

# STS304 스테인리스강의 고온 인장거동의 통계적 특성과 음향방출

곽명규\* · 김선진\*\*

\*부경대학교 대학원

\*\*부경대학교 기계공학부

## A Statistical Properties of Tensile Behaviors of STS304 Stainless Steel at Elevated Temperature and the Acoustic Emission

MYUNG-KYU KWAK\* AND SEON-JIN KIM\*\*

\*Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**KEY WORDS:** Statistical Properties 통계적 성질, Tensile Strength 인장강도, Acoustic Emission 음향방출, Elevated Temperature 고온, STS304 Stainless Steel STS304 스테인리스 강, Weibull Distribution 와이불 분포, Scatter 변동

**ABSTRACT:** The tensile tests to identify the statistical tensile properties and the acoustic emission characteristics were conducted for STS304 stainless steel at 600°C, 700°C. From tensile tests performed by constant cross head speed controls with 1mm/min. rates at each elevated temperature, the scatters were observed in tensile strength, reduction of area, elongation and the acoustic emission parameters. The effect of temperature on the scatter of tensile behavior was larger at 700°C. The distributions of tensile properties was well followed in 3-parameter Weibull. The AE counts and energy of the 700°C specimens were smaller than the 600°C.

### 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 기본적으로 중요하다.

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, 산포(scatter)를 나타내는 하나의 확률적 량이다. 이 산포의 원인에는 시험조건의 부정확성(시험편, 시험기)나 시험기술의 부족 등에 의한 것도 있지만, 다음과 같은 요인을 생각할 수 있다. (1) 재료의 화학 성분의 차이 (2) 열처리 조건의 불 균일 (3) 시험편의 가공방법, 잔류 응

력 등의 scatter (4) 기계적 성질 고유의 산포 실제로는 이들 요인이 중복하여 일어나기 때문에 scatter는 복잡한 양상을 나타내고, 그 원인을 특징짓는 것은 반드시 용이하지 않은 않다. 그러나 기계적 성질의 정량적 분포 특성은, 기계나 구조물의 신뢰성 설계, 설계의 합리화 및 품질 관리의 기초 데이터로서 이용되고 있다.

현재 자동차나 항공기 엔진, 발전소 보일러, 터빈, 원자로 부품 등의 여러 가지 고온 재료의 고온 분위기에서의 사용 기회가 증가하고 있으며, 효율 면에서도 이들의 사용 온도가 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.

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 정량적인 상관 관계를 규명하고 이를 정

제1저자 곽명규 연락처 : 부산광역시 남구 용당동 부경대학교

051-620-1608 sjkim@pknu.ac.kr

상화하여 파단 수명을 도출하는 크리프 수명 예측 평가에 관한 연구가 수행되고 있다. 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, 미소 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 가능성 매우 높고, 실제 크리프 강도 데이터에 대한 통계적 특성을 연구한 결과도 보고되고 있지만, 적은 실정이다. 재료 강도의 신뢰성 공학적 취급에는 풍부한 실험 데이터가 필요하지만, 크리프에 관한 통계적인 데이터나 해석이 부족한 것이 현실이다. 이는 타의 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, STS304 스테인리스강의 고온 인장 시험에 대한 인장강도 등의 분포 특성과 음향방출 해석에 의한 고온 인장거동을 고찰하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 550℃이상의 보일러 과열기관, 재열기관, 증기관, 증기터빈의 케이싱, 벨브본체, 로터, 브레이크 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

