

등시 응력-변형률 곡선을 얻기 위한 크리프 곡선의 모델링

Creep Curve Modeling for Obtaining the Isochronous Stress-Strain Curve

**이원¹, 윤송남¹, 김우곤², 김용원², 황영탁³

*#W. Yi¹(yiwon@ssu.ac.kr), S.N. Yin¹, W.G. Kim², W.Y. Kim² and Y.T. Hwang³

¹ 숭실대학교 기계공학과, ² 한국원자력연구원, ³ 강원대학교

Key words : Type 316LN Stainless Steel, Creep Curve, Garofalo's Models, Isochronous Stress-Strain Curve

1. 서론

크리프 곡선은 초기 크리프 변형률, 최소크리프 속도, 활성화 에너지 등의 재료의 열적, 물리적, 기계적 특성이 반영되어 나타나는 현상학적 결과이므로 이 곡선을 기초로 하여 크리프 곡선을 모델링하면 신뢰성이 있는 크리프 곡선을 장시간까지 모델링 할 수 있다. 크리프 곡선의 모델링을 통하여 얻은 결과는 특정된 변형률에 도달하는데 걸리는 시간을 예측할 수 있으므로 설계에서 필요로 하는 데이터도 얻을 수 있다.⁽¹⁾

지금까지 여러 연구자들에 의해 많은 크리프 곡선 모델이 제안되어왔다. Kachanov⁽²⁾ 모델은 공동에 의해 파괴가 일어나는 재료의 3 차 크리프 영역을 잘 표현하는 모델이며, Garofalo⁽³⁾, Blackburn⁽⁴⁾의 모델은 크리프 곡선의 1, 2 차 영역만을 표현하는 모델이다. 또한 Evans⁽⁵⁾ 및 Maruyama⁽⁶⁾ 모델은 3 차 크리프 영역까지 크리프 곡선을 잘 표현하는 모델이다. 이 중에서 Garofalo 모델은 2 차 크리프 영역까지만 표현하나 응력 의존성이 간단하고 파라미터 수가 적은 장점이 있다.

본 연구에서는 316LN 강에 대하여 Garofalo 모델을 사용하여 비선형 피팅법으로 크리프 곡선을 모델링하여 얻고 이로부터 등시 응력-변형률 곡선을 예측하였다.

2. 실험 결과

Fig. 1 은 316LN 강을 600°C에서 210MPa~280MPa의 여러 단계의 응력으로 얻은 크리프 곡선을 나타낸 것이다. 크리프 곡선에서 볼 수 있듯이 2 차 크리프 영역은 두 개의 영역으로 나누어 짐을 알 수 있다. 따라서 크리프 곡선을 피팅하는데 있어서 하나의 모델로 모든 영역을 완전하게 잘 표현하기는 부적절하다. 또한 고온 원자력구조물의 크리프 변형률은 1%의 낮은 크리프 변형률을 기준으로 하

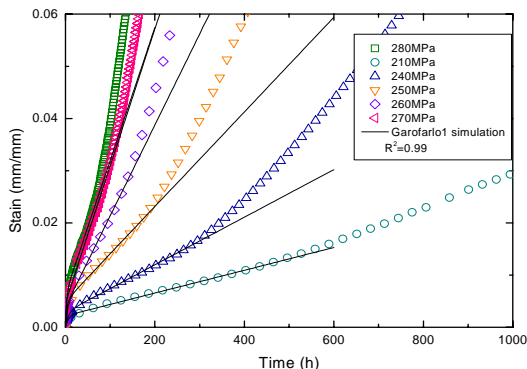


Fig. 1 Creep strain-time curve for type 316LN stainless steel at 600°C

여 수명을 평가한다. 따라서 등시 곡선을 얻기 위해서

1% 영역을 충분히 표현할 수 있는 Garofalo 식을 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

3. 결과 분석

Garofalo 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon = \epsilon_0 + \alpha[1 - e^{-\beta t}] + \dot{\epsilon}_m t \quad (1)$$

