

## 피로수명예측을 위한 잔류강도 저하모델의 파라미터 결정법 제안(II)

김 상 태\* · 장 성 수\*

(2001년 2월 9일 접수, 2001년 6월 26일 심사완료)

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

Sang-Tae Kim and Seong-Soo Jang

**Key Words:** Residual Strength Degradation Model(잔류강도 저하모델), Residual Sum of Square(잔차제곱합), Minimization Technique(최소화기법), Weibull Distribution Function(와이블 분포함수), Equivalent Ultimate Strength(등가극한강도), Prediction of Fatigue Life(피로수명예측)

#### Abstract

A new method of parameter determination in the fatigue residual strength degradation model is proposed. The new method and minimization technique is compared experimentally to account for the effect of tension-compression fatigue loading of spheroidal graphite cast iron and graphite/epoxy laminate<sup>(2)</sup>. It is shown that the correlation between the experimental results and the theoretical prediction on the fatigue life and residual strength distribution using the proposed method is very reasonable. Therefore, the proposed method is more adjustable in the determination of the parameter than minimization technique for the prediction of the fatigue characteristics.

#### 1. 서 론

구조용 재료에 대한 피로수명예측, 잔류강도에 측 등의 통계적 연구는 복합재료를 중심으로 잔류강도 저하모델,<sup>(1~7)</sup> 강성 저하모델 등에 의한 연구가 주로 이루어지고 있는데, 특히 잔류강도 저하모델은 강성 저하모델 대비 피로시험동안 연속적인 변형률의 측정이 불필요하고 쉽게 시험데이터를 확보할 수 있는 장점이 있다.

피로하중하에서 잔류강도저하를 전제조건 통계적 연구는 복합재료를 이용하여 Broutman<sup>(3)</sup> 등

에 의해 시작되었고, Yang<sup>(1)</sup>은 잔류강도가 피로사이클에 따라 단조감소한다는 가정을 근거로 하여 잔류강도 저하모델을 제안하였으며, 노치없는 탄소섬유/에폭시 적층판의 인장-인장 피로하중의 경우에 제안된 모델이 실험결과와 좋은 일치를 보임을 보고하였다. 또 Yang<sup>(2)</sup>은 인장-압축 피로하중의 경우에도 잔류강도 저하모델을 통한 피로수명예측이 가능한 이론을 제시하고, 실험데이터로 입증하였으며, Radhakrishnan<sup>(5)</sup>과 심<sup>(7)</sup> 등에 의하여 잔류강도 저하모델의 유효성이 재확인 되었다.

Weibull 분포<sup>(8~12)</sup> 형태로 표현되는 잔류강도 저하모델은 모델을 구성하는 파라미터들의 정확한 산출이 요구되어 지는데, 지금까지의 파라미터 추정에는 최소화기법(minimization technique)과 최우추정법(maximum likelihood method) 등이 주

\* 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : stkim@yu.ac.kr

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

\* 회원, 제주산업정보대학 자동차·기계계열

로 이용되고 있다.

심<sup>(7)</sup> 등, Radhakrishnan<sup>(5)</sup>과 Whitney<sup>(4)</sup> 등은 최우 추정법을 이용하여 파라미터를 결정하였고, Yang<sup>(1,2)</sup>은 최소화기법을 이용하였다.

김<sup>(6)</sup> 등은 탄소섬유/에폭시 복합재료에 대해 최우추정법과 최소화기법을 비교하고 최소화기법이 파라미터 결정에 더 적합함을 보고한 바 있지만, 보다 정확한 파라미터 결정법에 관한 연구는 미흡한 수준이다.

본 연구의 第1報<sup>(13)</sup>에서는 잔류강도 저하모델 해석에 적합한 새로운 파라미터 결정법을 제안하고, 인장-압축 피로하중하의 구상흑연주철과 인장-인장 피로하중하의 복합재료에 대하여 제안된 파라미터 결정법이 기존의 최소화기법, 최우추정법 보다 피로수명예측과 피로수명분포 예측에 더 적합함을 실험결과와 비교 입증하였다.

본 第2報에서는 구상흑연주철에 대한 피로 잔류강도저하 예측과 [0/45/90/-45<sub>2</sub>/90/45/0]<sub>2</sub> 탄소섬유/에폭시 복합재료<sup>(2)</sup>에 대한 인장-압축 피로하중의 영향을 전반적으로 고려하여 제안된 파라미터 결정법이 최소화기법 보다 잔류강도 저하모델 해석에 더 적합함을 종합적으로 실험결과와 비교 검증하고자 한다.