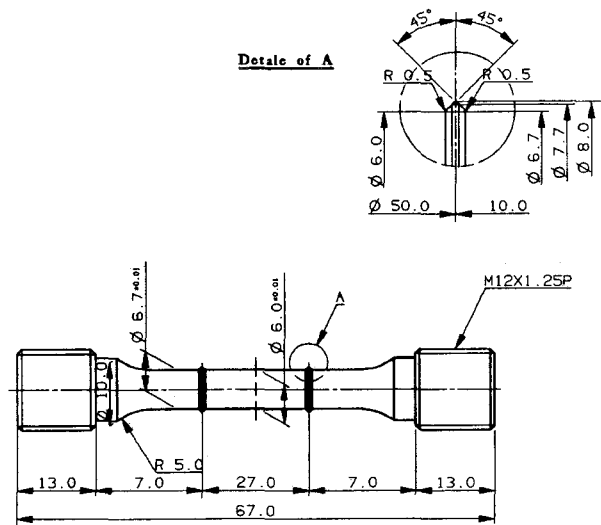
고온에서의 인장거동을 관찰하기 위한 시험 장비는 미국 SATEC사의 DLF-10-1029 시험기를 사용하였다. 온도측정은 thermocouple를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하상태에서 설정온도까지 8℃/min로 가열하였다. 그리고 부하전에 노의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 1시간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 실험 중 온도를 일정 온도에서  $\pm 1$ ℃범위 이내로 유지하면서 1mm/min의 변위 제어를 통해 600 및 700℃에서 인장 시험을 수행하였다. 또한 고온 인장시험중 발생하는 연신은 표점거리 27mm되는 양단의 플랜지를 기준으로 하여 LVDT(liner variable displacement transformer)로 측정하여 시험기 자체에 연결되어 있는 레코더로 기록하였고, 실시간적으로 컴퓨터에 저장하여 고

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

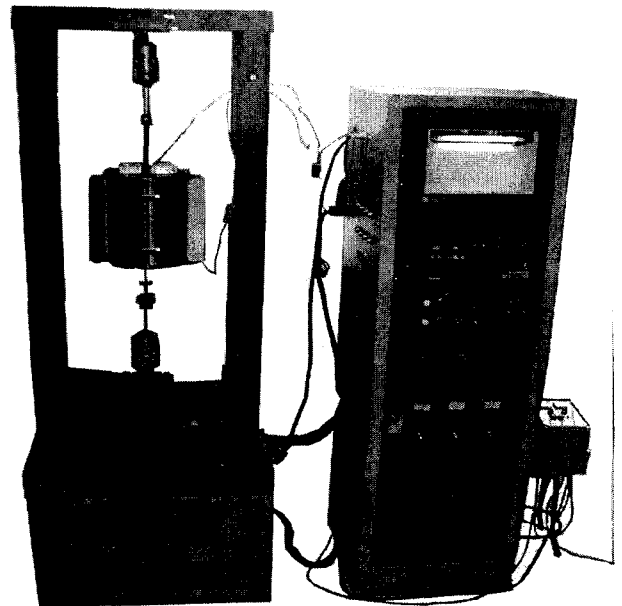
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
0.020	0.40	1.83	0.029	0.009	8.13	18.22	0.24	2.06	0.012

**Table 2** The mechanical properties

Tensile strength	Yield strength	Elongation(%)	Hardness(HB)
706 MPa	490 MPa	33.0	250



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



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

은 인장 변형거동을 평가하였다.

시험편 가열을 위한 전기로는 개폐식을 사용하였으며 control console에 부착된 노의 온도를 제어하는 자동 온도 조절장치는 1200°C까지 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°C정도이다.

STS 304강이 주로 사용되는 사용환경을 고려하여 시험 온도의 결정을 600°C와 700°C로 하였다. 본 실험 시스템의 모습을 Fig. 2에 나타내었다.

AE counts 및 sample data의 획득에는 미국 PAC사의 Model LOCAN 320(4 channel)으로서 14채널까지 확장이 가능한 음향방출(AE) 시스템을 사용하였다. 실험시 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 센서를 사용하였고, 노내부는 고온이므로 센서를 시험편에 직접 부착할 수 없으므로 노 밖에 Dow Corning사의 고진공 그리스를 접촉매질로 사용하여 부착하였다.

### 3. 시험 결과 및 분석

#### 3.1 고온 인장 거동

고온 인장 거동에 미치는 변위 속도의 영향을 알아보기 위하여, 600°C에서 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°C에서 1mm/min의 변위 제어를 이용한 인장 시험을 수행한 결과를 보여준다. 또한 Fig. 5는 700°C에서 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 온도가 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.

