

고온 저주기 피로에 의한 STS 304 압연강재의 특성연구

김치환* · 박영민* · 배문기* · 신동철** · 김대원*** · 김태규****,†

*부산대학교 나노융합기술학과, **거제대학교 기계공학과

신라대학교 지능형자동차공학과, *부산대학교 나노메카트로닉스공학과

Characteristics of STS 304 Rolled Steel by High Temperature Low Cycle Fatigue

C.H. Kim*, Y.M. Park*, M.K. Bae*, D.C. Shin**, D.W. Kim***, T.G. Kim****,†

*Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Busan 50463, Korea

**Department of Mechanical Engineering, Koje College, Koje 53325, Korea

***Division of Intelligent Vehicle, Silla University, Busan 46958, Korea

****Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University, Busan 50463, Korea

Abstract In this study, strain-controlled low cycle fatigue test for hot rolled STS304 steel was carried out at 400°C and 600°C, respectively. High temperature fatigue test was done using an electric furnace attached on the hydraulic fatigue test machine. The results of this study show that STS304 hot rolled steel has excellent static strength and fatigue characteristics. The hysteresis loop at half life was obtained in order to calculate the elastic and plastic strain. Also, Relationship between strain amplitude and fatigue life was examined in order to predict the low cycle fatigue life of STS304 steel by Coffin-Manson equation.

(Received January 7, 2019; Revised January 14, 2019; Accepted January 24, 2019)

Key words : Low Cycle Fatigue, STS 304 steel, Austenite Stainless Steel, Hot Rolled Stainless Steel, Plastic Strain Energy

1. 서 론

STS304 소재는 18Cr-8Ni-Fe 합금으로 대표적인 austenite계 스테인리스 강으로 내식성과 가공성이 우수하여 화학 플랜트, 발전소 등의 구조용 강으로 널리 사용되는 강재이다. 화학 플랜트 및 발전소 등에 사용되어지는 구조용 강은 장비의 가동 및 정지에 따른 갑작스런 큰 응력을 받게 되고, 이러한 응력에 의한 파손사고가 많은 인명 및 재산 피해를 초래하기 때문에 구조용 강의 설계 및 제작에 높은 신뢰성이 요구 된다.

구조물의 설계, 제작을 위해서 선행되어야 할 중요한 연구로는 구조물에 사용되어지는 재료의 물성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 단일 인장 및 압축 하중에 의한 파손은 설계를 통해 거의 발생하지 않지만, 반복하중에 의한 파손사례는 종종 보고되어 진

다. 반복하중에 의한 피로파손의 경우 항복응력 이하의 응력에서도 발생하는 경우가 종종있다. 따라서 사고발생의 사전예후를 발견하기 어렵고, 사고발생 시 큰 인명피해를 가져올 수 있으므로 설계 시에 반복응력에 의한 피로강도 물성특성을 확보하는 것은 매우 중요하다[1, 2].

본 연구에서는 화학 플랜트 및 발전소의 구조용 강으로 널리 사용되어지는 STS 304 압연강재의 상온 및 고온에서 저주기 피로시험을 통하여 저주기 피로물성을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

STS 304 강재는 내식성 및 내열성이 뛰어나고, 가공성이 좋아 발전소의 구조용 강재로 널리 사용되

†Corresponding author. E-mail : tgkim@pusan.ac.kr

Table 1. Chemical composition of STS 304 steel

Chemical Composition (wt%)									
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
0.03	0.430	1.077	0.031	0.009	8.661	18.14	0.188	0.389	0.018

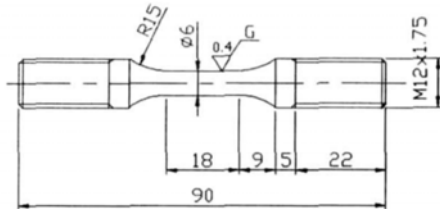


Fig. 1. Dimension of the specimen (unit : mm).

어지는 소재이다. 본 연구에서는 STS 304 강재의 강도를 향상시키기 위하여 열간 압연된 강재를 사용하였다.

저주기 피로시험을 위해 시험편은 직경이 6mm인 봉상형 시험편으로 ASTM-E606 규격에 따라 시험편을 정밀가공하였다[3]. 피로시험의 경우 표면 거칠기에 따라 시험편의 파단사이클이 달라질 수 있기 때문에, 저주기 피로시험 시 표면거칠기에 의한 영향을 없애기 위해서 가공된 시험편 표면에 emery paper를 이용하여 #2000까지 정밀연마를 수행하였다. 시험편의 형상 및 화학조성을 Fig. 1, Table 1에 각각 나타내었다.

