

최소구속법을 이용한 Type 316LN 강의 크리프 수명 예측

김우곤*(한국원자력연구소), 윤송남(숭실대학교), 류우석(한국원자력연구소), 이원(숭실대학교)

Creep Life Prediction of Type 316LN Steel Using Minimum Commitment Method

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

ABSTRACT

A minimum commitment method (MCM) was applied to predict the creep rupture life of type 316LN SS. For this purpose, a number of the creep rupture data for the type 316LN SS were collected through literature survey and experimental data of KAERI, Using the short-term creep rupture data under 2000 hr, the long-term creep rupture life above 10^5 hour was predicted by means of the MCM. An optimum value of A , P and G function, used in the MCM equation, was determined respectively, and the creep rupture life with the A values in different temperatures was compared with the experimental data and the predicted curves.

Key Words: Minimum Commitment Method (최소구속법), Type 316LN Stainless Steel (Type 316LN 스테인리스강), Time-Temperature Parameter (시간-온도 파라메타), Creep (크리프), Creep Rupture (크리프 파단)

1. 서론

차세대원자로나 액체금속로 (liquid metal reactor, LMR) 등의 원전 발전소 구조물들은 고온($>550^\circ$)에서 20~30 년 이상의 장기간 동안 사용되도록 설계되기 때문에 장시간에서의 고온 크리프 특성이 매우 중요하다.¹ 그러나 사용할 구조물에 대하여 장시간 크리프 수명을 시험으로 정확히 확인한 후 사용한다는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 비교적 단시간의 크리프 파단 자료를 이용하여 설계목적에 충분할 정도로 장시간의 크리프 수명을 예측하는 것이 필요하다.

단시간의 크리프 자료를 이용하여 장 시간 크리프 수명을 예측하기 위한 유용한 방법으로 시간-온도 파라메타 (time-temperature parameter, TTP) 방법들이 사용되고 있다.² 그러나 TTP 법은 일정한 응력에서 크리프 파단수명과 온도의 관계가 직선 관계이고 각 등 응력선은 한 점에서 만나거나 서로 평행해야 하는 등 구속조건들이 다르므로 실험 결과에 따라서는 이러한 조건들이 만족되지 않는 경우에는 TTP 법으로 외삽후 크리프 파단수명을 예측하면 상당한 오차가 발생할 수 있다. 그래서 Manson 과 Ensign³ 등은 이러한 구속조건을 최소화하여 모든

경우의 실험 결과에 대하여 일반적으로 적용될 수 있는 최소구속법 (minimum commitment method, MCM)을 제안하였다. 최소구속법은 TTP 법에서의 여러 가지 구속조건들을 최소화하는 것으로 MCM 식에 사용되는 각 함수들은 실험값으로부터 직접 결정하기 때문에 실험값을 가장 잘 반영하는 정확한 크리프 수명 예측이 가능한 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 액체금속로의 구조재료로 사용되는 316LN 스테인리스강에 대하여 $500^\circ\text{C}\sim 800^\circ\text{C}$ 의 크리프 파단 자료를 KAERI 의 실험 자료 및 문헌 자료를 다수 수집하여 최소구속법을 적용하여 크리프 파단 수명을 온도 별로 예측하였다.

2. 최소구속법의 일반식

단시간의 크리프 자료를 이용하여 장 시간의 크리프 수명을 예측하기 위한 대표적인 것으로는 Larson Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D), Manson-Haford (M-H), Manson-Succop (M-S), Goldholff-Sherby (G-S) 파라메타 등이 있으며, 이들은 모두 시간-온도 파라메타 (time-temperature parameter, TTP) 방법으로 정식화된다. 이들 TTP 방법들은 등 응력조건에