## 2. 이론해석

Yang<sup>(1,2)</sup>은 일정진폭 반복하중하에서 n 피로사이클 후 잔류강도 R(n)의 저하는 식 (1)과 같고, 등가극한강도 R<sub>i</sub>(0)는 식 (2)와 같이 정의됨을 보고하였다.<sup>(13)</sup>

$$R(n) = R^c(0) - \beta^c K S^b n \quad (1)$$

여기서, b, c, K는 실험데이터에 의해 결정되는 상수이고, S는 응력범위, β는 2모수 Weibull 분포의 규모모수 이다.

등가극한강도 R<sub>i</sub>(0)는 i 번째 응력범위 S<sub>i</sub>에서 피로시험편수를 J라 두면, 식 (1)의 변환으로 부터 식 (2)를 얻을 수 있다.

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

여기서, R<sub>i</sub>(0)는 i번째 피로시험편이 피로를 전혀 받지 않았다면 정적극한강도를 의미한다.

본 연구에 사용된 구상흑연주철과 복합재료의 경우 정적극한강도 R(0)가 2모수 Weibull 분포를 따르고<sup>(2,8)</sup> 있으므로, 식 (3)과 같은 정적극한강도 분포 F<sub>R(0)</sub>(x)를 얻을 수 있다.

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

여기서, α는 형상모수, β는 규모모수(특성강도)이다. 또한, 피로파괴 사이클수 N은 파괴조건 {피로파괴 순간에 n=N, R(n)=σ<sub>max</sub>}을 식 (1)에 대입 후 정리하면 식 (4)와 같이 된다.

$$N = \frac{[R^c(0) - \sigma_{max}^c]}{\beta^c K S^b} \quad (4)$$

피로수명 N의 통계적 분포는 식 (4)의 변환과 식 (3)의 정적극한강도 R(0)의 통계적분포로 부터 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$F_N(n) = P[N \leq n] = P[R(0) \leq (\beta^c K S^b n + \sigma_{max}^c)^{\frac{1}{c}}] \\ F_N(n) = 0 \quad : n < 1 \\ = 1 - \exp[-(\frac{n + \sigma_{max}^c / \beta^c K S^b}{1 / K S^b})^{\frac{\alpha}{c}}] : n \geq 0 \quad (5)$$

n 피로사이클 후 잔류강도 R(n)의 통계적 분포는 식 (1)의 변환과 식 (3)에 주어진 정적극한강도분포로 부터 식 (6)을 얻을 수 있다. 그리고 잔류강도 R(n)이 최대 작용응력 σ<sub>max</sub> 보다 작을 확률, 즉 시험편이 n 사이클 이전에 파괴될 확률은 식 (6)으로 부터 식 (7)과 같이 된다.

$$F_{R(n)}(x) = P[R(n) \leq x] \\ = P[R^c(0) - \beta^c K S^b n \leq x^c] \\ = P[R(0) \leq (x^c + \beta^c K S^b n)^{\frac{1}{c}}] \\ = 1 - \exp[-(\frac{x^c + \beta^c K S^b n}{\beta^c})^{\frac{\alpha}{c}}] \quad (6)$$

$$F_{R(n)}(\sigma_{\max}) = P[R(n) \leq \sigma_{\max}] = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_{\max}^c + \beta^c K S^b n}{\beta^c}\right)^{\frac{a}{c}}\right] \quad (7)$$

잔류강도 저하모델을 근거로 한 피로수명과 잔류강도거동 예측은 식 (1)의 파라미터  $b, c, K$ 에 크게 의존하며, 최소화기법과 第1報에서 제안된 파라미터 결정법을 요약하면 식 (8), (9)와 같다.

최소화기법은 식 (8)과 같이 정적극한강도 및 등가극한강도 데이터에 대한 첫 번째 중앙모멘트들( $m, \mu$ )간의 평균에 제공급을 취한 차이(mean square difference)  $\Delta$ 를 최소화 함으로서 얻어질 수 있다.

$$\Delta = (m_1 - \mu_1)^2 + g_1(\sqrt{m_2} - \sqrt{\mu_2})^2 + g_2(\sqrt[3]{m_3} - \sqrt[3]{\mu_3})^2 \quad (8)$$

여기서,  $g_1$ 과  $g_2$ 는 평균, 분산, 왜도의 상대적 중요성에 따라 부여되는 가중치들이다.

