

## 스테인리스강의 고온 기계적 성질에 대한 확률분포 특성

김선진\* · 곽명규\*\* · 권상우\*\* · 공유식\*

\*부경대학교 기계공학부

\*\*부경대학교 대학원 기계공학과

## Probability Distribution Characteristics for Elevated Temperature Mechanical Properties of Stainless Steels

SEON-JIN KIM\*, MYUNG-KYU KWAK\*\*, SANG-WOO KWON\*\* AND YU-SIK KONG\*

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

\*\*Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Probability Distribution 확률분포, Tensile Strength 인장강도, Elongation 연신율, Acoustic Emission 음향방출, Normal Distribution 정규분포, Weibull Distribution 와이벨 분포, Scatter 변동

**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 are investigated. Tensile test is performed by constant crosshead speed controls with 1mm/min. The probability distribution function of measured mechanical properties seems to follow a 3-parameter Weibull, and shows a slight dependence on the temperature. When the temperature is raised, the shape parameter  $a$  is increased, but both the scale parameter  $\beta$  and location parameter  $\gamma$  are decreased.

### 1. 서 론

과학 기술의 현저한 발전과 더불어, 최근 각종 기계·구조물의 안전성이나 신뢰성의 확보에 관한 요구가 더욱 증가하고 있다. 또한 이들 기계·구조물의 사용 환경은 점점 가혹하게 되고 있다. 기계·구조물에 작용하는 외력이나 부재의 강도는 확정적으로 주어지는 경우는 극히 적으나, 확정적이지 아니라는 것은 확률적으로 변동한다고 하는 것과 정보가 부족하여 명확히 조건을 부여하는 것이 불가능한 경우가 있을 수 있다. 때로는 이들 모두가 공관여하기 때문이다. 따라서 이러한 기계·구조물의 안전 설계나 신뢰성 해석, 평가 등에 있어서는 외력과 부재의 강도 분포 특성을 정량적으로 명확히 하는 것이 중요하다(김선진, 1996).

인장 강도, 경도 등의 기계적 성질은 통상 수개 내지 수십개의 시험편 또는 수점의 측정치의 평균치가 사용되는 경우가 많다. 이것으로부터도 이해할 수 있듯이 이들은 확정치가 아니고, 변동(scatter)을 나타내는 하나의 확률적 량이다. 이 산포의 원인에는 시험조건의 부정확성(시험편, 시험기 등)이나 시험기술의 부족 등에 의한 것도 있지만, 다음과 같은 요인을 생각할 수 있다: (1) 재료의 화학 성분의 차이 (2) 열처리 조건의 불균일 (3) 시험편의 가공방법, 잔류응력 등의 변동 (4) 기계적

성질 고유의 산포. 실제로는 이들 요인이 중복하여 일어나기 때문에 변동은 복잡한 양상을 나타내고, 그 원인을 특징짓는 것은 반드시 용이하지는 않다(재료강도확률모델연구회, 1992). 그러나 기계적 성질의 정량적 분포 특성은, 기계나 구조물의 신뢰성 설계, 설계의 합리화 및 품질 관리의 기초 데이터로서 이용되고 있다.

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 내열 재료에 있어 무엇보다도 중요한 고온 강도, 특히 크리프 강도 특성에 관한 연구가 매우 중요하다. 이와 같은 고온 재료는 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).

고온 재료에 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 연신률, 전 크리프 속도 등)와의

제1저자 김선진 연락처: 부산광역시 남구 용당동 부경대학교  
051-620-1608 sjkim@pknu.ac.kr

정량적인 상관 관계를 규명하고 이를 정량화하여 파단 수명을 예측하는 크리프 수명 예측 평가에 관한 연구가 수행되고 있다(정민화, 1998). 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, void, 미스 균열 등의 손상에 의해 일어나며 실제 설비의 사용환경에 있어서의 손상은 재질, 온도, 압력, 그리고 시간에 의존하여 복합적으로 발생하게 되므로 이들의 데이터는 결정론적 방법이 아닌 확률적인 변동을 할 가능성이 매우 높고, 실제 크리프 강도 데이터에 대한 통계적 특성을 연구한 결과가 보고 되고 있으나 아직, 적은 실정이다. 재료 강도의 신뢰성 공학적 취급에는 풍부한 실험 데이터가 필요하지만, 크리프에 관한 통계적인 데이터나 해석이 부족한 것이 현실이다. 이러한 재료 강도 데이터만큼 간단히 얻을 수 없다는 시간적, 경제적 제약이 있기 때문이다.

