

〈논 문〉

외경홈을 지닌 C형 시험편의 저주기 피로수명평가

이승인* · 김영일** · 고승기*** · 정세희**** · 이성우*****

(1996년 1월 20일 접수)

Low Cycle Fatigue Life Evaluation of External Grooved C-shaped Specimen

S. I. Lee, Y. I. Kim, S. K. Koh, S. H. Chung and S. W. Lee

Key Words : Low Cycle Fatigue(저주기 피로), Fatigue Crack Initiation Life(피로균열개시수명), Local Strain Approach(국부변형률법), Mean Stress Effect(평균 응력효과)

Abstract

A local strain approach was applied to an external single and double grooved C-shaped specimen in order to evaluate and predict the fatigue crack initiation life by using low cycle fatigue properties. The low cycle fatigue properties were determined from the strain-controlled fatigue tests using smooth cylindrical axial specimens. Fatigue crack initiation life was evaluated by a life prediction software, FALIPS, based on the local strain approach. The fatigue life was significantly influenced by the mean stress, and SWT parameter represented the fatigue life effectively. The predicted fatigue crack initiation life was then compared to the experimental fatigue life evaluated from the C-shaped fatigue test specimens. A good correlation was found between the experimental and predicted fatigue lives within factors of 2 and 4 for the single and double grooved C-shaped specimens respectively. Also, experimental fatigue life of the double grooved specimen was 10~12 times longer than that of the single grooved specimen.

1. 서 론

기계나 구조물이 반복적인 작용하중의 영향을 받을 때 설계시 불가피한 키홈(keyway), 구멍(hole) 등과 같이 국부적인 응력이 그 재료의 항복응력을 초과하게 되는 불연속부에서는 피로균열이 조기에 발생하여 매우 빠른 속도로 전파된다. 이와같이 노치와 같은 응력집중부에는 소성변형영역이 형성되어 주위의 전반적인 탄성응력장에 둘러싸이게 되

며, 이러한 국부적인 소성영역은 변형률에 의해 제어되므로 노치나 홈을 갖는 부재의 피로균열 개시 수명을 예측하기 위해서는 국부적인 영역이 겪는 변형률조건을 노치없는 매끄러운 실린더형 시험편에 적용시켜 피로시험을 수행하는 변형률-수명방법이 이용된다.⁽¹⁾ 따라서 피로거동에 크게 영향을 끼치는 기계적, 환경적, 금속학적 인자들과 함께 기하학적 불연속부의 선단에서 발생하는 국부응력과 국부변형률을 정확히 결정하는 문제는 피로수명평가에 있어서 주요한 관건이 된다.⁽²⁾ 이러한 국부응력과 국부변형률의 평가에는 일반적으로 Neuber법칙에 기초한 국부변형률방법이나 유한요소해석, 스트레인 게이지법 등이 이용되고 있으며, 최근에 매끄러운 형상 및 노치를 포함한 형상의 두가지 실린더형 시험편을 이용하여 수행된 Shatil,⁽³⁾ Koh⁽⁴⁾

*회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

**회원, 군산대학교 대학원 생산기계공학과

***회원, 군산대학교 생산기계공학과

****회원, 전북대학교 정밀기계공학과

*****회원, 국방과학연구소

등의 연구에서 Neuber법칙에 의한 국부변형률의 과대평가가 보수적(conservative)인 피로수명에측 결과를 낳는다고 보고하고 있으나, 국부변형률방법은 개선된 방법으로 노치선단에서의 국부변형률을 결정하여 노치를 포함하는 기계나 구조물의 피로수명 평가에 폭넓게 이용되고 있다.

노치를 지닌 두께가 두꺼운 실린더의 피로수명 평가 및 예측에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 특히 국부변형률방법을 이용하여 상당히 정확한 저주기 피로수명예측이 되고있다.⁽⁵⁾ 또한 이러한 저주기 피로수명 평가방법은 형상최적화기법과 병행하여 두께가 두꺼운 실린더의 피로수명을 연장하는 실린더의 피로설계에 응용되고 있다.⁽⁶⁾ 그러나 운전조건, 잔류응력 등에 기인하는 평균응력이 존재하는 경우에 노치선단에서의 복잡한 재료의 거동으로 인하여 노치를 지닌 기계 및 구조물의 부정확한 피로수명예측을 초래하고 있으며, 이에 대한 개선이 요구되고 있다.

본 연구에서는 노치를 지닌 두께가 두꺼운 실린더의 시뮬레이션용으로 제작된 외경에 홈을 지닌 C형 피로시험편이 저주기 피로하중을 받을 때 외경홈 선단에서의 피로균열 생성거동 및 피로균열 개시수명을 정확히 평가하기 위하여 고강도 압력용기강 ASTM A723의 저주기 피로실험과 국부변형률방법에 근거한 저주기 피로수명평가를 수행하였다. 특히 평균응력 및 평균변형률이 존재하는 경우에서의 저주기 피로거동을 파악하기 위하여 변형률비를 달리하는 저주기 피로실험이 수행되었으며, 평균응력이 피로수명에 미치는 영향을 정확히 고려하기 위하여 두가지의 피로손상변수를 이용하여 피로수명을 평가하였다.