제안된 방법은 응력범위  $S$ 의 수를  $n$ ,  $i$ 번째 응력범위  $S_i$ 에서 피로시험편수를  $m_i$ 라 하고, 최대 작용응력  $\sigma_{\max i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 각 응력수준에서 피로사이클 수  $N_{ij}$ , 파괴순서  $k_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, m$ )으로 명기하면, 아래 식 (9)와 같이 잔차  $\Delta$ 를 최소화 함으로서 산출할 수 있는 방법이다.

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \left[ \left\{ \frac{k_{ij} + 0.3}{m_i + 0.4} \right\} - \left( 1 - \exp\left[-\left(\frac{N_{ij} + \sigma_{\max i}^c / \beta^c K S_i^b}{1 / K S_i^b}\right)^{\frac{a}{c}}\right] \right) \right]^2 \quad (9)$$

### 3. 재료 및 실험방법

사용된 실험재료는 구상흑연주철(FCD 45)이며, 인장시험편은 ASTM E 8, 피로시험편은 ASTM E 606 표준시험편으로 제작하였고, 시험기는 MTS사의 250KN 용량의 유압식 만능 피로시험기를 이용하였다.

인장시험은 스트로크 제어로 하였고, 하중속도는 변형률증가 0.05mm/sec로 시험하였다. 그리고 피로시험의 경우 응력비  $R=-1$ , 정적극한 강도에 대한 최대 작용응력의 비  $q (= \sigma_{\max} / \sigma_w)$ 는 0.63

~0.83으로 5개의 응력수준에서 시험하였으며, 각 응력수준에서 7개의 시험편을 사용하였다. 주기는 저주기 1Hz, 고주기는 시험장비 및 재료의 특성을 고려하여 신뢰성이 있는 속도인 10Hz로 하였다.

### 4. 결과 및 고찰

잔류강도 저하모델 해석에 이용된 파라미터들은 구상흑연주철의 경우 최소화기법과 제안된 방법 모두 第1報에서 산출된 결과를 이용하였고, 복합재료의 경우 최소화기법은 Yang<sup>(2)</sup>의 결과를 이용하였으며 제안된 방법은 Table 4<sup>(2)</sup>의 일정진폭 피로데이터와 식 (9)를 이용하여 Delphi 5.0 소프트웨어로 프로그래밍하여 산출하였다. 그리고 복합재료의 잔류강도 분포에 대한 비교는 Table 3<sup>(2)</sup>의 잔류강도 데이터를 이용하였다.

Table 1은 복합재료에 대한 최소화기법과 제안된 파라미터 결정법에 따른 잔류강도 저하모델의 파라미터  $b, c, K$ 값을 나타내고 있는데, 제안된 방법의 경우  $b, K$ 값은 최소화기법과 유사하게 나타났으나  $c$ 값은 상당히 큰 값으로 나타났다.

$c$ 값이 커지면 식 (5)와 식 (7)의 형상모수  $a/c$  값을 감소시키게 되는데 이것은 Weibull 분포의 형상모수값이 작아지는 것을 의미하므로 피로수명분포가 낮은 기울기를 갖는 즉, 각 분포의 제안된 파라미터 결정법에 의한 예측결과가 최소화기법에 의한 예측결과 보다 큰 산포를 나타내게 됨을 의미한다.

Table 2는 파라미터 결정법에 따른 복합재료의 응력수준별 예측피로수명과 실험에 의한 평균값과의 비교결과를 제시하고 있는데, 두 방법에 의한 예측 모두 실험값과 훌륭한 일치성을 보이고 있었다. 또 실험데이터를 통해 파라미터가 결정되면 다양한 임의의 응력수준에서 피로수명예측이 가능하여야 하므로 임의의 작용 응력수준  $q=0.434$ 와  $0.506$ 에 대해 외삽하여 추정한 결과도 함께 제시하고 있는데, 실험값과 좋은 일치성을 보이고 있음을 알 수 있다.

Table 3은 복합재료의 피로수명분포, 잔류강도 분포에 관한 파라미터 결정법에 따른 예측분포와

실험분포와의 비교 결과를 제시하고 있는데, 각 예측분포에 대한 비교는 식 (10)으로 표시되는 잔차제곱합(residual sum of square, SSR)과 Fig. 4, 5로 비교하였다.

$$SSR = \sum_{i=1}^m (F_{m(i)} - F_{\mu(i)})^2 \quad (10)$$

여기서,  $F_{m(i)}$ 은 중앙순위(median rank)에 의한 실험데이터의 분포이고,  $F_{\mu(i)}$ 은 모델에 의해 예측된 분포이다.

