



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

고온에서 Alloy 800H의 저사이클 피로
특성에 대한 통계적 변동성에
관한 연구



2021년 8 월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 설 계 공 학 과

오 세 희

공 학 석 사 학 위 논 문

고온에서 Alloy 800H의 저사이클 피로
특성에 대한 통계적 변동성에
관한 연구

지도 교수 김 선 진

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2021년 8 월

부 경 대 학 교 대 학 원

기 계 설 계 공 학 과

오 세 희

오세희의 공학석사 학위논문을 인준함.

2021년 8 월 27 일



주 심 공학박사 김 병 탁 (인)

위 원 공학박사 김 찬 중 (인)

위 원 공학박사 김 선 진 (인)

목 차

Abstract	iii
 제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적	4
 제 2 장 이론적 배경	5
2.1 저사이클 피로	5
2.2 변형률-수명 접근법	8
2.2.1 단순 응력-변형률 거동	8
2.2.2 반복 응력-변형률 거동	10
2.2.3 반복 하중 하에서 재료의 변화	13
2.3 기술통계학	15
2.4 Weibull 확률분포(Weibull distribution)	17
 제 3 장 실험 방법 및 절차	21
3.1 재료 및 시험편	21
3.1.1 시험편 재료	21
3.1.2 시험편 채취 및 제작	24
3.2 실험 장비 및 방법	25
3.2.1 실험 장비	25

3.2.2 실험 조건 및 방법	27
제 4 장 실험 결과 및 고찰	30
4.1 저사이클 피로 시험 조건의 확인 및 반복성	30
4.2 현상론적 반복 응력 반응 거동	32
4.3 현상론적 반복 응력-변형률 거동	39
4.4 저사이클 피로 특성의 통계적 변동성	44
4.4.1 반복 응력 데이터의 통계적 변동성	44
4.4.2 반복 응력-변형률 데이터의 통계적 변동성	49
4.4.3 저사이클 피로 수명의 통계적 변동성	59
제 5 장 결 론	71
참고문헌	72

A Study on Statistical Variability for Low Cycle Fatigue
Properties of Alloy 800H at High Temperature

Sae - Hee Oh

Department of Mechanical Design Engineering
The Graduate School
Pukyong National University

Abstract

Alloy 800H, an austenitic Fe-Ni-Cr alloy with higher Ni and Cr contents than conventional stainless steels, is one of the candidate materials for key structural components such as control rod systems, hot gas duct, core barrels, core supports, and a shut-down cooling systems for the very high temperature reactor (VHTR) systems. The start-up and shut-down, and power transmission of the reactors cause low cycle fatigue (LCF) and creep-fatigue (C-F). The research results of many scholars have been published in the literature on the characterization of low cycle fatigue and creep-fatigue properties of Alloy 800H. However, most of their research works are the deterministic study about the low cycle fatigue properties. It is well known that a significant scatter of the cyclic stress-strain responses was observed for a nuclear reactor material, steel pipe weld metal.

The statistical nature of the data for low cycle fatigue properties of Alloy 800H has not investigated in the past studies. Therefore, it is valuable to investigate the statistical variability of the low cycle fatigue

properties of Alloy 800H at high temperature.

The purpose of this study is to investigate the statistical variability of low cycle fatigue properties of Alloy 800H at a high temperature of 850°C. Specially, the variability associated with the low cycle fatigue properties in a mid-life hysteresis loops for data and fatigue life are examined. In this study, the strain-controlled constant amplitude low cycle fatigue tests at a high temperature of 850°C were performed on six identical specimens of Alloy 800H in accordance with ASTM standards E606 at a strain rate of 1×10^{-3} . All the low cycle fatigue tests are performed at constant total strain range value of 0.6% with a cyclic strain ratio R of -1.

In this test conditions, the cyclic stress-response behavior showed cyclic softening phenomenon. The stress amplitude at the mid-life follows 2-parameter Weibull distribution. The shape parameter was estimated the value of 36. The plastic strain amplitude also follows 2-parameter Weibull distribution. And, the shape parameter was estimated the value of 70. Namely, the statistical variabilities for the stress amplitude and plastic strain amplitude at the mid-life in Alloy 800H at a high temperature of 850°C were known a little. However, the fatigue life have a larger scatter than those of the stress amplitude and plastic strain amplitude. The fatigue life also follows well 2-parameter Weibull distribution. And, the shape parameter was estimated the value of 8.7.

Consequently, although the stress amplitude and plastic strain amplitude have a variability, the repeatability have excellent. However, the fatigue life have a significant scatter with the coefficient of variation Of 14%.

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 필요성

기존의 원자력발전소보다 경제성을 향상함과 동시에 안전성까지 획기적으로 증가시킬 수 있는 새로운 개념의 원자로가 국제 공동으로 선정되어 설계, 개발되고 있다. 이 새로운 개념의 설계는 기존 제3세대에서 진보된 모델로 분류되어 제4세대(Generation IV 혹은 Gen-IV)로 명명되었으며, 2030 ~ 2040년경에 상업로 건설을 목표로 연구, 개발되고 있다. GIF(Generation IV International Forum)에 의해 선정된 제4세대 원자로의 노형에는 6가지 노형이 선정되어 연구 개발되고 있으며, 이 6개의 신개념 원자로에는 초고온가스로(VHTR), 가스냉각고속로(GFR), 소듐냉각고속로(SFR), 용융염로(MSR), 납냉각고속로(LFR) 및 초임계수냉각로(SCWR)가 있다.⁽¹⁾

제4세대 원자로는 제3세대 원자로보다 더 높은 안전성을 가지고 있으며 대한민국, 중국, 미국, 일본 등 여러 나라가 공동으로 개발되고 있다. 그리고 제4세대 원자로의 신뢰성과 안전성, 경제성과 지속성을 추구하고 있다. 이러한 목표들을 달성할 수 있다면 현재의 원자력발전소가 가지고 있는 여러 문제점을 완화시킬 수 있거나 해결할 수 있으리라 예상하고 있다.⁽²⁾

위에서 언급한 Gen-IV 원자력 시스템의 6개의 후보 노형 중 초고온가스로(VHTR, Very High Temperature Reactor)는 전기 및 수소의 경제적 생산에 가장 유망한 노형으로 주목받고 있다.⁽³⁾ 초고온가스로의 예상 출구 온도가 950℃이므로 높은 열에너지를 이용하며 이산화탄소를 배출하지 않고도 많은 수소와 전기를 생산할 수 있는 장점이 있다. Fig. 1-1은 초고온가스로의 주요 부품을 나타낸 것이다.^(2,4)

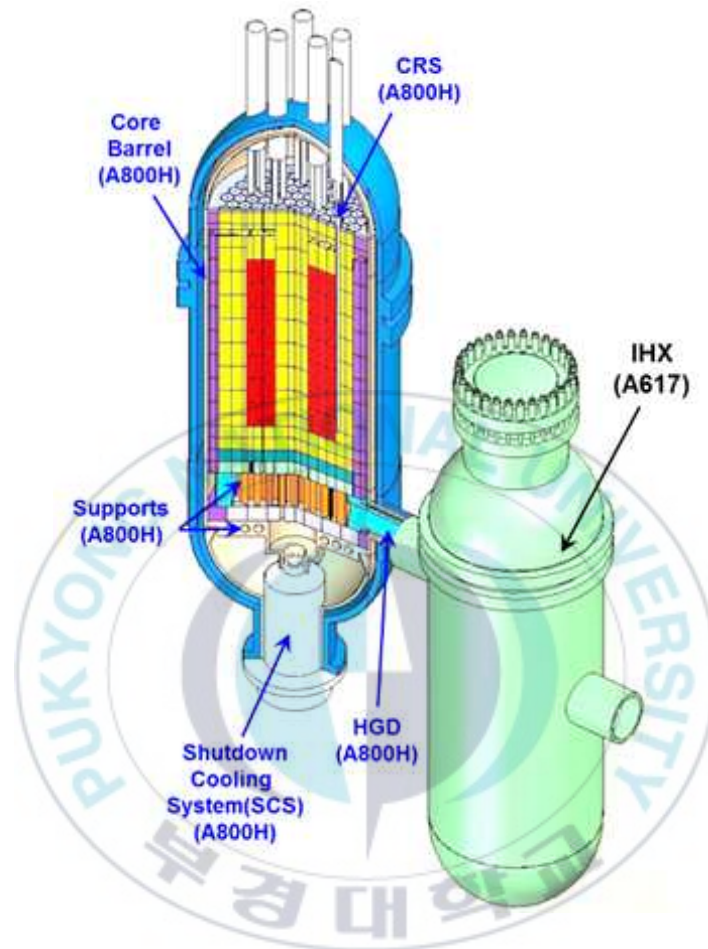


Fig. 1-1 Main components of the Very High Temperature Reactor (VHTR) system

Alloy 800H는 초고온가스로의 고온 가스 덕트(hot gas duct), 코어 배럴 (core barrel), 코어 지지대(core supports) 및 냉각시스템(shutdown cooling system)과 같은 구조 부품의 후보 재료 중의 하나이다.^(4,5) 초고온가스로는 장시간 초고온 고압 환경에서 운전되도록 설계되며 원자로의 기동과 중지 및 동력 전달은 부재에 저사이클 피로 와 크리프-피로 하중을 유발하게 된

다.⁽⁶⁾ 따라서 고온에서 원자로의 안전한 설계와 건전성 평가를 위해서는 고온에서 사용되는 재료의 설계 요구조건과 더불어 초고온 환경에서의 저사이클 피로 와 크리프-피로에 대한 특성의 이해와 데이터의 축적 등의 연구가 선행되어야 한다.

이러한 관점에서 국제적으로 많은 연구자들은 Alloy 800H의 재료에 대하여 저사이클 피로 와 크리프-피로 거동에 관한 연구를 수행하여 왔다. Kolluri 등은 800℃에서 Alloy 800H의 고온 인장, 저사이클 피로 와 크리프-피로에 관한 연구를 수행하였다.⁽⁷⁾ Kaae는 온도 범위 22-760℃에서 Alloy 800H에 대한 저사이클 피로 시험을 변형률 제어 2%-0.3%의 범위에서 수행한 결과를 보고하였다.⁽⁸⁾ 특히 Rao 등은 750℃에서 950℃의 온도 범위에서 Alloy 800H에 대한 저사이클 피로 시험을 변형률 속도와 변형률 형태 (slow-slow, fast-fast, slow-fast, fast-slow)가 다름에 따라서 저사이클 피로 거동에 미치는 영향에 대해서 평가한 결과를 보고하였다.⁽⁹⁾ 한편, 국내에서도 본 재료에 대한 700℃~850℃의 고온 환경에서의 저사이클 피로 와 크리프-피로에 관한 연구를 수행하여 왔다. Rando 등은 700℃에서 Alloy 800H의 GTAW 용접재에 대한 저사이클 피로 시험을 수행하여 모재의 경우와 비교하여 저사이클 피로 특성과 크리프-피로 특성을 연구하였다.⁽¹⁰⁾ 또한 샤위언 등은 850℃의 고온에서 Alloy 800H 모재 및 용접재의 저사이클 피로 거동을 고찰하여 피로 수명과 반복 응력 변형률 거동에 미치는 전 변형률 범위에는 강한 영향이 있음을 보고하였다.⁽¹¹⁾ 이상과 같이 이들 피로 연구의 대부분이 동일 조건에서 하나 혹은 수개의 실험치의 평균을 이용하여 저사이클 피로 특성을 평가하였다.

따라서 동일 온도 동일 조건하에서의 고온 저사이클 피로 특성에 대한 통계적 변동성을 고찰하는 것은 구조 부재의 피로 해석 설계 및 신뢰성 해석에 중요한 기여를 하리라 기대된다.

1.2 연구 목적

기계·구조물의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위한 설계 및 해석을 수행하는 경우에는 구조 부재의 재료 강도도 하나의 확률변수로 고려하여 확률·통계적으로 취급하는 것이 중요하다. 일반적으로 금속재료의 재료 강도는 통상 몇 개의 시험편 또는 수점의 측정치의 평균이 채용되는 경우가 많다.⁽¹²⁾ 이들에서 이해할 수 있듯이 이들은 확정치가 아닌 산포를 나타내는 하나의 확률변수이다. 이들의 원인으로는 시험편 및 시험기 등의 시험 조건의 불량이나 실험자의 시험 기술의 부족 등도 있지만, 동일한 하중조건과 환경조건 하에서도 재료 화학성분의 산포, 열처리 조건의 불균일, 시험편의 가공 방법이나 잔류응력 등의 산포, 그리고 기계적 성질 고유의 산포 등 여러 가지가 있을 수 있다.⁽¹²⁾ 일반적으로 정적 강도, 즉 인장강도나 항복강도의 경우 통상 5~10%의 변동계수를 나타내는 것으로 알려져 있지만, 피로 수명의 경우는 이보다 높은 변동계수를 나타내는 것으로 알려져 있다. 피로 수명의 평균과 분산뿐만 아니라 그 확률분포는 잘 제어된 동일 작용하중의 형태 및 크기에도 불구하고 재료의 미세조직 등 내적 불확정적 요인에 의하여 본질적으로 확률적인 변동을 하는 것으로 알려져 있다.

본 연구의 목적은 초고온가스로의 주요 구조 부품의 후보 재료인 Alloy 800H에 대한 850℃ 고온에서 저사이클 피로 특성에 대한 통계적 변동성을 고찰하기 위하여, 하나의 동일 온도 동일 전 변형률 범위 조건에서 6개의 시험편에 대하여 완전 양진 연속 변형률 제어 저사이클 피로 시험을 주의 깊게 수행하여 저사이클 피로 성질의 통계적 변동성에 대하여 고찰하고자 하였다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 저사이클 피로(Low Cycle Fatigue, LCF)

피로(Fatigue)는 변동 하중 및 반복 하중이 작용하는 구조물 또는 부재에서 발생하는 파손의 일종이며, 항복강도(Yield Strength, YS) 및 인장강도(Ultimate Tensile Strength, UTS)보다도 낮은 응력 상태에서 일어나는 파손이다.

피로에 대한 정의를 좀 더 명확하게 표현하게 되면, 피로 현상이란 변화되는 변형이나 하중 등에 영향을 받고 있는 재료의 어떤 지점이나 영역 등에서 발생하는 구조적이고 영구적인 변화가 국부적(localized) 형태로 점진적으로 진행되어(progressive)가는 하나의 과정이라고 표현할 수 있다. 국부적이 갖는 의미는 피로 과정이 구조물 전체를 통하여 발생하는 현상보다는 매우 미소한 영역에서 발생된다는 것을 의미하고, 점진적으로 진행되어가는 이 갖는 의미는 하중의 작용과 함께 피로 현상이 즉시 발생하는 현상이 아닌 어느 정도 시간이 지난 후에 발생됨을 의미한다.

피로에는 파단 사이클, 즉 파단까지의 반복 수(Number of Cycles to Failure)를 기준으로 피로를 분류하면, **Fig. 2-1**과 같이 크게 저사이클 피로(Low Cycle Fatigue, LCF) 또는 고사이클 피로(High Cycle Fatigue, HCF)의 2개로 나눌 수 있고, 보통 $10^4 \sim 10^5$ cycle을 기준으로 구분한다. LCF와 HCF의 천이 영역의 반복 수는 재료에 따라 다르게 된다. 피로를 파단 사이클에 따라 분류하면, LCF와 HCF, 그리고 $10^8 \sim 10^9$ cycle 이상에서 파괴되는 것을 초 고사이클 피로(Ultra-High Cycle Fatigue, UHCF)와, 20 ~ 100 사이클 이하에서 파괴되는 피로를 극 저사이클 피로(Extremely-Low Cycle

Fatigue, ELCF 혹은 Very-Low Cycle Fatigue, VLCF)라 하며 4개로 분류할 수 있다.

저사이클 피로는 **Fig. 2-2**와 같이 비교적 큰 하중을 받는 부재나 노치가 있는 부재에 대해 변형률-수명(Strain-Life, $\epsilon-N$)방법의 접근법이 적당하고, 고사이클 피로는 재료의 탄성한도 내의 경우이므로 응력-수명(Stress-Life, $\sigma-N$) 접근법을 이용하는 것이 적절하다.

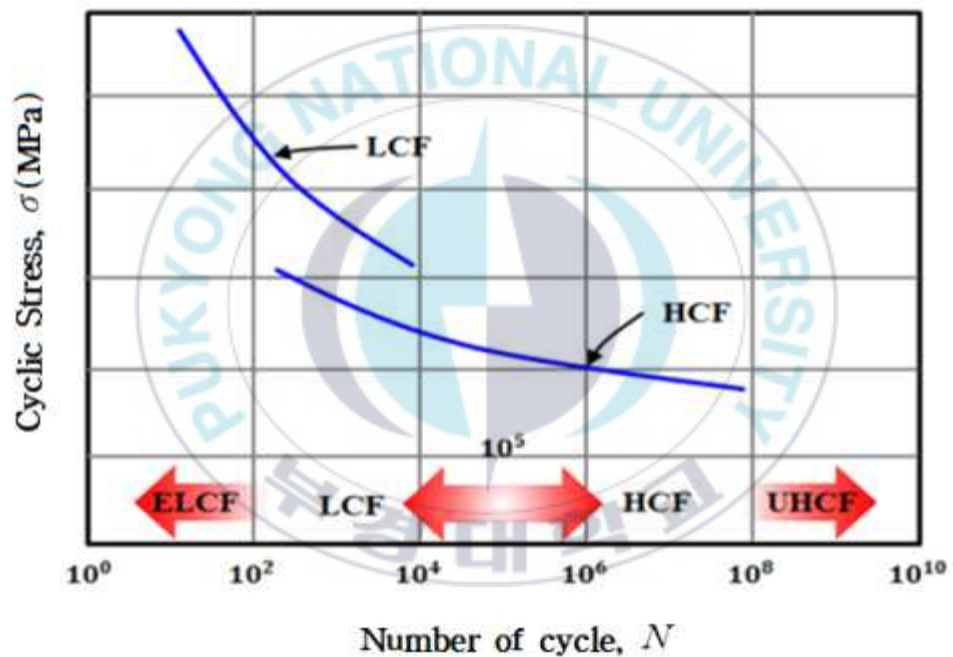


Fig. 2-1 A typical plot of fatigue region

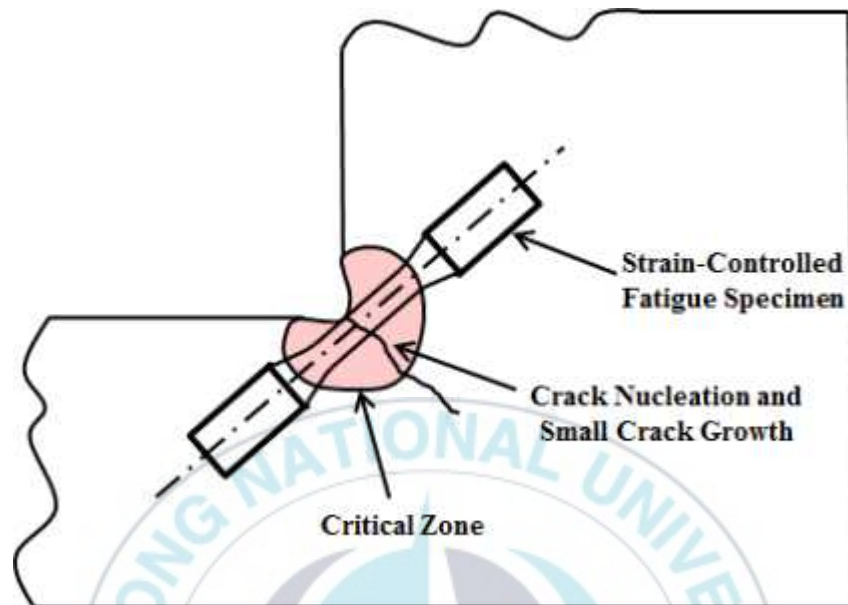


Fig. 2-2 Concept of the local strain-life approach

2.2 변형률-수명 접근법⁽¹³⁾

2.2.1 단순 응력-변형률 거동

일반적으로 시험편의 단순 인장시험은 재료의 공칭응력-변형률 거동을 결정할 때 사용된 것이다. 저탄소강 및 구조용 강은 인장 시 보편적으로 **Fig. 2-3**에 나타낸 응력-변형률 선도를 그리게 된다. 재료의 항복강도를 넘어 임의의 위치 P에서 하중을 없애면 영구변형과 회복되는 구간이 있으며, 이것을 식으로 나타내면 식 (2-1)과 같다.