C형 시험편의 저주기 피로수명은 하나의 홈을 지닌 시험편 및 형상최적화 과정을 통해 설계, 제작된 두개의 홈을 지닌 시험편들을 대상으로 피로시험을 수행하여 평가하였고, 외경홈 형태에 따른 피로수명의 향상정도를 비교하였다. 또한 선형 누적손상법을 기초로 개발된 피로수명예측 프로그램(FALIPS: Fatigue Life Prediction Software)에 의해 C형 시험편의 저주기 피로수명을 예측하였

다. 이를 위해 유한요소법을 이용한 응력해석 결과와 저주기 피로시험을 통해 얻어진 피로특성치들을 국부변형률 방법에 적용하여 노치선단에서의 국부적인 변형률과 응력을 결정하고 수명예측에 이용하였다. 예측된 피로수명은 C형 시험편을 이용하여 실험으로부터 구한 실제 피로수명과 비교함으로써 피로수명예측의 정확성을 평가하였다.

2. 저주기 피로시험

2.1 시험절차

C형 시험부재의 저주기 피로특성과 평균응력의 영향을 평가하기 위해서 노치없는 평탄한 실린더형 시험편을 제작하고, 용량 25 Ton의 유압식 피로시험기를 이용하여 저주기 피로시험을 수행하였다. 이 실험에서는 세가지의 서로 다른 변형률비($R_\epsilon = \epsilon_{\min}/\epsilon_{\max}$), 즉 $R_\epsilon = -2, -1, 0.5$ 에서 각각 0.015~0.002 사이의 서로 다른 7가지 변형률 진폭이 적용되었으며, 일정한 변형률 속도 0.01 sec⁻¹에서 모든 실험이 수행되었다. 또한 실험중 균열의 개시 및 형성과정을 관찰하면서 최대인장하중의 75%에 달하는 하중치와 파단시를 파괴기준으로 설정하고 그 상태까지의 반복횟수를 저주기 피로수명으로 정의하였다. 본 실험에서 사용된 재료의 화학적 조성과 단순인장 특성 등이 각각 Table 1과 Table 2에 수록되었다.

반복적인 하중을 받는 재료의 응력과 변형률 응답은 다음과 같이 저주기 피로시험으로부터 구한 반복응력-변형률곡선식 (1)과 히스테리시스 루프곡선식 (2)로 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

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

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left[\frac{\Delta\sigma}{2K'} \right]^{1/n'} \quad (2)$$

여기서, $\Delta\epsilon/2$, $\Delta\epsilon_e/2$, $\Delta\epsilon_p/2$, $\Delta\sigma/2$ 는 각각 총 변형률 진폭, 탄성변형률 진폭, 소성변형률 진폭, 응력진폭을 의미하며, 대수선형 회귀분석에 의해 구해진 n' , K' 값은 Table 3에 수록하였다.

Table 1 Chemical composition of ASTM A723 steel (% weight)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Fe
0.31	0.14	0.60	0.006	0.002	2.38	0.98	0.53	0.103	base

Table 2 Monotonic tensile properties and hardness of ASTM A723 steel

Young's modulus, E(GPa)	197
Ultimate tensile strength, σ_u (MPa)	1264
0.2% Offset yield strength, σ_{ys} (MPa)	1112
% Elongation, % EL	15.5
% Reduction of area, % RA	46
True fracture strength, σ_f (MPa)	1807
True fracture ductility, ϵ_f (MPa)	0.617
Rockwell hardness, HRC	43

Table 3 Cyclic stress-strain properties and low cycle fatigue properties from $R_e = -1$

Cyclic strength coefficient, K' (MPa)	1703.8
Cyclic strength exponent, n' (MPa)	0.0831
0.2% Offset cyclic yield strength, σ'_{ys} (MPa)	1010
Fatigue strength coefficient, σ'_f (MPa)	2717.5
Fatigue strength exponent, b	-0.1487
Fatigue ductility coefficient, ϵ'_f	0.8195
Fatigue ductility exponent, c	-0.9064
Averaged Young's modulus, E'(GPa)	200.3

각 변형률 진폭과 저주기 피로수명과의 관계는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\Delta \epsilon_e}{2} + \frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (3)$$

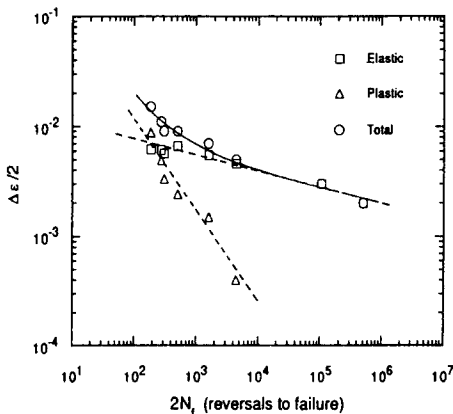


Fig. 1 Strain amplitude versus reversals to failure of low cycle fatigue test specimens for $R_e = -1$

여기서, 대수선형 회귀분석에 의해 구한 σ'_f , b, ϵ'_f , c는 Table 3에 수록하였다.

