

# 초고온가스로 압력용기용 Gr. 91 강의 장시간 크리프 수명 예측 방법 개선

박재영<sup>†</sup> · 김우곤\* · I.M.W. EKAPUTRA\*\* · 김선진\*\* · 김민환\*

## Improvement of Long-term Creep Life Prediction Method of Gr. 91 steel for VHTR Pressure Vessel

Jae-Young Park<sup>†</sup>, Woo-Gon Kim\*, I.M.W. EKAPUTRA\*\*, Seon-Jin Kim\*\* and Min-Hwan Kim\*

(Received 13 June 2014, Revised 11 July 2014, Accepted 14 July 2014)

### ABSTRACT

Gr. 91 steel is used for the major structural components of Generation-IV reactor systems, such as a very high temperature reactor(VHTR) and sodium-cooled fast reactor(SFR). Since these structures are designed for up to 60 years at elevated temperatures, the prediction of long-term creep life is important for a design application of Gr. 91 steel. In this study, a number of creep rupture data were collected through world-wide literature surveys, and using these data, the long-term creep life was predicted in terms of three methods: the single-C method in Larson-Miller(L-M) parameter, multi-C constant method in the L-M parameter, and a modified method(“sinh” equation) in the L-M parameter. The results of the creep-life prediction were compared using the standard deviation of error value, respectively. Modified method proposed by the “sinh” equation revealed better agreement in creep life prediction than the single-C L-M method.

**Key Words** : 9Cr-1Mo steel(9Cr-1Mo 강), Creep(크리프), Creep-life prediction(크리프-수명 예측), Time-Temperature Parameter(시간-온도 파라미터), Larson-Miller parameter(라슨-밀러 파라미터)

### 1. 서론

제 4 세대 원자로인 수소생산 초고온가스로(very high temperature reactor, VHTR)의 압력용기나 소듐 냉각고속로(sodium-cooled fast reactor, SFR)의 고온 구조물의 후보재료로는 고온 기계적 특성이 우수한 Gr. 91 강(ASME Grade 91)이 유망하다<sup>1-5)</sup>. 여기에 사용되는 구조물은 고온에서 60년의 수명을 목표로 설계되기 때문에 장시간 크리프 수명을 정확히 결정하는 것이 재료의 안정성 측면에서 매우 중요하다. 그

러나 실제로 60년의 실험 자료를 직접 생산한다는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 비교적 단시간의 데이터로부터 장시간 크리프 수명이나 크리프 강도를 정확히 예측하는 것이 필요하다<sup>6-8)</sup>.

단시간의 크리프 자료를 이용하여 장시간의 크리프 수명을 예측하기 위하여 일반적으로 시간-온도 파라미터(time-temperature parameter, TTP) 방법이 널리 사용되고 있다. 이 방법은 온도와 시간을 하나의 파라미터로 통합하고 파라미터와 응력사이의 관계를 마스터 곡선 회귀식으로 표현하는데 일반적으로 다항식이 많이 사용된다. 하지만 다항식은 차수에 따라 예측값이 변하며 특히 고차다항식의 경우 외삽특성이 좋지 않고 장시간 예측에서 상대적으로 큰 값으로 예측하기 때문에 이러한 다항식의 단점을

<sup>†</sup> 책임저자, 학생회원, 부경대학교

E-mail: jypark701@gmail.com

TEL: (042)868-2821 FAX: (042)868-8549

\* 한국원자력연구원 원자력소재개발부

\*\* 부경대학교 기계설계공학과

극복하기 위한 새로운 방법들이 개발되고 있다.

본 연구에서는 다음의 3가지 방법을 이용하여 Gr. 91 강의 크리프 수명 예측 방법을 개선하고, 실험 데이터와 수명 예측 방법 사이의 오차의 표준편차를 비교하였다.