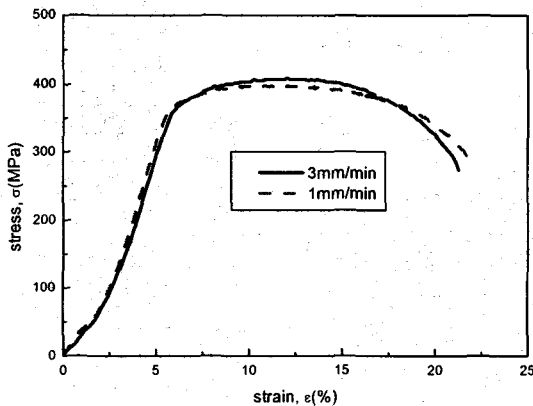


Fig. 3 Displacement dependency at 600°C

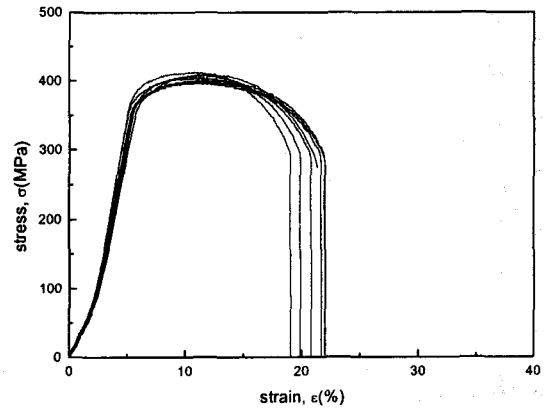


Fig. 4 Tensile behaviors at 600°C

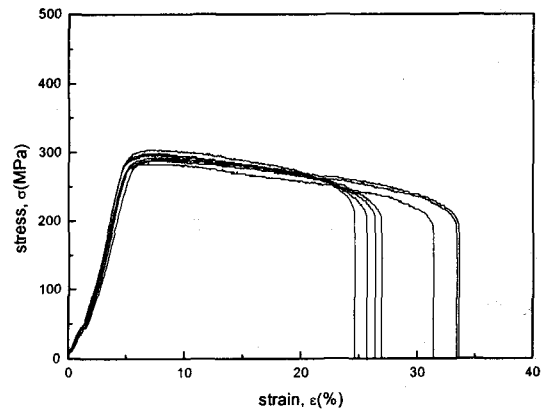


Fig. 5 Tensile behaviors at 700°C

#### 3.2 고온 인장 성질의 통계적 특성

##### 3.2.1 인장강도의 분포

각종 금속재료의 상온에 대한 인장강도, 연신율, 단면수축율 등의 분포특성에 대해서는 많은 실험결과가 축적되어 있고, 그 분포형으로는 정규분포, 대수정규분포, Weibull 분포 등으로 취급된 것이 많지만, 그 중에서도 3-parameter Weibull 분포에 의한 취급이 정착되고 있다. 본 연구에서도 3-parameter Weibull 분포형을 기초로해서 본 재료에 대한 고온 인장 성질의 특성을 정량적으로 해석하려고 한다.

3-parameter Weibull 분포의 분포함수 및 밀도함수는 다음식으로 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,  $\alpha$ 는 형상모수(shape parameter),  $\beta$ 는 척도모수(scale parameter),  $\gamma$ 는 위치모수(location parameter)이다.

Fig. 6는 SUS304 강에 대한 600, 700°C에 대한 인장강도 분포를 Weibull확률지에 나타낸 것이다. 누적확률은 평균 순위(mean rank)법으로 구하였다. 본 그림에 나타낸 실험 결과의 온도에 대하여 직접탐색법으로 추정된 인장강도 분포의 모수 추정치를 Table 3에 나타내었다.

이들의 모수 추정치에 의해 식(1)에 의해 결정된 분포함수를 그림에 실선으로 나타내었다. 이들의 실선은 온도에 관계없이 실험결과의 경향과 잘 일치하고 있으며, Weibull 분포의 적합성과 함께 파라미터의 추정 결과의 타당성이 있다고 판단된다. 여기서 실험결과에 대한 각 파라미터의 온도의존성을 나타낸 것이 Fig. 7과 Fig. 8이다.