Fig. 1은 $R_e = -1$ 의 완전역전 저주기 피로거동에서 탄성, 소성, 총변형률 진폭에 따른 저주기 피로수명을 나타내고 있다. Fig. 1에서 변형률-수명곡선의 탄성성분과 소성성분에서 약간의 비선형성을 관찰할 수 있으나, 총변형률과 수명과의 관계는 식 (3)을 이용하여 각 변형률 진폭에 따른 피로수명을 계산한 후 이를 실선으로 나타낸 변형률-수명 곡선과 매우 유사한 거동을 보이고 있다.

2.2 저주기 피로거동에서 평균응력의 영향

Fig. 2는 저사이클 피로실험에서 적용된 3가지 R_e 로부터 얻은 변형률-수명거동을 종합적으로 나타낸 그림이다. 압축평균변형률을 나타내는 $R_e = -2$ 의 경우, 다른 두 경우보다 가장 긴 피로수명을 나타내고 있어 압축평균응력이 피로수명을 연장시키는 반면, 인장평균응력을 동반하는 $R_e = 0.5$ 의 경우에는 가장 짧은 피로수명을 나타내고 있다. 전

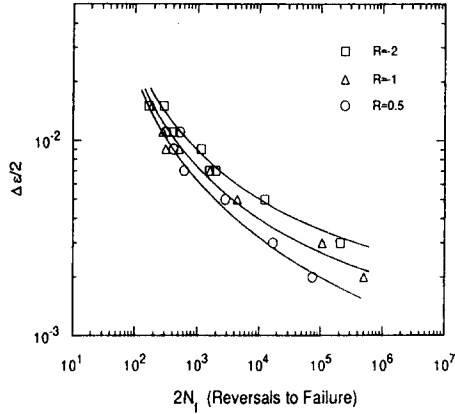


Fig. 2 Strain amplitude versus reversals to failure of low cycle fatigue test specimens for all strain ratios

반적으로 0.005 미만의 변형률 진폭에서, 변형률 진폭이 작아질수록 피로수명은 큰 차이를 보이고 있다. 저주기 피로시험결과로부터 변형률 진폭이 작아질수록 압축평균응력과 인장평균응력의 크기는 점점 증가하였다. 이러한 평균응력의 영향으로 인하여 동일한 변형률 진폭에서도 피로수명은 현저한 차이를 보임으로써 평균변형률에 따라 큰 평균응력이 동반되는 경우, 피로수명에 큰 영향을 미치는 현상을 관찰 할 수 있었다.

저주기 피로시험에서 평균응력의 영향을 평가하기 위하여, 본 연구에서는 Morrow 손상변수와 SWT 손상변수를 도입하였다. 평균응력 σ_m 을 고려한 Morrow식은 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f (2N_f)^c \quad (4)$$

탄성성분만을 고려한 Morrow식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_a = (\sigma'_f - \sigma_m) (2N_f)^b \quad (5)$$

Morrow 모델방정식의 탄성성분과 실제 저주기 피로수명과의 관계를 Fig. 3에 나타내었으며 식 (5)를 이용하여 예측한 피로수명과 Morrow 모델의 탄성성분 파라미터, $\sigma_a / (\sigma'_f - \sigma_m)$ 과의 상관관계를 직선으로 나타내었다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 1×10^3 reversal 이상에서 Morrow식에 의해 구한 피로수명은 실제 피로수명보다 더 짧은 수명치를 나타내고 있으나 상당히 만족할 만한 상관관계를 보이고 있다.

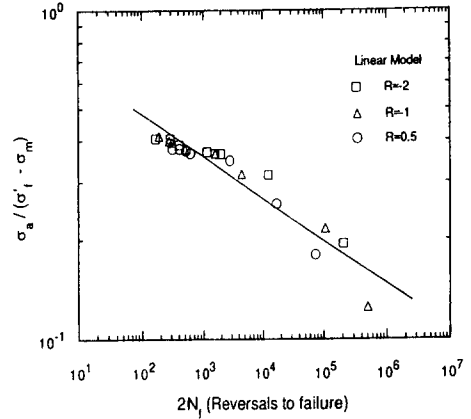


Fig. 3 Relationship between Morrow's mean stress parameter and reversals to failure

