

신뢰성기법을 이용한 항공구조재의 열기계적 특성 연구

박성호* · 박노석** · 김재훈***

A Study on Thermo Mechanical Properties for a Airframe Structural Material by using Reliability Methods

Sungho Park* · Noseok Park** · Jaehoon Kim***

ABSTRACT

This study describes tensile test results under room and elevated temperatures for AISI 304 stainless steel which is widely used for a airframe structural material. Tensile tests were conducted according to ASTM standards. Reliability analysis was conducted by using normal probability paper to evaluate A and B basis tensile strengths applicable to airframe structural design.

초 록

본 연구는 항공구조재로 널리 사용되고 있는 AISI 304강에 대한 상온 및 고온 인장특성을 신뢰성 기법을 이용하여 실험한 결과를 정리한 것이다. 인장실험은 ASTM 규정에 의하여 수행하였고, 정규확률지를 이용하여 항공구조설계 시 적용할 수 있는 A-Basis 및 B-Basis 강도를 평가하는 신뢰성 해석을 수행하였다.

Key Words: AISI type 304, Tensile Strength, Probability Paper, Reliability method, Elevated temperature.

1. 서 론

비행체가 고공과 고속으로 운용될 때 기체 구조물은 외력 외에 가파른 온도 구배의 열적 환경을 경험하기 때문에 이러한 항공구조물 설계에 있어서 소재에 대한 열기계적 물성치 획득은 설계 해석의 기초자료 활용 측면에서 필수적이

라고 할 수 있다.

본 연구에서는 고온용 구조 소재로 널리 활용되고 있는 AISI 304강에 대하여 21 °C, 100 °C, 200 °C, 350 °C, 500 °C, 650 °C 및 800 °C에서 인장실험을 수행하여 항복강도(yield strength, F_{ly}), 인장강도(ultimate strength, F_{tu}), 탄성계수(modulus of elasticity, E) 및 연신률(elongation, %)을 구하였다. 정규확률지(Normal Probability Plot)를 이용하여 온도변화에 따른 재료의 인장응력 특성에 대한 A Basis와 B Basis 강도를 구하였으며, 인장강도와 항복강도 간의

* 국방과학연구소 종합시험단 2부

** 국방과학연구소 종합시험단 2부

*** 충남대학교 기계설계공학과

연락처, E-mail: n761213@daum.net

온도별 상관분석으로 정규분포를 따르는지 여부를 살펴보았다.

2. 실험방법

AISI 304강의 인장실험은 ASTM E8 및 E21 규정에 기술된 방법으로 수행하였다[1, 2]. 21 °C, 100 °C, 200 °C, 350 °C, 500 °C, 650 °C 및 800 °C의 온도에서 인장실험을 수행하였으며, 시험편은 각 온도별 10개씩 총 70개가 사용되었다.

Figure 1은 인장실험에 사용된 10톤 용량의 MTS 810 재료실험기로 변위제어방식이다. 가열 장치는 최대 가열온도가 1,400 °C인 653.02 고온 노(high temperature furnace)를 사용하였으며, 가열속도를 일정하게 유지할 수 있도록 제어가 가능하다.

온도측정은 시험편에 최대 측정가능 온도가 1,550 °C인 K 타입 열전대(thermocouple type K)를 부착하여 측정하였다.

열전대는 끝단을 T/C welder(대현테크, 모델 : DH-TC100)로 용접한 후 strain gage welder(EATON, 모델 : W1200)를 사용하여 시험편에 부착하였다.

Figure 2는 인장실험에 사용된 시험편에 열전대를 부착한 모습이다. 시험편의 치수는 중심부에서 폭 6.25 mm, 두께 3.0 mm로 하였다. Fig. 2와 같이 시험편의 중앙과 중앙에서 양쪽으로 10 mm 떨어진 위치에 열전대를 부착하였다.

Microprocessor thermometer(Omega, 모델 : HH21)를 이용하여 시험편의 온도를 측정하였으며, 고온변형률은 집측방식인 632.53F-11 고온 익스텐소미터를 이용하여 구하였다. 익스텐소미터의 Gage length는 25 mm로 하였다. 실험장치는 TestStar II s controller로 조절하였다

고온 인장실험은 고온노에서 시험편을 가열한 후 시험편 표면이 요구온도에 도달했을 때부터 30분 동안 온도를 유지한 후 하중을 가하였다. 가열속도와 변위속도는 각각 1.9~2.0 °C/sec와 2 mm/min로 일정하게 유지하였다.

