

Mean Stress를 고려한 11.7Cr-1.1Mo강의 고온저주기 피로특성에 관한 연구

홍상혁¹⁾ · 홍춘희¹⁾ · 이현우²⁾

부산대학교 기계설계공학과¹⁾ · 부산대학교 기계공학부²⁾

A Study of Low Cycle Fatigue Characteristics of 11.7Cr-1.1Mo Heat Resisting Steel with Mean Stress

Sanghyuk Hong¹⁾ · Chunhyi Hong¹⁾ · Hyunwoo Lee²⁾

¹⁾Department of Mechanical Design Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²⁾School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 19 October 2005 / Accepted 27 December 2005)

Abstract : The Low cycle fatigue behavior of 11.7Cr-1.1Mo heat-resisting steel has been investigated under strain-controlled conditions with mean stresses at room temperature and 300°C. For the tensile mean stress test, the initial high tensile mean stress generally relaxed to zero at room temperature, however, at 300°C initial tensile mean stress relaxed to compressive mean stress. Low cycle fatigue lives under mean stress conditions are usually correlated using modifications to the strain-life approach. Based on the fatigue test results from different stain ratio of -1, 0, 0.5, and 0.75 at room temperature and 300°C, the fatigue damage of the steel was represented by using cyclic strain energy density. Total strain energy density considering mean stress indicated well better than not considering mean stress at 300°C. Predicted fatigue life using Smith-Watson-Topper's parameter correlated fairly well with the experimental life at 300°C.

Key words : Low cycle fatigue(저주기 피로), High temperature fatigue(고온 피로), Mean stress(평균 응력), Mean strain(평균 변형률), Total strain energy density(총 변형률 에너지 밀도), Fatigue life(피로 수명)

1. 서론

기계부품이나 구조물을 설계할 때 정적하중과 피로하중에 대한 강도를 고려해야 하는 것은 잘 알려진 사실이다. 특히 많은 구조물에 있어서 피로강도는 보통 정적강도보다 낮기 때문에 부품의 안정성, 신뢰성 등에 결정적인 영향을 줄 수 있는 요인이다. 20세기 들어서는 피로현상을 물리적으로 접근하려는 노력이 있었으며, 응력, 변형률 등에 기초한 피로 수명 예측방법은 많은 발전을 거듭하였다. 특히

Low Cycle Fatigue를 위한 Coffin-Manson의 피로 판정식은 현재 S-N curve와 함께 널리 쓰이고 있다.¹⁾

최근 고온, 고압 하에서 운전되는 대형 설비들이 증가하고 있다. 이러한 설비들이 받게 되는 반복하중은 국부적으로 탄성한도를 넘는 높은 변형률을 발생시켜 구조물을 파손에 이르게 한다. 대부분의 고온 설비에서는 열효율 향상을 위하여 고온 고압화 추세이므로 고온 저 사이클에 대한 연구의 중요성은 점점 더 높아지고 있다. 따라서 이들 부품에 대한 고온에서의 피로특성을 규명하는 것은 중요한 연구 과제이다.

^{*}Corresponding author. E-mail: hywlee@pusan.ac.kr

미시적인 관점에서 반복하중에 의한 비가역적인 성질을 지닌 소성변형은 변형률에너지의 방출과 관련되며, 이러한 변형률에너지는 반복하중에 의해 발생하는 피로손상의 중요한 요인 중의 하나이다.²⁾ 응력과 변형률의 함수로 표현되는 변형률에너지에 의한 적절한 피로손상모델은 여러 연구자에 의하여 제안되었다.^{3,5)} 변형률에너지를 이용한 피로손상평가는 각 사이클 당 방출되는 변형률에너지 밀도를 반 수명(half-life)에서의 응력-변형률 선도 곡선의 면적을 측정하여 소성 변형률에너지 밀도로 정의하고 총 변형률에너지 밀도의 합이 일정한 값에 도달하였을 때를 파손기준으로 사용하였으며 이를 이용하여 저 사이클 피로수명의 예측에 적용할 수 있다. 또한 재료의 피로수명은 평균응력 또는 평균변형률에 많은 영향을 받으며, 이러한 평균응력의 영향은 특히 고 사이클 영역에서 매우 큰 것으로 알려지고 있다.^{6,7)} 그러나 변형률에너지 손상변수를 이용한 수명평가에 대한 대부분의 연구가 평균응력의 영향이 상대적으로 작은 저 사이클 영역에서 이루어졌으므로 변형률에너지 손상변수가 평균응력의 피로수명에 미치는 영향을 적절히 표현할 수 없는 문제점이 있다.