Table 1~Table 3의 결과와 같이 피로수명분포는 제안된 방법에 의한 예측이 최소화기법에 의한 예측 보다 작용응력비  $q=0.606$ 을 제외한 모든 응력수준에서 낮은 잔차를 가지며 실험결과와 더 좋은 일치치를 보이고 있었고, 잔류강도분포의 경우에도 제안된 방법에 의한 예측이 실험결과와 더 낮은 잔차를 가지며 좋은 일치치를 보였다.

최소화기법은 정적극한강도와 식 (1)의 잔류강도 저하모델에 의해 환산한 등가극한강도가 일치할때의 파라미터를 결정하는 것으로 모델을 통한 피로수명 및 분포예측이 유효하기 위한 선행조건만을 충족시키는 방법이지만, 제안된 방법은 직접적으로 식 (5)의 피로수명 예측분포가 실험데이터에 의한 중앙순위 분포에 가장 근접할때의 파라미터를 결정하는 것으로 이러한 잔류강도 저하모델을 통한 피로수명 및 분포예측이 유효하기 위한 필연적인 사항을 만족시키는 결정방법이기 때문에 실험값과 좋은 일치치를 보인 것으로 판단된다.

Fig. 1은 第1報의 파라미터값( $b, c, K$ )들과 식 (1)을 이용하여 구상후연주철에 대한 최소화기법과 제안된 방법으로 예측한 잔류강도 저하거동을 보여주고 있는데, 작용응력비  $q=0.83$ 을 제외한 모든 응력수준에서 제안된 방법에 의한 예측이 실험결과와 더 좋은 일치치를 보이고 있었으며,  $q=0.72, 0.79$ 의 경우 최소화기법에 의한 예측은 실험값과 상당한 차이를 보이고 있었다.

따라서, 인장-압축 피로하중하의 구상후연주철의 경우 잔류강도 저하모델에 의한 잔류강도 저하거동 예측은 매우 타당하며, 파라미터 결정은

제안된 방법을 이용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

Fig. 2는 최소화기법과 제안된 방법을 이용하여 식 (2)로 환산한 등가극한강도의 분포를 제시하고 있는데 두 방법 모두 양호한 일치치를 보이며 2모수 Weibull 분포를 잘 따르고 있음을 알 수 있다. 이는 인장-압축 피로하중하의 복합재료의 경우에 잔류강도 저하모델이 유효하기 위한 선행조건이 만족함을 의미하는 것이다.

Fig. 3은 최소화기법과 제안된 방법으로 결정한 파라미터를 이용하여 식 (4)의 피로수명 예측식에 적용하여 얻은 피로수명 예측결과를 제시하고 있는데, 두 방법에 의한 예측 모두 실험값과 훌륭한 일치치를 보이고 있음을 알 수 있다. 그리고 임의의 작용응력비  $q=0.434, 0.506$ 에 대하여 외삽하여 추정한 결과도 실험값과 좋은 일치치를 보이고 있었다. 전체적으로 비교해 볼때 제안된 방법이 최소화 기법 보다 실험에 의한 평균값과 더 좋은 일치치를 보이고 있었고, 최소화기법에 의한 예측피로수명은 제안된 방법에 비하여 피로수명을 과소평가하고 있었다.

Fig. 4는 각 응력수준에서 최소화기법과 제안된 방법으로 예측한 피로수명분포와 실험데이터에 의한 중앙순위를 사용하여 파손확률로 환산한 값과의 관계를 제시하고 있는데,  $q=0.606$ 을 제외한 모든 응력수준에서 제안된 방법에 의한 예측이 낮은 잔차를 가지며 실험결과와 더 좋은 일치치를 보이고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 최소화기법과 제안된 방법으로 예측한 복합재료의 잔류강도분포와 실험데이터에 의한 중앙순위 분포함수와의 관계를 제시하고 있는데, 모든 응력수준에서 제안된 방법에 의한 예측이 낮은 잔차를 가지며 실험결과와 조금 더 좋은 일치치를 보이고 있는 것으로 나타났다.

