

Type 316LN 스테인리스 강의 크리프 수명 예측과 표준오차 분석

윤송남*(송실대 대학원 기계공학과), 김우곤(한국원자력연구소), 류우석(한국원자력연구소),
이원(송실대 기계공학과)

Creep-Life Prediction and Standard Error Analysis of Type 316LN Stainless Steel

S. N. Yun(Mechanical. Eng. Dept. SSU), W. G. Kim(KAERI), W. S. Liu(KAERI),
W. Yi (Mechanical. Eng. Dept. SSU)

ABSTRACT

The creep rupture data for type 316LN stainless steels were collected through literature survey or experimental data produced in KAERI. Using these data, polynomial equations for predicting creep life were obtained by Larson-Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D) and Manson-Haferd (M-H) etc. time-temperature parametric (TTP) methods. Standard error of estimate (SEE) values for the each parameter was obtained with different temperatures through the statistical process of the creep data. The results of L-M, O-S-D and M-H methods showed good creep-life prediction, but M-H method showed better agreement than L-M and O-S-D methods. Especially, it was found that SEE values of M-H method at 700 °C were lower than that of L-M and O-S-D methods..

Key Words : Type 316LN Stainless Steel(Type 316LN 스테인리스강), Creep(크리프), Standard Error (표준오차), Time-Temperature Parameter(시간-온도 파라미터), Creep Life(크리프 수명)

1. 서론

화력발전소는 에너지 전환 효율의 수효에 따라 점점 높은 온도를 필요로 한다. 또한 액체금속로 원전 발전소 구조물들은 고온(>550°C)에서 20~30 년 이상의 장기간 동안 사용되도록 설계되기 때문에 장시간에서의 고온 크리프 특성이 매우 중요하다.¹⁻² 그러나 사용할 재료에 대하여 장시간 크리프 수명을 실험에 의하여 정확히 확인한 후 사용하는 것은 현실적으로 불가능하기에 비교적 단시간의 크리프 파단 시험을 통하여 장시간의 크리프 수명을 예측하는 것이 필요하다.

따라서 단시간의 크리프 자료를 이용하여 장시간의 크리프 수명을 예측하기 위한 다수의 수명 예측 파라미터 방법들이 개발되었다. 이들 중에서 주로 사용되는 대표적인 것으로는 Larson-Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D), Manson-Haferd (M-H), Manson-Succop (M-S), Goldhoff-Sherby (G-S) 파라미터 등이 있으며, 이들은 모두 시간-온도 파라미터(time-temperature parameter, TTP) 방법으로 정식화된

다.³⁻⁷ 즉 크리프 변수인 시간, 온도, 응력의 세 변수를 하나의 식으로 묶어 복합적인 효과를 나타내도록 한 것인데, 시간과 온도 변수를 묶어 하나의 파라미터로 변환시키고, 이 파라미터를 응력의 함수로 나타내면 임의의 온도에서 응력 값을 알면 크리프 파단시간을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 316LN 스테인리스강에 대하여 500°C ~ 800°C 의 크리프 파단자료를 실험 및 문헌으로부터 수집하여 대표적 크리프 수명예측 모델인 L-M, O-S-D, M-H 파라미터 식에 적용하여 수명 예측식을 얻었으며, 또한 얻어진 각 수명 예측식으로부터 예측 파단 시간의 표준오차(standard error of estimate, SEE) 값을 구하여 각 수명예측 파라미터의 적합성 정도를 비교 분석하였다.

2. 시간-온도 파라미터(TTP) 법

2.1 TTP 법의 기초

TTP 법은 파라미터 $P(t, T)$ 를 사용하여 온도 T

와 파단시간 t_r 을 통합하여 응력만의 함수 $f(\sigma)$ 로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

