

## Grade 91 강의 장시간 크리프 수명 예측 방법 Long-term Creep Life Prediction Methods of Grade 91 Steel

박재영\*† · 김우곤\*\* · I.M.W.EKPUTRA\*\*\* · 김선진\*\*\* · 장진성\*\*  
Jay-Young Park\*† , Woo-Gon Kim\*\* , I.M.W.EKAPUTRA\*\*\*  
Seon-Jin Kim\*\*\* and Jin-Sung Jang\*\*

(Received 28 July 2015, Revision received 06 August 2015, Accepted 17 August 2015)

**Abstract** : Grade 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 very important to determine an allowable design stress of elevated temperature structural component. In this study, a large body of creep rupture data was collected through world-wide literature surveys, and using these data, the long-term creep life was predicted in terms of three methods: Larson-Miller (L-M), Manson-Haferd (M-H) and Wilshire methods. The results for each method was compared using the standard deviation of error. The L-M method was overestimated in the longer time of a low stress. The Wilshire method was superior agreement in the long-term life prediction to the L-M and M-H methods.

**Key Words** : Grade 91 Steel, Creep, Creep Life Prediction, Time-Temperature Parameter, Wilshire

### 1. 서 론

Modified 9Cr-1Mo (ASME Grade 91, 이하 Gr. 91으로 표기)은 제4세대 원자로인 초고온가스로 (very high temperature reactor, VHTR)의 압력용기나 소듐냉각고속로(sodium-cooled fast reactor, SFR)의 증기 발생기, 고온 배관 및 구조 재료로 유력하다.<sup>1-5)</sup> 제 4세대 원자로는 60년의 설계 수명을 목표로 만들어지기 때문에 여기에 사용되는 고온 구조물의 장시간 크리프 수명을 정확하게

예측하는 것이 사용재료의 안정성 측면에서 매우 중요하다. 그러나 실제로 설계 수명에 해당하는 실험 자료를 직접 생산하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 비교적 단시간의 시험 자료로부터 장시간의 크리프 수명(또는 강도)을 정확히 예측하는 것이 필요하다.<sup>6-8)</sup>

단시간의 크리프 자료로부터 장시간의 크리프 수명을 예측하는 방법은 여러 가지 방법들이 개발 사용되고 있다. 가장 일반적으로 널리 사용되고 있는 시간-온도 파라미터 (time-temperature parameter, TTP) 방법이 있으며, TTP의 대표적인

\*† 박재영(교신저자) : 부경대학교 기계설계공학과  
E-mail : jypark701@gmail.com, Tel : 042-868-2821  
\*\* 김우곤, 장진성 : 한국원자력연구원 원자력소재개발부  
\*\*\* I.M.W.EKPUTRA, 김선진 : 부경대학교 기계설계공학과

\*† Jae-Young Park(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l University.  
E-mail : jypark701@gmail.com, Tel : 042-868-2821  
\*\* Woo-Gon Kim, Jin-Sung Jang : Korea Atomic Energy Research Institute.  
\*\*\* I.M.W.EKAPUTRA, Seon-Jin Kim : Department of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l University.

방법으로 Larson-Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D) 및 Manson-Hafard (M-H) 파라미터 방법이 있다. 본 TTP 방법은 온도와 파단시간을 하나의 파라미터로 통합하여 나타내고 파라미터와 응력 사이의 관계를 나타내는 마스터 곡선 (master curve)을 다항식으로 표현하여 수명을 예측한다. 이에 대하여 최근에 Wilshire가 제안한  $\ln(\sigma/\sigma_{TS})$ 와  $t_f \exp(-Q/RT)$ 의 관계식이 개발되었으며 이들 관계를 멱급수 형태로 마스터 곡선을 나타낸다. 본 방법에서의 1차식으로 표현되는 마스터 곡선을 사용하여 고크롬 (9-12%) 페라이트 (ferrite)/마르텐사이트 (martensite) 강에 적용한 결과 타당한 수명예측을 잘 하는 것으로 보고되고 있으며, 크리프 수명예측에 우수한 방법으로 주목받고 있다.<sup>9-10)</sup> 따라서 Gr. 91 강의 장기 수명예측에 대한 본 방법의 적용성을 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 TTP의 대표적인 방법인 L-M 및 M-H 파라미터 법 그리고 현재 주목받고 있는 Wilshire 방법인 3가지 방법을 사용하여 Gr. 91 강의 장시간 (10<sup>6</sup> h) 크리프 수명을 예측하여 어느 방법이 가장 우수한지 비교 평가하였다.