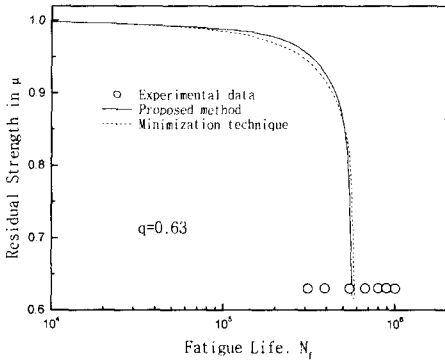
Fig. 6은 최소화기법과 제안된 방법으로 예측한 복합재료의 잔류강도 저하거동을 보여주고 있는데, 그럼에 제시된 실험결과는 각 응력수준에서 큰 산포를 갖는 20개의 시험데이터중 효율적인 비교를 위하여 10개의 중앙값만 이용하여 표기하였다. 비교결과 저응력수준인 Fig. 6(a), (b)에서는 제안된 방법이 실험값과 더 좋은 일치치를 보이고 있었으나, 고응력수준인 Fig. 6(c), (d)에서는 최소

화기법에 의한 예측이 더 좋은 일치를 보이는 것으로 나타나 전반적으로 뚜렷한 차이 없이 두 방법 모두 유사하게 나타났다.

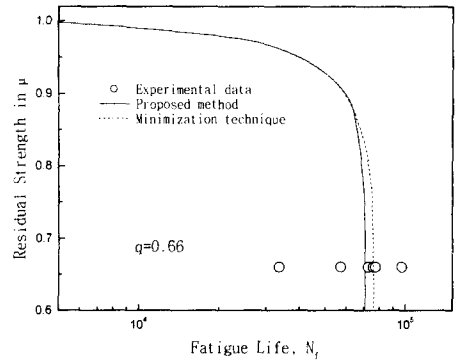
이상의 결과를 종합적으로 고려해볼 때 인장-압축 피로하중하의 구상흑연주철과 복합재료의 경우 피로 잔류강도 저하해석에 의한 피로수명예측, 피로수명분포 예측, 잔류강도예측, 잔류강도

**Table 1** Parameters of the residual strength degradation model in graphite/epoxy laminate<sup>(2)</sup>

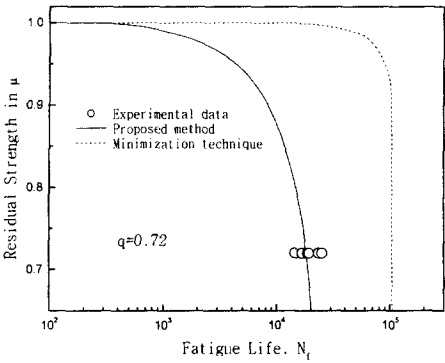
Parameters	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>K</i>
Method			
M.T. <sup>(2)</sup>	12.267	12.0	$5.560 \times 10^{-27}$
P.M.	12.890	19.7	$3.899 \times 10^{-28}$



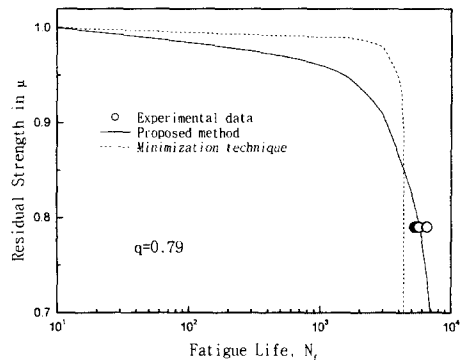
(a)



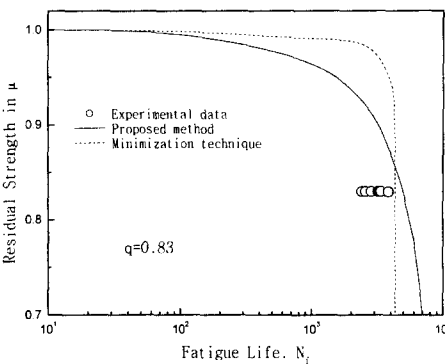
(b)



(c)



(d)



(e)

**Fig. 1** Comparisons between the experimental results and the prediction of residual strength degradation by the parameter determination method in FCD 45

