

스테인리스 강의 단시간 크리프 파단시간의 변동성과 수명예측

정원택* · 공유식** · 김선진**

*부경대학교 대학원 기계설계공학과

**부경대학교 기계자동차공학과

Variability of Short Term Creep Rupture Time and Life Prediction in Stainless Steels

Won-Taek Jung*, Yu-Sik Kong** and Seon-Jin Kim**

*Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Department of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Creep rupture time 크리프 파단 시간, Weibull distribution 와이블 분포, Variability 변동성, Creep life prediction 크리프 수명예측, Lason-miller parameter 라슨-밀러 파라메터

ABSTRACT: This paper deals with the variability of short term creep rupture time based on previous creep rupture tests and the statistical methodology of the creep life prediction. The results of creep tests performed using constant uniaxial stresses at 600, 650, and 700°C elevated temperatures were used for a statistical analysis of the inter-specimen variability of the short term creep rupture time. Even under carefully controlled identical testing conditions, the observed short-term creep rupture time showed obvious inter-specimen variability. The statistical aspect of the short term creep rupture time was analyzed using a Weibull statistical analysis. The effect of creep stress on the variability of the creep rupture time was decreased with an increase in the stress level. The effect of the temperature on the variability also decreased with increasing temperature. A long term creep life prediction method that considers this statistical variability is presented. The presented method is in good agreement with the Lason-Miller Parameter (LMP) life prediction method.

1. 서 론

현재 선박이나 해양구조물 등의 열기관, 자동차나 항공기 등의 엔진, 발전소 보일러, 터빈, 원자로 부품 등의 여러 가지 고온 분위기하에서의 사용 기회가 증가하고 있을 뿐 아니라 효율 면에서도 이들의 사용 온도가 높아지는 추세이다. 이러한 고온 분위기하에서 사용되는 내열강 또는 내열합금의 개발과 더불어 이들 재료에 대한 고온 크리프 파단 거동의 정확한 평가는 고온에서 사용되는 부재의 구조 설계에 있어서 아주 중요한 사항 중의 하나이다. 크리프 설계의 접근법은 수명 평가와 더불어 크리프 파단 데이터의 해석을 포함한 설계 코드 등에 기초하고 있다. 따라서 실험적 데이터를 획득하기 위해서는 많은 시간이 소요되므로 통상 외삽에 의한 평가를 행하고 있다(Yokoi and Monma, 1979). 고온 부재의 장시간 고온 크리프 특성을 단시간의 실험을 통하여 정확히 평가하고 안전 강도나 수명 등을 예측하는 평가 기법의 개발은 예기치 않은 사고 방지는 물론 인명 및 재산 손실 예방의 경제적인 차원 뿐 만 아니라 실용적인 공학적 의미에서도 중요한 기술이라 아니할 수 없다.

현재 크리프 파단시간, 초기연신율, 정상상태의 크리프 속도

그리고 총크리프 변형률 등과 같은 크리프 성질과 관련된 실험 결과를 보면 동일 온도, 동일 응력 조건하에서도 상당한 변동성을 보인다는 것은 잘 알려진 사실이다. 크리프 파단 데이터의 변동성이나 그 통계적 및 확률적 모델링에 관한 연구가 여러 연구자들에 의하여 이루어져 왔다(Davies et al., 1999; Evans, 1994; Huh et al., 2006; Seo et al., 2006).

크리프 파단 성질의 변동성은 많은 외적 요인에 의하여 영향을 받는다. 이러한 영향에 대한 연구가 Hayhurst에 의하여 연구된 바 있다(Evans, 1994). 일반적으로 실험데이터의 평균치 개념은 불충분하고 확률분포의 개념으로 취급할 필요성이 있다고 보고하였다(Seo et al., 2006). Evans(1994)는 0.5Cr0.5Mo0.25V 강에 대한 파손 시간 분포의 통계적 성질에 대하여 조사하였다. 그의 연구에 의하면 높은 응력에서 파손 시간 분포는 비 정규 분포의 형태를 보인다고 하였다. 또한 Evans(1994)와 Davies et al.(1999)는 크리프 성질의 확률적 본성을 연구하였으며, 크리프 거동에 대한 재료의 변동성이 산포의 주된 원인임을 보였다. 그러나 이러한 산포에 대한 재료의 변동성이나 크리프 데이터의 확률 모델링 등에 그다지 관심을 보여주지 못했다.

