

스테인리스강의 크리프 특성치와 파단시간과의 관계

공유식* · 김선진* · 이배섭**

*부경대학교 기계공학부

**인천기능대학 컴퓨터응용기계과

Relationship between Creep Characteristic Values and Rupture time in STS304 Stainless Steels

YU-SIK KONG*, SEON-JIN KIM* AND BAE-SUB LEE**

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**Department of Computer Aided Mechanics, Incheon Polytechnic College, Incheon, Korea

KEY WORDS: Tensile Strength 인장강도, Elongation 연신율, Larson-Miller parameter LMP, Creep Properties 크리프 특성, Rupture Time 파단시간

ABSTRACT: The characteristics of the probability distribution for mechanical properties, e.g. tensile strength, reduction of area and elongation, for STS304 stainless steel in elevated temperature were investigated from tensile test performed by constant cross head speed controls with 1mm/min. Recently, in order to clarify the strengthening mechanisms at high temperature, a new scheme to improve high temperature mechanical properties is desired. Therefore, the test technique development of high temperature creep behaviors for this material is very important. In this paper, the creep properties and creep life prediction by Larson-Miller parameter method for STS304 stainless steel to be used for other high temperature components were presented at the elevated temperatures of 600, 650 and 700℃.

1. 서 론

현재 선박이나 해양구조물의 열기관, 자동차나 항공기 등의 엔진, 발전소 보일러, 터빈, 원자로 부품 등의 여러 가지 고온 재료의 고온 분위기에서의 사용 기회가 증가하고 있으며, 효율 면에서도 이들의 사용온도가 높아지는 추세이고 이러한 고온에서 사용할 수 있는 내열강, 내열 합금의 개발과 함께 내열재료에 있어 무엇보다도 중요한 고온 강도, 특히 크리프 강도 특성에 관한 연구가 매우 중요하다. 이와 같은 내열재료는 고온에서 장시간 사용되므로 고온 파괴, 즉 크리프 손상에 의한 고장 및 파손으로 경제적 손실은 물론 인명 피해까지도 발생할 수 있을 것이다. 따라서 이러한 강재의 장시간 고온 크리프 특성을 단시간의 실험을 통하여 파악하고 안전 강도와 수명을 예측함으로써 사고 방지는 물론 인명 및 재산 손실 예방을 도모한다는 것은 고온 재료의 사용에 있어서 가장 중요한 요소라 할 수 있다(송정근, 1998; Kim et al, 2001).

내열재료에 대한 장시간 고온 크리프 특성의 연구뿐 아니라 수명, 강도 평가에 대한 연구는 시간적, 경제적 제약으로 미약한 실정이나 크리프의 주요 인자(크리프 응력,

파단 수명, 정상 크리프 속도, 전 크리프 연신율, 전 크리프 속도 등)와의 정량적인 상관관계를 규명하고 이를 정량화하여 파단 수명을 도출하는 크리프 수명 예측 평가에 관한 연구가 수행되고 있다(정민화, 1998; Kong et al, 2003; Oh et al, 1999). 그러나 이러한 연구에서 극히 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, 공공, 미소 균열 등의 손상에 의해 일어나며 실제 설비의 사용 환경에 있어서의 손상은 재질, 온도, 압력, 그리고 시간에 의존하여 복합적으로 발생하게 되므로 이들의 실제 크리프 강도 데이터에 대한 통계적 특성을 연구한 결과도 보고(김 등, 2004)되고 있지만, 적은 실정이다. 재료 강도의 신뢰성 공학적 취급에는 풍부한 실험 데이터가 필요하지만, 크리프에 관한 통계적인 데이터나 해석이 부족한 것이 현실이다. 이는 타의 재료 강도 데이터 만큼 간단히 얻을 수 없다는 시간적, 경제적 제약이 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 STS304 스테인리스강의 단시간 크리프 파단시험을 통하여 각종 크리프 특성치와 파단시간과의 상관관계를 고찰하였고, 일반적으로 현재 널리 쓰이고 있는 Larson-Miller parameter(LMP)에 의하여 크리프 수명예측을 도출하였다.