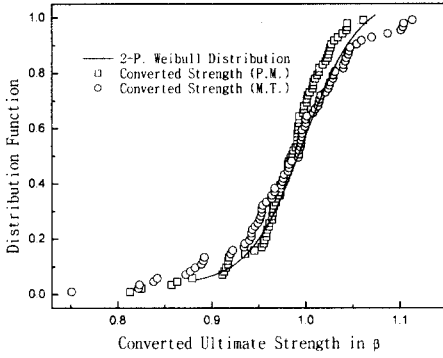


Fig. 2 Distribution function of converted ultimate strength in graphite/epoxy laminate(2)

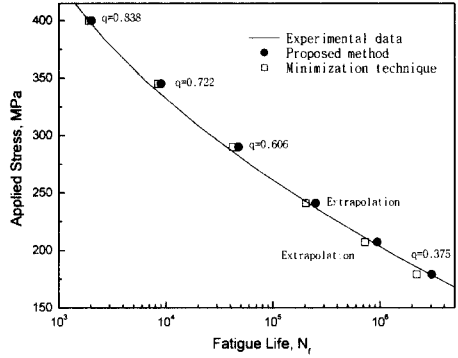
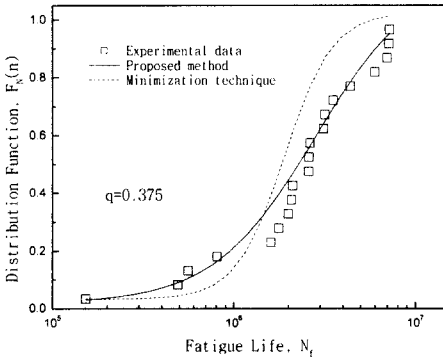
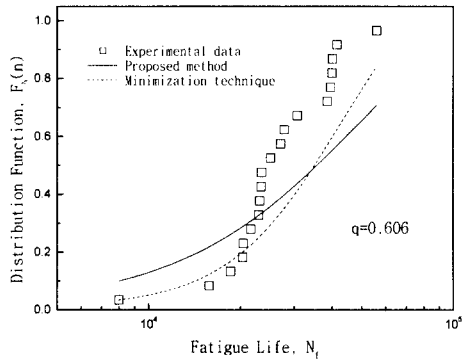


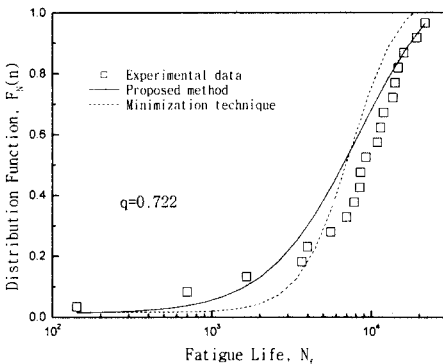
Fig. 3 Comparisons between the experimental results and the prediction of fatigue life according to the parameter determination method in graphite/epoxy laminate<sup>(2)</sup>



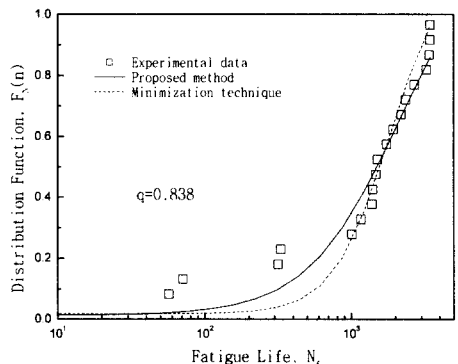
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4 Comparisons between the experimental results and the prediction of fatigue life distribution by the parameter determination method in graphite/epoxy laminate<sup>(2)</sup>