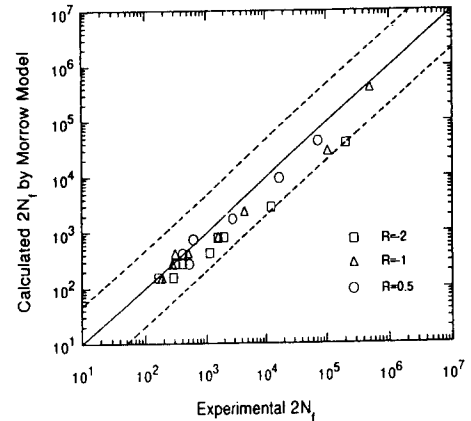


Fig. 4 Experimental fatigue life versus calculated fatigue life using Morrow model

Fig. 4는 Morrow식 (4)에 의해 계산된 피로수명과 실제 시험에서 구한 실제 피로수명과의 관계를 나타낸 것이다. Morrow식 (4)를 이용하여 계산된 피로수명은 긴 수명영역으로 갈수록 약간의 보수적인 (conservative) 경향을 보이나, 5배이내의 오차범위에서 실제 피로수명과 비교적 적절한 상관관계를 보이고 있으며, 이러한 보수성은 Fig. 3에서도 알 수 있듯이 Morrow 모델이 긴 수명영역에서 실제보다 짧은 수명에 예측을 보임에 기인한다.

한편 SWT 파라미터의 경우는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁹⁾

$$\sigma_{\max} \cdot \epsilon_a = f(2N_f) \quad (6)$$

$$\sigma_{\max} \cdot \epsilon_a = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \cdot \epsilon_f (2N_f)^{b+c} \quad (7)$$

Table 4 Log-Log linear SWT model for each strain ratio

Strain ratio, R_ϵ	Coefficient, C (MPa)	Exponent, γ
-2	112.04	-0.3671
-1	94.83	-0.3658
0.5	59.83	-0.2969
All	95.11	-0.3571

본 실험의 경우, 대수 선형회귀분석으로부터 다음과 같은 SWT 이선형식(SWT bilinear equation)을 구할수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} \cdot \epsilon_a &= A(2N_f)^\alpha + B(2N_f)^\beta \\ &= 36.868(2N_f)^{-0.297} + 2226.99(2N_f)^{-1.0551} \end{aligned} \quad (8)$$

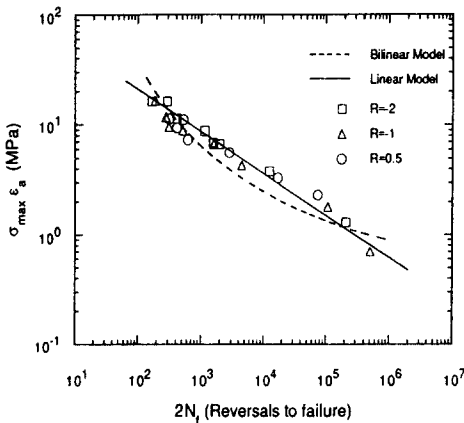


Fig. 5 Log-log bilinear and linear model of SWT parameter versus reversals to failure

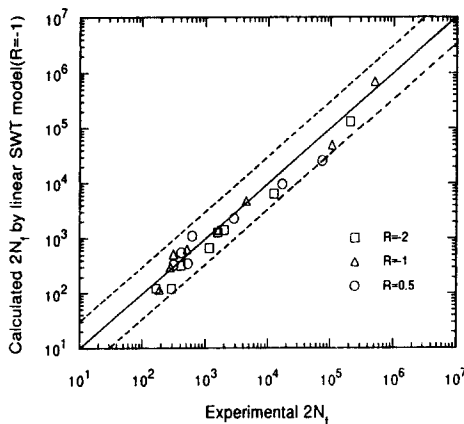


Fig. 6 Experimental fatigue life versus calculated fatigue life using SWT linear model

이러한 SWT 이선형식과 함께, 다음과 같은 SWT 선형식(SWT linear equation)이 적용되었다. $R_\epsilon = -1$ 의 경우, 선형회귀분석에 의해

$$\sigma_{\max} \cdot \epsilon_a = C(2N_f)^\gamma = 94.83(2N_f)^{-0.3658} \quad (9)$$

여기서, 각 R_ϵ 에 대한 계수 C 와 지수 γ 는 Table 4에 나타내었다.

Fig. 5에서는 $R_\epsilon = -1$ 일 때의 저주기 피로특성치들을 SWT 이선형식 (7)과 SWT 선형식 (8)에 대입하여 피로수명들을 계산한 후, SWT 파라미터, $\sigma_{\max} \cdot \epsilon_a$ 에 대하여 각각 점선과 실선으로 나타내었고, 실험에서 구한 실제 피로수명들과 비교하였다. SWT 이선형모델은 선형모델에 비하여 더 보수적인 결과를 보여주고 있으며, SWT 선형모델이 실제수명과 더 적절한 상관관계를 보이고 있음을 알 수 있다.