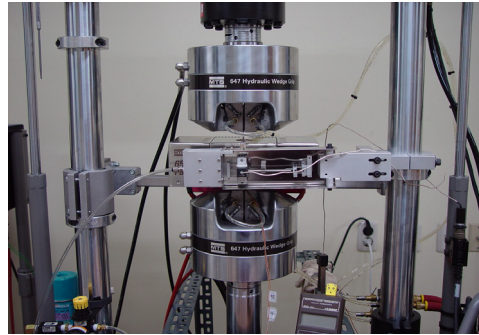


Fig. 1 Configuration of Test Equipment, MTS 810

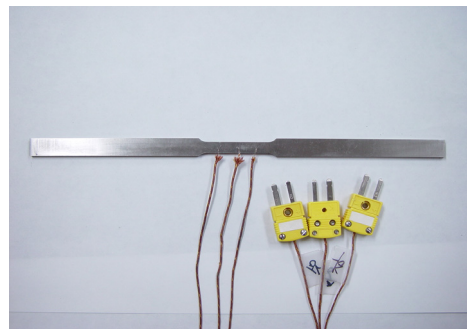


Fig. 2 Configuration of Thermocouple Attached Specimen

인장강도(F_{tu})는 응력-변형률 선도의 최대 응력 값으로 구하였으며, 항복강도(F_{ty})는 응력-변형률 선도로부터 변형률을 0.2% 읍셋하여 구하였다.

탄성계수(E)는 응력-변형률 선도의 선형구간의 기울기를 이용하여 산출하였다.

연신률(Elongation)은 파단전과 후의 표점거리 변화량($\Delta L/L$)으로부터 구하였다.

3. 신뢰성 해석 방법

구조설계를 위해 재료의 응력특성(F_{ty} , F_{tu})은 필요에 따라 A Basis와 B Basis를 선택하여 구할 수 있다. A Basis는 적어도 모집단의 99%가 기계적 허용특성 95%의 신뢰를 가지는 응력이며, B Basis는 적어도 모집단의 90%가 기계적 허용특성 95%의 신뢰를 가지는 응력이다.

순서화된 자료를 $s_1 \leq \dots \leq s_m$ 이라고 할 때, s_i

($i=1, 2, \dots, m$)에 대응하는 누적확률은 순서통계량을 이용하여 구할 수 있다. 확률지에서 각각의 자료값에 대응하는 누적확률을 계산하기 위해서 순서통계량을 오름차순으로 정렬해야 한다.

s_i 에 대응하는 순서통계량을 $X_1 \leq \dots \leq X_m$ 이라고 하면, X_i 는 근사적으로 Eq. 1과 같이 구할 수 있다.

$$E\{X_i\} = \frac{i-c}{m-2c+1} \quad (1)$$

Equation 1에서 s_i 가 정규분포를 따를 경우 $c=0$ 이다.

누적확률을 구할 때, $c=0$ 인 경우 평균순위법(mean ranking)이라 하며 $c=0.3$ 인 경우 메디안순위법(median ranking)이라고 한다. 또한 $c=0.5$ 또는 $c=1$ 인 경우 모드순위법(mode ranking)이라고 한다[3]. 일반적으로 계량값의 분포는 정규분포를 따르므로, 재료의 인장강도와 같은 계량값들은 평균순위법 또는 메디안 순위법을 이용하여 누적확률을 구한다[4].

재료의 응력특성치 분포가 정규분포를 따를 때, 즉 $s \sim N(\mu, \sigma^2)$ 일 때 s 는 응력특성, μ 는 모평균, σ 는 모표준편차라고 하면 파괴확률밀도함수 $f(s)$ 와 파괴누적분포함수(누적확률) $F(s)$ 는 Eq. 2 ~ Eq. 3과 같이 표현된다.

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{s-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$F(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^s \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{s-\mu}{\sigma}\right)^2\right] ds \quad (3)$$

4. 실험결과 및 인장특성 분석

4.1 온도별 기계적 특성 분석

Figure 3과 Fig. 4는 상온 및 고온의 온도조건에서 수행된 인장실험결과 얻어진 하중-변위 선도와 응력-변형률 선도이다.

Table 1은 Fig. 3과 Fig. 4를 바탕으로 각 온도별 10개의 시험편에 대하여 수행된 인장실험에서 얻어진 인장강도(F_{tu}), 항복강도(F_{ty}), 탄성계수(E) 및 연신률(%)값을 정규확률지에 플로팅하여 구해진 각각에 대한 온도별 모평균추정값($\hat{\mu}$), 모표준편차추정값($\hat{\sigma}$) 및 A Basis 강도, B Basis 강도를 정리한 것이다.