본 연구의 주재(raw material)인 화력발전소 고온, 고압 터빈에서 스테드 볼트로 쓰이는 11.7Cr-1.1Mo 강의 실제 사용 환경과 하중 히스토리는 최초에 tension prestress(약 300 MPa)가 주어진 후 고온(300°C에서 500°C)에서의 온도변화와 동시에 약 100 Mpa에서 200 Mpa 사이의 응력이 주어진다. 특히 스테드 볼트에 가해진 응력값 중 초기에 주어진 tension prestress가 응력 히스토리 중 가장 큰 값을 차지하므로 tension prestress는 피로수명에 영향을 미치는 주요한 요인이 될 수 있다. Nihel⁸⁾ 등은 노치가 없는 시편에 평균응력이 작용할 때 변형률 제어 피로시험을 하여 피로수명을 예측하는데 Morrow⁹⁾와 Smith, Watson and Topper(SWT parameter)¹⁰⁾에 의하여 제안된 여러 가지 손상변수들의 가능성과 정밀도를 검증했다. 그리고 일반적으로 평균 변형률은 평균응력을 발생시키지 않으면 피로수명에 영향이 없음이 밝혀졌다.^{11,12)} 이는 사이클이 진행되는 동안 히스테리시스 루프의 변화와 응력이완을 포함한 주

기적인 소성변형과 관계있다. Kliman과 Bily¹³⁾는 응력 제어 cyclic 응력-변형률 선도는 평균응력 수준에 의해 영향을 받고, 반면에 변형률 제어 cyclic 응력-변형률 선도는 다양한 평균 변형률들에서 동일한 결과가 나타남을 보였다. 따라서 본 연구에서는 인장 평균응력이 작용하는 발전소 터빈의 스테드 볼트로 쓰이는 11.7Cr-1.1Mo강의 노치가 없는 시편을 상온과 고온에서 변형률 제어로 저주기 피로 물성치와 수명을 결정하여 고온(300°C)에서 평균응력/평균변형률이 작용하는 11.7Cr-1.1Mo강의 고온 저주기 피로특성을 관찰하고 평균응력을 고려하기 위해 탄성 인장변형률 에너지밀도가 포함된 총 변형률에너지밀도 손상변수, Morrow 손상변수, Smith-Watson-Topper(SWT) 손상변수를 각각 비교하여 고온에서 평균응력/평균변형률이 피로손상에 미치는 영향을 효과적으로 평가 하는데 연구의 목적이 있다.

2. 실험 및 실험방법

2.1 시편

사용된 시편은 발전소 터빈용으로 쓰이는 크롬 몰리브덴강이며, 재료의 기본적인 물성을 얻기 위하여 단순 인장 실험은 ASTM 규격(E 8M-90)에 따라 Fig. 1과 같은 시편을 사용하였고, 피로 시험은 Fig. 2와 같은 형상의 시편을 사용하였다

Table 1 Chemical composition of 11.7Cr-1.1Mo steel

C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	V	W
0.204	0.28	0.78	0.0197	0.78	11.73	1.09	0.275	1.09

Table 2 Heat treatment of 11.7Cr-1.1Mo steel

Material	Melting process and initial heat treatment
Cr-Mo steel	Quenched : 1040°C at 5hrs oil cool Tempered : 660°C at 11hrs air cool S. R. A. : 620°C at 4hrs air cool

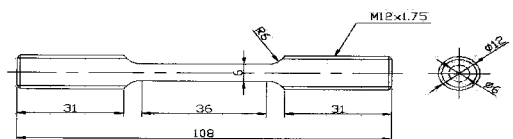


Fig. 1 Geometry of tensile test specimen

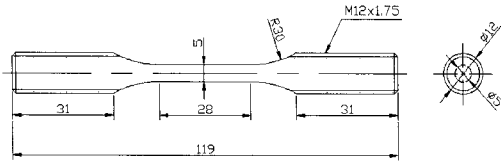


Fig. 2 Geometry of fatigue test specimen

2.2 실험 장비

실험 장비는 MTS사의 2축 피로 실험장치로 최대 용량 축 하중 100kN, 비틀림 하중 1000N-m의 폐쇄 유압회로 방식의 MTS(Axial-Torsional material test system, Model : 646.10) 피로 시험기를 사용하였다.

상온 및 고온에서의 피로 실험은 ASTM standard practice E606.5에 의거하여 삼각 과형으로 수행되었다. 변형률 제어를 하기 위하여 상온에서는 상온용 1축 신장계인 MTS사의 Model No. 632.11c.20을 사용하였고 고온에서는 Photo. 1과 같이 MTS사의 Model No.6 32.42C-01의 고온용 1축 신장계를 사용하여 변형률, 변위 및 하중을 측정하였다.

