

〈 논문 〉

## 시간-온도 파라미터법과 최소구속법에 의한 크리프 수명예측과 오차 분석

윤송남\* · 김우곤† · 류우석\*\* · 이 원\*  
(2006년 6월 20일 접수, 2006년 12월 21일 심사완료)

### Creep-Life Prediction and Its Error Analysis by the Time Temperature Parameters and the Minimum Commitment Method

Song-Nan Yin, Woo-Gon Kim, Woo-Seog Ryu and Won Yi

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

#### Abstract

To predict long-term creep life from short-term creep life data, various parametric methods such as Larson-Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D), Manson-Haferd (M-H) parameters, and a Minimum Commitment Method (MCM) were suggested. A number of the creep data were collected through literature surveys and experimental data produced in KAERI. The polynomial equations for type 316LN SS were obtained by the time-temperature parameters (TTP) and the MCM. Standard error (SE) and standard error of mean (SEM) values were obtained and compared with the each method for various temperatures. The TTP methods showed good creep-life prediction, but the MCM was much superior to the TTP ones at 700°C and 750°C. It was found that the MCM were lower in the SE values when compared to the TTP methods.

#### 1. 서 론

금속재료는 고온에서 장시간 사용되면 열화 및 크리프 변형이 발생하면서 파단에 이르게 된다. 원전 발전소 구조물들은 고온에서 20~30년 이상의 장기간 동안 사용되도록 설계되기 때문에 재료의 장시간 고온 크리프 특성이 매우 중요하다. 그러나 크리프 데이터를 실험적으로 얻기에는 경제적, 시간적 제한이 있다. 따라서 단시간의 크리프 자료를 이용하여 외삽에 의하여 장시간의 크

리프 수명을 예측하기 위한 다수의 수명예측 방법들이 제안되고 있으며<sup>(1,2)</sup> 이러한 방법은 주로 시간-온도 파라미터법(time-temperature parameter, TTP), 응력변환 파라미터법(stress modified parameter), 시간-응력 파라미터법(time-stress parameter)으로 구분된다. 이들 파라미터법에서 널리 사용되고 있는 시간-온도 파라미터는 선형 파라미터법과 비선형 파라미터법으로 구분되며 선형 파라미터법은 대부분 재료에서 적용이 가능하며 응용이 간편한 이점이 있으며 그 대표적인 것으로는 Larson-Miller(L-M), Orr-Sherby-Dorn(O-S-D), Manson-Haferd(M-H), Manson-Succop(M-S), Goldhoff-Sherby (G-S) 파라미터법 등이 주로 사용되고 있다.<sup>(2-7)</sup> 이러한 TTP 법은 일정 응력에서 그리프 파단 시간과 온도의 관계가 선형이고 각 등응력 선들은 한 점에 수렴하거나 평행해야 하는 구속조건이 따른다. 경우에 따라서는 이러한 구속조건이 만

† 책임저자, 회원, 한국원자력연구소  
E-mail : wgkim@kaeri.re.kr  
TEL : (042)868-2493, FAX : (042)868-8549  
\* 숭실대학교 기계공학부  
\*\* 한국원자력연구소

족되지 않는 경우도 있으며 이 경우 예측에 상당한 오차가 발생할 수 있다.<sup>(8)</sup>

이에 대하여 최소구속법(minimum commitment method, MCM)은 시간-온도 파라미터법의 다른 형태로서 1971년 Manson과 Ensign에 의하여 제안되었다. 이 방법은 일반적인 시간-온도 파라미터법에서 규정된 구속조건을 최소화한 포괄적인 형태로서 보편적인 경우에 모두 적용될 수 있는 새로운 파라미터법으로 보고되고 있다.<sup>(9,10)</sup>

본 연구에서는 316LN 스테인리스강에 대하여 500℃~800℃의 크리프 파단자료를 실험 및 문헌으로부터 수집하여 L-M, O-S-D, M-H 파라미터의 TTP법과 최소구속법을 적용하여 수명 예측식을 얻었으며, 또한 얻어진 각 수명 예측식으로부터 예측 파단시간의 표준오차(standard error, SE) 및 평균의 표준오차(standard error of mean, SEM) 분석을 통하여 두 가지 방법의 적합성을 비교 분석하였다.

## 2. 크리프 수명예측 파라미터

### 2.1 시간-온도 파라미터법

TTP법은 파라미터  $P(t_r, T)$ 를 사용하여 온도  $T$ 와 파단시간  $t_r$ 을 통합하여 응력만의 함수  $f(\sigma)$ 로 식 (1)과 같이 표현된다.