Fig. 7은 형상모수  $\alpha$ 와 온도의존성의 관계를 나타낸 것으로, 600, 700°C의 경우 거의 비슷한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 본 실험의 온도와 시험편 수에 있어서 형상계수의 온도의존성은 확인되지 않았다. Fig. 8는 척도계수  $\beta$ , 위치계수  $\gamma$ 의 온도의존성을 나타낸 것으로 이들 파라미터에 대해서는 모두 온도의 증가와 더불어 감소하는 경

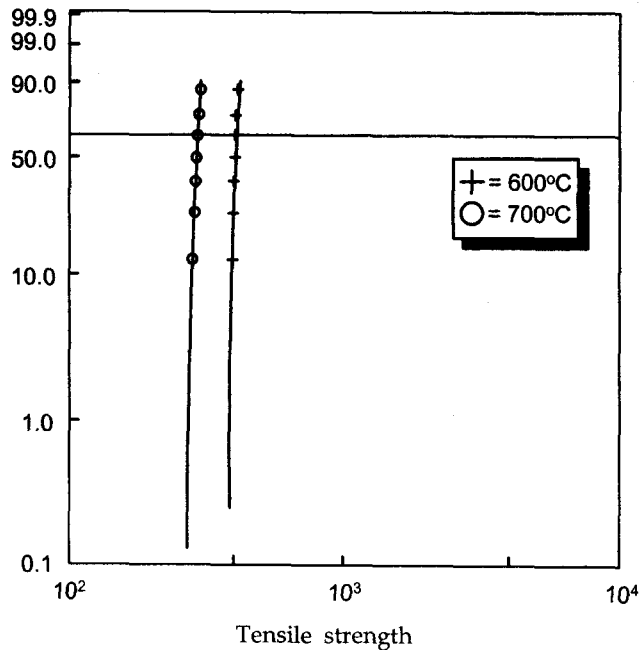


Fig. 6 Weibull plots of tensile strength for 600 & 700°C

Table 3 Parameters of tensile strength distribution

	600°C	700°C
$\alpha$	3.11	3.07
$\beta$	408	296
$\gamma$	382	272

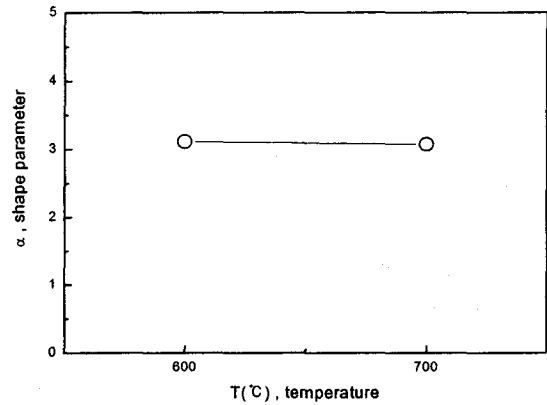


Fig. 7 Effect of the shape parameter on temperature

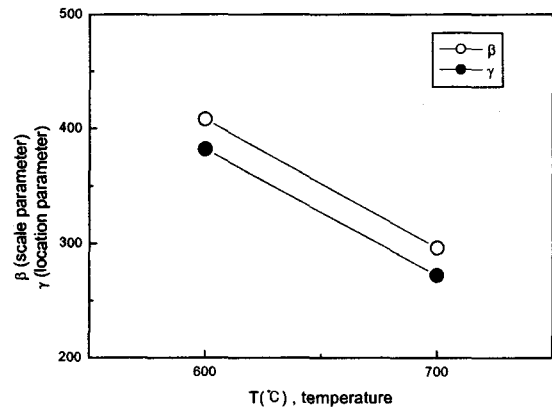


Fig. 8 Effect of the scale parameter and location parameter on temperature

향을 보이고 있다. 이는 많은 재료의 상온에 대한 결과와도 일치하고 있다. 본 실험에 대한 고온 인장강도의 척도모수  $\beta$ 와 위치모수  $\gamma$ 의 온도의존성은 다음과 같은 실험식의 관계가 성립하였다.

$$\beta = 1080 - 1.12T \quad (3)$$

$$\gamma = 1042 - 1.1T \quad (4)$$

그러나, 정확한 온도의존성에 대한 고찰은 더 많은 온도범위에 대하여 더 많은 시험편 수를 가지고 고찰할 필요가 있다. 예로 Mischke의 문헌에 의하면 Type 304 스테인리스강의 상온 인장강도의 3-parameter Weibull 분포의 형상모수는 2~5정도의 값을 나타내고 있다.