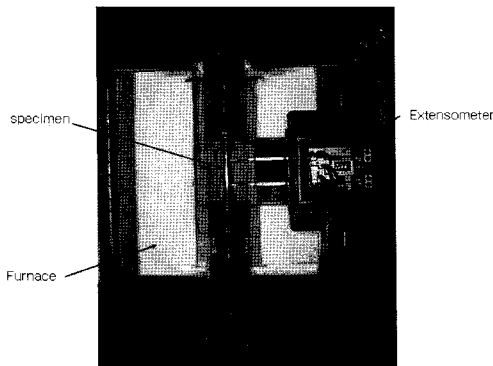


Photo. 1 Grip assembly at high temperature

2.3 실험 방법

2.3.1 상온 및 고온 인장실험

상온에서의 인장실험과 고온에서의 인장실험을 통해 재료의 응력-변형률 선도와 기본 물성자료를 Table 3과 같이 얻었다. 상온인장시험은 상온용 지그를 이용하여 과단 시까지 일정하게 하중을 증가시켜 응력과 변형률의 값을 측정하였으며 고온에서는 고온용 지그와 온도제어기를 사용하였다. 재료

Table 3 Mechanical properties at room temperature

Mechanical property	E (GPa)	σ_{ys} (MPa)	σ_u (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Room temperature	184	762	962	24	52
300°C	166	721	854	16	54

의 안정화를 위해 하중제어를 이용해 시편에 부가되는 하중이 '0' 이 되도록 제어하면서 온도를 실험 온도까지 올리고, 1시간동안 유지시켜 재료가 열적으로 안정화된 후에 상온과 같은 방법으로 시험을 수행하였다.

2.3.2 상온 및 고온 피로실험

11.7Cr-1.1Mo강의 저 사이클 피로특성과 평균응력의 영향을 평가하기 위해서 노치가 없는 평탄한 일축 봉상 시험편을 Fig. 2와 같이 제작하고, 용량 10ton의 유압식 피로 시험기를 이용하여 변형률 제어 피로시험을 수행하였다. 본 실험에서는 상온과 300°C 환경에 각각 기본적으로 4종류의 서로 다른 변형률 비 $R=-1, 0, 0.5, 0.75$ ($R = \epsilon_{min}/\epsilon_{max}$)에 대한 각각 0.002~0.014 사이의 서로 다른 일정변형률 진폭을 적용하여 0.4 Hz의 일정한 변형률 속도에서 모든 실험이 수행되었다. 또한 상온에서의 저 사이클 피로시험을 수행 시 실험 중 균열의 생성 및 진전과정을 관찰하면서 초기 최대 인장하중의 75%하중 또는 파단을 파괴기준으로 설정하고 그 상태까지의 반복횟수를 피로수명으로 정의 하였다. 고온에서의 저주기 피로시험은 인장시험과 같은 조건으로 시편을 유압식 피로시험기에 장착 후 고온로를 가동하여 1시간 동안 열적 안정화를 꾀하고 저주기 시험에 임하였다. 상온에서의 저주기 시험은 모두 0.1Hz의 변형률 속도로 시험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장 및 피로시험 결과

상온과 300°C에서의 기계적 물성치를 비교하여 보았을 때 E (탄성계수)는 약 10% 감소하였고 항복강도(0.2% offset)는 약 5% 감소하였으며 인장강도는 약 11% 감소하였다.

Fig. 3은 고온에서 R=-1일 때 반 수명(half life)에서의 cyclic stress-strain 곡선이다. Fig. 4를 통해 11.7Cr-1.1Mo강의 주기적 연화 현상을 잘 알 수 있

