

평균응력을 동반하는 2.2Ni-1Cr-0.5Mo강의 피로수명과 변형률에너지밀도와의 상관관계

고 승 기[†] · 하 정 수^{*}
(2002년 6월 10일 접수, 2002년 12월 2일 심사완료)

Correlation Between Fatigue Life of 2.2Ni-0.1Cr-0.5Mo Steel Accompanying Mean Stresses with Cyclic Strain Energy Density

Seung-Kee Koh and Jeong-Soo Ha

Key Words: Strain Energy Density(변형률에너지밀도), 압력관(Pressure Tube), Fatigue Damage Parameter(피로손상변수), Mean Stress(평균응력), Fatigue Life(피로수명)

Abstract

Fatigue damage of 2.2Ni-1Cr-0.5Mo steel used for high strength pressure tubes and vessels was evaluated using uniaxial specimens subjected to strain-controlled fatigue loading. Based on the fatigue test results from different strain ratios of -2, -1, 0, 0.5, 0.75, the fatigue damage of the steel was represented by using a cyclic strain energy density. Mean stress relaxation depended on the magnitude of the applied strain amplitude. The high pressure vessel steel exhibited the cyclic softening behavior. Total strain energy density consisting of the plastic strain energy density and the elastic tensile strain energy density described fairly well the fatigue life of the steel, taking the mean stress effects into account. Compared to other fatigue damage parameters, fatigue life prediction by the cyclic strain energy density showed a good correlation with the experimental fatigue life within a factor of 3.

1. 서 론

미시적인 관점에서 반복하중에 의한 비가역적인 성질을 지닌 소성변형은 변형률에너지의 방출과 연관지어질 수 있으며, 이러한 변형률에너지는 반복하중에 의해 발생하는 피로손상의 중요한 요인으로 간주되어질 수 있다.⁽¹⁾ 응력과 변형률의 함수로 표현되는 변형률에너지에 의한 적절한 피로손상모델은 여러 연구자에 의하여 제안되어 오고 있다.⁽²⁻⁵⁾ 변형률에너지를 이용한 피로손상평가는 각 사이클당 방출되는 변형률에너지밀도를 반

수명(half-life)에서의 히스테리시스 루프의 면적을 측정하여 소성 변형률에너지밀도로 정의하고 총 변형률에너지밀도의 합이 일정한 값에 도달하였을 때를 파손기준으로 사용하였으며,^(4,5) Hyun 등은 이 기준을 이용하여 1Cr-0.5Mo강의 저사이클 크리프-피로수명의 예측에 적용하였다.⁽⁶⁾

큰 하중에서와는 달리 낮은 하중에서의 피로손상은 탄성 변형상태에 있으므로 고사이클 피로영역을 포함한 모든 영역에서 재료의 피로손상을 적절히 표현하기 위해서는 탄성변형률에너지를 포함하는 반복 변형률 에너지밀도가 요구된다.⁽⁷⁾ 또한 재료의 피로수명은 평균응력 또는 평균변형률에 많은 영향을 받으며, 이러한 평균응력의 영향은 특히 고사이클 영역에서 매우 큰 것으로 알려져 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 그러나 변형률에너지 손상변수를 이용한 수명평가에 대한 대부분의 연구가 큰 소성변형을 동반하는, 즉 평균응력의 영향이 상

[†] 재임직원, 회원, 군산대학교 기계공학부

E-mail : skkoh@kunsan.ac.kr

TEL : (063)469-4717 FAX(063)469-4727

^{*} 한국전력공사 전력연구원 발전연구실

대적으로 작은 저사이클 영역에서 이루어졌으므로 변형률에너지손상변수가 평균응력의 피로수명에 미치는 영향을 적절히 표현할 수 없는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 인장 및 압축 평균응력이 존재하는 경우 변형률에너지 손상변수가 2.2Ni-1Cr-0.5Mo강의 피로수명을 적절히 표현할 수 있는지를 평가하고 피로손상변수로서의 적용가능성을 검토하였다. 이를 위하여 평균응력을 동반하는 변형률제어 피로시험을 수행하여 피로거동을 관찰하고, 반복변형률에너지밀도를 이용한 피로손상변수와 압력용기강의 피로수명과의 상관관계를 해석하였으며 타 피로손상변수와 비교하였다.

