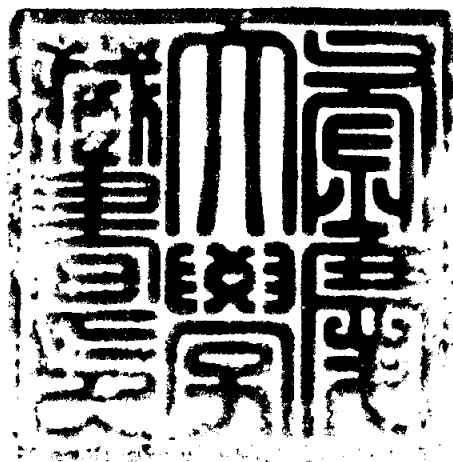


711  
8.14.05  
L2  
7.2

工學碩士學位論文

STS304 스테인리스강의 고온  
인장거동의 통계적 특성과  
음향방출에 관한 연구



2003年 2月

釜慶大學校 大學院

機械工學科

郭明圭

工學碩士學位論文

STS304 스테인리스강의 고온  
인장거동의 통계적 특성과  
음향방출에 관한 연구

指導教授 金 善 振

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함

2003 年 2 月


釜慶大學校 大學院


機械工學科


郭明圭

# 郭明圭의 工學碩士 學位論文을 認准함

2002年 12月 26日

主 審 : 工學博士 金 永 植 

委 員 : 工學博士 吳 明 錫 

委 員 : 工學博士 金 善 振 

# 目 次

Abstract .....	3
Nomenclature .....	4
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 확률 통계와 AE의 이론적 배경 .....	3
2.1 확률 및 통계 .....	3
2.1.1 정규분포 .....	3
2.1.2 지수분포 .....	4
2.1.3 와이블 분포 .....	6
2.2 음향방출법 .....	8
제 3 장 시험편 및 실험방법 .....	11
3.1 시험편 .....	11
3.2 실험장치 및 실험방법 .....	13
3.2.1 고온인장강도시험 .....	13
3.2.2 음향방출시험 .....	15
제 4 장 결과 및 고찰 .....	18
4.1 고온 인장 거동 .....	18
4.2 고온 인장 성질의 통계적 특성 .....	21
4.2.1 인장강도의 분포 .....	26
4.2.2 연신율의 분포 .....	31
4.2.3 단면 수축율의 분포 .....	35
4.3 고온 인장 거동과 AE특성 .....	40

제 5 장 결 론 .....45

참 고 문 헌 .....46

謝 辭

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

Myung-Kyu Kwak

*Department of Mechanical Engineering  
Graduate School  
Pukyong National University*

## ***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 specimens were concentrated on the plastic zone.*

## Nomenclature

- AE : Acoustic emission  
 $\varnothing$  : Diameter (mm)  
R : AE counts rate (count/sec)  
N : AE cumulative counts  
 $\alpha$  : Shape parameter of Weibull distribution  
 $\beta$  : Scale parameter of Weibull distribution  
 $\gamma$  : Location parameter of Weibull distribution  
R : Reduction of area (%)  
 $\varepsilon$  : Strain (%)  
 $\sigma$  : Tensile strength (TS) (MPa)

# 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, 확정적이 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 응력 등의 scatter (4) 기계적 성질 고유의 산포 실제로는 이들 요인이 중복하여 일어나기 때문에 scatter는 복잡한 양상을 나타내고, 그 원인을 특징짓는 것은 반드시 용이하지만은 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 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.

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 정량화하여 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. 이론적 배경

### 2.1 확률과 통계

#### 2.1.1 정규 분포

드 모아브르( A. de Moivre)는 1733년에 2항 분포의 근사로서, 그리고 라플라스(P. S. Laplace)는 1774년에 초기하 분포의 근사로서 각각 정규 분포를 도출했다. 가우스(C. F. Gauss)는 1816년에 상호간에 독립된 각종 요소가 추가된 결과로서 발생하는 오차의 분포가 정규 분포가 된다는 사실을 제시했다.

이는 정규 정규 분포의 통계 이론에 있어서 위치 설정을 나타내는 ‘중심 극한 정리’의 시초가 된 것이다. 중심 극한 정리란  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 를 상호간에 독립된 동일한(분포형은 어떤 것이든 좋다. 그리고 어떤 종류의 조건 아래서는 동일한 분포가 아니라도 된다.)에 따라 유한한 평균  $E(X)$ 와 분산  $Var(X)$ 를 지닌다면

$\sum_{i=1}^n X_i - nE(X) / \sqrt{nVar(X)}$ 는  $n$ 이 커짐에 따라 평균 0, 분산 1의 표준 정규 분포에 점차 근접한다는 것이다.

따라서 수많은 요소가 서로 겹쳐 하나의 결과가 발생하는 종류의 것, 예를 들어 품질 관리에서 공업 제품의 치수, 중량, 용량 등의 분포로서, 그리고 인간의 신장이나 체중 등의 분포도 정규 분포라고 생각할 수 있다.

정규 분포는 평균  $\mu$ 와 분산  $\sigma^2$ 에 의해 결정된다. 평균  $\mu$ 와 분산  $\sigma^2$ 의 정규 분포를  $N(\mu, \sigma^2)$ 의 기호로 나타낸다.

확률 밀도 함수

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad \{(-\infty, \infty), -\infty < \mu < \infty, \sigma > 0\} \quad (1)$$

로 주어진다.

## 2.1.2 지수 분포

지수 분포란 고장률이 일정한 분포로서 신뢰성 분야에서 기본적인 역할을 수행한다. 지수 분포는 고장률이 일정한 함수이므로 이를  $\lambda$ 로 두고 지수 분포의 신뢰도 함수

$$\begin{aligned} R(t) &= \exp\left(-\int_0^t \lambda dt\right) \\ &= \exp(-\lambda t) \end{aligned}$$

를 얻는다. 따라서

$$F(t) = 1 - R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda dt\right)$$

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{d}{dt} F(t) \\ &= \lambda \exp(-\lambda t) \end{aligned}$$

이 구해진다. 모든 특징이  $\lambda$ 에 의해서만 결정된다는 사실을 알 수 있다.

특히, 평균과 분산은  $1/\lambda, 1/\lambda^2$ 이다.

### <주요 특징>

1) 일반적으로 기기는 복수개의 유닛으로 이루어진다. 이들 유닛은 고장률이 증가하는 것 또는 감소, 일정한 것 등으로 잡다하다. 그러나 이들이 시스템으로 구성될 때 어떤 종류의 조건 아래 시스템 전체의 수명은 지수 분포가 된다는 사실이 드레닉(R.F.Drenick), 그네덴코(Gnedenko), 아베 등에 의해 증명되었다. 이들은 제품의 치수, 측정 오차 등이 정규 분포한다는 사실을 뒷받침하는 중심 극한 정리에 대응하는 것이다.

2) 배스터브 곡선에서 디버깅으로 초기 고장을, 예방 보전으로 마모 고장을 제거하면 우발 고장만 남는다. 즉 고장률이 일정하게 되어 이는 지수 분포가 된다.

3) 1950년대에 엡스타인(B.Epstein)과 소벨(M.Sobel)에 의해 수명 분포로서의 연구가 시작되고 지수 분포에 관한 통계적 추정, 검정의 기초가 만들

어졌다. 그 취급으로도 알 수 있듯이 상당히 해석이 용이하며 수명 분포 일반에 관한 통계적 사고방식의 습득을 가능하게 한 것이다.

4) 와이불 분포(2.1.3참조)의 형상 파라미터  $\alpha$ 가 과거의 데이터에 의해 이미 알고 있을 때의 와이불 분포에 따른 확률 변수를  $X$ 로 하면  $X^\alpha$ 는 지수 분포에 따른다. 따라서 신뢰성 확인을 위한 수명 시험 시간 설정 등에 지수 분포를 전제로 한 수법이 적용 가능하게 된다.(감마 분포의 형상 파라미터에 대해서도 동일하다)

5) 고장 시간 간격이 파라미터  $\lambda$ 의 지수 분포에 따를 때 어떤 일정 기간  $[0, T]$ 간에 생기는 고장 횟수를 생각하면 그 횟수는 푸아송 분포가 된다.

## 2.1.2 Weibull 분포

Weibull 분포<sup>11)</sup>는 스웨덴의 Weibull 이라는 사람이 강구의 수명에 처음으로 적용한 분포로서 그 같은 이름으로 불리게 되었다. 이것도 지수분포의

일종의 확장이다. 지수분포  $R(x) = e^{-x/x_0}$ 에 형상모수  $a$ 을 도입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(x) = e^{-x_0/x} = e^{-(x/\beta)^\alpha} \quad (2)$$

$$R(x) + F(x) = 1 \quad (3)$$

$$F(x) = 1 - R(x) = 1 - e^{-x_0/x} = 1 - e^{-(x/\beta)^\alpha} \quad (4)$$

$$\frac{dF(x)}{dt} = f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-(x/\beta)^\alpha} \quad (x \geq 0, \beta > 0, \alpha > 0) \quad (5)$$

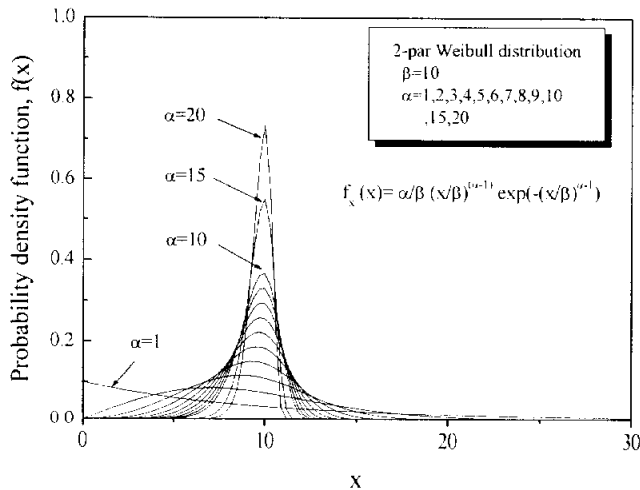


Fig. 1 Failure density function of Weibull distribution

$a < 1$ ,  $a = 1$ ,  $a > 1$ 로 가정하면 그때의 확률밀도 함수는 Fig. 2-11 에서와 같이 시간적으로 감소, 일정(지수분포), 상승의 세 가지로 대응시킬 수 있다.  $a < 1$ 에서는 신뢰도는 지수보다 더욱 더 급격히 떨어진다. 또,  $a > 1$ 에서  $a$ 가 크게 되면 고장은 차차 집중적으로 일어나고  $a=2 \sim 4$  정도에서는 정규

분포에 가깝다.

