

피로수명예측을 위한 잔류강도 저하모델의 파라미터 결정법 제안 (I)

김상태* · 장성수*

(2000년 11월 16일 접수, 2001년 2월 14일 심사완료)

A Proposal of Parameter Determination Method in the Residual Strength Degradation Model for the Prediction of Fatigue Life (I)

Sang-Tae Kim and Seong-Soo Jang

Key Words: Residual Strength Degradation Model(잔류강도 저하모델), Maximum Likelihood Method(최우추정법), Minimization Technique(최소화기법), Weibull Distribution Function(와이블 분포함수), Equivalent Ultimate Strength(등가극한강도)

Abstract

The static and fatigue tests have been carried out to verify the validity of a generalized residual strength degradation model. And a new method of parameter determination in the model is verified experimentally to account for the effect of tension-compression fatigue loading of spheroidal graphite cast iron. It is shown that the correlation between the experimental results and the theoretical prediction on the statistical distribution of fatigue life by using the proposed method is very reasonable. Furthermore, it is found that the correlation between the theoretical prediction and the experimental results of fatigue life in case of tension-tension fatigue data in composite material appears to be reasonable. Therefore, the proposed method is more adjustable in the determination of the parameter than maximum likelihood method and minimization technique.

1. 서론

최근 재료생산 과정에서 발생하는 화학조성, 열처리영향, 가공 등의 불규칙한 요인으로 인해 피로수명예측, 잔류강도예측, 비파괴확률 등의 신뢰성 평가가 요구되어 지고 있다. 정규분포, 대수정규분포, Weibull 분포가 신뢰성 해석에서 뛰어난 응용성으로 인해 재료의 피로수명 및 정적강도 분포해석에 복합재료를 중심으로 자주 이용^(1~12)되고 있으나, 구상흑연주철과 같은 주조재료의 산재연구에의 적용과 잔류강도와 강성저하를 전

제로한 잔류강도 저하모델,^(1~7) 강성 저하모델에 의한 피로수명 예측, 피로수명분포 예측, 잔류강도 예측 등의 신뢰성 평가에 관한 보다 많은 연구가 필요한 실정이다. 장⁽¹⁰⁾ 등은 구상흑연주철의 정적극한강도 및 피로수명분포에 대한 연구에서 2모수 Weibull 분포가 정규분포, 대수정규분포보다 실험데이터와 더 좋은 일치치를 보이고 있으며, 2모수 Weibull 분포의 형상, 규모모수 추정은 최우추정법이 최소사승법 보다 실험데이터와 더 좋은 일치치를 보이고 있음을 보고 하였다. 피로하중하에서 잔류강도저하를 전제로한 통계적 연구는 1972년 복합재료를 이용하여 Broutman⁽³⁾ 등에 의해 시작되었고, Yang⁽¹⁾은 응력비, 응력영역, 사이클수의 함수로서 잔류강도가 피로사이클에 따라 단조감소한다는 가정을 근거로 하여 잔류강도

* 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : stkim@yu.ac.kr

TEL : (053)810-2456 FAX : (053)810-3703

* 회원, 제주산업정보대학 자동차· 기계계열

저하모델을 제안하였으며, 노치없는 탄소섬유/에폭시 적층판의 인장-인장 피로하중의 경우에 제안된 모델이 실험결과와 좋은 일치율을 갖음을 보고하였다. 또 Yang⁽²⁾은 인장-압축 피로하중의 경우에도 잔류강도 저하모델을 통한 피로수명분포와 잔류강도예측이 가능한 이론을 제시하고, 실험데이터로 입증하였다.

Radhakrishnan⁽⁵⁾은 Yang⁽¹⁾의 모델의 유효성을 입증하였고, 심⁽⁷⁾ 등은 노치없는 탄소섬유/에폭시 복합재료에 있어서 피로 잔류강도 저하모델의 해석에 의한 잔류강도 및 피로수명의 분포특성을 통계적 누적분포함수와 중앙순위에 의한 파손확률을 이용하여 실험결과와 비교함으로써 모델이 유효함을 입증하였다.

Takashi⁽¹³⁾ 등은 노치없는 구상흑연주철을 이용한 회전굽힘피로에서 피로사이클에 따라 잔류강도저하가 발생함을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 피로사이클에 따라 잔류강도가 단조감소한다고 가정하고, 구상흑연주철에 대한 Yang⁽²⁾의 모델의 유효성을 입증하였으며, 잔류강도 저하모델을 이용하여 피로수명 예측, 피로수명분포 예측, 잔류강도 예측을 위해서는 잔류강도 저하모델을 구성하고 있는 3개의 파라미터들의 정확한 산출이 가장 중요한 부분이므로 구상흑연주철의 인장-압축 피로하중과 탄소섬유강화 복합재료의 인장-인장 피로하중을 고려하여 보다 효율적인 새로운 파라미터 결정법을 제안하였다.