- 1) 기존의 Larson-Miller 파라미터 방법
- 2) L-M 법에서 2개의 상수(C)를 사용하는 수정 방법
- 3) 마스터 곡선에서 “sinh” 함수에 의한 새로운 방법

## 2. 결과 및 고찰

### 2.1 Larson-Miller 파라미터

본 연구에서는 Gr. 91 강의 장시간 크리프 수명을 예측하기 위하여 다수의 크리프 파단 데이터를 수집하였다. Gr. 91 강의 장기 크리프 수명(또는 강도)을 예측하고자 크리프 파단 데이터를 plate, pipe forging 및 tube에 대하여 총 690개의 데이터를 수집하여 데이터베이스화하였다. 수집된 자료는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 일본의 NIMS(National Institute Materials Science), 유럽의 튜브 제조사 V&M(Vallourec & Mannesmann) 그리고 KAERI에서 생산한 데이터로서 500~700°C의 온도 범위에 대한 것이다.

크리프 수명예측에 널리 사용되는 대표적인 시간-온도 파라미터는 Larson-Miller(L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D), Manson-Haferd (M-H) 등이 있으나 가장 널리 사용되는 L-M 방법을 사용하였다. L-M 파라미터의 식은

$$P(t_r, T) = T(\log t_r + C) \tag{1}$$

이며,  $T$ 는 절대온도(K),  $t_r$ 은 파단시간(h),  $C$ 는 재료상수이다. 일반적으로 재료상수는 20으로 사용되고 있지만 정확한 수명예측을 위해서는 최적의  $C$ 값을 구하여야 한다. 따라서 본 연구에서는  $\log \sigma$  vs. LMP 와의 관계에서 얻어지는 하나의 마스터 곡선의 통계적 상수인 결정계수( $R^2$ )를 사용하여 최적의  $C$ 값을 결정하였다. Fig. 2에 결정계수를 이용하여  $C=38$ 의 최적값을 도출하였다.

$C=38$ 에서의 L-M 파라미터는 응력에 대한 함수로 3차 다항식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(t_r, T) = f(\sigma) = K_1 (\log \sigma)^3 + K_2 (\log \sigma)^2 + K_3 (\log \sigma) + K_4 \tag{2}$$

여기서  $K_1, K_2, K_3, K_4$ 는 재료상수이며, 마스터 곡선의 식은 다음과 같이 도출되었고, 이를 Fig. 3에 나타내었다.