## 2. 결과 및 고찰

### 2.1 Larson-Miller 파라미터

Gr. 91 강의 크리프 수명 예측을 위하여 다수의 크리프 파단 데이터를 수집하였다. 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. Gr. 91 강의 plate, pipe forging 및 tube 재료에 대하여 총 690개 데이터를 수집하여 데이터베이스화 하였다.

시간-온도 파라미터는 식(1)과 같이 온도의 차이를 보정한 파라미터  $P(t_r, T)$ 를 사용하여 파단시간을 응력의 함수로 표현하는 것이다.

$$P(t_r, T) = f(\sigma) \tag{1}$$

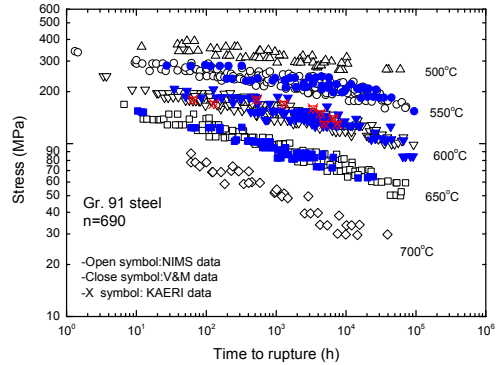


Fig. 1 A number of creep data collected from literature surveys and KAERI data

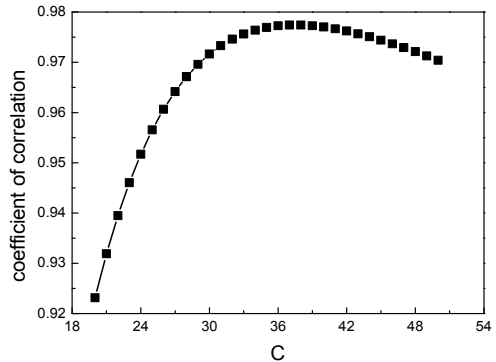


Fig. 2 Coefficient of correlation ( $R^2$ ) with C values in L-M parameter

크리프 수명예측에 널리 사용되는 대표적인 시간-온도 파라미터는 Larson-Miller (L-M), Orr-Sherby-Dorn (O-S-D), Manson-Hafard (M-H) 등이 있으나, 본 연구에서는 O-S-D는 L-M와 비슷하기 때문에 제외하고 L-M 및 M-H 파라미터를 사용하였다. L-M 파라미터 식은

$$P_{LM}(t_r, T) = T(\log t_r + C) \tag{2}$$

이며,  $T$ 는 절대온도(K),  $t_r$ 은 파단시간(h),  $C$ 는 재료상수이다. 일반적으로 재료상수  $C=20$ 으로 사용되고 있지만 정확한 수명예측을 위해서는 최적의  $C$  값을 구하여야 한다. 본 연구에서는  $\log \sigma$  vs.

L-M 파라미터와의 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.

$$P(t_r, T) = f(\sigma) = K_3(\log \sigma)^3 + K_2(\log \sigma)^2 + K_1(\log \sigma) + K_0 \quad (3)$$

여기서  $K_0, K_1, K_2, K_3$ 는 재료상수이며, 마스터 곡선의 식은 다음과 같이 도출되었고, 이를 Fig. 3에 나타내었다.

$$P = -1.941(\log \sigma)^3 + 7.018(\log \sigma)^2 - 13.328(\log \sigma) + 51.733 \quad (4)$$

식(4)를 이용한 수명예측 결과를 Fig. 4에 나타내었다. L-M 파라미터의 경우  $C$ 값과 마스터 곡선의 형태에 따라 예측 값이 변하게 되는데 장시간 (저응력)에서의 크리프 강도를 높게 예측하는 결과를 보인다. 이는 Fig. 3에서처럼 데이터가 존재하지 않는 저응력 영역으로 갈수록 3차 다항식의 변곡점에 의해 마스터 곡선의 형태가 과도하게 높게 나타나기 때문이다. 따라서 저응력 장시간에서 크리프 강도가 떨어지지 않는 과도한 예측을 한다.