### 3.2.2 연신율의 분포

Fig. 9는 STS304 강에 대한 600, 700°C에 대한 연신율 분포를 Weibull확률지에 나타낸 것이다. 누적확률은 평균 순위(mean rank)법으로 구하였다. 본 그림에 나타낸 실험 결과의 온도에 대하여 직접탐색법으로 추정한 연신율 분포의 추정치를 Table 4에 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 1.9%, 3.1%, 15.3%로 큰 차이를 보였다. 본 실험에 의한 STS304강의 600°C와 700°C의 변동계수는 각각 4.6%와 13.3%을 얻었다. 본 실험결과에 의하면 온도에 의한 연신율의 산포는 700°C에서 더 크다는 것을 알 수 있었다.

Table 4에서 알 수 있듯이 3-parameter Weibull분포에 미치는 모수의 영향은 온도가 증가할수록 형상모수와 위치모수는 감소하였고, 특성치인 척도모수는 증가하는 경향을 보였다. 고온 인장강도와 비교하면 인장강도의 특성치(척도모수)는 온도가 증가함에 감소하였으나, 연신율의 경우는 증가하는 경향으로 온도의존성이 인장성질에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

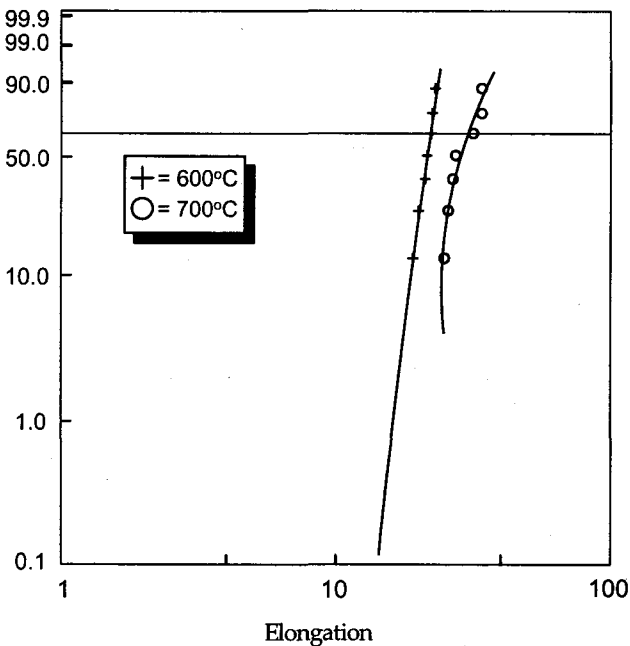


Fig. 9 Weibull plots of elongation at 600°C and 700°C

Table 4 Parameters of elongation distribution

	600°C	700°C
$\alpha$	12.13	0.99
$\beta$	21.8	29.9
$\gamma$	36.3	23.8

### 3.2.3 단면수축률의 분포

Fig. 10은 SUS304 강에 대한 600, 700°C에 대한 단면 수축률 분포를 Weibull확률지에 나타낸 것이다. 이 경우도 누적확률은 평균 순위(mean rank)법으로 구하였다. 본 그림에 나타낸 실험 결과의 온도에 대하여 직접탐색법으로 추정한 단면수축률 분포의 추정치를 Table 5에 나타낸다.

고온에 대한 단면수축률의 분포도 인장강도, 연신율 등과 마찬가지로 Weibull분포로 적합하는 것이 가능하다고 사료된다. 예를 들어, 상온에 대한 단면수축률의 데이터가 S45C강에 대하여 열처리 방법에 대한 결과가 있지만 앞 절의 연신율과 마찬가지로 이 또한 분포의 적합형은 얻지 못하였다. 참고로 이에 대한 변동계수는 열처리 종류에 따라서 1.5%, 1.1%, 9.9%로 큰 차이를 보였다. 본 실험에 의한 STS304강의 600°C와 700°C의 단면수축률의 변동계수는 각각 2.0%와 5.0%을 얻었다. 본 실험결과에 의하면 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.