2.2 실험장치 및 실험조건

본 실험에 사용된 저주기 피로시험기(INSTRON 8516)는 유압식 만능재료시험기로 최대 100 kN의 하중을 부하하여 정적 인장, 압축 및 굽힘시험과 피로시험을 할 수 있는 장비이며 표점거리 12.5mm의 연신계(Extensometer)를 사용하여 변형률을 측정하였다. 고온 저주기 피로시험을 위해 상, 중, 하 부위에 thermal couple로 온도를 측정하여 온도조절이 가능한 전기로를 사용 하였다. 시험편의 온도 편차를 줄이기 위하여 실제 시험편의 gage length 부분에 thermal couple를 추가로 설치하여 시험편의 온도를 측정하였다.

저주기 피로시험은 변형률 비(strain ratio) R=-1.0인 삼각파(triangular wave)를 이용하여 수행하였으며, 총변형률 0.6%, 0.8%, 1.0%의 세 가지 변형률

Table 2. Low cycle fatigue test conditions of STS 304 steel

Total strain range (%)	0.6, 0.8, 1.0
Strain ratio (R)	-1.0
Temperature (°C)	Room Temperature
Frequency (Hz)	0.25
Test control method	Strain control

에서 각각 세 번의 시험을 수행하였다. 저주기 피로 시험에서 발생 할 수 있는 시험편의 좌굴을 최소화 하기 위해 보조 align 장치를 장착하여 시험을 진행 하였다. 저주기 피로시험의 조건을 Table 2에 정리 하였다.

STS 304 고온 저주기 피로시험결과를 상온 저주기 피로시험과 비교하기 위해 저자의 논문 결과를 참고하였다[4].

3. 실험결과 및 고찰

3.1 저주기 피로특성

저주기 피로수명에 대한 많은 예측 방법이 제안되어 있다. 저주기 피로시험에서 사용된 전체 변형률(ϵ_t)은 식 (1)과 같이 탄성변형률(ϵ_e)과 소성변형률(ϵ_p)의 합으로 나타내어진다[5, 6].

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p \tag{1}$$

Basquin은 탄성변형률과 피로파단수명 사이의 관계가 log-log 좌표상에 선형적으로 나타낼 수 있음을 식을 통해 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{\epsilon_e}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b \tag{2}$$

Coffin-Manson에 의해 제안된 식은소성변형률과 피로수명과의 관계를 나타내며 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (3)$$

탄성변형률에 대한 식과 소성변형률에 대한 피로수명 관계식을 정리하여 나타낸 식 (4)를 일반적인 변형률-수명 관계식으로 알려져있다.

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_t}{2} &= \frac{\varepsilon_e}{2} + \frac{\varepsilon_p}{2} \\ &= \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 각각 E는 탄성계수, $\varepsilon_t/2$ 는 전변형률 진폭, $\varepsilon_e/2$ 는 탄성변형률 진폭, $\varepsilon_p/2$ 는 소성변형률 진폭, σ_f' 은 피로강도계수, b는 피로강도지수, ε_f' 은 피로연성계수, c는 피로연성지수, $2N_f$ 는 파단사이클의 반전수를 의미한다.

본 연구에서는 Coffin-Manson에 의해 제안된 변형률과 피로수명 사이의 관계식인 식 (4)으로 피로수명을 평가하였다.

히스테리시스 곡선은 저주기 피로시험과 같이 항복응력 이상의 하중에서 반복시험과정에서 나타나는 그래프로 응력-변형률 사이의 관계를 나타낸다. 저주기 피로시험이 진행되는 동안 히스테리시스 곡선은 재료의 반복 경화 또는 연화에 의해 값이 변한다. 히스테리시스 곡선은 초기에 그 변동 폭이 조금 크다가 점차 안정화되는 경향을 나타내고, 대부분 반수명($1/2N_f$) 사이클 이상에서는 안정화되기 때문에 본 연구에서는 반수명에서 안정화된 히스테리시스 곡선을 구하여 나타내었다.

Coffin-Manson에 의해 제안된 소성변형률과 피로수명 사이의 관계를 나타내기 위해서 안정화된 반수명에서의 히스테리시스 곡선을 Fig. 2~4에 나타내었다. 세가지 변형률 시험 조건에서 온도에 따른 히스테리시스 곡선을 비교해보면 상온의 시험조건에 비해 고온에서 최대 인장 및 압축 응력이 감소하는 것을 알 수 있고, 낮은 변형률에서는 400도와 600도 조건에서 히스테리시스 곡선이 유사한 경향을 나타내지만, 변형률 조건이 높아질수록 경향이 달라짐을 알 수 있다.