이 분포의 평균수명과 분산은

$$\mu = E(t) = \beta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (6)$$

$$\sigma^2 = V(t) = \beta^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right] \quad (7)$$

또, 평균수명  $M$  및 고장율은

$$M = \beta (\ln 2)^{1/\alpha} \quad (8)$$

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} t^{\alpha-1} \quad (9)$$

$\left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right]$  혹은  $(\ln 2)^{1/\alpha}$ 는  $\alpha$ 가 1보다 큰 영역에서는 거의 0.8~1에 가까운 값이 된다.  $\beta$ 를 사용하면  $R(t) = e^{-(t/\beta)^\alpha}$ 이기 때문에  $t=\beta$ 일 때  $R(\beta) = e^{-1} = 36.8\%$ 가 된다. Weibull 분포는 직관적으로 지수분포의 확장임은 확실하다. 이 분포가 흔히 사용되는 이유는 적용범위가 넓고 더욱이 모수의 추정을 확률 치에 의해서 비교적 간단히 행할 수 있기 때문이다.

## 2.2 음향방출법(AE)

음향방출(Acoustic Emission)은 응력과 방출이라고도 불리우며, 재료내 국부 에너지원에서 급작스러운 에너지 방출에 의해 야기된 일시적인 기계적 진동을 의미한다. 이러한 방출을 발생시키기 위해서는 응력이나 다른 자극원들이 필요하다. 방출에너지의 범위는 금속내 소수의 전위들의 거동에서부터 구조물의 예기치 못한 균열을 야기하는 수준에까지 이른다.

일반적으로 음향방출 감시시스템들은 수동적인 시스템이다. 이 시스템들은 단순히 균열의 시작과 성장, 부식 같은 화학적 거동, 쌍정 같은 미시동적 거동, 마르텐사이트 상변태, 공공병합 등에서의 전위운동에 의해 야기된 음향을 감지한다. 따라서, 이 시스템은 성장하지 않는 균열을 감지하는 것은 불가능하다. 그러나, 적절한 자극원에 의해서 음향방출법은 재료의 거동, 생산 공정과 압력배관과 파이프의 구조적 무결성의 감시뿐만 아니라 많은 특별한 적용이 가능하다<sup>9)</sup>.

음향방출 기술은 다음과 같은 몇몇 영역, 즉 공정 모니터와 제어, 재료연구, 구조 무결성 평가, 군수장비 시험, 기계장비 모니터링, 그리고 누설 시험 등에서 적용되어져 왔다. 공정 모니터링과 제어에서의 응용은 균열에 대한 용접, 저항 스폿 용접의 AE 피드백 제어, 금속 단련 작용들, 피에조 세라믹의 소결, 내화벽돌의 열처리, 그리고 전자부품의 생산 등을 포함한다. 그리고, 재료연구에서의 전형적 응용들은 부식에 대한 모니터링, 피로결함, 상변태, 수소취화, 파괴역학, 전위이론, 크리프 및 수소화합물의 변형에 대한 연구 등이다. 또한, 구조 완전성 평가는 대개 복잡하면서도 재래적인 순수 압력 용기 및 파이프, 항공기와 다리 구조, 선박 그리고 기름 저장 탱크 등에 대해 평가되고 있으며, 군 장비 시험에서는 종종 탱크 부품, 탄약대 링크, 고압가스 용기, 무기부품들에 대한 열처리 그리고 밸브 작동 등을 포함한다. 누설 시험에 대한 음향 방출은 고압가스 및 진공 시스템에 적용된다<sup>10)</sup>.

요약하면, 음향방출은 실시간에 재료의 상태변화를 감시하는 데에 사용

되며, 또한 이러한 방출원의 위치를 결정하는데 이용이 가능하다. 그러나, 균열과 같은 결함들의 크기를 결정할 수 없기 때문에 방사선법이나 초음파법 같은 다른 비파괴 법들과 함께 방출 원을 평가할 필요가 있다.

Table 1은 음향방출 신호의 진폭에 영향을 미치는 재료의 특성 또는 현상의 종류를 나타내고 있다. AE 매개변수에는 event, count, energy, amplitude, duration, rise time, 쇠퇴시간 등이 있으며, AE 파형과 특성을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1 Factors that affect the relative amplitude of acoustic emission response

Factors that tend to increase acoustic emission response amplitude	Factors that tend to decrease acoustic emission response amplitude
High strength High strain rate Low temperature Anisotropy Nonhomogeneity Thick sections Brittle failure (cleavage) Material containing discontinuities Martensitic phase transformation Crack propagation Cast materials Large grain size Mechanically induced twinning	Low strength Low strain rate High temperature Isotropy Homogeneity Thin sections Ductile failure (shear) Material without discontinuities Diffusion without discontinuities Plastic deformation Wrought materials Small grain size Thermally induced twinning



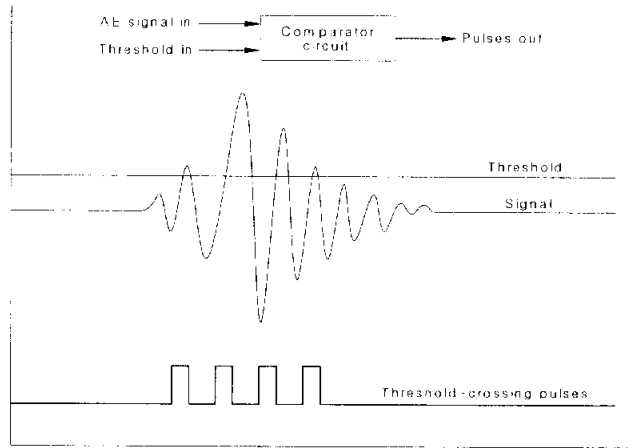


Fig. 2 Principle of AE signal detection and threshold-crossing counts

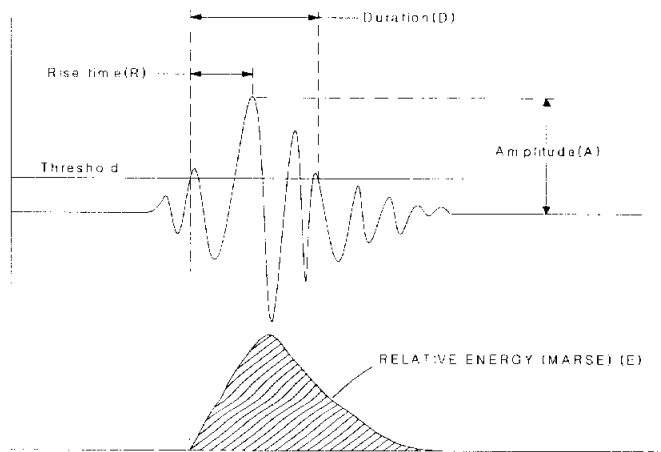


Fig. 3 Commonly measured parameters of a burst-type acoustic emission signal

## 제 3 장 시험편 및 실험방법

### 3.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 550℃ 이상의 보일러 과열기관, 재열기관, 증기관, 증기터빈의 케이싱, 밸브본체, 로터, 블레이드 등에 사용되는 18-8계 스테인리스강인 STS304이며 그 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 2과 Table 3에 각각 나타내었다. 또한 고온 인장시험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 Fig. 4에 나타낸다. 시험편 평행부의 직경은 13mm의 환봉으로부터 6mm로 가공하였으며 표면 부는 사포400번에서 1200번까지 연마한 후 다시 0.3에서 0.05 $\mu$ m의 산화분말을 사용하여 표면을 경면연마하여 표면 거칠기가 시험결과에 미치는 영향을 최소화 하도록 하였다.

**Table 2** The chemical composition of STS304 stainless steel (wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Fe
SUS304	0.02	0.4	1.83	0.029	0.009	8.13	18.22	0.24	2.06	0.012	Bal

**Table 3** The mechanical properties

Material	Tensile strength	Yield strength	Elongation	Hardness
SUS304	706MPa	490MPa	33.0%	250

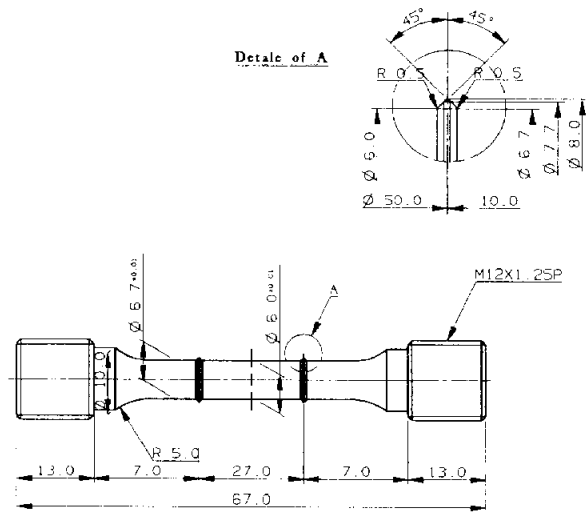


Fig. 4 Shape and dimension of test specimen (unit: mm)

## 3.2 실험장치 및 실험방법

### 3.2.1 고온 인장 강도 시험

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

시험편 가열을 위한 전기로는 개폐식을 사용하였으며 control console에 부착된 노의 온도를 제어하는 자동 온도 조절장치는  $1200^{\circ}\text{C}$ 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.

STS 304강이 주로 사용되는 사용 환경을 고려하여 시험 온도의 결정을  $600^{\circ}\text{C}$ 와  $700^{\circ}\text{C}$ 로 하였다. 본 실험 시스템의 모습을 Fig. 5에 나타내었다.