본 연구는 고온 크리프 특성치의 통계적 변동과 크리프 수명 예측에 관한 연구의 일환으로서, 일차적으로 STS304 스테인리스강의 고온 인장 시험에 대한 인장강도, 연신율, 단면수축률 등의 기계적 성질의 확률분포 특성을 고찰하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 550°C 이상의 보일러 과열 기관, 재열기관, 증기관, 증기터빈의 케이싱, 벨브본체, 로터, 블레이드 등에 사용되는 18-8계 스테인리스강인 STS304이며 그 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 또한 고온 인장시험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타낸다. 시험편 평행부의 직경은 13mm의 환봉으로부터 6mm로 가공하였으며 표면부는 사포400번에서 1200번까지 연마한 후 다시 0.3에서 0.05 $\mu$ m의 산화분말을 사용하여 표면을 경면 연마하여 표면거칠기가 시험결과에 미치는 영향을 최소화 하도록 하였다.

### 2.2 실험장비 및 방법

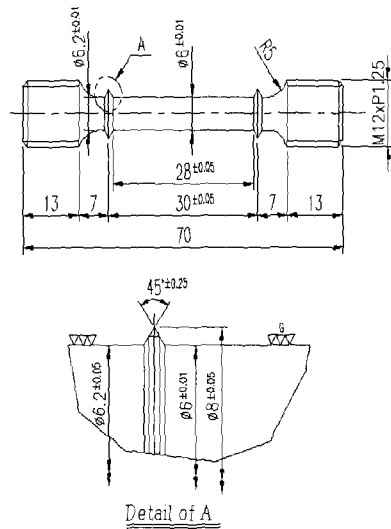
고온에서의 인장거동을 관찰하기 위한 시험 장비는 미국 SATEC사의 DLF-10-1029 시험기를 사용하였다. 온도측정은 열전대를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하상태에서 설정온도까지 8°C/min로 가열하였다. 그리고 부하전에 노의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정 온도에서 1시간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 실험 중 온도를 일정 온도에서  $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 이내로 유지하면서 1mm/min의 변위 속도를 통해 600 및 700°C에서 인장 시험을 수행하였다. 또한 고온 인장시험중 발생하는 연신은 표점거리 27mm되는 양단의 플랜지를 기준으로 하여 LVDT로 측정하여 시험기 자체에 연결되어 있는 레코더로 기록하였고, 실시간적으로 컴퓨터에 저장하여 고온 인장 변형거동을 평가하였다.

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

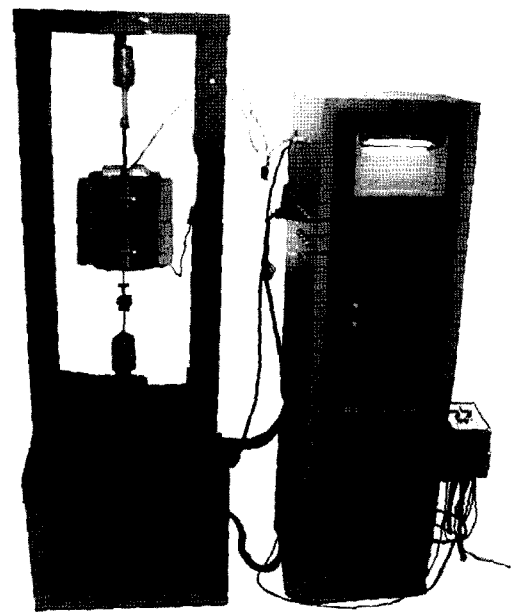
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
0.020	0.40	1.83	0.029	0.009	8.13	18.22	0.24	2.06	0.012

**Table 2** The mechanical properties

Tensile strength	Yield strength	Elongation(%)	Hardness(HB)
706 MPa	490 MPa	18.0	250



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



**Fig. 2** Elevated temperature tensile test system

시험편 가열을 위한 전기로는 개폐식을 사용하였으며 control console에 부착된 노의 온도를 제어하는 자동 온도 조절장치는 1200℃까지 전 범위의  $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 의 정확도를 가지며 노의 내부는  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ , 노 전체 3구간 top, middle, bottom zone의 온도 구배는  $2^\circ\text{C}$  정도이다.