여기서 ϵ 는 크리프 변형률, ϵ_0 는 하중이 가해지는 순간 변형률로서 고온 인장실험의 응력-변형률 관계에 의하여 얻어진다. 응력-변형률 관계는 다음과 같이 정식화 된다.

$$\sigma = \sigma_p + D\epsilon_p^m \quad (2)$$

여기서 σ_p 와 ϵ_p 는 각각 항복응력과 변형률이고 D 와 m 은 소성상수와 소성지수이다. 그러나 316LN 의 경우 매우 큰 소성영역이 나타나며 소성구간을 하나의 함수로 나타내기 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig.2 와 같이 두 개의 구간으로 분리하여 소성지수와 상수를 구함으로써 전 구간을 비교적 정확히 묘사할 수 있었다.

식(1)을 다시 쓰면 식(3)로 되며, 이 식에 의해 비선형 피팅을 하면 최적의 파라미터값을 얻을 수 있다. 또한 Fig.3(a)에 보여주듯이 각각의 파라미터와 응력사이에 식(4)의 관계가 성립됨을 잘 보여주고 있다. Fig.2 (b)는 예측된 곡선과 실험데이터를 비교하여 나타낸 것으로써 예측곡선이 실험데이터를 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 파라미터와 응력사의 관계로부터 비교적 작은 응력에서의 크리프 곡선도 예측 가능함을 알 수 있다.

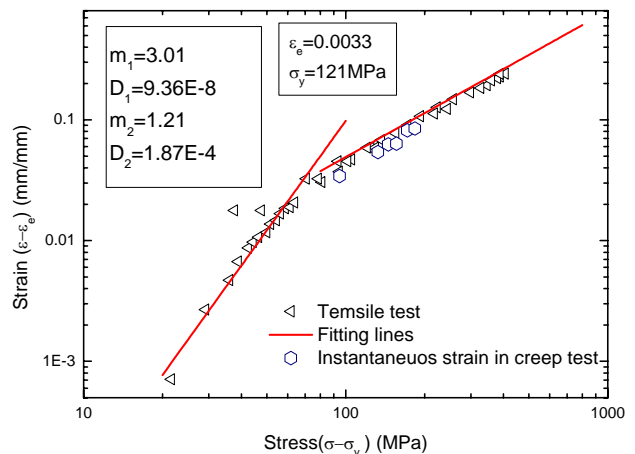


Fig. 2 Tensile stress-strain curve for 316LN steel at 600°C

600°C

4. 결론

316LN 스테인리스강의 크리프 곡선을 Garofalo 식으로 비선형 피팅하여 크리프 곡선을 모델링하였다. 크리프 곡선은 2 차 영역이 2 개의 단계로 분리됨을 보였으며 크리프 곡선의 피팅 구간은 2 차 영역의 처음 구간까지가 적절함을 알 수 있었다. 본 크리프 모델링을 통하여 300,000 시간까지의 등시 응력-변형률 곡선을 예측 할 수 있었다.

참고문헌

1. Mathew, M. D., Sasikala, G., Bhanu, S., Rao, K. and Mannan S. L., 1991, "Influence of Carbon and Nitrogen on the Creep Properties of Type 316 Stainless Steel at 873K," Materials Science and Engineering, A148, pp. 253~260.
2. Maruyama, K., Harada, C. and Oikawa, H., "A Strain-Time Equation Applicable up to Tertiary Creep Stage" J. Soc. Mater. Sci., Japan, Vol. 34, pp.1289~1295, 1985.
3. Maruyama, K. and Oikawa, H., 1987, "Comments on 'Exponential Descriptions of Normal Creep Curves by S.G.R. Brown, R.W. Evans and B. Wilshire'," Scripta Metallurgica, Vol. 21, Issue 2, pp. 233-237.
4. Penny, R. K. and Marriott, D. L., 1995, "Design for Creep," Chapman & Hall, pp. 206~248.
5. Blackburn, L. D., 1972, "Isochronous Stress Strain Curves for Austenitic Steels," American Society of mechanical engineers, New York, pp. 14-48.
6. Evans, R. W., Parker, J. D. and Wilshire, B., 1992, "The [Theta] Projection Concept-A Model-Based Approach to Design and Life Extension of Engineering Plant," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 50, Issues 1-3, pp. 147-160.

