

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.10.1119

# 크리프 파단 데이터의 변동성에 대한 새로운 고찰과 수명예측

정원택\* · 공유식\*\* · 김선진†

(2009년 7월 20일 접수, 2009년 8월 20일 수정, 2009년 8월 20일 심사완료)

## New Considerations on Variability of Creep Rupture Data and Life Prediction

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

**Key Words:** Creep Rupture Time(크리프 파단 시간), Steady State Creep Rate(정상크리프속도), Weibull Distribution(와이블 분포), Variability(변동성), Life Prediction(수명 예측), Monkman-Grant Model(Monkman-Grant 모델)

### Abstract

This paper deals with the variability analysis of short term creep rupture test data based on the previous creep rupture tests and the possibility of the creep life prediction. From creep tests performed by constant uniaxial stresses at 600, 650 and 700°C elevated temperature, in order to investigate the variability of short-term creep rupture data, the creep curves were analyzed for normalized creep strain divided by initial strain. There are some variability in the creep rupture data. And, the difference between general creep curves and normalized creep curves were obtained. The effects of the creep rupture time (RT) and steady state creep rate (SSCR) on the Weibull distribution parameters were investigated. There were good relation between normal Weibull parameters and normalized Weibull parameters. Finally, the predicted creep life were compared with the Monkman-Grant model.

### 1. 서 론

각종 열기관, 자동차나 항공기 등의 엔진, 발전소 보일러 과열기관, 터빈, 원자로 부품 등과 같은 많은 산업용 재료나 구조물들은 고온 고압의 분위기에서의 사용 기회가 더욱 증가되고 있으며, 효율을 향상시키기 위하여 이들의 사용 온도도 점차 높아지는 추세이다. 이러한 고온에서 장시간 사용할 수 있는 새로운 내열강, 내열 합금의 개발과 더불어 고온 설계허용 응력치의 설정

및 장시간 사용된 플랜트에 대한 고온 부재의 잔여 수명의 추정 등을 위해서는 사용하는 고온 부재의 고온에 대한 기계적 성질, 특히 시간 의존성 크리프 특성의 파악이 안전성, 신뢰성의 향상을 위하여 필요불가결 하다.<sup>(1-3)</sup> 이와 같은 고온 재료는 고온에서 장시간 사용되므로 고온파괴, 즉 크리프 손상에 의한 고장 및 파손으로 경제적 손실은 물론 인명 피해까지도 발생 할 수 있는 중요한 의미를 가지고 있다. 따라서 이러한 강재의 장시간 고온 크리프 특성을 단시간의 실험을 통하여 정확히 평가하고 안전 강도나 잔여수명 등을 예측하는 평가 기법의 개발은 예기치 않은 사고 방지는 물론 인명 및 재산 손실 예방의 경제적인 차원 뿐 만 아니라 실용적인 공학적 의미에서도 매우 중요하다.

현재 널리 이용되는 크리프 수명예측법으로는 크게 시간-온도 파라미터법과 해석적 수명예측기

[이 논문은 2009년도 신뢰성부문 춘계학술대회(2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 부경대학교 기계공학부  
E-mail : sjkim@pknu.ac.kr  
TEL : (051)629-6163 FAX : (051)629-6150

\* 부경대학교 대학원 기계설계공학과

\*\* 회원, 부경대학교 기계공학부

법으로 크게 나눌 수 있다. 이들 이외에도 크리프 변형이론에 의한 Monkman-Grant 법 등 많은 수명예측법이 제안되었다. 그러나 이러한 연구는 비교적 짧은 시간의 실험 데이터를 외삽하여 장시간의 수명 예측을 하는 것은 자칫 위험할 수도 있고, 또 사용 수명 요인인 열화 현상으로 인한 파단은 반드시 외부 표면에서부터 일어나는 것은 아니며 변형, 미소균열 등의 손상에 의해 일어날 수 있으며 실제 설비의 사용 환경에 있어서의 손상은 재질, 온도, 압력, 그리고 시간에 의존하여 복합적으로 발생하게 되므로 이들의 데이터는 결정론적 방법(deterministic approach)이 아닌 확률적인 변동을 할 가능성이 매우 높다. 실제 크리프 파단 강도 데이터에 대한 통계적 특성이나 확률론적 수명 예측 모델링에 관한 연구 결과도 국외에서는 다소 보고<sup>(4,5)</sup>되고 있지만, 국내의 경우는 거의 없는 실정이다.<sup>(6)</sup>