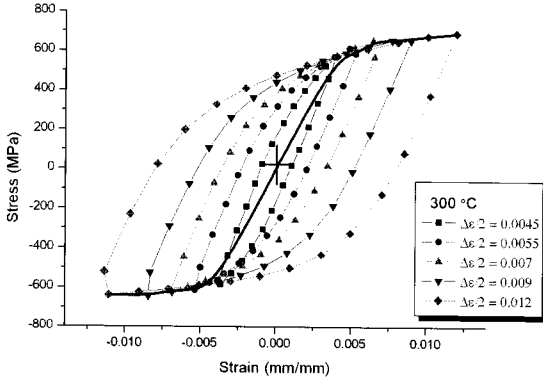


Fig. 3 Cyclic stress-strain curve at high temperature

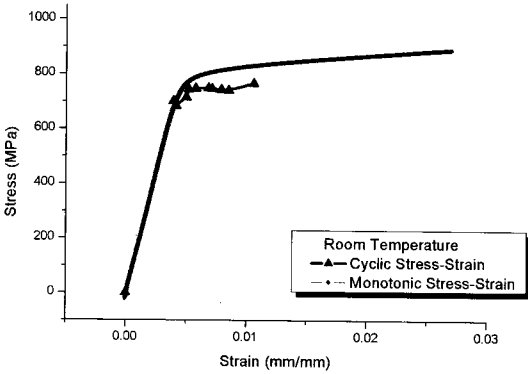


Fig. 4 Cyclic & Monotonic stress-strain curve at room temperature

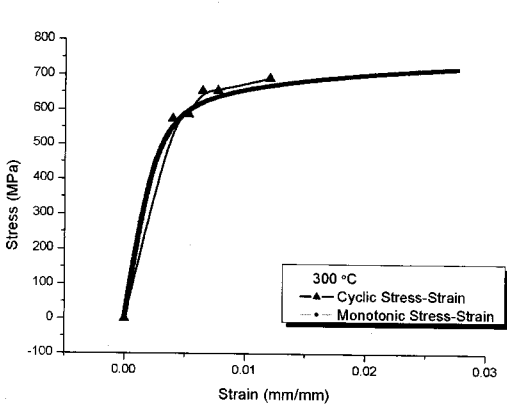


Fig. 5 Cyclic & Monotonic stress-strain curve at High temperature

으며 이는 소재의 전위구조가 불안정하여 주기적 변형에 의하여 안정화 되어가는 과정이다. 또한 Fig. 5의 결과를 보면 단일응력-변형률 곡선과 유사한 경로를 따르는 것을 알 수 있다. 시편이 고온에서 1시간의 안정화 시간을 통해 변형률 연화 현상이 초기에 일어나서 반복하중에 의한 연화 현상이 더 이상 나타나지 않는다.

3.2 상온 및 고온 저주기 피로시험 결과

3.2.1 저주기 피로 거동

Fig. 6은 상온에서 R=-1 일 때의 저주기 피로 거동 선도이다. 이를 통해 11.7Cr-1.1Mo강이 전형적인 저주기 피로특성을 보임을 알 수 있다.

Fig. 7, 8에서의와 같이 피로수명은 전체적으로 두 가지의 추세를 보인다. 즉, 평균응력이 존재하지 않는 R = -1인 경우와 인장 평균응력이 존재하는 경우로 구분되어 질 수 있다. Fig. 7, 8과 같이 각각 상온과 고온에서 시험한 변형률 비, R = -1, 0, 0.5, 0.75와 수명에 관한 결과는 상온에서 피로수명이 R = -1일 때에 비하여 R = 0, 0.5, 0.75의 경우 인장 평균응력의 작용으로 수명이 줄어드는 것을 알 수 있다. 300°C에서의 경우 변형률 비에 관한 수명은 R = -1일 때 보다 줄어드는 것을 확인할 수 있으나 상온에서의 경우보다 수명이 단축되는 정도가 작은 것으로 나타났다. 이는 평균응력 이완과 관계되어 발생하는 것으로 보인다.

