

<논 문>

Markov Chain Model을 이용한 CFRP 복합재료의 피로손상누적거동에 대한 확률적 해석

김도식* · 김정규** · 김인배***

(1995년 9월 1일 접수)

The Probabilistic Analysis of Fatigue Damage Accumulation Behavior Using Markov Chain Model in CFRP Composites

Do-Sik Kim, In-Bai Kim and Jung-Kyu Kim

Key Words : CFRP Composites(탄소섬유강화 복합재료), Stochastic Markov Chain Model(확률적 마르코프 연쇄모델), 2-Level Block Loading(2단 블럭하중), Secant Modulus(시컨트계수), Fatigue Cumulative Damage(피로누적손상), Fatigue Life(피로수명)

Abstract

The characteristics of fatigue cumulative damage and fatigue life of 8-harness satin woven CFRP composites with a circular hole under constant amplitude and 2-level block loading are estimated by Stochastic Markov chain model. It is found in this study that the fatigue damage accumulation behavior is very random and the fatigue damage is accumulated as two regions under constant amplitude fatigue loading. In constant amplitude fatigue loading, the predicted mean number of cycles to a specified damage state by Markov chain model shows a good agreement with the test result. The predicted distribution of the fatigue cumulative damage by Markov chain model is similar to the test result. The fatigue life predictions under 2-level block loading by Markov chain model revised are good fitted to the test result more than by 2-parameter Weibull distribution function using percent failure rule.

1. 서 론

응력진폭 및 평균응력이 변화하는 변동하중하의 기계 구조물의 피로수명예측은 이 하중의 기본형태인 블럭하중하의 피로수명을 기초로 결정론적 모델에 의하여 수행되어져왔다. 그러나 복합재료의 피로손상과정과 수명은 큰 변동성을 나타내므로, 이의 피로특성을 평가하기 위해서는 변동성을 고려한 확률적 개념의 도입이 필요하다.

블럭하중을 받는 복합재료의 피로손상누적거동의 예측에는 여러가지 확률적 모델들이 사용되어져 왔다. 이들 중 Johnson 등⁽¹⁾은 2단 블럭하중하의 피로수명을 평가하기 위하여 Monte Carlo방법을 이용하여 Miner법칙을 수정하고, 이의 분포는 log normal분포를 따른다고 보고하였다. 또한 Hwang 등⁽²⁾은 normal, log normal 및 2-parameter Weibull 분포에 퍼센트 파손법칙(percent failure rule) 그리고 Miner법칙에 강도-수명 동등순위가정(strength-life equal rank assumption) 및 2-parameter Weibull 분포를 도입하여 2단 블럭하중 실험에 대한 피로손상거동을 해석하였다. 그러나

*한양대학교 산업과학기술연구소

**회원, 한양대학교 기계설계학과

***회원, 현대정공(주) 마부리연구소

이 모델들은 피로손상누적과정에 대한 변동성의 묘사가 어렵고, 2번째 하중이 작용한 후의 피로수명이 커질수록 정확성이 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

한편 Bogdanoff^(3,8) 등은 이와 같은 기존 모델들의 단점을 극복하기 위하여 Markov chain(이하 M. C.라 함)이론을 도입하고 금속재료의 피로균열 진전거동에 대한 통계적 평가를 수행하였다. 또한 그 후 Bogdanoff 등⁽⁹⁻¹¹⁾ 및 Tanaka 등⁽¹²⁾은 블럭 하중 또는 스펙트럼하중하의 피로균열진전의 변동성을 확률적으로 묘사한 M. C. 모델을 제안하였으며, 이 모델은 금속재료의 피로손상누적과정에 대한 전반적인 정보를 제공할 수 있을 뿐만 아니라 기존의 연속분포를 도입한 피로누적손상 모델들에 비하여 적용이 간단하다는 잇점을 가짐을 보고하였다. 또한 저자들⁽¹³⁾은 원공을 가진 CFRP 복합재료에 대하여 M. C. 모델을 도입하여 일정진폭 하중하에서의 피로손상누적 과정과 수명의 변동성을 검토한 결과, 이 재료의 피로특성은 M. C. 이론의 기본가정에 잘 부합됨을 확인하였다. 이상의 결과로부터 M. C. 모델은 피로누적손상 및 피로수명을 평가하기 위한 확률론적 모델로서 유용하다고 할 수 있다. 그러나 블럭하중하에서는 M. C. 모델의 확률치이행렬의 구성에 필요한 state수(state number)가 각 응력레벨마다 다를 뿐만 아니라 특히 복합재료에서는 파손양상의 다양성으로 인하여 피로손상누적 과정의 변동성이 현저히 다를 것으로 예상되므로 이에 대한 M. C. 모델의 적용성은 불명확하다.