제1저자 공유식 연락처 : 부산광역시 남구 용당동 산100번지

051-620-1608 kongys@mail1.pknu.ac.kr

2. 재료 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 550℃이상의 보일러 과열기관, 재열기관, 증기관, 증기터빈의 케이싱, 밸브본체, 로터, 브레이크 등에 사용되는 18-8계 스테인리스강인 STS304이며, 그 화학 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 또한 고온 크리프 시험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 시험편 평행부의 직경은 13mm의 환봉으로부터 6mm로 가공하였으며, 표면은 사포400번에서 1200번까지 연마한 후 다시 0.3에서 0.05 μ m의 산화분말을 사용하여 표면을 경면연마하여 표면 거칠기가 시험결과에 미치는 영향을 최소화 하도록 하였다.

2.2 실험장비 및 방법

시험 장비는 미국 SATEC사의 DLF-10-1029 시험기를 사용하였다. 온도측정은 열전대를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 설정온도까지 약 10℃/min로 가열하였다. 그리고 부하전에 노의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 실험 중 온도를 일정 온도에서 ± 1 ℃범위 이내로 유지하였다. 또한 시험 중 발생하는 연신은 표점거리 30mm되는 양단의 플랜지를 기준으로 LVDT로 측정하여 시험기 자체에 연결되어 있는 레코더로 기록하였고, 실시간적으로 컴퓨터에 저장하여 고온 크리프 변형거동을 평가하였다.

시험편 가열을 위한 전기로는 개폐식을 사용하였으며 control console에 부착된 노의 온도를 제어하는 자동 온도 조절장치는 1200℃까지 전 범위의 ± 0.25 ℃의 정확도를 가지며 노의 내부는 ± 1.5 ℃, 노 전체 3구간(top, middle, bottom zone)의 온도 구배는 2℃정도이다. STS304강이 주로 사용되는 사용 환경을 고려하여 시험 온도의 결정을 600℃, 650℃, 700℃로 하였다.

Table 1 The chemical composition of STS304 stainless steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
0.020	0.40	1.83	0.029	0.009	8.13	18.22	0.24	2.06	0.012

Table 2 The mechanical properties

(a) Room temperature

Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Hardness (H1B)
706 MPa	490 MPa	18	250

(b) Tensile strength(σ_t , MPa) of high temperatures

Temp.(°C)	600	650	700
Material	423	360	304

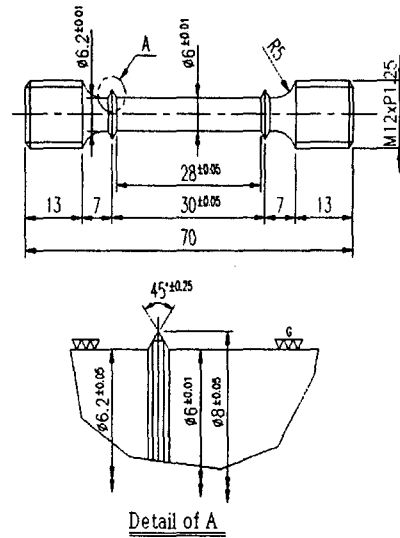


Fig. 1 Shape and dimension of test specimen (unit: mm)