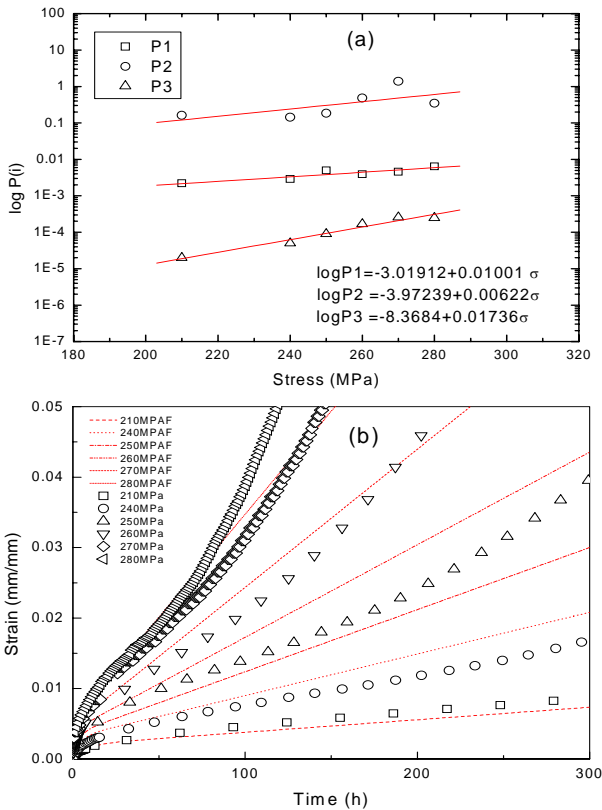


Fig. 3 (a) is stress dependence of P_i parameter in the Garofalo model, and (b) is comparison of estimated creep curves and experimental data for 316LN steel at 600°C

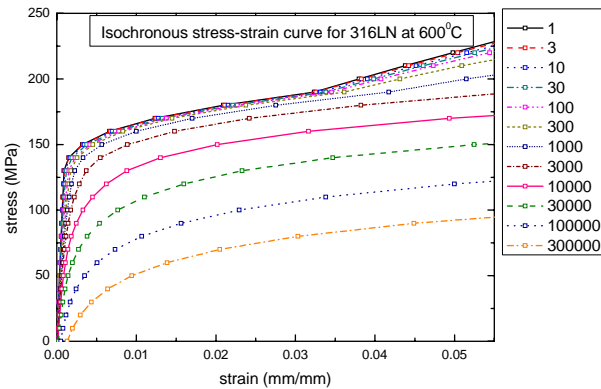


Fig. 4 ISSC predicted at 600°C

Fig. 4 는 위의 파라미터와 응력사의 관계에 의해 예측된 등시 응력-변형률 곡선 결과를 을 나타낸 것이다. 그림에서 비교적 짧은 시간에서는 곡선이 갑자기 급격하게 승하는 구간이 나타난다. 이는 인장실험 응력-변형률 곡선이 2 개의 구간을 나누어 짐에 의해 나타난 것이다. 그러나 장시간에서는 작용응력이 2 차 소성구간까지 미치지 못함으로 곡선의 굽힘 현상은 나타나지 않는다.

$$\epsilon_c = (\epsilon - \epsilon_o) = P_1[1 - e^{-P_2 t}] + P_3 t \quad (3)$$

$$\log P_i = a_i + b_i \sigma \quad (4)$$

여기에 ϵ_c 는 크리프 순수 변형률이다.