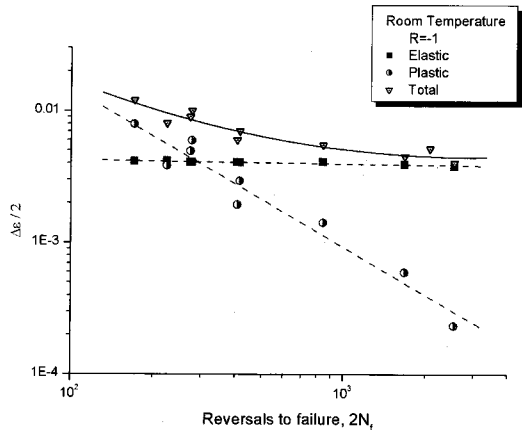


Fig. 6 Low cycle fatigue behavior for R = -1

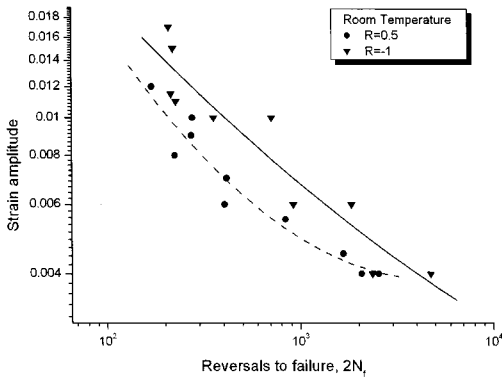


Fig. 7 Strain ratio effect on LCF behavior at room temperature

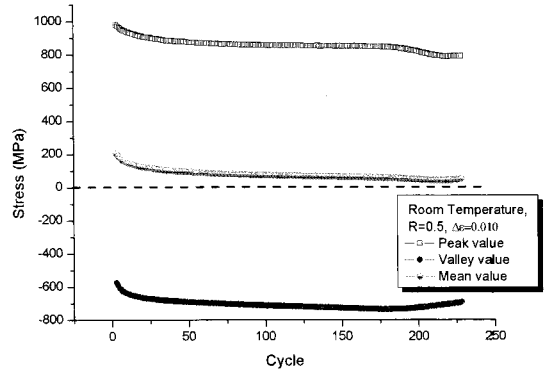


Fig. 9 Relaxation on mean stress at room temperature

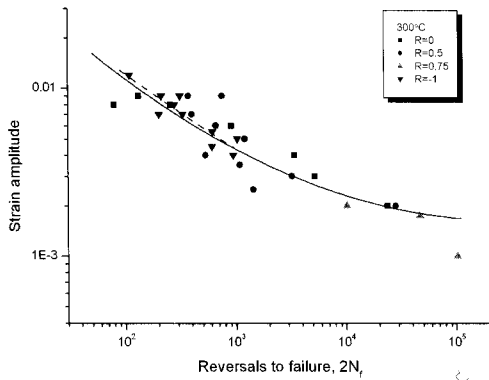


Fig. 8 Strain ratio effect on LCF behavior at 300°C

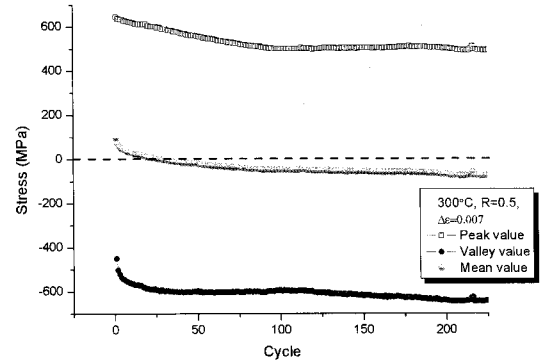


Fig. 10 Variation of values on mean stress at 300°C

3.2.2 평균응력 이완

일반적으로 변형률 진폭이 큰 경우에는 반복하중 초기의 주기적 응력-변형률 선도에서는 하중조건에 따라 압축 또는 인장 평균응력이 존재하지만 반복이 진행됨에 따라 응력이완에 의하여 평균응력이 없어지게 되며 이는 반복소성변형에 기인한다.⁶⁾ Fig. 9는 R=0.5일 때 상온에서 사이클 이력에 대한 응력의 Peak, Valley값 변화를 나타낸 것이다. 평균 변형률이 작용하지 않을 때 즉 R=1일 때와 달리 초기에 평균응력이 존재하고 비교적 짧은 사이클 수만에 평균응력은 이완되며 그 이후에는 응력이 안정된 후 파단 되는 경향을 나타내었다. R=0, 0.75도 Fig. 9와 같은 경향의 평균응력 이완현상을 보였다.

Fig. 10에서와 같이 고온에서도 상온과 같은 평균응력 이완현상을 보였다. 그러나 상온과 달리 고온에서는 초기에 평균응력이 급격히 연화되나 반수명영역까지 크립의 영향으로 지속적으로 이완되어

압축력으로 전환 되는 현상을 관찰할 수 있고, 반수명영역에서 안정되어 지속되다가 파단에 이르는 경향을 보였다. 특히 고온에서는 압축 평균응력으로 전환되는 추이를 보였다.

3.2.3 피로손상 모델의 비교

저 사이클 피로동안 발생하는 소성변형에너지는 일부분 열로 소비되며 나머지는 재료에 흡수된다. 사이클 당 소비되는 소성 변형에너지는 응력-변형률 선도의 면적이며 소비되는 총에너지는 이들 루프의 합으로 각 재료는 에너지를 흡수할 수 있는 일정용량을 가지고 있어 에너지의 흡수 한계치에 도달할 때 재료는 파손된다.

$$\Delta W^t = \Delta W^p + \Delta W^e \quad (1)$$

$$\Delta W^p = 4\sigma_a \epsilon_a^p - 2 \int_0^{2\sigma_a} \epsilon^p d\sigma \quad (2)$$

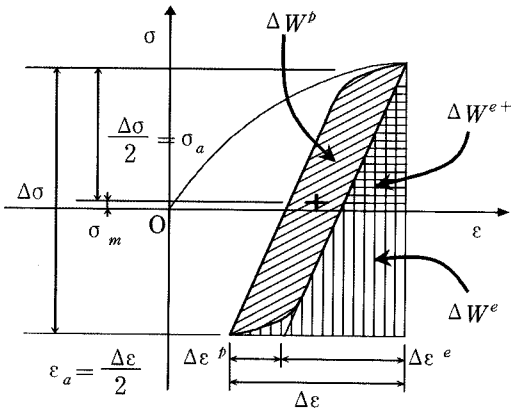


Fig. 11 Definition of plastic and elastic strain energy density

Morrow³⁾는 이력곡선의 면적을 계산하기 위해 응력-변형률 관계로부터 이력곡선의 인장부분을 다음과 같이 가정하였다.