3. 결과 및 고찰

3.1 고온 인장 거동

고온 인장 거동에 미치는 변위 속도의 영향을 알아보기 위하여, 600℃에서 1mm/min, 3mm/min의 크로스 헤드 속도로 인장 시험을 수행한 결과를 Fig. 2에 나타낸다. 이들의 결과를 보면 본 실험 조건의 경우 재료 거동에 변위 속도의 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 3과 Fig. 4는 600℃, 700℃에서 1mm/min의 변위 제어를 이용한 인장 시험을 수행한 결과를 나타낸다. 또한 Fig. 5는 이들 데이터의 편차를 온도에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 동일 온도에서는 재료의 거동이 매우 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 온도 변화에 따른 재료 거동에는 차이가 있음을 보여준다. 이는 고온에서 열에너지의 상승으로 강도는 감소하고 연신이 증가하기 때문이다. 따라서 온도는 재료 거동에 중요한 영향을 미치는 변수임을 알 수 있다. 또한 이들의 데이터에는 온도에 관계없이 재료의 기본적 물성치에는 변동(scatter)이 있다는 것을 알 수 있다.

3.2 고온 크리프 곡선

일정 온도(600, 650, 700℃)하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 STS304 재료의 크리프 곡선은 각각 Fig. 6(a), (b), (c)에 표시한 바와 같다. 그래프에서 응력이 증가함에 따라 파단수명은 감소하는 것을 알 수 있고, 특히 700℃의 고온에서는 비교적 낮은 응력하에서 크리프 거동이 더욱 크게 나타나고 있다. 이는 활성화 에너지로 인한 고온에서의 열거동이 커져, 확산이 활발해 지는데 기인하며, 온도가 크리프 특성에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 또한 각 온도에서 응력의 차이(20MPa)가 소폭임에도 불구하고 단시간에서 파단수명의 차이는 크게 나타나므로 장시간에서 그 차이가 클 것으로 예상된다.

