

Type 316LN 강의 크리프 수명예측 파라메타의 표준오차 분석

김우곤[†] · 윤송남* · 류우석**

Standard Error Analysis of Creep-Life Prediction Parameters of Type 316LN Stainless Steels

Woo Gon Kim, Song Nam Yoon and Woo Seog Ryu

Key Words : Type 316LN Stainless Steel (Type 316LN 스테인리스강), Creep (크리프), Standard Error (표준오차), Time-Temperature Parameter (시간-온도 파라메타), Creep-Life Prediction Parameter (크리프 수명예측 파라메타), Fast Breeder Reactor(고속증식로)

Abstract

A number of creep data were collected and filed for type 316LN stainless steels through literature survey and experimental data produced in KAERI. Using these data, polynomial equations for predicting creep life were obtained for Larson Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D) and Manson-Haford (M-H) parametric methods. In order to find out the suitability for them, the relative standard error (RSE) and standard error of estimate (SEE) values were obtained by statistical process of creep data. The O-S-D parameter showed better fitting to creep-rupture data than the L-M or the M-H parameters, and the three parametric methods did not generate the large difference in the SEE and the RSE values.

1. 서 론

차세대원자로나 액체금속로(LMR) 등의 원전 발전소 구조물들은 고온(>550°)에서 20~30년 이상의 장시간 동안 사용되도록 설계되기 때문에 고온 크리프 특성이 매우 중요하다.⁽¹⁻²⁾ 그러나 사용 구조물에 대하여 장시간 크리프 실험으로부터 크리프 수명을 정확히 확인한 후 사용한다는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 비교적 단시간의 크리프 파단 실험 자료를 이용하여 설계목적에 충분할 정도로 장시간의 파단 수명을 예측하는 것이 필요하다. 비록 단시간의 실험 결과라 할지라도 장시간의 수명을 잘 예측한다면 구조설계가 완벽하게 되므로 결국 플랜트의 신뢰성과 안전성을 높게 될 것이다.

따라서 단시간의 크리프 데이터를 이용하여 장시간의 크리프 수명을 예측하기 위한 다수의 수명예측 파라메타들이 개발되었다. 이들 중에서 주로 사용되는 대표적인 것으로는 Larson Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D), Manson-Haford (M-H), Manson-Succop (M-S), Goldhoff-Sherby (G-S) 파라메타법 등이 있으며, 이들은 모두 시간-온도 파라메타 (time-temperature parameter, TTP)법으로 정식화된다.⁽³⁻⁷⁾ 즉 크리프 변수인 시간, 온도 및 응력의 세 변수를 하나의 식으로 묶어 복합적인 효과를 나타내도록 한 것이다. 시간과 온도 변수를 묶어 하나의 파라메타로 변환시키고 이 파라메타를 응력과 관계 수식으로 나타내면 임의의 온도에서 응력 값을 알면 크리프 파단시간을 예측할 수 있다. 그러나 이들 각 수명예측 모델들은 그 나름대로의 장·단점을 갖고 있어서 사용되지만, 실제로는 금속조직이 열-기계적 영향을 받으면서 장시간 사용되므로 그 안정성을 예측할 수 있는 방안이 없기 때문에 단시간의 가혹한 조건에서의 실험결과를 이용하여 장시간의 수명 예측은 어느 예측식도 완전하지 못하다. 따라서 316LN 강에 대한 각 파라메타 법의 적합성 판단을 위한 수명 예측 오

[†] 한국원자력연구소 원자력재료기술개발부

E-mail : wgkim@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2493 FAX : (042) 868-8549

* 숭실대학교 기계공학과

** 한국원자력연구소

차 정도를 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 고속증식로의 원전 구조재료로 사용되는 316LN 스테인리스강에 대하여 500°C~800°C 의 크리프 파단 자료를 실험 및 문헌으로부터 다수 수집하여 대표적 크리프 수명예측 모델인 L-M, O-S-D, M-H 파라메타식에 적용하여 수명 예측식을 결정하였다. 그리고 얻어진 예측식으로부터 파단 시간을 구하고 통계적 처리를 수행하여 파단 시간의 예측 값에 대한 표준오차(standard error of estimate, SEE)를 구하여 각 수명예측 파라메타들의 적합성 정도를 비교 분석하였다.