Table 1에서 온도가 상승함에 따라 인장강도와 항복강도 및 탄성계수는 낮아지는 것을 알 수 있다. 반면에 연신률은 650 °C 이하의 온도에서는 온도가 상승함에 따라 감소하지만 650~800 °C의 온도에서는 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

Figure 5~Fig. 11은 각 온도조건에서 얻어진 인장강도와 항복강도값을 정규확률지에 플로팅한 것이다. 정규확률지에서 세로축의 50% 점에서 그은 수평선과 회귀선이 교차하는 점을 가로축에서 읽은 값이 모평균추정값($\hat{\mu}$)이며, 세로축의 84.135% 값에 대한 회귀선의 가로축값($\hat{\mu} + \hat{\sigma}$)과 모평균추정값과의 차이를 이용하여 모표준편차추정값($\hat{\sigma}$)을 구할 수 있다.

Table 1. Tensile Properties for AISI 304 Stainless Steel at Room and Elevated Temperatures

| Temp.(°C) | F_{tu} (MPa) | | | | F_{ty} (MPa) | | | | E (GPa) | | Elongation(%) | |
|-----------|----------------|----------------|---------|---------|----------------|----------------|---------|---------|-------------|----------------|---------------|----------------|
| | $\hat{\mu}$ | $\hat{\sigma}$ | A Basis | B Basis | $\hat{\mu}$ | $\hat{\sigma}$ | A Basis | B Basis | $\hat{\mu}$ | $\hat{\sigma}$ | $\hat{\mu}$ | $\hat{\sigma}$ |
| 21 | 691.6 | 7.97 | 674.5 | 682.2 | 322.7 | 7.49 | 305.3 | 313.1 | 199.0 | 8.98 | 78.4 | 0.84 |
| 100 | 562.2 | 3.52 | 554.0 | 557.6 | 268.9 | 3.45 | 260.9 | 264.5 | 187.7 | 7.02 | 52.0 | 0.49 |
| 200 | 502.0 | 3.17 | 494.7 | 497.9 | 233.0 | 4.91 | 221.6 | 226.7 | 183.2 | 3.84 | 44.5 | 1.12 |
| 350 | 492.9 | 10.81 | 470.2 | 480.1 | 202.4 | 3.16 | 195.0 | 198.4 | 173.1 | 7.83 | 42.9 | 0.93 |
| 500 | 448.2 | 3.70 | 439.6 | 443.5 | 182.0 | 3.56 | 173.7 | 177.4 | 167.4 | 3.72 | 36.1 | 0.27 |
| 650 | 327.4 | 10.92 | 302.0 | 313.4 | 156.4 | 4.91 | 145.0 | 150.2 | 151.9 | 5.79 | 31.5 | 0.55 |
| 800 | 170.0 | 7.04 | 153.6 | 160.9 | 113.0 | 5.57 | 100.0 | 105.9 | 111.4 | 5.16 | 43.1 | 1.80 |

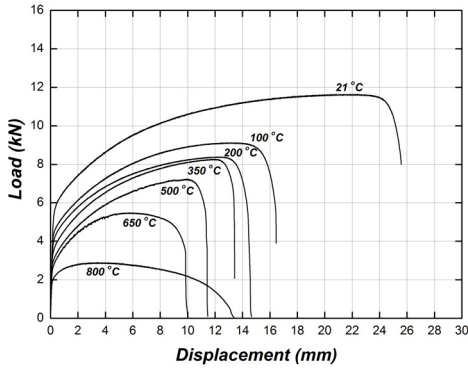


Fig. 3 Load-Displacement Curves for Tensile Test

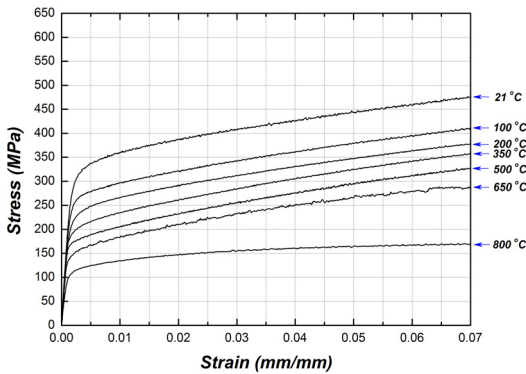


Fig. 4 Stress-Strain Curves for Tensile Test

같은 방법으로 A Basis 인장강도 및 항복강도와 B Basis 인장강도 및 항복강도는 각각 세로축의 1% 및 10% 값을 이용하여 회귀선으로부터 얻을 수 있다.

항공구조설계 시 기계적 허용특성 99%를 만족시키려면 A Basis 강도, 기계적 허용특성 90% 만족시키려면 B Basis 강도를 적용하면 된다.