2. 피로시험 및 피로거동

압력관강의 저사이클 피로특성과 평균응력의 영향을 평가하기 위해서 노치가 없는 평탄한 일축봉상 시험편을 제작하고, 용량 10 ton의 유압식 피로시험기를 이용하여 변형률제어 피로시험을 수행하였다. 이 실험에서는 5 종류의 서로 다른 변형률비($R = \epsilon_{min}/\epsilon_{max}$) 즉, $R = -2, -1, 0, 0.5, 0.77$ 에서 각각 0.015~0.002사이의 서로 다른 일정변형률진폭을 적용하여 0.01 sec⁻¹의 일정한 변형률속도에서 모든 실험이 수행되었다. 또한 실험 중 균열의 생성 및 진전과정을 관찰하면서 초기 최대 인장하중의 75%하중 또는 파단을 파괴기준으로 설정하고 그 상태까지의 반복횟수를 피로수명으로 정의하였다. 본 연구에서 사용된 압력관강재의 화학적 조성과 단순인장특성은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다.

반복적인 하중을 받는 재료의 응력과 변형률 응답은 다음과 같은 변형률제어 피로시험으로부터 구한 반복응력-변형률곡선식과 히스테리시스 루프 곡선식으로 표현된다.⁽¹⁾

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{1/n} \tag{1}$$

Table 1 Chemical composition of 2.2Ni-1Cr-0.5Mo steel

C	Mn	P	S	Si	Cu
0.332	0.629	0.009	0.011	0.205	0.097
Ni	Cr	V	Mo	Fe	
2.22	1.15	0.126	0.643	base	

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left[\frac{\Delta\sigma}{2K}\right]^{1/n} \tag{2}$$

위에서 $\Delta\epsilon/2$, $\Delta\epsilon_e/2$, $\Delta\epsilon_p/2$, $\Delta\sigma/2$ 는 각각 총변형률 진폭, 탄성변형률진폭, 소성변형률진폭, 응력진폭을 의미하며 n' , K' 은 각각 피로강도계수 및 피로경화 지수로서 Table 3과 같다. 또한 각 변형률 진폭과 피로수명과의 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \tag{3}$$

위에서 σ_f' , b , ϵ_f' , c 는 저사이클 피로특성치로서 대수선형 회귀분석에 의해 구해지며 2.2Ni-1Cr-0.5Mo강의 피로특성치는 Table 3과 같다.

일반적으로 변형률진폭이 큰 경우에는 반복하중 초기의 히스테리시스 루프에는 하중조건에 따라 압축 또는 인장 평균응력이 존재하지만 반복이 진행됨에 따라 응력이완에 의하여 평균응력이 없어지게 되며 이는 반복소성변형에 기인한다.⁽⁸⁾ 그러나 평균응력의 변화는 시험 중 일정 간격으로 기록된 히스테리시스 루프로부터 확인하였으며 압축평균변형률을 지닌 $R = -2$ 의 경우 변형률진

Table 2 Monotonic tensile properties of 2.2Ni-1Cr-0.5Mo steel

Young's modulus, E (GPa)	198
0.2% offset yield strength, $\sigma_{0.2}$ (MPa)	1158
Ultimate tensile strength, σ_u (MPa)	1264
%Reduction in area, %RA	46
Strength coefficient, K (MPa)	1483
Strain hardening exponent, n	0.037
True fracture strength, σ_f (MPa)	1861
True fracture strain, ϵ_f	0.617
Rockwell hardness, HRC	42

Table 3 Cyclic and low-cycle fatigue properties from $R = -1$

Cyclic strength coefficient, K' (MPa)	1612
Cyclic strain hardening exponent, n'	0.0742
Fatigue strength coefficient, σ_f' (MPa)	2426
Fatigue strength exponent, b	-0.1298
Fatigue ductility coefficient, ϵ_f'	0.5582
Fatigue ductility exponent, c	-0.8207

폭이 작은 긴 피로수명에서는 파단이 일어날 때까지 압축 평균응력이 관찰되었다. 또한 R=0, 0.5, 0.75의 인장 평균변형률을 지닌 경우에는 높은 변형률진폭에서의 인장 평균응력 이완현상과 낮은 변형률진폭에서의 지속적인 인장 평균응력이 관찰되었다.