고온 재료에 대한 장시간 고온 크리프 특성의 연구 뿐 아니라 수명 예측이나 강도 평가에 대한 연구는 시간적, 경제적 제약으로 어려움이 있으나 단시간 크리프의 주요 인자(크리프 응력과 파단 수명, 정상 크리프 속도, 전 크리프 연신율, 전 크리프 속도 등)와의 정량적인 상관관계를 규명하고 이를 정량화하여 장시간 파단 수명을 도출하는 크리프 수명 예측 평가에 관한 연구가 수행되고 있지만<sup>(7,8)</sup> 이들의 연구는 비교적 아주 적은 데이터에 의한 결정론적인 방법으로 확률-통계적으로 조사 고찰할 필요가 있다.

이상과 같은 관점에서 저자는 이미 STS304 스테인리스강의 고온 인장 시험에 대한 인장강도, 연신율, 단면 수축률 등의 고온 기계적 성질의 확률분포 특성에 관한 연구를 수행하였으며<sup>(9)</sup> 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.<sup>(10)</sup>

따라서 본 연구에서는 단시간 소수의 크리프 파단 시험을 통한 장시간 고온 크리프 파단 수명 예측법 개발에 관한 연구의 일환으로서, 이전의 실험 데이터<sup>(10)</sup>를 이용하여 크리프 특성치의 통계적 변동성에 대한 새로운 어프로치 방법에 대하여 고찰하고자 하였다.

## 2. 이전의 실험 결과

본 연구의 해석에 사용된 시험편 재료는 550℃ 이상의 보일러 과열기관, 재열기관, 증기기관, 증기터빈의 케이싱, 밸브본체, 로터, 브레이드 등에 사용되는 18-8계 스테인리스강(STS304)이며, 주로 사용되는 환경을 고려하여 Table 1과 같이 시험 온도는 600, 650, 및 700℃의 온도에 대하여 수행되었다. 각 온도의 두 응력 레벨에서 각각 5개의 시험편에 대하여 수행하였으며, 총 30개의 시험편에 대하여 단시간 크리프 파단 시험을 수행한 이전의 실험 데이터<sup>(10)</sup>를 이용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 초기연신율로 표준화한 크리프 특성치의 변동성

재질에 의한 크리프 특성치의 변동성의 영향을 명확히 고찰하기 위해서는 초기연신율로 표준화하여 크리프 곡선을 나타낼 필요성이 있다. 일례로 Fig. 1에 일반적인 크리프 곡선<sup>(10)</sup>과 초기연신율로 표준화한 크리프 곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 크리프 파단시간의 변동성에는 영향이 없으나 정상상태의 크리프 속도나 총 크리프 연신율 등에는 그 변동성의 평가에 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 정상상태의 크리프 속도 등을 이용한 파단수명 예측에 있어 진(true)의 수명예측이 곤란한 경우가 있음을 시사해 준다고 볼 수 있다.

이상과 같이 정상상태의 크리프 속도, 총 연신율 등 크리프 특성치의 변동성을 고찰하기 위해서는 초기연신율로 정규화하여 재질에 따른 크리프 특성의 변동성을 고찰할 필요가 있다.