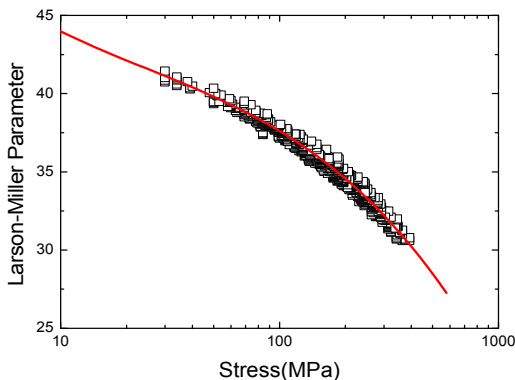


Fig. 3 A Master curve of Grade 91 steel obtained by L-M parameter

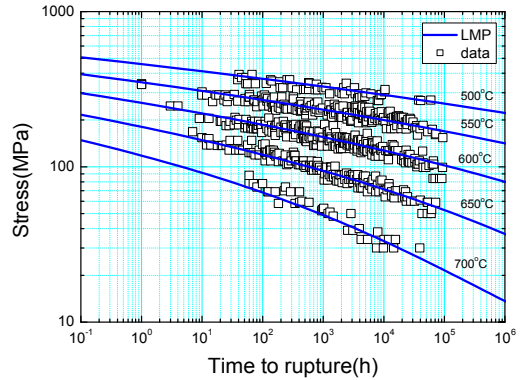


Fig. 4 Creep-life prediction results predicted by the L-M parameter

따라서 L-M 방법은 수명예측에 있어서 한계점이 있으며, 이는 저응력에서의 마스터 곡선 적합도에 따라서 예측 값이 달라지는 결과를 초래하기 때 문임을 알 수 있다.

## 2.2 Manson-Haferd 파라미터

Manson-Haferd (M-H) 파라미터는 등응력의 크 리프 파단 데이터를 이용하여, y축에는 대수 파단 시간( $\log t_r$ ), x축에는 온도( $T$ )의 관계가 직선관계에 있다는 가정 하에 만들어진 것이다. M-H 식은

$$P_{MH}(t_r, T) = \frac{\log t_r - \log t_a}{T - T_a} \quad (5)$$

이며,  $T$ 는 절대온도(K),  $t_r$ 은 파단시간(h),  $T_a$ 와  $\log t_a$ 는 재료 상수로서  $\log t_r$ 과  $T$ 의 직선 관계에서 기울기가 한 점에 수렴하게 되는데, 이 점의 x-y 축 좌표에 해당한다. 본 연구에서는 각 기울기의 교점이 여러 개 발생하므로 각 교점좌표의 평균값을 취해 수명예측을 수행하였다. Fig. 5에 나타낸 것과 같이  $T_a = 550.69$ ,  $\log t_a = 16.20$ 의 값을 도출 하였고, 마스터 곡선은 다음의 3차 다항식으로 얻었으며 Fig. 6에 나타내었다.

$$P_{MH} = -2.4539 \times 10^{-10}(\sigma)^3 + 8.3479 \times 10^{-8}(\sigma)^2 - 0.0001(\sigma) - 0.02601 \quad (6)$$