본 연구에서는 원공을 가진 8-harness satin woven CFRP 복합재료에 대하여 변동하중의 기본형태인 2단 블럭하중하의 피로특성을 확률적으로 평가하기 위한 M. C. 모델을 구축하였다. 또한 이 M. C. 모델의 적용성을 검토하고자 실험결과 및 기존의 확률적 피로누적손상 모델의 예측결과와 비교 검토하였다.

2. 이론 해석

Bogdanoff⁽³⁻⁵⁾ 등은 금속재료의 피로하중하의 손상누적과정 및 피로수명을 예측하기 위하여 불연속 상태-불연속시간(discrete state-discrete time) M. C. 이론을 도입하였다. 그는 Fig. 1과 같이 임의의 하중반복수 후의 피로손상이 현 상태 j 에서 바로 이웃한 상태 ($j+1$)로 진전하거나 또는 그대로 머물 수 있다고 가정하고, 손상이 현 상태에서 다음 상태로 증가할 수 있는 최소한의 하중반복수를 Duty cycle(이하 D. C.라 함)로 정의하였다. Fig. 1에서 s_j 는 D. C.가 가해지는 동안 손상이 j 상태에 정체되어 있을 확률(기하분포의 실패확률)이고, t_j 는 D. C.가 가해지는 동안 손상이 $j+1$ 상태로 증가될 확률(기하분포의 성공확률)이며, 이들은 아래의 관계를 가진다.

$$s_j + t_j = 1, \quad 0 < t_j < 1 \quad (j=1, 2, 3, \dots, b) \quad (1)$$

또한 피로손상의 누적은 초기 손상상태 $j=1$ 로부터 파손시 $j=b$ 까지 한 단계씩 차례로 진행된다고 가정한다.

일정진폭 피로하중하에서 임의의 하중반복수 x 후의 재료의 손상상태에 대한 확률분포 p_x 는 아래의 식으로 산출된다.

$$p_x = p_0 P^x \quad (x=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

여기서, p_0 는 재료의 초기 손상상태에 대한 확률분포이며, P 는 확률치이행렬로서 식 (3)과 같다.

$$p_0 = \{p_0(1), p_0(2), p_0(3), \dots, p_0(b)\},$$

$$\sum_{j=1}^b p_0(j) = 1$$

$$P = \begin{bmatrix} s_1 & t_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & t_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & t_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & s_{b-1} & t_{b-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

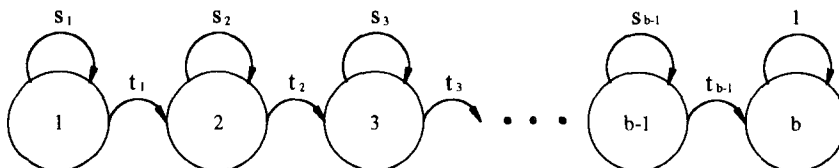


Fig. 1 Illustration of the principle in the Markov chain model

한편 재료가 한계손상상태 ($D^*=1$)에 이르기까지의 하중반복수, 즉 피로수명 N_b 의 평균값 $E[N_b]$ 와 분산값 $Var[N_b]$ 는 기하분포의 정의로부터 다음과 같이 나타내어진다.