이상과 같은 관점에서 저자는 이미 STS304 스테인리스강의

고온 인장시험에 대한 인장강도, 연신율, 단면 수축률 등의 고온 기계적 성질의 확률분포 특성(Kim et al., 2006)에 관한 연구를 수행하였으며 또한 STS304 스테인리스강의 단시간 크리프 파단 시험을 통하여 현상론적 이론에 근거하여 크리프 거동의 확률적 양상을 검토하여 이들 크리프 특성치의 통계적 성질과 확률 분포에 관한 연구를 수행하였다(Kim et al., 2008; Oh et al., 1999).

따라서 본 연구에서는 단시간 소수의 크리프 파단 시험을 통한 장시간 고온 크리프 파단 수명 예측법 개발에 관한 연구의 일환으로서, 이전의 실험 데이터(Kim et al., 2004; 2005)를 이용하여 먼저 시험편간 크리프 파단시간의 변동성을 명확히 고찰하기 위하여 무차원 파라미터 Z 를 도입하여 단시간 크리프 파단시간의 통계 해석을 수행하였다. 또한 단시간 크리프 파단시간의 통계적 변동성을 고려한 크리프 수명 예측 기법에 대하여 고찰하였다.

2. 크리프 파단시간의 변동성

일반적으로 크리프 파단시간은 예측할 수 없는 많은 인자들의 영향으로 시험편간에 상당한 변동성(혹은 산포)을 나타낸다. 이러한 인자는 재료의 화학적 성분, 열처리 그리고 실험전의 재료 가공 등을 포함한다. 후자의 두 인자는 열기계적 이력이며, 결과적으로 재료의 미세조직의 변화를 가져온다. 이 외에도 실험 동안의 온도와 응력의 제어 상태나 불균질한 미세조직 그리고 크리프 손상 축적의 본성 등이 잠재적으로 확률적이라 할 수 있다.

시험편간 크리프 파단시간의 변동성을 고찰하기 위하여, 식 (1)과 같이 무차원 파라미터 Z_i 를 도입한다. 즉,

$$Tr = Z_i \cdot \overline{Tr} \tag{1}$$

여기서 Tr 은 크리프 파단시간, \overline{Tr} 는 크리프 파단시간의 평균치 그리고 첨자 i 는 시험편 번호를 나타낸다. 크리프 파단시간의 변동성을 나타내는 무차원 파라미터 Z_i 는 식 (2)와 같이 응력, 온도 그리고 구조의 함수이다.

$$Z_i = f(\sigma, T, S) \tag{2}$$

여기서, σ 는 크리프 응력, T 는 크리프시험 온도 그리고 S 는 미세조직의 변화와 크리프 손상 축적의 본성을 포함하는 구조를 나타낸다.

만일 크리프 시험이 동일 온도 동일 응력 조건하에서 주의 깊게 잘 제어하여 수행되었다고 하면, 식 (2)의 무차원 파라미터는 식 (3)과 같이 S 의 함수로 표현될 수 있다.

$$Z_i = f(S) \tag{3}$$

파라미터 Z 의 고찰은 크리프 시험에서 얻은 Tr 의 통계적 변동성을 고찰하는 것과 같게 된다. 따라서 $Z_i(S)$ 의 통계적 변동성은 식 (4)와 같이 다른 방법으로 표현할 수 있다.

$$Z_i(S) = \frac{Tr}{\overline{Tr}} \tag{4}$$

그리고 $Z_i(S)$ 의 잔차(Residual) ξ_i 는 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$\xi_i = Z_i(S) - \overline{Z_i(S)} \tag{5}$$

식 (5)에 의해서 동일 응력 동일 온도하의 조건에서 시험편간의 크리프 파단시간의 변동성을 평가하는 것이 가능하다.

3. 크리프 파단시간의 확률분포

크리프 파단시간의 확률분포함수는 대수정규분포(Evans, 1994) 혹은 와이블분포(Davies et al., 1999)에 따른다는 보고가 많다. 그러나 크리프 파단시간은 와이블분포로 모델화할 수 있으며 일정 온도하에서 응력 레벨이 증가함에 따라 파단시간이 감소한다고 잘 알려져 있다(Davies et al., 1999; Oh et al., 1999).