Table 1 Testing matrix for creep rupture test

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

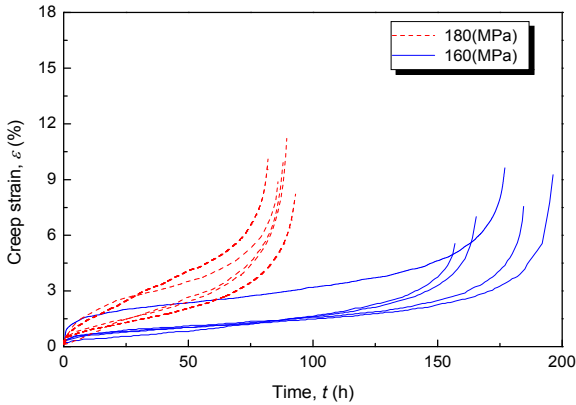


Fig. 1 General creep curves for STS304 at 700°C

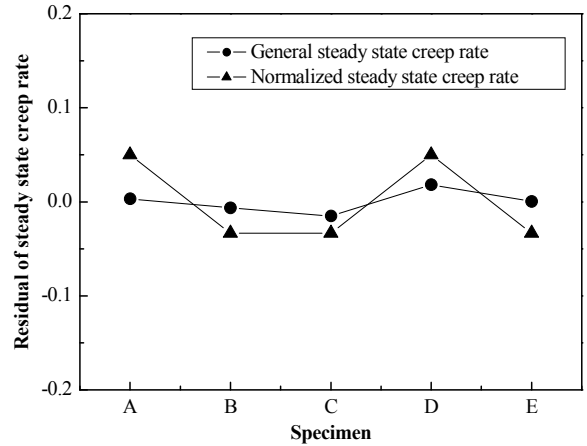


Fig. 3 Variability of the residuals of steady state creep rate on specimen at 180MPa

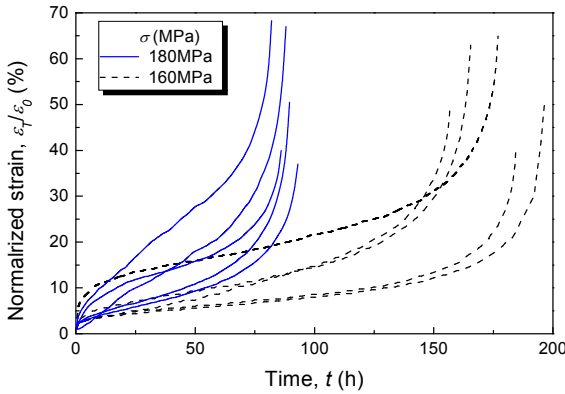


Fig. 2 Normalized creep curves for STS304 at 700°C

이상과 같은 관점에서, 정상상태 크리프 속도의 변동성을 고찰하기 위하여 다음과 같이 행하였다.

$$\epsilon_i = E[\epsilon_q] + Z_i \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_i$ 는 어떤 실험조건(일정온도, 일정 응력)에서 얻은  $i$ 번째 시험편에서의 정상상태 크리프 속도이고,  $E[\epsilon_q]$ 는 어떤 실험조건에서 얻은 모든 시험편에 대한 평균 정상상태의 크리프 속도이고,  $Z_i$ 는 어떤 실험조건에서 얻은  $i$ 번째 시험편에서의 정상상태 크리프 속도의 변동성을 나타내는 하나의 파라미터이다. 따라서 변동성의 특성을 나타내는  $Z_i$ 는 다음과 같다.

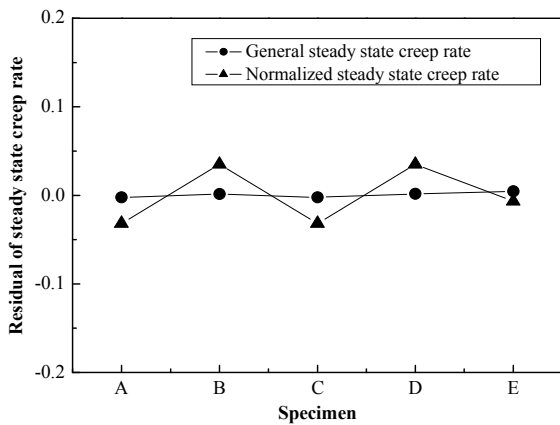
$$Z_i = \epsilon_i - E[\epsilon_q] \quad (2)$$

식(2)에서  $Z_i$ 의 파라미터를 구하여 실험조건에 대한 변동성의 영향을 고찰 할 수 있다. 일례로 Fig. 3 및 Fig. 4는 700°C에 대하여 각 응력 조건에서의 정상상태 크리프 속도의 잔차,  $Z_i$ 를 나타낸 것이다. 즉, 변동성은 일반적인 정상상태 크리프 속도 보다 정규화한 정상상태 크리프 속도가 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 통계적 크리프 수명 예측시 일반적인 특성치의 변동계수를 이용하는 경우와는 실제의 불확실성을 과소평가 할 가능성이 존재할 수 있음을 알 수 있다.