2. 표준오차 분석 절차

2.1 수명예측 파라메타

크리프 수명예측 파라메타 법으로는 대표적으로 L-M, O-S-D, M-H, M-S, G-S 등이 주로 사용되는데, 이들은 모두 시간-온도 파라메타(TTP) 법에 의해 기초화하며 정식화 된다. TTP 법은 파라메타 $P(t_r, T)$ 를 사용하여 온도 T 의 차이를 보상하여 파단시간 t_r 이 응력만의 함수 $f(\sigma)$ 로 식 (1)과 같이 표현될 수 있다는 가정 하에 만들어진 것이다.

$$P(t_r, T) = f(\sigma) \quad (1)$$

본 연구에서는 t_r 과 T (또는 $1/T$) 의 실험결과로부터 직선 관계가 잘 되었던 L-M, O-S-D, M-H 의 3 가지 방법을 사용하였다. 일정응력의 크리프 데이터에 대하여 대수 파단시간인 $\log t_r$ 은 y 축에 온도 T 는 x 축에 놓고 데이터를 찍을 때 O-S-D 이나 L-M 파라메타 법은 $\log t_r$ (y 축) 과 온도 $1/T$ (x 축) 관계에서 직선관계가 있는 것이며, M-H 파라메타 법은 $\log t_r$ 과 T 사이의 관계에서 직선관계가 있는 경우이고, O-S-D 파라메타 법은 $\log t_r - 1/T$ 의 직선 기울기가 응력에 관계없이 일정하며, L-M 파라메타법은 $\log t_r - 1/T$ 의 직선 기울기가 응력에 따라서 변화하는 경우이다.

L-M, O-S-D, M-H 파라메타 식들은 다음 식 (2), (3) 및 (4)로 각각 표현이 된다.⁽³⁻⁶⁾

$$\text{L-M: } P(t_r, T) = (\log t_r + C)T \quad (2)$$

$$\text{O-S-D: } P(t_r, T) = \log t_r - \frac{Q}{2.3RT} \quad (3)$$

$$\text{M-H: } P(t_r, T) = \frac{\log t_r - \log t_a}{T - T_a} \quad (4)$$

여기서 C, Q, t_a 및 T_a 는 파라메타 상수로서 임의 상수이고, R 은 기체상수이다. M-H 파라메타에서는 2 개의 임의 정수를 포함하고 있다.

파라메타의 y 축에 대응하는 응력의 x 축 함수는 일반적으로 다음과 같은 다항식을 사용한다.

$$f(\sigma) = b_0 + b_1 \log(\sigma) + b_2 (\log \sigma)^2 + \dots + b_k (\log \sigma)^k \quad (5)$$

여기서, b_k 는 k 차에 대한 회귀계수(regression coefficient)를 나타내며 k 차수는 일반적으로 5 차 이하가 이용된다.

2.2 크리프 데이터의 처리 절차

TTP 법은 크리프 파단 시간 실험 데이터를 사용하여 다음과 같은 절차에 따라서 각 파라메타 상수 값 및 파라메타, P 값을 계산하고 그리고 데이터와 가장 잘 일치하는 회귀곡선의 응력 다항식을 결정한다.

(i) 파단시간, $\log t_r$ 과 크리프 온도, T 와의 관계를 이용하여 우선 식 (2), (3) 및 (4)의 각 파라메타식에 사용될 C, Q, t_a 및 T_a 의 임의 상수값들을 결정한다.

(ii) 결정된 상수 값과 크리프 파단 자료인 각 온도 및 파단 시간 데이터를 식 (2), (3) 및 (4)에 대입하여 파라메타 상수, P 값을 계산한다.