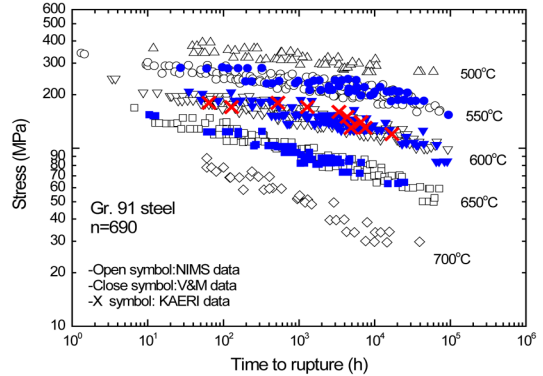


Fig. 1 A number of creep data collected from literature surveys and KAERI data

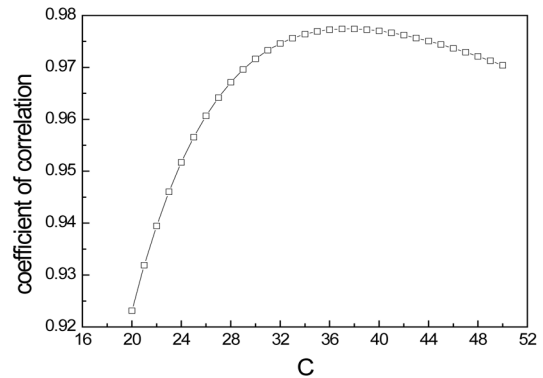


Fig. 2 Coefficient of correlation ( $R^2$ ) with C values in L-M parameter

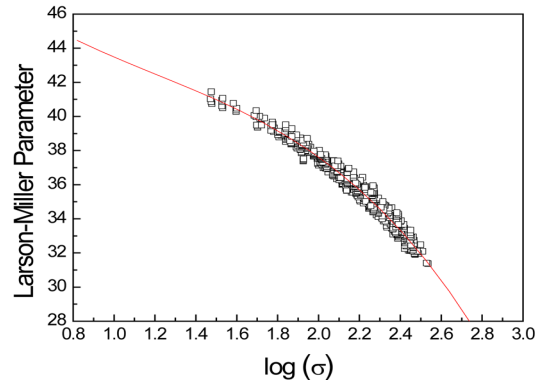


Fig. 3 A master curve of Gr.91 steel obtained in L-M parameter

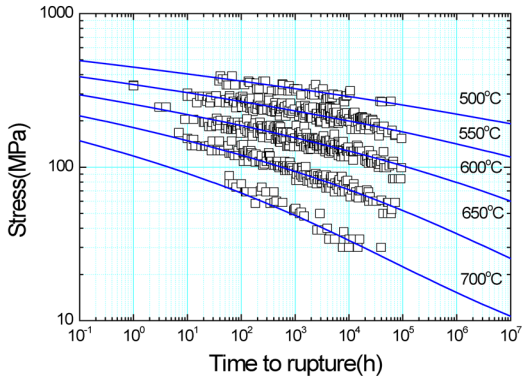


Fig. 4 Creep-life prediction results predicted by the L-M parameter

$$P = -1.941(\log \sigma)^3 + 7.018(\log \sigma)^2 - 13.328(\log \sigma) + 51.733 \quad (3)$$

이를 이용한 수명예측을 Fig. 4에 나타내었다.

통상 1개의 C 값을 사용하는 L-M 방법의 경우 C 값과 마스터 곡선의 차수에 따라 예측 값이 변하게 되며, 장시간 (저응력)으로 되면 크리프 강도를 실제보다 높게 예측하는 결과를 보여 왔다. 즉 수명예측 마스터 곡선에서 저응력 영역으로 되면 3차 다항식의 특징에 변곡점이 발생하게 되어 마스터 곡선이 크게 변하게 된다. 다행히 본 수명예측에서는 Fig. 3의 마스터 곡선은 저응력의 경우 그림상으로는 크게 변하지 않는 것으로 나타났지만, 실제 수명예측 결과에서는 Fig. 4에서 처럼 고온 저응력의 700°C 에서 수명 예측선의 형태가 장시간에서 더 길게 뻗어나가는 결과로서 크리프 강도를 높게 예측하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 1개의 상수 C를 사용하는 L-M 방법은 Gr. 91 강의 크리프 파단 수명을 예측하는데 실제보다 보수적으로 예측하기 때문에 한계가 있다.

## 2.2 상수 2개를 사용한 Larson-Miller 파라미터 방법

Maruyama 등의 연구에 따르면 고 크롬강의 크리프 파단수명에서 장시간으로 가면 급격히 떨어지는 것을 실험으로 확인하였으며, 장시간 크리프 수명을 보다 정확히 예측하기 위해 다중 구간 분석 방법 (multi regional analysis method)을 제안하였다<sup>11)</sup>. 앞서 기술한 바와 같이 L-M 방법의 경우 3차 다항식이 낮은 응력에서 외삽 특성이 좋지 못하므로 장시간 크리프 수명예측에 적합하지 않으므로, 본 연구에서는 높은 응력과 낮은 응력 부분의 C 값을 다르게 하는 2-

파라미터 방법을 사용하여 외삽 특성을 높이고 L-M 방법이 가지는 단점을 보완하는 방법을 제안한다.

C 값은  $\log \sigma$  vs. LMP 와의 관계의 마스터곡선에서 단시간 데이터와 장시간 데이터의 구간을 나누었다. 구간을 나누는 경계 응력은 전체 실험데이터에서 최대응력과 최소응력의 대수 평균값(약 110MPa)을 결정하여 이를 기준으로 하여 2개의영역으로 나누었다. 20~50 사이의 C 값을 대입하여 L-M 파라미터와 마스터 곡선이 가지는 결정계수를 비교하여 낮은 응력에서와 높은 응력에서의 C 값을 결정하였다.