본 연구에서도 크리프 파단시간이 식 (6)과 같이 2-파라미터 와이블분포(Kim et al., 2004)에 따른다고 가정한다.

$$F(Tr) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{Tr}{\beta}\right)^\alpha\right] \tag{6}$$

여기서 α 는 와이블분포함수의 형상계수(Shape parameter), β 는 척도계수(Scale parameter)이다. 즉, β 는 63.2%의 크리프 파단 시간을 의미하는 특성계수를 의미한다.

와이블분포는 α 의 값에 의존하여 다른 분포와 같거나 거의 일치하게 된다. $\alpha=1$ 인 경우 지수분포와 일치하며, $\alpha=2$ 인 경우는 레일레이(Rayleigh)분포와 일치한다. 또한 $\alpha=2.5$ 인 경우는 대수정수분포에 거의 가까우며, $\alpha=3.6$ 인 경우에는 거의 정규분포와 일치한다. 그리고 $\alpha=5.3$ 인 경우에 와이블 밀도함수는 음의 값을 보이는 형태를 취하고 있다(Kim et al., 2008). 이러한 성질을 이용한 와이블 통계해석에 의하여 어떤 확률변수의 변동성이나 통계적 분포를 쉽게 평가할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 이전의 실험 데이터

본 연구의 해석에 사용된 재료는 550°C 이상의 보일러 과열기관, 재열기관, 증기기관, 증기터빈의 케이싱, 밸브본체, 로터, 브레이크 등에 사용되는 18-8계 스테인리스강이며, Table 1과 같이 시험 온도는 600, 650, 및 700°C의 온도에 대하여 수행되었다. 각 온도의 두 응력 레벨에서 각각 5개의 시험편에 대하여 수행하였으며, 총 30개의 시험편에 대하여 단시간 크리프 파단시험을 수행한 이전의 실험 데이터(Kim et al., 2005)를 이용하였다.

Table 1 Testing matrix for creep rupture test

Stress (MPa)	Temp. (600°C)	Temp. (650°C)	Temp. (700°C)
320	5	-	-
300	5	-	-
260	-	5	-
240	-	5	-
180	-	-	5
160	-	-	5

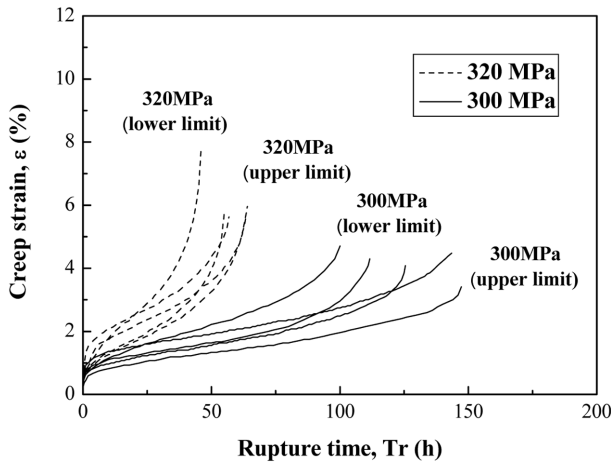


Fig. 1 Creep curves for STS304 at 600°C

실험으로부터 얻은 데이터의 일례를 Fig. 1에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 단시간 크리프 곡선은 동일 온도 동일 응력 하에서도 일치하지 않고 변동성을 보이고 있다. 이는 Evans와 Ward의 실험결과와도 잘 일치한다(Davies et al., 1999). 크리프 파단 데이터에는 상당한 량의 산포가 존재함을 알 수 있으며, 크리프 파단 거동이 근본적으로 확률적 본성을 나타냄을 보여주고 있다.

크리프 변형에 대한 재료의 크리프 저항의 평균치가 변동한다고 사료된다. 그러나 일반적인 크리프 평가법은 크리프 재질의 확률적 변성이나 변동성을 고찰하는 좋은 방법이라 할 수 없다. 따라서 이하에서는 4.2절에서 언급한 방법으로 시험편간 파단시간의 변동성을 고찰하고자 한다.