STS304강이 주로 사용되는 사용환경을 고려하여 시험 온도의 결정을 600℃와 700℃로 하였다. 본 실험 시스템의 모습을 Fig. 2에 나타낸다.

### 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 결과의 예를 Fig. 3에 나타낸다. 이들의 결과를 보면 본 실험 조건의 경우 재료 거동에 변위 속도의 영향은 그리 크지 않음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 각 온도에서 1mm/min의 속도로 인장 시험을 수행하여 고찰하였다.

Fig. 4는 600℃에서 1mm/min의 변위 제어를 이용한 인장 시험을 수행한 결과를 보여준다. 또한 Fig. 5는 700℃에서 1mm/min의 변위 제어를 이용한 인장 시험 결과이다. 이들 그림에서 관찰해 보면, 동일 온도에서는 재료의 거동이 매우 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 온도에 따른 재료 거동에 차이가 있음을 보여주고, 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 물성치, 예를 들면 인장강도, 연신율 등에 변동(scatter)이 있다는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 고온 인장 성질의 평균, 표준편차 및 분산

600℃와 700℃에서 행한 실험 결과를 각각 Table 3 및 Table 4에 나타내었다. 그리고 NRIM(1990)에 의한 결과도 함께 표기하였다.

Table 3에서 알 수 있듯이 600℃의 경우 변동계수는 연신율의 경우가 0.038로 가장 크게 나타났고, 인장강도가 0.016으로 가장 낮았다. 반면에 NRIM의 결과에 의하면 변동계수는 단면수축율의 경우가 가장 크고, 연신율의 경우가 0.009로 가장 낮았다. 이는 열처리에 의한 재료의 차이로 사료된다. 700℃의 경우에 있어서는 본 시험재의 경우 단면수축율이 0.50으로 가장 크게 나타났고, 역시 인장강도가 0.017로 가장 낮게 나타났다. 700℃의 경우에 있어서는 본 시험재의 경우와 같이 NRIM의 결과도 단면수축율이 0.037로 가장 크고, 인장강도가 0.017로 가장 낮은 결과를 가져왔다. 본 시험재의 인장강도의 경우, 600℃나 700℃ 거의 유사한 변동계수 값을 나타내었고, 이는 NRIM의 결과와도 거의 동일함을 알 수 있다.