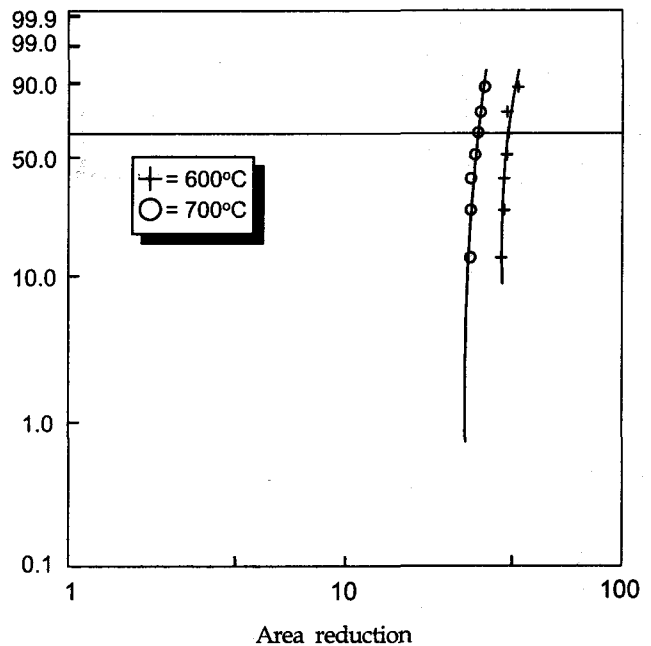


Fig. 10 Weibull plots of area reduction at 600°C and 700°C

Table 5 Parameters of area reduction distribution

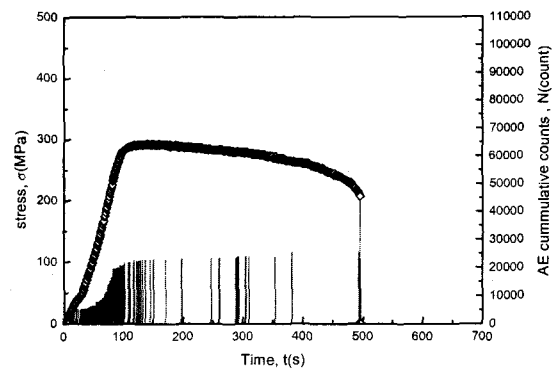
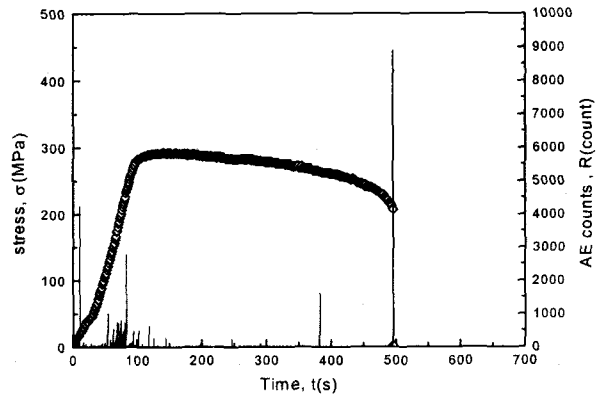
	600°C	700°C
$\alpha$	1.17	1.93
$\beta$	38.6	30.0
$\gamma$	36.3	26.5

### 3.3 고온 인장 거동과 AE특성

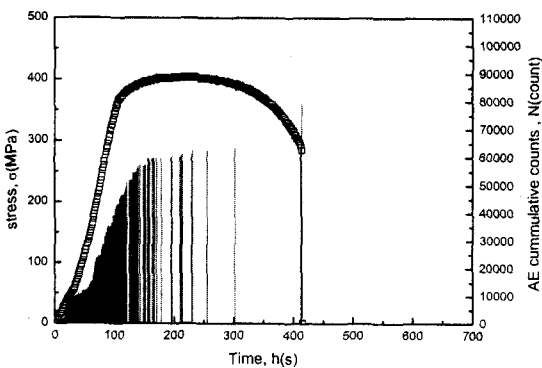
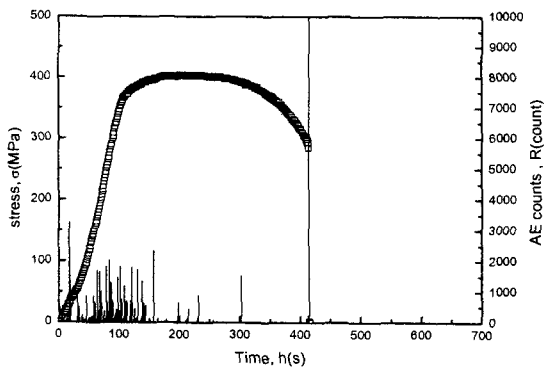
AE hit란 센서에 도달된 신호의 시작점과 끝점이 기준치를 넘는 범위에서 1개의 AE 신호로서 간주하는 것이고 count는 기준치를 넘는 모든 진폭에 대해서 그 횟수를 세는 것을 말한다. 이들 파라미터는 재료내부에서 일어나는 현상의 발생빈도를 직접적으로 대변하는 것으로 알려져 있으며, 금속재료의 소성변형 거동의 연구에 적합한 파라미터이다. 일반적으로 다공성 재료는 초기 초기응력 상태에서는 수많은 미시균열이 생성되며, 응력이 증가하여 감에 따라 소수의 거시적 균열로 발전해 가는 파괴기구를 갖고 있다. 이와 마찬가지로 AE신호의 발생빈도도 초기에는 높으나 어느 응력을 기점으로 저하하는 현상을 나타낸다. 이때의 신호를 AE hit 나 count로 정리했을 때 나타나는 변곡점은 거시적 균열의 시작을 대변하게 된다.