(iii) 계산된 파라메타 값과 각 실험 온도에 해당하는 응력 데이터를 이용하여 σ (x 축)- P (y 축)으로 데이터를 넣은 다음 데이터와 가장 잘 fitting 하는 응력함수 $f(\sigma)$ 의 회귀식 찾아내어 결정한다.

이상의 절차에 따라 파단시간은 T 와 σ 의 함수로 정식화 시킨다. $f(\sigma)$ 의 회귀식은 σ - P 곡선을 정확하게 잘 재현할 수 있다. 데이터 들에 대한 회귀식은 식(5)와 같이 반드시 다항식으로 하지 않아도 되며 직선으로 fitting 이 잘 되면 직선으로 그려도 된다. 그러나 대부분의 경우 다항식을 사용하면 데이터를 충분히 잘 재현할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 크리프 파단 데이터

316LN 강에 대한 크리프 데이터는 현재까지 문헌에서 보고된 재료조성이 정확히 표기된 신뢰성이 있는 데이터들만 수집 선택하여 디지털링

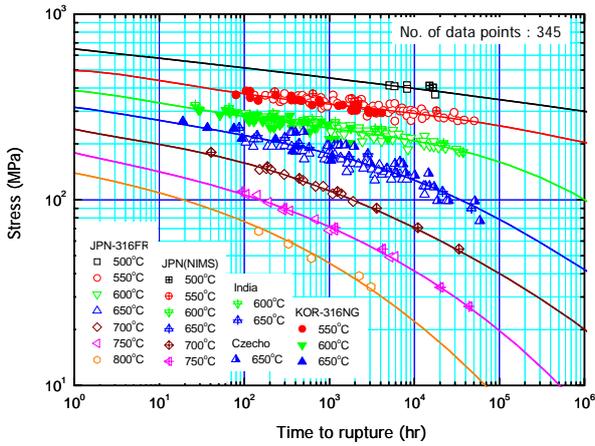


Fig. 1 Stress vs. time to rupture of type 316LN stainless steels

(digitizing) 하고 파일화 하였다. 수집된 316LN 강의 재료조성은 저 탄소량(약 0.03wt% 이하) 대신에 질소량을 약 0.06~0.15wt% 첨가하여 고용강화한 것으로 고온강도 특성이 우수한 재료이다.

Fig. 1 은 수집한 316LN 강의 모든 크리프 데이터를 응력과 파단 시간에 대하여 온도별로 나타낸 것이다. 본 316LN 강의 크리프 데이터는 일본(8-9), 체코(10), 인도(11), 한국(1-2,12) 등에서 연구한 자료로서 크리프 물성을 비교하는데 참고가 된다. 이들 국가는 316LN 강을 고속증식로의 원자력 발전소 주요 부품으로 적용하기 위하여 고온 크리프 특성을 연구하고 크리프 물성 자료를 생산 축적하고 있는 국가들이다.

특히 일본은 자국에서 개발한 316LN 강을 316FR(fast breeder reactor)으로 명칭을 붙여 고속증식로용으로 개발하였으며, 316FR 강을 고속증식로의 실증로에 적용하기 위하여 수 십년 전부터 장시간 크리프 물성 데이터를 생산 축적하고 있으며 크리프 자료를 DB 화 하고 있다. Fig. 1 에 나타낸 총 크리프 데이터의 개수는 345 개이며, 온도 범위는 500°C~800°C 이다. 그림에 보이는 것처럼 모든 크리프 데이터는 온도 의존성을 잘 보이고 있음을 볼 수 있다. 이들 수집된 316LN 강의 크리프 데이터를 이용하여 L-M, O-S-D, M-H 파라메타법으로 크리프 파단수명을 예측하고, 실험값에 대한 예측 파단시간을 통계적으로 처리하여 오차 정도를 각 파라메타으로 비교 분석한다.