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

이들 파라미터들은 일정응력의 크리프 파단 데이터를 y 축에는 대수 파단시간 $\log t_r$, x 축에는 온도 T (또는 $1/T$)의 관계로 나타낼 때 모두 선형 관계에 있다는 가정 하에 만들어진 것이다. Fig. 1에 나타낸 것처럼 L-M, G-S, O-S-D 파라미터는 $\log t_r - 1/T$ 관계가 선형관계에 있는 것이며, M-H 와 M-S 파라미터는 $\log t_r - T$ 의 관계가 선형관계에 있다. 그리고 $(\log t_r) - 1/T$ 의 관계에서 L-M 파라미터는 직선의 기울기가 각기 다른 경우로서 1 차식의 절편 값을 나타내는 C 값이 y 축에 접하나, G-S 파라미터는 y 축에 접하지 않는 한 점에서 수렴하는 경우이며, O-S-D 파라미터는 각 응력의 직선 기울기가 동일한 경우이다. 또한 $\log t_r - T$ 의 관계를 나타내는 M-H 파라미터는 직선의 기울기가 공간상의 1 점에서 수렴하며, M-S 파라미터는 직선의 기울기가 같은 평행한 경우이다. 따라서 $\log t_r - T$ (또는 $1/T$)의 관계가 각 파라미터 별로 차이가 있다.

위의 5 가지 파라미터 방법 중에서 G-S 파라미터는 L-M 파라미터와 유사하고, M-S 파라미터는 M-H 파라미터와 유사하므로, 본 연구에서는 L-M, O-S-D, M-H 파라미터의 3 가지 방법을 사용하여 316LN 강의 크리프 수명 예측식을 얻고자 하였으며 각 파라미터 법의 적합성을 분석하였다. L-M, O-S-D, M-H 의 3 파라미터의 각 식들은 (2), (3), (4)와 같이 표현된다.⁽⁸⁾

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

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

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

여기서 C , Q , t_a 및 T_a 는 임의 상수이고, R 은 기체상수이다. O-S-D 파라미터에서 $Q/2.3R$ 은 응력 직선의 기울기 값으로 1 개의 상수 값이 되나, M-H 파라미터는 t_a 및 T_a 의 2 개의 임의 상수를 포함한다.

각 파라미터 법의 응력 함수는 다음 식 (5)와 같은 다항식으로 나타낼 수 있다.

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

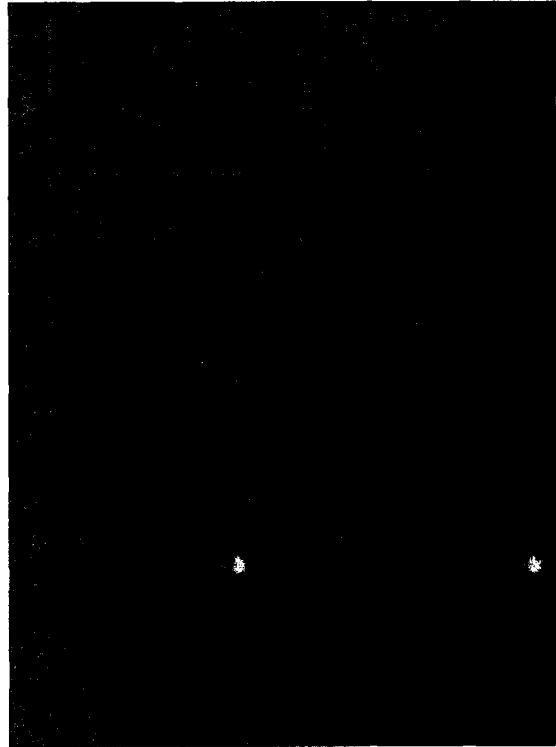


Fig. 1 Typical time-temperature parametric methods

여기서 k 는 다항식의 차수이며, b_k 는 k 차에 대한 회귀계수(regression coefficient)를 나타낸다.

2.2 TTP 법의 적용

TTP 법은 크리프 파단 시간 실험 데이터를 사용하여 다음과 같은 절차에 따라서 각 파라미터, P 값을 계산하고 P 값과 $\log \sigma$ 사이의 가장 잘 일치하는 회귀곡선으로부터 응력 다항식을 결정한다.

(i) 대수 파단시간 $\log t_r$ 과 크리프 온도 T 와의 관계에서 상수 C , Q , t_a 및 T_a 의 값들을 결정한다.