SWT 모델에 의해 계산된 피로수명과 실제수명을 Fig. 6에 나타내었으며, Fig. 4에 나타내어진 Morrow 모델에 비해 SWT 모델은 더 좁은 오차 범위로 실제수명과 매우 훌륭한 상관관계를 나타내고 있다. SWT 모델은 변형률비에 상관없이 $R_\epsilon = -1$ 인 경우의 계수와 지수값만을 이용하여 평균응력에 무관하게 저주기 피로특성을 가장 적절하게 평가할 수 있으므로 완전역전 저주기 특성 데이터베이스를 이용하여 평균응력의 영향을 고려한 저주기 피로수명평가가 가능하다.

3. C형 시험편의 피로실험 및 저주기 피로수명

Fig. 7과 같이 한개의 흙과 두개의 흙을 지닌 2가지 형태의 C형 시험편에 반복하중이 가하여질 때 피로수명을 평가하기 위한 실험이 수행되었다. C형 시험편의 외경흙에서 발생하는 최대응력과 응력집중계수는 Fig. 8과 같은 유한요소해석 모델을 이용하여 Table 5와 같이 얻어졌으며, Table 6은

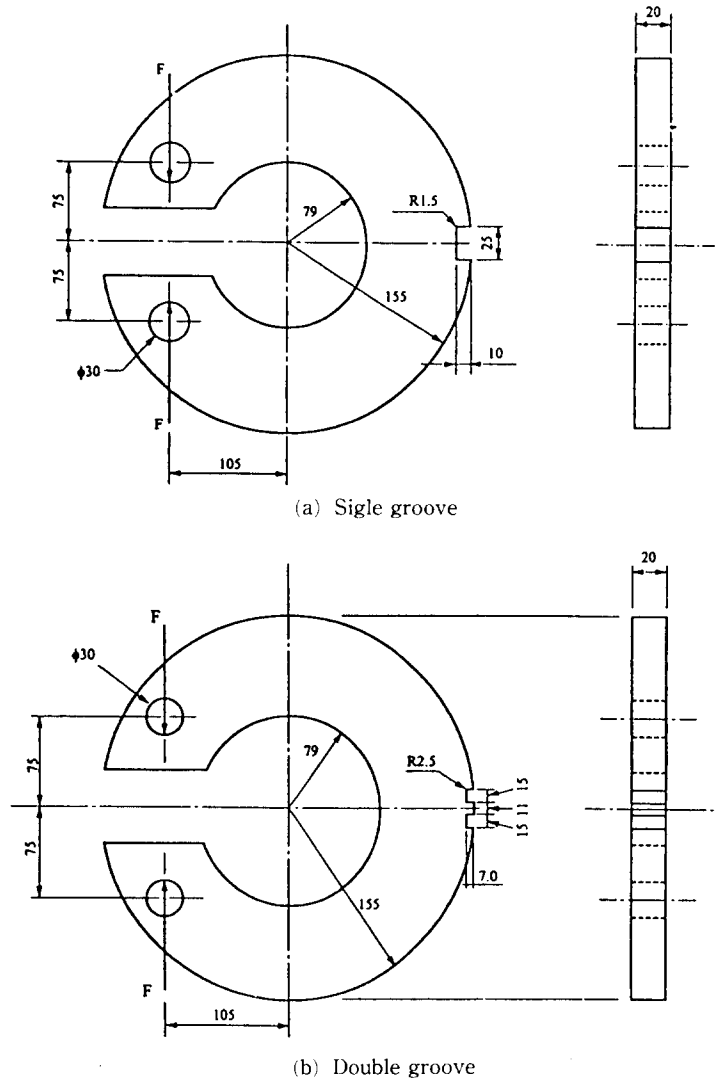


Fig. 7 Geometries of C-shaped fatigue test specimens with external grooves

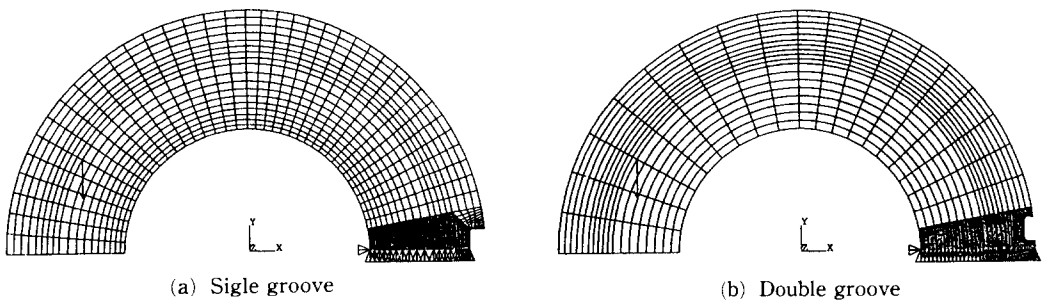


Fig. 8 Finite element meshes of C-shaped fatigue test specimens with external grooves