$$\sigma = 2K''(\epsilon^p)^{n'} \quad (3)$$

n'' 는 주기 변형률 경화지수(cyclic strain hardening exponent)인 n' 와 같다고 가정하고 경계조건을 적용하면 계수 K'' 는 다음과 같다.

$$K'' = \frac{\sigma_a}{(\epsilon_a^p)^{n'} 2^{(n'-1)}} \quad (4)$$

여기서, $\epsilon_a^p = (\frac{\sigma_a}{K'})^{(\frac{1}{n'})}$, K' 는 주기 강도계수(cyclic strength coefficient)이다. 식 (4)로부터 $d\sigma$ 를 식 (2)에 대입하면 다음과 같은 소성 변형 에너지 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta W^p = 4K'' \frac{-1}{n'} \sigma_a^{\frac{-1+n'}{n'}} \frac{1-n'}{1+n'} \quad (5)$$

$$\Delta W^e = \frac{1}{2} \Delta\sigma \Delta\epsilon \quad (6)$$

Fig. 11과 같이 평균응력을 고려할 때 소성 변형률뿐만 아니라 탄성 변형률도 피로손상 및 피로수명에 영향을 미치므로 피로손상에 직접적인 영향을 주는 다음과 같은 인장 탄성변형률 에너지밀도, ΔW^{e+} 를 포함한 총 변형률 에너지밀도가 손상변수에 사용된다.¹⁴⁾

$$\Delta W^{e+} = \frac{1}{2E} \left(\frac{\Delta\sigma}{2} + \sigma_m \right)^2 = \frac{\sigma_{\max}^2}{2E} \text{ for } \sigma_{\min} \leq 0$$

$$= \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})^2}{2E} \text{ for } \sigma_{\min} > 0 \quad (7)$$

식 (5)와 식 (7)을 통해 평균응력을 고려하여 소성 및 인장 탄성변형률 에너지밀도를 이용한 총 변형률 에너지밀도-수명의 결과는 Fig. 14에 잘 나타나 있다. 특히 고온에서도 적절히 표현되며 Fig 13과 같이 식 (5), 식 (6)의 합으로 표현되는 평균응력을 고려하지 않은 총 변형률 에너지밀도-수명에 비해 우수한 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

변형률 제어 피로실험에서의 평균응력 영향을 설명하기 위하여 변형률-수명 관계식이 수정되어, Morrow 및 Smith-Watson-Topper 손상 변수가 각각 고려되었다. Morrow는 변형률-수명 관계식의 탄성항을 수정함으로써 설명할 수 있다고 제안했다. 상온과 고온 저주기 시험에서 사용하는 평균응력, 응력

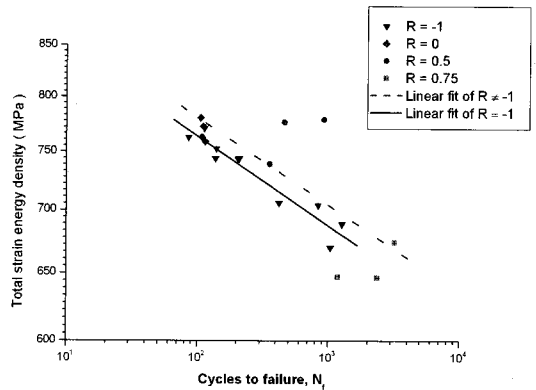


Fig. 12 Total strain energy density versus cycles to failure neglecting mean stress at room temperature

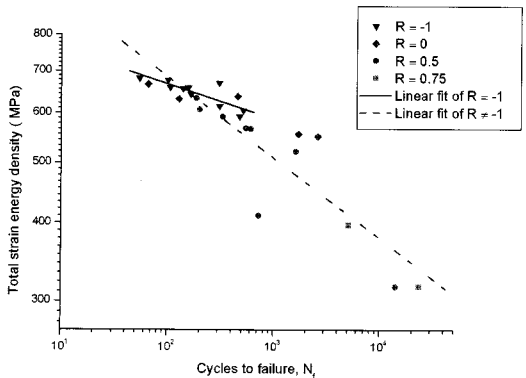


Fig. 13 Total strain energy density versus cycles to failure neglecting mean stress at 300°C