$$E[N_b] = E\left[\sum_{j=1}^{b-1} \delta N_j\right] = \sum_{j=1}^{b-1} E[\delta N_j]$$

$$= \sum_{j=1}^{b-1} \frac{1}{t_j} = (b-1) \frac{1}{t_j} \quad (4)$$

$$Var[N_b] = \sum_{j=1}^{b-1} Var[\delta N_j] = \sum_{j=1}^{b-1} \frac{1-t_j}{t_j^2}$$

$$= (b-1) \frac{S_j}{t_j^2} \quad (5)$$

$$\frac{Var[N_b]}{E[N_b]} = \frac{S_j}{t_j} = r \quad (6)$$

$$N_b = \sum_{j=1}^{b-1} \delta N_j \quad (7)$$

여기서, δN_j 는 임의의 손상상태에 도달할 때까지의 D. C.수, N_b 는 피로파손시의 D. C.수이며, b 는 파손 state수이다.

또한 하중반복수 n_1 에서 작용하중의 변동이 일어날 때, 임의의 하중반복수 x 후의 손상상태에 대한 확률분포 p_x 는 각각 1단 및 2단의 일정진폭하중하의 피로수명의 평균과 분산으로부터 결정된 기하분포의 확률값들로 구성된 확률천이행렬 P_1 및 P_2 와 초기 손상상태에 대한 확률분포 p_0 의 곱셈의 형태로서 다음과 같이 표현된다.

$$p_x = p_0 P_1^x \quad (0 \leq x < n_1) \quad (8)$$

$$p_x = p_0 P_1^{n_1} P_2^{x-n_1} \quad (x > n_1) \quad (9)$$

즉, 하중반복수 x 가 n_1 보다 작을때, 하중반복수 x 후의 손상상태는 1단의 일정진폭하중을 받는 상태와 동일하기 때문에 1단 하중에서 구한 확률천이행렬 P_1 을 이용한 식 (8)을 사용하여 구한다. 또한 n_1 보다 큰 하중반복수에서는 2단의 하중이 가해지는 상태이므로, 임의의 하중반복수 x 후의 재료의

손상상태는 1단 하중하에서 하중반복수 n_1 동안 누적된 피로손상을 초기 손상상태로 하고 2단 하중하에서 구한 확률천이행렬 P_2 을 적용한 식 (9)로부터 구할 수 있다.

3. 실험방법

사용된 재료는 8-harness satin woven CFRP 복합재료 ($\nu_f=60\%$, $B=2.2$ mm)이며, 이의 기계적 특성은 Table 1과 같다. 시험편은 섬유배열방향이 하중방향에 대하여 $0^\circ/90^\circ$ 가 되도록 폭 $W=20$ mm, 길이 $L=150$ mm의 크기로 가공하였고, Fig. 2와 같이 시험편 중앙에 엔드밀(endmill)을 이용하여 직경 $2R=4$ mm의 원공을 가공하였다.

일정진폭 피로실험은 시험편의 평균 정적극한강도 $(\sigma_{ult.})_{ave}$ 에 대한 최대 반복응력 σ_{max} 의 비, 즉 작용응력비 $q(=\sigma_{max}/(\sigma_{ult.})_{ave})=0.87$ 및 0.91 에서 10 Hz의 정현파로 행하였으며, 이때 응력비($=\sigma_{min}/\sigma_{max}$)는 0을 유지하였다.

한편 2단 블럭하중 피로실험은 Fig. 3(a), (b)에 나타낸 바와 같이 저(low) → 고(high) 하중에서 작용응력비 $q=0.87 \rightarrow 0.91$ 그리고 고 → 저에서는 $q=0.91 \rightarrow 0.87$ 의 2종류로 수행하였다. 이때 잔류피로수명 n_2 는 1단의 피로수명 N_{f1} 의 약 30%까지 작용응력비 q_1 으로 하중반복수 n_1 동안 일정진폭 피로하중을 가한 후, 2단에서 작용응력비 q_2 로 파손 시까지 피로하중을 가하여 측정하였다.

일정진폭 및 블럭하중 피로시험 동안의 시컨트 계수(secant modulus)의 변화는 시험편에 변위신장계(extensometer)를 일정 게이지길이($=50$ mm)로 부착하여 측정하였고, 이 값을 1000 사이클마다 GPIB Board를 통하여 컴퓨터에 저장하였다.