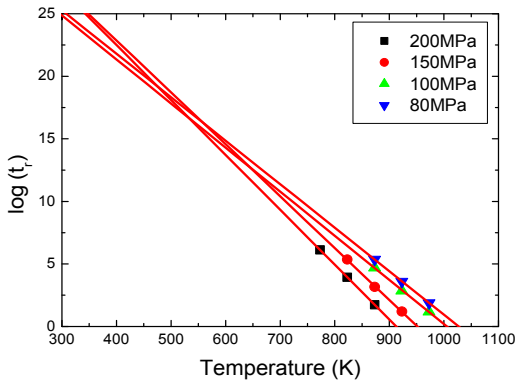


Fig. 5 Plot of  $\log t_r$  vs. temperature relation in M-H parameter

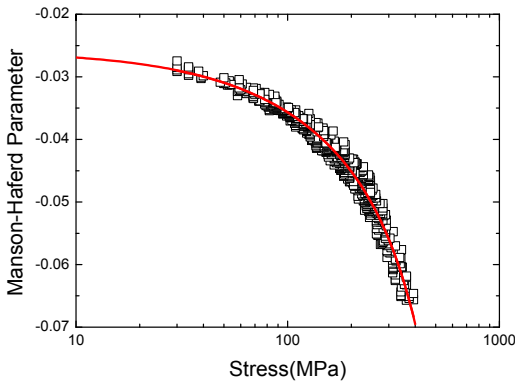


Fig. 6 A master curve of Grade 91 steel obtained by M-H parameter

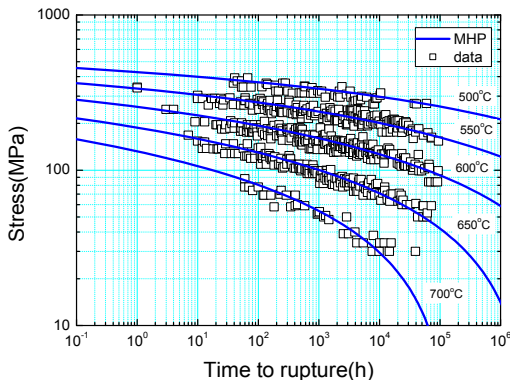


Fig. 7 Creep-life prediction results predicted by the M-H parameter

이를 이용한 수명예측 결과는 Fig. 7과 같다. M-H 파라미터의 경우  $T_a$ 와  $\log t_a$  그리고 마스터 곡선의 형태에 따라 수명예측의 결과가 달라지게 된다. Fig. 6에서처럼 저응력에서 마스터 곡선이 부드러운 곡선의 형태로 L-M 와 달리 서서히 높아진다. 그 결과로 Fig. 7에 보인 것처럼 L-M에 비해 크리프 강도를 매우 낮게 예측하는 것을 알 수 있다.

### 2.3 Wilshire 방법

Wilshire는 일반적으로 사용되는 멱급수 형태의 크리프 속도 식으로부터,  $\sigma_{TS}$ 로 정규화하여 장시간 크리프 수명 예측식을 제안하였다. 최소 크리프 속도 식은 다음과 같다.

$$\frac{M}{t_r} = \dot{\epsilon}_m = A \sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (7)$$

여기서  $t_r$ 은 파단시간,  $\dot{\epsilon}_m$ 은 최소 크리프 속도,  $\sigma$ 는 응력,  $Q$ 는 활성화 에너지,  $R$ 는 기체상수(8.314  $Jmol^{-1}K^{-1}$ ),  $T$ 는 온도,  $A$ 와  $n$ 은 재료상수이다.  $\sigma_{TS}$ 로 정규화하여 다시 쓰면

$$\frac{M}{t_r} = \dot{\epsilon}_m = A^* \left(\frac{\sigma}{\sigma_{TS}}\right)^n \exp\left(\frac{-Q^*}{RT}\right) \quad (8)$$

되며, 여기서  $A^* \neq A$ ,  $Q^* \neq Q$ 이다. 식(8)을 응력과 파단시간에 대하여 다시 정리하면

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_{TS}}\right) = \exp\left[-k_1 \left\{t_r \exp\left(\frac{-Q^*}{RT}\right)\right\}^u\right] \quad (9)$$

된다. 여기서  $Q^*$ 는 일반적인 합금에서는 300  $kJ/mol$ 을 사용하며  $k_1$ 과  $u$ 는 상수이다. 식 (9)가 Wilshire가 제안한 크리프 수명 예측식이다.

본 방법을 사용하기 위해서 각 온도별 최대 인장강도 값은 Fig. 8에 보인 것처럼 여러 문헌으로부터 수집하여 3차 다항식의 회귀식을 만들어 사

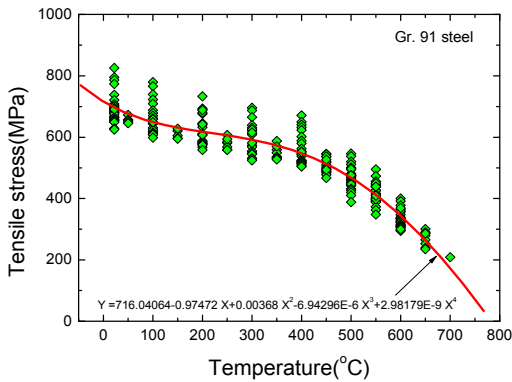


Fig. 8 A number of tensile stress collected from literature surveys

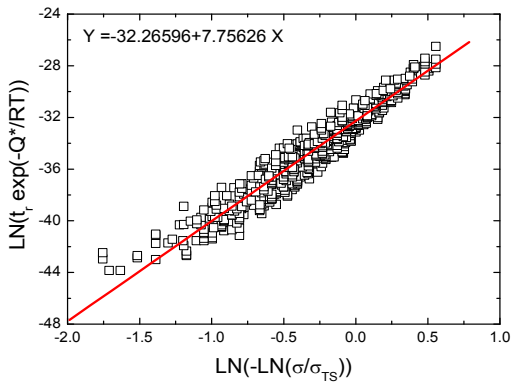


Fig. 9 Plot of  $\ln(t_r \exp(-Q^*/RT))$  vs.  $\ln(-\ln(\sigma/\sigma_{TS}))$  relationship in Wilshire method