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (2-1)$$

여기서, ϵ_t 는 전 변형률(Total Strain)이며 ϵ_e 는 탄성변형(Elastic Strain)이고 ϵ_p 는 소성 변형률(Plastic Strain)이다. 금속 대부분은 전 응력 대 전 소성 변형률을 log-log 좌표로 나타내면 직선으로 나타나게 된다. 결과적으로 이 선도는 지수함수로 나타내게 되면 식 (2-2), 식 (2-3)과 같다.

$$\sigma = K(\epsilon_p)^n \quad (2-2)$$

혹은

$$\epsilon_p = \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \quad (2-3)$$

여기서, K는 강도계수(Stress Coefficient), n은 변형률 경화 지수(Strain Hardening Exponent)이다. (Elastic Strain)은 Hooke's 법칙을 만족하므로 식 (2-4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{E} \quad (2-4)$$

따라서, 단순 응력 전에서의 전 변형률은 식 (2-3)과 식 (2-4)를 식 (2-1)에 대입하면 다음의 식 (2-5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{1/n} \quad (2-5)$$

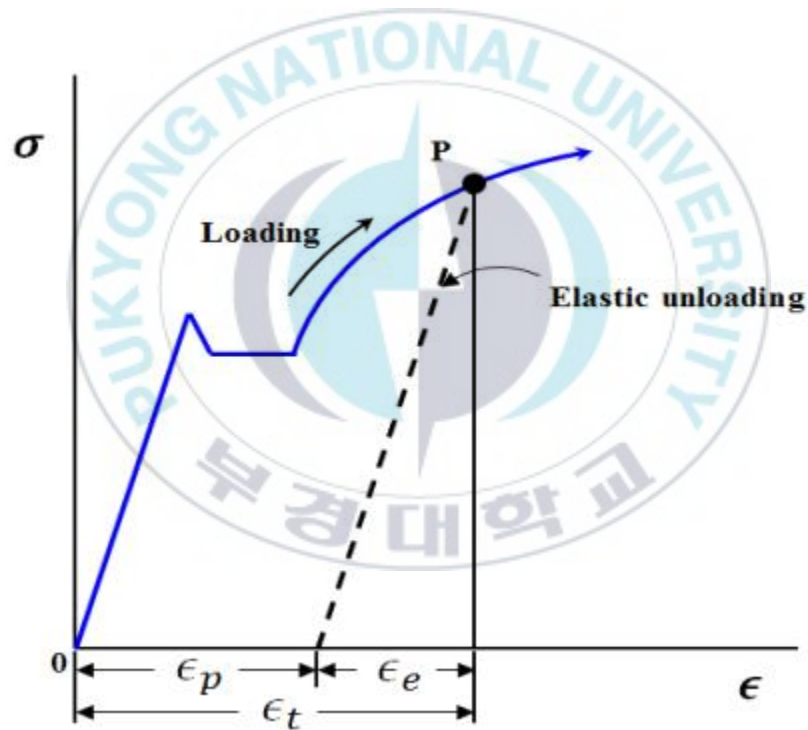


Fig. 2-3 Elastic and plastic strain

2.2.2 반복 응력-변형률 거동(Cyclic Stress Strain Behavior)

단순 응력-변형률 선도는 정적 하중을 받는 공업적 구조물과 부재의 설계 변수를 얻을 때 사용되며, 반복 응력-변형률 선도는 반복 하중을 받는 구조물의 내구성을 평가할 때 사용된다.

재료가 반복적인 비탄성 하중을 받아서 나타낸 반응 거동 결과는 **Fig. 2-4**의 히스테리시스 루프의 형태로 나타낼 수 있다. 그림의 전체 높이는 응력 범위이며 폭은 변형률 범위이다. 그리고 루프 안쪽의 면적은 한 사이클 동안 사용되는 단위 체적당의 에너지로 재료가 받는 소성변형의 정도를 나타나게 된다. 이는 진폭의 향으로 나타낼 수 있으며 식 (2-6), 식 (2-7)과 같이 나타낸다.

$$\epsilon_a = \frac{\Delta\epsilon}{2} \quad (2-6)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (2-7)$$

여기서, ϵ_a 와 σ_a 는 각각 변형률 진폭(Strain Amplitude)과 응력 진폭(Stress Amplitude)이다. 그리고 전 변형률 진폭(Total Strain Amplitude)은 탄성 변형률 진폭($\Delta\epsilon_e$)과 소성 변형률 진폭($\Delta\epsilon_p$)의 합으로 식 (2-8)과 같이 나타낸다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \quad (2-8)$$

인장과 압축의 반복 응력을 받는 금속재료의 경우에는 **Fig. 2-5**와 같은 바우싱거 효과(Bauschinger Effect)를 관찰할 수 있으며 바우싱거 효과(Bauschinger Effect)는 재료의 항복점을 넘어 압축 응력을 받을 때 압축 항복강도에 도달하기 전 소성변형이 나타나는 현상이다.

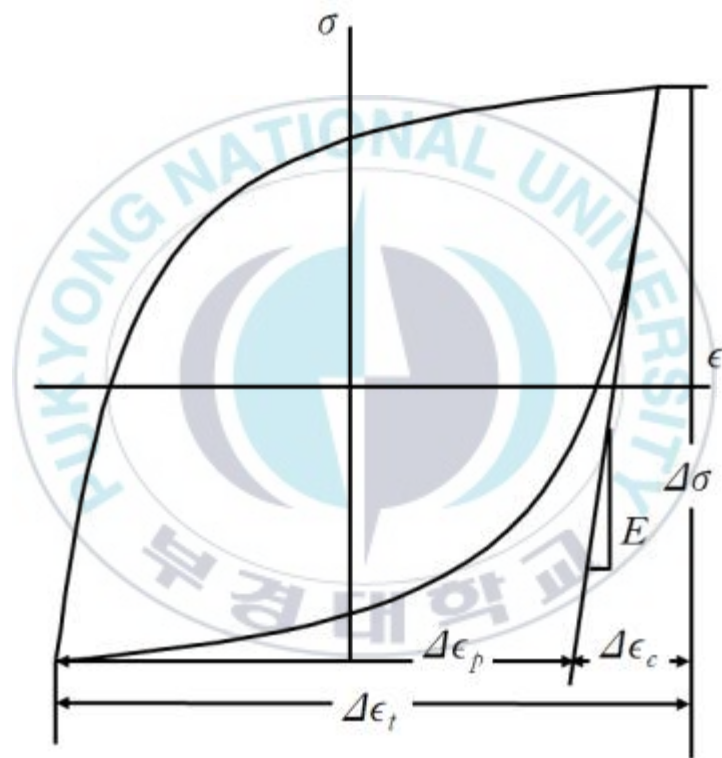


Fig. 2-4 Hysteresis loop for elastic strain and plastic strain

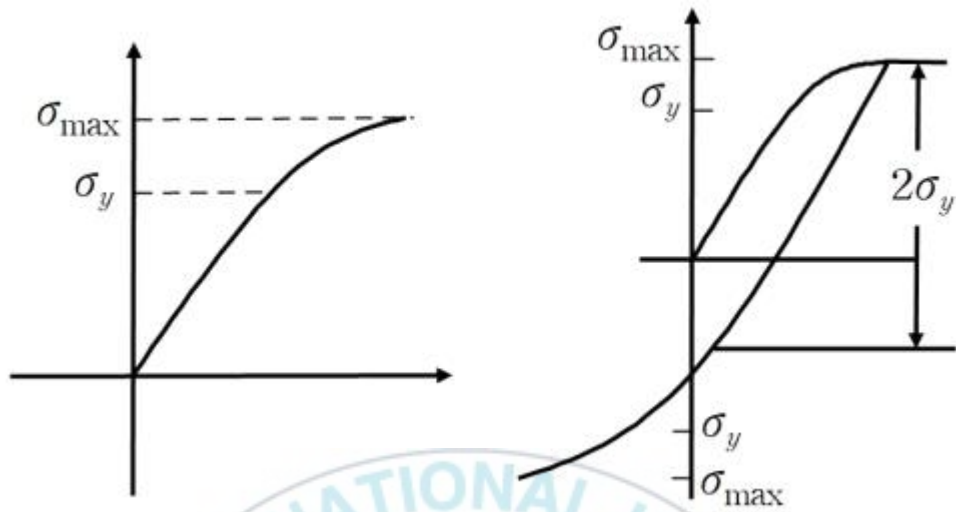


Fig. 2-5 Bauschinger effect

2.2.3 반복 하중 하에서 재료의 변화

금속재료의 응력-변형률 거동은 각종 반복 하중으로 인해 변화할 수 있으며, 응력-변형률 거동은 일반적으로 다음과 같이 거동한다.

1. 반복적인 경화
2. 반복적인 연화
3. 반복적인 안정화
4. 복합 거동 (변형률 범위에 의존한 연화 혹은 경화)

일반적으로 연한 재료는 하중 반복에 따라 항복강도가 증가하는 경향을 보이며 경한 재료는 항복강도가 감소하는 경향으로 나타난다. 첫 번째와 같은 경향을 반복적인 경화(cyclic hardening)현상이라 하고, 두 번째와 같은 경향을 반복적인 연화(cyclic softening)현상이라 한다. **Fig. 2-6**과 **Fig. 2-7**은 반복 경화와 반복 연화 현상을 나타내고 있다.

Fig. 2-6은 하중의 반복에 따라 변형률에 대응하는 응력 값이 증가하게 되며 이는 하중 반복에 따른 재료의 경도가 상승되기 때문에 나타나는 현상이다. **Fig. 2-7**은 응력 값이 사이클의 증가에 따라 감소되는 것을 볼 수 있으며 이는 반복적인 응력에 따라 재료가 연화되어 나타나는 현상이다.

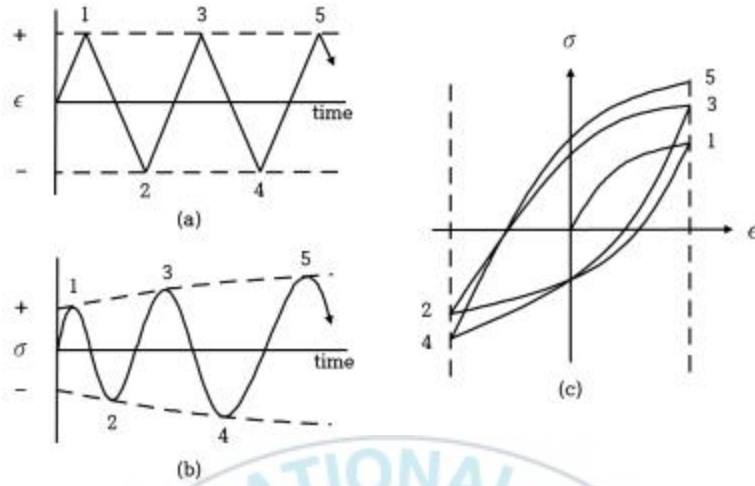


Fig. 2-6 Cyclic hardening : (a) constant strain amplitude, (b) stress response (increasing stress level), (c) cyclic stress-strain response

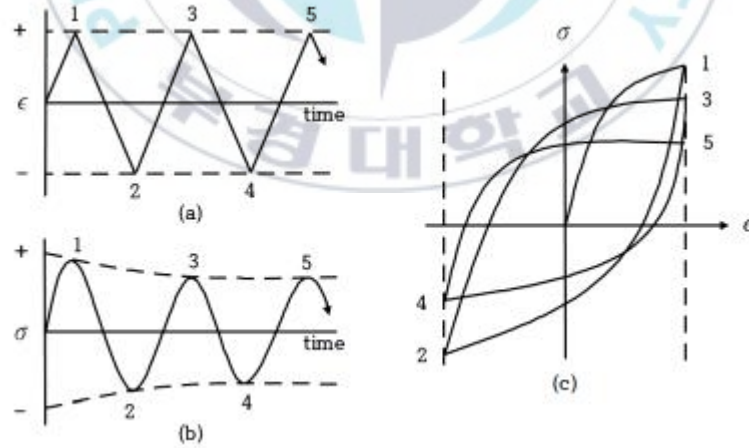


Fig. 2-7 Cyclic softening : (a) constant strain amplitude, (b) stress response (decreasing stress level), (c) cyclic stress-strain response

2.3 기술통계학⁽¹⁴⁾

기술통계학(Descriptive Statistics)은 영국의 피어슨(Pearson, K., 1857-1936)에 의해 완성되었으며, 측정이나 실험에서 수집한 데이터의 정리, 요약, 해석, 표현 등을 통하여 자료의 특성을 규명하게 되는 통계적 방법이다. 기술 통계량의 종류로는 중심경향성(Central Tendency), 산포도(Dispersion), 분포(Distribution), 백분위(Percentile) 등이 있다.

중심 경향치는 통계학에서 측정이나 실험에서 얻어진 데이터를 도표화 하게 되면 많은 자료들이 어떠한 특정 값으로 몰리는 현상을 보이며, 이를 중심 경향치라 한다. 중심 경향치는 중심값 혹은 집중 값으로 표현하기도 하며, 중심값은 실험의 결과를 대표하는 집중 값으로 **Fig. 2-8**의 정규분포(Normal distribution)에서 평균(Mean), 중앙값(Median), 최빈값(Mode) 등으로 나타낼 수 있다.

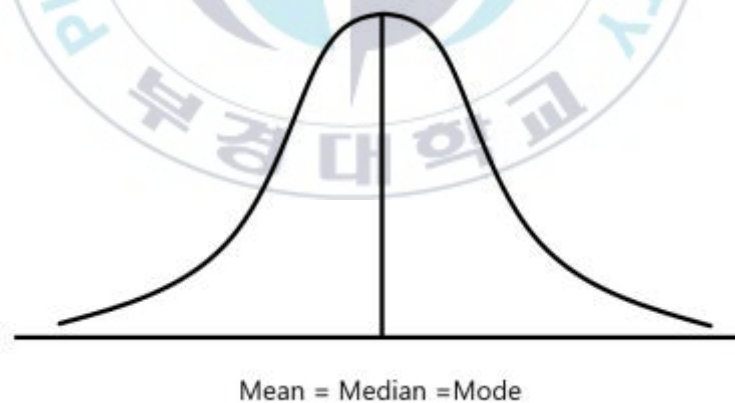


Fig. 2-8 Normal distribution

산포도는 대표 값 하나만으로 자료에 대하여 분포를 설명할 수가 없기 때문에 자료가 대표 값으로부터 얼마나 흩어져 분포되어 있는지를 나타낼 수 있다. 산포도를 나타내는 척도에는 범위(Range), 평균편차(Mean Deviation), 분산(Variance), 사분위편차(Quartile Deviation), 표준편차(Standard deviation), 표준오차(Standard error), 변동계수(Coefficient of variation) 등이 있다. 이중 사분위편차는 사분위 간 범위에 대한 평균이며, 사분위 간 범위란 상사분위수(Q_u)에서 하사분위수(Q_L)를 차감한 것으로 사분위 편차의 계산식은 다음 식 (2-9)와 같다.

$$Q = \frac{1}{2}(Q_3 - Q_1) \quad (2-9)$$

표준오차는 표본의 평균 분포의 표준편차 및 표본평균과 모평균 간의 표준 간격을 측정한 것으로 다음 식 (2-10)과 같다.

$$SE_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2-10)$$

2.4 Weibull 확률분포(Weibull distribution)^(14~19)

Weibull 분포는 강구 재료의 파괴 연구에 관하여 1939년 스웨덴의 W. Weibull이 고안한 분포로 오늘날의 신뢰성공학에 있어 가장 많이 사용되는 확률분포 중 하나이다.

Weibull 분포는 다음의 식 (2-11)과 같은 확률분포함수를 갖는 분포이다.

$$F(x)=1-\exp\left\{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right\}, \quad (x \geq \gamma \geq 0) \quad (2-11)$$

여기서, 분포의 형상을 특정 짓는 α 는 형상 계수(shape parameter)이고, 특수 수명을 나타내는 β 는 척도 계수(scale parameter)이다. 위치(또는 최소수명)를 나타내는 γ 는 위치 계수(location parameter)이다. 그밖에 α 는 무차원의 량이고, β, γ 는 각각 x 와 같은 차원의 량이다.

Weibull 분포의 확률밀도함수는 다음 식 (2-12)와 같다.

$$f(x)=\frac{\alpha}{\beta}\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}\exp\left\{-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right\} \quad (2-12)$$

이들을 3-parameter Weibull 분포라 하고, 특히 $\gamma=0$ 의 경우를 2-parameter Weibull 분포라 한다.

다음, 2-parameter Weibull 분포에 대하여 평균과 분산은 다음 식 (2-13), 식 (2-14)와 같이 구할 수 있다.

$$\mu = \int_0^x x f(x) dx = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (2-13)$$

$$\sigma^2 = \int_0^x x^2 f(x) dx - \mu^2 = \beta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right] \quad (2-14)$$

여기서, Γ 는 감마함수(gamma function)이다. 따라서 변동계수는 다음 식 (2-15)와 같다.

$$\eta = \frac{\sigma}{\mu} = \left[\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)}{\left\{ \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right\}^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-15)$$

형상 계수 α 와 변동계수 η 는 근사적으로 다음의 관계가 성립된다.

$$\eta \equiv \frac{1}{\alpha} \quad (2-16)$$

식 (2-16)은 분포의 계수를 적용하여 변동계수를 파악하는 데 도움이 된다.

한편, Weibull 분포의 신뢰도함수와 고장률함수는 각각 다음 식 (2-17), 식 (2-18)과 같다.

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right\} \quad (2-17)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \quad (2-18)$$

식 (2-18)에서 $t-\gamma=\beta$ 이면, 신뢰도 $R(t)=e^{-1}=0.368$, 즉 $F(x)=0.632$ 가 되며, 이를 특성 수명이라 한다. 특성 수명은 63.2%가 고장이 나는 시간, 즉 $t=\beta+\gamma$ 를 의미한다.