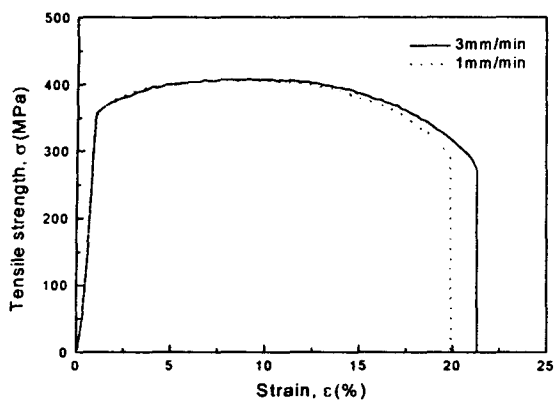


Fig. 2 Displacement dependency at 600°C

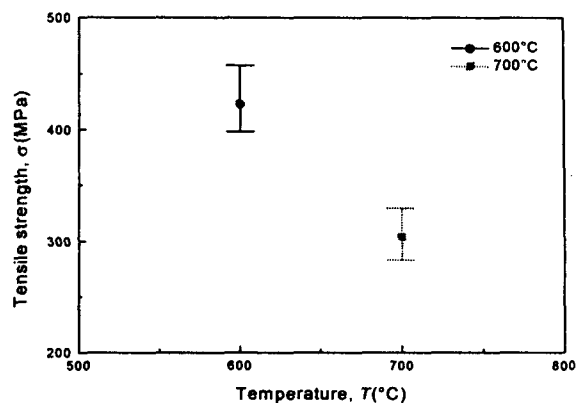


Fig. 5 Deviation in tensile strength versus temperatures

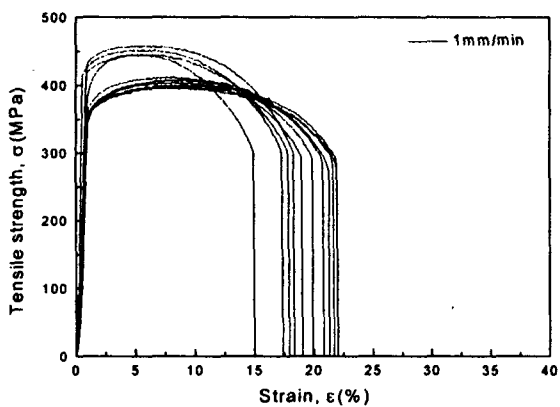
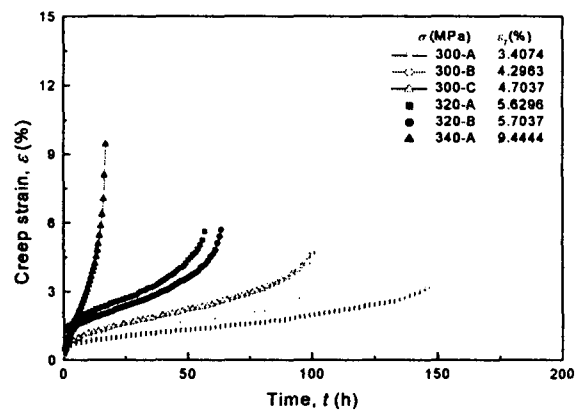


Fig. 3 Tensile behaviors at 600°C



(a) 600°C

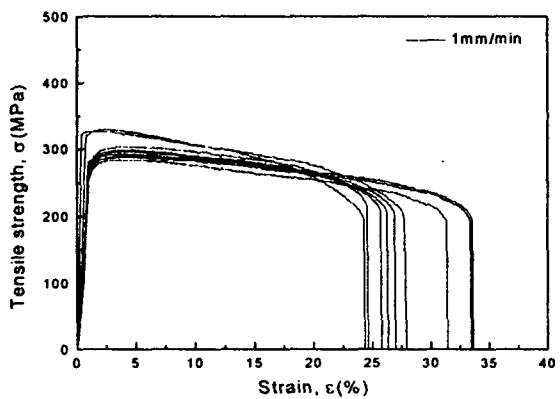
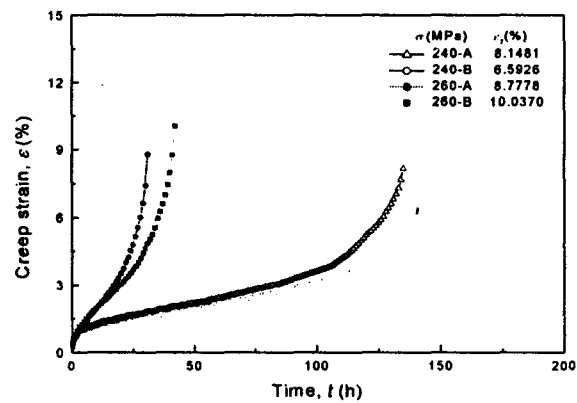
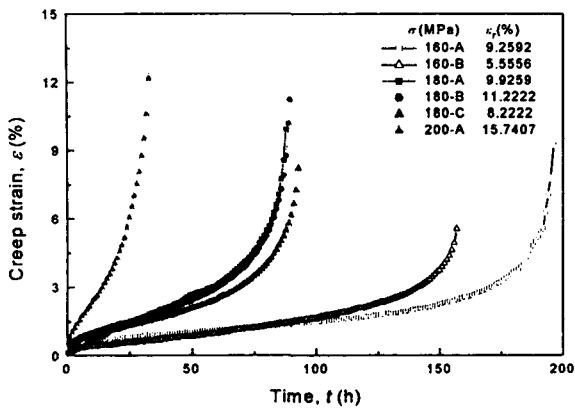


Fig. 4 Tensile behaviors at 700°C



(b) 650°C



(c) 700°C

Fig. 6 Creep curves for STS304 at 600°C, 650°C and 700°C

3.3 온도에 따른 크리프 응력과 크리프 속도와의 상관성

Fig. 7과 Fig. 8은 크리프 응력(σ , MPa)과 정상크리프 속도($\dot{\epsilon}$, %/h), 총 크리프 속도($\sigma - \dot{\epsilon}_T$, %/h)와의 상관관계를 나타낸다. 그래프에서 응력이 증가함에 따라 정상크리프 속도와 총 크리프 속도는 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 특히 700°C에서 기울기가 더욱 커짐을 알 수 있다. 여기서 상관관계식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 7에서 $\sigma - \dot{\epsilon}$ 관계식