3.2 수명예측 파라메타식의 상수값 결정

크리프 파단 데이터를 이용하여 식 (2), (3) 및 (4)의 각 파라메타식에 사용될 C, Q, t_a 및 T_a의 임의 상수 값들을 결정하였다. 임의 상수 값들의

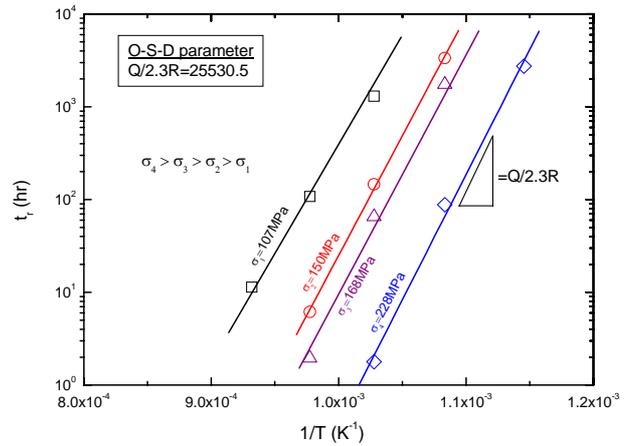


Fig. 2 Relationship between t_r and 1/T in O-S-D parameter under constant stresses

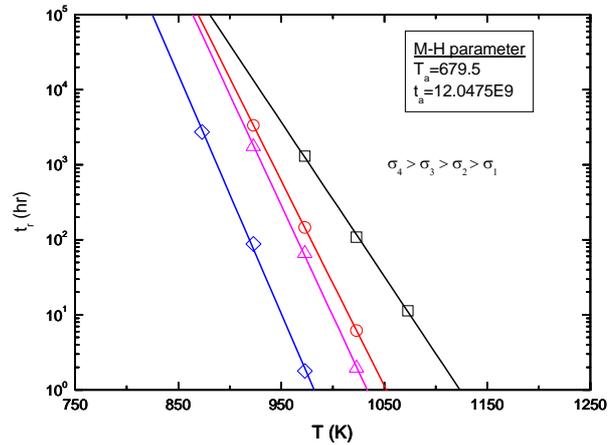


Fig. 3 Relationship between t_r and T in M-H parameter under constant stresses

결정에 있어서 L-M의 C 값은 일정 응력별 데이터를 log t_r - 1/T의 관계로 나타낼 때 1 차식(y=ax+b) 관계에서 절편 b 값이 해당된다. 이 절편 b를 5 회 평균하여 C=23.03 값을 얻었다. O-S-D의 Q/2.3R 값은 Fig. 2에 보인 것처럼 일정 응력별 데이터를 log t_r - 1/T 관계로 그릴 때 일정응력 107 MPa, 150 MPa, 168 MPa, 228 MPa에서 각 직선은 거의 평행관계를 잘 보였으며, 이들 기울기 값이 Q/2.3R이 되므로, 이들 4 개 직선의 1 차식 기울기를 4 회 평균하여 Q/2.3R = 25530의 값을 얻었다. M-H의 t_a 및 T_a 값은 Fig. 3에 보인 것처럼 일정 응력별 데이터를 log t_r - T 관계로 4 개의 곡선이 1 점에 수렴되는 값의 좌표 값이 되므로 이 값을 결정하면 된다. 그러나 실제 4 개 직선이 1 점에 정확히 수렴이 잘 되지 않고 있음을 알 수 있었다. 따라서 보다 정확히 구하기 위하여 각 직선의 1 차식에 대한 4 개 연립방정식을 x와 y에 대하여

풀어서 평균값을 구하였다. 이때 y 축은 t_a 값에 해당되고 x 축은 T_a 값에 해당된다. 4 개의 연립방정식을 평균값을 구한 결과 $t_a = 12.0475E9$, $T_a = 679.5$ 의 값을 얻었다. 이상과 같은 방법으로 C , Q , t_a 및 T_a 의 임의 상수값들을 사용하여 식 (2), (3) 및 (4)의 각 파라메타 상수값을 계산하여 얻었다.