지금까지의 파라미터 추정에는 최소화기법(minimization technique, M.T.)과 최우추정법(maximum likelihood method, M.L.M.) 등이 가장 많이 이용되고 있는데 심⁽⁷⁾ 등, Radhakrishnan⁽⁵⁾과 Whitney⁽⁴⁾ 등은 최우추정법을 이용하여 파라미터를 결정하였고, Yang^(1,2)은 정적극한강도와 등가극한강도의 평균, 분산, 왜도의 차가 가장 작을 때 즉 정적극한강도와 등가극한강도가 가장 잘 일치할때의 파라미터를 구하는 최소화기법을 이용하였다. 그리고 김⁽⁶⁾ 등은 노치없는 탄소섬유/에폭시 복합재료에 대해 최우추정법과 최소화기법을 비교하고 최소화기법이 파라미터 결정에 더 적합함을 보고하였다.

본 연구에서는 Yang⁽²⁾의 모델의 구상흑연주철에 대한 유효성 입증과 더불어 피로수명의 실험

데이터에 근거한 2모수 Weibull 분포함수와 잔류강도 저하모델을 근거로한 예측분포함수의 잔차제곱합(residual sum of square)이 최소가 될 때의 새로운 파라미터 결정법을 제안하고 제안된 방법의 적합성을 최우추정법, 최소화기법과 비교 평가하였다.

2. 이론해석

2.1 잔류강도 저하해석

Yang⁽¹⁾은 n 피로사이클 후에 잔류강도 R(n)이 점차적으로 감소하는 실험데이터를 기초로 하여 잔류강도 R(n)의 저하 기율기를 아래 식 (1)과 같이 가정하였다.

$$\frac{dR(n)}{dn} = -\frac{f(S,r)}{cR^{c-1}(n)} \quad (1)$$

여기서, S는 응력범위, r은 응력비(혹은 최소응력 σ_{min}), c는 상수이고 f(S, r)은 S와 r의 함수이다. 식 (1)을 $n_0=0 \sim n_1=n$ 사이클까지 적분하면 식 (2)와 같다.

$$R^c(n) = R^c(0) - f(S,r)n \quad (2)$$

식 (2)에서 n 사이클 후 잔류강도 R(n)은 정적극한강도 R(0), 작용사이클수 n, 응력범위 S의 함수로 표현됨을 알 수 있다. 그리고 잔류강도의 분포 형상(shape)은 c에 의존함을 알 수 있다. 그리고 구상흑연주철의 정적극한강도 R(0)의 통계적 분포가 2모수 Weibull 분포를 따르고⁽¹⁰⁾ 있으므로 식 (3)과 같은 정적극한강도 분포 $F_{R(0)}(x)$ 를 얻을 수 있다.

$$F_{R(0)}(x) = P\{R(0) \leq x\} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (3)$$

여기서, α 는 형상모수, β 는 규모모수(특성강도)이다. 잔류강도 R(n)이 최대 작용응력(σ_{max}) 값으로 저하될때 피로파괴가 일어난다고 가정하고, 최대 작용응력하에서 피로파괴가 발생하는 사이클수를 N이라 놓으면 피로파괴 순간에 $R(n) = \sigma_{max}$, $n=N$ 의 피로파괴조건을 얻을 수 있다.

식 (2)에 피로파괴조건 $\{R(n) = \sigma_{max}, n=N\}$ 을 대

입하면, $\sigma_{\max}^c = R^c(0) - f(S, r)N$ 이 되고 피로파괴 사이클수 N 은 식 (4)와 같이 된다.

$$N = \frac{[R^c(0) - \sigma_{\max}^c]}{f(S, r)} \quad (4)$$

여기서, 정적극한강도 $R(0)$, 피로파괴 사이클수 N 은 통계적 변수이고, 피로수명 N 의 통계적 분포는 식 (4)의 변환과 식 (3)에 주어진 정적극한강도 $R(0)$ 의 통계적분포로 부터 식 (5)와 같이 된다.

$$F_N(n) = P[N \leq n] = P\left[\frac{R^c(0) - \sigma_{\max}^c}{f(S, r)} \leq n\right] \quad (5)$$

$$= P\left[R(0) \leq [nf(S, r) + \sigma_{\max}^c]^{\frac{1}{c}}\right]$$

식 (5)에 식 (3)를 대입하면 식 (6)과 같이 된다.

$$F_N(n) = 1 - \exp\left[-\left\{\frac{n + \sigma_{\max}^c/f(S, r)}{\beta^c/f(S, r)}\right\}^{\frac{\alpha}{c}}\right] \quad (6)$$

따라서 피로수명 N 의 통계적 분포는 식 (6)과 같이 3모수 Weibull 분포임을 알 수 있다. 일반적으로 최대 작용응력 (σ_{\max})이 매우 낮은 저응력 진폭피로의 경우 (σ_{\max} 이 β 보다 작은 경우) 즉 고주기피로의 경우 ($\sigma_{\max}/\beta)^c \ll 1$ 이 되므로 식 (6)은 식 (7)로 표현될 수 있다.

$$F_N(n) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{n}{\beta^c/f(S, r)}\right]^{\frac{\alpha}{c}}\right\} \quad (7)$$