서 크리프 파단수명과 온도의 관계가 직선 관계가 되어야 하고 각 등응력선은 한 점에서 만나거나 서로 평행해야 하는 등 구속조건들이 따른다. 그리고 실험결과가 이러한 조건들이 만족되지 않는 경우에는 수명예측에 상당한 오차를 발생시킬 수 있다. 이에 반해 최소구속법은 TTP 법에서의 실험 데이터를 시간-온도 계수에 맞추려 하지 않고 실험데이터로부터 잘 맞는 계수를 회귀법 (regression method)에 의해 찾아내는 것으로 일반식은 다음과 같이 표현이 된다.

$$F(\log t) + P(T) = G(\log \sigma) \quad (1)$$

이며, 파단시간과 온도 사이에 함수 $F(T)$ 의 관계가 성립된다고 하면,

$$F(T) \log t + P(T) = G(\log \sigma) \quad (2)$$

되고, 여기서 일반적인 온도-시간 파라미터에서의 직선 관계를 일정한 함수 관계로 대체하고 이 함수 관계를 $F(T)=1+P(T)$ 라고 가정하면,

$$\log t + AP(T) \log t + P(T) = G(\log \sigma) \quad (3)$$

을 얻을 수 있다. 식 (3)은 Manson 과 Ensign 이 제안한 최소구속법의 기본식을 개선한 보다 일반화된 식이 된다.⁴ 여기서, t 는 파단 시간, A 는 재료상수, $P(T)$ 는 온도함수, $G(\log \sigma)$ 는 응력함수이다. 여기서 적절한 상수 A 값과 $P(T)$ 함수 값을 선택하면 일반적으로 사용하고 있는 모든 TTP 파라메타법을 포함하는 포괄적인 함수라고 할 수 있다. 최소구속법의 방정식에 사용되는 각 함수들은 직접적인 실험 데이터를 사용하여 결정되기 때문에 TTP 법에 비해 보다 정확한 수명예측을 할 수 있다. 그러나 식 (3) 방정식의 해를 구하는 것은 미지수 A 및 P 가 비선형식이므로 다소 복잡한 점이 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 크리프 파단 데이터의 수집

Fig. 1 은 316LN 강에 대하여 수집한 모든 온도 별 크리프 데이터를 응력과 파단 시간으로 나타낸 것이다. 총 크리프 데이터 수는 345 개로 500°C~800°C 온도 범위에 대한 것이다. 본 316LN 강의 크리프 데이터는 일본, 체코, 인도, 한국 등에서 연구한 자료이며⁵, 특히 일본은 316LN 강을 316FR

(fast breeder reactor) 강으로 명칭을 붙여 FR 강을 고속증식로의 실증로에 적용하기 위하여 수 십년 전부터 장시간 크리프 물성 데이터를 생산 축적하고 있으며 데이터 베이스화 하고 있다. 이들 수집된 316LN 강의 크리프 데이터를 이용하여 MCM 식에 적용하여 크리프 파단 수명을 예측한다.