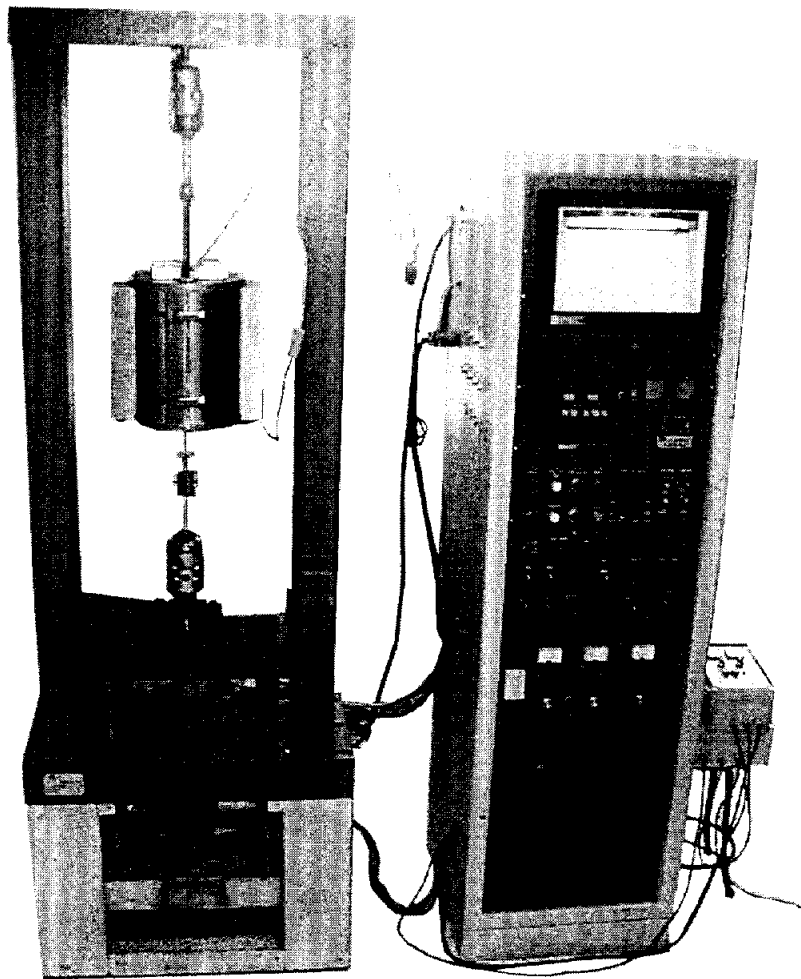


Fig. 5 Elevated temperature tensile test system

### 3.2.1 음향방출시험

AE counts 및 sample data의 획득에는 미국 PAC사의 Model LOCAN 320(4 channel)으로서 14채널까지 확장이 가능한 음향방출(AE) 시스템을 사용하였다. 시험시 발생하는 AE량을 측정하기 위하여 고감도 센서를 사용하였고, 센서는 Dow Corning사의 고진공 그리스를 접촉매질로 사용하여 부착하였다.

Fig. 6은 AE 측정분석 시스템의 개략도를 나타낸다. 낮은 진폭의 신호 전압을 높이기 위하여 pre-amplifier에서 40dB로 증폭하였고, 외부 노이즈(noise)를 제거하기 위하여 문턱값(threshold voltage)은 1.0V로 설정하여 실험을 수행하였다.

주파수 범위의 넓은 스펙트럼을 커버하는 광범위한 발원으로부터 AE가 발생하기 때문에 고감도 변환기용 전치증폭기(pre-amplifier)와 함께 사용하였고, AE시스템의 증폭(gain)은 주증폭기(main amplifier)에서 35dB gain(100~300 kHz filter), 전치증폭기에서 40dB로서 합계 75dB로 고정되었고, 외부소음을 제거하기 위해 문턱값(threshold voltage)을 1.0V로 설정하여 실험하였다.

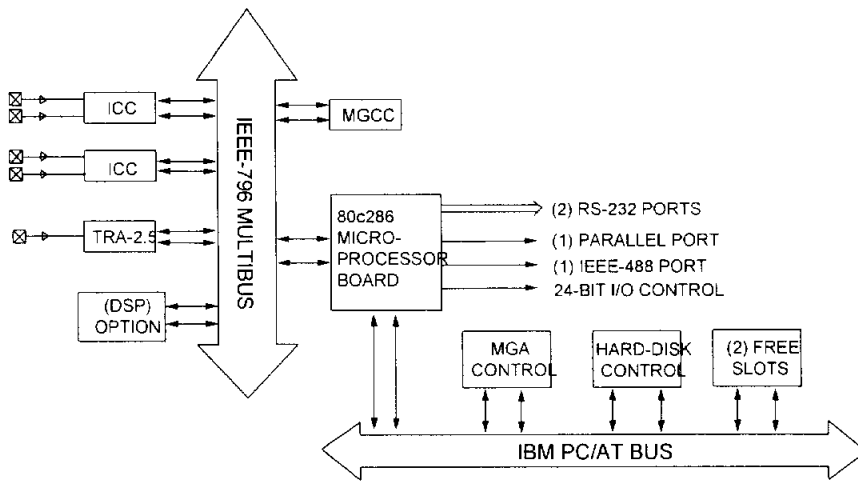
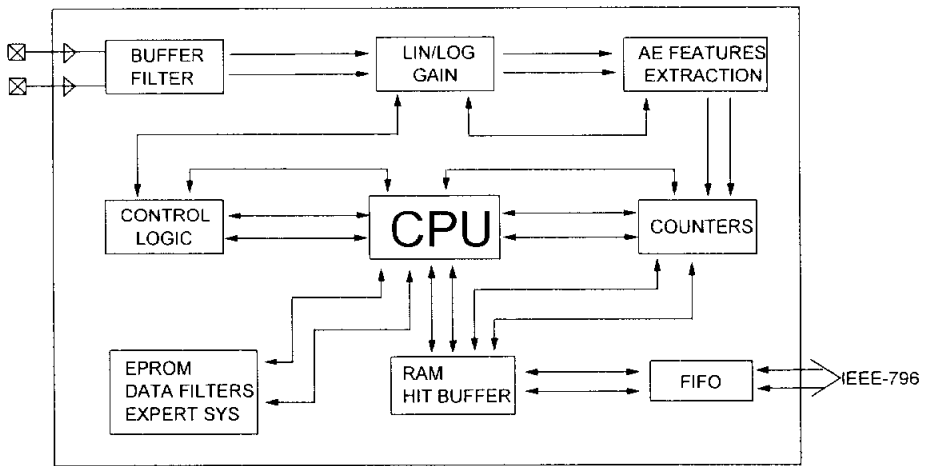


Fig. 6 AE system architecture of PAC LOCAN320

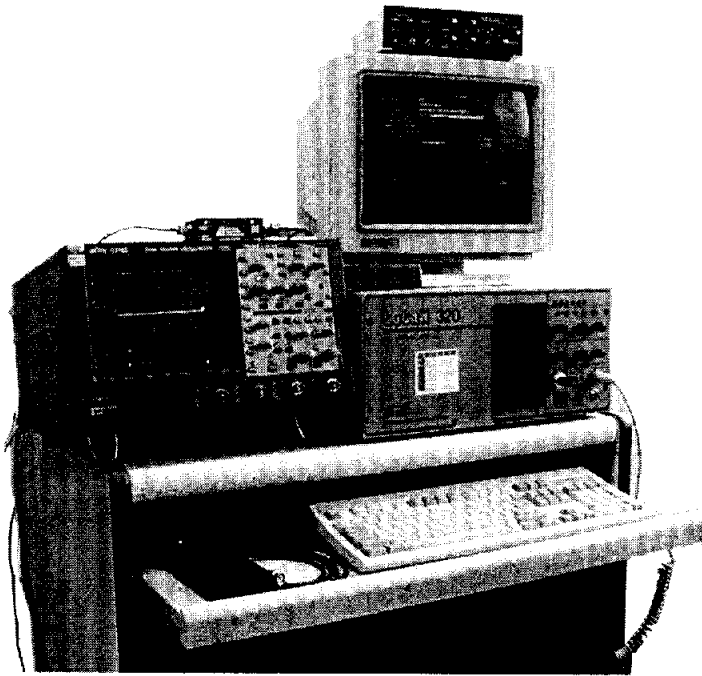


Fig. 7 PAC LOCAN320



## 제 4 장 결과 및 고찰

### 4.1 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. 8에 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. 9는 600℃에서 1mm/min의 변위 제어를 이용한 인장 시험을 수행한 결과를 보여준다. 또한 Fig. 10는 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 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.

