

# 지수 함수를 이용한 크리프 곡선 모델링과 수명예측

\* 이원<sup>1</sup>, 윤송남<sup>1</sup>, 김우곤<sup>2</sup>, 류우석<sup>2</sup>, 김용완<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 숭실대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 한국원자력연구소,

## Creep Curve Modeling and Creep-Life Prediction Using Exponential Term

\* W. Yi<sup>1</sup>, S. N. Yin<sup>1</sup>, W. G. Kim<sup>2</sup>, W. S. Ryu<sup>2</sup>, and Y. W. Kim,

<sup>1</sup> Dept. of Mech. Eng., Soongsil Univ., <sup>2</sup> KAERI,

Key words :  $\theta$ -projection method, Hastelloy-X, Creep strain-time curve, time to low strain,

### 1. 서론

금속재료는 고온에서 장시간 사용하면 비교적 낮은 응력에서도 크리프 변형을 일으키며 결국 파괴에 이르게 된다. 특히 원전 발전소 구조물들은 고온에서 20~30년 이상의 장기간 동안 사용되도록 설계되기 때문에 장시간 크리프 변형에 대한 상세한 정보가 필요하다. 현재 연구중인 수소 생산용 고온 가스로는 출구 온도가 950°C에 달하므로 재료의 크리프 파괴가 더욱 중요시 되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 그러나 장시간 크리프 특성을 직접 실험하여 얻는 것은 매우 어렵기 때문에 일반적으로 단시간의 실험에서 얻은 데이터로부터 외삽법을 이용하여 사용조건에 맞는 장시간 크리프 수명을 예측한다<sup>(3)</sup>.

크리프 수명예측은 과단시간, 응력, 온도를 이용한 시간-온도 파라미터 법<sup>(4,5)</sup>과 변형률-시간 곡선, 응력, 온도를 이용한 크리프 곡선 모델링 법<sup>(3,6-8)</sup>이 있다. 시간-온도파라미터법에 의한 수명예측은 수학적 논리에 의한 것으로서 재료의 물리적 의미가 반영되지 않는데 반해 시간-변형률 곡선 모델링에 의한 수명예측은 재료의 역학적인 특성인 최소크리프 속도, 활성화 에너지, 초기 크리프 변형률 등이 반영되므로 더 신뢰성이 있는 수명예측이 가능하며 또한 일정한 변형률까지 도달하는데 걸리는 시간을 예측할 수 있다<sup>(8)</sup>. 시간-온도 파라미터 법은 여러 온도에서의 실험 결과에 의해 과단 수명을 예측하지만 변형률-시간 곡선 모델링에 의한 수명 예측은 단일 온도 실험만으로도 수명예측이 가능하다. 지금까지 Garofalo,<sup>(9)</sup> Blackburn,<sup>(6)</sup> Evans,<sup>(7,8)</sup> Maruyama<sup>(3)</sup> 등 여러 연구자들에 의해 많은 크리프 곡선 모델이 제안되었다. 이들 모델 중에서 Garofalo 와 Blackburn의 모델은 1, 2 차 크리프 구간만 잘 묘사 하고 있지만 Evans의 모델은 3 차 구간까지 잘 묘사하고 있다.

특히 고온가스로 열교환기, 노내 구조물에 많이 사용되고 있는 Hastelloy-X 니켈베이스 슈퍼알로이(superalloy)는 고온에서 1%미만의 작은 크리프 변형률에서도 3 차 크리프 변형이 발생한다. 그러므로 일반적으로 3 차 영역까지 사용하는 경우가 많다. 따라서 3 차 크리프 영역에서의 정보가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 3 차 영역까지 묘사할 수 있는 Evans의  $\theta$ -프로젝션 크리프 모델을 이용하여 Hastelloy-X 합금에 대한 장시간 크리프 변형률-시간 곡선을 예측하였다.

### 2. 실험 결과 및 고찰

크리프 시편은 지름 6mm, 표점거리 30mm 인 봉 형으로 가공하였으며, 실험 절차는 ASTM E139 규정에 따라 일정 하중조건에서 수행하였다.

Fig. 1 은 950°C에서 14MPa~35MPa 응력에서 얻은 크리프 곡선을 나타낸 것이다. Hastelloy-X 합금은 매우 높은 과단 연신률(50%~100%)을 보여주고 있으며 이들 연신률은 응력이 감소함에 따라 낮아짐을 보였다.