4.2 크리프 파단시간의 변동성

재질에 의한 크리프 파단시간의 변동성의 영향을 명확히 고찰하기 위하여 잔차를 구하여 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 시험편간 크리프 파단시간에는 변동성이 존재함을 알 수 있다. 이러한 변동성은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 잘 제어된 실험 조건하에서도 파단시간에는 상당한 변동성을 보이고 있다. 따라서 크리프 수명 평가나 설계에 있어서 통계적 접근법이 필요하다고 사료된다. 650°C 260MPa의 경우를 제외하고는 크리프 변형 메커니즘에 특별한 차이는 없었다. 650°C 260MPa의 경우, 변동계수는 14.9%로 예측값 보다도 아주 큰 값을 보였다. 이는 현재의 실험결과로 다른 크리프 변형 메커니즘이 존재하는지는 알 수 없으나 더 많은 시험편에 의한

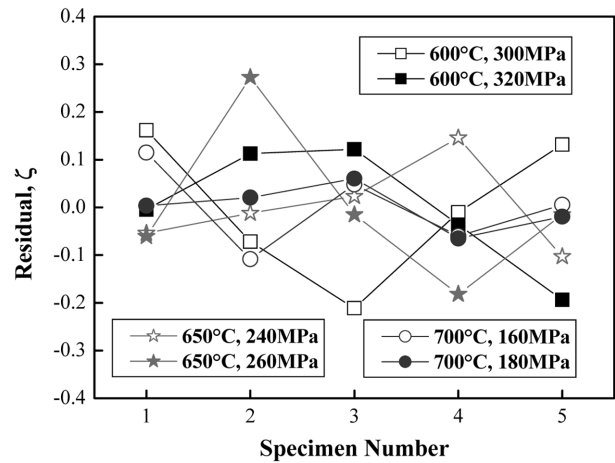


Fig. 2 Variability of the residual, ζ , of rupture time

고찰이 필요하다고 사료된다. Table 2는 실험 매트릭스에 따른 크리프 파단시간의 통계적 성질을 정리하여 나타낸 것이다.

4.3 크리프 파단시간의 확률분포

Fig. 3에 2-파라미터 Weibull 분포의 확률밀도함수를 나타내었다(Weibull, 1951). 또한 최우추정법에 의해 추정된 파라미터 α 와 β 의 값을 Table 3에 나타낸다. 650°C의 경우를 제외하면 Weibull 형상계수 α 는 응력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 척도계수 β 는 모든 온도에서 응력이 증가함에 따라 감소하였다. 이것은 어떤 온도에서 응력이 증가하면 그 산포와 수명이 감소함을 의미한다. 또한 Fig. 3에서 알 수 있듯이 동일 온도에서 응력이 증가하면 그 산포가 감소하는 응력 의존성이 존재하며, 그 의존성은 온도가 증가하면 커짐을 알 수 있다.

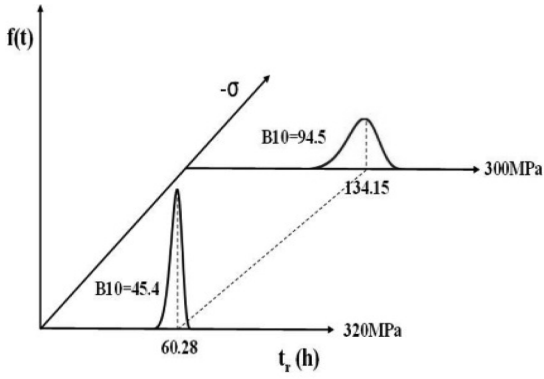
4.4 응력에 미치는 와이블 파라미터의 의존성

Fig. 4 및 Fig. 5는 크리프 응력에 미치는 파단시간의 Weibull 분포의 형상계수 및 척도계수의 의존성을 각각 나타낸다. 형상계수의 경우, 650°C의 경우를 제외하고는 작용응력이 증가함에 따라 형상계수는 증가하는 경향을 보였다. 650°C의 경우는 Table 2에서와 같이 비정상적인 결과를 보여주고 있다. 이것을 고찰하기 위해서는 더 많은 실험 데이터에 의한 해석과 고찰이 필요로 한다. 그러나 본 연구에서는 크리프 작용응력이 증가하면 형상계수가 증가한다는 가정하에 크리프 수명예측을 수행하였다.