$\beta=1, \gamma=0$ 에 대하여 Weibull 분포의 확률밀도함수로 나타내게 되면 Fig. 2-9와 같이 되며, 형상 계수 α 의 값에 의해 분포의 형이 변함을 알 수 있다. β 가 가해진다 해도 종축의 신축만 있게 되고 본질적인 분포의 형상은 변화되지 않는다. 그리고 이에 상응하는 고장률의 함수를 Fig. 2-10에 나타내었다. 그림에서 나타나듯이 형상 계수 α 는 분포의 형을 결정하는 계수이다.

- ① $\alpha=1$ 이면 고장률함수는 일정형 고장률(CFR)이 되며, 고장확률 밀도함수는 지수분포에 대응한다.
- ② $\alpha < 1$ 이면 고장률함수는 감소형 고장률(DFR)에 대응한다.
- ③ $\alpha > 1$ 이면 고장률함수는 증가형 고장률(IFR)이 되며, 고장확률 밀도함수는 α 가 2 또는 3.5일 때 각각 Rayleigh 분포 및 정규분포에 대응한다.

이와 같이 Weibull 분포는 다양한 고장률함수에 대응한다는 점에서 실용상 대단히 편리하다.

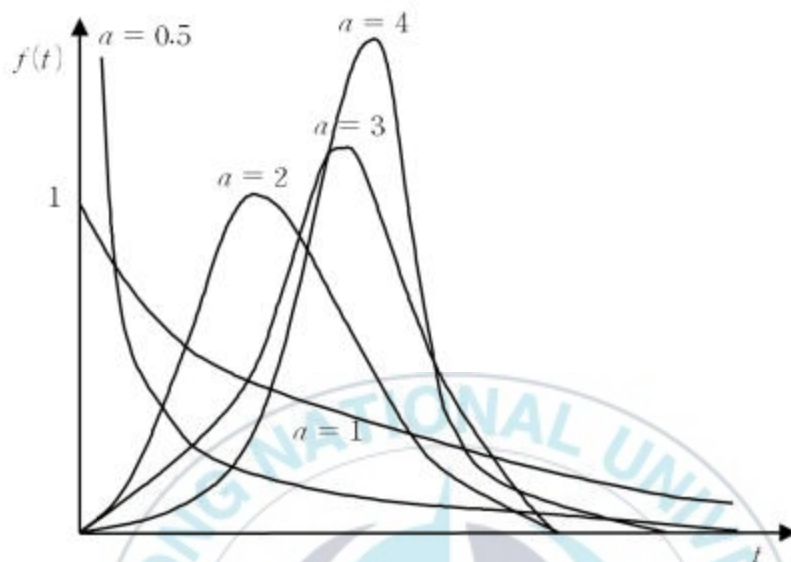


Fig. 2-9 Probability density function of 2-parameter Weibull distributio

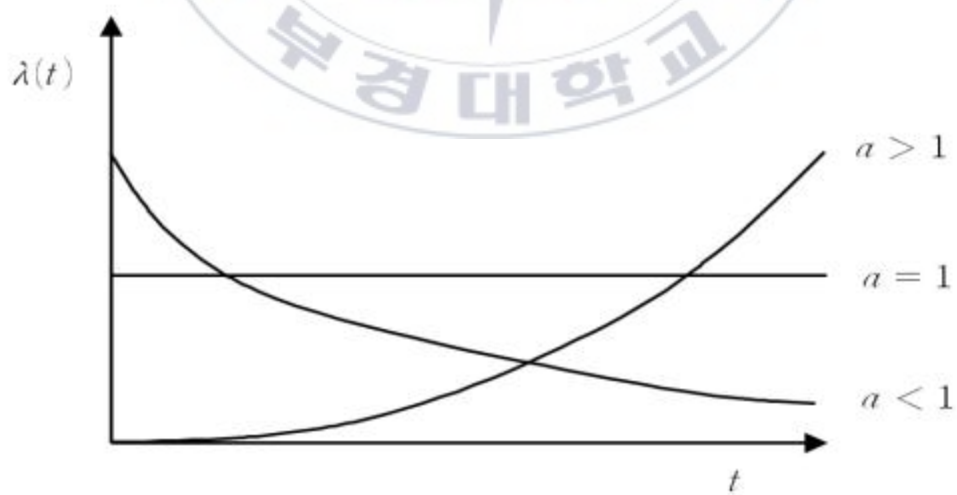


Fig. 2-10 Failure rate function, $\lambda(t)$

제 3 장 실험 방법 및 절차

3.1 재료 및 시험편

3.1.1 시험편 재료

본 연구에 사용된 시험편 재료는 면심입방(FCC) 오스테나이트계 철(Fe)-니켈(Ni)-크롬(Cr) 합금인 Alloy 800H (UNS N08810)이며 초고온가스로의 코어 배럴, 고온 가스 덕트, 냉각시스템 및 코어 지지대와 같은 구조 부품의 주요 후보 재료 중의 하나이다.^(8~11) 초기 개발된 Alloy 800에 비해 더 향상된 초고온 크리프 특성을 가지고 있다. 재료의 탄소 함량 비율은 0.05 ~ 0.10 wt. % 이내로 하며 1,150℃의 고온 환경에서 용체화 처리하여 ASTM 결정 입도 지수(index) 입자크기 “5”를 보장하도록 하고 있다. **Table 1**에 본 실험에 사용된 열간 압연 Alloy 800H 판재(commercial Alloy 800H plate, 25mm thickness)의 화학적 성분을 ASTM 규격 범위와 함께 나타냈으며, 각 원소의 화학적 조성 값은 ASTM 범위 내에 잘 일치되고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서 사용된 25mm 두께의 상업용 Alloy 800H 판재의 미세조직을 **Fig. 3-1**에 나타낸다. 잘 형성된 등축 결정립을 가지고 있으며 큰 등축 결정립 구조를 갖는 미세 γ 오스테나이트 석출물을 형성하고 있다. 한편, 본 재료의 상온에서의 기계적 성질을 **Table 2**에 나타낸다. 상온에서의 본 재료의 항복강도/인장강도의 비(항복비, YR)는 0.43으로 나타났다.

Table 1 Chemical composition of Alloy 800H (wt. %) used in this work

Element		C	Ni	Fe	Si	Mn
ASTM Spec.	min	0.05	30.	39.5	-	-
	max	0.10	35.	-	1.00	1.50
Alloy 800H		0.07	30.18	Bal	0.42	0.98
Element		Ti	Cr	Al	P	Cu
ASTM Spec.	min	0.15	19.00	0.15	-	-
	max	0.60	23.00	0.60	0.035	0.75
Alloy 800H		0.54	20.43	0.49	0.022	0.45



Fig. 3-1 Microstructure of Alloy 800H used in this work

Table 2 Mechanical properties of Alloy 800H used in this work (RT)

Property	Value (SI Units)
Ultimate Tensile Strength (UTS)	568.7 (MPa)
Yield Strength (YS)	246.4 (MPa)
Elastic Modulus (E)	218.0 (GPa)
Percent Elongation (El)	54 (%)

(Strain Rate : 5.5×10^{-4} /sec)



3.1.2 시험편 채취 및 제작

본 실험에서 사용된 Alloy 800H의 시험편은 25mm 두께의 열간 압연 판재로부터 제작하였으며, 시험편의 채취는 압연 방향과 하중의 작용 방향이 일치하도록 제작하였다. 본 실험에 사용된 모든 시험편은 **Fig. 3-2**와 같은 버튼 헤드 형상의 환봉 시험편으로 제작하였으며, 그 시험편의 형상과 치수는 ASTM E606⁽²⁰⁾ 규정에 따라 주의 깊게 제작하였다. 모든 시험편의 평행부 표면 조도(실험 조건 : Range 50 μ m, λ c 0.8mm $\times$ 5) Ra, 즉 산술 평균 거칠기는 0.1 μ m 로 측정되었다.

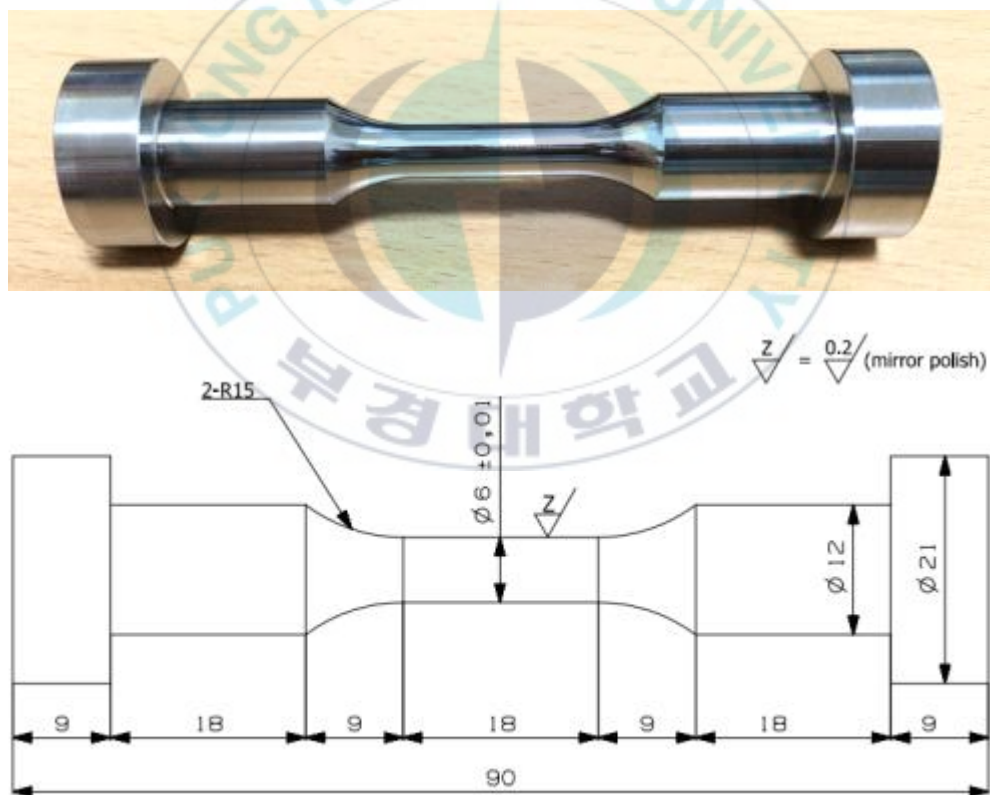


Fig. 3-2 Shape and dimension of LCF testing specimen

3.2 실험 장비 및 방법

3.2.1 실험 장비

본 연구에 사용된 실험 장비는 MTS 사의 최대 100KN 하중의 유압식 동적 재료 고온 피로 시험기(MTS 370)를 사용하였다.⁽²¹⁾ 이와 함께 고온의 환경을 정확하게 제어하기 위한 튜브형 전기로(ATS-3160)와 온도 컨트롤러(Temperature controller), 그리고 변형률 제어와 데이터 확보를 위하여 고온 신장계(Extensometer)를 설치하여 실험을 수행하였다. **Fig. 3-3**은 MTS 370의 전체적인 모습을 나타내었으며, **Fig. 3-4**는 고온 신장계(Extensometer)를 시험편에 직접 설치한 모습과 실험이 진행 중인 상태를 나타내고 있다. 전기로와 온도 컨트롤러는 ATS Series 3160 모델이며 상, 중, 하로 나누어 각각의 온도를 제어할 수 있고, 최대 1,200℃의 온도까지 고온의 환경을 제어 및 구성하는 데 적합하다. 본 실험에서는 상온에서 실험 온도인 850℃까지 1시간 동안 서서히 온도를 상승시킨 후 이후 30분간 유지하여 고온의 실험 환경을 구축하였다. 실험에 설치된 신장계는 632.53F-14 모델로 표점 거리는 12mm이고 최대 1,200℃의 고온까지 사용 가능한 고온용 공랭식 신장계이다. 본 실험의 변형률 제어에 사용된 고온용 신장계의 규격을 **Table 3**에 요약하였다.

본 실험 장비는 시험편에 최대 100KN 용량의 하중, 변위, 변형률 제어를 통하여 인장시험, 압축시험, 전단시험, 피로시험, 굴곡시험 등의 다양한 표준 시험과 저온 및 고온의 환경에서 소재의 기계적 특성과 내구 피로 특성 등을 평가할 수 있다.⁽²¹⁾



Fig. 3-3 Low cycle fatigue test machine (MTS-370)

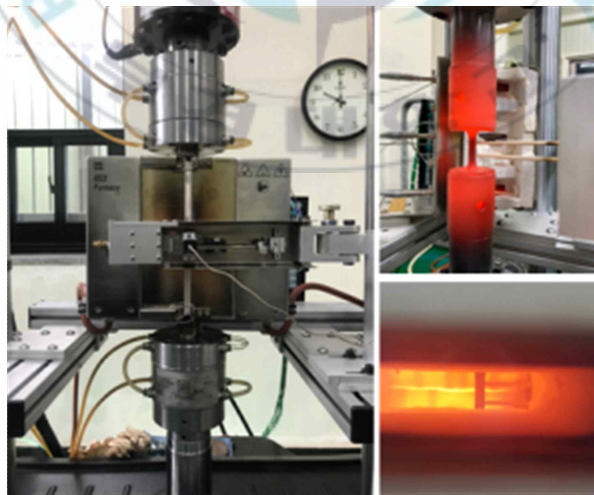


Fig. 3-4 Configuration of LCF testing M/C

Table 3 Specifications of high-temperature axial extensometer

Parameter	632.53F-14 (SI Units)
Gage Length	12.00mm
Maximum Travel	+2.40, -1.20 mm
Maximum Strain	+20%, -10%
Typical Nonlinearity	0.1%
Maximum Nonlinearity	0.15%
Typical Hysteresis	0.07%
Contact Force Against Specimen	300 grams per rod
Maximum Operating Frequency	2Hz
Maximum Temperature	1,200 °C
Bridge Resistance	1,000Ω
Extensometer Weight	60g

3.2.2 실험 조건 및 방법

본 연구에 대한 시험 조건은 **Table 4**와 같으며, 850°C의 고온 환경에서 완전 양진 연속 변형률 제어 방식으로 수행하였다. 본 연구에서 수행한 전 변형률 범위(TSR)는 0.6%의 한 가지 동일 조건에서 6개의 시험편에 대하여 수행되었다. 또한, 모든 시험편에 대하여 $10^{-3}/s$ 의 일정한 변형률 속도로 주의 깊게 실험을 수행하였다. 시험 조건에 대한 변형률 이력을 **Fig. 3-5**에 나타내었으며 시간의 함수로 나타내었다. 본 연구에서의 피로 수명(fatigue life, N_f)은 최대 응력 비가 20%로 감소하는 지점의 사이클 수 혹은 시험편 파단 사이클 수(반복수)로 정의하였다. 또한 거시 균열의 발생까지의 수명, 즉 균열 발생수명(crack initiation life, N_i)은 피크 응력 비가 선형에서 변화하기 시작하는 점의 반복 수로 정의하였다.

한편, 본 시험 조건에서 시험한 시험 직후의 시험편 양상의 일례를 **Fig. 3-6**에 나타낸다.

Table 4 Strain controlled LCF test conditions for Alloy 800H

LCF test parameter	Condition
Wave form	Triangular
Strain rate	$1 \times 10^{-3} / s$ (0.1%/s)
Environment	850°C
Test start direction	Tension
% drop in load	20% (stop)
Total Strain Range, TSR (Strain Amplitude)	0.6% (±0.3%)
Strain ratio, R	-1
No. of Specimen	6

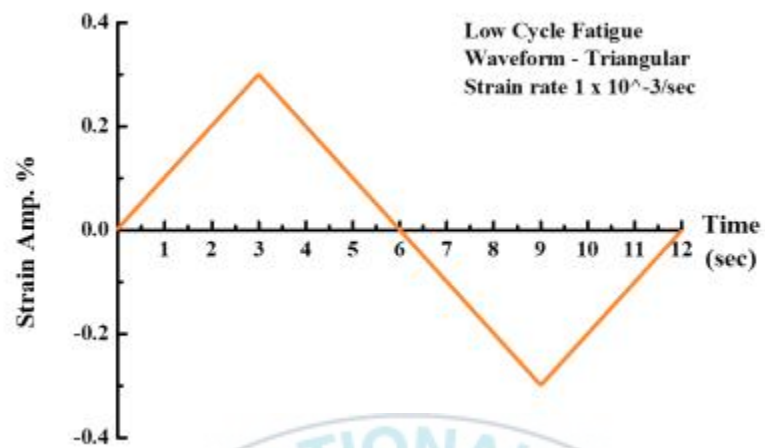


Fig. 3-5 Schematic diagram of strain history for continuous low cycle fatigue



Fig. 3-6 Example of the LCF specimen after testing

제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 저사이클 피로 시험 조건의 확인 및 반복성

저사이클 피로 성질 데이터의 변동성을 고찰하기 전에, 먼저 동일 시험 조건에서 시험이 잘 제어 수행되었는지를 확인할 필요가 있다. 본 연구의 목적인 저사이클 피로 성질의 통계적 데이터를 추출하기 위한 실험 조건은 앞 절의 **Table 4**와 같다. 저사이클 피로에서 산포 혹은 불확정성을 평가하기 위해서는 무엇보다도 동일 조건에서 정확히 실험이 수행되어야 한다. 그래야만 실험에 의한 산포 혹은 불확정성을 제외하고 재료 고유의 불균질성에 의한 산포 혹은 변동성을 고찰하는 것이 가능하다.

그중에서도 첫 번째 시험 온도는 정확하게 제어되었는가? **Fig. 4-1**은 시험 중 노대의 온도가 $850^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 정확히 아주 잘 제어되었음을 나타낸다. 즉 측정량의 온도에 대한 변동의 영향은 없음을 확인할 수 있었다. 그다음 중요한 인자가 완전 양진 변형률 제어인 변형률 진폭이 $\pm 0.3\%$ 가 정확하게 시험 중 유지되었는가? 그것도 초당 0.1%의 변형률 속도로 잘 제어되었는가 하는 것이다. 이는 고온 신장계의 신뢰성과도 밀접한 관련이 있다. **Fig. 4-2**는 시험 중 반복 수에 대한 변형률 진폭이 $\pm 0.3\%$ 로 정확히 잘 제어되었음을 보여 준다. 즉, 변형률 진폭의 변동계수는 약 0.01%로 나타났다. 이러한 제어 결과는 6개의 모든 시험편에 대하여 동일한 결과를 얻었다.

저사이클 피로에서 불확정성의 또 다른 하나의 문제는 하중의 축 정렬 불량에 의한 것이나 본 연구에서는 이 부분을 고려하지 않았다.

