

## Type 316LN 스테인리스강의 크리프 수명예측과 오차분석

이원\*(송실대), 윤송남(송실대), 김우곤(한국원자력연구소), 류우석(한국원자력연구소)

### Creep Life Prediction and Error Analysis for Type 316LN Stainless Steel

W. Yi (SSU), S.N. Yin (SSU), W.G. Kim (KAERI), W.S. Ryu (KAERI)

#### ABSTRACT

Various parametric methods, Larson-Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D), Manson-Haford (M-H) parameters, and minimum commitment method (MCM), were used to predict longer rupture time from short-term creep data. A number of the creep data were collected through literature surveys and experimental data produced in KAERI for predicting the creep life of type 316LN SS. Polynomial equations for predicting the creep life were obtained by the time-temperature parameters (TTP) and the MCM. Standard error (SE) and standard error of mean (SEM) values were compared for the each method with temperatures. The TTP methods were good in the creep-life prediction, but the MCM was much superior to the TTP ones at 700°C and 750°C. The MCM was found to be lower in the SE values compared to the TTP methods

**Key Words** : Minimum Commitment Method(최소구속법), Standard Error (표준오차), Time-Temperature Parameter (시간-온도 파라미터), Creep Life (크리프 수명), Standard Error of Mean (평균의 표준오차)

#### 1. 서론

단시간의 크리프 파단 실험 자료를 이용하여 외삽에 의하여 장시간의 크리프 수명을 예측하기 위한 다수의 수명 예측 방법들이 제안되고 있다. 널리 사용되고 있는 방법으로는 시간-온도 파라미터 (time-temperature parameter, TTP) 방법<sup>1</sup>과 최소구속법 (minimum commitment method, MCM)이 있다. 시간-온도 파라미터 법의 대표적인 것으로는 Larson-Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D), Manson-Haford (M-H), Manson-Succop (M-S), Goldholff-Sherby (G-S) 파라미터 법등이 있으며, 최소구속법은 1971년 Manson 과 Ensign에 의하여 제안된 새로운 방법이다<sup>2</sup>.

본 연구에서는 316LN 스테인리스강에 대하여 500°C ~ 800°C의 크리프 파단자료를 실험 및 문헌으로부터 수집하여 대표적 TTP 모델인 L-M, O-S-D, M-H 파라미터와 MCM을 적용하여 수명 예측식을 얻었으며, 또한 얻어진 각 수명 예측식으로부터 예측 파단 시간의 표준오차(standard error, SE) 및 평균의 표준오차(standard error of mean, SEM) 분석을 통하여 그 적합성을 비교 분석하였다.

#### 2. 크리프 수명예측 파라미터

##### 2.1 시간-온도 파라미터법

L-M, O-S-D, M-H의 3개 파라미터의 각 식들은

(1), (2), (3)와 같이 각각 표현된다.

$$\text{L-M: } P(t_r, T) = (\log t_r + C) T \quad (1)$$

$$\text{O-S-D: } P(t_r, T) = \log t_r - \frac{Q}{2.3RT} \quad (2)$$

$$\text{M-H: } P(t, T) = \frac{\log t_r - \log t_a}{T - T_a} \quad (3)$$

여기서  $C$ ,  $Q$ ,  $t_a$  및  $T_a$  는 임의 상수이고,  $R$ 은 기체상수이다.

##### 2.2 최소구속법

최소구속법은 실험 데이터로부터 잘 맞는 계수를 회귀법(regression method)에 의해 찾아내는 것으로 일반식은 다음과 같이 표현 된다<sup>3</sup>.

$$\log t_r + AP(T)\log t_r + P(T) = G(\log \sigma) \quad (4)$$

여기서,  $t_r$ 은 파단 시간,  $A$ 는 재료상수,  $P(T)$ 는 온도함수,  $G(\log \sigma)$ 는 응력함수이다.

##### 2.3 표준오차 분석

표준오차는 표본으로부터 얻는 통계량으로서 다음과 같은 식(5)에 의해 구할 수 있다.

$$SE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n-1)} \quad (5)$$

여기서,  $Y_i$ 와  $\hat{Y}_i$ 는  $i$ 번째 데이터의 크리프 파단시간 실험값과 예측값을 가리키고  $n$ 은 측정된 데이터의 개수이다.