Table 1 Material properties of 8-harness satin woven CFRP

E_{xx}	E_{yy}	ν_{xy}	G_{xy}
62.86	62.86	0.07	5.38

E_{xx} : Longitudinal Young's modulus(GPa)

E_{yy} : Transverse Young's modulus(GPa)

ν_{xy} : Poisson's ratio

G_{xy} : In-plane shear modulus(GPa)

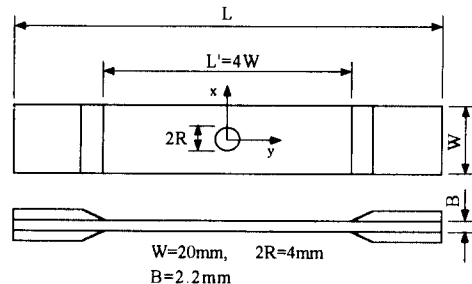


Fig. 2 Configuration of test specimen

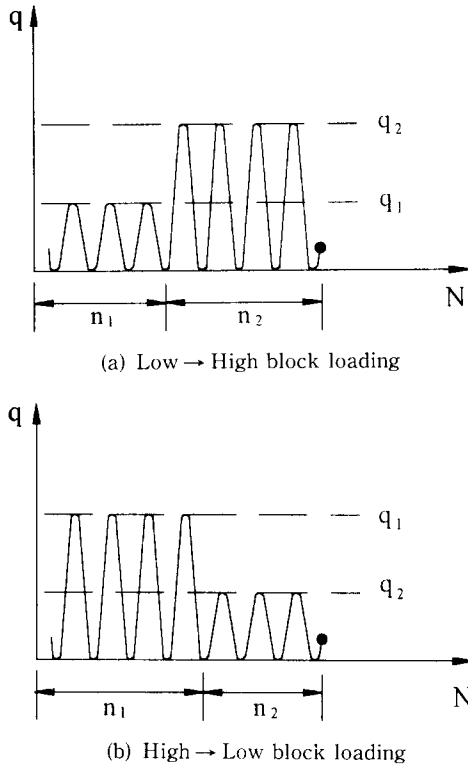


Fig. 3 Schematic diagram of 2-level block loading

4. 실험결과 및 고찰

4.1 일정진폭 하중하의 피로손상누적거동

사용된 재료의 정적극한강도 $\sigma_{ult.}$ 는 Table 2에 정리한 바와 같으며, 평균 정적극한강도 ($\sigma_{ult.})_{ave.}$ 는 560.6 MPa이었다.

Fig. 4(a), (b)는 작용응력비 $q=0.87$ 과 $q=0.91$ 에

Table 2 Static tensile test results

Specimen no.	$\sigma_{ult.}$	Specimen no.	$\sigma_{ult.}$
PMS-1	582.6	PMS-6	531.9
PMS-2	543.1	PMS-7	560.8
PMS-3	553.6	PMS-8	563.8
PMS-4	565.2	PMS-9	560.8
PMS-5	577.9	PMS-10	566.1

($\sigma_{ult.})_{ave.} = 560.6$

$\sigma_{ult.}$: Static ultimate strength(MPa)

서의 누적손상량 D^* 와 하중반복수 n 의 관계로서, $q=0.87$ 의 결과는 전보⁽¹³⁾의 것이다. 이 그림에서 D^* 는 전보⁽¹³⁾에서와 같이 평가하였으며 이의 정의는 식 (10)과 같다.

$$D^* = \frac{E_o - E_{sn}}{E_o - E_{sf}} \quad (10)$$

여기서, E_o 는 첫번째 사이클에서의 탄성계수, E_{sf} 는 파손시의 시컨트계수 그리고 E_{sn} 은 하중반복수 n 후의 시컨트계수이다. 또한 누적손상량 D^* 는 재료의 초기상태($E_{sn} = E_o$)에서 $D^* = 0$ 그리고 파손시($E_{sn} = E_{sf}$)에 $D^* = 1$ 의 값을 가진다.