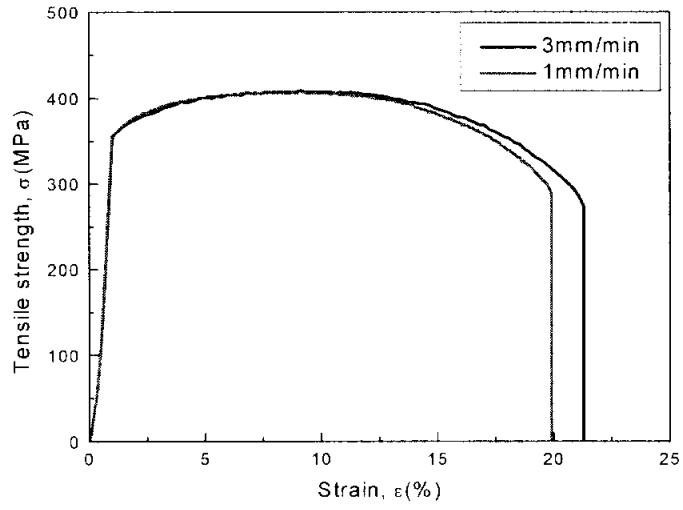


Fig. 8 Displacement dependency at 600°C

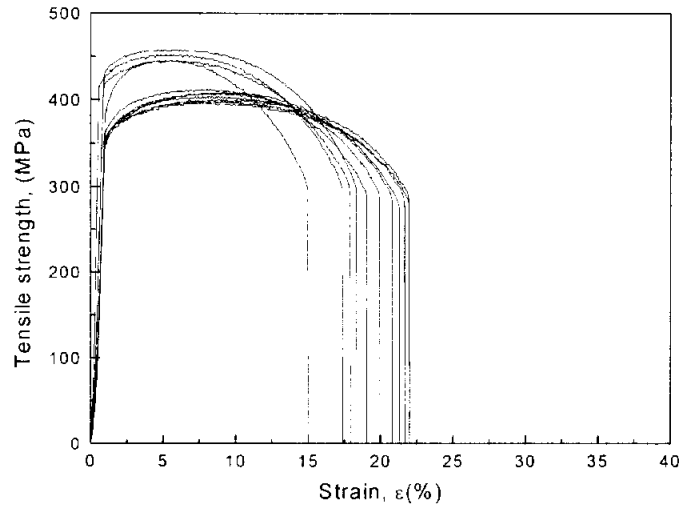


Fig. 9 Tensile behaviors at 600°C

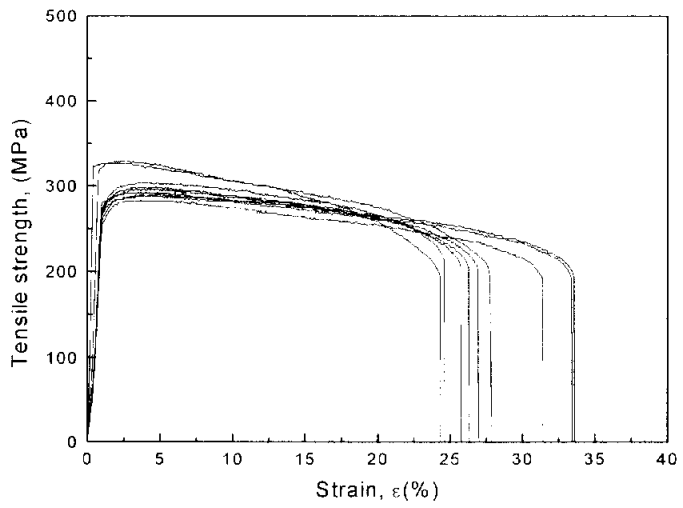


Fig. 10 Tensile behaviors at 700°C

## 4.2 고온 인장 성질의 통계적 특성

고온 인장 시험은 600℃와 700℃ 두 조건에서 각각 12개 그리고 10개의 실험을 하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 그 결과는 각각 Table 4와 Table 5에 나타내었고, 참고적으로 한국 기계 금속 시험연구소에 실험한(이하 nrim) 데이터 9개씩을 Table 6,과 7에 나타내었다

**Table 4** Data of sts 304 stainless steel at 600℃

	Temp(℃)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area(%)
sus304-1	600 (3mm/min)	409	21.3	37.5
sus304-2	600 (1mm/min)	407.2	19.9	36.7
sus304-3	600 (1mm/min)	412.5	19.04	41.7
sus304-4	600 (1mm/min)	398.6	22.0	38.3
sus304-5	600 (1mm/min)	400.3	22.0	37.5
sus304-6	600 (1mm/min)	403.8	20.9	38.3
sus304-7	600 (1mm/min)	396.9	22.7	38.3
sus304-8	600 (1mm/min)	445.4	15.0	42.7
sus304-9	600 (1mm/min)	441.9	16.0	43.3
sus304-10	600 (1mm/min)	457.5	18.5	42.5
sus304-11	600 (1mm/min)	445.4	17.9	42.7
sus304-12	600 (1mm/min)	452.3	17.4	42.7
Mean( $\mu$ )		422.57	19.39	40.18
표준편차		6.81194	0.7464	0.74649
$\sigma/\mu$		0.016	0.0384	0.0186

**Table 5** Data of sts 304 stainless steel at 700°C

	Temp(°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area(%)
sus304-1	700 (1mm/min)	299.8	25.7	31.7
sus304-2	700 (1mm/min)	303.3	24.6	29.2
sus304-3	700 (1mm/min)	292.9	26.5	30.8
sus304-4	700 (1mm/min)	296.3	27.0	30.0
sus304-5	700 (1mm/min)	284.2	31.4	28.3
sus304-6	700 (1mm/min)	289.4	33.5	28.3
sus304-7	700 (1mm/min)	291.1	33.6	28.3
sus304-8	700 (1mm/min)	324.07	28.26	40
sus304-9	700 (1mm/min)	329.27	24.36	40
sus304-10	700 (1mm/min)	325.81	27.89	40
Mean( $\mu$ )		303.62	28.28	32.66
표준편차		5.2576	1.08428	1.64007
$\sigma/\mu$		0.0173	0.0383	0.05

**Table 6** Data of sts 304 stainless steel at 600°C(nrim)

	Temp(°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area(%)
sus304-1	600	372.4	42	65
sus304-2	600	372.4	42	69
sus304-3	600	372.4	42	70
sus304-4	600	372.4	43	70
sus304-5	600	392	43	73
sus304-6	600	392	43	73
sus304-7	600	392	43	75
sus304-8	600	392	43	75
sus304-9	600	411.6	46	76
Mean( $\mu$ )		385.47	43.00	71.78
표준편차		4.61976	0.40825	1.18764
$\sigma/\mu$		0.012	0.0094	0.017

Table 7 Data of sts 304 stainless steel at 700°C(nrim)

	Temp(°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area(%)
sus304-1	700	254.8	47	60
sus304-2	700	254.8	52	61
sus304-3	700	254.8	53	62
sus304-4	700	254.8	53	65
sus304-5	700	264.2	55	66
sus304-6	700	264.6	57	69
sus304-7	700	274.4	61	75
sus304-8	700	274.4	61	78
sus304-9	700	294	66	80
Mean( $\mu$ )		265.64	56.11	68.44
표준편차		4.4567	1.9253	2.5117
$\sigma/\mu$		0.0167	0.03431	0.0366



### 4.2.1 인장강도의 분포

Fig. 11은 STS304강에 대한 600, 700℃에 대한 인장강도 분포를 정규 확률지에 나타낸 것이다. 평균값은 600, 700℃ 모두 본 실험결과에서 nrim 데이터보다 조금씩 높게 나타났으며, 피팅의 정확도는 본 실험의 700℃에서 가장 높게 나타났고 nrim 700℃에서 가장 낮게 나타났으나 4결과 모두 비슷한 값을 보이고 있다. 시편의 개수가 좀 더 많다면 더욱더 정규분포를 잘 따를 수 있으리라 생각된다.

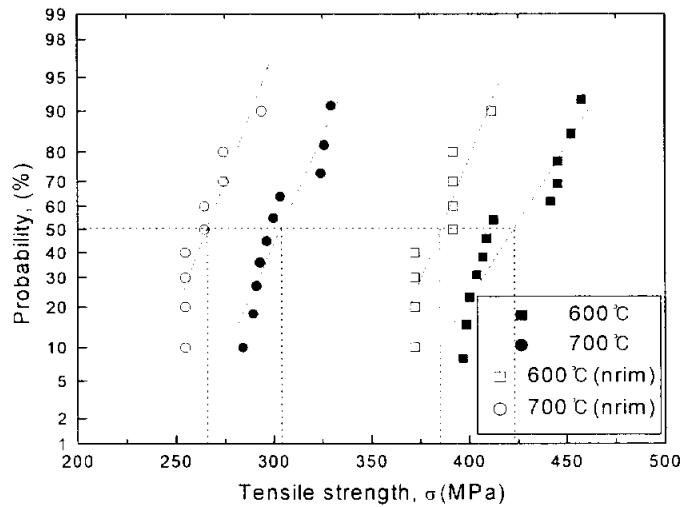


Fig. 11 Normal distribution of tensile strength for 600 & 700℃

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

3-parameter Weibull 분포의 분포함수 및 밀도함수는 다음 식으로 주어진다.

$$F_z(z) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{z-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right] \quad (10)$$

$$f_z(z) = \frac{\alpha}{\beta-\gamma} \left(\frac{z-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{z-\gamma}{\beta-\gamma}\right)^\alpha\right] \quad (11)$$

여기서,  $\alpha$ 는 형상모수(shape parameter),  $\beta$ 는 척도모수(scale parameter),  $\gamma$ 는 위치모수(location parameter)이다.

Fig. 12는 STS304 강에 대한 600, 700℃에 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 8에 나타내었다.

이들의 모수 추정치에 의해 식(10)에 의해 결정된 분포함수를 그림에 실선으로 나타내었다. 이들의 실선은 온도에 관계없이 실험결과의 경향과 잘 일치하고 있으며, Weibull분포의 적합성과 함께 파라미터의 추정 결과의 타당성이 있다고 판단된다. 여기서 실험결과에 대한 각 파라미터의 온도 의존성을 나타낸 것이 Fig. 13과 Fig. 14이다.

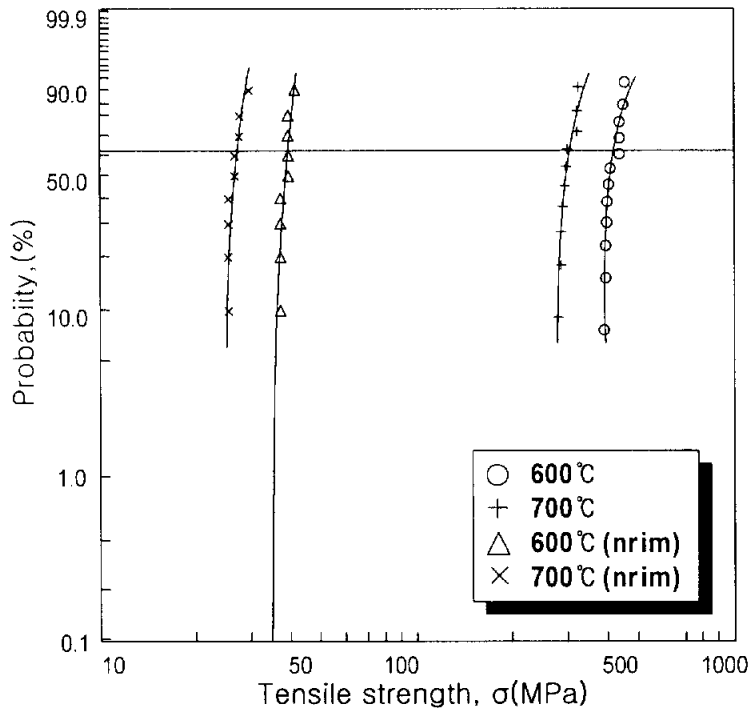


Fig. 12 Weibull plots of tensile strength for 600 & 700°C

Table 8 Parameters of tensile strength distribution

	600°C	700°C	600°C (nrim)	700°C (nrim)
$\alpha$	0.8	1.16	2.68	1.28
$\beta$	423	309	392	267
$\gamma$	396	280	343	247