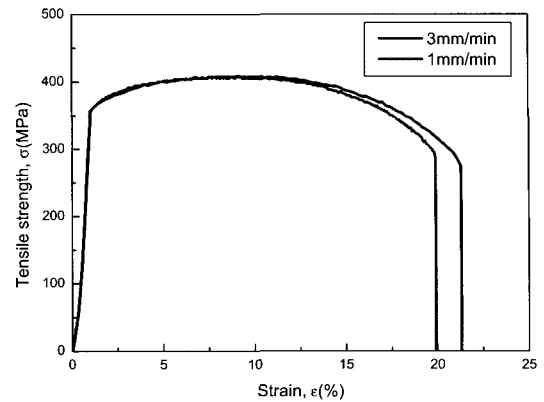


Fig. 3 Displacement dependency at 600℃

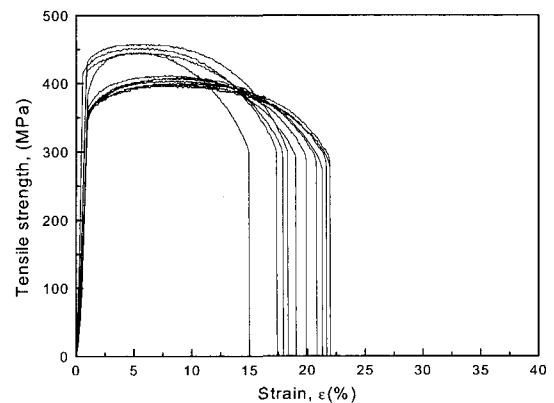


Fig. 4 Tensile behaviors at 600℃

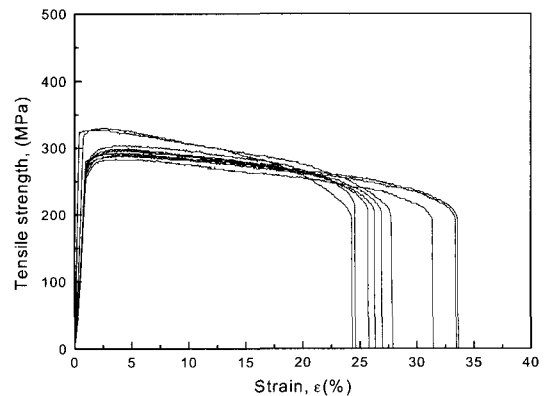


Fig. 5 Tensile behaviors at 700℃

**Table 3** Mean, Standard Deviation and Coefficient of Variance for 600°C (NRIIM Data) [COV=Std. Deviation/Mean]

600°C	Tensile strength(MPa)	Elongation(%)	Reduction of area(%)
Mean	422.57(385.47)	19.39(43.00)	40.18(71.78)
Std. Deviation	6.820(4.619)	0.746(0.408)	0.746(1.187)
COV	0.016(0.012)	0.038(0.009)	0.019(0.017)

**Table 4** Mean, Standard Deviation and Coefficient of Variance for 700°C (NRIIM Data) [COV=Std. Deviation/Mean]

700°C	Tensile strength(MPa)	Elongation(%)	Reduction of area(%)
Mean	303.62(265.64)	28.28(56.11)	32.66(68.44)
Std. Deviation	5.258(4.457)	1.084(1.925)	1.640(2.512)
COV	0.017(0.017)	0.038(0.034)	0.050(0.037)

3.3 고온 기계적 성질의 확률분포 특성

3.3.1 인장강도의 확률분포

Fig. 6은 600°C, 700°C에 대한 인장강도를 정규확률지에 나타낸 것이다. 그림중에 NRIIM의 데이터도 함께 나타내었다. 50%의 확률의 평균값을 보면 600, 700°C 모두 본 실험재료의 결과와 NRIIM의 결과치 보다 높게 나타났으며, 분포의 양상은 모두 비슷한 경향을 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 고온에서의 인장강도 데이터는 정규분포에 적합하다고 하기에는 무리가 있음을 보여준다고 할 수 있다.

각종 금속재료의 상온에 대한 인장강도, 연신율, 단면수축율 등의 분포특성에 대해서는 많은 실험결과가 축적되어 있고, 그 분포형으로는 정규분포, 대수정규분포 등으로 취급한 것이 많지만, 그 중에서도 Weibull 분포(Weibull, 1951)에 의한 취급이 정착되고 있다. 본 연구에서는 3-parameter Weibull 분포형을 최초로 해서 본 재료에 대한 고온 인장 성질의 특성을 정량적으로 해석하려고 한다.

3-parameter Weibull 분포의 확률분포함수 및 밀도함수는 다음과식으로 주어진다.

$$F_z(z) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{z-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right] \quad (1)$$

$$f_z(z) = \frac{\alpha}{\beta-\gamma} \left(\frac{z-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{z-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right] \quad (2)$$

여기서, α는 형상모수(shape parameter), β는 척도모수(scale parameter), γ는 위치모수(location parameter)이다.

Fig. 7는 STS304 강에 대한 600, 700°C에 대한 인장강도 분포를 Weibull확률지에 나타낸 것이다. 누적확률은 평균순위

(mean rank)법으로 구하였다. 본 그림에 나타난 실험 결과의 온도에 대하여 직접탐색법으로 추정된 인장강도 분포의 모수 추정치를 Table 5에 나타내었다.