3.3 상대표준오차(RSE) 분석

Fig. 4, 5 및 6 은 이상의 절차로 얻어진 각 파라메타 값을 이용하여 $P-\sigma$ 관계로 나타낸 것이다. 데이터 점들과 가장 잘 맞는 회귀곡선으로부터 수명예측 다항식을 각각 얻었다. L-M 인 경우는 2 차식, O-S-D 및 M-H 는 4 차 다항식이 가장 잘 맞는 것으로 나타났다. 전체적으로 보면 3 파라메타 모두 다항식으로 나타내면 수명예측 곡선을 잘 얻을 수 있음을 알 수 있다.

회귀곡선의 다항식으로부터 계산된 각 데이터들의 오차 정도를 알아보기 위하여 각 파라메타 별 상대표준오차, RSE (relative standard error)를 각각 계산하여 비교 하였다. RSE 는

$$RSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{\hat{Y}_i} \right)^2 / (n - n_p)} \quad (6)$$

로 표현되는 값으로 \hat{Y}_i 의 예측값에 대하여 상대적인 오차를 나타내는 값이다. Table 1 은 이상에서 얻어진 각 파라메타 식의 임의 상수 및 회귀 곡선 식의 계수값을 요약 정리하여 나타내었다. RSE 값을 3 개의 파라메타법 별로 비교하여보면 O-S-D(=0.01283) <L-M(=0.01316) <M-H (=0.05254) 순으로 M-H 법이 O-S-D 나 L-M 법보다 높은 오차값을 보이고 있음을 알 수 있다.

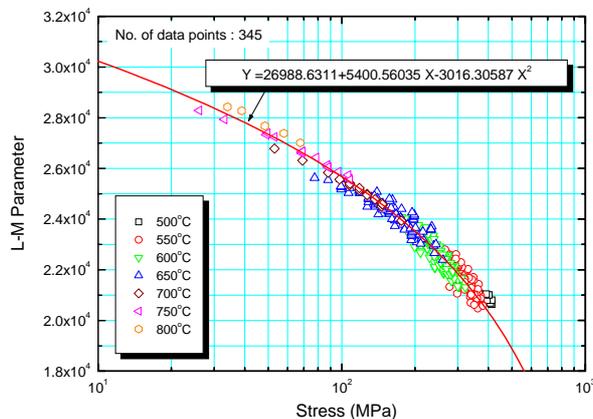


Fig. 4 L-M parameter equation for life prediction

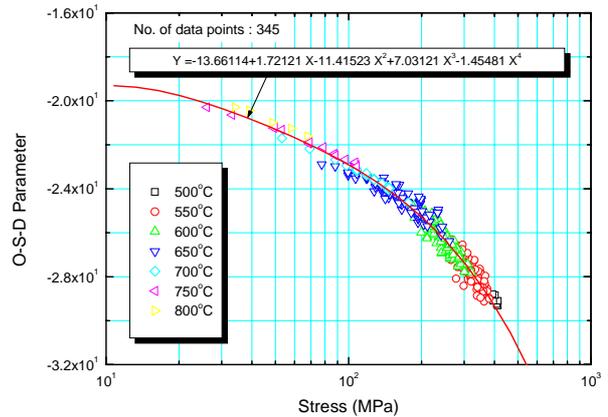


Fig. 5 O-S-D parameter equation for life prediction

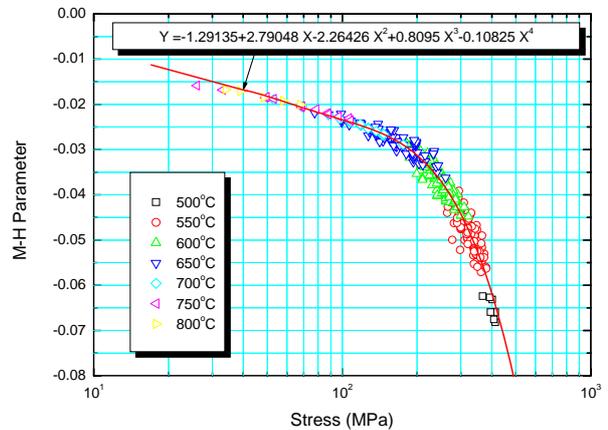


Fig. 6 M-H parameter equation for life prediction

이러한 이유는 파라메타 예측 곡선의 모양에서 볼 수 있듯이, M-H 법의 경우 200MPa 의 응력부근에서 급격히 변화하는 곡선 모양으로 인하여 발생하는 것으로 판단된다.