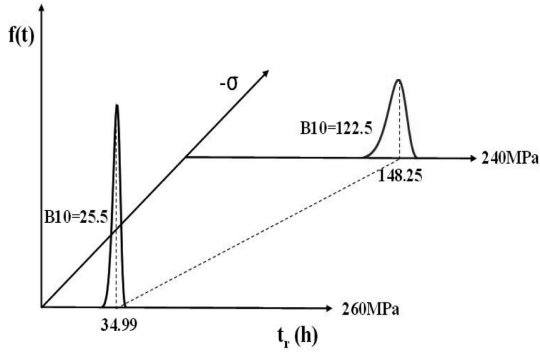
한편, 척도계수는 작용응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을

Table 2 Statistical properties of rupture time

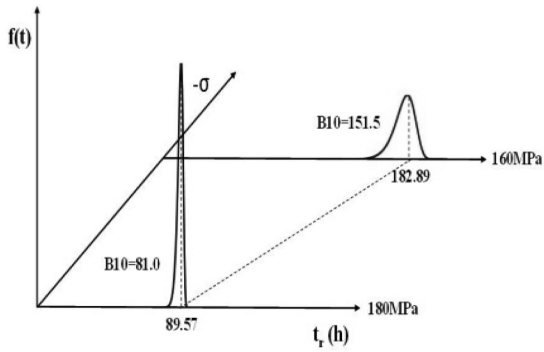
Temp. [°C]	Stress [MPa]	Mean [hr]	Standard deviation [hr]	Coefficient of variation	Mean of $[Z_i]$	COV of $[Z_i]$
600	320	57.06	6.576	0.115	1	0.128
	300	125.6	18.110	0.144	1	0.152
650	260	33.0	4.929	0.149	1	0.167
	240	142.7	12.014	0.084	1	0.094
700	180	87.7	3.655	0.041	1	0.046
	160	176.1	13.831	0.078	1	0.087



(a) 600 °C



(b) 650 °C



(c) 700 °C

Fig. 3 Weibull density functions of rupture time

Table 3 The estimated Weibull parameters

Temp. [°C]	Stress [MPa]	α	β
600	320	7.94	60.28
	300	6.42	134.15
650	260	7.11	34.99
	240	11.81	148.25
700	180	22.32	89.57
	160	11.93	182.89

보였다. 또한 그 기울기는 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있었다. Weibull 파라미터와 크리프 응력사이의 실험적 상관관계식은 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

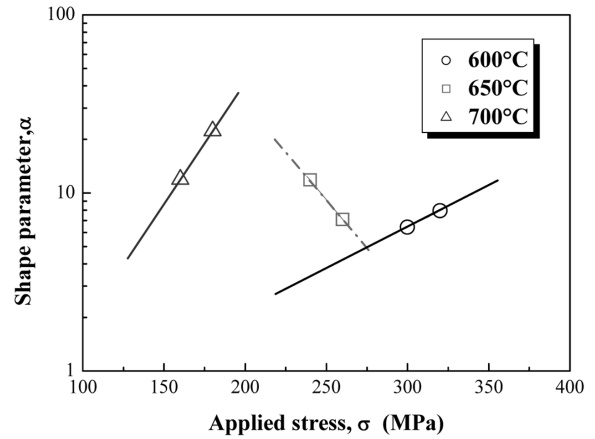


Fig. 4 Dependency of shape parameter on stress

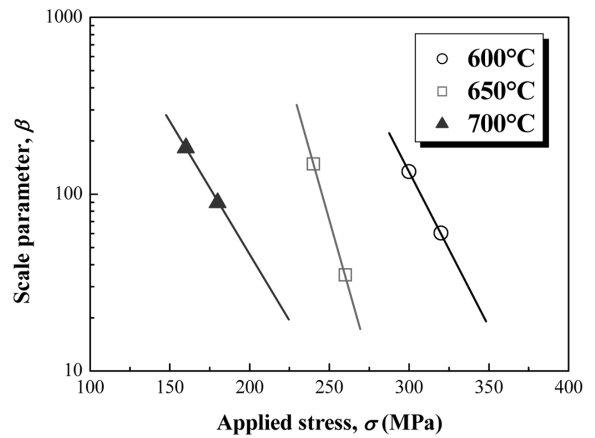


Fig. 5 Dependency of scale parameter on stress

$$\log \alpha = A + B\sigma \tag{7}$$

$$\log \beta = C + D\sigma \tag{8}$$

여기서 A, B, C 및 D는 실험 상수이다.