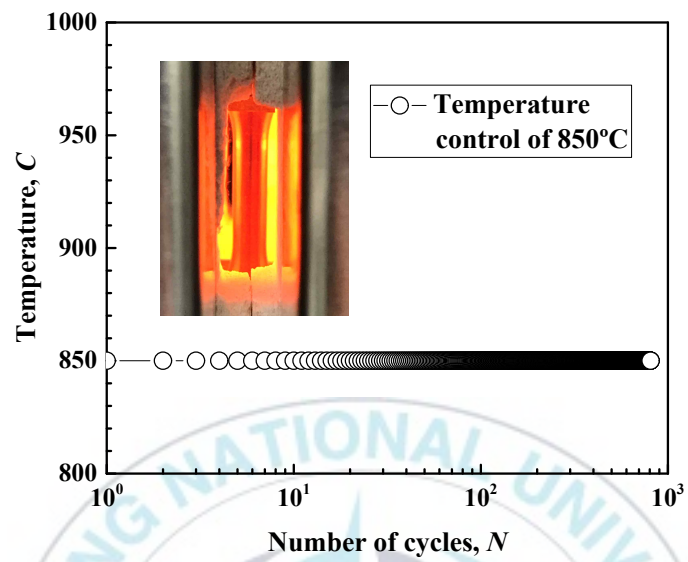


Fig. 4-1 Temperature control according to number of cycles

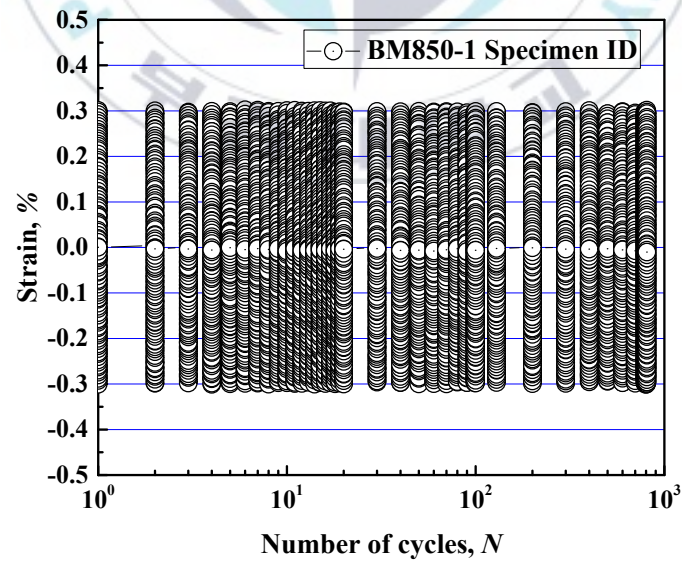
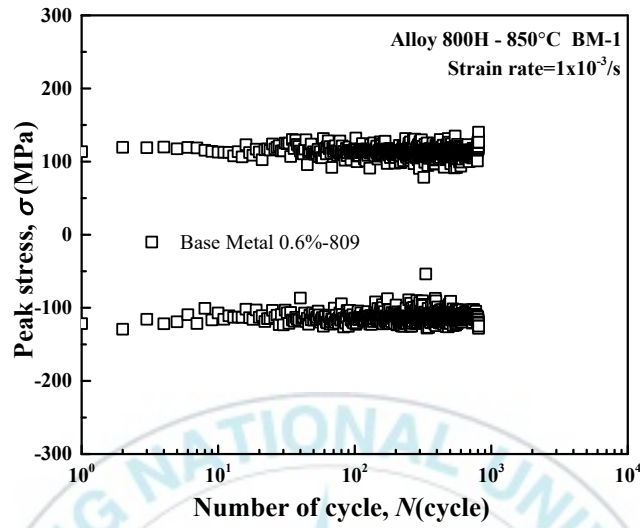


Fig. 4-2 Strain control according to number of cycles

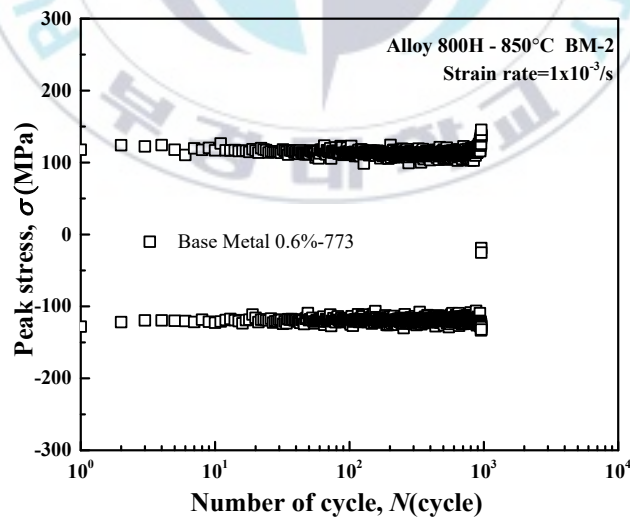
4.2 현상론적 반복 응력 반응 거동

본 연구의 고온 850℃에서 Alloy 800H의 저사이클 피로 실험에 대한 현상론적 반복 응력 반응 거동(cyclic stress response behavior)을 반복 수의 함수로 고찰하였다. **Fig. 4-3**은 고온 850℃의 0.6% 전 변형률 범위의 실험 조건에서 수행한 6개의 시험편에 대한 반복 수의 함수로써 최대 반복 인장 및 압축 응력의 변화를 나타낸 것이다. 모든 시험편에서 거시적으로 반복 수가 증가함에 따라 최대 인장 및 압축 응력은 응력이 급격히 변화할 때까지 아주 완만하게 감소하며 반복 연화하는 응력 반응 거동을 보이고 있다. 정도의 차이는 있지만 모든 시험편에서 최대 인장 응력과 압축 응력은 거의 대칭을 보여 주고 있다. 이는 비교적 완전 양진 연속 저사이클 피로 실험의 특징을 잘 나타내어 주고 있음을 알 수 있다.

일례로 **Fig. 4-4**는 850℃에서의 본 실험 결과의 하나(BM-5)와 동일 조건 R. T. Dewa 에서의 700℃에 대한 Alloy 800H의 저사이클 피로 실험 결과⁽¹⁰⁾를 비교하여 나타낸 것이다. 고온 700℃에서 전 변형률 범위 0.6%에서 수행된 시험에 대한 하중 반복 수에 대한 피크 응력(최대 인장 응력 및 압축 응력)의 진전은 **Fig. 4-4(a)**에서 알 수 있듯이, 초기 하중 반복 수에서 피크 응력이 증가함을 알 수 있고 그다음에 오랜 반복 수 동안은 평형을 유지한 후 마지막으로 급격히 감소하는 반복 응력 반응 거동을 보이고 있다. 이러한 현상은 Kaae⁽⁸⁾의 비슷한 온도인 650℃에서의 반복 응력 반응 거동과도 매우 잘 일치하고 있다. 그러나 온도가 더욱 증가하면 초기 수십 사이클의 하중 반복 수 동안 다소 완만히 증가하다가 평행을 유지한 후 급격히 감소하는 것으로 나타난다.

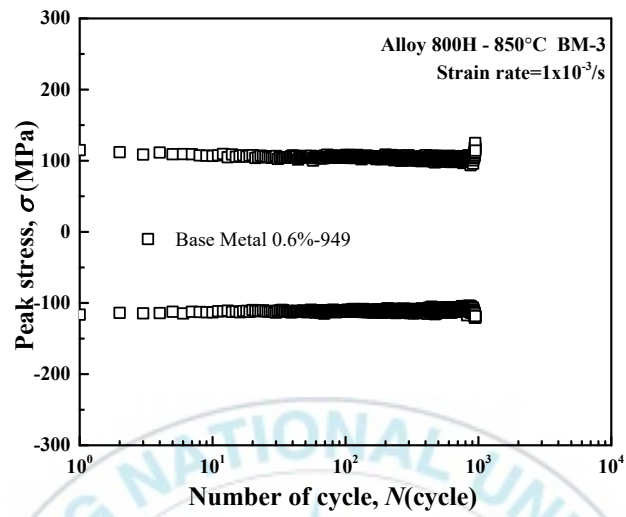


(a) Specimen ID_BM-1

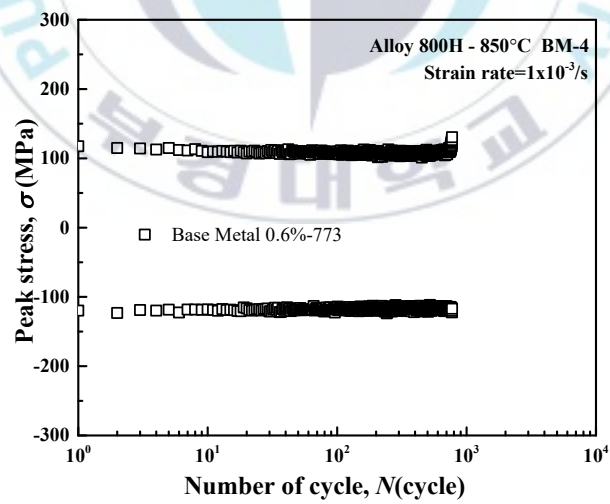


(b) Specimen ID_BM-2

Fig. 4-3 Cyclic stress response behavior of 0.6% TSR at 850°C (*cont.*)

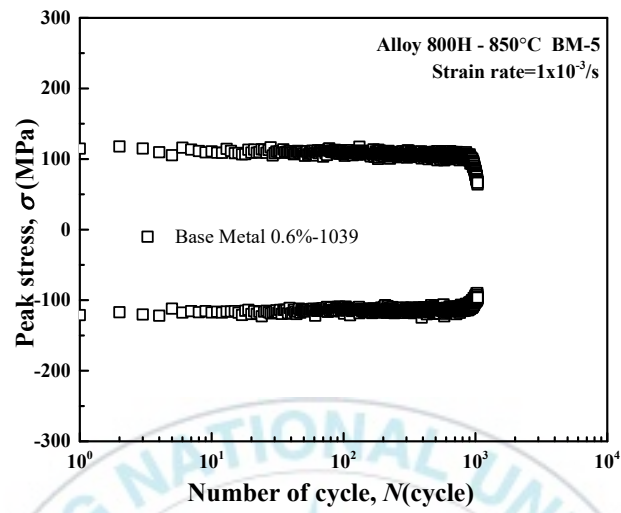


(c) Specimen ID_BM-3

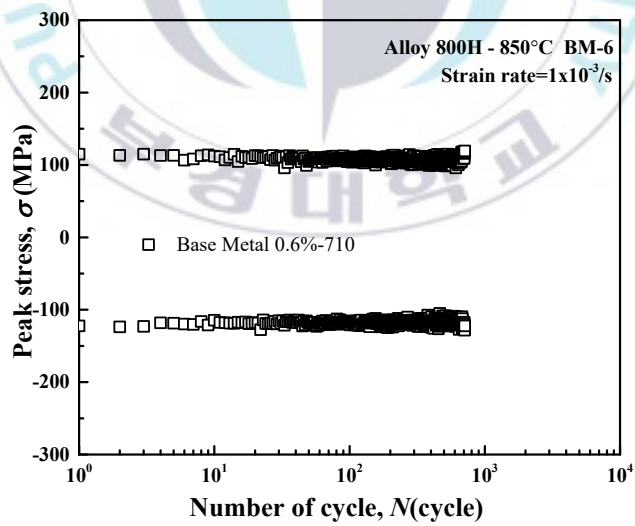


(d) Specimen ID_BM-4

Fig. 4-3 Cyclic stress response behavior of 0.6% TSR at 850°C (*cont.*)

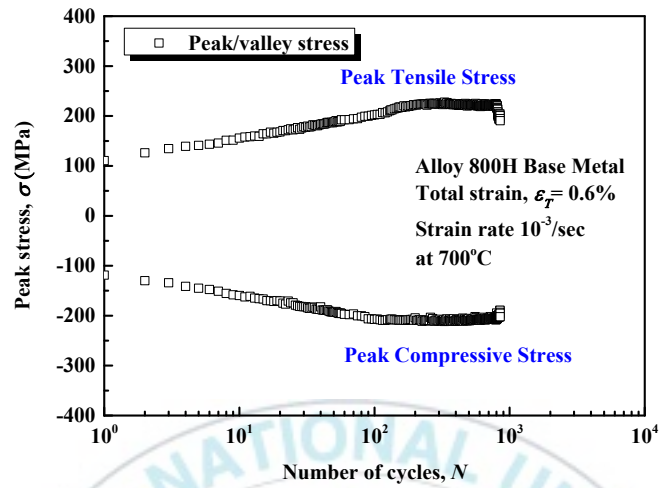


(e) Specimen ID_BM-5

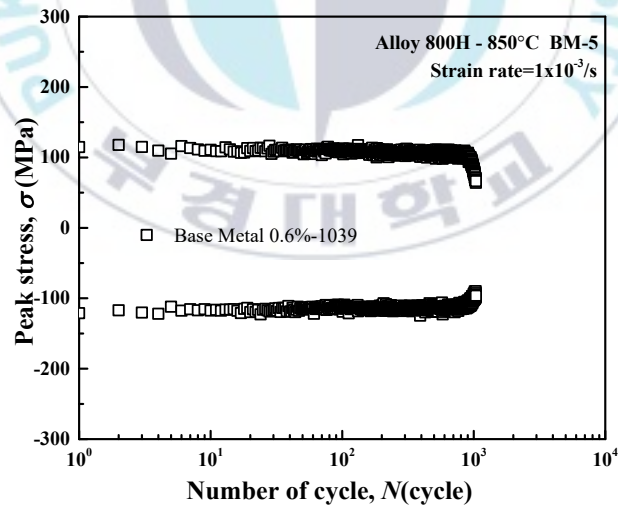


(f) Specimen ID_BM-6

Fig. 4-3 Cyclic stress response behavior of 0.6% TSR at 850°C



(a) Alloy 800H at 700°C [R.T, Dewa., 2018]



(b) BM-5 specimen for this experiment of 850°C

Fig. 4-4 Comparison of cyclic stress response behavior of 700°C and 850°C at same total strain range of 0.6%

Alloy 800H의 고온 850℃에서의 본 실험 조건에 대한 반복 경화 혹은 연화 거동을 더욱 자세히 살펴보기 위해서, 하중 반복 수에 따른 반복 인장 응력 변화를 고찰하였다. 일례로 **Fig. 4-5**는 BM-5 시험편에 대한 하중 반복 수에 따른 각 사이클의 피크 인장 응력(peak tensile stress, σ_p)을 첫 사이클의 피크 인장 응력(peak tensile stress, σ_{p1})으로 정규화하여 나타내었다. 그림에서 정규화된 피크 인장 응력이 1보다 크면 반복 하중 조건에서 재료가 경화됨을 의미하고, 1보다 작으면 반복 하중 조건에서 재료가 연화됨을 의미한다. **Fig. 4-5**에서 알 수 있는 바와 같이 Alloy 800H의 850℃의 본 실험의 전 변형률 범위 및 변형률 속도의 조건에서 초기부터 반복 연화하는 거동을 나타내었다. 이와 같은 현상은 동일 조건의 다른 시험편에서도 유사한 경향으로 나타났다. 일반적으로 강한 금속재료는 반복적으로 연화하는 현상을 보이고, 저강도 금속은 반복적으로 경화하는 것으로 알려져 있다. 전형적으로 인장강도/항복강도의 비가 1.4보다 크면 경화되고, 이 값이 1.2보다 작으면 연화하는 것으로 알려져 있다.⁽¹³⁾ 본 연구의 실험 온도에서 Alloy 800H의 인장강도/항복강도의 비는 1.06으로 1.2보다 작은 값을 보였으며, 반복 연화하는 거동과 잘 일치하였다. 본 재료의 항복비(항복강도/인장응력)는 0.94의 값을 얻었다. 즉, 이와 같이 높은 항복비를 갖는 재료는 반복적으로 연화할 것으로 기대된다. 향후 이에 대한 더 많은 실험 데이터의 확보와 해석이 요구된다.

결과론적으로 고온 850℃에서 Alloy 800H는 초기 하중 반복 수부터 거시적으로 완만하게 반복 연화하는 거동을 보였으며, 하중 반복 수에 따른 피크 응력에는 시험편간에도 변동이 존재함을 알 수 있고, 또한 피로 수명에도 변동이 존재함을 알 수 있다.

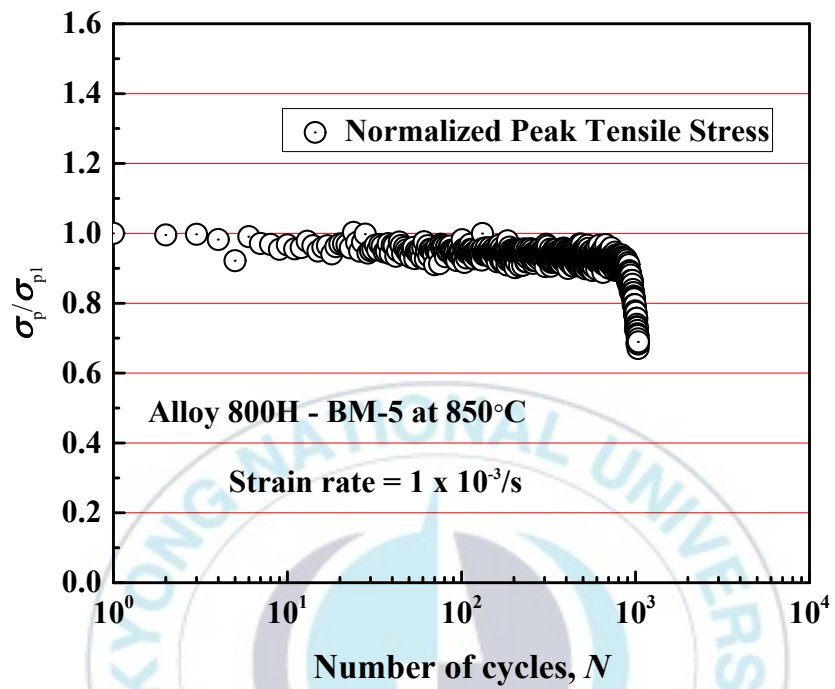


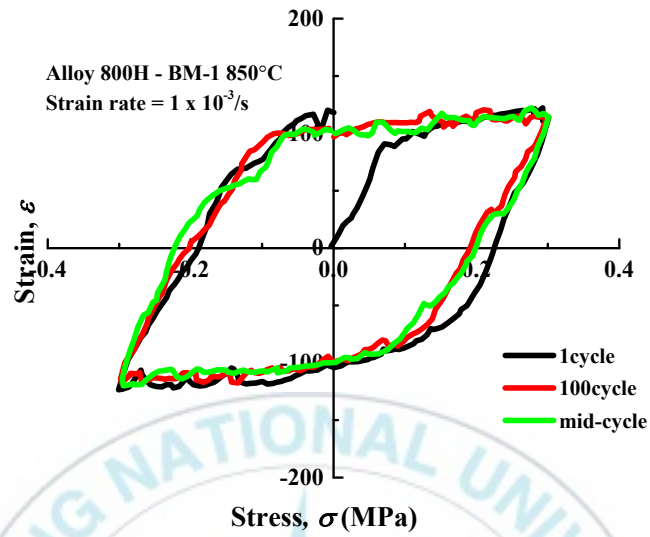
Fig. 4-5 Variation of the normalized peak tensile stress as a function of number of cycles for specimen ID_BM-5

4.3 현상론적 반복 응력-변형률 거동

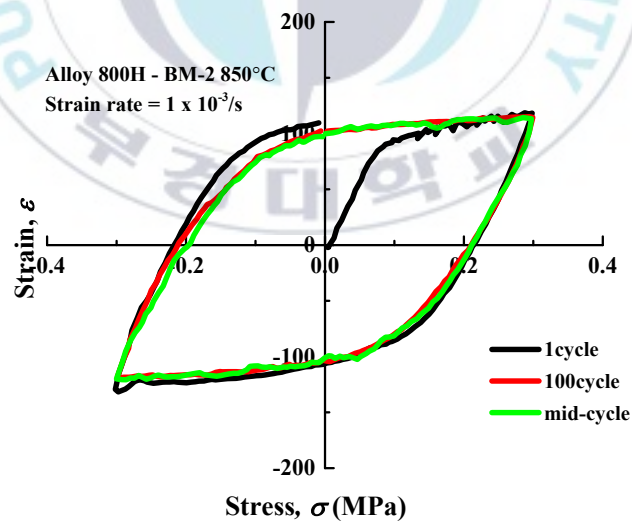
본 연구의 고온 850℃에서 Alloy 800H의 저사이클 피로 실험에 대한 현상론적 반복 응력-변형률 거동(cyclic stress-strain behavior)을 히스테리시스 루프를 이용하여 고찰하였다. **Fig. 4-6**은 고온 850℃의 0.6% 전 변형률 범위의 실험 조건에서 수행한 6개의 시험편에 대한 응력-변형률 거동을 첫 번째 반복 수, 100번째 반복 수 그리고 반 수명에서의 반복 수(mid-cycle)에 대하여 히스테리시스 루프 곡선으로 나타낸 것이다. 모든 시험편에 있어서, 첫 번째 하중 반복 수에서의 최대 인장 응력과 최대 압축 응력이 가장 높게 나타났으며, 하중 반복 수가 100 사이클, 반 수명에서의 사이클로 증가할수록 완만히 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 응력-변형률 곡선에서 하중의 반복 수에 따른 응력의 변화는 재료의 반복 경화/연화 특성에 지배된다. 일례로 **Fig. 4-7**에 하나의 시험편에 대한 응력-변형률 곡선을 파단까지의 하중 반복 수에 대하여 나타내었다. 앞 절의 반복 응력 반응 거동에서 언급하였듯이, 본 재료는 본 실험의 850℃ 온도 조건에서 완만히 연화하는 특성을 나타내는 재료라 할 수 있다. 이와 같은 경화/연화 특성은 재질뿐 아니라, 특히 온도, 전 변형률 범위 및 변형률 속도 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

이상의 반복-변형률 히스테리시스 루프 곡선에서 관찰되듯이, 동일한 하중 반복 수에서도 시험편간에 응력과 변형률이 일정하지 않다는 것은 분명하다. 또한 반 수명에서의 탄성 변형률 진폭과 소성 변형률 진폭도 완전 동일한 값을 나타내지 않음을 확인할 수 있다.