Fig. 1에서 단순 인장응력-변형률선도와 반복응력-변형률선도의 비교로부터 2.2Ni-1Cr-0.5Mo 압력관강은 피로연화현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 R=-1시험결과로부터 얻어진 반복응력-변형률선도에서 R=0, 0.5, 0.75 실험 데이터 중 높은 변형률진폭의 데이터가 약간 이탈하는 경향을 보이고 있으며, 이는 인장 평균변형률을 지니는 실험 중 높은 변형률진폭의 실험에서 인장 평균응력의 이완에 기인하였다.

변형률비가 변형률제어 피로수명에 미치는 영향은 Fig. 2에 잘 표현되어 있으며, 피로수명은 전체적으로 세 가지의 추세를 보이고 있다. 즉, Fig. 2에서 실선으로 표시된 평균응력이 존재하지 않는 R=-1의 경우와 인장 평균응력이 존재하는 경우, 그리고 압축 평균응력이 존재하는 경우로 구분되어 질 수 있다. 압축 잔류응력은 변형률제어 저사이클 피로수명을 개선하고, 인장 잔류응력이 피로수명을 단축시키는 효과를 나타내고 있으며, 이러한 영향은 긴 피로수명영역에서 매우 뚜렷하게 나타나고 있었다.

3. 변형률에너지밀도 피로손상변수

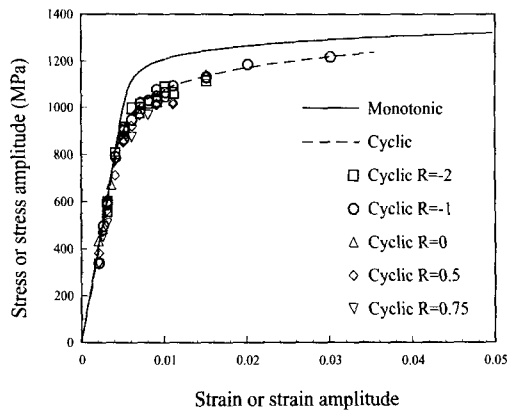


Fig. 1 Monotonic and cyclic stress-strain curves

피로손상은 일반적으로 응력, 변형률, 그리고 에너지를 기본으로 하여 표현된다. 응력에 의한 손상변수는 피로수명에 영향을 미치는 정수압 응력을 고려하지 못하는 결점을 지니고 있으나 Tresca 또는 von Mises 등의 항복기준을 수정하여 표현되며 주로 긴 수명의 고사이클 피로파괴기준으로 사용되고 있다. 저사이클 영역에서는 노치와 같은 응력집중부위에서의 재료가 이를 둘러싸고 있는 탄성재료에 의하여 구속되고 변형률제어되기 때문에 변형률에 의한 손상변수가 사용된다. 그러나 변형과정에서의 응력과 변형률과의 상호작용이 고려되는 변형에너지에 의한 손상변수는 응력과 변형률을 모두 포함하며, 저사이클 및 고사이클의 전 피로수명영역에 걸쳐 다축하중상태까지 확장이 가능한 많은 장점을 지닌 피로손상변수로 제안되어 사용되고 있다.⁽⁷⁾

평균응력에 의한 피로손상을 고려하기 위하여 소성변형률 에너지와 인장응력에 의한 탄성변형률 에너지의 합으로 표현되는 총변형률 에너지밀도(total strain energy density), ΔW^t 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\Delta W^t = \Delta W^p + \Delta W^e \quad (4)$$