Fig. 11은 600°C, 700°C에 대한 STS304 스테인리스강의 AE 카운트 수를 응력-변형을 선도와 함께 나타낸 일례이다.

그림에서 나타나는 AE 신호는 조직내의 변화가 발생하여 미시균열의 진전으로 미세한 탄성파를 발생함으로써 신호가 전달되었기 때문인 것으로 생각된다. 각 온도에서의 그림중 위의 그림은 AE count 수를, 아래는 누적 총량을 나타낸 것으로 700°C 보다 600°C에서 많은 counts수를 나타내고 있고 600, 700°C 모두 초기에서  $\sigma_{max}$  까지 AE 신호가 대량 발생하고 파단시에 다시 대량 발생함을 관찰할 수 있었으며, 이는 나머지의 실험결과에서도 비슷한 경향을 얻을 수 있었다. 이처럼 고온 인장 시험에서 초기 변형,  $\sigma_{max}$ , 그리고 파단과 같은 여러 고온 인장



(b) 700°C



(a) 600°C

Fig. 11 Stress and AE count versus strain

거동에 따라 AE 신호가 나타나므로 실시간에 해석, 평가함으로써 재료의 고온 인장 거동을 이해하는데 도움을 주리라 생각된다. 그러나 고온에 대한 인장성질의 변동 등에 대한 AE의 영향 등은 추후 검토가 필요하다.

## 4. 결 론

고온 크리프 특성치의 통계적 변동과 크리프 수명 예측에 관한 연구의 일환으로서, STS304 스테인리스강의 고온 인장 시험에 대한 인장강도 등의 분포 특성과 음향방출에 의한 고온 인장거동을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고온 인장 거동에 미치는 변위 속도의 영향을 알아보기 위하여, 600°C에서 1mm/min, 3mm/min의 크로스 헤드 속도로 인장 시험을 수행한 결과 변위 속도의 영향은 그리 크지 않음을 알 수 있었다.

(2) 고온 인장 성질의 통계적 특성에서 인장강도의 분포는 Weibull 분포의 적합성과 함께 파라미터의 추정 결과의 타당성이 있다고 판단되고 척도, 위치 계수의 온도 의존성이 확인

되었고 연신율, 단면수축률은 인장강도보다는 큰 산포를 나타내었으나 Weibull분포에 적합하는 것이 가능하다.

(3) 고온 인장 시험중 AE 거동을 조사한 결과 초기 변형,  $\sigma_{max}$ , 그리고 파단과 같은 여러 고온 인장 거동을 AE 신호로써 이해할 수 있었고 700℃보다 600℃에서 많은 신호가 관측되었다.

## 참 고 문 헌

- 김귀식, 박경석, 홍용의(1996). "플라즈마용사 세라믹코팅 피막 부식재의 음향방출 특성" 한국해양공학회지 제15권 제3호, pp 69~74.
- 김선진(1996). "기계·구조물의 안전성 및 신뢰성" 한국해양공학회지 제10권 제2호, pp 1~11.
- 정민화(1998). "발전소 고온배관재료의 크리프 수명예측과 AE평가에 관한 연구" 부경대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp 2~19.
- 송정근(1998). "열교환기 부품용 Cr-Mo강의 고온 크리프 수명예측과 AE평가에 관한 연구" 부경대학교 대학원 공학석사 학위논문, pp 3~28.
- Endo, T. and Masuyama, F. (1997). Material Japan, 36, pp. 225~231.
- 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.
- Weibull, W. (1951). "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", Journal of applied mechanics, Vol. 18, pp 293~297.
-