3.4 예측 파단시간의 표준오차(SEE) 분석

실험 데이터에 대한 회귀식의 적합성을 판단하기 위한 오차분석은 식(7)로 표현되는 예측 파단시간(대수값)의 표준오차, SEE(standard error of estimate)를 이용하였다.

$$SEE = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - n_p)} \quad (7)$$

여기서 Y_i 와 \hat{Y}_i 는 i 번째 데이터의 크리프 파단시간 실험값(대수)과 TTP 식으로부터 계산된 예측값 이다. n 은 데이터의 총개수이고 n_p 는 회귀식에 포함되어 있는 총 미정계수의 개수이다. L-M

Table 1 Constant, regression coefficient and RSE values with each parameter of 316LN stainless steels

Parameters	Constants	Regression coefficients					RSE
		b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	
L-M ¹⁾	C (= 23.03)	26988.6	5400.5	-3016.3			0.01316
O-S-D ²⁾	Q/2.3R(=25530)	-13.66	1.72	-11.41	7.03	-1.45	0.01283
M-H ³⁾	T _a (=679.5) t _a (=12.0475E9)	-1.29	2.79	-2.26	0.80	-0.10	0.05254

¹⁾ $Y(P_{L-M}) = T(\log t_r + C), Y = b_0 + b_1X + b_2X^2$
²⁾ $Y(P_{O-S-D}) = \log t_r - Q/2.3RT, Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 + b_4X^4$
³⁾ $Y(P_{M-H}) = (\log t_r - \log t_a) / (T - T_a), Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 + b_4X^4$

및 O-S-D 법인 경우는 $n_p = k + 2$ 이 되고, M-H 법인 경우는 $n_p = k + 3$ 이 된다. 각 파라메타법의 파단 수명 예측식은 파라메타, P 를 식 (5)의 응력함수 다항식으로 나타내면 된다. 즉 파라메타 P 식을 y 축, 응력함수 다항식을 x 축으로 놓고 각 파라메타 식 (2), (3), (4)를 이항정리하면 예측 파단시간, t_r 을 계산할 수 있다.

Fig. 7, 8 및 9 는 550°C, 600°C, 650°C 의 대표적인 온도에 대하여 예측 파단시간 결과를 각 파라메타별로 비교하여 각각 나타낸 것이다. 온도별 예측값의 곡선 모양을 분석하여 보면, 어느 방법이 우월하다고 볼 수는 없지만 예측 곡선의 변화양상은 각기 다르게 나타나고 있다. 즉 O-S-D 법은 L-M 와 M-H 법의 중간값으로 예측하며, 장시간에서도 비교적 실험값과 잘 일치하고 있다. M-H 의 경우는 장시간으로 가면 곡선이 아래로 변화되는 예측을 하는 것으로 나타나기 때문에 특히 700°C 이상의 고온에서 실험치와 일치하고 있음을 보였다. L-M 법은 거의 선형관계로 예측하고 있으므로, 700°C 이상의 고온에서 장시간 예측은 실험값보다 다소 높은 예측을 하고 있음을 알 수 있다.

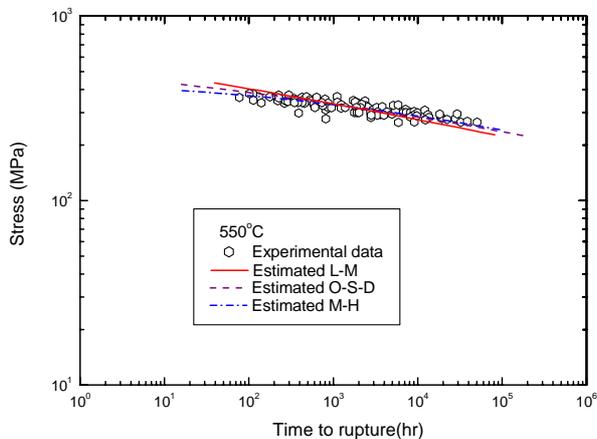


Fig. 7 Comparison of L-M, O-S-D and M-H methods on experimental and estimated results at 550°C