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

(iii) 계산된 각 파라미터 값과 실험 온도에 해당하는 응력 데이터를 이용하여 σ (x 축) - P (y 축)으로 데이터를 넣은 다음 크리프 데이터를 가장 잘 나타내는 응력함수 $f(\sigma)$ 의 회귀식을 결정한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 크리프 파단 데이터의 수집

316LN 스테인리스강의 크리프 데이터는 현재까

지 문헌에서 보고된 재료조성이 정확히 표기된 신뢰성이 있는 데이터들만 수집하여 디지털화 (digitizing) 하고 파일화 하였다. 수집된 316LN 강 의 재료조성은 약 0.03wt% 이하 저 탄소량과 고용 강화 효과가 좋은 질소가 약 0.06-0.15wt% 범위로 첨가된 데이터들에 대한 것이다.

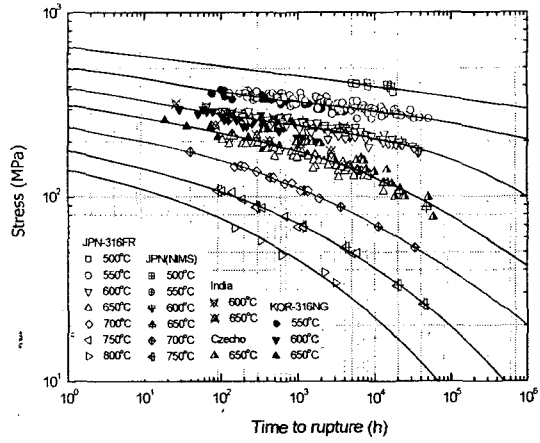


Fig. 2 Stress vs. Time to rupture of type 316LN stainless steel

Fig. 2 는 본 연구에서 수집한 316LN 강 의 온도 별 크리프 데이터를 응력과 파단시간으로 나타낸 것이다. 본 316LN 강 의 크리프 데이터는 일본 (8-9), 체코 ¹⁰, 인도 ¹¹, 한국 ^{1-2, 12} 등에서 생산된 데이터로서 크리프 물성을 비교하는데 유용한 참고자료가 된다.

이들 수집된 316LN 강 의 크리프 데이터를 이용하여 L-M, O-S-D, M-H 파라미터 법으로 파단 시간을 예측하고, 각 파라미터 법에 대한 예측 파단 시간의 오차 정도를 비교 분석한다.

3.2 TTP 식의 상수 값 결정

크리프 수명을 예측하기 위해서는 각 파라미터 식에 사용되는 C , Q , t_0 및 T_0 의 임의 상수 값들을 결정하여야 한다. L-M 의 경우 C 값을 결정하는 데는 2 가지 방법으로 구할 수 있다. 첫째 방법은 일정 응력별 데이터를 Fig. 2 와 같은 전형적인 $\log \sigma - \log t_r$ 의 시험 결과 곡선을 이용하면 된다. 크리프 시험조건 (T_1, t_{r1})과 (T_2, t_{r2}) 사이에는 $T_1 (\log t_{r1} + C) = T_2 (\log t_{r2} + C)$ 가 성립하므로

$$C = \frac{T_1 \log t_{r1} - T_2 \log t_{r2}}{T_2 - T_1} \quad (6)$$

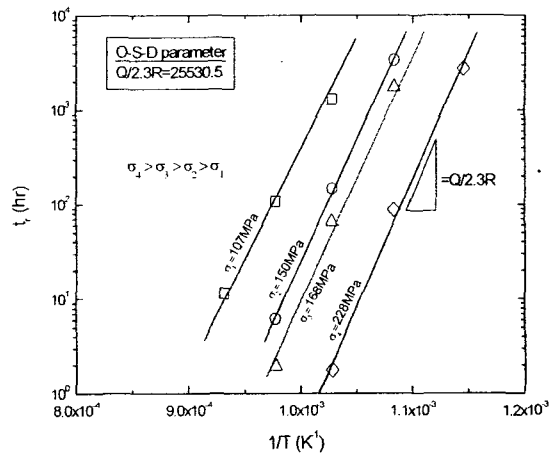


Fig. 3 Relationship between t_r and $1/T$ in O-S-D parameter under constant stresses