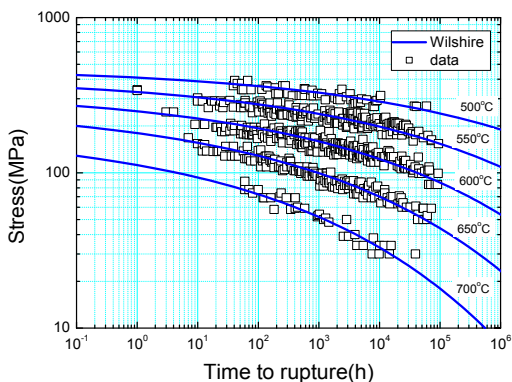


Fig. 10 Creep-life prediction results predicted by Wilshire method

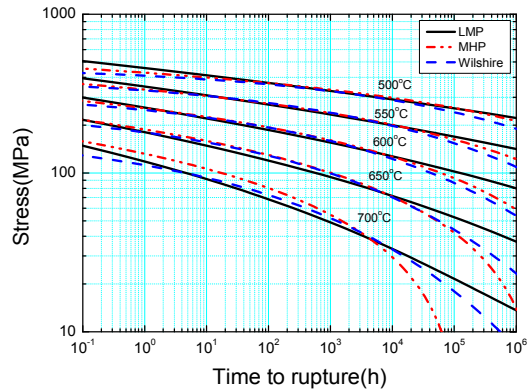


Fig. 11 Creep-life prediction curves estimated by L-M, M-H and Wilshire method

용하였다. 식(9)로부터  $(\sigma/\sigma_{TS})$ 와  $t_f \exp(-Q/RT)$ 의 멱급수 관계는 자연대수 좌표에서 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\ln(-\ln(\sigma/\sigma_{TS})) = u \ln\left(t_f \exp\left(-\frac{Q^*}{RT}\right)\right) + \ln k_1 \quad (10)$$

$\ln(\sigma/\sigma_{TS})$ 와  $t_f \exp(-Q/RT)$ 의 관계는 Fig. 9에 나타난 관계로부터 상수인  $k_1$ 과  $u$ 를 얻었으며, 이를 이용한 수명예측 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 11은 L-M, M-H, 그리고 Wilshire 방법을 이용하여 크리프 수명예측 결과를 온도별로 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전체 온도 영역에서 L-M 방법이 크리프 강도를 높게 예측하였으며, M-H 방법이 가장 낮은 보수적인 수명을 예측하였다. Wilshire 방법은 L-M과 M-H의 중간 정도를 예측하였다. 각 방법에 따라 크리프 수명의 차이가 크게 나타났으며, 극단적인 결과로 700°C, 10 MPa의 경우 각 방법에 따라 1차수 이상 파단 수명이 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이가 나타나는 이유는 고온 저응력 구간에서 마스터 곡선의 형태가 L-M의 경우 과도하게 높게 나타나고, M-H의 경우는 낮게 나타나기 때문이다. 고크롬 9-12Cr 페라이트/마르텐사이트 강의 경우 저응력 장시간이 되면 크리프 강도가 크게 저하

되는 것으로 보고되고 있으며,<sup>12)</sup> 앞의 세 가지 방법을 사용하여 Gr. 91 강 의 크리프 강도를 평가하는 경우에는 재료의 안정성 측면에서 가장 보수적인 M-H나 Wilshire 방법을 사용하는 것이 타당하다고 여겨진다.

### 2.4 오차의 표준편차 분석

표준편차(standard deviation, *SD*)는 단위의 계량적 특성값에 대한 산포도를 나타내는 도수 특성값으로서 데이터가 중심값에 얼마나 잘 맞는가를 판단하는데 많이 사용된다. 각 방법에 의해 수명 예측을 함에 있어서 가장 이상적인 상태는 오차의 평균과 편차가 0인 상태이다. 그러나 실제 실험은 여러 가지 원인에 의하여 불확실성이 존재하며, 또한 수명예측 방법에 의해서도 오차가 발생한다. 따라서 위에서 적용한 3가지 수명예측 방법에 대하여 적합도를 평가하기 위하여 오차의 표준편차(standard deviation of error, *SDE*)을 사용하였다.