Fig. 13은 형상모수  $\alpha$ 와 온도의존성의 관계를 나타낸 것으로, 600, 700℃의 경우 비슷한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 본 실험의 온도와 시험편 수에 있어서 형상계수의 온도의존성은 확인되지 않았다. Fig. 14는 척도계수  $\beta$ , 위치계수  $\nu$ 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  $\nu$ 의 온도의존성에는 다음과 같은 실험식의 관계가 성립하였다.

$$\beta = 1052 - 1.14T \quad (12)$$

$$\nu = 1059 - 1.16T \quad (13)$$

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

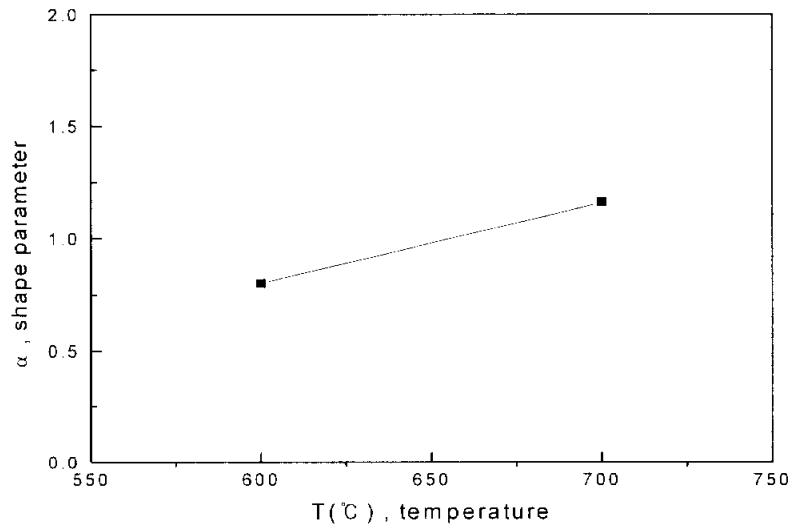


Fig. 13 Effect of the shape parameter on temperature

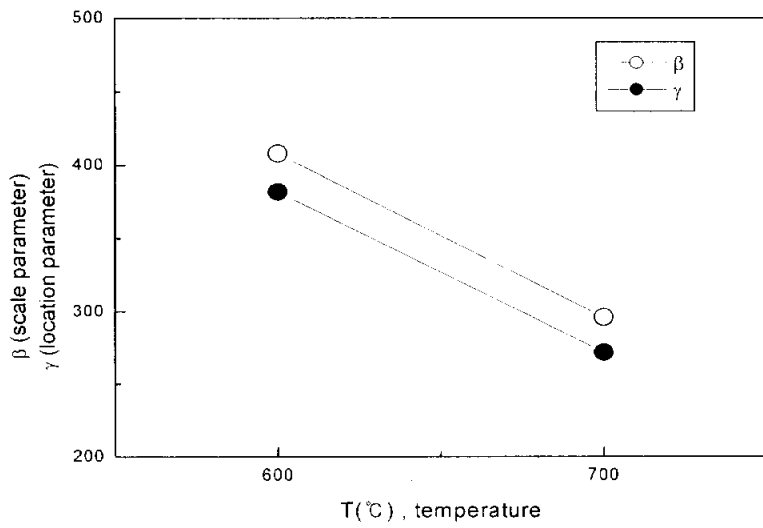


Fig. 14 Effect of the scale parameter and location parameter on temperature

### 4.2.2 연신율의 분포

Fig. 15는 STS304강에 대한 600, 700℃에 대한 연신율의 분포를 정규 확률 지에 나타낸 것이다. 평균값은 600, 700℃모두 본 실험결과에서 낮게 나타났으며, 피팅의 정확도는 본 실험 결과의 600℃에서 가장 높았고 nrim 600℃에서 가장 낮게 나타났다. 역시 시편의 개수가 좀 더 많다면 더욱더 정규 분포를 잘 따를 수 있으리라 생각된다.

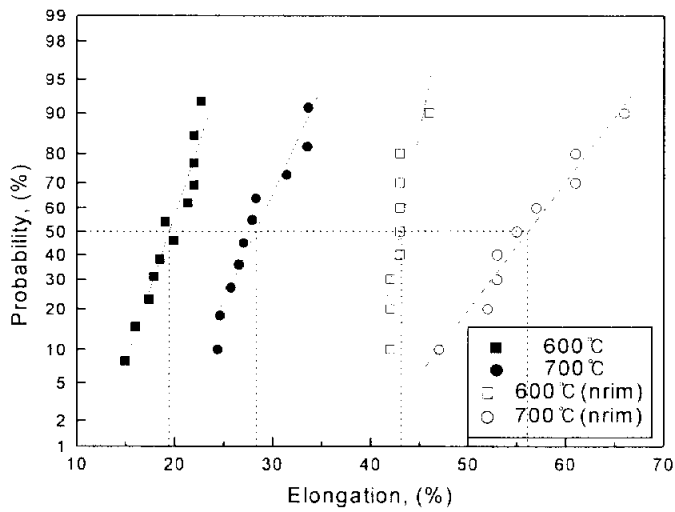


Fig. 15 Normal distribution of elongation for 600 & 700℃

Fig. 16는 STS304 강에 대한 600, 700℃에 대한 연신율 분포를 Weibull확률지에 나타낸 것이다. 누적확률은 평균 순위(mean rank)법으로 구하였다. 본 그림에 나타낸 실험 결과의 온도에 대하여 직접탐색법으로 추정된 연신율 분포의 추정치를 Table 7에 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 적합 형은 얻지 못하였다. 참고로 이에 대한 변동계수는 열처리 종류에 따라서 1.9% , 3.1%, 15.3%로 큰 차이를 보였다. 본 실험에 의한 STS304강의 600℃와 700℃의 변동계수는 각각 3.84%와 3.83%을 얻었고, nrim데이터는 0.94, 3.43%를 얻었다. 본 실험결과에 의하면 온도에 의한 연신율의 산포는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

Table 9에서 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, 연신의 경우는 증가하는 경향으로 온도의존성이 인장성질에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

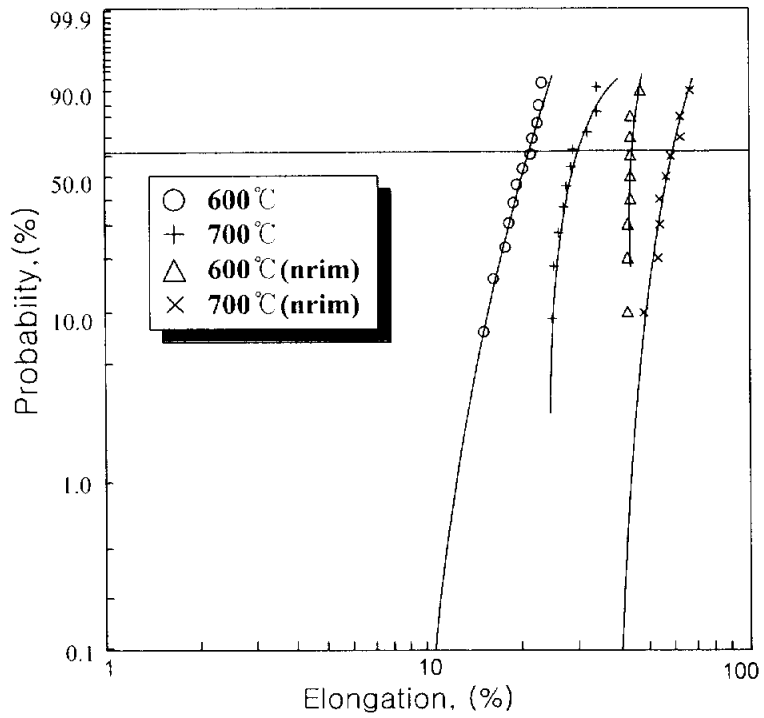


Fig. 16 Weibull plots of elongation at 600°C and 700°C

Table 9 Parameters of elongation distribution

	600°C	700°C	600°C (nrims)	700°C (nrims)
$\alpha$	4.52	1.15	0.98	2.82
$\beta$	20.52	29.12	43.12	58.24
$\gamma$	7.41	23.50	41.71	38.36



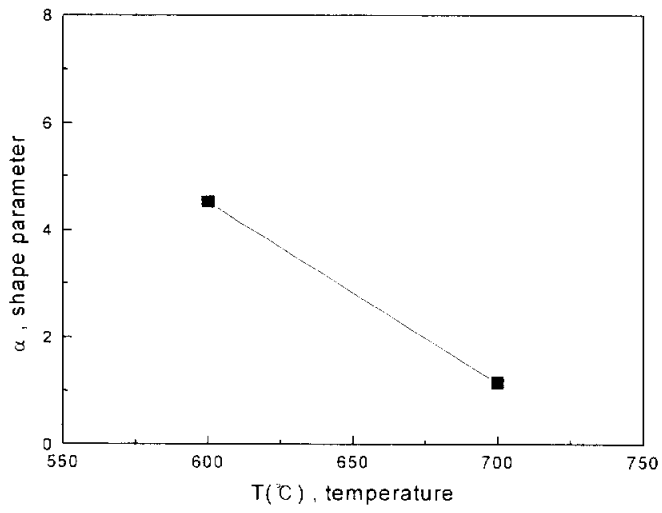


Fig. 17 Effect of the shape parameter on temperature

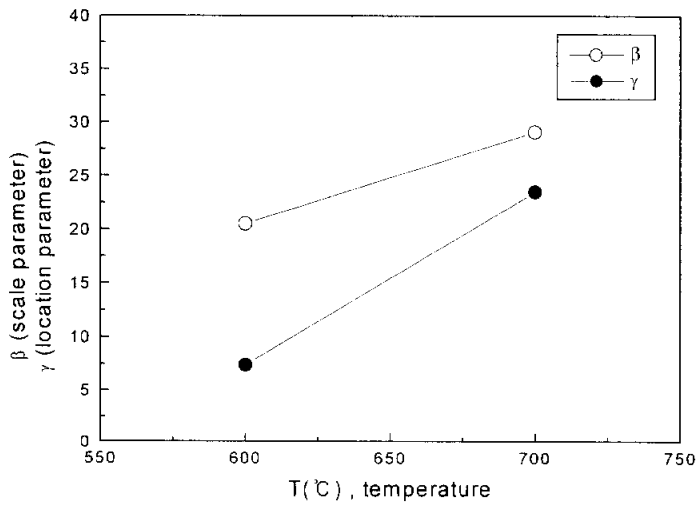


Fig. 18 Effect of the scale parameter and location parameter on temperature

### 4.2.3 단면수축률의 분포

Fig. 19은 STS304강에 대한 600, 700℃에 대한 단면수축율의 분포를 정규확률지에 나타낸 것이다. 평균값은 600, 700℃모두 본 실험결과에서 조금씩 낮게 나타났으며, 피팅의 정확도는 nrim 600℃에서 가장 높았고 본 실험 결과의 700℃에서 가장 낮게 나타났다. 시편의 개수가 좀 더 많다면 더욱더 정규분포를 잘 따를 수 있으리라 생각된다.