각 사이클에 대한 소성변형률 에너지밀도, ΔW^p 와 탄성변형률 에너지밀도 ΔW^e 는 Fig. 3과 같이 표시되며,⁽⁸⁾ 히스테리시스 루프곡선식이 반복응력-변형률곡선식을 2배로 곱하여 표현될 수 있는 Masing 재료⁽¹¹⁾의 경우 다음 식으로부터 결정되어

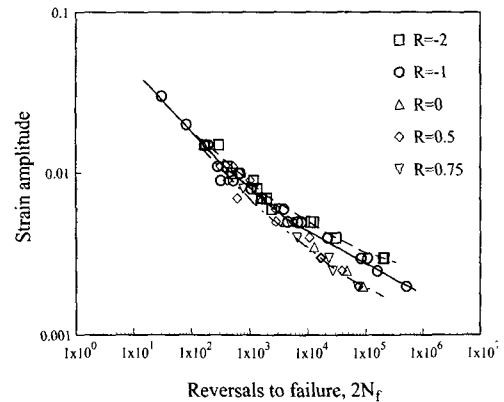


Fig. 2 Low-cycle fatigue curves for all strain ratios

질 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta W^P &= \int_{cyclic} \sigma d\epsilon = \frac{1-n'}{1+n'} \Delta\sigma \Delta\epsilon^P \\ &= \frac{2(1-n')}{(1+n')} (2K')^{-1/n'} (\Delta\sigma)^{\frac{1+n'}{n'}} \\ &= 4 \left(\frac{1-n'}{1+n'} \right) K'^{-1/n'} \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \right)^{\frac{1+n'}{n'}} \end{aligned} \quad (5)$$

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

또한 식 (5), (6)로부터 계산되는 총 변형률에너지 밀도와 파단반복수(N_f)와의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽⁷⁾

$$\Delta W^t = \alpha_u \cdot N_f^a + C_u \quad (7)$$

위 식에서 재료상수, α_u 와 C_u 는 완전역전피로시험으로부터 얻어지며, C_u 는 피로한도에서 재료가 지나는 임계 변형률에너지밀도(threshold strain energy density)로 정의된다.

평균응력을 고려한 압력용기강의 피로손상을 평가하기 위하여 유한수명구간에서 식 (7)의 임계 변형률에너지밀도, C_u 를 무시하면 변형률에너지 밀도 피로손상변수, ψ 는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\psi = \alpha_u \cdot N_f^a \quad (8)$$

소성 변형률에너지밀도는 식 (5)를 이용하여 반수명(half-life)에서의 히스테리시스 루프의 면적을 계산하여 얻어졌으며, 탄성 변형률에너지밀도는 최대 응력과 탄성계수로부터 식 (6)을 이용하여 계산되어질 수 있다. 소성 변형률에너지밀도에 근거한 피로손상변수를 이용한 피로수명선도는 Fig. 4와 같다. Fig. 4로부터 알 수 있듯이 소성 변형률에너지밀도와 수명은 변형률비에 따라 서로 다른 경향을 보이고 있기 때문에 이러한 변형률비, 즉 평균응력에 영향을 받지 않는 변수가 필요로 된다.