변형률-시간 곡선 모델에 의해 수명예측을 함에 있어서 다음 2 가지 조건을 만족하여야 한다. i) 모델이 실험 데이터를 정확히 반영하여야 하며, ii) 각각의 파라미터의 온도

또는 응력 의존성에 대하여 외삽 정확도가 높아야 한다. 즉 파라미터와 온도 또는 응력 사이의 관계가 간단하며 외삽 오차가 작아야 한다. 장시간 크리프 곡선을 예측하기 위해서는 크리프 변형률-시간 곡선을 수식으로 표현하여야 한다. 이 모델은 다음과 같은 지수 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= (\epsilon_t - \epsilon_0) \\ &= \theta_1(1 - e^{-\theta_2 t}) + \theta_3(e^{\theta_4 t} - 1) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_c$ 는 크리프 변형률이고  $\epsilon_t$ 는 전체 크리프 변형률,  $\epsilon_0$ 는 하중이 가해지는 순간 변형률이다. 또한 대부분 고온 재료에서  $\log \theta_i$ 와 작용응력은 선형관계를 나타내고 있으며 다음과 같다.

$$\log \theta_i = a_i + b_i \sigma \quad (2)$$

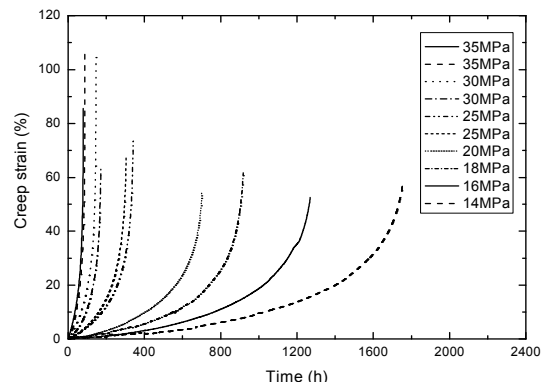


Fig. 1 Creep strain-time curve for Hastelloy-X alloy at 950°C

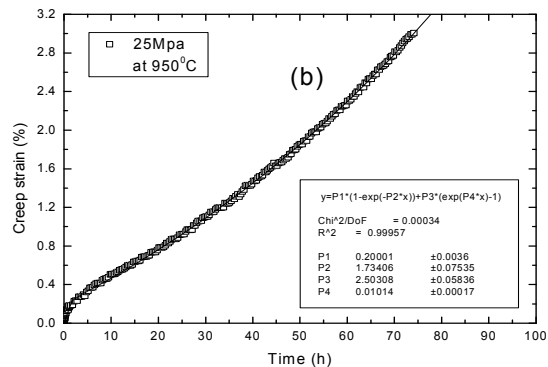


Fig. 2 Results of experimental data and estimated curve for different stresses at 16MPa, 950°C

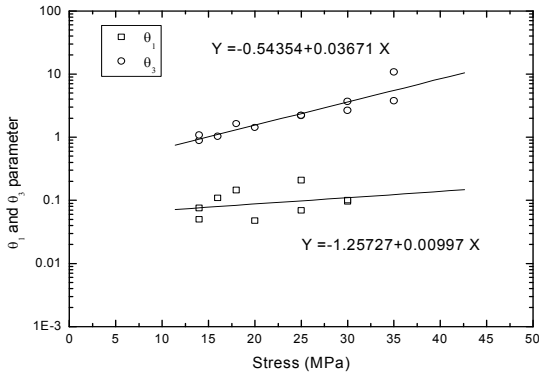


Fig. 3 Stress dependence of  $\theta_1$  and  $\theta_3$  parameters in the  $\theta$ -projection model for Hastelloy-X alloy at 950°C

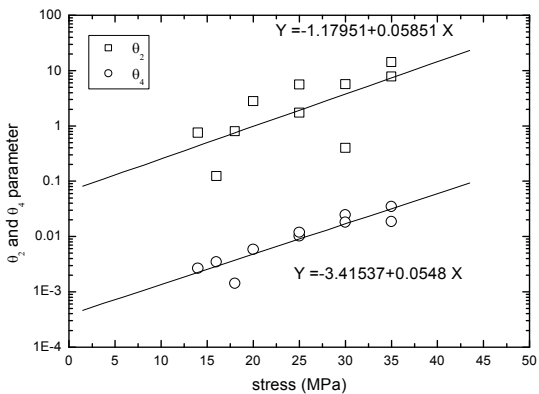


Fig. 4 Stress dependence of  $\theta_2$  and  $\theta_4$  parameters in the  $\theta$ -projection model for Hastelloy-X alloy at 950°C