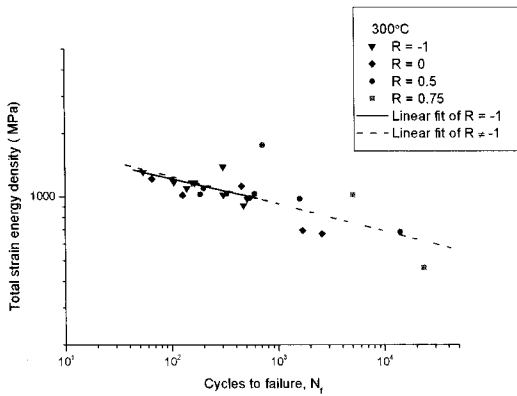


Fig. 14 Total strain energy density versus cycles to failure considering mean stress at 300°C

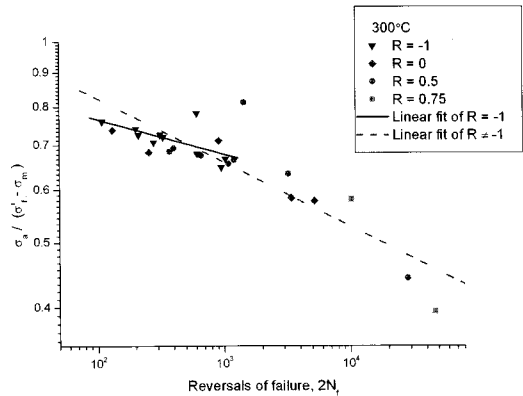


Fig. 15 Morrow's damage parameter versus reversals to failure at 300°C

진폭은 반 수명에서의 히스테리시스 루프로부터 얻고, 피로강도계수 σ'_f , 피로연성계수 e'_f , b , c 는 $R = -1$ 의 경우에서 얻어진다.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \left(\frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} \right) (2N_f)^b + e'_f (2N_f)^c \quad (8)$$

탄성항만을 수정하였으므로 탄성변형률과 피로 수명항만을 고려하면 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_m) (2N_f)^b \quad (9)$$

Fig. 15와 같이 Morrow의 피로손상변수와 수명의 관계는 편차가 관찰되었고 이는 고온(300°C)환경 하에서 수명이 길어질수록 크립의 영향을 받기 때문이다.

Smith-Watson-Topper (SWT)는 $R=-1$ Mean=0일 때

$\sigma_{max} = \frac{\Delta \sigma}{2} = \sigma'_f (2N_f)^b$ 이고, 이를 기초 변형률-수명 관계식에 곱하여 다음과 같이 정리 하였다.

$$\sigma_{max} \frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f e'_f (2N_f)^{b+c} \quad (10)$$

식 (10)의 일반식은 $\sqrt{\sigma_{max} \Delta \epsilon} \propto N_f^r$ 이며, 이를 이용하여 식 (10)을 변형하면

$$\sigma_{max} \cdot \epsilon_a = C(2N_f)^r \quad (11)$$

로 나타낼 수 있다.¹⁵⁾

선형 SWT 피로손상변수로 표현된 11.7Cr-1.1Mo 강 of 고온(300°C) 저주기 피로수명은 변형률비와

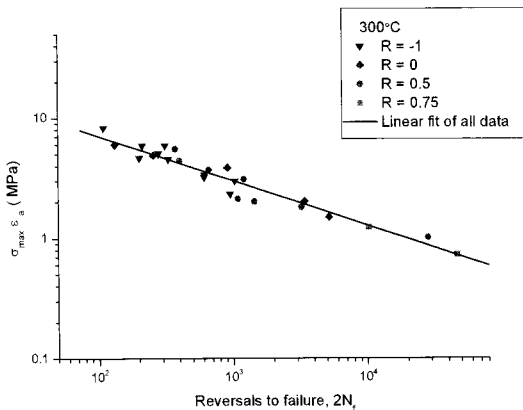


Fig. 16 SWT's damage parameter versus reversals to failure at 300°C

무관하게 Fig. 16과 같이 잘 일치함을 보여주고 있다. 변형률 비 -1, 0, 0.5, 0.75을 고려한 SWT손상변수-피로수명 관계식의 재료상수는 회귀분석으로 $C = 39.22$ MPa, $Y = -0.37199$ 로 얻어졌으며 매우 우수한 상관관계를 나타냈다.

4. 결론

평균응력 효과를 고려한 11.7Cr-1.1Mo 강 of 고온 저주기 피로시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상온에서 $R=-1$ 에서의 Cyclic stress-strain 곡선과 단순인장 응력-변형률 곡선을 통해 11.7Cr-1.1Mo강이 반복 응력상태에서 연화되는 경향을 알 수 있으며, 고온에서의 Cyclic stress-strain 곡선과

단순인장 응력-변형을 곡선은 1시간의 재료 열화로 인해 충분히 연화되어 더 이상 연화현상은 일어나지 않고 압축평균 응력으로 전환되는 경향을 보였다.