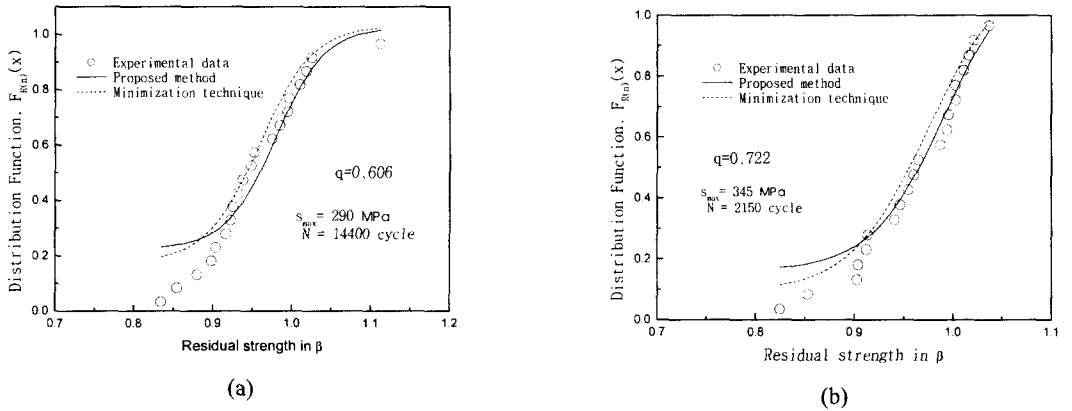


Fig. 5 Comparisons between the experimental results and the prediction of residual strength distribution by the parameter determination method in graphite/epoxy laminate<sup>(2)</sup>

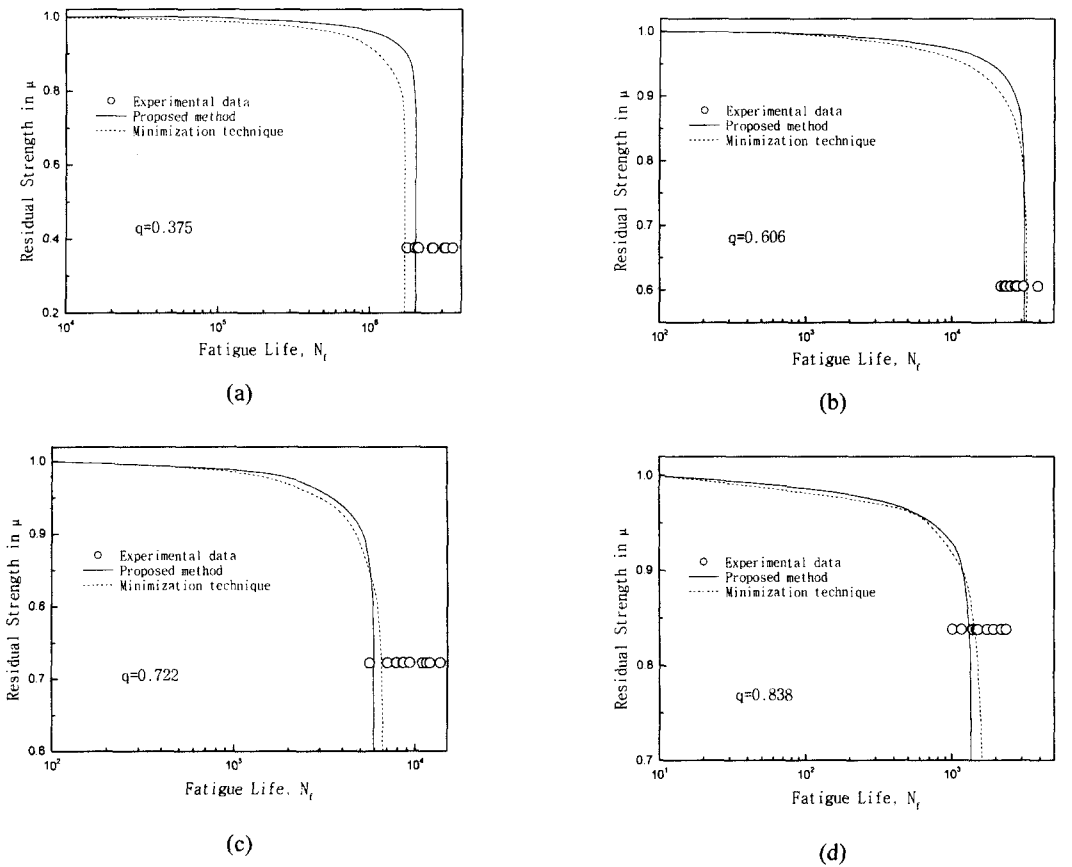


Fig. 6 Comparisons between the experimental results and the prediction of residual strength degradation by the parameter determination method in graphite/epoxy laminate<sup>(2)</sup>

**Table 2** Comparisons between the experimental results and the prediction of fatigue life by the parameter determination methods in graphite/epoxy laminate<sup>(2)</sup>

Method q	Experimental results(mean)	M.T.	P.M.
0.375	3042038	2200511	<u>3057478</u>
0.606	28211	<u>41890</u>	47692
0.722	9540	8467	<u>9009</u>
0.838	1658	<u>1917</u>	2022
0.434*	-	720875	<u>946451</u>
0.506*	-	203267	<u>250303</u>