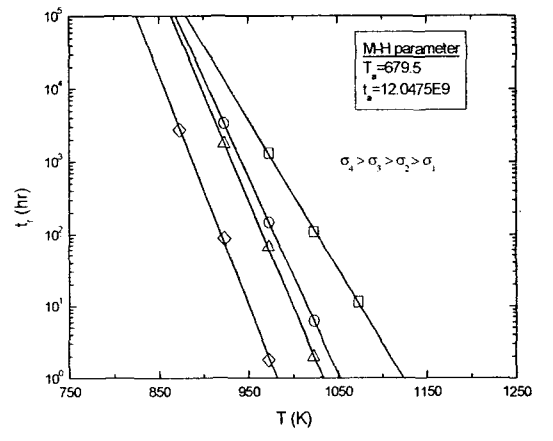


Fig. 4 Relationship between t_r and T in M-H parameter under constant stresses

C 의 평균값은 일정응력에서의 온도조건에 대하여 얻어지는 파단시간 실험 데이터를 계산하여 얻을 수 있다. 두 번째 방법은 일정응력의 데이터를 $\log t_r - 1/T$ 의 관계로 나타낼 때 1 차식 ($y = ax + b$) 관계에서 절편 b 값이 C 값이 되므로 이 값을 얻으면 된다. 본 연구에서는 위의 두 가지 방법을 적용한 결과, 식(6)을 이용하게 되면 $\log \sigma - \log t_r$ 그래프상에 각 점의 데이터 값을 결정하는 과정에서 상당한 차이가 발생함을 알 수 있었다. 그래서 보다 정확한 값을 얻기 위하여 둘째 방법을 사용하여 1 차식 절편 b 를 5 회 평균하여 $C=23.03$ 값을 얻었다. O-S-D 의 $Q/2.3R$ 값은 Fig. 3 에 보인 것처럼 107 MPa, 150 MPa, 168 MPa, 228 MPa 의 각 응력별

데이터는 $\log t_r - 1/T$ 관계로 나타내면 평행관계에 있음을 잘 보인다. 이들 직선의 기울기 값이 $Q/2.3R$ 이 되므로 4 개 직선의 기울기 값을 평균하여 25530 의 값을 얻었다.

M-H 의 t_a 및 T_a 값은 Fig. 4 에 보인 것처럼 일정 응력별 데이터를 $\log t_r - T$ 관계로 나타낼 때 4 개 곡선이 1 점에 수렴되는 좌표 값이 되므로 이 값을 결정하면 된다. 그러나 실제 4 개 직선이 1 점에 정확히 수렴되지 않고 있음을 알 수 있었다. 따라서 각 직선의 1 차식에 대한 4 개 연립방정식을 x 와 y 에 대하여 풀어서 평균값을 취하여 구하였다. 이때 y 축 좌표값은 t_a 값에 해당되고 x 축 좌표값은 T_a 값에 해당된다. 4 개의 연립방정식을 평균값을 구한 결과 $t_a = 12.0475E9$, $T_a = 679.5$ 의 값을 얻을 수 있었다.

3.3 상대표준오차(RSE) 분석

Fig. 5, 6 및 7 은 C , Q , t_a 및 T_a 의 얻어진 임의 상수 값들을 사용하여 식 (2), (3) 및 (4)의 각 파라미터 상수(P) 값을 얻고, 이를 $P-\sigma$ 관계로 나타낸 것이다. 모든 크리프 데이터 점들과 가장 잘 맞는 회귀곡선으로부터 수명예측 다항식을 각각 얻을 수 있다. L-M 인 경우는 2 차식, O-S-D 및 M-H 는 4 차 다항식이 가장 잘 맞는 것으로 나타났으며, 5 차 이하의 다항식으로 나타내면 수명예측 곡선이 잘 표현이 됨을 알 수 있었다. 실험 데이터의 회귀곡선 다항식으로부터 계산된 예측 곡선에 대하여 각 데이터들의 오차는 상대표준오차(relative standard error, RSE)를 구하여 각 파라미터 별로 비교하였다. RSE 값은 다음 식(7) 로 표현된다.