4.5 확률론적 크리프 수명예측

본 연구의 경우에서도 알 수 있듯이 단시간 크리프 파단 시험에 의하여 얻은 파단 수명이 일정 온도, 일정 응력하에서 산포를 나타내고 있음을 잘 알 수 있다. Evans(Evans, 1994; Kececioglu, 1991) 등은 확률론적 크리프 수명 예측을 수행하기 위하여 Monkman-Grant 관계를 이용하여 확률분포 개념으로 고찰한 바 있다. 본 연구에서는 크리프 파단 수명의 분포가 와이불분포에 따른다고 가정한다.

어떤 주어진 온도에서 응력에 대한 Weibull 분포(Weibull, 1951)의 파라미터 α, β 를 식 (7) 및 (8)로부터 추정할 수 있다면, 평균 크리프 파단수명은 간단히 식(9)로 구할 수 있다.

$$\overline{Tr} = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \tag{9}$$

여기서, $\Gamma(-)$ 는 감마함수(Gamma function)이다.

또한, 확률적으로 크리프 파단수명을 구하기 위해서는 식 (6)

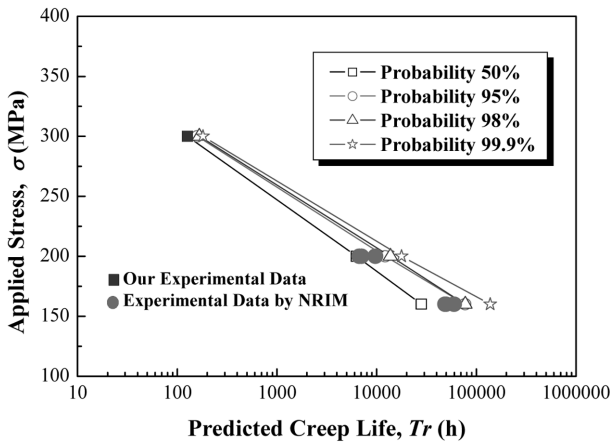


Fig. 6 Comparison of the predicted creep life and NIRM data in 600°C

에 의해서 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$Tr_p = \beta [\sqrt{-\log(1-F)}]^{1/\alpha} \quad (10)$$

여기서 α , β 는 임의 온도, 응력에서 추정된 형상 및 척도 파라미터이고, Tr_p 는 F 의 확률에서의 크리프 파단수명이다. 따라서 식 (10)으로부터 간단히 확률론적 크리프 파단수명을 구할 수 있다.

수명예측의 일례로 600°C, 300, 200 그리고 160MPa의 응력에 대하여 50, 95, 98 및 99.9%의 예측 파단수명을 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. 또한 NIRM(1990)의 실험 데이터틀 이용하여 수명예측을 비교한 결과 비슷한 경향으로 나타났다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 확률론적 수명 예측의 가능성이 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 확률론적 수명예측 적용은 단시간 그리고 아주 소수(다섯개의 시험편)의 크리프 파단 시험에 의한 데이터의 변동성 해석으로부터 와이블 통계해석의 관계식으로부터 확률론적으로 크리프 수명 예측 가능성을 보였다.

본 수명예측법을 라슨-밀러 파라미터법(LMP)에 의한 수명과 비교 고찰하였다. 작용응력과 LMP(Larson and Miller, 1952)사

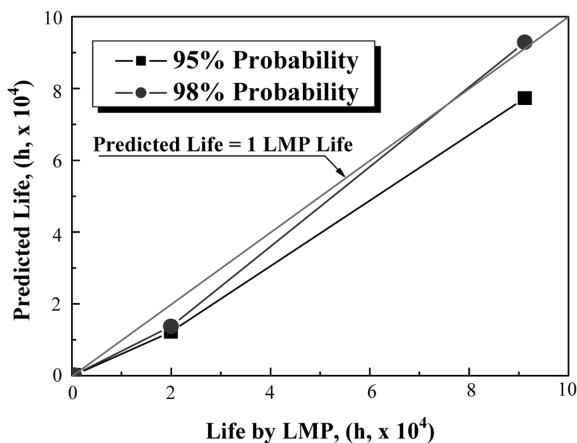


Fig. 7 Comparison of the predicted creep life and LMP life

이에는 식 (11)을 얻었다.