Fig. 5는 C 값의 변화에 따른 결정계수의 크기를 비교한 것이다. 본 결과를 바탕으로 낮은 응력 부분은 C=31, 높은 응력 부분은 C=40의 최적 C 값을 도출하였다. C=31 및 C=40에서의 L-M 파라미터를 응력에 대한 함수로 3차 다항식으로 다음과 같이 나타낼 수 있고, 그 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

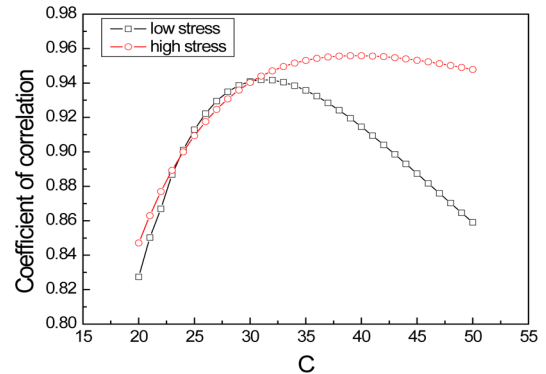


Fig. 5 Coefficient of correlation ( $R^2$ ) with C values at the low and high stresses

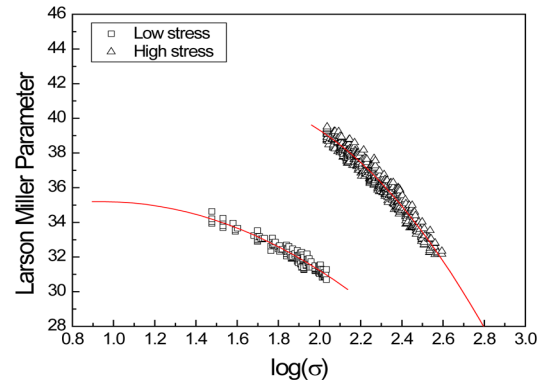


Fig. 6 The master curves obtained by multi-C values in the L-M parameter

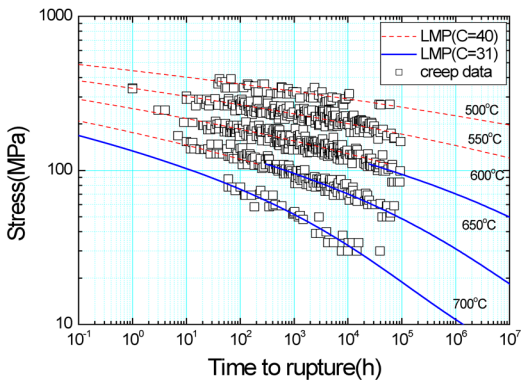


Fig. 7 Creep-life curves predicted by multi-C values in the L-M parameter

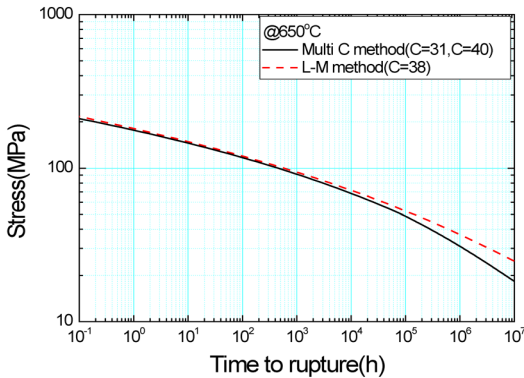


Fig. 8 Comparison of the creep-life prediction curves estimated by a single C and multi-C in the L-M parameter at 650°C

$$P(C=31) = -2.230(\log \sigma)^3 + 8.324(\log \sigma)^2 - 14.266(\log \sigma) + 44.307 \quad (4)$$

$$P(C=40) = -3.094(\log \sigma)^3 + 13.111(\log \sigma)^2 - 23.687(\log \sigma) + 59.049 \quad (5)$$

Fig. 6에서와 같이 마스터 곡선이 데이터가 존재하지 않는 저응력 영역에서 L-M 파라미터가 과도하게 높아지지 않으며, Fig. 7은 2개의 C 값을 사용한 수명예측의 결과로서 낮은 응력에서의 외삽특성을 좋은 결과를 보인다. 또한 이러한 방법으로 정해진 2개의 수명 예측선이 만나는 지점을 적절히 연결하면 기존의 L-M 방법에 비해 나은 수명예측이 가능하다.