Table 5 Maximum equivalent stresses, theoretical stress concentration factors of the C-shaped specimen due to compressive simulation load of 1 kN determined from finite element stress analysis

Groove type	Nominal stress S_N (MPa)	$\sigma_{eq} \cdot \max$ (MPa)	K_t
Single	11.65	31.70	2.72
Double	10.74	21.70	2.07

Table 6 Fatigue loads and corresponding nominal stresses for C-shaped specimens

Groove type	Load type	Load, F (kN)		Nominal stress, S (MPa)	
		F_{max}	F_{mix}	S_{max}	S_{mix}
Single	LT1	112.6	63.4	1311.8	738.6
	LT2	92.6	43.4	1078.8	505.6
	LT3	69.3	20.1	807.3	234.2
Double	LT1	109.4	61.9	1145.4	648.1
	LT2	89.3	41.8	935.0	437.6
	LT3	66.8	19.4	699.4	203.1

공칭응력에 따른 피로하중의 크기들을 나타낸 것이다.

피로시험은 상온에서 0.5~1 Hz의 주기에 따라 하중제어조건으로 수행되었으며, 이동현미경 2대를 사용하여 시험편의 양표면에서 균열길이를 평균하여 평균균열길이 1.5 mm 까지의 반복횟수를 피로수명으로 정의하였다.

Fig. 9는 본 연구에서 사용된 3가지 하중조건에 따른 C형 시험편의 피로수명을 두가지의 홈 형태에 따라 나타낸 것으로서, 한개의 외경홈과 두개의

외경홈을 지닌 시험편 모두가 피로하중이 감소함에 따라 피로수명은 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 모든 하중조건하에서 하중진폭은 동일하므로 피로하중에 따른 피로수명의 차이는 평균응력, 또는 최대등가응력의 차이에 기인함을 알 수 있다. 또한 두개의 홈을 지닌 시험편은 한개의 홈을 지닌 시험편에 비하여 약 10~12배 정도 더 긴 피로수명을 보이고 있어 두개의 홈을 지닌 시험편은 홈선단에서의 낮은 응력집중효과로 인하여 피로수명이 크게 향상 되었음을 알 수 있다.

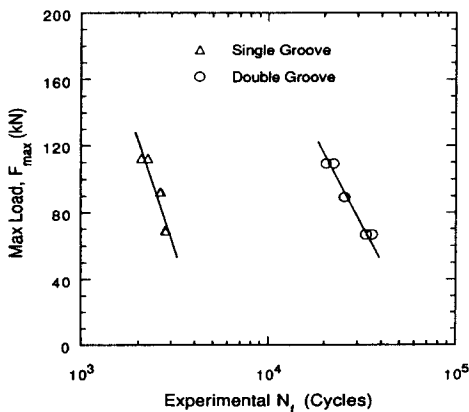


Fig. 9 Fatigue life to 1.5mm crack length for C-shaped specimens

4. 피로균열 개시수명 예측 및 비교평가

노치와 같은 불연속부를 갖는 부재나 구조물이 반복적인 하중을 받을때 기계나 구조물의 대부분은 탄성적인 변형거동을 보이나, 실제적으로 그 노치의 선단부분에서는 국부적인 소성변형에 의하여 피로균열의 발생 및 전파가 용이하게 된다. 이러한 부재의 피로균열 개시수명을 평가하기 위해서는 노치선단을 대상으로 탄소성 유한요소해석이나, 스트레인 게이지 등을 이용한 실험적 방법들이 이용되나, 이들 방법은 해석시 복잡한 절차 등을 요구하기 때문에 Neuber에 의해 제안된 근사해법이 주로 이용되고 있다. (10, 11)

Neuber법칙에 의한 노치뿌리에서의 국부응력과 국부변형률, 공칭응력과 공칭변형률과의 관계는 다음과 같다. (12, 13)

$$\Delta\sigma \cdot \Delta\varepsilon = K_f^2 (\Delta s \cdot \Delta c) \quad (10)$$

여기서, $\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon$ 은 각각 국부응력범위와 국부변형률범위, Δs 와 Δc 은 공칭응력범위와 공칭변형률범위를 나타낸다. 또한 피로노치계수 K_f 는 이론적 응력집중계수 K_t 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$K_f = 1 + \frac{(K_t - 1)}{(1 + p/r)} \quad (11)$$

여기서, r 은 노치의 반경이고, p 는 재료상수로서 다음과 같은 Peterson의 제안식을 이용하여 얻어졌다. (14)

$$p = 0.0254 \left(\frac{2068 \text{ MPa}}{\sigma_u} \right)^{1.8} \text{ (mm)} \quad (12)$$

따라서 노치반경이 1.5 mm인 한개의 홈과 노치반경이 2.5 mm인 두개의 홈을 지닌 시편에서의 피로노치계수 K_f 는 각각 2.65, 2.04가 얻어진다.