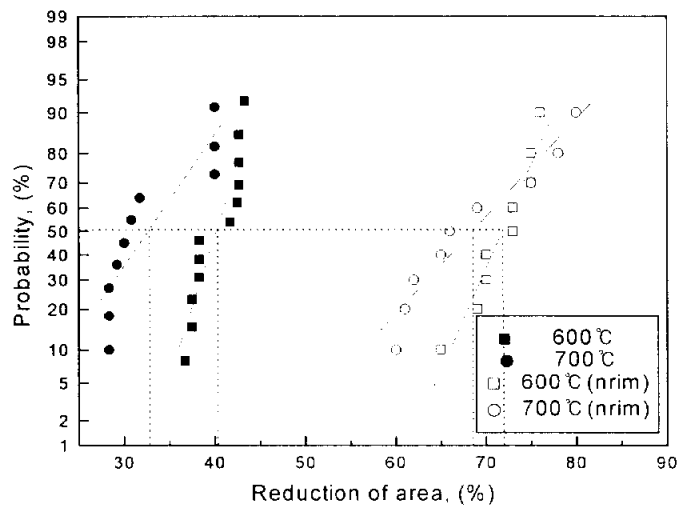


Fig. 19 Normal distribution of Reduction of area for 600 & 700℃

Fig. 20은 SUS304 강에 대한 600, 700℃에 대한 단면수축률 분포를 Weibull확률지에 나타낸 것이다. 이 경우도 누적확률은 평균 순위(mean rank)법으로 구하였다. 본 그림에 나타낸 실험 결과의 온도에 대하여 직접탐색법으로 추정된 단면수축률 분포의 추정치를 Table 10에 나타다

고온에 대한 단면수축률의 분포도 인장강도, 연신율 등과 마찬가지로 Weibull분포로 적합 하는 것이 가능하다고 사료된다. 예를 들어, 상온에 대한 단면수축률의 데이터가 S45C강에 대하여 열처리 방법에 대한 결과가 있지만 앞 절의 연신율과 마찬가지로 이 또한 분포의 적합 형은 얻지 못하였다. 참고로 이에 대한 변동계수는 열처리 종류에 따라서 1.5% , 1.1%, 9.9%로 큰 차이를 보였다. 본 실험에 의한 STS304강의 600℃와 700℃의 단면수축률의 변동계수는 각각 1.86%와 5.0%을 얻었고, nrim데이터는 1.7, 3.66%를 얻었다. 본 실험결과 데이터에서 nrim보다 큰 산포를 나타내었고, 본 실험결과 경우 온도에 의한 연신율의 변동은 700℃에서 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.

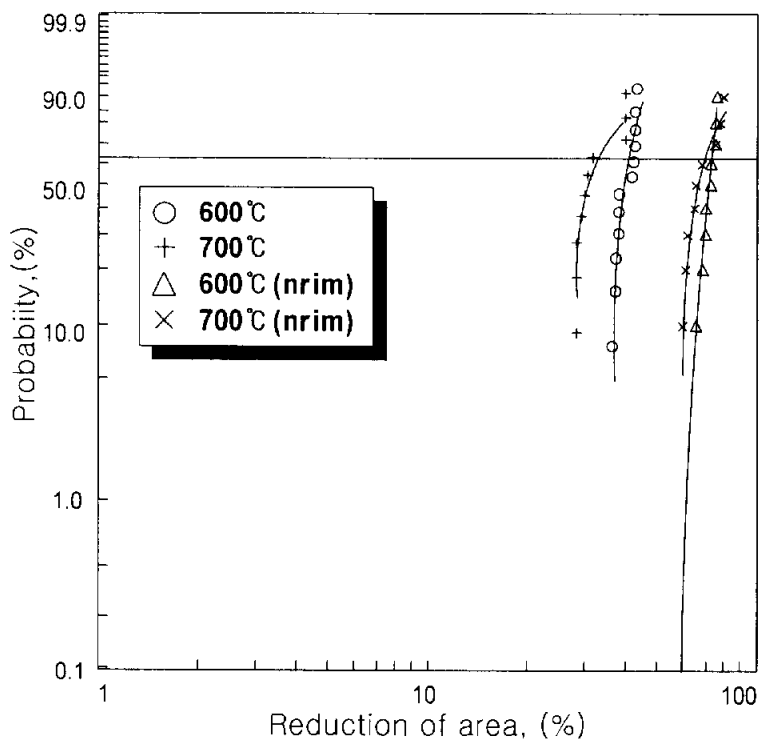


Fig. 20 Weibull plots of area reduction at 600°C and 700°C

Table 10 Parameters of area reduction distribution

	600°C	700°C	600°C (nrim)	700°C (nrim)
$\alpha$	1.17	0.63	4.7	0.98
$\beta$	40.8	32.64	73.13	70
$\nu$	36.14	27.97	55.04	58.54

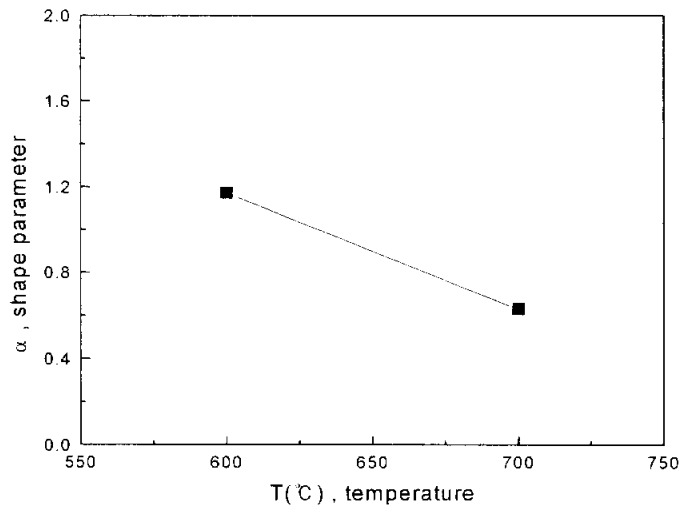


Fig. 21 Effect of the shape parameter on temperature

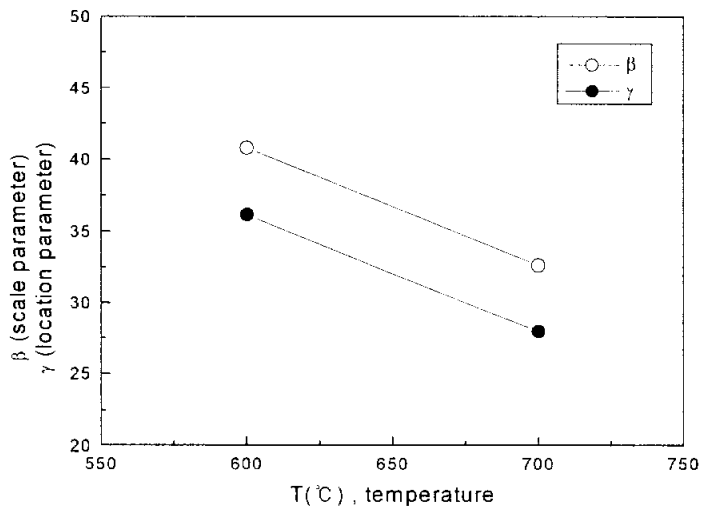
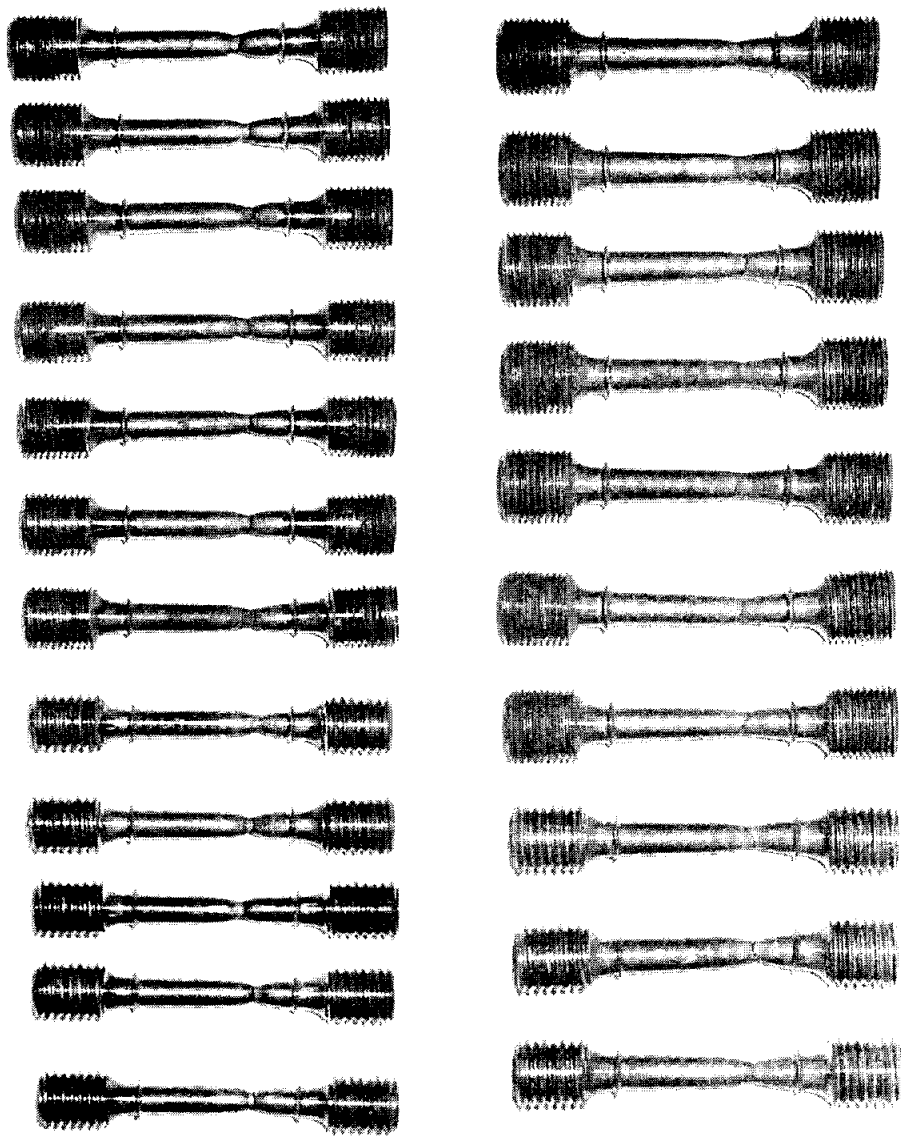