Table 2는 각각의 실험조건에서 구한 전형적인 크리프 곡선과 정규화한 크리프 곡선에 의하여 구한 정상상태 크리프 속도의 Weibull 통계해석에 의한 결과치를 나타낸 것이다. 이는 크리프 특성치의 변동성을 고려할 때 진(true)의 값보다도 적게 변동성을 나타낼 가능성이 존재함을 의미한다. 따라서 재질에 의한 크리프 특성치의 변동성을 고찰할 경우에는 이와 같이 정규화하여 고찰할 필요가 있다. Table 2의 해석 결과에서도 알 수 있듯이, 정상상태 크리프 속도(SSCR)에 파라미터에 의한 각 온도에서의 응력 의존성이 존재함을 보여준다. 즉, 형상 및 척도 파라미터는 동일 온도에서 응력이 감소함에 따라 모두 감소하는 경향을 보이고 있다. 단, 650°C의 경우는 형상 파라미터가 증가하는 결과를 보였는데 이에 대해서는 다른 크리프 메카니즘의 존재 가능성 등을 포함하여 더 많은 시험편에 의한 실험과 고찰이 필요하다고 사료된다. 그러나 일반적으로는 Norton<sup>(11)</sup>의 결과식과 비교적 일치하고 있다.

**Table 2** The estimated Weibull parameters for SSCR

Stress/temp. (MPa/°C)	General creep curves	Normalizes creep curves
320/600	$\alpha=4.85, \beta=0.058$	$\alpha=3.89, \beta=0.1172$
300/600	$\alpha=4.93, \beta=0.190$	$\alpha=2.42, \beta=0.0484$
260/650	$\alpha=3.92, \beta=0.199$	$\alpha=3.61, \beta=0.7065$
240/650	$\alpha=17.67, \beta=0.029$	$\alpha=3.95, \beta=0.0713$
180/700	$\alpha=4.17, \beta=0.054$	$\alpha=5.78, \beta=0.2134$
160/700	$\alpha=6.12, \beta=0.016$	$\alpha=4.44, \beta=0.1432$

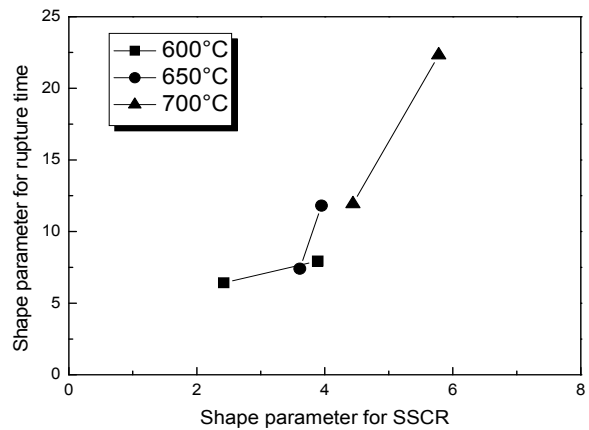


**Fig. 4** Variability of the residuals of steady state creep rate on specimen at 160MPa

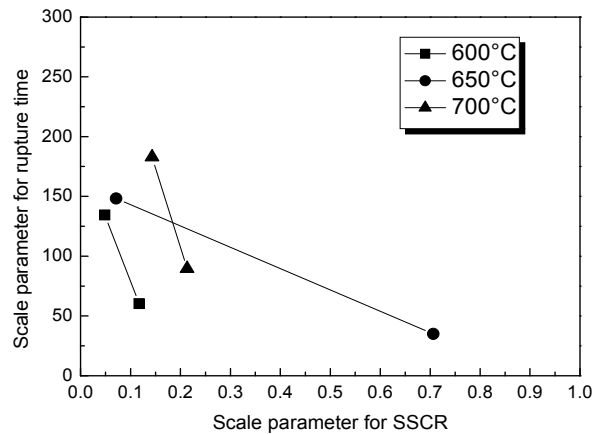
3.2 파단수명과 SSCR의 Weibull 분포의 파라미터의 상관성

Fig. 5 및 6은 각 온도에서 크리프 파단수명 (RT)과 정규화한 SSCR의 확률분포 형상 파라미터 및 척도 파라미터의 상관성을 각각 나타낸다.