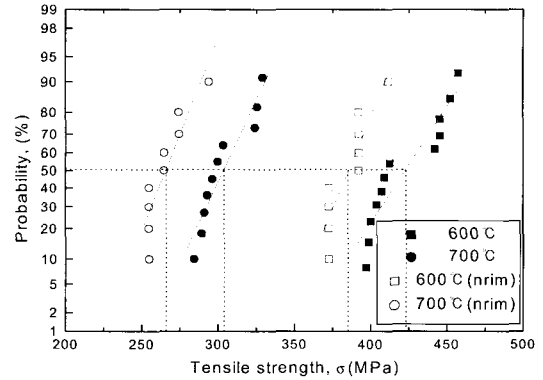


Fig. 6 Normal distribution of tensile strength

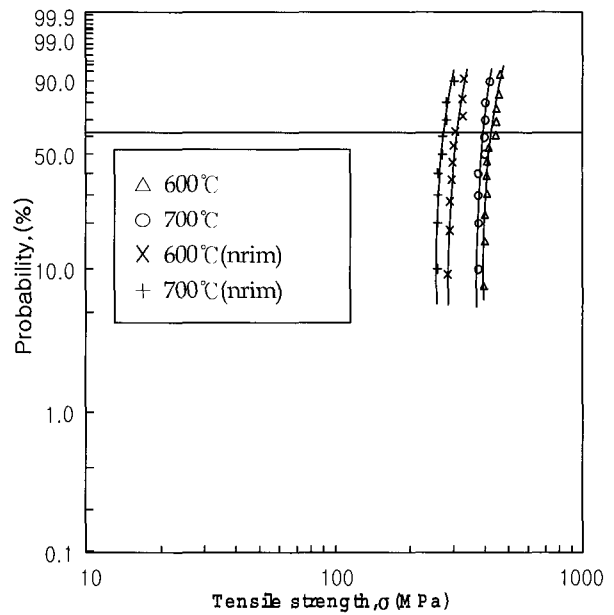


Fig. 7 Weibull plots of tensile strength

**Table 5** Weibull parameters of tensile strength (NRIIM Data)

Parameter	600°C	700°C
shape	0.8 (2.68)	1.16 (1.28)
scale	423 (392)	309 (267)
location	396 (343)	280 (247)

이들의 모수 추정치에 의해 식(1)에 의해 결정된 분포함수를 그림에 실선으로 나타내었다. 이들의 실선은 온도에 관계없이 실험결과와 경향과 잘 일치하고 있으며, Weibull분포의 적합성

과 함께 파라미터의 추정 결과의 타당성이 있다고 판단된다. 여기서 실험결과에 대한 각 파라미터의 온도의존성을 나타낸 것이 Fig. 8과 Fig. 9이다.

Fig. 8은 형상모수  $\alpha$ 와 온도의존성의 관계를 나타낸 것으로, 온도가 증가하면 형상모수는 다소 증가하는 경향이였다. Fig. 9는 척도모수  $\beta$ , 위치모수  $\gamma$ 의 온도의존성을 나타낸 것으로 이들 파라미터에 대해서는 모두 온도의 증가와 더불어 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 많은 재료의 상온에 대한 결과와도 일치하고 있다. 본 실험에 대한 고온 인장강도의 척도모수  $\beta$ 와 위치모수  $\gamma$ 의 온도의존성은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

그러나, 정확한 온도의존성에 대한 고찰은 더 많은 온도범위에 대하여 더 많은 시험편을 가지고 고찰할 필요가 있다. 예로 Mischke(1989)의 문헌에 의하면 Type 304 스테인리스강의 상온 인장강도의 3-parameter Weibull 분포의 형상모수는 2~5정도의 값을 나타내고 있다.