Table 2는 Fig. 4~Fig. 12의 각 온도별 인장강도 및 항복강도와 누적확률과의 선형정도를 나타내는 상관계수(correlation coefficient, r)이다.

상관계수(r)은 $-1 \leq r < 1$ 의 값을 가지며 $0 < r < 1$ 인 경우 양의 상관관계를, $-1 < r < 0$ 인 경우 음의 상관관계를 나타낸다. 또한 $r = \pm 1$ 인 경우 모든 점은 일직선상에 위치한다[5]. 그러므로 정규확률지에 플롯팅 된 데이터의 상관계수로 정규분포를 따르는지 여부를 결정할 수 있다.

Table 2에서 인장강도와 항복강도에 대한 상관계수가 비교적 높은 값을 보이기 때문에 자료값은 정규확률지 상에서 선형적 특성을 나타낸다고 할 수 있으므로 계량값인 실험 데이터가 정규분포를 따른다는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Correlation Coefficients for F_{tu} and F_{ty}

| Temp. (°C) | r for F_{tu} | r for F_{ty} |
|------------|------------------|------------------|
| 21 | 0.9887 | 0.9333 |
| 100 | 0.9006 | 0.8499 |
| 200 | 0.9804 | 0.9376 |
| 350 | 0.9467 | 0.8072 |
| 500 | 0.9781 | 0.8548 |
| 650 | 0.9427 | 0.8401 |
| 800 | 0.9320 | 0.9301 |