총 변형률에너지밀도는 소성과 탄성 변형률 에너지의 합으로 표현된다. 소성변형률뿐만 아니라 탄성변형률도 피로손상 및 피로수명에 영향을 미

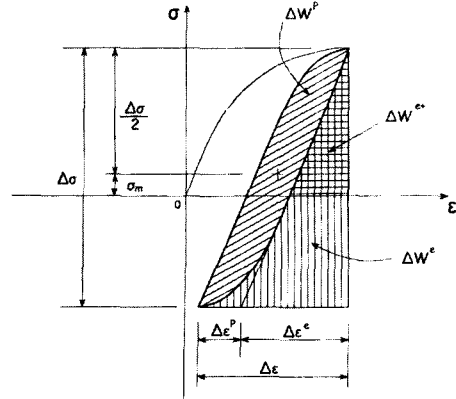


Fig. 3 Elastic and plastic strain energies for a uniaxial stress state

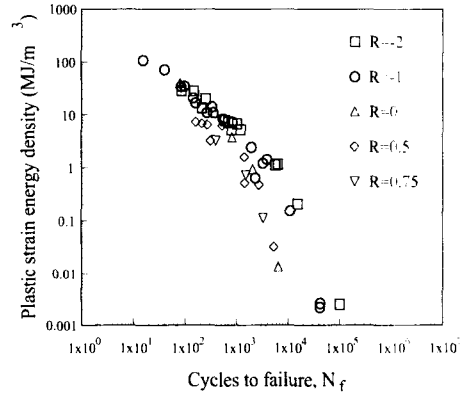


Fig. 4 Plastic strain energy density versus cycles to failure

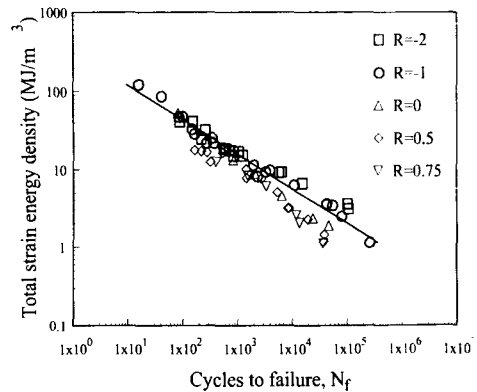


Fig. 5 Total strain energy density versus cycles to failure neglecting mean stress

치므로 피로손상에 직접적인 영향을 주는 다음과 같은 인장 탄성변형률에너지밀도, ΔW^{el} 를 포함한 총 변형률에너지밀도가 손상변수에 사용된다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} \Delta W^{el} &= \frac{1}{2E} \left(\frac{\Delta\sigma}{2} + \sigma_m \right)^2 = \frac{\sigma_{max}^2}{2E} \text{ for } \sigma_{min} \leq 0 \\ &= \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})^2}{2E} \text{ for } \sigma_{min} > 0 \end{aligned} \quad (9)$$

각각 식 (5)와 (6)으로 표현되는 소성 및 탄성 변형률에너지밀도를 이용한 얻어진 총 변형률에너지밀도-수명곡선은 Fig. 5와 같으며, Fig. 5로부터 알 수 있듯이 평균응력의 영향을 적절히 표현할 수 없게 되는 문제점을 발견할 수 있다. 그러나 식 (5) 및 식 (9)의 소성 및 인장 탄성변형률에너지밀도를 이용한 총변형률 에너지-수명식은 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있으며, Fig. 6으로부터 알 수 있듯이 변형률에너지밀도 피로손상변수는 평균응력의 영향을 적절히 표현하면서 우수한 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6의 실험은 최소오차차승법에 의한 R=-1 데이터의 회귀선(regression line)을 나타내며, $\alpha_u = 509 \text{ MJ/m}^3$, $\alpha = -0.6062$, 그리고 $C_r = 0.225 \text{ MJ/m}^3$ 으로 얻어졌다. 각 변형률비에서의 변형률에너지밀도-수명은 대체적으로 좋은 상관관계를 보였으나 큰 인장 평균변형률을 지닌 상태에서 실험이 수행된 R=0, 0.5, 0.75의 데이터는 R=-1 추세선으로부터 약간 벗어나는 경향을 보였다. Fig. 6으로부터 모든 변형률비의 피로수명이 R=-1의 실험결과에서 얻어진 피로수명선도와 전체적으로 잘 일치하고 있어 식 (8)의 변형률에너지밀도 손상변수는 평균변형률/평균응력을 적절히 고려하는 피로손상변수로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 피로손상모델의 비교·평가

변형률제어피로실험에서의 평균변형률/평균응력이 압력관강재의 피로손상에 미치는 영향을 효과적으로 평가하기 위하여 총 변형률에너지밀도 손상변수와 비교하여 Morrow 및 Smith-Watson-Topper손상변수가 각각 고려되었다.