안정화된 히스테리시스 곡선에서 탄성 변형률과 소성 변형률을 계산한 값을 Table 3~5에 나타내었다. 안정화된 히스테리시스 곡선에서의 탄성 변형률 및

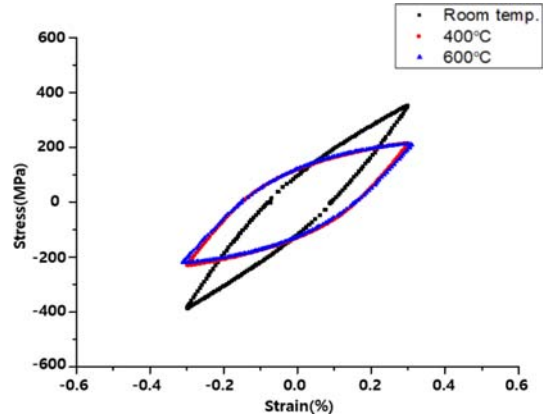


Fig. 2. Hysteresis loop with total strain at $\varepsilon=0.6\%$.

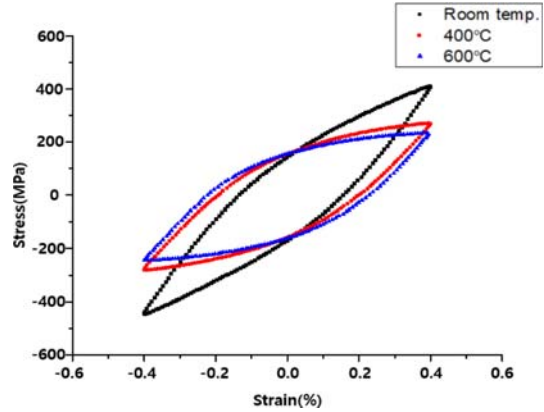


Fig. 3. Hysteresis loop with total strain at $\varepsilon=0.8\%$.

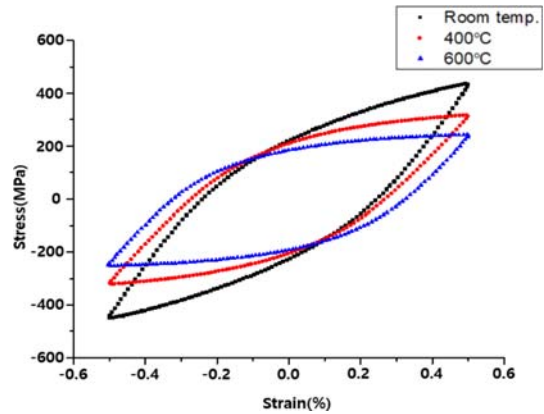


Fig. 4. Hysteresis loop with total strain at $\varepsilon=1.0\%$.

소성 변형률을 계산하여 선형회귀해석을 통해 저주기 피로특성치를 계산하였다. 선형회귀해석에 이용된 식

Table 3. Low cycle fatigue test data at room temperature

$\Delta\epsilon_t/2$	$\Delta\epsilon_e/2$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\Delta\sigma/2$ (MPa)	Nf (cycles)
0.6	0.2175	0.0825	110.25	2785
0.8	0.255	0.145	154.4	15744
1.0	0.2565	0.2435	222.2	79818

Table 4. Low cycle fatigue test data at 400°C

$\Delta\epsilon_t/2$ (%)	$\Delta\epsilon_e/2$ (%)	$\Delta\epsilon_p/2$ (%)	$\Delta\sigma/2$ (MPa)	Nf (cycles)
0.6	0.146	0.154	122.25	22121
0.8	0.203	0.197	156.6	4196
1.0	0.231	0.269	208.8	1157

Table 5. Low cycle fatigue test data at 600°C

$\Delta\epsilon_t/2$	$\Delta\epsilon_e/2$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\Delta\sigma/2$ (MPa)	Nf (cycles)
0.6	0.1455	0.1545	124.1	2000
0.8	0.1745	0.2255	157.75	1948
1.0	0.175	0.325	187.75	1018

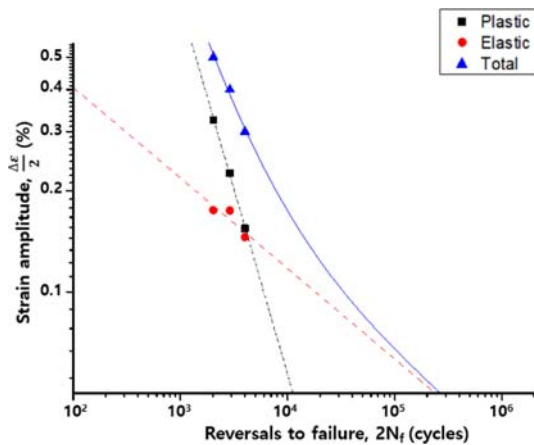


Fig. 5. Strain-life curves of STS 304 at 600°C.