- 2) 상온과 고온에서 피로수명은 전체적으로 평균응력이 존재하지 않는 경우와 평균응력이 존재하는 두 가지 추세로 구분되어졌다. 상온에서 인장 평균응력은 같은 변형을 진폭의 변형률제어 피로시험에서 피로수명을 단축시키는 효과를 뚜렷하게 나타냈고 고온에서는 재료의 연화 현상으로 $R=-1$ 과 비슷한 수명을 나타내었다.
- 3) 상온에서 인장 평균응력 작용 시 사이클이 진행됨에 따라 반복소성변형에 기인하여 평균 응력이완 현상이 관찰되고, 그 변화가 초기에 급격히 일어나고 안정화 되는 현상을 보였다. 고온에서는 상온과 같이 응력이완 현상이 일어나지만 인장 평균응력에서 압축 평균응력으로 진행하는 추이를 보였으며 초기에 급격히 응력이완 현상이 진행되어 반 수명(half-life)까지 서서히 진행되는 현상을 보였다.
- 4) 11.7Cr-1.1Mo강을 고온(300°C)에서 총변형률 에너지 밀도를 사용하여 피로손상을 표현할 때 탄성 변형률 에너지 밀도보다 인장 탄성 변형률 에너지 밀도를 적용하는 경우가 평균응력의 영향을 나타내고 상대적으로 우수한 상관관계를 보였다.
- 5) 고온(300°C)저주기 시험의 피로손상 모델로서 총 변형률 에너지밀도 손상모델, Morrow손상모델, SWT손상모델을 각각 비교하면 재료의 피로손상이 발생하는 최대응력과 변형률 진폭의 곱의 함수로 표현된 SWT식이 선형적인 결과를 보여주며 11.7Cr -1.1Mo강의 고온(300°C) 저주기 피로손상 모델로서 적절했다.

References

- 1) J. A. Bannantine and J. J. Comer, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, New Jersey, pp.40-70, 1990.
- 2) R. I. Stephens and A. Fatemi, Metal Fatigue In Engineering, 2nd Edition, Willy-Interscience, New York, pp.93-118, 2001.
- 3) J. D. Morrow, "Cyclic Plastic Strain Energy and Fatigue of Metals," In Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity, ASTM STP 378, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, pp.45-84, 1965.
- 4) B. N. Leis, "An Energy-based Fatigue and Creep-fatigue Damage Parameter," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.99, pp.524-533, 1977.
- 5) F. Ellyin and D. Kujawski, "The Energy-based Fatigue Failure Criterion," In Microstructure and Mechanical Behavior of Materials, Vol. II, H. Gu and J. He, Eds., EMAS, West Midlands, UK, pp.541-600, 1986.
- 6) S. K. Koh and R. I. Stephens, "Mean Stress Effects on Low Cycle Fatigue for a High Strength Steel," Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.14, No.4, pp.413-428, 1991.
- 7) T. Wehner and A. Fatemi, "Effect of Mean Stress on Fatigue Behavior of a Hardened Acarbon Steel," International Journal of Fatigue, Vol.13, No.3, pp.241-253, 1991.
- 8) M. Nihel, P. Heuler, C. Boller and T. Seeger, "Evaluation of Mean Stress Effect on Fatigue Life by use of Damage Parameters," International Journal of Fatigue, Vol.8, pp.119-126, 1986.
- 9) J. Morrow, Fatigue Design handbook, Advances in Engineering, Vol.4, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., Sec. 3.2, pp.21-29, 1968.
- 10) K. N. Smith, P. Watson and T. H. Topper, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals," J. Mater., Vol.5, No.4, pp.767-778, 1970.
- 11) A. Fatemi and R. I. Stephens, "Tensile Mean Stress Effects on Uniaxial Fatigue Behavior of 1045 HR Steel," Fatigue 87, Vol.1, Roc. Third Int. Conf. on Fatigue and Fracture Thresholds, pp.537-546, 1987.
- 12) A. Fatemi and P. Kurath, "Multi-Axial Fatigue Life Predictions under the Influence of Mean Stresses," J. Engng Mater. Tech. 110, pp.380-388, 1988.

- 13) V. Kliman and M. Bily, "Influence of Mode Control, Mean Value and Frequency of Loading on the Cyclic Stress-Strain Curve," Mater. Sci. Engng 44, pp.73-79, 1980.
- 14) K. Golos and F. Ellyin, "A Total Strain Energy Density Theory for Cumulative Fatigue Damage," ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.110, pp.36-41, 1988.
- 15) S. K. Koh and J. S. Ha, "Correlation Between Fatigue Life of 2.2Ni-0.1Cr-0.5Mo Steel Accompanying Mean Stresses with Cyclic Strain Energy Density," KSME(A), Vol.27, No.1, pp.167-174, 2003.