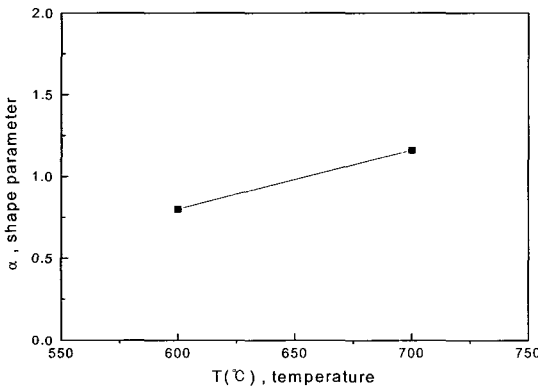


Fig. 8 Effect of the shape parameter on temperature

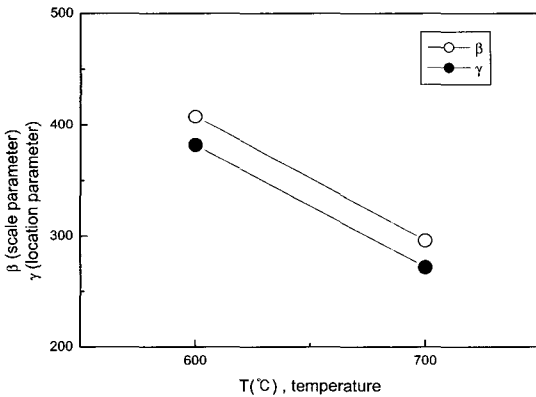


Fig. 9 Effect of the scale parameter and location parameter on temperature

3.3.2 연신율의 확률분포

Fig. 10은 STS304 강에 대한 600, 700°C에 대한 연신율 분포를 Weibull확률지에 나타낸 것이다. 누적확률은 평균순위(mean rank)법으로 구하였다. 본 그림에 나타낸 실험 결과의 온도에 대하여 직접탐색법으로 추정한 연신율 분포의 추정치를 Table 6에 나타낸다.

고온에 대한 연신율의 분포적합형에 대한 데이터는 거의 없는 실정이다. 상온에 대한 연신율의 데이터가 S45C강에 대하여 열처리 방법에 대한 결과가 있지만 산포(scatter)가 크므로 분포의 적합형은 얻지 못하였다. 참고로 이에 대한 변동계수는 열처리 종류에 따라서 0.019, 0.031, 0.053으로 큰 차이를 보였다(재료강도확률모델연구회, 1992). 본 실험에 의한 STS304강의 600°C와 700°C의 변동계수는 각각 0.038와 0.038을 얻었고, NRIIM 데이터에서는 0.009, 0.034였다. 본 실험결과에 의하면 온도에 의한 연신율의 산포는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

Table 6에서 알 수 있듯이 3-parameter Weibull분포에 미치는 모수의 영향은 온도가 증가할수록 형상모수는 감소하였고, 위치모수와 특성치인 척도모수는 증가하는 경향을 보였다. 고온 인장강도와 비교하면 인장강도의 특성치(척도모수)는 온도가 증가함에 감소하였으나, 연신율의 경우는 증가하는 경향으로 온도의존성이 인장 성질에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

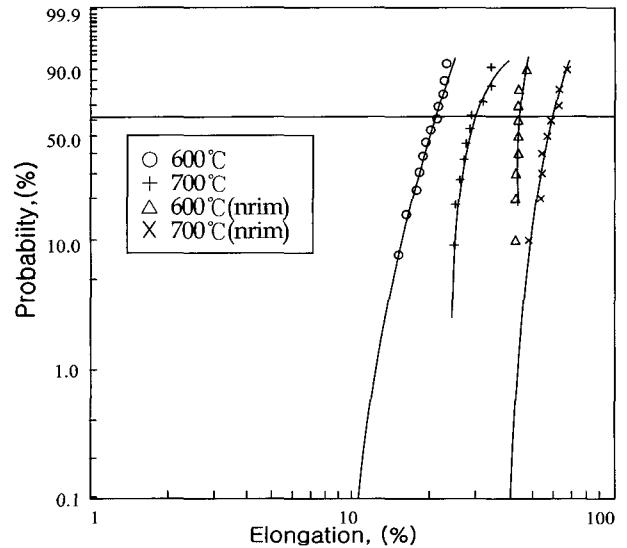


Fig. 10 Weibull plots of elongation

Table 6 Weibull parameters of elongation (NRIIM Data)

Parameter	600°C	700°C
shape	4.52 (0.98)	1.15 (2.82)
scale	20.52 (43.12)	29.12 (58.24)
location	7.41 (41.71)	23.50 (38.36)

3.3.3 단면수축률의 확률분포

Fig. 11은 STS304 강에 대한 600, 700°C에 대한 단면수축률 분포를 Weibull확률지에 나타낸 것이다. 이 경우도 누적확률은 평균순위(mean rank)법으로 구하였다. 본 그림에 나타낸 실험 결과의 온도에 대하여 직접탐색법으로 추정한 단면수축률 분포의 추정치를 Table 7에 나타낸다.