Fig. 8은 650°C에서 기존의 L-M 방법과 2개의 상수를 이용한 L-M 방법의 수명예측 결과를 비교한 것이다. 높은 응력에서는 거의 차이가 나타나지 않으나 낮은

응력에서는 2개의 상수를 이용한 L-M방법의 크리프 강도가 더 낮게 예측된다. 따라서 기존의 L-M 방법에 비해 2개의 상수를 이용한 예측법이 Gr. 91 강의 장시간 수명예측에 적합할 것으로 판단된다. 이러한 이유는 9~12Cr 강의 경우 저 응력 장시간이 되면 크리프 강도가 현저히 크게 저하되는 것으로 보고되고 있다<sup>11)</sup>.

### 2.3 sinh 함수를 포함한 마스터 곡선을 이용한 Larson-Miller 파라미터 방법

2개의 상수를 이용한 L-M 방법은 낮은 응력에서의 외삽 특성을 높이고 장시간에서 수명예측에 유용할 것으로 생각된다. 그러나 응력경계 범위를 둘로 나누는 기준이 모호하고, 한쪽의 데이터의 수가 적을 경우에는 마스터 곡선의 형태가 어떻게 변할지 예측할 수 없기 때문에 실험값에 맞지 않는 경우가 발생할 수 있다. 또한 각각의 C 값을 찾아내기 위해 반복적으로 마스터 곡선을 구하고 결정계수를 비교하는 과정이 번거롭다. 따라서 실험 데이터의 전 영역에서 L-M 파라미터를 잘 따르는 수정된 하나의 마스터 곡선으로 수명예측을 할 수 있는 “sinh” 함수 (hyperbolic sine) 을 사용하여 Gr. 91 강의 장시간 수명 예측에 활용하고자 제안한다. 재료상수 C 값의 경우 기존의 L-M 방법과 비교를 위해 같은 값을 사용하였다.

크리프 거동을 표현하는데 일반적으로 power law 와 지수함수 형태의 모델을 제시하는 경우가 많다. 또한 연속손상 메커니즘에 기초하여 쌍곡선 함수로 제안하기도 한다. Sinh 함수는 비교적 넓은 영역에서 크리프 거동을 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다. Sinh 포함된 수정된 마스터 곡선의 함수는

$$P = P_1 + P_2 \sinh(P_3 \log \sigma) + P_4 \log \sigma \quad (6)$$

로 나타낼 수 있으며,  $P_1, P_2, P_3, P_4$  는 재료 상수이고,  $\sigma$ 는 응력이다. 마스터 곡선의 식은 다음과 같이 도출되었고, 이를 Fig. 9에 나타내었다.

$$P = 44.7165 - 2.0633 \sinh(1.0616 \log \sigma) + 0.7024 \log \sigma \quad (7)$$

Sinh 함수가 포함된 마스터 곡선의 경우 낮은 응력에서의 외삽특성이 기존의 L-M 방법과는 다르게 발산하지 않고 부드럽게 연결되는 것을 확인할 수 있다. 이를 이용하여 수명 예측 결과를 Fig. 10에 보이고 있다. 수정된 마스터 곡선을 이용한 경우에도 장시간에서 Gr. 91 강의 크리프 강도가 완만하게 서서히 줄어드는 것으로 예측되었다.

Fig. 11에 3 가지의 L-M 방법을 이용하여 수명 예측한 결과를 비교하였다. 500, 550°C 영역에서는 모든 방법이 거의 비슷한 결과를 보였다. 하지만