Table 5는 본 실험 조건에서 반 수명에서의 저사이클 피로 시험 결과를 요약한 것이다. 저사이클 피로 특성 데이터에는 산포가 존재함을 알 수 있다. 따라서 이들 특성에 대한 통계적 변동성을 고찰할 필요가 있다.

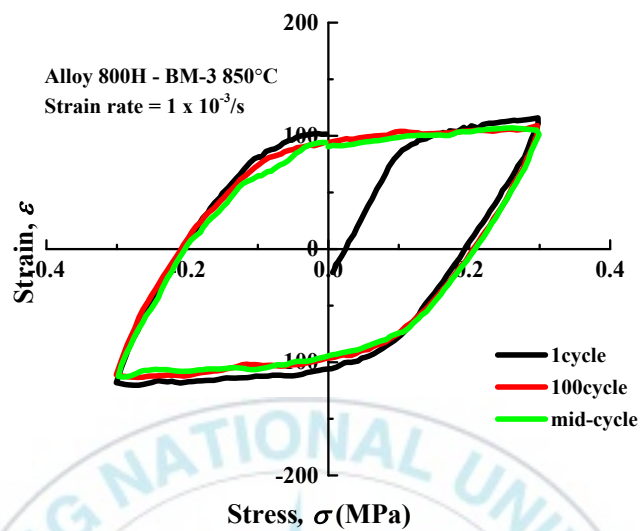


(a) Hysteresis loop for specimen ID_BM-1

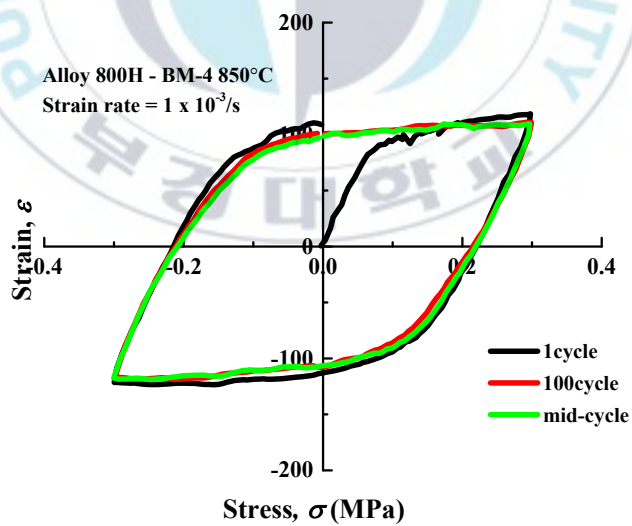


(b) Hysteresis loop for Specimen ID_BM-2

Fig. 4-6 Cyclic stress-strain behavior of 0.6% TSR at 850°C (*cont.*)

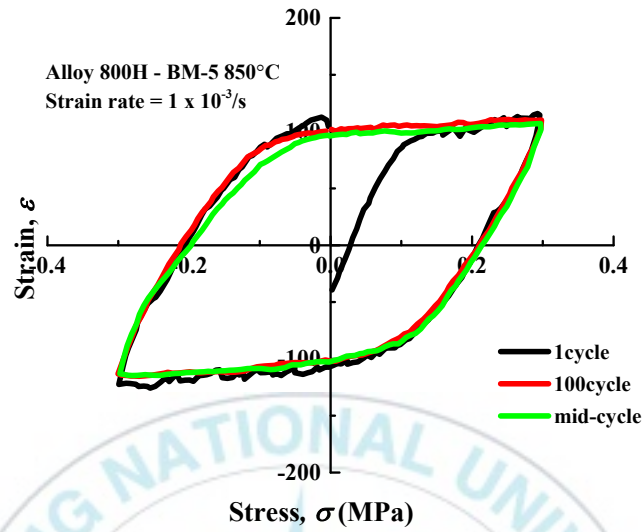


(c) Hysteresis loop for Specimen ID_BM-3

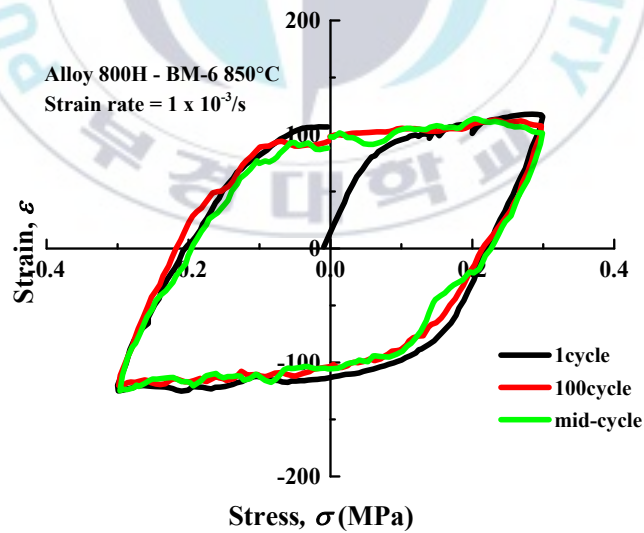


(d) Hysteresis loop for Specimen ID_BM-4

Fig. 4-6 Cyclic stress-strain behavior of 0.6% TSR at 850°C (cont.)



(e) Hysteresis loop for Specimen ID_BM-5



(f) Hysteresis loop for Specimen ID_BM-6

Fig. 4-6 Cyclic stress-strain behavior of 0.6% TSR at 850°C

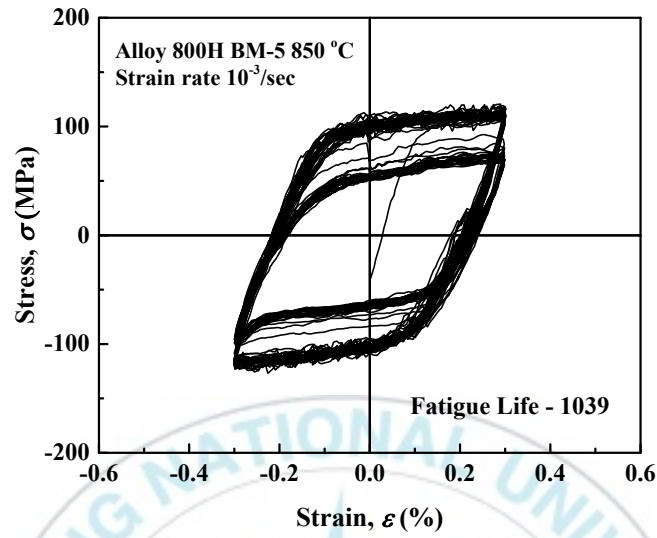


Fig. 4-7 Cyclic stress-strain hysteresis curves for specimen ID BM-5

Table 5 Strain controlled LCF test conditions and the results for Alloy 800H of constant total strain range of 0.6% at 850°C

Specimen ID	Strain Rate $\dot{\epsilon}$ (/s)	Elastic Strain Amp. $\Delta\epsilon_e/2$ (%)	Plastic Strain Amp. $\Delta\epsilon_p/2$ (%)	Stress Amp. $\Delta\sigma/2$ (%)	Fatigue Life N_f (cycle)	Crack Initiation Life N_i (cycle)
BM-1	10^{-3}	0.089	0.211	117.2	809	752
BM-2		0.095	0.205	116.5	958	833
BM-3		0.093	0.207	108.7	949	892
BM-4		0.087	0.213	113.5	773	734
BM-5		0.095	0.205	110.0	1039	984
BM-6		0.090	0.210	113.0	710	653

4.4 저사이클 피로 특성의 통계적 변동성

4.4.1 반복 응력 데이터의 통계적 변동성

저사이클 피로 거동 동안에 응력을 표현하는 전형적인 방법은 반 수명에서의 응력 진폭을 나타내는 것이다.⁽⁸⁾ Fig. 4-8은 반 수명에서의 응력 진폭을 시험편간으로 나타내었다. 응력 진폭은 저사이클 피로에서 정량적으로 결정되는 하나의 물질의 속성인 측정량(quantity)이다. 본 그림에서 알 수 있듯이 응력 진폭의 값은 그리 크지는 않지만, 시험편간에 일정하지 않고 산포가 존재함을 알 수 있다. 따라서, 먼저 응력 진폭에 대한 산술적 통계 해석을 행하였다. n=6개의 시험편에 대한 표본의 평균(mean)과 표준편차(standard deviation)를 Table 6에 정리하였다.

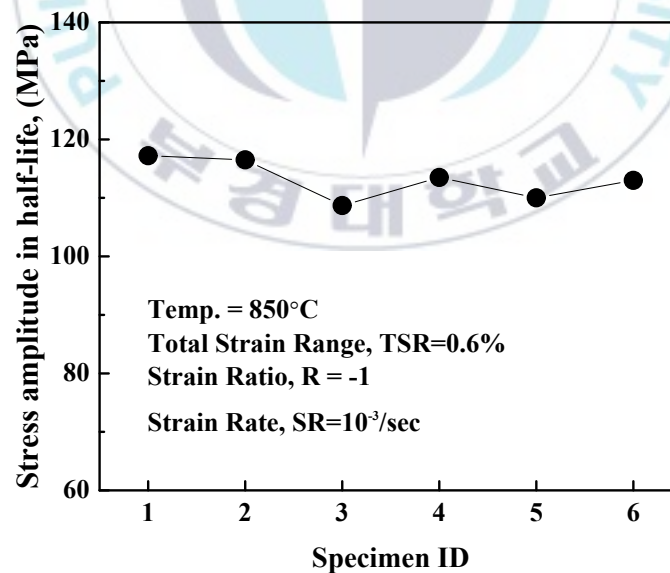


Fig. 4-8 Scatter of stress amplitude for specimen-to-specimen

Table 6 Descriptive statistics for stress amplitude

<i>N</i> total	Mean	Standard Deviation	Sum	Min.	Median	Max.
6	113.15	3.39102	678.9	108.7	113.25	117.2

표본 데이터와 표본 평균 사이의 차 d_i 를 나머지(residual)라 하면, 아래 식 (4-1)과 같다.

$$d_i = x_i - \bar{x} \quad (4-1)$$

Fig. 4-9는 응력 진폭을 나머지의 형태로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 표본의 평균과 표본 데이터에는 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 얼마나 산포가 있는지에 대한 정보는 제공하지 못한다.

본 연구에서는 저사이클 피로 특성 데이터의 통계적 변동성을 고찰하기 위하여 신뢰성공학에서 가장 많이 이용되고 있는 2-parameter Weibull 통계 해석을 사용하고자 한다.

본 연구의 경우 이른바 측정량이 완전 데이터(complete test data of magnitude n)이므로, 확률 $F(\%)$ 점은 다음의 메디안 링크(median rank) 식 (4-2)를 사용하여 구하였다.

$$F(i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (4-2)$$

여기서, n 과 i 는 각각 샘플 수(sample size) 및 순위(rank)를 나타낸다. **Fig. 4-10**은 본 실험의 조건에서 Alloy 800H의 저사이클 피로 실험 데이터

에 대한 반 수명에서의 응력 진폭을 와이블 확률지에 플롯트한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 데이터는 거의 직선($\rho=0.9748$)으로 잘 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 응력 진폭은 2-parameter 와이블 확률분포에 잘 따른다고 할 수 있다. x-축 회귀 직선에 따라 추정한 2-parameter 와이블 분포의 파라미터를 **Table 7**에 나타낸다. 응력 진폭의 형상 파라미터 β 는 36으로 아주 큰 값을 나타내었다. 또한 척도 파라미터인 η 는 114.7MPa를 나타내었다. 2-parameter Weibull 확률분포함수의 파라미터로 추정된 평균과 표준편차를 **Table 6**에서 구한 산술적 평균과 표준편차와 비교하여 **Table 8**에 나타낸다. 한편 **Table 8**에는 각각의 변동계수(coefficient of variation, COV)를 구하여 함께 나타내었다. 이상의 고찰로부터 Alloy 800H는 850℃ 고온에서 저사이클 피로에 대한 반 수명에서의 응력 진폭의 측정량은 약 3~3.5%의 변동계수를 보이는 것으로 확인하였다. 일반적으로 금속재료의 인장강도의 변동계수⁽²²⁾인 5%보다도 약간 낮은 변동계수를 보였다. 한편, 반복성 조건이란 같은 실험 조건에서 같은 측정량을 연속적으로 측정하여 얻은 결과들 사이의 일치하는 정도를 의미한다. 반복성 조건은 통상 다음을 포함한다.⁽²³⁾

- 같은 측정 절차
- 같은 관측자
- 같은 조건하에서 사용된 같은 측정기기
- 같은 장소
- 짧은 시간 내의 반복

따라서 본 연구에서 수행한 저사이클 피로 실험 조건하에서의 반 수명에서의 반복 응력에 대한 측정 결과의 반복성(repeatability)은 어느 정도 매우 우수한 것으로 판단된다. 또한 이러한 변동성은 실험의 불확정성(uncertainty)에 의한 것보다는 재료의 불균일성(randomness)에 기인하는 것으로 사료된다.

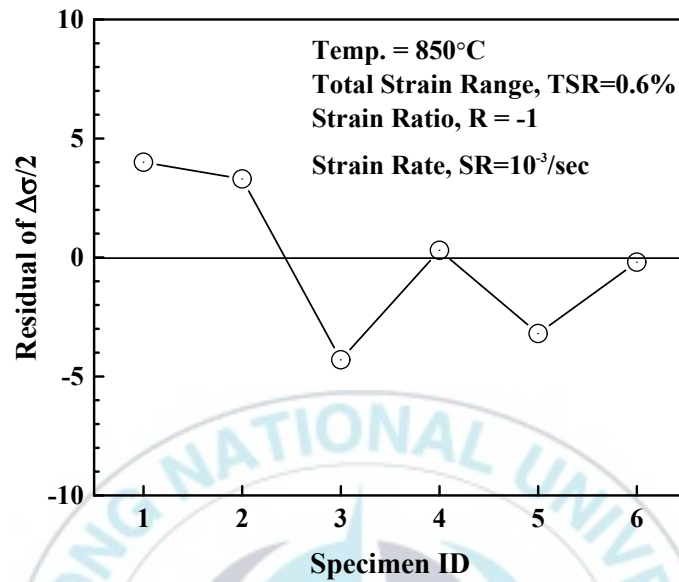


Fig. 4-9 Residual of stress amplitude at half-life

Table 7 The estimated Weibull parameters for stress amplitude

Weibull Distribution	Shape Parameter, β	Scale Parameter, η
Value	36.3	114.7

Table 8 Comparison of Weibull statistics and descriptive statistics

Statistic	Mean	Standard Deviation	COV (%)
Weibull	112.81	3.92173	0.03476 (3.5%)
Descriptive	113.15	3.39102	0.02996 (3.0%)

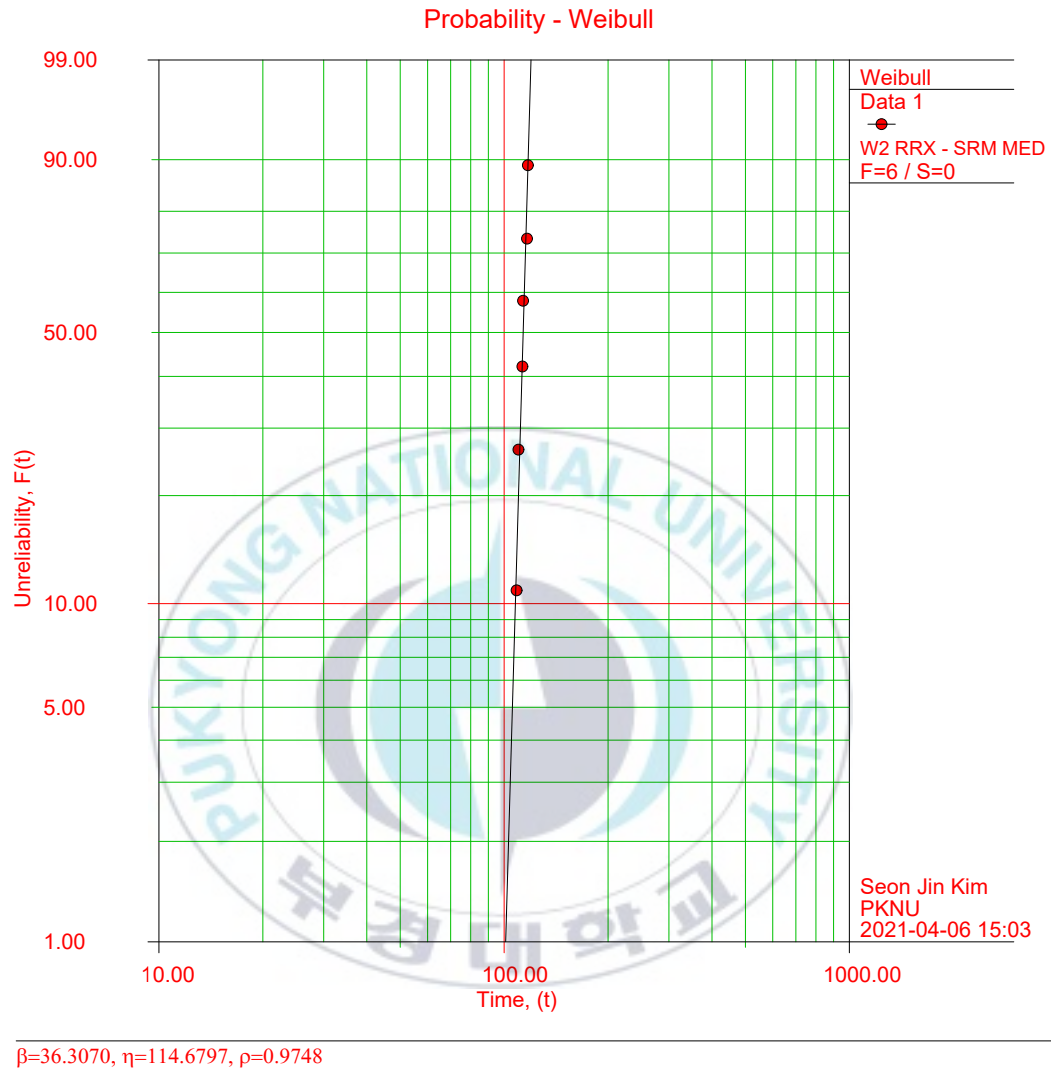


Fig. 4-10 Weibull plot of stress amplitude at half-life

4.4.2 반복 응력-변형률 데이터의 통계적 변동성

4.3절에서 언급하였듯이 고온 저사이클 피로에 있어서 반복 응력-변형률 거동(cyclic stress-strain behavior)은 반 수명에서의 반복 하중에 대한 응력-변형률 히스테리시스 루프를 이용하여 고찰하는 것이다. 저사이클 피로 실험 결과에서 전 변형률 범위는 탄성 변형률 범위와 소성 변형률 범위로 나눌 수 있다. 0.6%의 일정 전 변형률 범위 제어 피로 실험에도 불구하고 **Table 5**에서와 같이 시험편마다 그 탄성 변형률 진폭과 소성 변형률 진폭에는 산포가 있음을 알 수 있다.