평균응력의 영향이 고사이클 피로수명영역에서 지배적으로 나타남을 고려하여 기존의 변형률-수명식 (3)을 수정하여 제안된 Morrow손상변수는

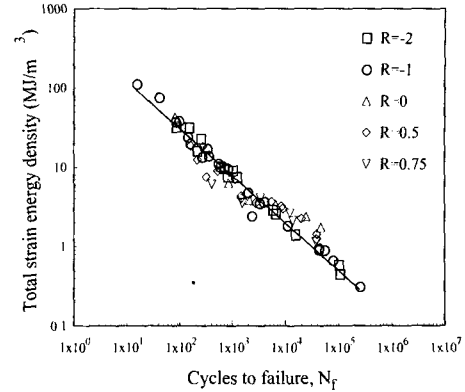


Fig. 6 Total strain energy density versus cycles to failure considering mean stress

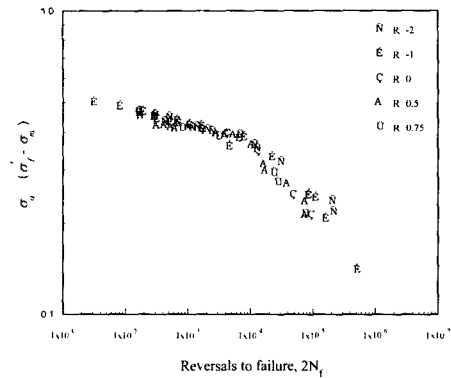


Fig. 7 Morrow's damage parameter versus reversals to failure

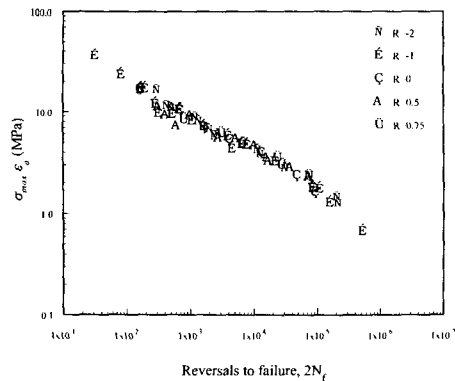


Fig. 8 SWT damage parameter versus reversals to failure

Table 4 Comparison of correlation coefficients for all fatigue damage parameters

Damage parameter	Correlation coefficient, <i>r</i>
Morrow	0.959
SWT	0.974
Strain energy	0.933

다음과 같다.⁽¹²⁾

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f (2N_f)^c \quad (10)$$

위 식에서 평균변형률에 의하여 발생하는 평균응력, σ_m 은 탄성변형률 피로수명에 대하여만 영향을 미치므로 탄성변형률 피로수명항만을 고려하면 응력진폭, σ_a 와 피로수명은 다음과 같은 관계를 지닌다.

$$\sigma_a = (\sigma_f - \sigma_m) (2N_f)^b \quad (11)$$

위 식에서 피로강도계수 σ_f 는 평균변형률과 평균응력이 존재하지 않는 $R=-1$ 경우의 저사이클 피로수명식에서 Table 3과 같이 얻어지며 평균응력, 응력진폭은 반수명에서의 히스테리시스 루프로부터 얻어진다.

압력관강재의 피로수명과 Morrow손상변수와의 상관관계는 Fig. 7과 같으며, 실선은 $R=-1$ 데이터를 최소오차자승법을 이용하여 로그-로그선형 커브피팅으로부터 얻어진 추세선이다. Morrow손상변수는 각각의 재료에 대하여 피로수명을 평균변형률 및 평균응력에 무관하게 한 개의 함수로 표현하고 있으나 $10^3 < 2N_f < 10^5$ 구간에서 좋지 못한 상관관계를 보이고 있다.