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

Y_i 와 \hat{Y}_i 는 i 번째 데이터의 크리프 파단시간 실험 대수값과 TTP 식으로부터 계산된 예측값을

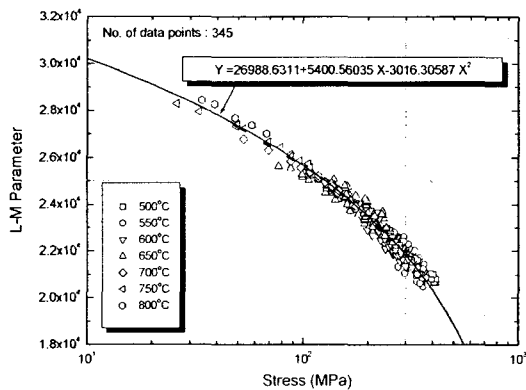


Fig. 5 L-M parameter equation for life prediction

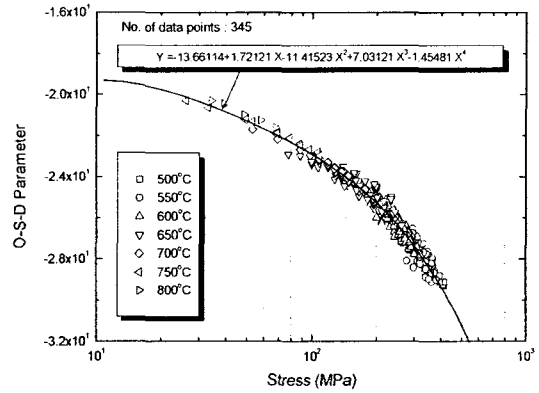


Fig. 6 O-S-D parameter equation for life prediction

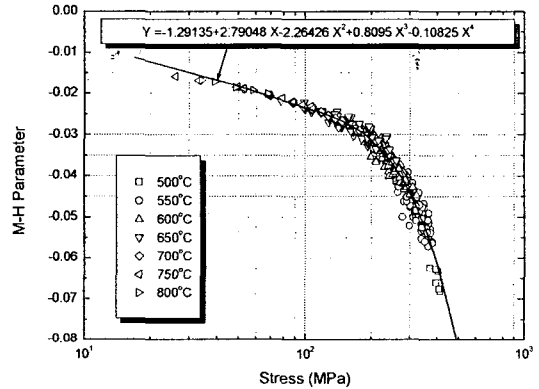


Fig. 7 M-H parameter equation for life prediction

나타내며, n 는 데이터의 총갯수이고 n_p 는 회귀식에 포함되어 있는 미정계수의 총 갯수이다. L-M 및 O-S-D 인 경우는 $n_p = k + 2$ 이 되고, M-H 인 경우는 $n_p = k + 3$ 이 된다. 식 (7)은 \hat{Y}_i 의 평균예측값에 대하여 각 데이터의 상대 오차값을 나타내는 것으로, Table 1 에 각 파라미터 식의 임의 상수 및 회귀곡선식에서 얻어진 계수 값을 정리하여 나타내었다. RSE 값을 각 파라미터 별로 비교하면 L-M 는 0.01316, O-S-D 는 0.01283, M-H 는 0.05254 의 값으로 345 개 데이터의 온도별 전체 데이터를 감안하면 매우 낮은 오차를 보인다.

따라서 316LN 스테인리스 강의 크리프 수명 예측을 위해 3 개 파라미터 모두 잘 사용될 수 있음을 알 수 있으며, M-H 법에서의 약간 높은 오차 원인은 Fig. 7 에서 보이는 것처럼 200~250 MPa 응력 부근에서 수명예측 회귀곡선이 급격히 변화하기 때문에 오차 값이 L-M 나 O-S-D 방법에 비해 약간 높게 발생하는 것으로 판단된다.