Fig. 4-11은 반 수명에서의 탄성 변형률 진폭을 시험편간으로 나타내었다. 탄성 변형률 진폭도 저사이클 피로에서 정량적으로 결정되는 하나의 물질의 속성인 측정량(quantity)이다. 본 그림에서 알 수 있듯이 탄성 변형률 진폭의 값은 시험편마다 일정하지 않고 산포가 존재함을 알 수 있다. 따라서, 먼저 탄성 변형률 진폭에 대한 산술적 통계 해석을 행하였다. $n=6$ 개의 시험편에 대한 표본의 평균(mean)과 표준편차(standard deviation)를 **Table 9**에 정리하였다.

Fig. 4-12는 응력 진폭을 나머지의 형태로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 표본의 평균과 표본 데이터에는 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 얼마나 산포가 있는지에 대한 정보는 제공하지 못한다.

전절의 응력 진폭과 동일하게 탄성 변형률 진폭 데이터의 통계적 변동성을 고찰하기 위하여 2-parameter Weibull 통계 해석을 사용하고자 한다.

Table 9 Descriptive statistics for elastic strain amplitude in half-life

<i>N</i> total	Mean	Standard Deviation	Sum	Min.	Median	Max.
6	0.0915	0.00333	0.549	0.087	0.0915	0.095

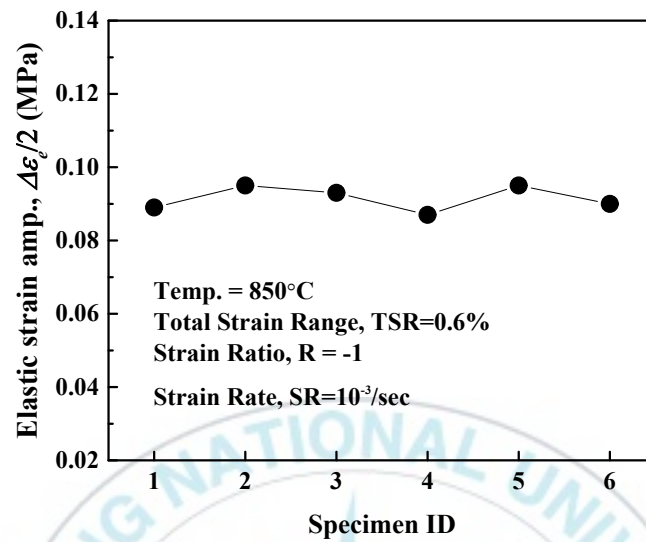


Fig. 4-11 Scatter of elastic strain amplitude for specimen-to-specimen

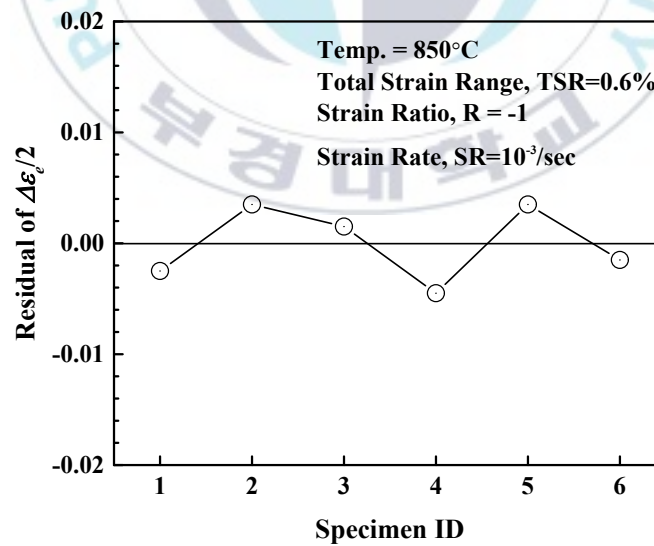


Fig. 4-12 Residual of elastic strain amplitude at half-life

Fig. 4-13은 본 실험의 조건에서 Alloy 800H의 저사이클 피로 실험 데이터에 대한 반 수명에서의 탄성 변형률 진폭을 와이블 확률지에 플롯트한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 데이터는 거의 직선($\rho=0.9696$)으로 잘 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 탄성 변형률 진폭은 2-parameter 와이블 확률분포에 잘 따른다고 할 수 있다. x-축 회귀 직선에 따라 추정된 2-parameter 와이블 분포의 파라미터를 **Table 10**에 나타낸다. 응력 진폭의 형상 파라미터 β 는 30으로 비교적 큰 값을 나타내었다. 또한 척도 파라미터인 η 는 0.093%를 나타내었다. 2-parameter Weibull 확률분포함수의 파라미터로 추정된 평균과 표준편차를 **Table 9**에서 구한 산술적 평균과 표준편차와 비교하여 **Table 11**에 나타낸다. 한편 **Table 11**에는 각각의 변동계수(coefficient of variation, COV)를 구하여 함께 나타내었다. 이상의 고찰로부터 Alloy 800H는 850℃ 고온에서 저사이클 피로에 대한 반 수명에서의 반복 변형률 진폭의 측정량은 약 3.6~4.2%의 변동계수를 보이는 것으로 확인하였다.

Table 10 The estimated Weibull parameters for stress amplitude

Weibull Distribution	Shape Parameter, β	Scale Parameter, η
Value	30.0	0.0930

Table 11 Comparison of Weibull statistics and descriptive statistics

Statistic	Mean	Standard Deviation	COV (%)
Weibull	0.0913	0.00382	0.04184 (4.2%)
Descriptive	0.0915	0.00333	0.03639 (3.6%)

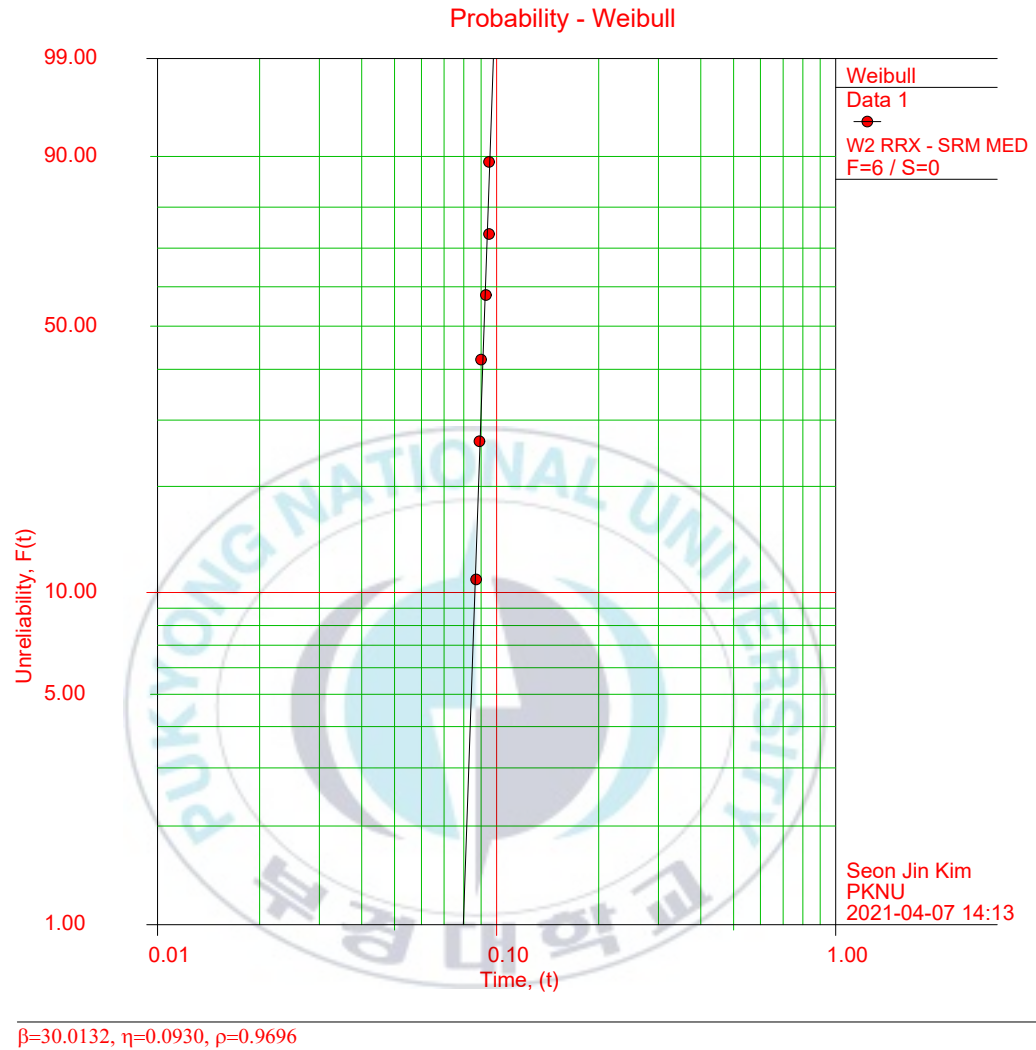


Fig. 4-13 Weibull plot of elastic strain amplitude at half-life

소성 변형률 진폭에 대한 통계적 변동성도 탄성 변형률 진폭과 동일한 접근 방법으로 고찰하였다.

Fig. 4-14는 반 수명에서의 소성 변형률 진폭(plastic strain amplitude)을 시험편간으로 나타내었다. 소성 변형률 진폭도 저사이클 피로에서 정량적으

로 결정되는 하나의 물질의 속성인 측정량(quantity)이다. 본 그림에서 알 수 있듯이 소성 변형률 진폭 또한 탄성 변형률 진폭과 동일하게 시험편마다 일정하지 않고 산포가 존재함을 알 수 있다. 따라서, 먼저 소성 변형률 진폭에 대한 산술적 통계 해석을 행하였다. n=6개의 시험편에 대한 표본의 평균(mean)과 표준편차(standard deviation)를 **Table 12**에 정리하였다.

Fig. 4-15는 응력 진폭을 나머지의 형태로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 표본의 평균과 표본 데이터에는 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 이 또한 얼마나 산포가 있는지에 대한 정보는 제공하지 못한다.

탄성 변형률 진폭과 동일하게 소성 변형률 진폭 데이터의 통계적 변동성을 고찰하기 위하여 2-parameter Weibull 통계 해석을 수행하고자 한다.

Table 12 Descriptive statistics for elastic strain amplitude in half-life

<i>N</i> total	Mean	Standard Deviation	Sum	Min.	Median	Max.
6	0.2085	0.00333	1.251	0.205	0.2085	0.213

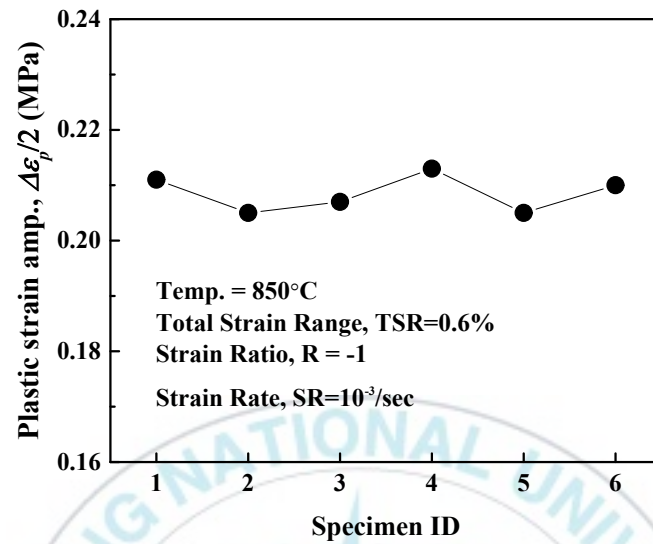


Fig. 4-14 Scatter of plastic strain amplitude for specimen-to-specimen

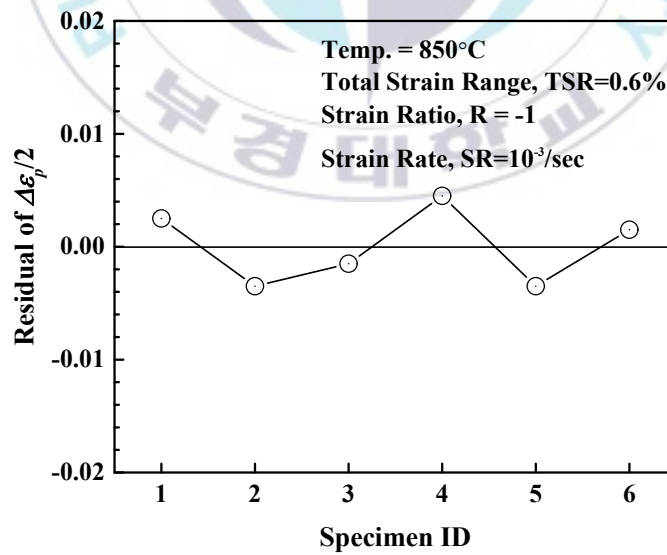


Fig. 4-15 Residual of plastic strain amplitude at half-life

Fig. 4-16은 본 실험의 조건에서 Alloy 800H의 저사이클 피로 실험 데이터에 대한 반 수명에서의 소성 변형률 진폭을 와이블 확률지에 플롯트한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 데이터는 거의 직선($\rho=0.9420$)으로 잘 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 소성 변형률 진폭은 2-parameter 와이블 확률분포에 잘 따른다고 할 수 있다. x-축 회귀 직선에 따라 추정된 2-parameter 와이블 분포의 파라미터를 **Table 13**에 나타낸다. 응력 진폭의 형상 파라미터 β 는 70으로 비교적 큰 값을 나타내었다. 또한 척도 파라미터인 η 는 0.210%를 나타내었다. 2-parameter Weibull 확률분포함수의 파라미터로 추정된 평균과 표준편차를 **Table 12**에서 구한 산술적 평균과 표준편차와 비교하여 **Table 14**에 나타낸다. 한편 **Table 14**에는 각각의 변동계수(coefficient of variation, COV)를 구하여 함께 나타내었다. 이상의 고찰로부터 Alloy 800H는 850℃ 고온에서 저사이클 피로에 대한 반 수명에서의 반복 소성 변형률 진폭의 측정량은 약 1.6~1.8%의 변동계수를 보이는 것으로 확인하였다.