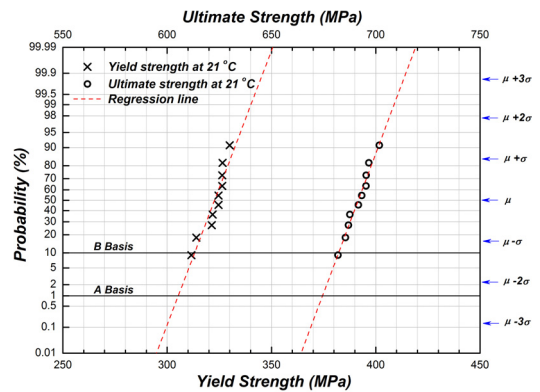


Fig. 5 Normal Probability Paper for F_{tu} and F_{ty} at 21 °C

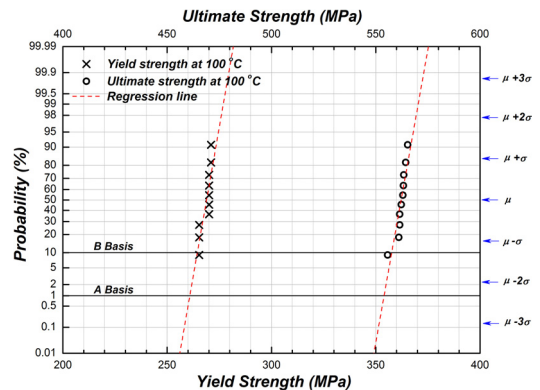


Fig. 6 Normal Probability Paper for F_{tu} and F_{ty} at 100 °C

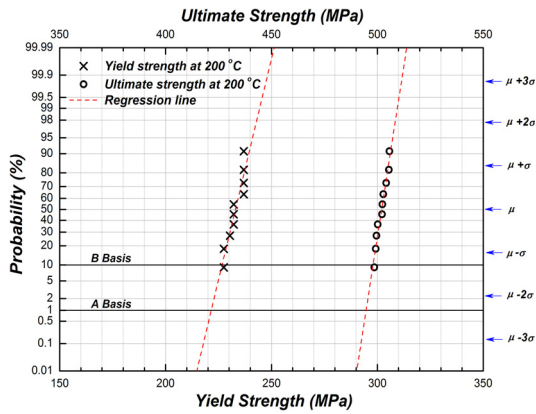


Fig. 7 Normal Probability Paper for F_{tu} and F_{ty} at 200 °C

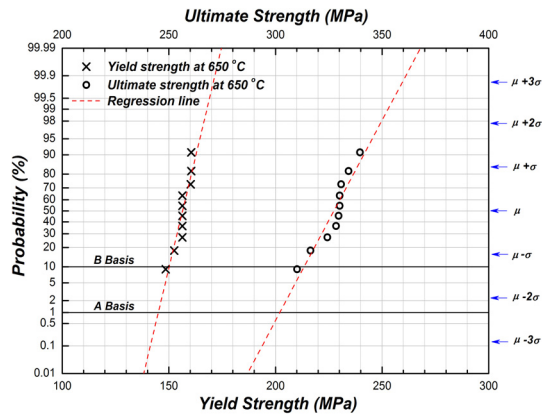


Fig. 10 Normal Probability Paper for F_{tu} and F_{ty} at 650 °C

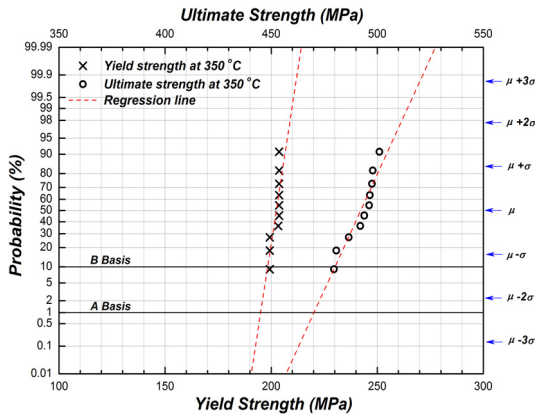


Fig. 8 Normal Probability Paper for F_{tu} and F_{ty} at 350 °C

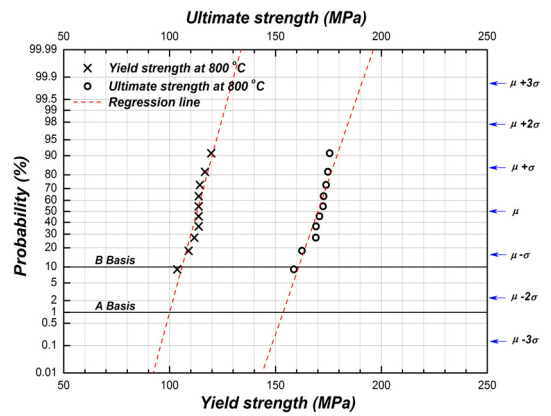


Fig. 11 Normal Probability Paper for F_{tu} and F_{ty} at 800 °C

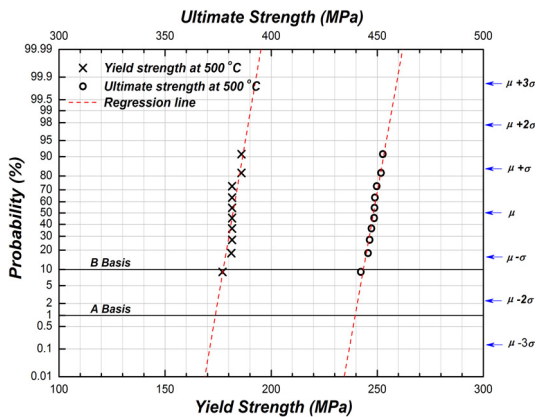


Fig. 9 Normal Probability Paper for F_{tu} and F_{ty} at 500 °C

6. 결 론

본 연구에서 항공구조재로 널리 사용되고 있는 AISI 304강에 대하여 21 °C, 100 °C, 200 °C, 350 °C, 500 °C, 650 °C 및 800 °C의 온도조건에서 인장실험을 ASTM 규정에 기술된 방법으로 수행하였다. 실험결과 각 온도조건에서 인장강도, 항복강도, 탄성계수, 연신률에 대한 기계적 특성을 분석하였다. 정규확률지에 인장강도와 항복강도를 플로팅하고 상관계수를 구한 결과 정규분포를 따름을 확인할 수 있었다. 정규확률지를 이용하여 인장강도와 항복강도의 모평균 추

정값 및 모표준편차 추정값을 구하였으며, A Basis와 B Basis의 인장강도와 항복강도를 구하였다. 같은 방법으로 탄성계수와 연신률의 모평균 추정값과 모표준편차 추정값을 정규확률지를 이용하여 구하였다.

AISI 304강의 상온/고온 인장특성에 관한 연구로부터 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 신뢰성 해석결과 인장강도, 항복강도와 탄성계수는 온도가 증가함에 따라서 감소한다.
- 2) 연신률은 650 °C 이하에서 온도가 증가함에 따라 감소하지만 650~800 °C의 온도에서는 증가한다.
- 3) 정규확률지를 이용한 신뢰성 해석에서 상관계수가 비교적 높은 선형적 특성을 보이므로 계량값인 인장실험데이터가 정규분포를 따르는

것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. ASTM E8, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, 2004, pp.1-24
2. ASTM E21, Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials, ASTM International, 2005
4. 송지호, 박준협, 기계계열 학생을 위한 신뢰성공학 입문, 2007
5. 이상용, 신뢰성공학, 형설출판사, 1999
6. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 1995