식 (7)은 만약 $(\sigma_{\max}/\beta)^c \ll 1$ 이면, 피로수명 N 의 통계적분포는 형상모수 α/c , 규모모수 $\beta^c/f(S, r)$ 인 2모수 Weibull 분포임을 의미한다. 일정 진폭응력 피로의 경우 각 응력범위 S 와 특성수명 N^* 의 관계가 식 (8)을 따른다고 가정하면, 식 (8)에서 $N^* = (KS^b)^{-1}$ 이고 식 (7)과 식 (8)에 의해 $\beta^c/f(S, r) = (KS^b)^{-1}$ 이므로, 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$KS^b N^* = 1 \quad (8)$$

$$f(S, r) = \beta^c KS^b \quad (9)$$

식 (9)를 식 (2)에 대입하면, 일정진폭 피로하중 하에서 잔류강도 저하를 나타내는 식 (10)을 얻을

수 있다.

$$R^c(n) = R^c(0) - \beta^c KS^b n \quad (10)$$

여기서, c, b, K 는 실험데이터에 의해 결정되는 상수이다. 그리고 일정진폭하의 잔류강도저하는 저응력과 고응력수준 피로로 분리하여 고려하여도 모델 파라미터 b, c, K 의 값은 다르지만 잔류강도 저하모델은 식 (10)과 같은 동일한 결과⁽¹⁾를 갖는다. 피로파괴 사이클수 N 은 파괴조건 $\{n=N, R(n) = \sigma_{\max}\}$ 을 식 (10)에 대입하면, 잔류강도와 파라미터가 결정되면 각 작용응력에 따른 피로수명을 평가할 수 있는 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$N = \frac{[R^c(0) - \sigma_{\max}^c]}{\beta^c KS^b} \quad (11)$$

피로수명 N 의 통계적 분포는 식 (3)의 정적극한강도 $R(0)$ 의 분포함수와 식 (11)로 부터 식 (12)와 같이 된다.

$$F_N(n) = P[N \leq n] = P\left[R(0) \leq (\beta^c KS^b n + \sigma_{\max}^c)^{\frac{1}{c}}\right] \quad (12)$$

$$F_N(n) = 0 \quad : n < 1$$

$$= 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(n + \sigma_{\max}^c/\beta^c KS^b)}{1/KS^b}\right]^{\frac{\alpha}{c}}\right\} : n \geq 0$$

2.2 파라미터 결정방법

잔류강도 저하모델을 근거로 한 식 (12)의 피로수명의 예측분포는 파라미터 b, c, K 에 의존하므로 파라미터 결정은 잔류강도 저하모델을 이용한 피로수명 예측시 가장 중요한 부분이다. 그리고 최우추정법, 최소화기법과 본 연구에서 제안된 파라미터 결정법은 아래와 같다.

2.2.1 최우추정법

각 응력수준에서 피로수명의 형상모수 α_i 가 같다고 가정하면, 전체 피로수명에 대한 형상모수 α_f 는 각 응력수준에서의 규모모수 β_i 로 정규화 ($Y_{ij} = X_{ij}/\beta_i$) 하면, 아래 식 (13)에 의해 모든 응력수준에 대하여 단 하나의 형상모수 α_f 를 얻

을 수 있다.

$$\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Y_{ij}^{a_i} \ln Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m Y_{ij}^m} - \frac{1}{a_i} - \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \ln Y_{ij}}{mn} = 0$$

$$\beta_i = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij}^{a_i} \right)^{\frac{1}{a_i}} \quad (13)$$

이때, 피로수명분포는 식 (12) 또는 식 (14)로 표현되므로, $c = a/a_j$ 가 된다.

$$F_N(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{N}\right)^{a_i}\right] \quad (14)$$

그리고 b, K 는 전체 피로수명 데이터가 $KS^b N^* = 1$ 을 따른다고 가정하면, 식 (15)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\ln \beta_i = -b \ln S_i - \ln K \quad (15)$$

2.2.2 최소화기법

m 개 시험편의 정적강도를 x_1, x_2, \dots, x_m 이라 두고, 정적강도의 첫번째 3 중앙 모멘트인 평균(m_1), 분산(m_2), 왜도(m_3)를 구한다. 피로시험의 경우는 여러 응력수준에서 일정진폭피로가 작용된 J 개의 피로시험 데이터를 확보한다. 그리고 피로파괴 순간에 잔류강도는 작용응력범위 S 와 같으므로 J 개의 잔류강도 데이터는 $(R_1, S_1, N_1), (R_2, S_2, N_2), \dots, (R_J, S_J, N_J)$ 로 명기한다. i 번째 데이터 (R_i, S_i, n_i) 는 i 번째 시험편이 n_i 사이클 동안 작용 응력범위 S_i 를 받음을 의미하고 그것의 잔류강도는 R_i 이다 즉 n_i 사이클에 시험편이 파괴된다면 $R_i = S_i$ 이다. 피로시험편의 잔류강도 $R_i (i=1, 2, \dots, J)$ 는 등가극한강도 $R_i(0)$ 로 변환되어 질 수 있다. 식 (10)의 잔류강도 저하모델을 이용하여 정리하면 등가극한강도 $R_i(0)$ 는 식 (16)과 같이 된다.