Table 13 The estimated Weibull parameters for plastic strain amplitude

Weibull Distribution	Shape Parameter, β	Scale Parameter, η
Value	70.0	0.210

Table 14 Comparison of Weibull statistics and descriptive statistics

Statistic	Mean	Standard Deviation	COV (%)
Weibull	0.2083	0.00375	0.01798 (1.8%)
Descriptive	0.2085	0.00333	0.01597 (1.6%)

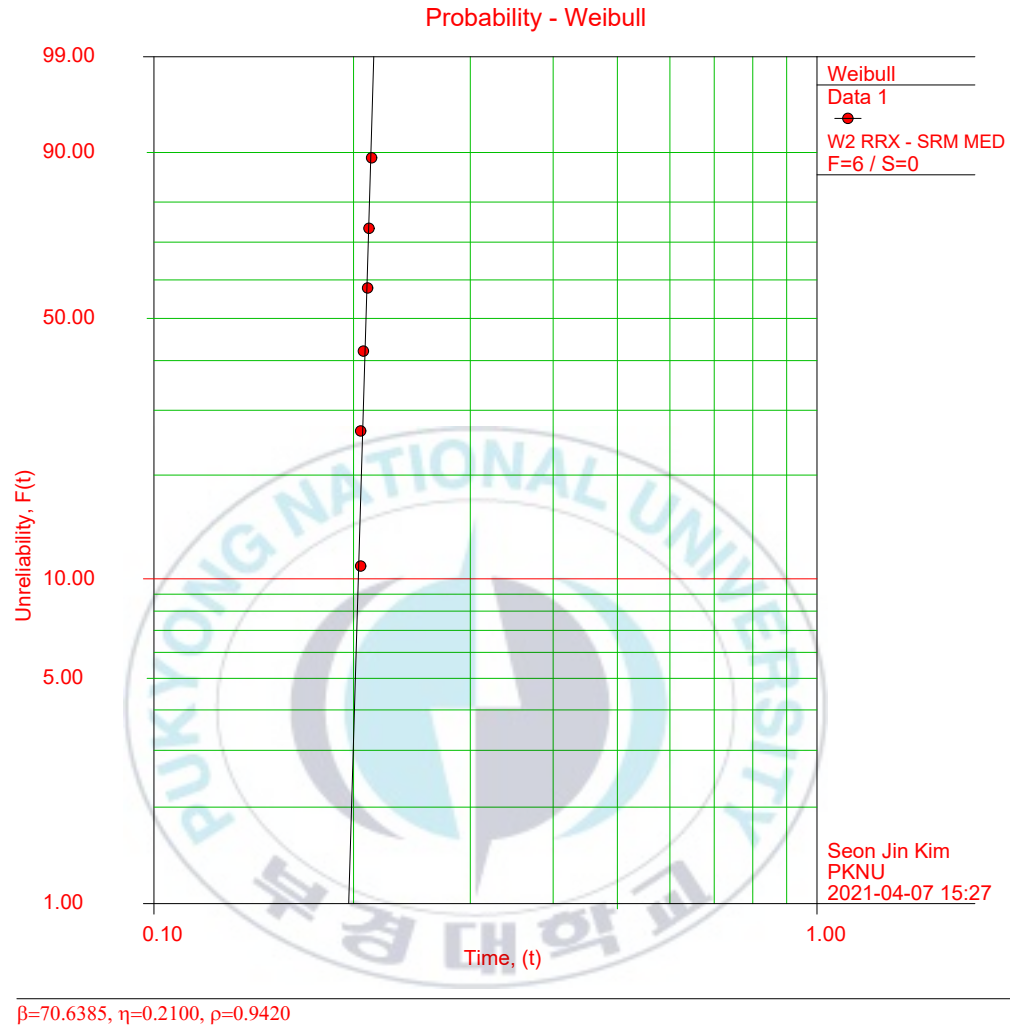


Fig. 4-16 Weibull plot of plastic strain amplitude at half-life

Table 15는 Wright 등의 850℃에서의 Alloy 617의 저사이클 피로 시험 결과를 요약 정리한 것이다.^(2,4) Alloy 617의 850℃ 온도의 동일 저사이클 피로 실험 조건에서 얻은 소성 변형률 진폭의 산술적 통계 해석 결과를 Table 16에 나타낸다. Fig. 4-17에 Alloy 617의 소성 변형률 진폭을 와이블 확률지에

플롯트하여 나타내었다. 그리고 x-축 회귀 직선에 따라 추정한 2-parameter 와이블 분포의 파라미터를 **Table 17**에 나타낸다. 본 재료에 대한 소성 변형률 진폭의 형상 파라미터 β 는 9로 나타났다. 또한 척도 파라미터인 η 는 0.1726%를 나타내었다. 2-parameter Weibull 확률분포함수의 파라미터로 추정한 평균과 표준편차를 산술적 평균과 표준편차와 비교하여 **Table 18**에 나타내었다.

이상의 결과로부터 알 수 있듯이 동일 온도의 동일 조건하에서도 재료에 따라 저사이클 피로 특성, 즉 소성 변형률 진폭 등의 크기뿐만 아니라 그 측정량의 통계적 변동성에는 차이가 있음을 알 수 있었다. 본 연구 결과에 의하면 Alloy 800H는 Alloy 617보다 소성 변형률 진폭의 통계적 변동성이 약 15% 적게 나타났으며, 소성 변형률 진폭의 반복성은 매우 우수한 것으로 사료된다.

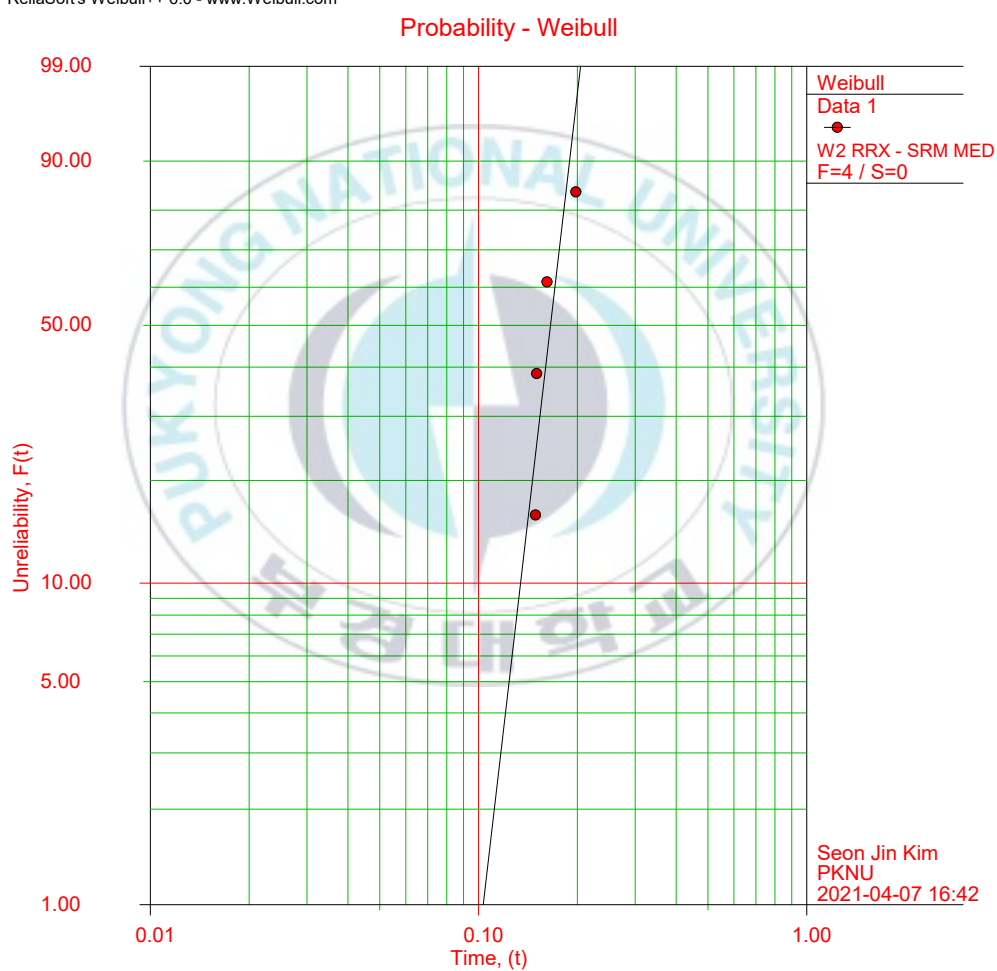
Table 15 The low cycle fatigue test results of Alloy 617 at 850°C

Specimen ID	Strain rate (/s)	Total strain range (%)	plastic strain amp. (%)	N_i (cycles)	N_f (cycles)
416-3	1.0E-03	0.6	0.1980	1620	1993
416-4			0.1504	1680	1939
416-5			0.1616	1200	1475
416-8			0.1492	1480	1785

Table 16 Descriptive statistics for plastic strain amplitude in half-life

<i>N</i> total	Mean	Standard Deviation	Sum	Min.	Median	Max.
4	0.1648	0.02283	0.6592	0.1492	0.1560	0.1980

ReliaSoft's Weibull++ 6.0 - www.Weibull.com



$\beta=8.9709$, $\eta=0.1726$, $\rho=0.8524$

Fig. 4-17 Weibull plot of plastic strain amplitude at half-life for Alloy 617

Table 17 The estimated Weibull parameters for stress amplitude

Weibull Distribution	Shape Parameter, β	Scale Parameter, η
Value	9.0	0.1726

Table 18 Comparison of Weibull statistics and descriptive statistics

Statistic	Mean	Standard Deviation	COV (%)
Weibull	0.1634	0.02172	0.13293 (13.3%)
Descriptive	0.1648	0.02283	0.13853 (13.8%)

4.4.3 저사이클 피로 수명의 통계적 변동성

본 연구의 저사이클 피로 시험으로 얻어진 Alloy 800H에 대한 저사이클 피로에 대한 응력 진폭의 변동과 피로 수명의 변동을 **Fig. 4-18**에 나타낸다. 본 절에서는 특히 저사이클 피로 수명의 변동성을 고찰하기 위하여 동일 전 변형률 범위에 대한 수명 데이터를 **Fig. 4-19**에 정리하여 나타내었다. **Fig. 4-19**에는 K. B. S. Rao 등⁽⁹⁾의 Alloy 800H의 동일 온도 조건에서 변형률 속도만 4×10^{-3} 으로 다른 4개의 시험편에 대한 피로 수명 결과도 함께 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 잘 제어된 동일 조건의 실험에 있어서도 그 피로 수명에는 상당한 변동성이 존재함을 알 수 있다. 따라서, 먼저 피로 수명에 대한 산술적 통계 해석을 수행하였다. n=6개의 시험편에 대한 표본의 평균과 표준편차를 **Table 19**에 정리하였다. **Table 20**에 Rao의 실험 결과에

대한 표본의 평균과 표준편차를 나타내었다.

이상의 결과로부터 알 수 있듯이 동일 조건의 실험에서도 Alloy 800H의 피로 수명에는 상당한 변동성이 존재함을 분명히 알 수 있다.

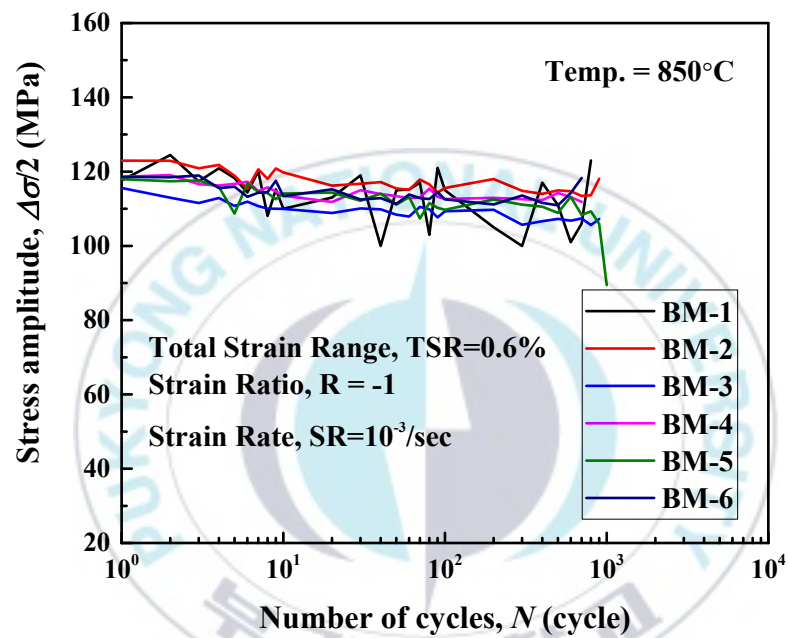


Fig. 4-18 Variations of the cyclic stress amplitudes and the fatigue life

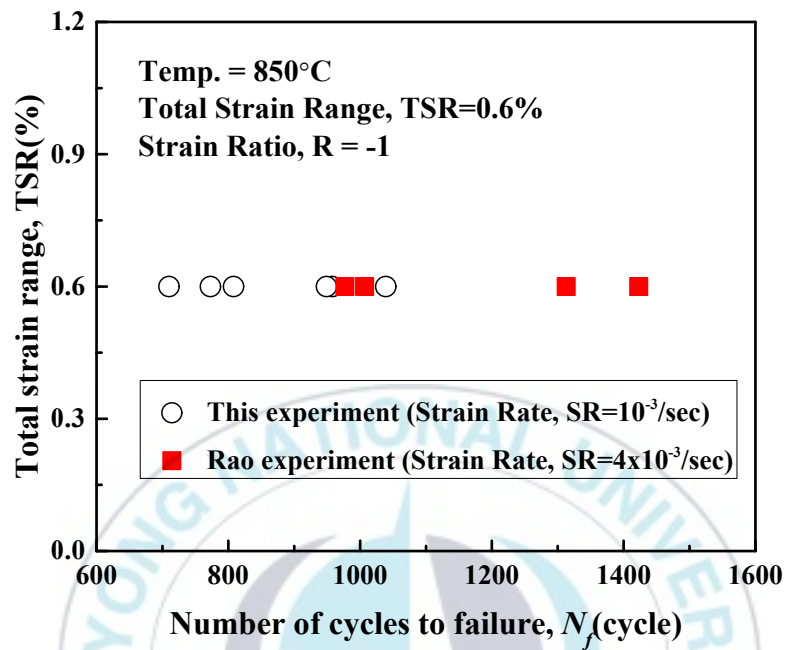


Fig. 4-19 Variations of the fatigue life (○: this experiment, ■: Rao experiment)

Table 19 Descriptive statistics for low cycle fatigue life

<i>N</i> total	Mean	Standard Deviation	Sum	Min.	Median	Max.
6	872.8	127.6	5237	710	878.5	1039

Table 20 Descriptive statistics for the Rao's experimental results

<i>N</i> total	Mean	Standard Deviation	Sum	Min.	Median	Max.
4	1180	222.0	4720	977	1160	1423

4.4.3 저사이클 피로 수명의 통계적 변동성

(1) 피로 수명의 확률분포 추정

본 연구에서는 저사이클 피로 특성 데이터, 즉 응력 진폭 및 변형률 진폭의 통계적 변동성을 신뢰성공학에서 가장 많이 이용되고 있는 Weibull 확률분포를 이용하여 지금까지 해석하였다.

피로 수명의 확률분포가 어느 확률분포에 적합한지를 먼저 Minitab의 확률분포 적합도 검정을 통하여 수행하였다.^(22~23) Table 21은 각종 확률분포에 대하여 Anderson-Darling 적합도 검정을 행한 결과를 나타낸다.

Anderson-Darling 값은 관측된 자료가 어떤 분포에 가장 적합한지를 판단할 수 있는 정보를 제공하는 것으로 가장 적은 값이 해당 분포가 데이터에 더 적합하다는 것을 의미한다. 이상의 결과에서 보듯이 본 연구의 피로 수명 데이터는 2-parameter Weibull 분포에 적합하다고 판단된다. 이상의 적합도 검정 결과와 더불어 오늘날 수명분포로 가장 널리 사용되고 편리한 Weibull 분포 중 2-parameter Weibull 분포를 본 연구의 피로 수명 분포의 확률 통계 해석에 사용한다.

Table 21 Goodness of-fit for the various probability distributions

Probability Distribution	Anderson-Darling Value
2-parameter Weibull distribution	2.217
3-parameter Weibull distribution	2.231
Normal distribution	2.237
Log-normal distribution	2.237
Exponential distribution	3.618

(2) Weibull 확률지에 의한 피로 수명 데이터의 해석

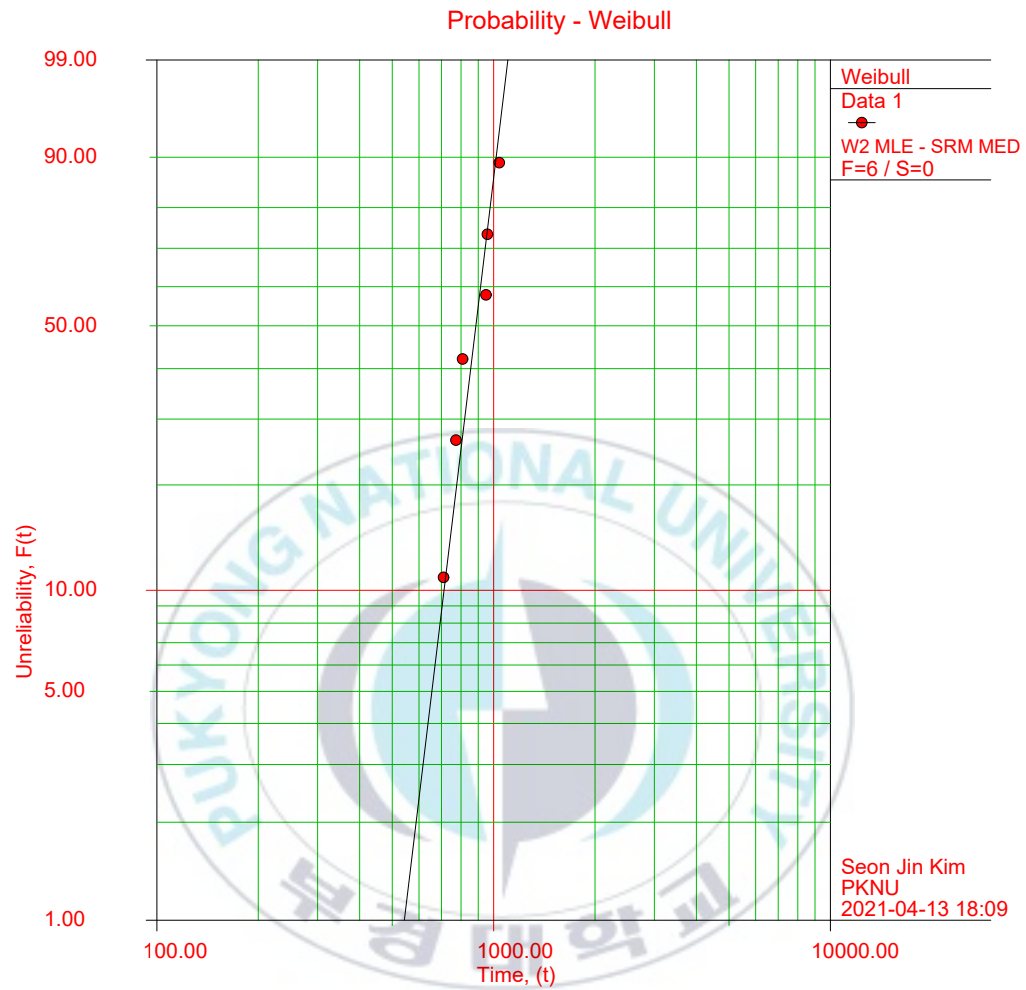
Fig. 4-20은 본 연구에서 수행한 저사이클 피로 수명을 메디안 랭크법에 따른 각 순위의 불 신뢰도를 구하여 Weibull 확률지에 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 본 피로 수명의 확률분포는 2-parameter Weibull 분포에 잘 따른다고 판단된다.

(3) 피로 수명의 Weibull 해석

일반적으로 고장분포를 Weibull 분포에 맞추어 형상 파라미터, 척도 파라미터 값을 구하는 것을 Weibull 해석이라 한다. **Fig. 4-20**의 직선은 최우추정법에 따라 그린 직선이며, 추정된 확률분포의 파라미터 값을 **Table 22**에 나타내었다. 본 재료에 대한 피로 수명의 형상 파라미터 β 는 8.7로 나타났다. 또한 척도 파라미터인 η 는 924를 나타내었다. 2-parameter Weibull 확률분포함수의 파라미터로 추정된 평균과 표준편차를 산술적 평균과 표준편차와 비교하여 **Table 23**에 나타내었다. 이처럼 동일 온도의 동일 조건하에서도 Alloy 800H의 저사이클 피로 수명에는 통계적 변동성이 존재하며 Weibull 확률분포에 잘 따른다고 할 수 있다.

Table 22 The estimated Weibull parameters for low cycle fatigue life

Weibull Distribution	Shape Parameter, β	Scale Parameter, η
Value	8.7	924



$\beta=8.6538, \eta=924.3388$

Fig. 4-20 2-parameter Weibull plot of low cycle fatigue life

Table 23 Comparison of Weibull statistics and descriptive statistics

Statistic	Mean	Standard Deviation	COV (%)
Weibull	873.64	119.84	0.13717 (13.7%)
Descriptive	872.83	127.55	0.14613 (14.6%)

이상의 Weibull 해석에 의하면, 피로 수명 분포의 형상 파라미터 β 는 8.7로 마모고장의 메커니즘을 나타내고 있으며, 시간의 경과(하중의 반복 수)에 따라 고장이 가파르게 증가하는 경향이 현저함을 알 수 있다.