각 시험편에 대한 피로손상누적거동은 하중반복수의 증가에 따라 매우 불규칙하고 서로 엉켜있는 양상을 보이고 있다. 따라서 피로손상누적거동의

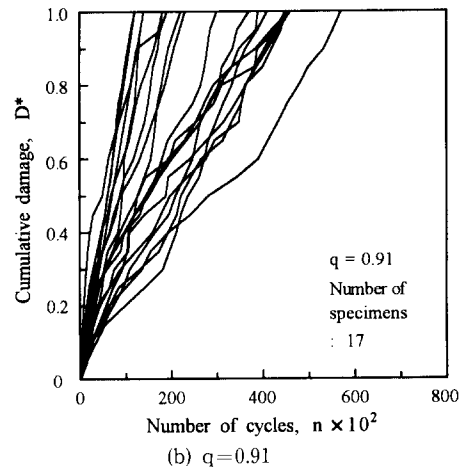
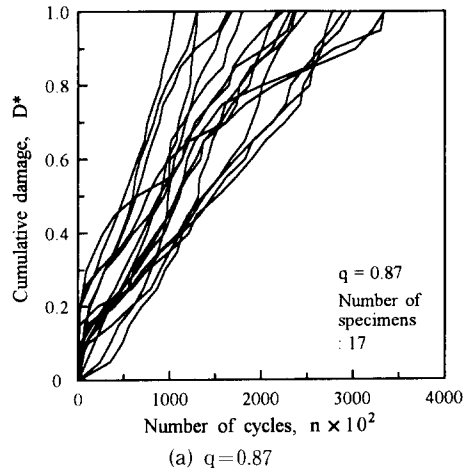


Fig. 4 Variation of cumulative damage with number of cycles under constant amplitude loading

평가를 위해서는 손상누적과정의 변동성을 포함하는 확률적 개념의 도입이 필요하다. Fig. 5는 하중반복수의 증가에 따른 누적손상량, 즉 손상누적속도 $dD^*/dn=(D^*_{i+1}-D^*_i)/(n_{i+1}-n_i)$ 의 변화를 나타낸 예이다. 전보⁽¹³⁾의 결과와 함께 검토하면 손상누적속도는 작용응력비 q 에 관계없이 피로수명의 약 20%까지 급격한 감소를 나타내지만 q 가 증가함에 따라 그 후 완만한 증가의 양상을 나타내는 2단계로 변화되고 있다. 피로수명의 초기단계에서의 손상거동은 원공주위의 응력집중으로 인하여 손상이 급속히 누적되고, 그 후 원공선단에서 발생된 피로손상이 그 주위의 응력집중을 완화시키기 때문⁽¹⁴⁾인 것으로 생각된다.

이상과 같은 피로손상누적거동을 M. C. 모델로써 평가하기 위해서는 M. C. 모델, 식 (2)의 파라미터들을 먼저 결정해야 한다. Table 3은 일정진

폭하중하에서 얻어진 피로수명의 평균과 분산 및 식 (1)~(7)로부터 구한 M. C. 모델의 천이확률값과 state수를 나타낸 것이다. 이 표에서 state 수를 2개의 영역으로 나눈 것은 Fig. 5에서 알 수 있듯이 피로손상이 2단계의 과정을 통하여 누적되고 있기 때문이다. Fig. 6은 $q=0.91$ 의 하중조건에서 임의의 손상상태에 이르는 하중반복수 n 의 평균값을 예측한 결과로서, 전보⁽¹³⁾의 $q=0.84$ 및 0.87 에 대한 결과와 마찬가지로 이 값들은 실험결과와 잘 일치하고 있다. 따라서 본 연구에서 M. C. 모델은 2단계의 피로손상누적거동으로부터 얻어진 천이확률값 및 state 수에 의하여 구성되어야 함을 알 수 있다.

