ASME Grade 91 steel)강에 대하여 고온 인장에서의 응력-변형률 선도를 이용하여 SED 값을 계산하고 이를 이용하여 매우 낮은 응력에서의 크리프 속도를 예측하였다. 또한 크리프 속도의 응력 의존성 관계를 조사하여 크리프 파단수명을 예측하고자 한다.

2. 변형률 에너지 밀도

Fig. 1과 같은 고온 인장시험에서 얻은 응력-변형률 선도에서 SED 값은 응력이 증가함에 따라 증가하며 실험 응력에 도달하면 SED 값은 일정한 값을 유지하게 되고 시편은 등응력 변형상태 즉 정상상태에 도달된다고 볼 수 있다. 이때 SED는 응력-변형률 선도를 변형률에 따라 적분하여 얻을 수 있으며 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q' = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

또한 크리프 속도는 Arrhenius의 식에 의해 (2)와 같이 표현된다. 정상상태의 크리프 속도는 SED를 의존한다고 가정하면 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$Jump\ rate = C \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon} = C \sinh\left(\frac{Q'}{RT}\right) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

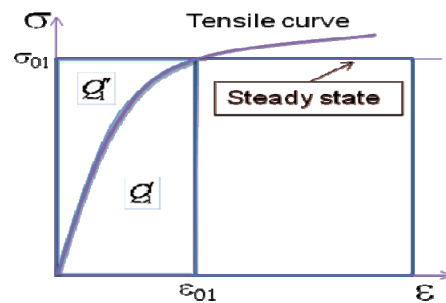


Fig. 1 Schematic illustration for strain energy density in a stress-strain tensile curve

여기서 σ 는 응력, ϵ 는 변형률, C 는 재료상수, T 는 절대온도이며 Q 는 활성화 에너지로서 일반적인 합금에서는 300 [KJ/mol]이며, R 은 기체상수로서 8.314 [J/ mol·K]이다. Q '는 변형률 에너지 밀도로서 인장 응력-변형률 시험으로 얻어진다.

3. 결과 및 분석

Fig. 2는 G91 강의 600°C에서 변형률 속도를 10^{-3} /sec로 하여 얻은 인장곡선의 시험 결과를 나타낸 것이다. G91 강은 최대 인장강도 점에서 연신률은 낮으며 항복응력 이상에서는 가공경화가 매우 낮다. 이러한 인장 특성은 크리프 특성에도 매우 큰 영향을 미치게 된다.

실제로 Fig. 3에서 나타낸 크리프 속도와 응력 사이의 관계에서 볼 수 있듯이 크리프 속도는 160MPa의 응력을 기점으로 기울기가 크게 변화함을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 SED를 이용하여 얻은 크리프 속도로 예측하였을 때 이러한 변곡점을 아주 잘 표현할 수 있음을 보였다.

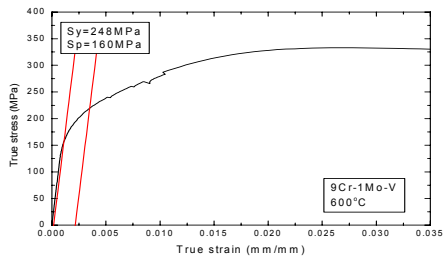


Fig. 2 Stress-strain tensile curve of G91 steel at 600°C

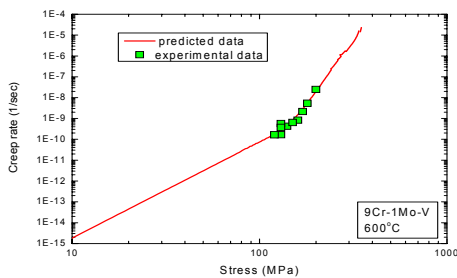


Fig. 3 Comparison between predicted creep rate and experimental data at 600°C

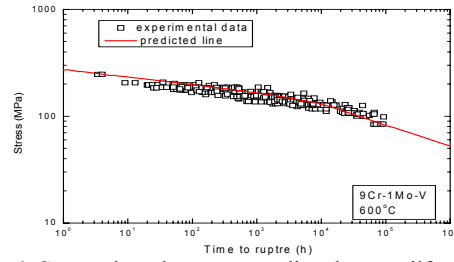


Fig. 4 Comparison between predicted creep life and experimental data at 600°C

Fig. 4는 크리프 파단시간과 응력과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 크리프 수명은 $t_r \dot{\epsilon}_{ss}^m = C'$ 에 의해 계산되었다. 그림에서 보여주듯이 일정한 응력 이하에서는 크리프 파단시간이 급격히 낮아지는 결과를 잘 보여주고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

크리프 속도를 SED에 의존한다고 가정하여 G91 강의 고온인장시험에서 얻은 응력-변형률 선도를 적분하여 SED값을 계산하여 얻었다. 얻어진SED값을 이용하여 매우 낮은 응력에서의 크리프 속도를 예측할 수 있었다. 그리고 크리프 속도와 응력과의 관계를 이용하여 장시간 크리프 파단시간을 잘 예측할 수 있었다. 특히 G91 강의 장시간 수명이 급격히 감소하는 현상을 잘 표현할 수 있는 있음을 보였다.

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. Penny, R. K. and Marriott, D. L., 1995, "Design for Creep" second edition, *Chapman & Hall*, London, pp. 8-42.
3. 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.