$$600^\circ\text{C}; \log \sigma = 0.0437 \log \dot{\epsilon} + 2.557 \quad (1)$$

$$650^\circ\text{C}; \log \sigma = 0.0485 \log \dot{\epsilon} + 2.457 \quad (2)$$

$$700^\circ\text{C}; \log \sigma = 0.0861 \log \dot{\epsilon} + 2.368 \quad (3)$$

Fig. 8에서 $\sigma - \dot{\epsilon}_T$ 관계식

$$600^\circ\text{C}; \log \sigma = 0.0444 \log \dot{\epsilon}_T + 2.545 \quad (4)$$

$$650^\circ\text{C}; \log \sigma = 0.0495 \log \dot{\epsilon}_T + 2.444 \quad (5)$$

$$700^\circ\text{C}; \log \sigma = 0.0912 \log \dot{\epsilon}_T + 2.337 \quad (6)$$

각 온도에서 얻어진 $\sigma - \dot{\epsilon}$ 의 관계식은 다음과 같이 모델화 할 수 있다. 이는 Norton(Norton, 1910)에 의해 제안된 모델식과 잘 일치한다.

$$\dot{\epsilon} = m\sigma^n \quad (7)$$

여기서 m , n 은 온도에 의존하는 재료정수이다.

3.4 온도에 따른 크리프 응력과 파단시간과의 상관성

Fig. 9(a)는 600, 650, 700°C에서의 크리프 응력 σ (MPa)와 크리프 수명(파단시간) t_f (h)과의 상관성을 나타내는 실험결과로서, 크리프 설계 곡선(creep design curve)이다. 그림에서 크리프 수명은 응력이 증가할수록 감소하며, 온도가 상승할수록 그 감소율이 더욱 커짐을 알 수 있다.

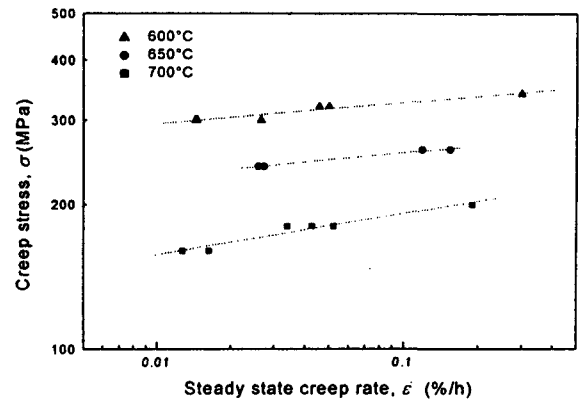


Fig. 7 Relationship between creep stress and steady state creep rate of STS304 at 600°C, 650°C and 700°C

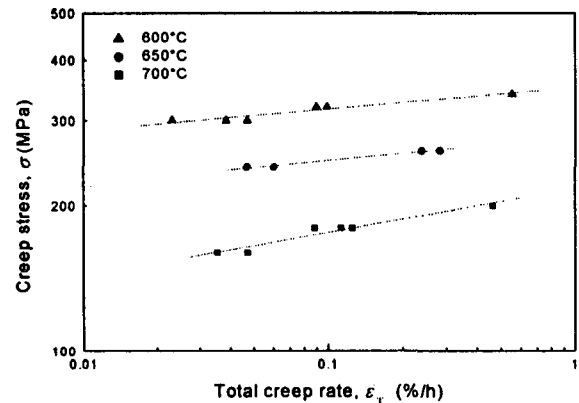


Fig. 8 Relationship between creep stress and steady state creep rate of STS304 at 600°C, 650°C and 700°C