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

선형 파라미터 법은 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 나타난 것처럼 L-M, O-S-D 파라미터는  $\log t_r - 1/T$  관계가 선형관계에 있는 것이며, M-H 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 1차식의 절편값을 나타내는  $C$ 값이  $y$ 축상의 한 점에 수렴하나, O-S-D 파라미터는 각 응력의 직선 기울기가 동일한 경우이다. 또한  $\log t_r - T$ 의 관계를 나타내는 M-H 파라미터는 직선의 기울기가 임의의 한 점에서 수렴하는 경우이다.

L-M, O-S-D, M-H의 3개 파라미터의 각 식들은 (2), (3), (4)와 같이 각각 표현된다.

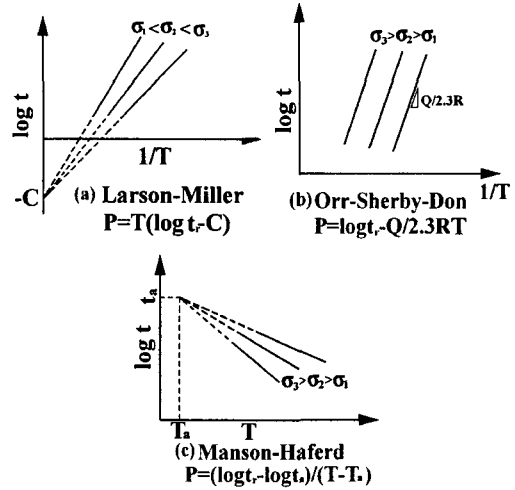


Fig. 1 Typical time-temperature parametric methods

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

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

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

여기서  $C$ ,  $Q$ ,  $t_a$  및  $T_a$ 는 임의의 상수이고,  $R$ 은 기체상수이다. 각 파라미터 법의 응력 함수는 다항식으로 나타낼 수 있다.

### 2.2 최소구속법

최소구속법은 실험데이터로부터 잘 맞는 계수를 회귀법(regression method)에 의해 찾아내는 것으로 일반식은 다음과 같이 표현된다.

$$F(\log t_r) + P(T) = G(\log \sigma) \quad (5)$$

파단시간과 온도 사이에 함수  $F(T)$ 의 관계가 성립되고, 이 함수 관계를  $F(T) = 1 + AP(T)$ 라고 가정하면,

$$\log t_r + AP(T)\log t_r + P(T) = G(\log \sigma) \quad (6)$$

을 얻을 수 있다. 식 (6)은 Manson과 Ensign이 제안한 최소구속법의 일반화된 식이다.<sup>(10)</sup> 여기서,  $t_r$ 은 파단시간,  $A$ 는 재료상수,  $P(T)$ 는 온도함수,  $G(\log \sigma)$ 는 응력함수이다.

### 3. 표준오차 분석

표준오차(SE)와 평균의 표준오차(SEM)는 데이터가 중심 값에 얼마나 잘 맞는가를 판단하는데 많이 사용된다. 각각의 파라미터에 의해 수명 예측을 함에 있어서 가장 이상적인 상태는 오차의 평균과 편차가 0인 상태이다. 그러나 실제 실험은 여러 가지 불확실성이 존재하고 또한 예측법에 의해서도 오차가 발생한다. 여기서 표준오차는 데이터의 산포를 나타내고 평균의 표준오차는 예측 정확도를 나타낸다. 표준오차는 표본으로부터 얻는 통계량으로서 다음과 같은 식 (7)에 의해 구할 수 있다.

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

여기서,  $Y_i$ 와  $\hat{Y}_i$ 는  $i$ 번째 데이터의 크리프파단시간 실험값과 예측값을 가리키고  $n$ 은 측정된 데이터 수이다.

SEM은 샘플에 의해 계산된 평균값의 분포를 나타내는 통계량으로서 예측정확도를 나타내며 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$SEM = SE / \sqrt{n} \quad (8)$$

L-M, O-S-D 및 M-H법과 최소구속법에 의한 온도별 수명예측의 정확도를 판단하기 위하여 SE와 SEM값을 구하여 비교하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 TTP 식의 상수 값 결정

본 316LN강의 크리프 데이터는 일본,<sup>(11,12)</sup> 체코,<sup>(13)</sup> 인도,<sup>(14)</sup> 한국<sup>(8,14)</sup> 등에서 생산된 데이터를 이용하여 L-M, O-S-D, M-H 파라미터 법과 최소구속법으로 크리프 파단 시간을 예측하고, 각 방법에 대한 예측 파단시간의 표준오차 정도를 비교 분석하고자 한다. 크리프 수명을 예측하기 위해서는 각 파라미터 식에 사용되는  $C$ ,  $Q$ ,  $t_a$  및  $T_a$ 의 임의의 상수값들을 결정하여야 한다. L-M 법의 경우 Fig. 2와 같은  $\log \sigma - \log t_r$  곡선에서 등응력선상의 두 점 ( $T_1, t_{r1}$ ) 과 ( $T_2, t_{r2}$ ) 사이에는