Fig. 22 Effect of the scale parameter and location parameter on temperature



(a) 600°C

(b) 700°C

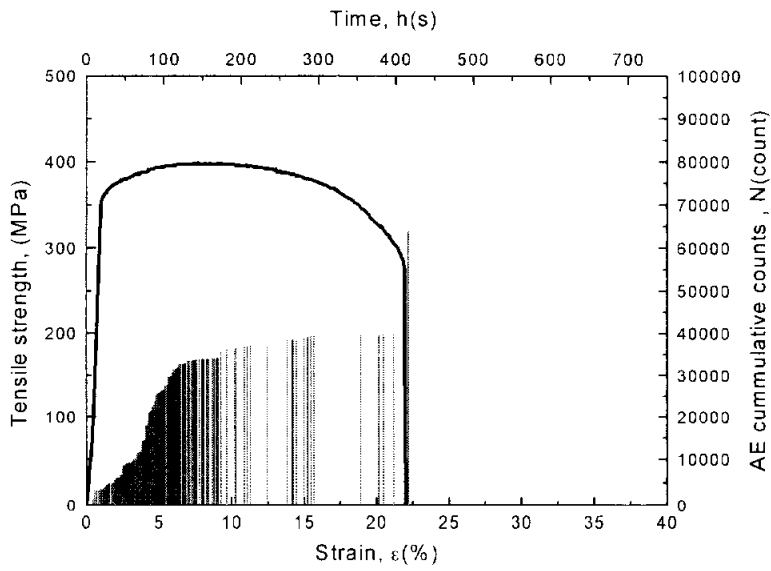
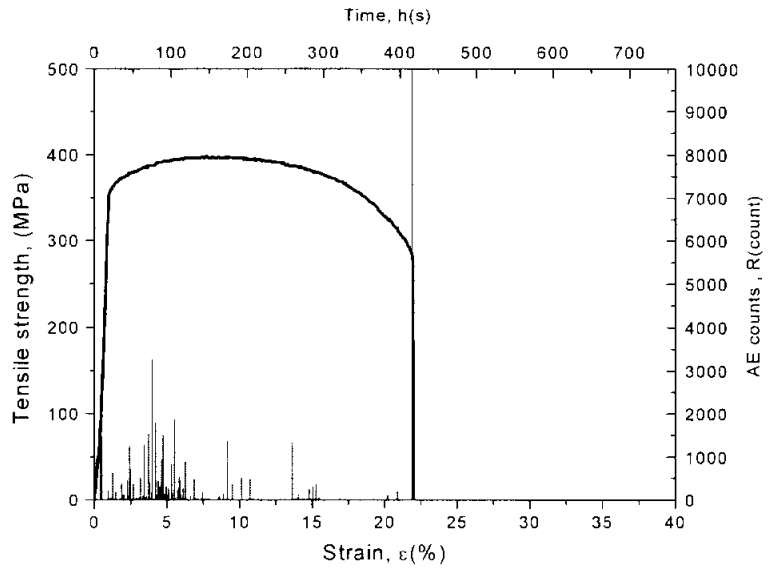
Fig. 23 Shape of fracture specimen

### 4.3 고온 인장 거동과 AE특성

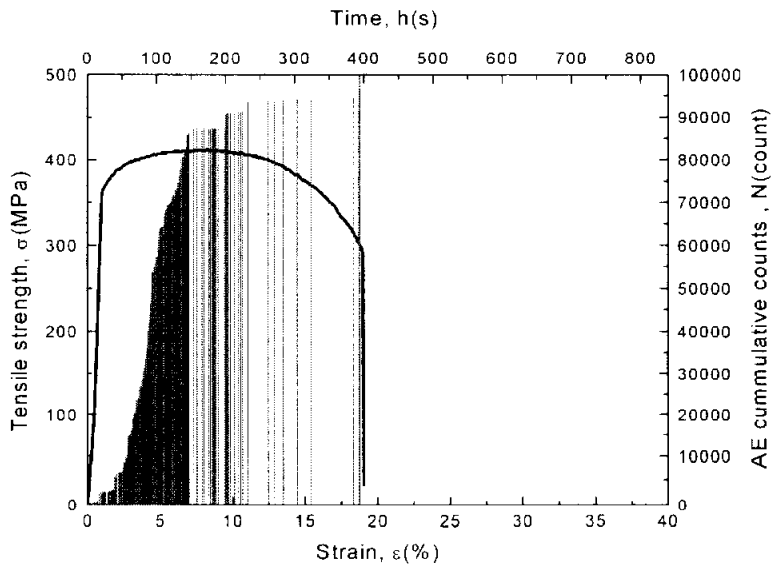
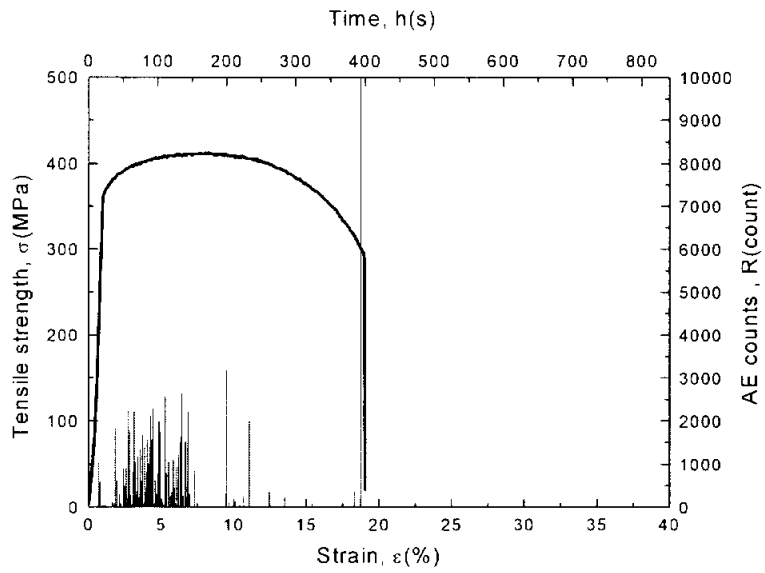
AE hit란 센서에 도달된 신호의 시작점과 끝점이 기준치를 넘는 범위에서 1개의 AE 신호로서 간주하는 것이고 count는 기준치를 넘는 모든 진폭에 대해서 그 횟수를 세는 것을 말한다. 이들 파라미터는 재료내부에서 일어나는 현상의 발생빈도를 직접적으로 대변하는 것으로 알려져 있으며, 금속재료의 소성변형 거동의 연구에 적합한 파라미터이다. 일반적으로 다공성 재료는 초기 초기응력 상태에서는 수많은 미시균열이 생성되며, 응력이 증가하여 감에 따라 소수의 거시적 균열로 발전해 가는 파괴기구를 갖고 있다. 이와 마찬가지로 AE신호의 발생빈도도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

Fig. 24는 600℃, 700℃에 대한 STS304 스테인리스강의 AE 카운트 수를 응력 변형을 선도와 함께 나타낸 일례이다.