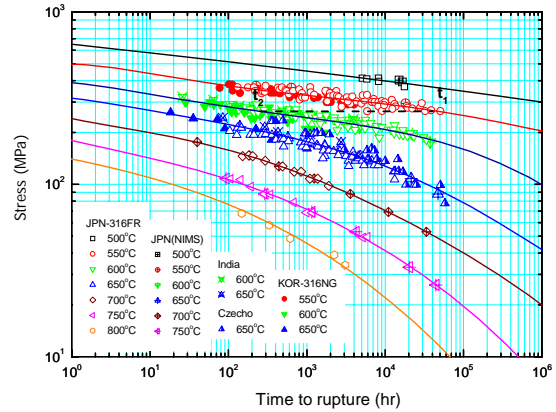


Fig. 1 Creep rupture data collected for type 316LN SS

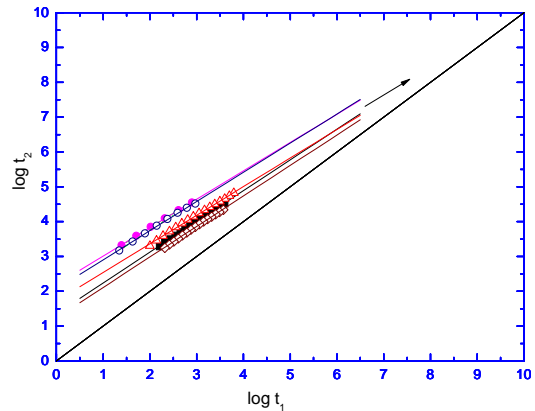


Fig. 2 Plot to determine A from focal point of such lines along the 45° line

3.2 상수 A 값의 결정

최소구속법의 적용하기 위해서는 식 (3)의 미지수 A 와 P 함수 값을 결정하여야 한다. A 값은 두 가지 방법으로 결정할 수 있다. 첫번째 방법은 Fig. 2 에 보인 각 등응력 직선에서 두 개의 온도에 대한 각 파단 시간 t_1 (x-축) 및 t_2 (y-축) 값을 좌표축으로 하여 그래프로 나타내면 45° 선위의 한 점에서 만나는 점의 역수 값인 A 를 결정하는 방법이다. 여기서 t_1 및 t_2 값은 Fig. 1 에서 보인 해당온도 조건에서의 각 파단시간 값이 된다. 실험 데이터 값들의 각 등응력 직선은 45° 선위에 일치하지 않았으

므로 본 연구에서는 각 등응력선의 기울기 평균값을 취한 결과 $A = -0.089$ 로 다소 높은 값을 얻었다. 둘째 방법으로는 시행착오법에 의해 결정하는 방법으로서 예상되는 일정한 범위의 A 값을 식 (3)에 대입하여 얻어지는 $\log \sigma$ 와 G 함수와의 관계로부터 회귀 다항식을 얻는다. 이 다항식이 실험결과를 어느 정도 잘 반영하는지를 나타내는 통계적 수치인 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 구하여 수명예측을 하였다.

3.3 P 및 G 함수의 결정

P 함수는 기존의 시간-온도 파라메타로 쉽게 전환 될 수 있는 형태인 다음 식으로부터 결정된다.

$$P(T) = R_1(T - T_m) + R_2 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right) \quad (4)$$

여기서, R_1, R_2 는 재료 상수이고 다음 방법에 의하여 계산된다. (4)식을 (3)식에 대입하면

$$\log(t) + A \left[R_1(T_1 - T_m) + R_2 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_m} \right) \right] \log(t) + R_1(T_1 - T_m) + R_2 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_m} \right) = G(\log \sigma) \quad (5)$$

되고 그리고 각 등응력 선에서 t_1 과 t_2 를 선택하여 식 (5)에 대입하면 $G(\log \sigma)$ 의 값은 같으므로

$$\begin{aligned} & \log(t_1) + A \left[R_1(T_1 - T_m) + R_2 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_m} \right) \right] \log(t_1) + R_1(T_1 - T_m) + R_2 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_m} \right) \\ & = \log(t_2) + A \left[R_1(T_1 - T_m) + R_2 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_m} \right) \right] \log(t_2) + R_1(T_1 - T_m) + R_2 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_m} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

이 성립된다. 식 (6)을 R_1 과 R_2 에 따라 정리하면 식 (7)과 같이 된다

$$\frac{(\log t_2 - \log t_1)}{M} = \frac{N}{M} R_2 + R_1 \quad (7)$$

$$M = A [(T_1 - T_m) \log(t_1) + (T_2 - T_m) \log(t_2)] + (T_1 - T_2) \quad (8)$$

$$N = A \left[\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_m} \right) \log(t_1) + \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_m} \right) \log(t_2) + \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (9)$$

여기서 T_m 은 절대온도 (273+°C)로 나타낸 값이며, 실험 데이터의 중간온도를 나타내는 것으로 본 연구에서는 550~800°C 의 실험 데이터에 대하여 650°C 를 취하였다.