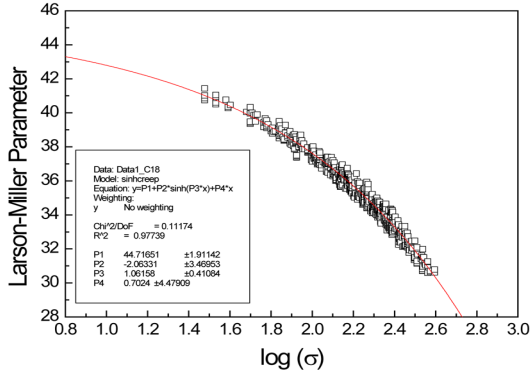


Fig. 9 A master curve of Gr.91 steel predicted by “sinh” function

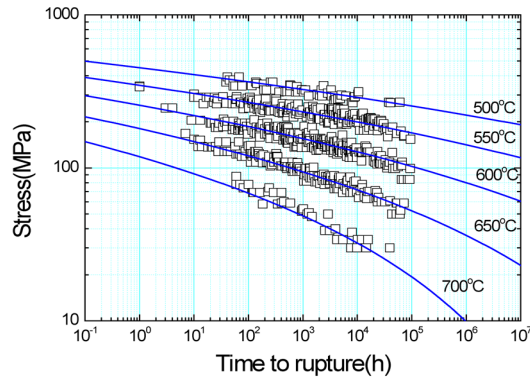


Fig. 10 Creep-life prediction curves estimated by modified equation of “sinh” function

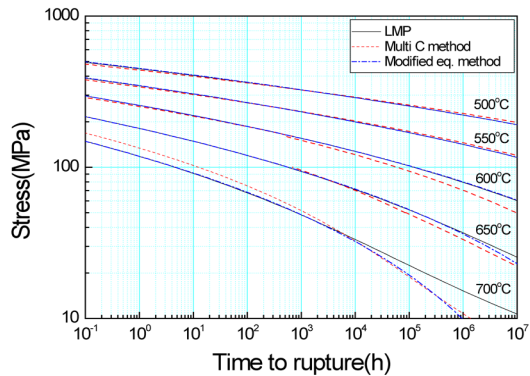


Fig. 11 Creep-life prediction curves estimated by a single C, multi-C, and modified equation in the L-M parameter

600~700°C 영역에서는 기존의 L-M 방법과 다른 두 가지 수명 예측법이 각각 다른 결과를 보이며, 극단적인 결과로서 700°C, 10MPa의 경우 기존의 L-M 방법과 개선된 예측법 사이에 파단수명이 1차수 만큼 매우 크게 차이나는 것을 확인할 수 있다. Gr. 91 강 의 경우 장시간에서의 크리프 강도는 2개의 상수를 이용한 방법이나 sinh 마스터 곡선을 이용한 예측법을 적용하는 것이 타당하다고 여겨진다.

2.4 오차의 표준편차 분석

표준편차(standard deviation)는 단위의 계량적 특성값에 대한 산포도를 나타내는 도수특성 값으로서 데이터가 중심 값에 얼마나 잘 맞는가를 판단하는데 많이 사용된다. 각각의 파라미터에 의해 수명예측을 함에 있어서 가장 이상적인 상태는 오차의 평균과 편차가 0인 상태이다. 그러나 실제 실험은 여러 가지 불확실성이 존재하고 또한 예측법에 의해서도 오차가 발생한다. 여기서 오차의 표준편차는 앞의 세 가지 예측법을 통해 구한 파단시간과 실험데이터 사이의 차이를 나타낸 값으로 데이터의 산포를 나타낸다.

Fig. 12는 각 수명 예측법에 대한 오차의 표준편차 (standard deviation of error)값을 나타낸 것이다. 실험 데이터 전체 영역에서 볼 때 본 오차 값으로는 어느 방법이 반드시 우월하다고 볼 수 없다. 그러나 실험 데이터를 5000시간을 기준으로 단시간 데이터와 장시간 데이터로 나누어 각 방법별 오차의 표준편차를 확인한 결과, 장시간 데이터에서는 2개의 상수를 이용한 L-M 방법이 오차의 표준편차가 분명히 적은 것으로 확인되고 있다.