재료의 피로손상이 발생하는 최대응력과 변형률진폭의 곱의 함수로 표현될 수 있다고 가정하여 Smith, Watson 그리고 Topper(SWT)에 의하여 다음 피로수명식이 제안되었다.⁽¹³⁾

$$\sigma_{max} \cdot \epsilon_a = f(2N_f) \quad (12)$$

위 식은 다음과 같이 선형로그-로그 함수로 표현

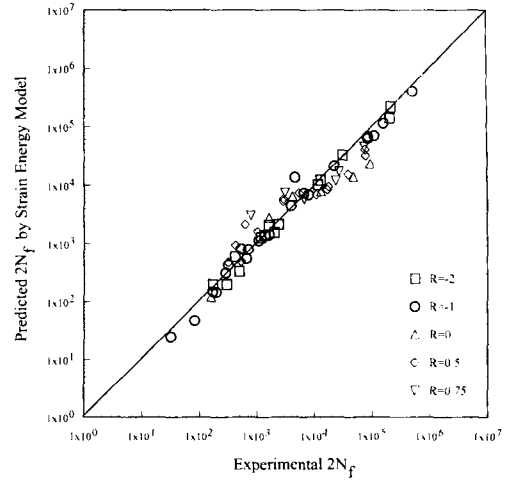


Fig. 9 Experimental versus predicted fatigue lives using strain energy damage model 할 수 있다.

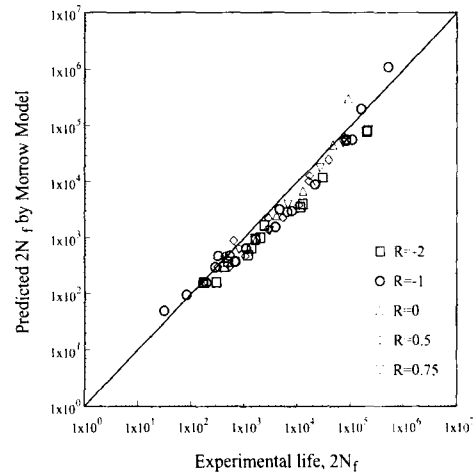


Fig. 10 Experimental versus predicted fatigue lives using Morrow damage model

$$\sigma_{max} \cdot \epsilon_a = C(2N_f)^\gamma \quad (13)$$

식 (13)의 선형 SWT피로손상변수로 표현된 각 재료의 피로수명은 변형률비에 무관하게 Fig. 8과 같이 한 개의 함수에 잘 일치함을 보여주고 있다. 각 변형률비에서의 SWT손상변수-피로수명 관계식 (13)을 표현하는 재료상수는 회귀해석으로부터 $C=100.2\text{MPa}$, $\gamma=-0.353$ 과 같이 얻어졌으며,

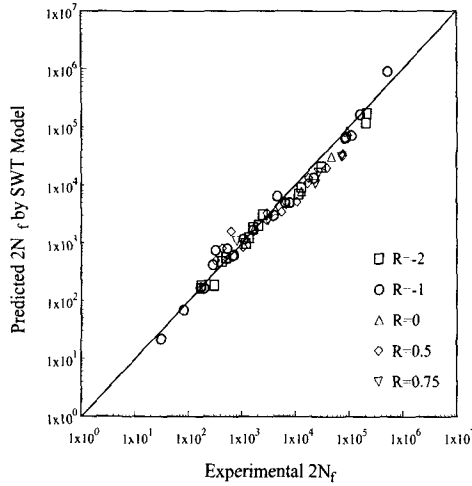


Fig. 11 Experimental versus predicted fatigue lives using SWT damage model

매우 우수한 상관관계를 나타냈다.

변형률에너지밀도를 비롯한 각 피로손상변수의 피로수명과 의 상관관계를 표현하는 상관계수를 비교하면 Table 4와 같으며, 변형률에너지모델을 비롯한 Morrow 및 SWT모델 모두 만족할 만한 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

식 (8), (10), (13)로 표현되는 변형률에너지밀도, Morrow, SWT 모델을 이용하여 예측되어진 저사이클 피로수명과 실제 피로실험으로부터 얻어진 실험수명을 비교한 결과는 Figs. 9~11와 같다. Morrow 피로손상 모델에 의한 수명예측은 보수적인 경향을 보이고 있으며, 변형률에너지밀도와 SWT 손상모델을 포함한 모든 피로손상변수에 의한 예측수명은 실험수명과 약 2~3배의 오차범위 내에서 비교적 정확하게 일치하는 경향을 나타냈다.