Experimental data;

$$600^\circ\text{C}; \log \sigma = -0.0645 \log t_f + 2.614 \quad (8)$$

$$650^\circ\text{C}; \log \sigma = -0.0582 \log t_f + 2.505 \quad (9)$$

$$700^\circ\text{C}; \log \sigma = -0.1366 \log t_f + 2.517 \quad (10)$$

Extrapolation data;

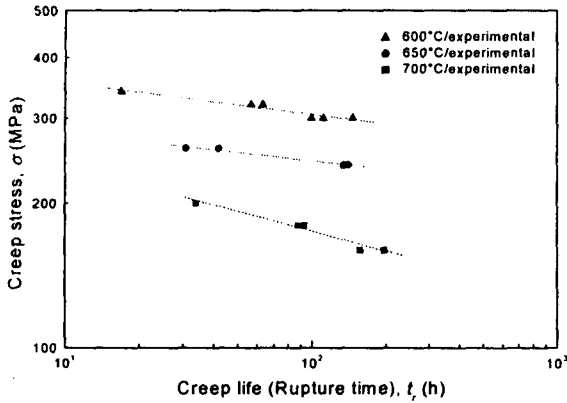
$$600^\circ\text{C}; \log \sigma = -0.0016(\log t_f)^2 - 0.0828 \log t_f + 2.649 \quad (11)$$

$$650^\circ\text{C}; \log \sigma = -0.0118(\log t_f)^2 - 0.0689 \log t_f + 2.556 \quad (12)$$

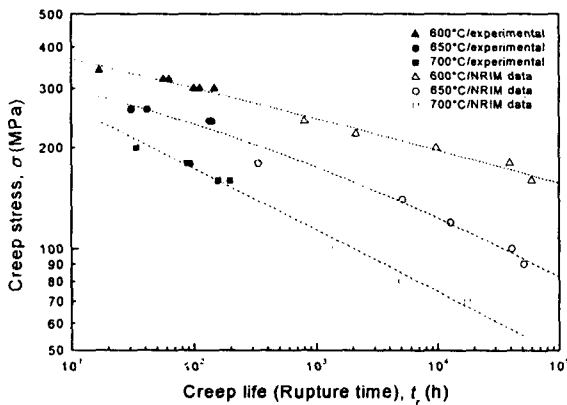
$$700^\circ\text{C}; \log \sigma = -0.0008(\log t_f)^2 - 0.1784 \log t_f + 2.599 \quad (13)$$

식(8)~(10)은 양대수 좌표평면에서 선형적으로 나타나며, 온도 600, 650, 700°C에서 응력이 결정되면 단시간 실험을 통하여 장시간의 크리프 수명을 예측할 수 있다. 따라서 Fig. 9(b)와 같이 NRIM의 데이터(NRIM, 1990)를 외삽하여 나타내었다. 그래프에서 고온일수록 장시간($10^3 \sim 10^5$ h)에서는 실제 수

병이 훨씬 단축되는 것을 알 수 있다. 그러므로 단시간 실험으로 신뢰성 있는 장시간 수명예측이 가능하리라고 판단된다.



(a) Experimental data



(b) NRIM data

Fig. 9 Relationship between creep stress and creep life of STS304 at 600°C, 650°C and 700°C

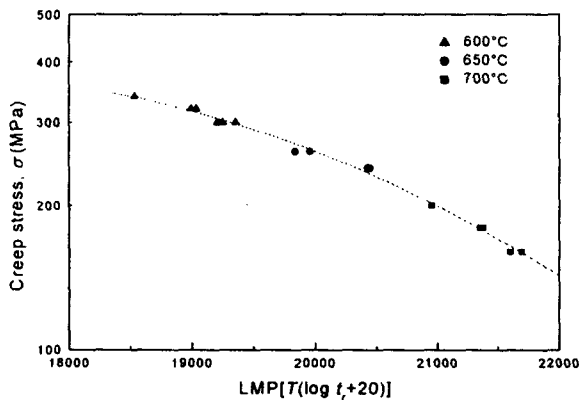


Fig. 10 Master creep curve of STS304 at 600°C, 650°C and 700°C

3.5 LMP법에 의한 크리프 수명예측

금속의 조직 변화는 일반적으로 높은 온도에서는 짧은 시간 내에서 발생한다. 실제 요구되는 온도보다 몇 백도 높은 온도에서의 응력-파단시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 LMP에 의해 다음과 같이 정의되어 있다(Larson and Miller, 1952).