$$R_i(0) = [R_i^c + \beta^c KS_i^b n_i]^{1/c} \quad (i=1, 2, \dots, J) \quad (16)$$

여기서, $R_i(0)$ 는 i 번째 피로시험편이 피로를 전

혀 받지 않았다면 정적극한강도를 의미한다. 식 (16)을 이용하여 J 개의 등가극한강도 데이터 set를 피로데이터들로 부터 얻을 수 있으며, 여기서 등가극한강도 데이터에 대한 첫번째 중앙모멘트인 평균(μ_1), 분산(μ_2), 왜도(μ_3)를 얻는다. 이론적으로 m 개의 정적강도 데이터와 J 개의 피로시험데이터가 무한대로 접근하면, x_i 의 통계적분포는 R_i 의 통계적분포와 같아질 것이고 잔류강도 모델이 유효한다면, $m_1 = \mu_1, m_2 = \mu_2, m_3 = \mu_3$ 가 될 것이다. 그러나 실제 실험데이터는 유한한 것이므로 위 내용은 불가능하다.

따라서, 식 (17)과 같이 파라미터 c, b 와 K 는 정적극한강도 및 등가극한강도 데이터에 대한 첫번째 중앙모멘트들 간의 평균에 제곱근을 취한 차이(mean square difference) Δ 를 최소화 함으로써 얻어질 수 있다.

$$\Delta = (m_1 - \mu_1)^2 + (\sqrt{m_2} - \sqrt{\mu_2})^2 + ({}^3\sqrt{m_3} - {}^3\sqrt{\mu_3})^2 \quad (17)$$

결과적으로 c, b, K 결정을 위해서는 m 개 정적강도 데이터와 J 개의 피로시험 데이터를 필요로 하지만, 정적강도 데이터는 분산이 적으므로 소수의 시험편이라도 무방하지만, 피로시험 데이터는 경험적으로 $J \approx 30$ 개 정도(응력범위 \geq 평균극한강도의 60% 경우)이면 충분⁽¹⁾하다.

2.2.3 파라미터 결정법 제안

최우추정법은 모든 응력수준에서 형상모수를 동일한 것으로 가정하였고, $KS^b N^* = 1$ 을 따르는 것으로 가정하였다. 최소화기법은 정적극한강도와 환산한 등가극한강도가 같다는 것을 근거로 하여 파라미터를 결정하는 방법이다. 본 연구에서 제안한 방법은 구상후연추월이 잔류강도 저하모델을 따른다면 식 (16)의 등가강도 분포가 정적극한강도 분포와 일치되어야 할 것이고, 식 (12)의 피로수명 예측분포도 식 (18)의 중앙순위(median rank)에 의한 실험데이터의 분포에 근접하여야 할 것이란 이론에 근거한 방법이다.

결과적으로, 중앙순위에 의한 실험데이터의 분포와 예측된 분포가 가장 잘 일치할 때 즉 잔류

강도 저하모델에 의한 예측된 분포와 실험데이터에 의한 분포 사이의 잔차제곱합(Δ)이 최소가 될 때의 파라미터를 결정하는 방법으로서 산출하는 방법은 아래와 같고, Delphi 5.0 소프트웨어로 프로그래밍하여 산출하였다.

$$F_{m(i)} = \left(\frac{i+0.3}{n+0.4} \right) \quad (18)$$

여기서, n , i 는 각각 시험편수와 파괴순서이다.

응력범위 S 의 수를 n , i 번째 응력범위 S_i 에서 피로시험편수를 m 이라 하자. 그리고 응력수준 S_j , 최대 작용응력 σ_{max_i} ($i=1, 2, \dots, n$), 각 응력수준에서 피로사이클수 N_{ij} , 파괴순서 k_{ij} ($j=1, 2, \dots, m$)으로 명기하면, 본 연구에서 제안된 방법은 식 (19)와 같다.

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{k_{ij} + 0.3}{m + 0.4} - \left[1 - \exp \left\{ - \frac{(N_{ij} + \sigma_{max_i}^c / \beta^c K S_i^c)^a}{1 / K S_i^c} \right\} \right]^c \right]^2 \quad (19)$$

3. 재료 및 실험방법

사용된 실험재료는 구상흑연주철(FCD 45)이며, 화학조성 및 기계적특성은 기 기재된 논문에서 있는 것과 같다.⁽¹⁰⁾ 시험편 구조는 실제부품과 시험편과의 구조적 제작오차를 줄이기 위하여 실제 자동차 새시부품에 사용되는 동일 ladle 주물을 이용하여 제작하였으며, 시험편의 상세한 형상은 Fig. 1과 같다.

인장시험편은 ASTM E 8, 피로시험편은 ASTM E 606 표준시험편으로 제작하였고, 시험기는 MTS사의 250KN 용량의 유압식 만능 피로시험기를 이용하였다. 그리고 시험편에 발생하는 변위량은 게이지 길이 25mm인 변위신장계를 부착하여 측정하였다.