5. 결론

변형률에너지밀도로 표현되는 피로손상변수를 이용하여 평균응력을 동반하며 반복하중을 받는 2.2Ni-1Cr-0.5Mo강의 피로손상평가를 수행하여 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

(1) 피로수명은 전체적으로 평균응력이 존재하지 않는 경우와 인장 평균응력이 존재하는 경우, 그리고 압축 평균응력이 존재하는 세 가지의 추

세로 구분되어졌다. 각각 압축, 인장 평균응력은 같은 변형률진폭의 변형률제어 피로실험에서 피로수명을 향상, 그리고 단축시키는 효과를 나타냈다.

(2) 피로손상을 표현하는 변수로서 총 변형률에너지밀도를 사용할 때 단순히 탄성변형률에너지밀도를 적용하면 평균응력의 영향을 표현할 수 없었으나, 인장 탄성변형률에너지밀도를 적용하는 경우 총 변형률에너지밀도 피로손상변수는 평균응력의 영향을 적절히 표현하면서 우수한 상관관계를 나타냈다.

(3) 변형률에너지밀도 피로손상모델은 Morrow, SWT 등의 손상모델과 비교하였을 때 피로수명과 의 우수한 상관관계를 나타냈으며, 변형률에너지밀도손상변수를 이용한 예측피로수명은 실험수명과 2~3배의 오차범위 내에서 일치하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-00967-0)지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Stephens, R.I., Fatemi, A., Stephens, R.R., and Fuchs, H.O., 2001, *Metal Fatigue in Engineering*, 2nd Ed., Wiley, New York.
- (2) Morrow, J.D., 1965, "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.
- (3) Halford, G.R., 1966, "The Energy Required for Fatigue," *Journal of Materials*, Vol. 1, No. 1, pp. 3~18.
- (4) Leis, B.N., 1977, "An Energy-based Fatigue and Creep-fatigue Damage Parameter," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 99, pp. 524~533.
- (5) Ellyin, F. and Kujawski, D., "The Energy-based Fatigue Failure Criterion," in *Microstructure and Mechanical Behaviour of*

- Materials*, Vol. II, H. Gu and J. He, Eds., EMAS, West Midlands, UK, 1986, pp. 541~600.
- (6) Hyun, J.S., Beak, S.G., and Song, G.W., 1998, "Low Cycle Creep-Fatigue Life Prediction of 1Cr-0.5Mo Pipe Steel with Hold Time Effects by Using the Plastic Strain Energy," *Transactions of KSME A*, Vol. 22, No. 12, pp. 2093~2099.
- (7) Golos, K. and Ellyin, F., 1988, "A Total Strain Energy Density Theory for Cumulative Fatigue Damage," *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol 110, pp. 36~41.
- (8) Koh, S.K. and Stephens, R.I., 1991, "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.
- (9) Koh, S.K., 1999, "Tensile Mean Strain Effects on the Fatigue Life of SiC-Particulate-Reinforced Al-Si Cast Alloy Composites," *Transactions of KSME A*, Vol 23, No. 11, pp. 1970~1981.
- (10) Wehner, T., and Fatemi, A., 1991, "Effect of Mean Stress on Fatigue Behavior of a Hardened Carbon Steel," *International Journal of Fatigue*, Vol. 13, No. 3, pp. 241~253.
- (11) Ellyin, F., 1997, *Fatigue Damage. Crack Growth and Life Prediction*, Chapman & Hall, London, pp. 55~56.
- (12) Morrow, J.D., Wetzel, R.M. and Topper, 1970, "Laboratory Simulation of Structural Fatigue Behavior," in *Effects of Environment and Complex Load History on Fatigue Life*, ASTM STP 462, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, pp. 74~91.
- (13) Smith, K.N, Watson, P. and Topper, T.H., 1970, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals," *Journal of Materials*, pp. 767~778.