Table 1 Constant, regression coefficient and RSE values for each parameter of type 316LN stainless steel

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 = b₀+b₁X+b₂X²
²⁾ Y(P_{O-S-D})=log t_r - Q/2.3RT, Y = b₀+b₁X+b₂X²+b₃X³+b₄X⁴
³⁾ Y(P_{M-H}) = (log t_r-log t_a)/(T-T_a), Y = b₀+b₁X+b₂X²+b₃X³+b₄X⁴

3.4 예측 파단시간의 표준오차(SEE) 분석

L-M, O-S-D 및 M-H 법의 각 파라미터에 대한 온도별 수명예측 회귀식의 적합성을 판단하기 위하여 표준오차 (standard error of estimate, SEE) 값을 구하여 비교하였다. 표준오차 식은

$$SEE = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - n_p)} \quad (8)$$

로 정의되며, 여기에 사용된 각 계수들의 의미는 식 (7)에 설명된 것과 같다. 각 파라미터 법의 수명예측식은 파라미터 P를 식 (5)의, 응력함수 다항식으로 나타내면 된다. 즉 파라미터 P식을 y 축으로 놓고 응력함수 다항식은 x 축으로 놓고서 각 파라미터 예측식 (2), (3), (4)를 이항 정리하여 풀면 예측 파단시간 t_r을 계산할 수 있다.

O-S-D 법은 L-M 와 M-H 법의 중간 정도의 값을 가지고 예측하고 있으며, M-H 법의 경우는 특히 700 °C 의 고온의 장시간에서 실험값과 잘 일치하고 있다. 반면 L-M 법은 700 °C 의 고온에서 장시간 조건이 되면 거의 선형관계로 예측하고 있으므로 예측값은 실험값 보다 다소 높은 값을 가지고 잘 일치하지 않음을 알 수 있다. 이상의 각 파라미터 방법의 수명예측 결과에 대하여 온도별 온도별 예측 파단시간에 대한 표준오차, SEE 값의 계산 결과를 요약 정리하여 나타내면 Table 2 와 같다.

각 파라미터 법에 대한 표준오차 결과를 분석하면, L-M, O-S-D 및 M-H 법은 모두 큰 오차가 발생하지 않았지만, M-H 법의 경우는 700 °C 의 고온으로 가면 L-M 나 O-S-D 법에 비해 낮은 오차 값으로 예측값은 실험값과 매우 잘 일치함을 보였다. 이러한 결과는 M-H 법은 식 (3)에서 처럼 t₀ 및 T₀ 의 2 개의 임의 상수를 포함하기 때문에 T₀ 의 온도 적용성 범위가 넓다는 것을 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
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

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 최소화 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 대하여 SEE>0.2 이면 나쁜 적합성이며, SEE<0.2 이면 양호한 적합성으로 판단 기준이 되므로⁽⁵⁾, 본 연구에서의 SEE 분석 결과에서 다소 높은 오차 값을 보이는 것은 316LN 강의 단일 재료 조성이라 할지라도 각국으로 다수의 크리프 자료를 모은 것이기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

1) 316LN 스테인리스강의 장시간 크리프 수명을 예측하고자 크리프 파단 데이터를 다수 수집하고 이들 데이터를 L-M, O-S-D, M-H 수명 예측식에 적용하여 크리프 수명 예측식을 각각 얻었으며, 각 수명 예측식의 표준오차를 분석한 결과 316LN 강의 크리프 수명 예측에 큰 오차 없이 모두 잘 적용될 수 있음을 보였다.

2) 316LN 강에 대한 L-M, O-S-D, M-H 수명예측법의 550°C ~ 700°C 사이의 온도별 표준오차 값은

650°C까지는 큰 차이가 없었으나 700°C의 고온이 되면 M-H 법이 L-M 나 O-S-D 법에 비해 보다 좋은 수명 예측을 하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 M-H 법은 t_n 및 T_n 의 2개의 임의 상수를 포함하므로 온도의 적용성 범위가 넓기 때문으로 판단된다.

3) O-S-D 법은 온도별 수명 예측 곡선의 거동에 있어서 L-M 와 M-H 법의 중간 값을 가지고 크리프 수명을 예측하는 것으로 나타났다.

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.

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 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