은 Coffin-Manson에 의해 제안된 변형률-수명 식을 이용하였다. Table 3~5에 나타난 저주기 피로수명 데이터를 이용하여 linear fitting을 통해 변형률-수명 곡선으로 Fig. 5~7에 나타내었다. 변형률-수명 곡선은 탄성 변형률-수명 곡선과 소성변형률-수명 곡선의 합으로 나타내어진다.

탄성변형률과 소성변형률 추정선의 교점으로 나타내어지는 천이수명은 상온, 400°C, 600°C 실험조건

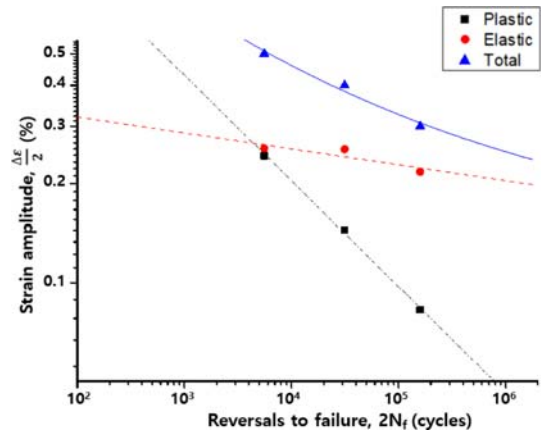


Fig. 6. Strain-life curves of STS 304 at room temperature.

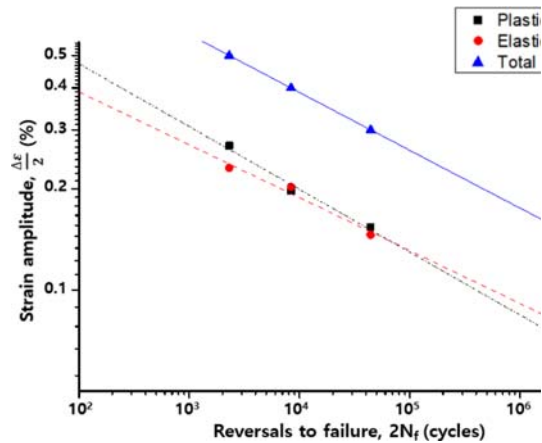


Fig. 7. Strain-life curves of STS 304 at 400°C.

에서 각각 4,485, 70,596, 4,120 cycles을 나타내었다. 각 온도조건에서 변형률-수명 곡선을 통해 linear fitting한 결과 상온에서는 각 변형률 조건에서 탄성변형률이 피로수명에 미치는 영향이 크지만, 고온 저주기 피로시험의 경우, 소성 변형률이 수명에 미치는 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 STS 304 압연강재의 고온 저주기 피로시험을 통하여 저주기 피로특성을 알아보았다. 이 결과를 이용하여 STS 304 압연강재의 저주기 피로시험 조건을 설정하였으며, 저주기 피로수명 예

측평가는 Coffin-Manson식을 통해 평가하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 소성변형률을 계산하기위해 구한 반수명에서의 히스테리시스 곡선에서 최대인장응력은 실험온도가 높아짐에 따라 감소하였다.
2. Coffin-Manson 식에 따른 linear fitting을 통해 얻은 고온에서의 Strain-life 곡선은 상온상태 보다 소성변형률이 저주기 피로수명에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다.
3. 저주기 피로수명에 영향을 미치는 탄성변형률과 소성변형률 사이의 천이수명이 상온 및 600°C에 비해 400°C 에서 70,596 cycle로 더 높게 나타남을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)와 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의

지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2018R1D1 A1B07046366).

References

1. U. Cho : J. Korean Soc. of Mechanical Technology, **13**(2) (2011) 87-92.
2. S. K. Koh, Y. I. Kim, H. J. Lee, W. D. Kim, S. R. Lee : Transactions of Korea Society of Automotive Engineers, **4**(2) (2015) 80-89.
3. ASTM E606-92 : ASTM International (2002) 569-583.
4. 김치환, 박영민, 배문기, 김혜성, 김태규 : J. of the Korean Society for Heat Treatment, **31**(1) (2018) 18-23.
5. Coffin Jr L. F. : ASTM-MPC-3 Symposium on Creep-Fatigue Interaction (1976) 349-364.
6. J. A. Bannatyne, J. J. Comer, J. L. Jandrock : Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall (1990).