\* : extrapolation

**Table 3** Comparisons of SSR between the minimization technique and proposed method in graphite/epoxy laminate<sup>(2)</sup>

Distribution / q	Method	M.T.	P.M.
	Fatigue life distribution	0.375	0.627
	0.606	<u>0.636</u>	0.698
	0.722	0.446	<u>0.230</u>
	0.838	0.108	<u>0.074</u>
Residual strength distribution	0.606	0.125	<u>0.123</u>
	0.722	0.103	<u>0.064</u>

분포 예측은 타당하며, 구상흑연주철의 경우 최소화기법에 의한 파라미터 결정은 일부 응력수준에서 실험값과 상당한 차이를 보이고 있으므로 최소화기법을 이용하는 데는 문제가 있는 것으로 생각된다.

복합재료의 경우에는 피로수명예측, 피로수명분포 예측, 잔류강도예측, 잔류강도분포 예측에 있어서 두 파라미터 결정법 모두 실험값과 좋은 일치를 보이고 있으므로 최소화기법을 이용하여도 문제는 없을 것으로 판단되지만, 보다 정확한 피로특성 해석을 위해서는 제안된 방법에 의한 예측결과가 실험값과 낮은 잔차를 보이고 있으므로 제안된 방법을 이용하는 것이 더 바람직 할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

구상흑연주철과 복합재료에 대한 잔류강도 저하모델의 파라미터 결정방법에 따른 피로수명예측, 피로수명분포 예측, 잔류강도예측, 잔류강도분포 예측에 관한 통계적 해석 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

인장-압축 피로하중하의 구상흑연주철과 복합재료의 경우 피로 잔류강도 저하해석에 의한 피로수명예측, 피로수명분포 예측, 잔류강도예측, 잔류강도분포 예측은 타당성이 있는 것으로 확인되었다.

구상흑연주철의 경우 제안된 파라미터 결정법에 의한 잔류강도저하 예측은 실험값과 매우 좋은 일치를 보이고 있었으나, 최소화기법에 의한 예측은 일부 응력수준에서 실험값과 상당한 차이를 보이고 있으므로 최소화기법에 의한 잔류강도저하모델 적용은 문제가 있는 것으로 확인되었다.

복합재료의 경우 피로수명예측, 피로수명분포 예측, 잔류강도예측, 잔류강도분포 예측에 있어서 두 파라미터 결정법 모두 예측결과가 실험값과 좋은 일치를 보이고 있으므로 두 방법 모두 파라미터 결정에 이용되어 질 수 있는 것으로 확인되었지만, 제안된 방법에 의한 예측이 실험값과 다소 더 좋은 일치를 보였다.

따라서, 第1報의 결과와 더불어 종합적으로 고려해 볼때 잔류강도 저하모델을 이용한 보다 정확한 피로특성 예측을 위해서는 예측결과가 실험값과 더 낮은 잔차를 갖는 제안된 방법으로 파라미터를 결정하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다.

## 후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- (1) Yang, J. N., Liu, M. D., 1977, "Residual



- Strength Degradation Model and Theory of Periodic Proof Tests for Graphite/Epoxy Laminate," *J. of 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. of 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, 제18권, 제8호, pp. 2053~2061.
- (7) 심봉식, 성낙원, 웅장우, 1991, "탄소섬유/에폭시 복합재료의 잔류강도 저하해석에 의한 피로수명 평가," 대한기계학회논문집, 제15권, 제6호, pp. 1908~1918.
- (8) 장성수, 김상태, 2000, "구상흑연주철의 피로수명분포에 대한 통계적 해석," 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제9호, pp. 2353~2360.
- (9) Nishijima, S., 1981 "Statistical Analysis to Fatigue Test Data," *JSME S 002*, pp. 132~137.
- (10) S. Nishijima, 1981, "Statistical Fatigue Properties of Some Heat Treated Steels for Machine Structural Use," *ASTM STP 744*, pp. 75~88.
- (11) Toshiyuki Shimokawa and Yasumasa Hamaguchi, 1983, "Distribution of Fatigue Life and Fatigue Strength in Notched Specimens of a Carbon Eight-Harness-Satin Laminate," *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 64~76.
- (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) 김상태, 장성수, 2001, "피로수명예측을 위한 잔류강도 저하모델의 파라미터 결정법 제안 (I)," 대한기계학회논문집 A권, 제25권, 제5호, pp. 874~882.