따라서 본 연구의 실험 조건에서 얻은 Alloy 800H의 피로 수명의 확률분포는 다음의 식 (4-3)과 같이 표현할 수 있다.

$$F(N) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{N}{924} \right)^{8.7} \right\} \quad (4-3)$$

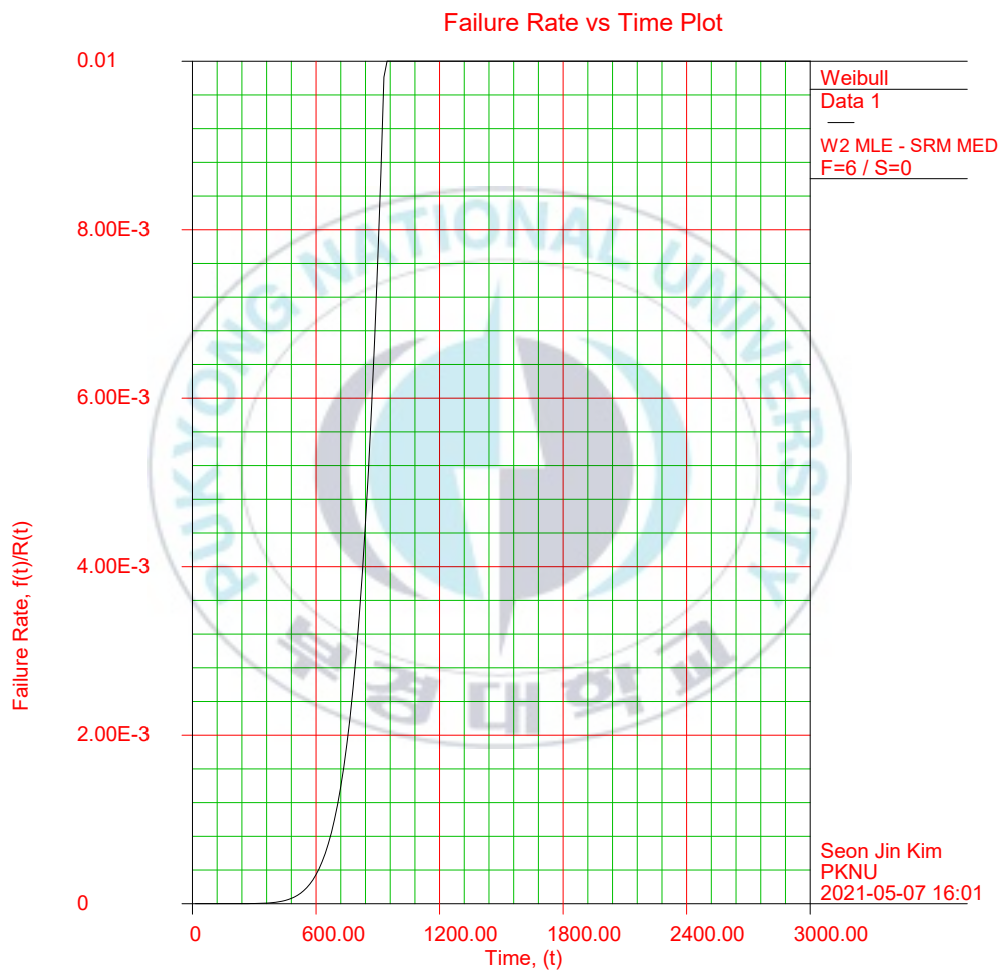
그리고 이에 상응하는 그 신뢰도함수와 고장률함수는 각각 아래와 식 (4-4), (4-5)와 같이 주어진다.

$$R(N) = \exp \left\{ - \left(\frac{N}{924} \right)^{8.7} \right\} \quad (4-4)$$

$$\lambda(N) = \frac{8.7}{924} \left(\frac{N}{924} \right)^{7.7} \quad (4-5)$$

Fig. 4-21과 **Fig. 4-22**는 각각 피로 수명의 고장률함수와 신뢰도함수를 나타낸 것이다. 따라서 Alloy 800H의 850℃ 고온에서 피로 수명의 신뢰도의 평가가 가능하다.

ReliaSoft's Weibull++ 6.0 - www.Weibull.com



$\beta=8.6538$, $\eta=924.3388$

Fig. 4-21 Failure rate function

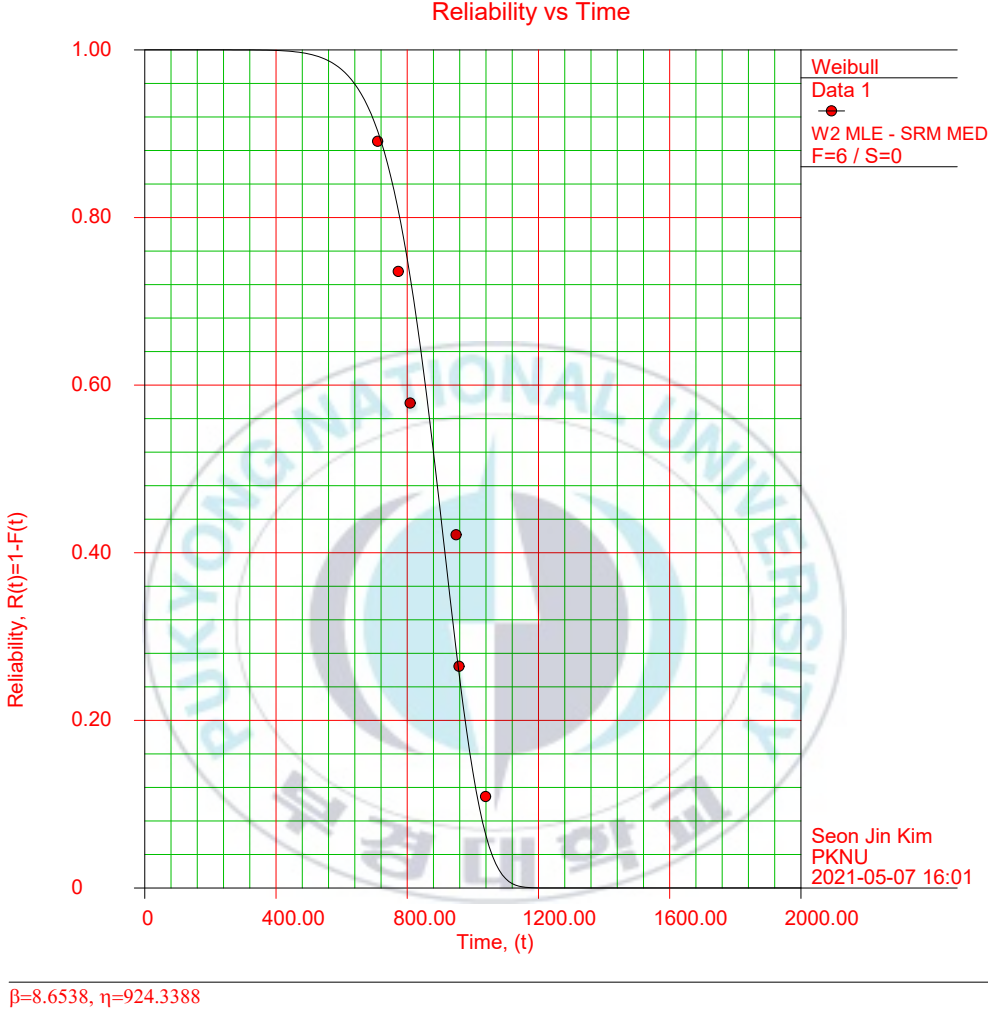


Fig. 4-22 Reliability function

한편 고온에서 Alloy 800H에 대한 피로 수명의 통계적 변동성에 대한 해안을 얻기 위하여, 앞 절의 **Fig. 4-19**의 K. B. S. Rao 등⁽⁹⁾의 Alloy 800H의 동일 온도인 850℃ 온도 조건에서 변형률 속도 4×10^{-3} 으로 수행한 4개의 저 사이클 피로 시험편에 대한 피로 수명 데이터를 활용하여 Weibull 해석을 수행하였다. **Fig. 4-23**은 Rao의 피로 수명 데이터를 Weibull 확률지에 플롯한 것이다. 그림 중의 직선은 최우추정법에 따라 그린 직선이며, 추정된 확률분포의 파라미터 값을 **Table 24**에 나타내었다. 즉, Rao의 실험에 대한 피로 수명의 형상 파라미터 β 는 7.1로 나타났으며, 또한 척도 파라미터인 η 는 1263으로 나타났다. 본 연구의 피로 수명에 대한 Weibull 해석의 파라미터와 Rao의 피로 수명에 대한 파라미터 값을 비교한 것을 **Table 25**에 나타내었다. **Table 25**에서 알 수 있듯이 Rao의 형상 파라미터가 7.1로 본 실험의 8.7보다 다소 작은 값을 나타내었다. 이는 Rao의 데이터가 더 변동계수가 크다는 것을 의미하며 Alloy 800H의 저사이클 피로 수명에는 분명히 통계적 변동성이 존재함을 알 수 있다. 또한 척도 파라미터가 Rao의 데이터가 크다는 것은 피로 수명이 본 연구의 결과보다 높다는 것을 의미한다. 아마 이는 변형률 속도의 차이에서 오는 것이라 사료된다.

Table 24 The estimated Weibull parameters for Rao's fatigue data

Weibull Distribution	Shape Parameter, β	Scale Parameter, η
Value	7.1	1263

Table 25 Comparison of the parameters for Rao's data and this work

Weibull Distribution	Shape Parameter, β	Scale Parameter, η
Rao's data	7.1	1263
This work	8.7	924

ReliaSoft's Weibull++ 6.0 - www.Weibull.com

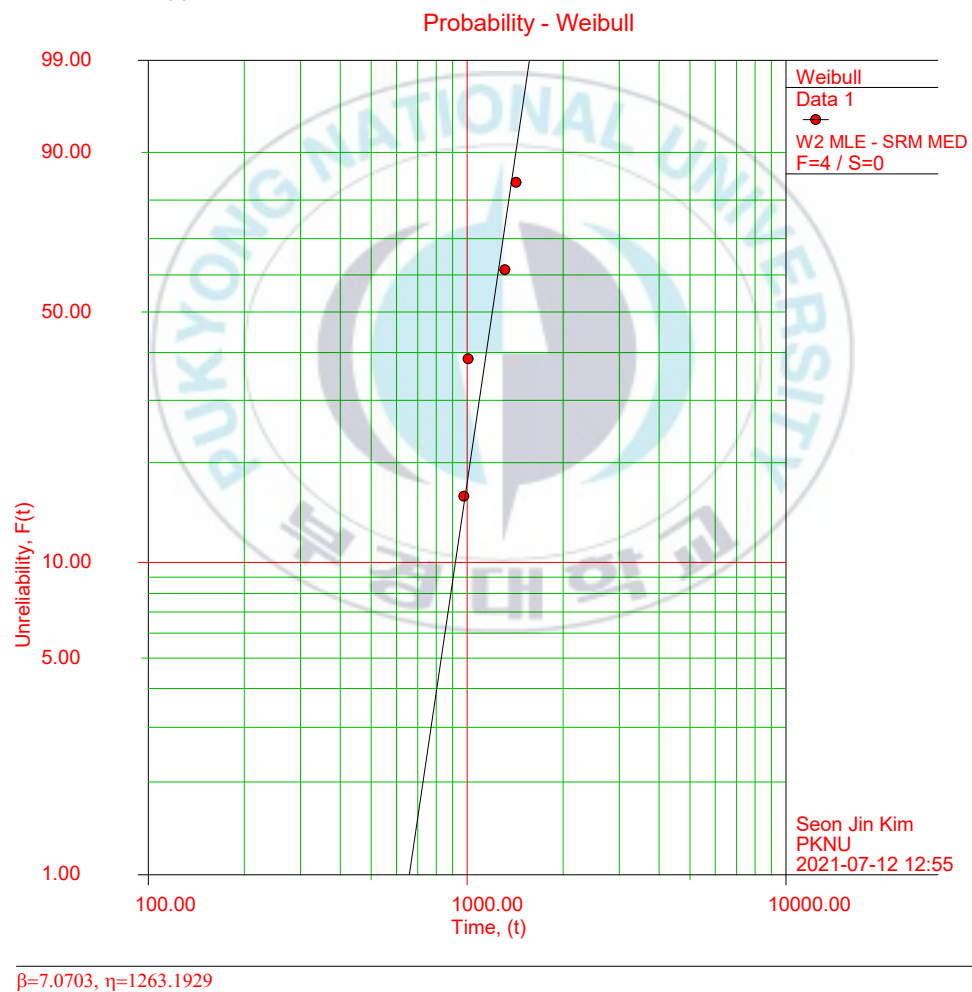


Fig. 4-23 Weibull plot of Rao's fatigue life data

이상과 같이 본 연구를 통하여 Alloy 800H의 고온 850℃에서의 저사이클 피로 수명 데이터에는 통계적 변동성이 존재함을 분명히 알 수 있었다. 이는 향후 고온에서의 저사이클 피로 수명을 신뢰성공학적 관점으로 평가할 필요가 있음을 시사해준다.



제 5 장 결 론

본 연구에서는 초고온가스로 주요 부품의 유력한 후보 재료인 Alloy 800H의 고온 850℃, 0.6%의 동일 전 변형률 범위 조건하에서 6개의 시험편에 대하여 완전 양진 연속 변형률 제어 저사이클 피로 시험을 주의 깊게 수행하여 저사이클 피로 성질의 통계적 변동성을 고찰하여, 다음과 같은 주요한 결론을 얻었다.

- (1) Alloy 800H의 850℃의 본 실험의 전 변형률 범위 및 변형률 속도의 조건에서 초기부터 반복 연화하는 거동을 나타냈다.
- (2) 반 수명에서의 응력 진폭은 2-parameter 와이블 확률분포에 잘 따름을 알 수 있었다. 형상 파라미터 β 는 36의 아주 큰 값을 나타내었다.
- (3) 반 수명에서의 소성 변형률 진폭은 2-parameter 와이블 확률분포에 잘 따름을 알 수 있었으며, 형상 파라미터 β 는 70으로 응력 진폭보다도 더 큰 값을 나타내었다. 즉 응력 진폭과 소성 변형률 진폭의 변동성은 아주 적다는 것을 알 수 있다.
- (4) 피로 수명의 확률분포도 2-parameter 와이블 분포에 잘 따름을 알 수 있었으며, 형상 파라미터 β 는 8.7를 나타내었다. 즉, 마모고장의 메커니즘을 나타내고 있으며, 시간의 경과(하중의 반복 수)에 따라 고장이 가파르게 증가하는 경향이 현저함을 알 수 있다.
- (5) 결론적으로 반 수명에서의 응력 진폭과 소성 변형률 진폭에도 변동성이 존재하나 반복 응력에 대한 측정 결과의 반복성(repeatability)은 어느 정도 매우 우수하다. 하지만 피로 수명은 변동계수는 약 14%로 통계적 변동성을 고려할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- (1) Generation IV International Forum, 2019, "Generation IV Systems"
- (2) Yu-En Xia, 2020, "Low Cycle Fatigue Properties of Alloy 800H Base Metal and Weldments at 850°C", Master Thesis, Pukyong National University
- (3) W. G. Kim, J. Y. Park, M. W. Ekaputra, S. D. Hong, S. J. Kim and Y. W. Kim, 2013, "Comparative Study on the High-Temperature Tensile and Creep properties of Alloy 617 Base Metal and Weld Metals", J. of Mech. Sci. & Tech., Vol. 27, No. 8, pp. 2331~1340.
- (4) SAPUTRA FAUZY EKA, 2019, "Comparison of Low Cycle Fatigue Properties of Alloy 800H Base Metal and Weldment at 800°C", Master Thesis, Pukyong National University
- (5) S. J. Kim, R. T. Dewa, W. G. Kim and E. S. Kim, 2016, "Macro and Microscopic Investigation on Fracture Specimen of Alloy 617 Base Metal and Weldment in Low Cycle Fatigue Regime", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A (or) B, Vol. 40, No. 6, pp. 565-571.
- (6) T. C. Totemeier and H. Tian, 2007, "Creep-Fatigue Interactions in INCONEL 617", Materials Science and Engineering A, Vol. 468~470, pp. 81~87.
- (7) M, Kolluri, P. ten Pierick, and T. Bakker, 2015, "Characterization of High Temperature Tensile and Creep-Fatigue Properties of Alloy 800H for Intermediate Heat Exchanger Components of (V)HTRs", Nuclear Engineering and Design, Vol. 284, pp. 38-49.
- (8) J. L. Kaae, 2009, "High-Temperature Low Cycle Fatigue of Alloy

- 617", International Journal of Fatigue, Vol. 31, pp. 332-340.
- (9) K. B. S. Rao, H. Schuster, G. R. Halford, 1996, "Temperature and Strain-Rate Effects on Low-Cycle Fatigue Behavior of Alloy 800H", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 27A, PP. 255-267.
- (10) R. T. Dewa, S. J. Kim, W. G. Kim and E. S. Kim, 2018, "Uniaxial Low-Cycle Fatigue Study of Alloy 800H Weldments at 700°C", Metals 2018, 8, 918, pp. 2-16.
- (11) Y. E. Xia, S. J. Kim, W. G. Kim and E. S. Kim, 2020, "Low-Cycle Fatigue Behavior of Alloy 800H at a High Temperature of 850°C", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A., Vol. 44, No. 7, pp. 481-488.
- (12) 재료강도확률모델연구회편, 1992, 재료강도의 통계적 성질, 양현당발행 (일서).
- (13) Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock, 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice-Hall, inc..
- (14) 브레이즈, 찰스 헨리. 기초 통계학의 이해. 서울: 교우,
- (15) 강석복, 우정수, "통계적 추정과 가설검정", 경문사, pp. 175-177, 2002.
- (16) 홍종선, "통계적 확률분포", 자유 아카데미, pp. 116-133, 2002.
- (17) 이치우, 김선진, 이성우, 정상영, "신뢰성공학", 원창출판사, 1993.
- (18) Nelson, Wayne, "Applied Life Data Analysis, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982.
- (19) W. Weibull, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", Journal of applied mechanics, Vol. 18, pp. 293-297, 1951.
- (20) ASTM E606-92, 2002, "Annual Book of ASTM Standards-Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing". Vol. 03.01, pp.

569-583.

- (21) MTS, 2015, "MTS Landmark Testing Solutions
- (22) 한국인정기구, 2016, 측정결과의 불확도추정 및 표현을 위한 지침, KOLAS-G-002. pp. 1-174.
- (23) 서순근저, Minitab 신뢰성분석, 이레테크, 2006, p.540
- (24) Wright J K ,Carroll L J ,Simpson J A ,Wright R N . "Low Cycle Fatigue of Alloy 617 at 850 °C and 950 °C" Journal of engineering materials and technology : 031005.