인장시험은 스트로크 제어 하중속도는 변형률증가 0.05 mm/sec로 시험하였다. 피로시험의 경우 저주기는 변형률 제어, 피로한도 규명을 위한 고주기는 하중제어로 실시하였다. 그리고 하중형태는 인장-압축, 응력비 $R=-1$, 정적극한강도에 대

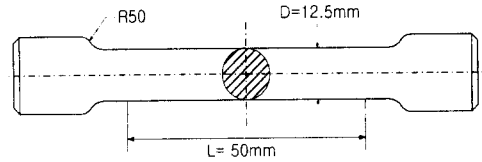


Fig. 1 Configuration of test specimen

한 최대 작용응력의 비 $q(=\sigma_{max}/\sigma_u)$ 는 0.63~0.83의 5개의 응력수준이 되도록 하고 각 응력수준에서 7개의 시험편을 사용하여 시험하였다. 주기는 저주기 1Hz, 고주기는 시험장비 및 재료의 특성을 고려하여 신뢰성이 있는 속도인 10Hz로 하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 1은 저응력수준($q=0.63, 0.66$)과 고응력수준($q=0.72 \sim 0.83$)으로 구분하여 제시된 최우추정법, 최소화기법과 본 연구에서 제안된 파라미터 결정법에 따른 잔류강도 저하모델의 파라미터 b , c , K 값을 나타내고 있다. 저응력수준과 고응력수준에서 파라미터 결정법에 따라 큰 차이를 보이고 있는데, 이것은 저응력수준과 고응력수준의 데이터 산포의 차이에 따라 형상모수의 값이 큰 차이를 보이기 때문 것으로 생각된다.

Table 2는 복합재료의 인장-인장 피로하중을 가한 경우⁽⁷⁾에 대해서 검토된 파라미터 값을 제시하고 있는데 3 방법 모두 유사한 값으로 나타났으나 제안된 방법의 파라미터가 최소화기법과 최우추정법의 가운데 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 Table 3과 Fig. 5는 파라미터 결정법에 따른 식 (11)의 피로수명 예측식에 적용된 결과를 제시하고 있는데 제안된 방법이 피로수명예측에 있어서 실험에 의한 평균값과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

Fig. 2는 작용응력과 피로사이클간의 관계를 제시하고 있는데, 저응력수준 보다 고응력수준에서 데이터 산포가 적음을 알 수 있다. 이것은 피로형상모수가 저응력수준 보다 고응력수준에서 큰 값을 가지고 있음을 의미하는 것이다.

Fig. 3은 정적극한강도의 2모수 Weibull 예측분포와 중앙순위에 의한 파손확률로 환산한 실험

Table 1 Parameters of the residual strength degradation model

| Parameters | b | c | K |
|------------------------------------|----------|----------|-------------|
| Method | | | |
| Maximum likelihood method (M.L.M.) | 48.193* | 12.152* | 1.889E-94* |
| Minimization technique (M.T.) | 13.049** | 6.808** | 1.374E-29** |
| Proposed method (P.M.) | 43.641* | 14.495* | 4.105E-86* |
| | 34.260** | 48.596** | 2.01E-70** |
| | 44.521* | 18.150* | 1.015E-87* |
| | 10.686** | 4.590** | 3.22E-25** |

* q = 0.63, 0.66

** q = 0.72~83

Table 2 Parameters of the residual strength degradation model in CFRP⁽⁷⁾

| Parameters | b | c | K |
|------------|--------|--------|-----------|
| Method | | | |
| M.L.M | 17.226 | 10.285 | 1.965E-50 |
| M.T. | 19.60 | 12.90 | 1.20E-56 |
| P.M. | 18.09 | 11.62 | 1.030E-52 |

q = 0.60, 0.75

Table 3 Comparisons between the experimental results and the prediction of fatigue life by the parameter determination methods

| Method | Exper. results | M.L.M. | M.T. | P.M. |
|--------------|----------------|--------|--------|--------|
| Stress level | | | | |
| 0.63 | 657894 | 649159 | 579769 | 560016 |
| 0.66 | 70063 | 68781 | 76040 | 70566 |
| 0.72 | 19417 | 16748 | 103988 | 18281 |
| 0.79 | 5766 | 4390 | 4330 | 5759 |
| 0.83 | 3076 | 2025 | 777 | 2923 |