형상 파라미터(shape parameter)의 경우 모든 온도에 있어서 본 연구에서 정규화한 정상상태의 크리프 속도의 형상 파라미터와 파단수명의 형상파라미터 사이에는 명확한 양의 상관성이 존재함을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 구한 SSCR의 형상 파라미터에는 차이가 있음을 알 수 있었다. 한편 척도 파라미터(scale parameter)는 각 온도에서 모두 정규화한 정상상태 크리프 속도의 척도 파라미터가 증가하면 파단 수명의 척도 파라미터는 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 파단수명의 척도 파라미터와 SSCR의 척도 파라미터 사이에는 좋은 음의 상관성이 존재함을 알 수 있었다. 650°C의 경우를 제외하면 그 기울기의 절대값은 고온으로 갈수록 증가하였는데 이는 고온에서 재료의 열화현상에 기인하는 것으로 생각된다.



**Fig. 5** Relationship between  $\alpha$ -SSCR and  $\alpha$ -RT



**Fig. 6** Relationship between  $\beta$ -SSCR and  $\beta$ -RT

이상과 같이, 파단수명과 정상상태 크리프 속도에는 확률적으로도 상관관계가 성립한다고 할 수 있다. 이는 Monkman-Grant의 관계식<sup>(12)</sup>으로부터 확률론적으로 수명예측이 가능함을 시사해 준다.

3.3 Monkman-Grant (M-G) 관계식

Fig. 7은 파단시간과 정상 상태 크리프 속도와 의 상관관계를 나타낸 것이다. 즉, 정상 상태 크리프 속도가 증가함에 따라 파단시간이 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 응력-정상 상태 크리프 속도, 응력-파단시간과의 사이에는 실험적 상관성이 존재한다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 즉, M-G식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log t_r = C - p \log \dot{\epsilon} \tag{3}$$

여기서, 재료 상수  $p$ 와  $C$ 는 각각 0.6803, 0.9869

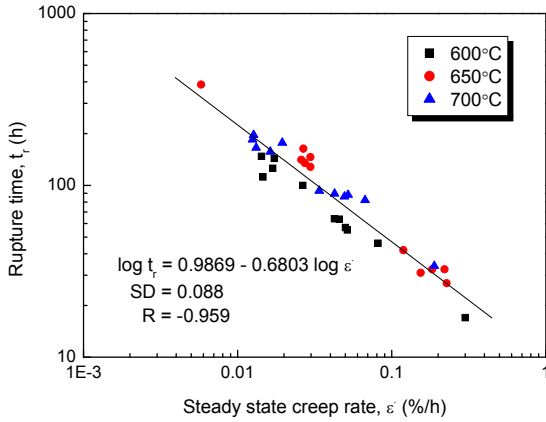


Fig. 7 Monkman-Grant relationship for STS304 at the respective temperature

의 값을 얻었다. 그림에서 알 수 있듯이 각각의 온도에 대해서 고려할 때는  $p$ 값이 다소 다르게 나타남을 알 수 있다. 이는 본 실험결과에 대한 산포의 영향이라 사료되며, 이에 대한 고찰이 더욱 필요하다고 하겠다.

3.4 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 등<sup>(4)</sup>은 확률론적 크리프 수명 예측을 수행하기 위하여 M-G 관계식을 이용하여 확률분포 개념으로 고찰한 바 있다. 본 연구에서는 크리프 수명과 정상상태 크리프 속도가 Weibull 분포<sup>(13)</sup>에 따른다고 하였다.