Fig. 3 은 식 (7)을 그래프로 나타내어 fitting 한 결과로서 R_1 과 R_2 를 구할 수 있다. 식 (7)의 1 차식에서 R_1 은 절편값이 되고, R_2 는 직선의 기울기 값

이 된다. 얻어진 1 차식으로 부터 $R_2 = -56715$, $R_1 = 0.0352$ 가 된다. Fig. 4 는 식 (4)에서 $A = -0.03$ 일 경우 얻어진 R_1, R_2 값을 이용하여 온도별에 따른 P 함수의 변화 결과를 대표적으로 나타낸 것이다. G 함수 값은 식 (3)으로부터 구해지며, 본 연구에서는 2000 시간 이내의 실험 데이터를 사용하여 여러 가지 A 값과 P 함수 값을 얻어 계산하였다.

Fig. 5 는 $A = -0.03$ 일 경우에서의 응력과 G 함수와의 관계를 대표적으로 나타낸 결과로서 실험 데이터를 가장 잘 일치하는 회귀식은 3 차 다항식의 마스터 곡선이 얻어졌다. Fig. 6 은 $A = -0.15 \sim 0.15$ 까지 변화시키면서 결정계수의 변화 관계를 나타낸 것으로 $A = -0.05 \sim -0.02$ 범위에서 결정계수의 값이 높다. 결정계수 값이 높을수록 회귀식은 실험자료를 잘 나타낸다는 의미를 주므로, 본 연구에서는 $A = -0.02 \sim -0.07$ 범위에 대하여 각 온도별에 따른 크리프 수명 예측값과 실험값을 비교하였다.

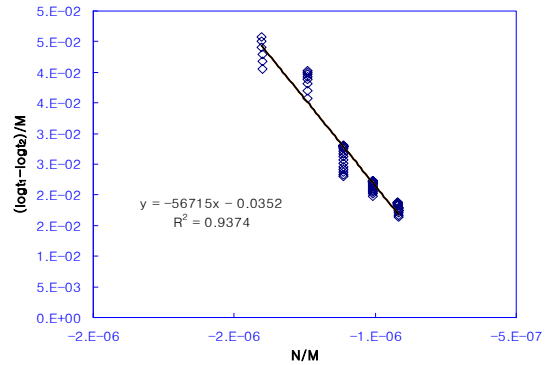


Fig. 3 Determination of R_1 and R_2

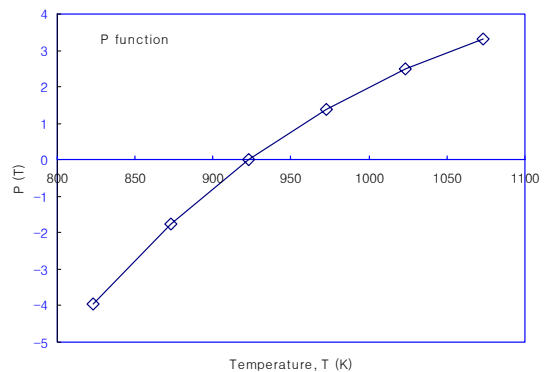


Fig. 4 Determination of temperature function P

3.4 A 값에 따른 온도별 수명 예측

550°C, 600°C, 650°C, 700°C, 750°C, 800°C 의 각 온도에 대하여 A 값에 따른 크리프 수명을 예측하였으며 그 결과를 실험 데이터와 비교하였다. 상수

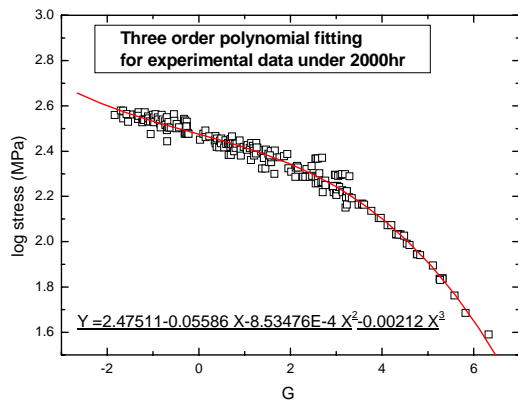


Fig. 5 Polynomial equation obtained from the besting fitting of stress and G function in $A = -0.03$