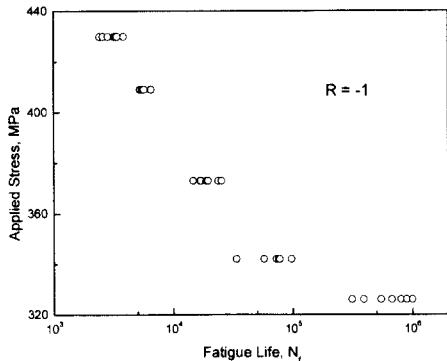


Fig. 2 Applied stress vs number of cycles to failure

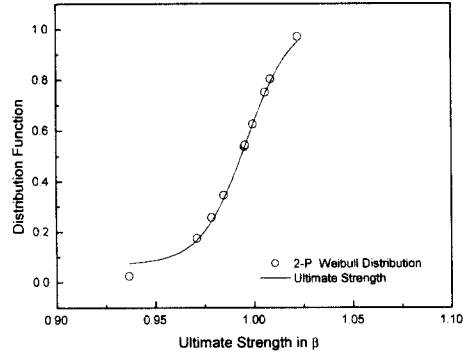


Fig. 3 Distribution function of ultimate strength

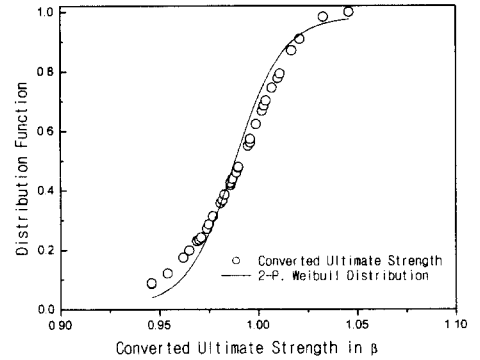


Fig. 4 Distribution function of converted ultimate strength

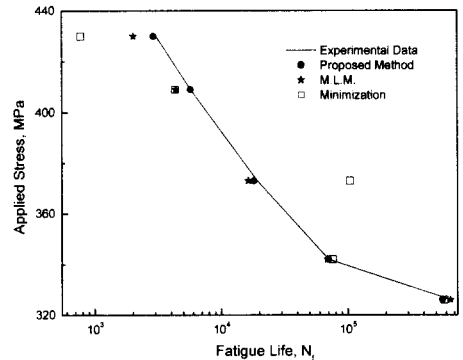


Fig. 5 Comparisons between the experimental results and the prediction of fatigue life according to the parameter determination method

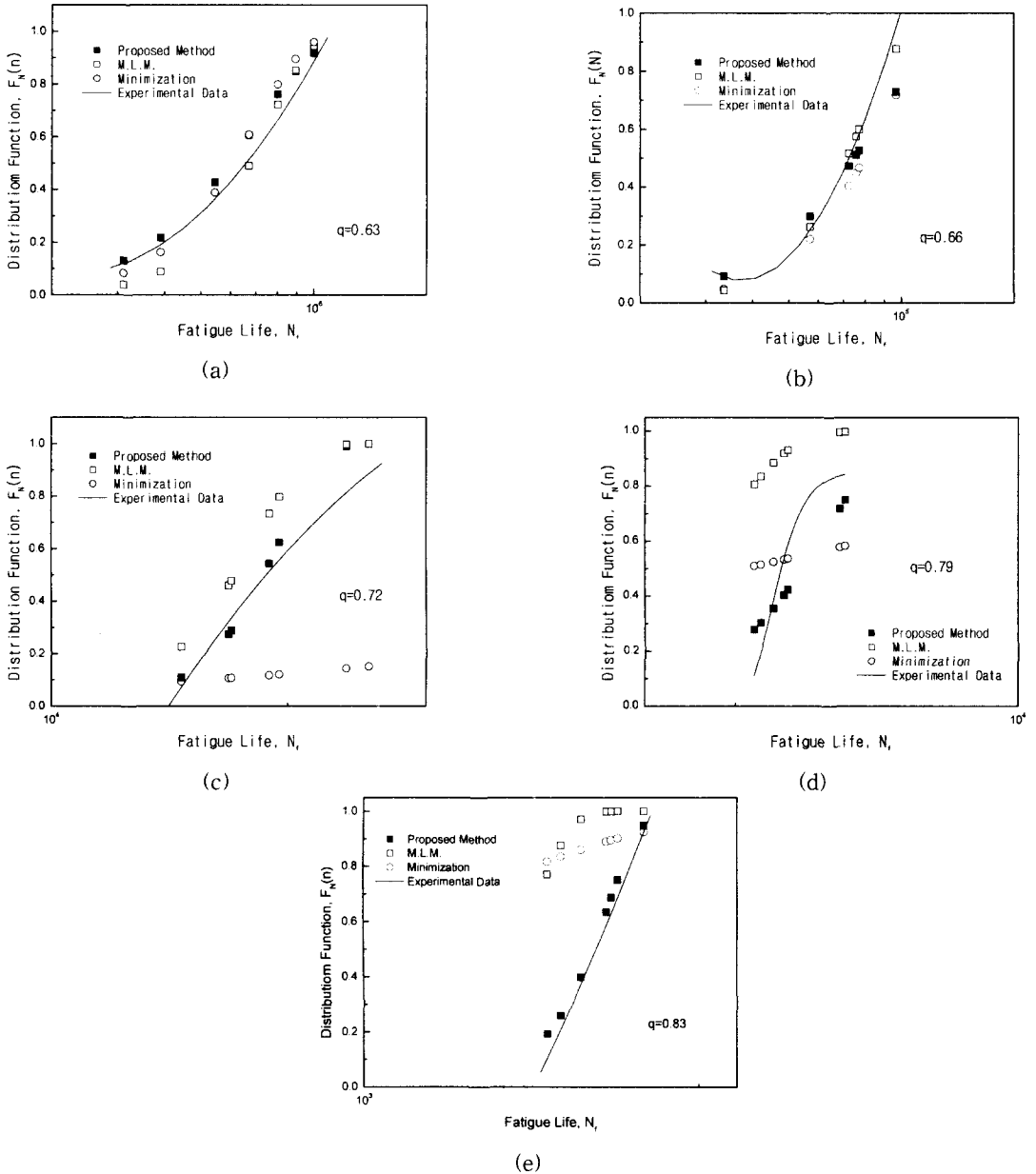


Fig. 6 Comparisons between the experimental results and the prediction of fatigue life distribution by the parameter determination method