### 3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 일본, 체코, 인도, 한국 등에서 생산된 316LN 강의 크리프 데이터를 이용하여 L-M, O-S-D, M-H 파라미터법과 최소구속법으로 크리프 파단시간을 예측하고, 각 방법에 대한 예측 파단시간의 표준오차 정도를 비교 분석하였다.

Fig. 1은 L-M, O-S-D, M-H법과 MCM에 의한 회귀 다항식과 그래프를 나타낸 것이다. 316LN 스테인리스강의 크리프 수명예측을 위해 각각의 방법이 모두 잘 사용될 수 있음 보였다. 그리고 M-H법과 MCM은 Fig. 1(c)와 (d)에서 보이는 것처럼 응력이 200MPa인 부근에서 수명예측 회귀곡선이 변곡점이 발생하며 이로 인하여 회귀 다항식의 차수가 증가하게 됨을 보였다.

Fig. 2는 TTP 법과 MCM을 이용하여 수명 예측값과 실험 데이터 값을 비교하여 각각 나타낸 것이다. 여기서 M-H법과 MCM의 경우 특히 700°C 이상의 고온의 장시간에서는 실험값과 잘 일치하였으며 또한 고온 장시간에서는 예측값이 급격히 감소하였다.

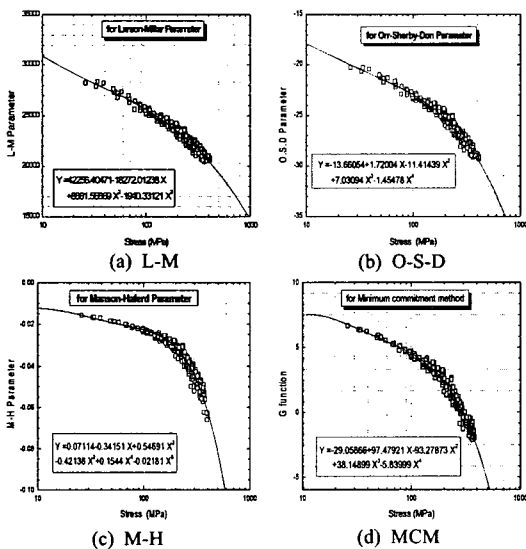


Fig.1 Polynomial equations of each method for predicting creep life of type 316LN SS

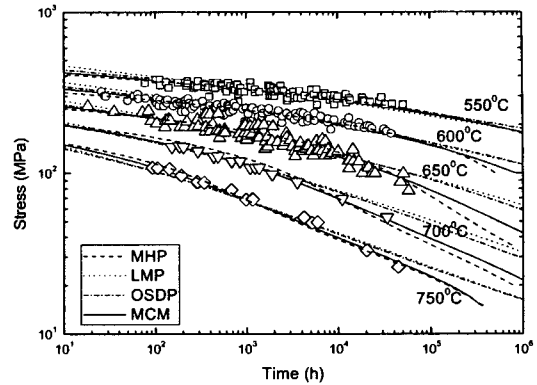


Fig. 2 Creep-life prediction for each method with temperatures

### 4. 결론

TTP법과 최소구속법에 의한 크리프 수명예측 다항식을 얻었으며 예측한 표준오차 범위는 0.11~0.33에 있었으며 최소구속법이 가장 잘 맞았다. TTP법과 최소구속법의 550°C와 750°C 사이의 온도별 표준오차 값은 650°C까지는 큰 차이가 없었으나 700°C 이상의 고온이 되면 최소구속법이 TTP법에 비해 보다 좋은 수명예측을 하는 것으로 나타났다. 최소구속법에는 온도 의존성 정식화에 의한 오차의 영향이 적음을 확인하였다.

### 참고문헌

- Kim, W. G., Yin, S. N., and Ryu, W.S., "Application and Standard Error Analysis of the Parametric Methods for Predicting the Creep Life of Type 316LN SS," *Key Engineering Materials*, Vols. 297~300, pp. 2272~2277, 2005.
- Manson, S.S., and Ensign, C.R., "Specialized Model for Analysis of Creep Rupture Data by the Minimum Commitment Method, Station-Function Approach," *NASA TM X-52999*, pp. 1~14, 1971.
- W. E. White, and Iain Le May, "On the Minimum-Commitment Method for Correlation of Creep-Rupture Data," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 100, pp. 333~335, 1978.