$$LMP = T(\log Tr + 20) = -0.00515 \log \sigma^2 - 14.56 \log \sigma + 24126 \quad (11)$$

Fig. 7은 600°C, 300, 200 그리고 160MPa의 응력에 대하여 95 및 98% 확률에 대하여 예측된 수명과 LMP에 의한 수명을 비교한 것이다. 비교적 보수적 수명예측이 가능함을 보이고 있다. 그러나 실제 장시간 가열에 의한 재료의 미세조직의 변화 등에서 재료의 크리프 특성이 크게 좌우할 것으로 생각되나, 이와 같은 재료 고유의 내부인자를 본 연구에서는 고려하지 않았으나 차후 이와 같은 영향을 고려한 연구가 필요하다고 사료된다.

5. 결 론

동일 온도 및 동일 응력에서 크리프 파단시간의 변동성과 통계적 성질을 고찰하여 분포의 파라미터가 크리프 응력에 미치는 의존성을 해석하였다. 또한 통계적 변동성을 고려한 확률론적 수명 예측방법을 제안하였다. 본 연구를 통하여 비교적 단시간 소수의 크리프 파단시험 데이터틀 이용하여 파단수명의 확률특성을 파악할 수 있었다. 이는 NIRM 데이터를 적용하여 비교분석한 결과, 장시간 고온 크리프 수명예측이 확률 통계적으로 가능함을 확인하였다.

참 고 문 헌

Davies, R.B., Hales, R., Harman, J.C. and Holdsworth, S.R. (1999). "Statistical Modeling of Creep Rupture Data", Trans. of the ASME, Vol 121, pp 264-271.

Evans, M. (1994). "A Statistical Analysis of the Failure Time Distribution for 1/2Cr1/2Mo1/4V Steel Tubes in the Presence of Outliers", Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol 60, pp 193-207.

Huh, N.S., Kim, Y.J. and Yoon, K.B. (2006). "Plastic Displacement Estimates in Creep Crack Growth Testing", Trans. of the KSME, Vol 30, No 10, pp 1219-1226.

Kececioglu, D. (1991). Reliability Engineering Handbook, Vol 1, pp 271-331.

Kim, S.J., Kong, Y.S., Noh, Y.j and Kim, W.G. (2008). "Statistical Properties Creep Rupture Data Distribution for STS304 Stainless Steels", Materials Science and Engineering A, 483-484, pp 529-532.

Kim, S.J., Kwak, M.K., Kwon, S.W. and Kong, Y.S. (2004). "Probability Distribution Characteristics for Elevated Temperature Mechanical Properties of Stainless Steels", Trans. of the KSOE, Vol 18, No 2, pp 64-69.

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 Method", Trans. of the KSME, Vol 29, No 1, pp 74-80.

- Kim, W.G., Yoon, S.N., Ryu, W.S., Kim, S.J. and Yi, W. (2006). "Probabilistic Analysis for the Creep Crack Growth Rate of Type 316LN Stainless Steel by the Monte Carlo Simulation", *Journal of ASTM International (JAI)*, Vol 3 Issue 1, pp 1-6.
- Larson, F.R and Miller, J.J. (1952). "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", *Transaction of the ASME*, pp 765-775.
- NRIM (1990). "NRIM Creep Data Sheet 1", *National Research Institute for Metals, Japan*, Vol 32, No 4.
- Oh, S.K., Kong, Y.S. and Yang, H.T. (1999). "Creep Prediction by Initial Strain Method for Aging Treated Friction Welds of Heat Resisting Steels", *Int. J. of Ocean Engineering and Technology*, Vol 2, No 2, pp 13-18.
- Seo, H.U., Park, K.S. and Yoon, K.B. (2006). "Evaluation of High Temperature Material Degradation for 12Cr Steel by Electrochemical Polarization Method", *Trans. of the KSME*, Vol 30, No 8, pp 965-975.
- Weibull, W. (1951). "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", *Journal of Applied Mechanics*, Vol 18, pp 293-297.
- Yokoi, S. and Monma, Y. (1979). "Prediction of Long-time Creep-Rupture Strength for High-Temperature Materials", *Iron and Steel*, Vol 65, pp 831-842.
-
- 2010년 3월 15일 원고 접수
2010년 11월 22일 심사 완료
2010년 12월 17일 게재 확정