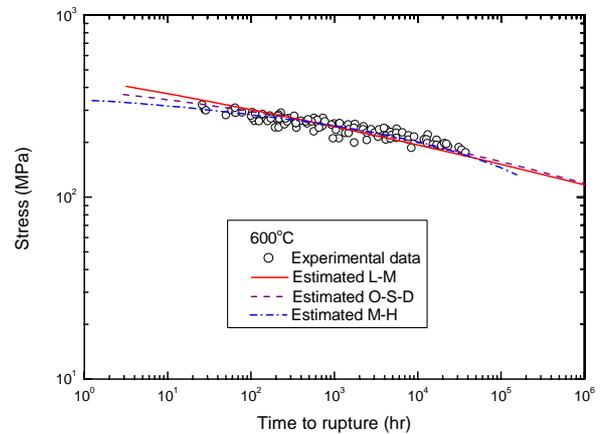


Fig. 8 Comparison of L-M, O-S-D and M-H methods on experimental and estimated results at 600°C

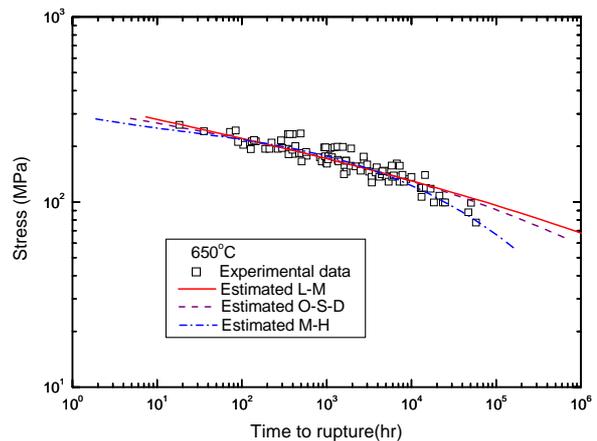


Fig. 9 Comparison of L-M, O-S-D and M-H methods on experimental and estimated results at 650°C

Table 2 의 SEE 결과를 보면 3 가지 방법은 본질적으로 TTP 법을 사용하기 때문에 큰 차이가 없지만 온도에 따라서는 다른 오차 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 650°C 까지는 SEE 값에서 큰 차이가 없으나 700°C 이상이 되면 SEE 값에서 각기 다른 오차 정도를 보임을 알 수 있다.

Table 2 Comparison of SEE values in each parameter

Temp.(°C)	SEE values for log t _r		
	L-M	O-S-D	M-H
500	0.4412	0.5532	0.6843
550	0.3823	0.3795	0.4066
600	0.3443	0.3280	0.3340
650	0.3649	0.3629	0.3640
700	0.2212	0.1251	0.0636
750	0.1510	0.1890	0.2082
800	0.3638	-	-

TTP 식을 사용한 SEE 값에는 (i) 온도 의존성의 정식화에서 기인하는 오차, (ii) 응력 의존성의 정식화에 기인하는 오차, (iii) 데이터 자체의 오차가 포함되어 있으므로, (i) 및 (ii)의 정식화에 기인하는 오차를 최소가 되게 결정하는 것이 필요하다. SEE 값의 오차는 크리프 파단 데이터가 단일 재료의 조성에 대한 것인지, 아니면 다수의 재료조성에 대한 것인지에 따라서 다르지만 단일 재료의 데이터에 대하여는 하나의 관점에서 $SEE > 0.2$ 이면 나쁜 적합성이며, $SEE < 0.2$ 이면 양호한 적합성으로 판단 기준이 되는 것으로 보고된다.⁽⁵⁾ 본 연구에서의 SEE 분석 결과는 다소 높은 오차 값을 보이는 것은 크리프 데이터가 단일 재료가 아니고 각국의 크리프 자료를 모은 것이기 때문에 다소 높은 오차가 있었던 것으로 판단된다.