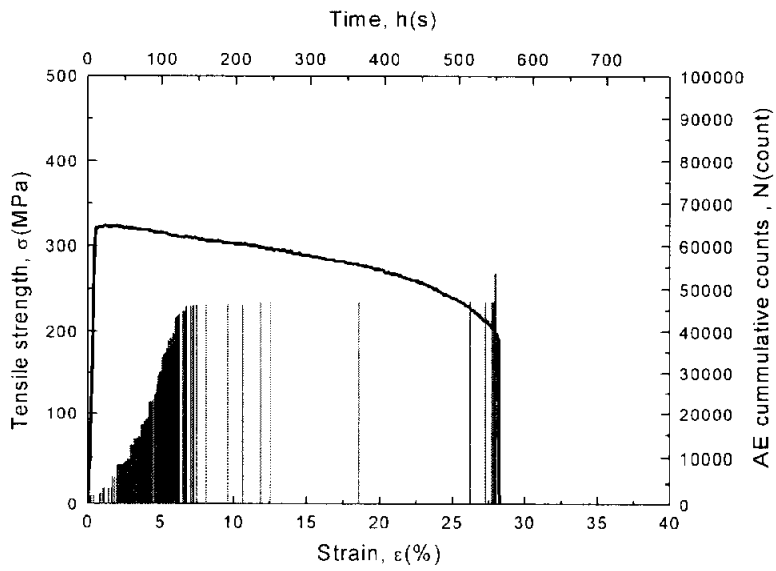
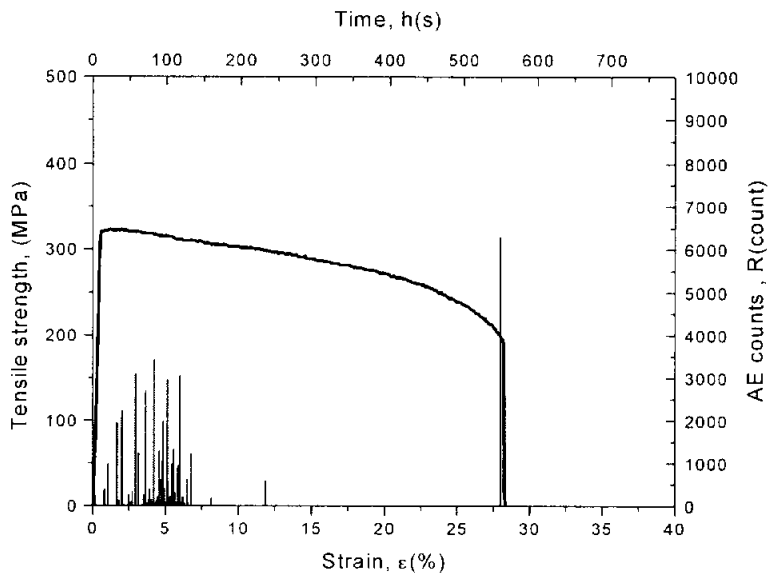
그림에서 나타나는 AE 신호는 조직 내의 변화가 발생하여 미시균열의 진전으로 미세한 탄성파를 발생함으로써 신호가 전달되었기 때문인 것으로 생각된다. 각 온도에서의 그림중 위의 그림은 AE count 수를, 아래는 누적 총량을 나타낸 것으로 600, 700℃ 모두 탄성영역을 지나 소성영역에서부터 AE 신호가 대량 발생하고 과단 시에 다시 대량 발생함을 관찰할 수 있었으며, 이는 나머지의 실험결과에서도 비슷한 경향을 얻을 수 있었다. 이는 항복점을 지나 소성영역에서 활발한 전위이동과 소성변형이 발생하여 다량의 AE신호가 나타난 것으로 생각된다. 이처럼 고온 인장 시험에서 초기 변형, 소성영역 그리고 과단과 같은 여러 고온 인장 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.

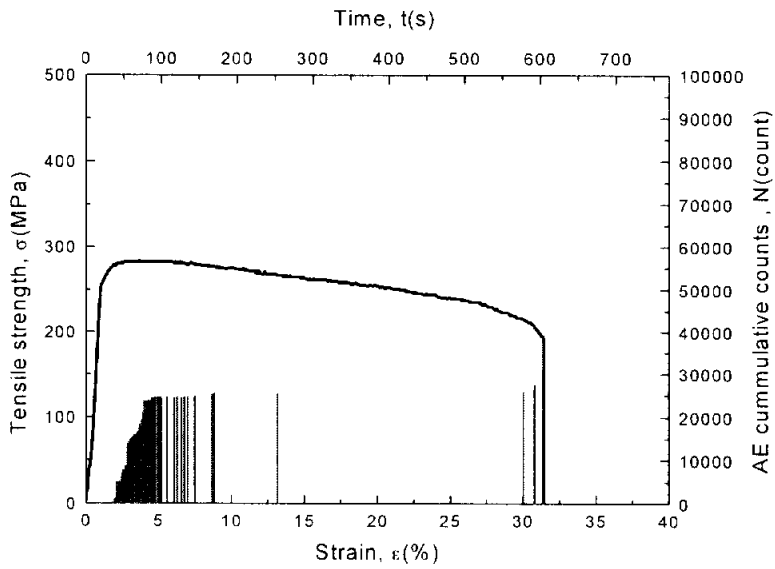
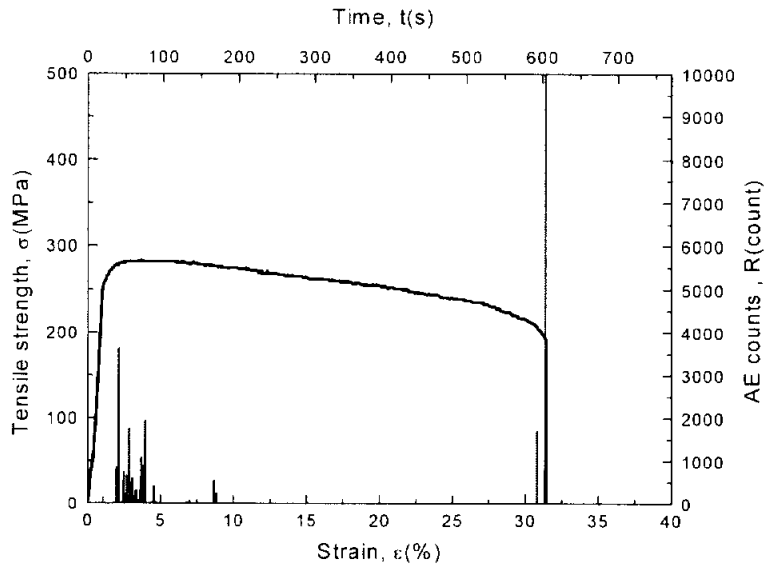






(a) 600 °C





(b) 700°C

Fig. 24 Stress and AE count versus strain

## 제 5 장 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℃에서 1mm/min, 3mm/min의 크로스헤드 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 확인되었고 연신율, 단면수축률은 인장강도보다는 큰 산포를 나타내었으나 Weibull분포에 적합 하는 것이 가능하다.

(3) 고온 인장 시험중 AE 거동을 조사한 결과 소성 역에서 많은 신호가 방출되었으며 고온 인장 거동을 AE 신호로써 이해할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- 1) 김귀식, 박경석, 홍용의(1996). “플라즈마용사 세라믹코팅 피막부식재의 음향 방출 특성” 한국해양공학회지 제15권 제3호, pp 69~74.
- 2) 김선진(1996). “기계·구조물의 안전성 및 신뢰성” 한국해양공학회지 제10권 제2호, pp 1~11.
- 3) 정민화(1998). “발전소 고온배관재료의 크리프 수명예측과 AE평가에 관한 연구” 부경대학교 대학원 공학박사 학위논문, pp 2~19.
- 4) 송정근(1998). “열교환기 부품용 Cr-Mo강의 고온 크리프 수명예측과 AE평가에 관한 연구” 부경대학교 대학원 공학석사 학위논문, pp 3~28.
- 5) Endo, T. and Masuyama, F. (1997). Material Japan, 36, pp. 225~231.
- 6) 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.
- 7) Weibull, W. (1951). “A Statistical Distribution Function of Wide Applicability”, Journal of applied mechanics, Vol. 18, pp 293~297.
- 8) 한국공업표준협회(1992) “신뢰성의 분포와 통계” pp33~70
- 9) Drenick, R. F(1960) “The Failure Law of Complex Equipment” J. Soc. Ind. Appl. Math. Vol. 8 pp680~690
- 10) Epstrin, B. and M. Sobel(1954) “Some Theorems Relevant to Life Testing from an Exponential Distributions” Ann, Math. Stat, Vol. 25. pp373~381
- 11) 黃培彦, 鋼の疲勞龜裂傳播の信頼性推定に關する研究, 橫濱國大工學博士學位 論文, 1990
- 12) 金善振, 板垣 浩, 石塚 鐵夫, “ 材質の空間的變動の材料強度試驗結果に及ぼす影響について(その2.疲勞龜裂傳播に及ぼす板厚の影響)” 日本造船學會論文集, 第173号,pp.327-336, 1993
- 13) 김선진, “피로균열전파저항에 미치는 시험편 두께의 영향에 관한 신뢰

- 성공학적 고찰”, 대한기계학회 94년도 재료 및 파괴부문 학술대회논문  
집, pp. 31~34, 1994
- 14) 오세욱, 이치우, 윤한기, 남기우, 재료강도학, 원창출판사, 1993
- 15) Miller, R. K. and P. McIntire(1988), NDT Handbook Vol. 5,  
Acoustic Emission Testing.
- 16) 권상우, “원자력 발전소용 이종재 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 실시  
간 평가에 관한 연구”, 부경대학교 대학원 공학석사 논문, p.1-58, 2000
- 17) Oh, S. K., H. K. Chang and J. W. Oh, “Development of Real  
Time Quality Evaluation of Friction Welding by Acoustic Emission  
; 2nd Report - Effects of Welding Parameters on Weld Strength  
and AE”, Proc. Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE,  
p.177-184, 1996
- 18) 오세규(1982), “어쿠스틱 에미션법에 의한 마찰용접 강도해석(1)”, 대한  
기계학회지, 제 22권, 제 3호, p.184~190, 202.
- 19) 오세규, 장홍근, 이향동, 신국식, 정문식, 송운섭, “로켓모터용 노즐의  
동종재 마찰용접의 최적화와 고온 크리프 예측 및 AE평가(2)-고온  
크리프 예측 및 AE평가”, 한국해양공학회 추계 학술강연 논문집, p.  
90-96, 1996
- 20) 이치우, 김선진, 이성우, 정상영, 신뢰성공학, 원창출판사, 1993
- 21) Transactions of national research institute for metals vol. 32 no.4  
1990

## 감사의 글

직장이라는 핑계로 여러모로 많이 소홀하고 부족했던 저를 너그러이 용서해 주시고 많은 지도, 편달을 해 주신 김선진 지도 교수님께 우선 감사의 말씀 드립니다. 또한 심사를 하시며 많은 충고와 조언을 해 주신 김영식 교수님과 오명석 교수님께도 감사드리며, 부족한 후배에게 많은 따뜻한 말 아끼지 않았던 안석환 박사님 그리고 저에게 많은 도움을 주었던 병두, 현철이, 상수, 조선배님 여러 많은 선,후배님들에게도 일일이 감사의 말을 해야 하겠지만 이렇게 지면을 통해서 감사의 글을 올리는 것이 무척 죄송스럽습니다. 앞으로도 여러 교수님들의 가르침 잊지 않고 살아가도록 하겠습니다.

마지막으로 못난 아들 여러모로 뒷바라지 해 주신 저의 어머님께 평소엔 해보지 못한 감사의 말을 드립니다.