반복응력-변형률 곡선식 (1)과 Neuber hyperbola식 (10), 히스테리시스 루프 곡선식 (2)로부터 다음 식 (13)과 같이 국부응력범위와 국부변형률범위 $\Delta\sigma$, $\Delta\varepsilon$ 을 구하게 된다.

$$\frac{(\Delta\sigma)^2}{2E} + \Delta\sigma \left(\frac{\Delta\sigma}{2K_f} \right)^{1/n'} = \frac{(K_f \cdot \Delta\sigma)^2}{2E} \quad (13)$$

Fig. 10은 피로수명예측 프로그램, FALIPS를 이용하여 C형 시험편의 피로수명을 예측하는 과정을 도식적으로 나타낸 그림이다. FALIPS를 이용하여 얻어진 C형 피로시험편의 홈형태와 각 하중조건에

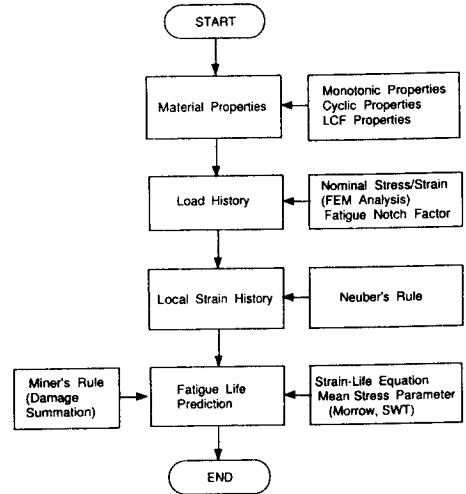


Fig. 10 Structure of FALIPS Program

따른 국부변형률과 국부응력, 평균응력치들은 Table 7에 수록하였다. 이와같이 얻어진 국부변형률과 국부응력들은 평균응력에 따른 피로수명의 평가를 위해 본 연구에 도입된 Morrow 모델과 SWT 모델식에 적용되어 FALIPS를 통해 피로균열 개시수명이 예측되었으며, 실험으로부터 구한 피로수명과 비교, 평가되었다.

Fig. 11은 Morrow 모델과 SWT 모델을 이용하여 예측된 C형 시험편의 피로수명치와 실험을 통해 구한 피로수명치와의 관계를 나타내고 있다. 전반적으로 한개의 홈을 지닌 시험편의 경우, 예측된 피로수명치는 매우 작은 1.5배의 오차범위에서 실험결과와 근접한 예측결과를 보이고 있으나, 두개의 홈을 지닌 시험편의 경우에는 최대 약 3.3배의

Table 7 Local strains and local stresses for C-shaped fatigue specimens

Groove type	Load type	Local strain, ε		Local stress σ (MPa)		Strain ratio R_ε
		ε_{max}	$\Delta\varepsilon/2$	σ_{max}	$\Delta\sigma_m$	
Single	LT1	0.04629	0.003819	1303.3	549.3	0.83
	LT2	0.03242	0.003819	1258.6	504.6	0.76
	LT3	0.01920	0.003819	1189.7	435.8	0.60
Double	LT1	0.022506	0.002533	1211.2	703.9	0.77
	LT2	0.015650	0.002533	1160.6	653.3	0.68
	LT3	0.009429	0.002528	1077.9	571.7	0.46

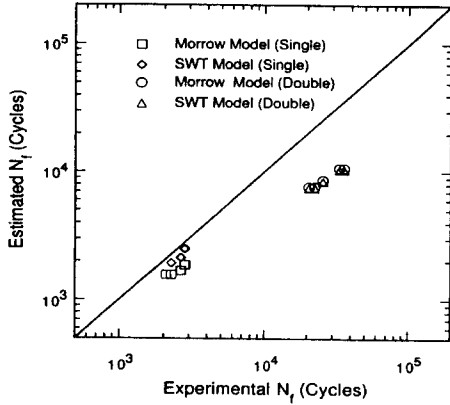


Fig. 11 Estimated fatigue life using Morrow and SWT model versus experimental fatigue life of C-shaped specimens

오차를 보이고 있다. 이와같이 한개의 흠과 두 개의 흠을 지닌 시험편의 피로수명예측치와 실험치가 각기 다른 오차정도를 보이는 것은 흠의 형태에 따라 응력집중정도가 다르고, 그에 따른 흠선단 부근에서의 응력구배차이에 의한 피로노치계수의 영향에 기인한 것으로 해석된다.