데이터의 분포함수가 매우 잘 일치함을 보이고 있다. 구상흑연주철의 정적극한강도가 2모수 Weibull 분포를 따르고 있으며, 분포함수의 형상, 규모모수는 최우추정법, 최소자승법 모두 실험데이터에 의한 분포와 잘 일치하고 있으므로⁽¹⁰⁾ 정

적극한강도의 모수는 최소자승법을 이용하여 구하였다.

Fig. 4는 제안된 파라미터 결정법을 이용하여 식 (16)에 의해 환산한 등가극한강도의 분포를 제시하고 있는데 양호한 일치를 보임을 알 수 있으

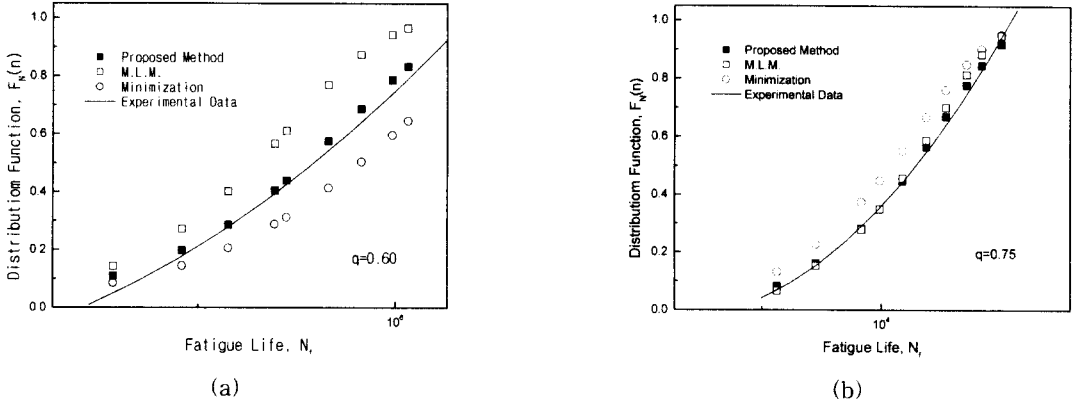


Fig. 7 Comparisons between the experimental results and the prediction of fatigue life distribution by the parameter determination method in CFRP⁽⁷⁾

며, 이는 본 연구에서 제안된 파라미터 결정법과 잔류강도 저하모델이 유효하기 위한 선행조건이 만족함을 알 수 있다.

Fig. 5는 최우추정법, 최소화기법과 제안된 방법을 식 (11)의 피로수명 예측식에 적용하여 얻은 피로수명 예측결과를 제시하고 있는데, 제안된 파라미터 결정법으로 구한 예측피로수명이 실험결과와 가장 좋은 일치를 보이고 있음을 알 수 있다.

최우추정법은 각 응력수준에서 형상모수가 모두 같다는 가정과 $KS^bN^* = 1$ 을 따르는 것으로 가정한 방법인데, 구상흑연주철의 경우 각 응력수준에서 형상모수 a_i 는 상당한 차이⁽¹⁰⁾를 나타내고 있기 때문에 응력수준에 따라 실험값과 예측값의 차이가 발생한 것으로 생각된다. 그리고 최소화기법은 정적극한강도와 식 (10)의 잔류강도 저하모델에 의해 환산한 등가극한강도가 일치할 때의 파라미터를 결정하는 것으로 모델을 통한 피로수명 및 분포예측이 유효하기 위한 선행조건만을 충족시키는 방법이지만, 본 연구에서 제안된 방법은 직접적으로 식 (12)의 피로수명 예측분포가 실험데이터에 의한 중앙순위 분포에 근접할 때의 파라미터를 결정하는 것으로 이러한 잔류강도 저하모델을 통한 피로수명 및 분포예측이 유효하기 위한 필연적인 사항을 만족시키는 효과적인 결정방법이기 때문에 실험값과 좋은 일치를 보인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 각 응력수준에서 최우추정법, 최소화기법과 본 연구에서 제안된 방법으로 예측한 피로수명분포와 실험데이터에 의한 중앙순위 분포함수와의 관계를 제시하고 있는데, (a), (b)에서 보듯이 저응력수준에서는 세 방법 모두 유사한 결과를 나타내고 있었다. 그러나, 고응력수준에서는 (c)~(e)의 그림과 같이 제안된 방법이 실험데이터와 더 좋은 일치를 보이고 있었으며, 최우추정법과 최소화기법은 실험결과와 예측결과가 상이하게 나타났다. 따라서 구상흑연주철의 경우 고응력수준 피로에 있어서는 파라미터 결정시 최우추정법과 최소화기법을 이용하는 데는 문제가 있는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 탄소섬유/에폭시 복합재료의 인장-인장 피로하중을 가한 경우에 제안된 파라미터 결정법의 적합성을 검토해 본 결과 제안된 방법에 의한 피로수명 예측분포함수⁽¹¹⁾가 실험데이터와 가장 좋은 일치를 보이고 있으므로 제안된 방법의 적합성을 재확인 할 수 있었다.