$$LMP = T(\log tr + C) \quad (14)$$

식(14)에서 T는 절대온도 (K)이고, C는 20이며, 재료정수이다. 그러므로 LMP는 응력의 2차 함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$LMP = T(\log tr + 20) = K_1 \sigma^2 + K_2 \sigma + K_3 \quad (15)$$

여기서 K_1 , K_2 , K_3 은 재료상수이다. 그러므로 Fig. 10에서 K_1 , K_2 , K_3 의 값과 LMP식은 각각 다음과 같이 도출되었다.

$$K_1 = -0.00515, K_2 = -14.56, K_3 = 24126$$

$$T(\log tr + 20) = -0.00515 \sigma^2 - 14.56 \sigma + 24126 \quad (16)$$

4. 결 론

고온 크리프 특성치의 통계적 변동과 크리프 수명예측에 관한 연구의 일환으로서, STS304 스테인리스강의 고온 인장 시험에 대한 고온 크리프 특성치와 크리프 파단시간과 상관관계를 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고온 인장강도에는 변동이 있음을 알 수 있었다.
- (2) 크리프 수명은 응력과 온도가 상승 할수록 감소하며, 특히 700°C에서는 수명이 급격히 감소함을 알 수 있었다.
- (3) 정상 크리프 속도나 총 크리프 속도 등의 크리프 특성이 크리프 응력과 정량적 상관관계가 성립하며, 외삽에 의한 장시간 수명예측이 가능함을 알 수 있었다.
- (4) LMP에 의한 수명예측은 실험치와 비슷한 결과를 나타내었고, 그 수명예측식은 다음과 같이 도출되었다.

$$LMP = T(\log tr + 20) = K_1 \sigma^2 + K_2 \sigma + K_3$$

$$K_1 = -0.00515, K_2 = -14.56, K_3 = 24126$$

참 고 문 헌

- 김선진, 박명규, 권상우, 공유식(2004). "스테인리스강의 고온 기계적 성질에 대한 확률분포 특성," 한국해양공학회지, 제18권, 제2호, pp 64-69.
- 송정근(1998). "열교환기 부품용 Cr-Mo강의 고온 크리프 수명예측과 AE평가에 관한 연구," 부경대학교 대학원 공학석사 학위논문, pp 3~28.

- 정민화(1998). "발전소 고온배관재료의 크리프 수명예측과 AE평가에 관한 연구," 부경대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp 2~19.
- Larson, F. R and Miller, J.(1952). "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Transaction of the ASME, pp 765-775.
- Norton, F. H.(1910). "The Creep of Steel at High Temperatures", McGraw Hill, New York, pp 67.
- NRIM(1990). "NRIM Creep Data Sheet," National Research Institute for Metals Weibull, W. (1951). "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," Journal of applied mechanics, Vol 18, pp 293~297.
- S. K. Oh, Y. S. Kong and H. T. Yang(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.
- W. G. Kim, S. H. Kim and W. S. Ryu(2001). "Creep Characterization of Type 316LN and HT-9 Stainless Steels by the K-R Creep Damage Model," KSME Int. J., Vol 15, No 11, pp 1463-1471.
- Y. S. Kong, H. K. Yoon, S. K. Oh(2003). "Creep Life Prediction for Udimet720 Material Using the Initial Strain Method(ISM)," KSME Int. J., Vol 17, No 4, pp 469-476.