4. 결 론

316LN 스테인리스강의 크리프 파단 데이터를 다수 수집하여 L-M, O-S-D, M-H 파라메타법으로 데이터를 처리하고, 각 파라메타의 적합성 판단을 위한 오차분석 절차를 확립하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) L-M, O-S-D, M-H 의 3 방법 모두 316LN 강 of 크리프 수명 예측에 큰 오차 없이 잘 적용되었으며, 전체적으로 O-S-D 법이 실험값에 가장 잘 일치하며, 고온의 장시간에서는 M-H 법이 L-M 나 O-S-D 법에 비해 잘 예측되는 것으로 나타났다.

(2) 회귀곡선에 대한 파라메타 예측 다항식의 상대표준오차(RSE) 값은 L-M 와 O-S-D 법이 M-H 법에 비해서 낮은 오차를 보였으며, 예측 파단시간에 대한 각 파라메타별의 표준오차(SEE)는 전체적으로 큰 차이가 없었으나 700°C 이상의 고온에서는 파라메타별로 차이가 있음을 보였다.

후 기

본 연구는 과기부에서 시행한 원자력 중장기 연구개발 사업 중 원자력재료 내환경 특성평가 및 향상기술개발과제내의 고온강도평가 및 신재료 기술개발 분야에서 수행한 것 입니다.

참고문헌

- (1) Kim, W. G., Kim, S. H. and Ryu, W. S., 2002, "Evaluation of Monkman-Grant Parameters for Type 316LN and Modified 9Cr-Mo Stainless Steels," *KSME Int. J.*, Vol.16, No. 11, pp. 420~427.
- (2) Kim, W. G., Kim, S. H. and Ryu, W. S., 2001, "Creep Characterization of Type 316LN and HT-9 Stainless Steels by the K-R Creep Damage Model," *KSME Int. J.*, Vol.15, No.11, pp. 1463~ 1471.
- (3) Viswanathan, R., 1989, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components," *ASM International*, pp. 59-70.
- (4) Penny, R. K. and Marriott, D. L., 1995, "Design for Creep," *Chapman & Hall*, pp. 206~248.
- (5) VAMAS Data Evaluation Committee, 1994, "Study on Standardization of Creep-Rupture Data Evaluation of Metals," *Iron and Steel Institute of Japan*, pp. 9~51.
- (6) Nam, S. W., 1997, "Measurement and Application of Creep Properties," *Bulletion of the Korean Inst. of Met. & Mat.*, Vol. 10, No. 3, pp. 223~246.
- (7) Le May, I., 1979, "Developments in Parametric Methods for Handling Creep and Creep-Rupture Data," *Transactions of the ASME*, Vol. 101, pp. 326~330.
- (8) NRIM, 1997, "Data Sheets of on the Elevated Temperature Properties of Hot Rolled Stainless Steel Plate (SUS 316-HP)-18Cr-12Ni-Mo-middle N-lowC," *NRIM Creep Data Sheet*, No. 45, pp 1~ 12.
- (9) Kazuya K., Shingo D., Kenichi T., Masayuki, S., Nobuchika. K. and Yoshihiko, T., 1999, "Material Strength Standard of 316FR Stainless Steel and Modified 9Cr-1Mo Steel," *Advances in Life Prediction Methodology- ASME*, PVP Vol. 391, pp. 47~54.
- (10) Liska, M., Vodarek, V., Sobotkova, M. and Sobotka, J., 1990, "Precipitation Behavior and Creep Rupture Properties of CrNi(Mo)N Austenitic Steels," *High Nitrogen Steels HNS 90*, pp. 78-83.
- (11) Mathew, M. D., Sasikala, G., Bhanu Sankara 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.
- (12) Kim, D. W., Lee, Y. K., Kim, W. G. and Ryu, W. S. 2001, "Effect of Nitrogen on Creep Properties of Type 316L(N) Stainless Steels," *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* Vol. 39, No.1, pp. 1241~1248.