잔류강도 저하해석에 의한 모델의 파라미터 결정은 본 연구의 경우 35개의 피로시험 데이터를 이용하였는데 경험적인 기준인 30개 이상⁽¹⁾보다 많은 시험데이터로 결정되어 충분하다고 생각되지만, Fig. 6에서 처럼 보다 효율적인 피로수명 분포예측을 위해서는 각 응력수준에서 보다 많은 피로시험 데이터를 이용하여 예측된다면 더욱 바람직한 분포예측이 되리라 생각된다.

5. 결론

잔류강도 저하모델의 파라미터 결정방법 및 피로수명분포 예측에 관한 통계적 해석 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

저응력수준에서는 최우추정법, 최소화기법과 본 연구에서 제안된 방법 모두 중앙순위에 의한 실험데이터와 좋은 일치율을 보이고 있으므로 잔류강도 저하모델에 의한 구상흑연주철의 고주기 피로수명예측에는 세 방법 모두 파라미터 결정에 이용되어 질 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 고응력수준에서는 제안된 방법이 다른 두 방법 보다 실험데이터와 더 좋은 일치율을 보이고 있었으며, 최우추정법과 최소화기법은 실험결과와 예측 결과가 상이하게 나타났다. 따라서 구상흑연주철의 경우 고응력수준 피로에 있어서는 파라미터 결정시 최우추정법과 최소화기법을 이용하는 데는 문제가 있는 것으로 생각된다.

그리고 인장-인장 피로하중의 탄소섬유강화 복합재료에 제안된 파라미터 결정법을 적용해 본 결과 제안된 방법이 다른 두 결정법 보다 실험결과와 더 좋은 일치율을 보이고 있었다.

따라서, 피로 잔류강도 저하해석에 의한 피로수명 분포특성은 타당성이 있는 것으로 판단되며, 제안된 파라미터 결정법은 금속재료와 복합재료, 피로하중형태, 응력수준에 무관하게 실험결과와 좋은 일치율을 보이고 있으므로 잔류강도 저하모델을 이용한 피로수명 예측은 제안된 방법을 이용하여 파라미터를 결정하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21 사업에 의해 지원되었음.

참고문헌

(1) Yang, J.N., Liu, M. D., 1977, "Residual Strength Degradation Model and Theory of sPeriodic

Proof Tests for Graphite/Epoxy Laminate," *J. Composite Materials*, Vol. 11, pp. 176~203.

(2) Yang, J.N., 1978, "Fatigue and Residual Strength Degradation for Graphite/Epoxy Composites Under Tension-Compression Cyclic Loadings," *J. Composite Materials*, Vol. 12, pp. 19~39.

(3) Broutman, L.J. and Sahu, S., 1972, "A New Theory to Predict Cumulative Fatigue Damage in Fiberglass Reinforced Plastics," *Composite Materials : Testing and Design (2nd Conference)*, *ASTM STP 497*, pp. 170~188.

(4) Whitney, J.M., 1981, "Fatigue Characterization of Composite Materials," *ASTM STP 723*, pp. 133~151.

(5) Radhakrishnan, K., 1984, "Fatigue and Reliability Evaluation of Unnotched Carbon Epoxy Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 18, pp. 21~31.

(6) 김도식, 김정규, 1994, "잔류강도 저하모델의 파라미터 결정법에 따른 피로수명 예측," *대한기계학회논문집* 제 18권 제8호, pp. 2053~2061

(7) 심봉식, 성낙원, 오장우, 1991, "탄소섬유/에폭시 복합재료의 잔류강도 저하해석에 의한 피로수명 평가," *대한기계학회논문집* 제15권 제6호, pp. 1908~1918.

(8) 日本機械學會(JSME), 1981, "統計的疲勞試驗方法," *JSME S 002*, pp. 1~159.

(9) Nishijima, S., 1981 "Statistical Analysis to Fatigue Test Data," *JSME S 002*, pp. 132~137.

(10) 장성수, 김상태, 2000, "구상흑연주철의 피로수명분포에 대한 통계적 해석," *대한기계학회 논문집 A 권*, 제24권 제9호, pp. 2353~2360.

(11) S. Nishijima, 1981, "Statistical Fatigue Properties of Some Heat Treated Steels for Machine Structural Use," *ASTM STP 744*, pp. 75~88.

(12) 田中道七, 酒井謙雄, 1978, "3 母數 ワイブル 分布の母數推定について," *材料* 第 28 卷 304 号, pp. 13~19.

(13) Takashi Matsuoka, Toshio Shiota, Shinichiro Komatsu, 1993, "Fatigue Damage Process of Spheroidal Graphite Cast Iron Under Rotating Bending Cyclic Loading," *日本機械學會論文集 (A 編)*, 59 卷 559 号, pp. 226~231.