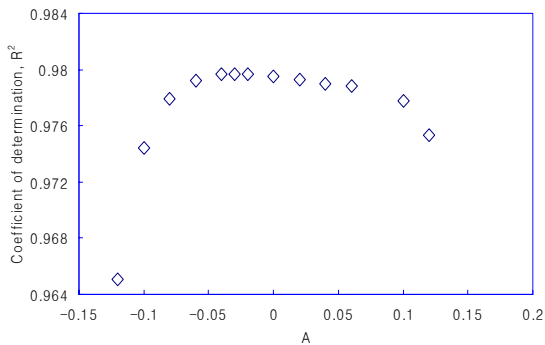


Fig. 6 Coefficient of determination with A value

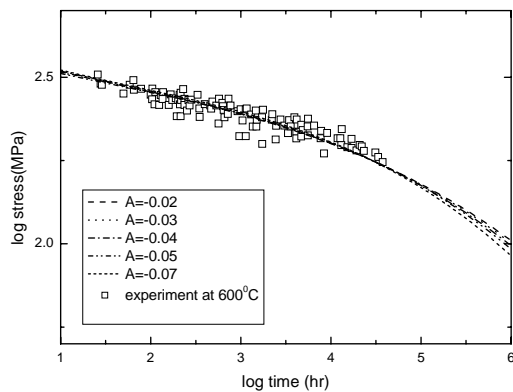


Fig. 7 Prediction curves with A values at 600°C

A 의 결정계수 값이 높았던 $-0.02 \sim -0.05$ 사이의 값에서는 수명예측에 큰 차이를 보이지 않았지만 750°C 및 800°C 의 고온에서는 수명예측에 상당한 차이를 보였다. Fig. 7은 600°C 에서 A 값의 변화에 따른 수명예측 결과를 대표적으로 나타낸 것으로 A 값에 따라서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 본 결과는

2000 시간 이하의 단시간 데이터를 가지고 10^5 시간 이상의 장시간 크리프 수명을 예측한 것이다.

4. 결론

최소구속법에 의한 크리프 수명 평가 절차를 기술하였으며, Type 316LN 강에 적용하여 장시간 크리프 수명을 예측하였다. 최소구속법에 사용될 상수 A 값은 -0.05 일때 비교적 정확한 수명을 예측하는 것으로 나타났다. 2000 시간 이하의 단시간 데이터를 가지고 10^5 시간 이상의 장시간 크리프 수명을 예측하였으며, 본 방법은 실험 데이터를 근거로 하여 각 함수 값들이 결정되므로 기존의 시간-온도 파라메타 방법에 비하여 크리프 수명을 정확하게 예측할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력 중장기 연구개발 사업 중 원자력재료 내환경 특성 평가 및 향상기술개발과제내의 고온강도 평가 및 신재료 기술개발 분야에서 수행한 것 입니다.

참고문헌

1. Kim, W. G., Kim, S. H., and Ryu, W. S., "Evaluation of Monkman-Grant Parameters for Type 316LN and Modified 9Cr-Mo Stainless Steels," *KSME Int. J.*, Vol.16, No. 11, pp. 420~1427, 2002.
2. Le May, I., "Developments in Parametric Methods for Handling Creep and Creep-Rupture Data," *Trans. of the ASME*, Vol. 101, pp. 326~330, 1979.
3. Manson, S.S., and Ensign, C.R., "Interpolation and Extrapolation of Creep Rupture Data by the Minimum Commitment Method," *Characterization of Materials for Service at Elevated Temperatures MPC-7 ASME* New York, pp 299~ 398, 1978.
4. 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.
5. Kim, W. G., Yoon, 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* Vol. 297~300, pp. 2272-2277, 2005.