한편, 한개의 흠을 지닌 시험편의 경우, Morrow 모델에 비하여 SWT 모델을 이용한 피로수명예측치가 실제 실험수명치에 약간 더 근접하는 결과를 보이고 있으며, 두개의 흠을 지닌 시험편의 경우에는 Morrow 모델과 SWT 모델 사이에 매우 유사한 결과를 보이고 있다. 또한 두 모델을 이용하여 예측된 피로수명치는 실험수명치에 비하여 모두가 보수적인 (conservative) 경향을 나타내고 있으며, 이는 실제보다 큰 국부변형률이 얻어지는 Neuber법칙의 보수성에 기인한다.

5. 결 론

(1) 변형률비가 각각 $R_e = -2, -1, 0.5$ 인 고강도 압력용기강 ASTM A723의 저주기 피로시험중, $R_e = -1$ 을 제외한 모든 경우에서 총변형률진폭이 0.005보다 클 때에는 평균응력의 이완으로 피로수명에 미치는 영향이 적으나, 0.005이하의 총변형률진폭을 지나는 경우에 재료는 탄성거동을 보이며 압축 및 인장평균응력이 존재하여 저주기 피로수명을 각각 연장 또는 단축시키는 영향을 주었다.

(2) 피로수명에 대한 평균응력의 영향을 고려하

기 위해 사용된 Morrow 손상모델과 SWT 손상모델은 모두 고강도 압력용기강의 저주기 피로수명을 효과적으로 표현하였으나, Morrow 손상모델에 비하여 SWT 손상모델이 상대적으로 실험수명에 더 접근하는 경향을 보였다.

(3) 최대하중이 서로 다르며 동일한 하중진폭을 지니는 피로하중 조건하에서의 피로수명은 평균응력 또는 최대응력의 크기에 의하여 지배되었으며, 이는 국부변형률 방법과 평균응력 손상모델을 사용하여 예측되었다. 피로수명예측치는 실험수명과 약 1.5~3.3배의 오차를 지니며, 비교적 정확히 일치하였으며, 두개의 흠을 지닌 시험편보다 한개의 흠을 지닌 시험편에서 상대적으로 실험수명에 더 접근하는 경향을 나타냈다.

후 기

이 연구는 96년도 한국과학재단 연구비지원 (과제번호 : 961-1004-032-2)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Barsom, J. M. and Rolfe, S. T., 1983, *Fracture and Fatigue Control in Structures*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 223~249.
- (2) Socie, D. F., 1977, "Fatigue-life Prediction Using Local Stress-Strain Concepts," *Experimental Mechanics*, Vol. 17, No. 2, pp. 50~55.
- (3) Shatil, G., Ellison, E. G. and Smith, D. J., 1995, "Elastic-Plastic Behavior and Uniaxial Low Cycle Fatigue Life of Notched Specimens," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, Vol. 18, No. 2, pp. 235~245.
- (4) Koh, S. K. and Stephens, R. I., 1991, "Mean Stress Effects on the Low Cycle Fatigue for High Strength Steel," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, Vol. 14, No. 4, pp. 413~428.
- (5) Koh, S. K. and Stephens, R. I., 1991, "Fatigue Life Prediction of an Autofrettaged Thick-walled Pressure Vessel with an External Groove," *Journal of Pressure Vessel Technology, American Society of Mechanical Engineers*, Vol. 113, No. 3, pp. 368~374.

- (6) Koh. S. K. and Stephens. R. I., 1994, "Improved Fatigue Life of an Autofrettaged Thick-walled Pressure Vessel with an External Groove," *Int. J. Pressure Vessel and Piping*, Vol. 58, No. 2, pp. 131~145.
- (7) Bannantine. J. A., Comers. J. J. and Handrock, J. L., 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 40~70.
- (8) Morrow. J., 1969, "Fatigue Design Handbook," *Advances in Engineering*, Vol. 4, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Sec 3.2, pp. 21~29.
- (9) Smith. K. N., Watson. P. and Topper. T. M., 1970, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals," *J. Materials*, Vol. 5, No. 4, pp. 767~778.
- (10) Topper. T., Wetzal. R. and Morrow. J., 1969, "Neuber's Rule Applied to Fatigue of Notched Specimens," *J. Materials*, Vol. 5, No. 4, pp. 200~209.
- (11) Leis. B. N., Gowda. C. V. B. and Topper. T. H., 1973, "Cyclic Inelastic Deformation and the Fatigue Notch Factor," *Cyclic Stress-Strain Behavior- Analysis, Experimentation, and Failure Prediction*, *ASTM STP 519*, pp. 133~150.
- (12) Truchen. M., 1982, "Application of Low-Cycle Fatigue Test Results to Crack Initiation from Notches," *Low Cycle Fatigue and Life Prediction*, *ASTM STP 770*, C. Amzallag, B. N. Leis, and P. Rabbe, Eds, pp. 254~ 268.
- (13) Neuber. H., 1961, "Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatic Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Law," *Journal of Applied Mechanics*, pp. 544~550.
- (14) Peterson. R. E., 1974, *Stress Concentration Factors*, John Wiley & Sons, N. Y.