오차 값은 파단시간의 수명 예측값 ( $\hat{X}$ )에다 실험데이터 값 ( $X_i$ )의 차이를 나타내는 것으로 식 (10)과 같이 표현되는 값이다. 그리고 오차의 표준편차 값은 다음의 식 (11)과 같이 표현이 된다.

$$e = X_i - \hat{X} \tag{10}$$

$$SDE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2} \tag{11}$$

Fig. 12는 각 수명 예측 방법에 대한 오차의 표준편차를 나타낸 것이다. 실험 데이터 전체의 영역에서 볼 때 본 오차 값으로는 어느 방법이 반드시 우월하다고 볼 수 없다. 그러나 실험 데이터를 5000 시간을 기준으로 단시간과 장시간으로 나누어 각 방법별 오차의 표준편차를 확인한 결과, 장시간 데이터의 경우는 Wilshire 방법이 오차의 표준편차가 적은 값을 보이므로 가장 우수한 방법임을 알 수 있다. 따라서 60년 설계를 목표로 하는 SFR에 사용되는 Gr. 91 강 의 장시간 수명예측에 Wilshire 방법을 적용하여 장시간 수명을 예측하는 것이 타당할 것으로 판단이 된다.

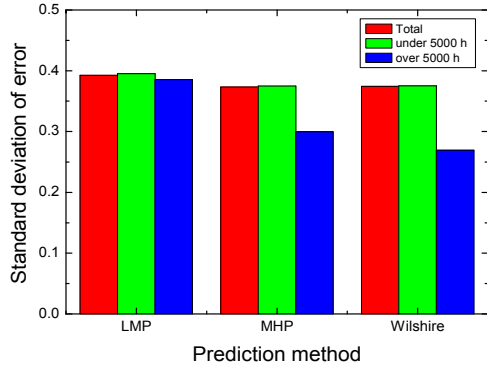


Fig. 12 Comparison of the standard deviation of error calculated by L-M, M-H and Wirshire method

## 3. 결 론

본 연구에서는 소듐냉각고속로용 Gr. 91 강에 대하여 L-M, M-H 및 Wilshire의 방법을 이용하여 장시간 크리프 수명 예측을 하였으며 각 방법에 대한 수명예측 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) L-M 및 M-H 파라미터의 TTP 방법의 경우 다항식의 마스터 곡선의 형태에 따라 저응력에서 외삽 특성이 크게 달라지는 예측 결과를 보였으며, L-M 방법은 장시간에서 크리프 강도가 떨어지지않는 너무 높은 크리프 강도 (수명)를 예측함을 알 수 있었다.

2) M-H 파라미터 방법은 L-M 나 Wilshire 방법에 비하여 가장 낮은 크리프 강도로 너무 보수적인 수명을 예측하였다. 이에 반해 Wilshire 방법은 L-M과 M-H의 중간 정도의 크리프 강도를 예측하였으며, 장기 수명예측에서 오차의 표준편차가 적은 값을 보였으므로 가장 우수한 방법임을 알 수 있었다.

3) 60년 설계를 목표로 하는 소듐냉각고속로용 Gr. 91 강 의 장기 크리프 수명 예측을 위해서는 Wilshire 방법을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단이 된다.

## 후 기

본 연구는 한국원자력연구원 주요사업의 일환으로 수행된 것입니다.

## References

1. W. R. Corwin, 2006, "U.S. Generation IV Reactor Intergrated Materials Technology Program", Nuclear Engineering & Technology, Vol. 38 No. 7, p. 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 ECCC Creep Conf. (eds. I.A. Shibli and S.R. Holdsworth), Zurich, Switzerland, p. 19.
9. B. Wilshire and P. J. Scharning, 2007, "Long-term Creep Life Prediction for High Chromium Steel", Scripta Materialia, Vol. 56, pp. 701-704.
10. B. Wilshire, P. J. Scharning and R. Hurst, 2009, "A New Approach to Creep Data Assesment", Materal Science and Engineering A, Vol. 510-511, pp. 3-6.
11. W. G. Kim, J. Y. Park, S. N. Yin, D. H. Kim, J. Y. Park and 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.
12. K. Maruyama, H. Ghassemi Armaki, R.P. Chen, K. Yoshimi, M. Yoshizawa and 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.