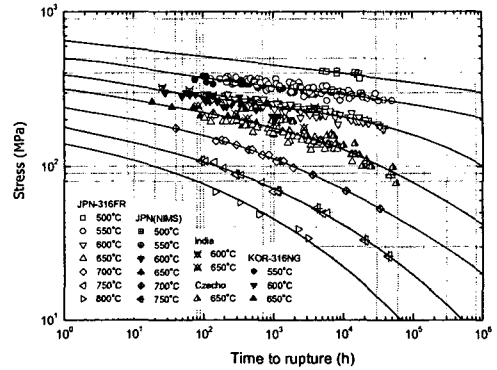


Fig. 2 Plot of stress and time to rupture of type 316LN stainless steel

식 (2)에 의하여  $T_1(\log t_{r1} + C) = T_2(\log t_{r2} + C)$ 가 성립하므로 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$C = (T_1 \log t_{r1} + T_2 \log t_{r2}) / (T_2 - T_1) \quad (9)$$

$C$ 의 평균값은 일정응력에서의 각 온도조건에 대하여 얻어지는 파단시간 데이터를 이용하여  $C=20$ 의 값을 얻었으며 또한 O-S-D의  $Q/2.3R$  값은 25530으로, M-H의  $t_a$  및  $T_a$  값은  $t_a = 12.0 \times 10^9$ (h),  $T_a = 679.5$ (K)의 값을 얻었다.<sup>(1)</sup>

#### 4.2 MCM에서 상수 A와 함수 P(T) 결정

##### 4.2.1 상수 A값의 결정

A값의 결정 방법으로는 시행착오법이 보편적으로 사용된다. 이 방법은 예상되는 일정한 범위의 A값을 식 (6)에 대입하여 얻어지는 G함수값과  $\log \sigma$ 와의 관계로부터 회귀 다항식을 얻는다. 여기서 다항식이 실험결과를 어느 정도 잘 반영하는지를 나타내는 통계적 수치인 결정계수 (coefficient of determination,  $R^2$ )값이 가장 클 때의 A값 -0.05를 얻었다.

##### 4.2.2 P(T) 함수의 결정

P함수는 시간-온도 파라미터로 쉽게 전환될 수 있는 형태인 다음 식으로부터 제안되었다.<sup>(8)</sup>

$$P(T) = R_1(T - T_m) + R_2(1/T - 1/T_m) \quad (10)$$

여기서,  $R_1, R_2$ 는 재료 상수이고 다음 방법에 의하여 계산된다. 식 (10)을 식 (6)에 대입하고,

$R_1, R_2$ 에 따라 정리하면 식 (11)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\log t_{r2} - \log t_{r1}}{M} = \frac{N}{M} R_2 + R_1 \quad (11)$$

여기서  $M, N$ 은 임의의 두 점의 온도와 파단시간에 의하여 결정되는 상수이다.  $T_m$ 은 실험 데이터의 중간온도를 나타내는 것으로 본 연구에서는  $550^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 의 실험 데이터에 대하여  $650^\circ\text{C}$ 를 취하여 계산한 결과  $R_1 = -0.0472, R_2 = -69457$ 을 각각 얻었다.

### 4.3 수명예측식과 오차 분석

Fig. 3~6은 L-M, O-S-D, M-H와 MCM에 의한 회귀 다항식과 그래프를 각각 나타낸 것이다. M-H법과 MCM은 Fig. 5 및 6에서 보이는 것처럼 응력이 200 MPa인 부근에서 수명예측 회귀곡선이 변곡점이 발생하며 이로 인하여 회귀 다항식의 차수가 증가하게 된다.

Fig. 7은 TTP와 MCM을 이용하여 수명 예측한 값과 실험 데이터를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 M-H법과 MCM의 경우는 특히  $700^\circ\text{C}$ 이상의 고온의 장시간에서 실험값과 잘 일치하고 있고, 또한 고온 장시간에서 예측값이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 회귀 다항식에서의 변곡점과 관련이 있다. 일반적으로 높은 응력에서 재료는 연성파괴를 일으키며 예측곡선의 기울기는 작고 낮은 응력 측에서는 취성파괴가 일어나므로 예측곡선의 기울기는 커진다. 또한 M-H법은 식 (3)에서처럼  $t_a$  및  $T_a$ 의 2개의 임의의 상수를 포함하기 때문에  $T_a$ 의 온도 적용성 범위가 넓으므로 고온 장시간에서 실험 데이터와 잘 일치함을 볼 수 있다.