정규화한 정상상태의 크리프 속도가 Weibull 분포에 따른다고 할 때 그 확률분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\dot{\epsilon}) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\dot{\epsilon}}{\beta}\right)^\alpha\right] \tag{4}$$

어떤 주어진 온도에서 응력에 대한 Weibull 분포의 진의 파라미터  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 추정할 수 있다면, 평균 정상 상태 크리프 속도( $\dot{\epsilon}_m$ )는 간단히 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_m = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \tag{5}$$

Table 3 The estimated creep life

Probability(%)	Creep life (h)	Experiment
	[600°C, 320MPa]	Mean rupture time
2	95.4	
5	81.1	
10	70.3	
50	51.5	57.1
90	41.7	
95	39.8	
98	38.0	

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

또한, 확률적으로 정상 상태 크리프 속도를 구하기 위해서는 식 (4)에 의해서 다음과 같이 구할 수 있다. 즉,

$$\dot{\epsilon}_p = \beta \sqrt{-\log(1-F)} \tag{6}$$

여기서  $a$ ,  $\beta$ 는 임의의 온도, 응력에서 추정된 형상 및 척도 파라미터이고,  $\dot{\epsilon}_p$ 는  $F$ 의 확률에서의 정상상태 크리프 속도이다. 따라서 식 (6)을 식 (3)에 대입하면 확률론적 파단수명은 다음과 같이 구하여 진다.

$$\log t_r = C - p \log(\beta \sqrt{-\log(1-F)}) \tag{7}$$

본 연구에서는 수명예측의 일례로 600°C, 320MPa에서의 확률 2, 5, 10, 50, 90, 95, 98%의 예측 파단수명을 계산하여 Table 3에 나타내었다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 확률론적 수명예측의 가능성이 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 확률론적 수명예측 적용은 단시간 그리고 아주 소수(다섯개의 시험편)의 크리프 파단 시험에 의한 데이터의 확률·통계적 해석으로부터 신뢰성 해석에 기초하여 Monkman-Grant (M-G) 관계식으로부터 확률론적으로 크리프 수명 예측 가능성을 보였다. 따라서 단시간 실험에 의한 응력과 정상상태 크리프 속도와의 관계식으로부터 비교적 장시간에 대한 수명예측도 가능할 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 실제 장시간 가열에 의한 재료의 미세조직의 변화 등에서 재료의 크리프 특성이 크게 좌우할 것으로 생각되나, 이와 같은 재료 고유의 내부인자를 고려한 연구가 필요하다 고 사료된다. 본 연구에서 제안한 것은 단

지 소수의 실험 데이터에 의하여 추정된 파라미터를 진(true)의 파라미터 값으로 한 적용방법이다. 그러나 실제 본 실험의 조건에 대한 확률변수인 정상상태 크리프 속도 분포의 파라미터가 본 재료에 대한 진의 파라미터 값인지는 의문이 남는다. 이 문제를 해결하기 위해서는 시험편 수를 고려한 파라미터의 추정 정확성과 더불어 신뢰수준을 고려한 파단 수명의 편측허용한계를 고찰할 필요가 있다. 향후 이들에 대한 연구를 진행하고자 한다.

#### 4. 결 론

STS304 스테인리스강의 단시간 크리프 파단 특성치의 통계적 변동성을 고찰함에 있어서 초기 연신율로 정규화하여 고찰함이 크리프 특성치의 진의 확률·통계적 변동성을 고찰하는 좋은 방법임을 보였으며, 파단시간과 정상상태 크리프 속도의 분포의 파라미터 사이에는 좋은 상관관계가 존재함을 알았다. 즉, 형상 파라미터 사이에는 좋은 양의 상관성이 존재하며, 척도 파라미터 사이에는 좋은 음의 상관성이 존재함을 알았다. 이는 파단수명과 정상상태 크리프 속도에는 확률적으로도 명확한 상관관계가 성립한다고 할 수 있다. 또한 비교적 단시간 소수의 크리프 파단 시험 데이터를 이용하여 파단 수명의 확률 특성을 파악한다면, Monkman-Grant 관계식에 의한 고온 크리프 수명예측이 확률통계적으로 가능함을 보였다.

#### 참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) Norton, F.H., 1910, "The Creep of Steel at High Temperatures, McGraw Hill," New York, pp. 67.
- (12) Monkman, F.C. and Grant, N.J., 1956, "An Empirical Relationship between Rupture Life and Minimum Creep rate in Creep Rupture Tests," *Proc. ASTM*, Vol. 56, pp. 593~598.
- (13) Weibull, W., 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 18, pp. 293~297.