고온에 대한 단면수축률의 분포도 인장강도, 연신율 등과 마찬가지로 Weibull분포로 적합하는 것이 타당하다고 사료된다. 예를 들어, 상온에 대한 단면수축률의 데이터가 S45C강에 대하여 열처리 방법에 대한 결과가 있지만 앞 절의 연신율과 마찬가지로 이 또한 분포의 적합형은 알지 못하였다. 참고로 이에 대한 변동계수는 열처리 종류에 따라서 0.015, 0.011, 0.099로 큰 차이를 보였다. 본 실험에 의한 STS304강의 600°C와 700°C의 단면수축률의 변동계수는 각각 0.019와 0.050을 얻었고, NRIM 데이터에서는 0.017, 0.037를 얻었다. 본 실험결과 의 경우 온도에 의한 연신율의 변동은 700°C에서 더 크다는 것을 알 수 있다. 한편, 이들의 기계적 성질의 변동을 비교해 보면, 연신율, 단면수축률이 인장강도보다도 큰 변동(scatter)을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 연신율이나 단면수축률이 일반적으로 다른 기계적 성질의 측정보다 큰 측정오차를 포함한다는 것과 재료의 국부적인 변형특성 등의 영향에 기인하는 것이라 생각된다.

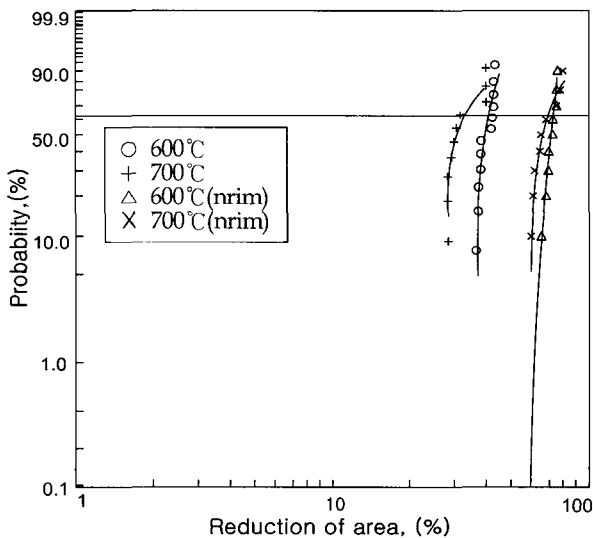


Fig. 11 Weibull plots of area reduction at 600°C and 700°C

Table 7 Weibull parameters of reduction of area (NRIM data)

Parameter	600°C	700°C
shape	1.17 (4.7)	0.63 (0.98)
scale	40.8 (73.13)	32.64 (70.0)
location	36.14 (55.04)	27.97 (58.54)

4. 결 론

고온 크리프 특성치의 통계적 변동과 크리프 수명 예측에 관한 연구의 일환으로서, STS304 스테인리스강의 고온 인장 시험에 대한 인장강도 등의 확률분포 특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고온 인장 기계적성질의 통계적 특성에서 인장강도의 확률분포는 3-parameter Weibull 분포에 잘 따르며, 형상 파라미터는 온도의 증가와 더불어 증가하는 경향이었으며, 척도 및 위치 파라미터는 온도의 증가와 더불어 감소하는 온도 의존성이 확인되었다.

(2) 연신율, 단면수축률은 인장강도보다는 큰 변동을 나타내었으며, 이들 분포도 3-parameter Weibull분포에 따름을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002학년도 부경대 기성회 학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

김선진 (1996). "기계·구조물의 안전성 및 신뢰성", 한국해양 공학회지, 제10권, 제2호, pp 1-11.

정민화 (1998). 발전소 고온배관재료의 크리프 수명예측과 AE 평가에 관한 연구, 부경대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp 2-19.

송정근 (1998). 열교환기 부품용 Cr-Mo강의 고온 크리프 수명 예측과 AE평가에 관한 연구, 부경대학교 대학원 공학석사 학위논문, pp 3-28.

재료강도확률모델연구회편 (1992). 재료강도의 통계적 성질, 양현당(일서).

Mischke, C. R. (1989). "Stochastic Methods in Mechanical Design: Part 1: Property Data and Weibull Parameters", Failure Prevention and Reliability, DE-Vol 16, pp 1-10.

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.

2003년 9월 17일 원고 접수

2004년 3월 22일 최종 수정본 채택