M-H법과 MCM에서 예측곡선의 변곡점은 이러한 성질을 잘 반영하고 있으므로 예측값과 실험값이 잘 일치하는 것으로 판단된다. 반면 L-M법과 O-S-D법은  $700^\circ\text{C}$ 이상의 고온 장시간 조건에서도 기울기의 값이 크게 변하지 않기에 예측값은 실험값 보다 다소 높은 값을 나타낸다. 이상의 각 파라미터 방법의 수명예측 결과에 대하여 온도별 예측 파단시간에 대한 평균값, SE, SEM 결과를 요약 정리하여 나타내면 Table 1과 같다.

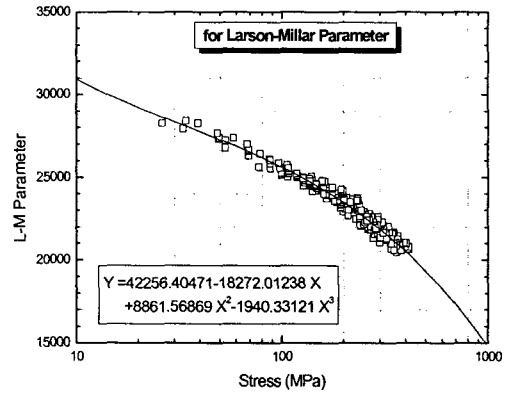


Fig. 3 L-M equation for creep-life prediction

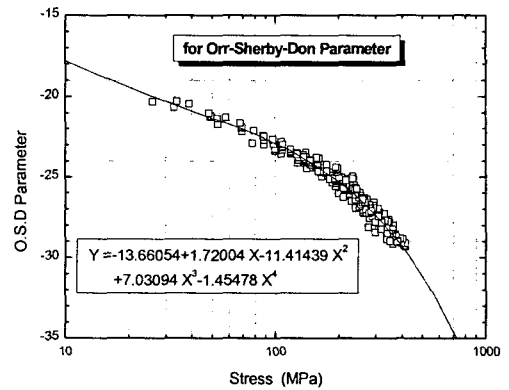


Fig. 4 O-S-D equation for creep-life prediction

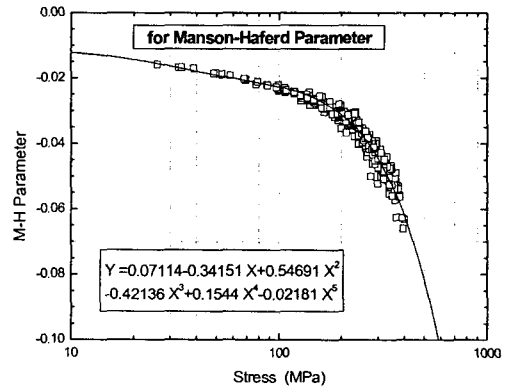


Fig. 5 M-H equation for creep-life prediction

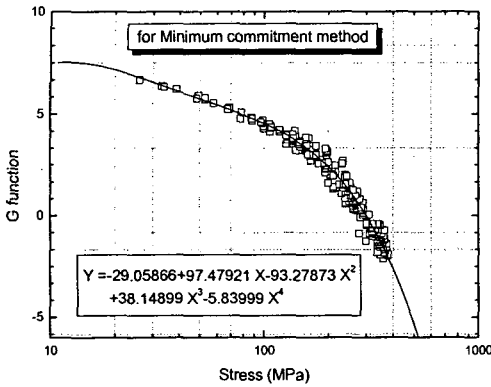


Fig. 6 MCM equation for creep-life prediction

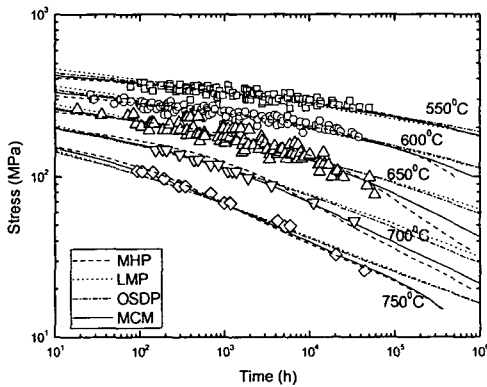


Fig. 7 Creep-life prediction for each method with temperatures

온도별 TTP법과 MCM에 대한 표준오차 결과를 분석하면, TTP법과 MCM 모두 큰 오차가 발생하지 않았지만, MCM의 경우는 700°C 이상의 고온으로 가면 TTP법에 비해 예측값은 실험값과 매우 잘 일치함을 보였다. 이러한 결과는 MCM에는 온도 의존성 정식화에 의한 구속조건에 따른 오차의 영향이 적기 때문이다.