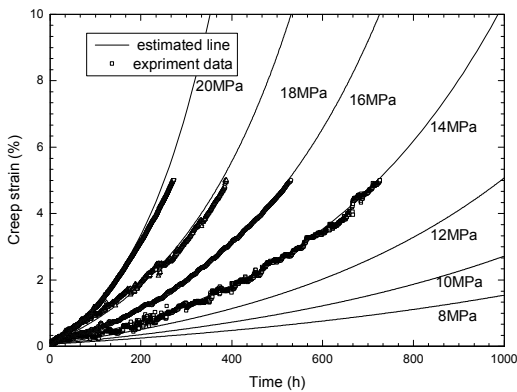


Fig. 5 Comparison of estimated creep curves and experimental data of Hastelloy-X alloy at 950°C

Fig. 2는 25MPa의 크리프 변형률-시간 곡선을 회귀분석한 결과를 나타낸 것이다. 분석 결과가 보여주듯이 회귀식과 데이터의 상관성을 나타내는 결정계수(coefficient of determination,  $R^2$ ) 값이 모두 0.99 이상으로 실험 데이터에 아주 잘 일치함을 보여 주고 있다. 또한 파라미터의 오차가 파라미터 값에 비해 매우 작은 값으로 나타나므로 정확한 값을 판단할 수 있다.

Fig. 3, 4는  $\log\theta_i$ 와 응력 사이에 직선 관계가 있음을 잘 보여 주며 여기에서 얻은  $\theta$ -파라미터와 응력 사이의 관계에서 응력 의존성에 의해 장시간 크리프 변형률-시간 곡선을 예측할 수 있다.

Fig. 5는 위의 회귀 식을 이용하여 8MPa~ 20MPa까지 예

측한 변형률-시간 곡선을 나타낸 것이다. 파라미터의 응력 의존성에 의한 크리프 변형률 곡선 예측은 실험 데이터와 잘 일치하고 있으며 장시간 크리프 변형률-시간 곡선의 예측이 가능함을 보여주고 있다.

### 3. 결론

Hastelloy-X 합금에 대하여 950°C에서 크리프 실험을 수행하여 크리프 데이터를 얻고 실험에서 얻은 데이터를  $\theta$ -프로젝션법에 적용하여 크리프 곡선을 예측하였다. 3% 변형률 구간을 사용하였을 때 실험 데이터를 잘 반영하고 있으며,  $\log\theta_i$ 와 응력 사이의 관계는 양호한 선형성을 나타내고 있다.

외삽법을 이용하여 낮은 응력까지의 크리프 곡선을 예측할 수 있었으며, 예측된 최소 크리프 변형률 곡선은 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

### 후기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 증강기 연구개발 사업 중 원자력재료 내환경 특성평가 및 향상기술개발 과제내의 고온강도 평가 및 신재료 기술개발 분야에서 수행한 것 입니다.

### 참고문헌

1. Ryu, W. S., KAERI/AR-653/2002.
2. Kim, W. G., KAERI/AR-723/2005.
3. Maruyama, K. and Oikawa, H., "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, 1987.
4. Manson, S. S. and Haferd, A. M., "A Linear Time-Temperature Relation for Extrapolation of Creep and Stress Rupture Data," NACA TN 2890, Mar. 1953
5. White, W. E. and Ianin, L. M., "On the Minimum-Commitment Method for Correlation of Creep-Rupture Data," Journal of Engineering materials and Technology, Vol. 100, pp. 333-335, 1978.
6. Blackburn, L. D., "Isochronous Stress Strain Curves for Austenitic Steels," American Society of mechanical engineers, New York, pp. 14-48, 1972.
7. Evans, R. W., Parker, J. D. and Wilshire, B., "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, 1992.
8. Brown, S. G. R., Evans, R. W. and Wilshire, B., "Alternative Methods of Parameter Estimation in Exponential Descriptions of Normal Creep Curves," Scripta Metallurgica, Vol. 21, Issue 2, pp. 239-242, February 1987.
9. Penny, R. K. and Marriott, D. L., "Design for Creep," Chapman & Hall, pp. 206~248, 1995.