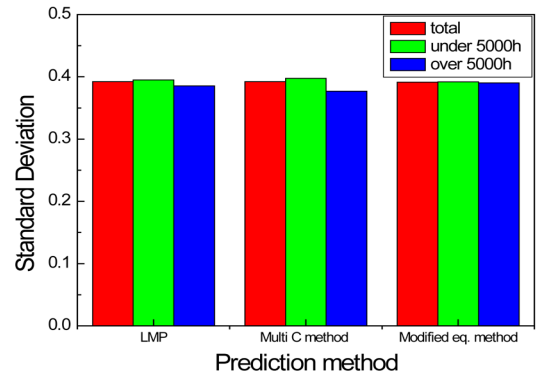


Fig. 12 Comparison of the standard deviation of error calculated by a single C, multi-C, and modified equation in the L-M parameter

### 3. 결론

본 연구에서는 Gr. 91 강에 대하여 한 개의 C를 사용한 L-M 방법, 2개의 상수를 이용한 L-M 방법, 마스터곡선에서 “sinh” 함수를 사용하는 L-M 파라미터 방법을 이용하여 장시간 크리프 수명을 예측하였으며 각 방법에 대한 결과를 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) L-M 파라미터의 경우, 고차 다항식이 낮은 응력에서 외삽특성이 좋지 못하고 장시간에서 크리프 강도가 높게 예측되므로 장시간 수명예측을 하는데 한계가 있음을 보였다.

2) 2개의 상수를 이용한 L-M 방법은 2개의 마스터곡선으로 사용하여 낮은 응력에서의 외삽특성을 높였고, 실험 데이터와 수명예측 사이의 오차도 적었으며 장시간 수명예측에 적합한 것으로 나타났다.

3) “sinh” 함수를 포함한 수정된 마스터 곡선을 이용한 L-M 방법은 Gr. 91 강의 크리프 파단 거동을 잘 묘사하였으며, 2개의 상수를 이용한 방법보다 보다 편리하게 장시간 크리프 수명 예측에 활용될 수 있다.

### 후 기

본 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 원자력연구 개발 사업임(2012M2A8A2025682).

### 참고문헌

1. W. R. Corwin, 2006, “U.S. Generation IV Reactor Intergrated Materials Technology Program”, Nuclear Engineering & Technology, vol. 38 No. 7, pp.591.
2. J. Orr, D. Burton, 1993, “Ironmaking and Steelmaking”,

- vol. 20 No.5. pp.333~337.
3. J. Orr, D. Burton, 1994, “Improving the Elevated Temperature Strength of Steel 91(9%CrMoNbVN)”, Materials for Advanced Power Engineering, Part I, pp. 263~280.
4. J. Cadek, V. Sustek, M. Pahutova, 1997, “An Analysis of Set of Creep Data for a 9Cr-1Mo-0.2V (P91 type) steel”, Material Science and Engineering A225, pp.22~28.
5. Y. Tsuchida, K. Okamoto and Y. Tokunaga, 1996, “Study of Creep Rupture Strength in Heat Affected Zone of 9Cr-1Mo-V-Nb-N Steel by Welding Thermal Cycle Simulation”, Welding International, 10(6).
6. K. Kimura, H. Kushima, K. Sawada and Y. Toda, 2007, Proc. of CREEP8, CREEP 2007-26406, Texas, USA.
7. K. Maruyama and T. Tokunaga, 2007, Proc. of CREEP8, CREEP 2007-26150, Texas, USA.
8. K. Maruyama and T. Tokunaga, 2009, Proc. 2nd ECCO Creep Conf. (eds. I.A. Shibli and S.R. Holdsworth), pp.19, Zurich, Switzerland
9. Yin, S. N., Kim, W. G., Park, J. Y., Kim, S. J., and Kim, Y. W., 2009, “Long-term Creep Life Prediction of Alloy 617 Using Taylor Series,” Trans. of the KSME(A), Vol. 34, No. 4, pp.457~465
10. W. G. Kim, J. Y. Park, S. N. Yin, D. H. Kim, J. Y. Park, S. J. Kim, 2011, “Reliability Prediction of Long-term Creep Strength of Gr. 91 Steel for Next Generation Reactor Structure Materials”, Kor. J. Met. Mater, Vol. 49, No. 4, pp.275~280
11. K. Maruyama, H. Ghassemi Armaki, R.P. Chen, K. Yoshimi, M. Yoshizawa, M. Igarashi, 2010, “Cr concentration dependence of overestimation of long term creep life in strength enhanced high Cr ferritic steels”, Int. J. Pressure Vessels and Piping, Vol. 87, pp.276~281