Table 2는 전체 데이터에 대한 SEM값과 평균값을 나타낸 것이다. M-H법과 MCM의 예측오차 평균값이 0에서 멀리 떨어짐을 보인다. 즉 회귀 곡선과 데이터의 중심이 불일치함을 의미한다.

이는 M-H법과 MCM의 경우 변곡점의 발생으로 높은 차의 다항식을 필요로 하는데, 다항식의 차수가 높아지면 회귀 오차가 커지기 때문이라고 판단된다. 이로부터 응력 정식화 있어서 너무 높은 차수의 다항식은 적절하지 않다는 것을 알

Table 1 Comparison of the SE and SEM values for each parameter with temperatures

Temp. °C	Parameters	Mean	SE	SEM
550	M-H	0.009	0.395	0.039
	L-M	0.006	0.372	0.037
	O-S-D	-0.028	0.371	0.037
	MCM	0.046	0.376	0.038
600	M-H	-0.016	0.331	0.032
	L-M	-0.066	0.337	0.033
	O-S-D	-0.050	0.318	0.031
	MCM	-0.030	0.315	0.031
650	M-H	-0.062	0.374	0.039
	L-M	0.015	0.334	0.035
	O-S-D	0.040	0.353	0.036
	MCM	0.069	0.332	0.034
700	M-H	-0.177	0.116	0.029
	L-M	-0.052	0.124	0.031
	O-S-D	-0.022	0.107	0.027
	MCM	0.001	0.044	0.011
750	M-H	0.011	0.120	0.030
	L-M	0.060	0.148	0.037
	O-S-D	0.080	0.139	0.035
	MCM	0.046	0.084	0.021

Table 2 Mean, SE and SEM values for total data

Parameters	Mean	SE	SEM
MHP	-0.032	0.351	1.89E-02
LMP	-0.001	0.338	1.82E-02
OSD	0.000	0.332	1.79E-02
MCM	0.034	0.326	1.76E-02

수 있다.

### 5. 결 론

316LN 스테인리스강의 크리프 수명예측을 위하여 TTP법과 최소구속법을 적용하여 각 수명예측의 표준오차를 분석을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) TTP법과 최소구속법을 이용하여 크리프 수명예측 다항식을 결정하였으며 그 표준편차 범위

는 0.1~0.4였으며 최소구속법의 경우 가장 낮은 오차를 보였다.

(2) 316LN강에 대한 TTP법과 최소구속법의 550℃와 750℃ 사이의 온도별 표준오차값은 650℃ 까지는 큰 차이가 없었으나 700℃ 이상의 고온이 되면 최소구속법이 TTP법에 비해 보다 좋은 수명예측을 하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 최소구속법의 경우 온도 의존성 정식화에 의한 오차의 영향이 적었기 때문이다.

(3) M-H 파라미터와 최소구속법은 오차의 평균값이 0에서 멀리 떨어져 있는 것으로 나타났으며, 이는 응력정식화 회귀 다항식을 구할 때 변곡점의 발생에 기인한 것으로 판단된다.

### 후 기

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

수

### 참고문헌

(1) Kim, W. G., Yoon, S. N., Ryu, W. S. and Yi, W., 2005, "Creep-Life Prediction and Standard Error Analysis of Type 316LN Stainless Steel by Time-Temperature Parametric Methods," *Trans. of the KSME, (A)*, Vol. 29, No. 1, pp. 74~80.

(2) 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. 420~1427.

(3) Viswathanathan, R., 1989, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components," ASM International, pp. 59~70.

(4) Penny, R. K. and Marriott, D. L., 1955, "Design 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) Kim, W. G., Yin, S. N. and Ryu, W. S., 2005, "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.

(9) Manson, S. S. and Ensign, C. R., 1978, "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.

(10) Manson, S.S. and Ensign, C.R., 1971, "Specialized Model for Analysis of Creep Rupture Data by the Minimum Commitment Method, Station-Function Approach," *NASA TM, X-52999*, pp. 1~14.

(11) W. E. White and Iain Le May, 1978, "On the Minimum-Commitment Method for Correlation of Creep-Rupture Data," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 100, pp. 333~335.

(12) 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.

(13) 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*, Vol. 90, pp. 78~83.

(14) 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, (A)*, Vol. 148, pp. 253~260.