4.2 2단 블럭하중하의 피로손상누적거동

Fig. 7(a), (b)는 2단 블럭하중하에서 하중반복수

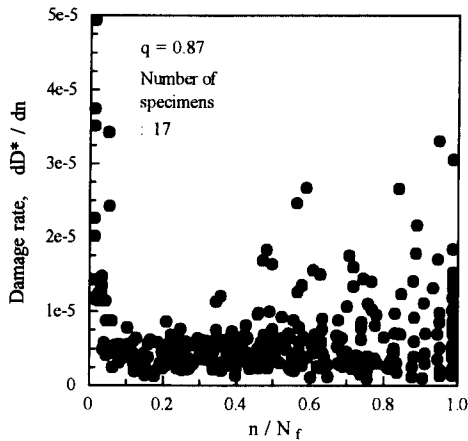


Fig. 5 Change of the rate of damage with number of cycles under constant amplitude loading

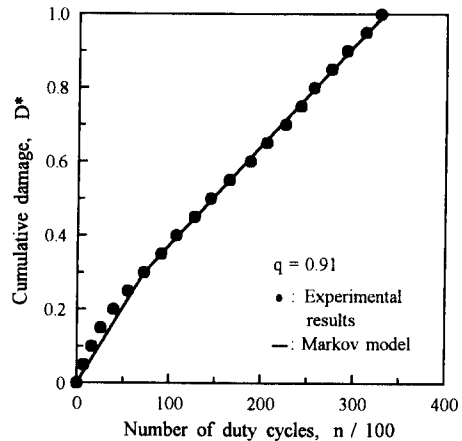


Fig. 6 Correlation between the test result and the prediction of mean number of cycles($q=0.91$)

Table 3 Transition probability and state number under constant amplitude loading

q	0.87		0.91	
Region	I	II	I	II
State number	5	7	4	4
Mean ($\times 10^2$)	529.6	2232.8	72.2	328.2
Variance ($\times 10^4$)	71551.6	492171.7	1971.5	19777.9
Probability of failure(s)	0.9925	0.9959	0.9584	0.9844
Probability of success(t)	0.0075	0.0041	0.0416	0.0156

q : Stress ratio(= $\sigma_{max}/(\sigma_{ult.})_{ave.}$)

n 의 증가에 따른 누적손상량 D^* 의 변화양상을 나타낸 것이다. 이 그림에서 누적손상량 D^* 는 식 (10)에 의하여 산출되었으며, 저 \rightarrow 고($q=0.87 \rightarrow 0.91$) 하중의 경우 누적손상량은 2단의 고하중이 가해짐에 따라 급격히 증가한다. 그러나 고 \rightarrow 저($q=0.91 \rightarrow 0.87$) 하중하에서는 저 \rightarrow 고하중과는 달리 저하중 영역($n/N_f > 0.3$)의 손상거동은 고하중($n/N_f \leq 0.3$)에서의 거동을 그대로 따르고 있다. 이는 2단의 저하중 영역에서도 1단의 고하중이 작용될 때 누적된 손상의 영향이 존재하기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 하중순서에 따른 피로손상누적거동의 차이를 명확히 하기 위하여 하중반복수의 증가에 따른 누적손상량, 즉 손상누적속도 dD^*/dn 의 변화를 검토하여 보았으며, Fig. 8(a), (b)는 그 결

과이다. 저 \rightarrow 고($q=0.87 \rightarrow 0.91$) 하중의 경우 손상누적속도는 저하중이 작용되는 영역($n/N_f \leq 0.3$)에서 급격한 감소를 보이지만 고하중이 작용되면($n/N_f > 0.3$) 피로손상의 누적이 빠르게 증가한다. 반면에 하중상호간섭(load interaction)을 나타내는 고 \rightarrow 저($q=0.91 \rightarrow 0.87$) 하중에서는 2단의 저하중이 작용($n/N_f > 0.3$)하였음에도 불구하고 1단의 고하중으로 인한 손상의 영향이 저하중에도 미치기 때문에 피로수명의 전과정에서 거의 일정한 손상누적속도를 나타낸다.

4.3 Markov chain(M. C.) model의 적용성 검토

M. C. 모델을 사용한 2단 블럭하중하의 피로손상누적거동 및 피로수명에 대한 해석은 일정진폭

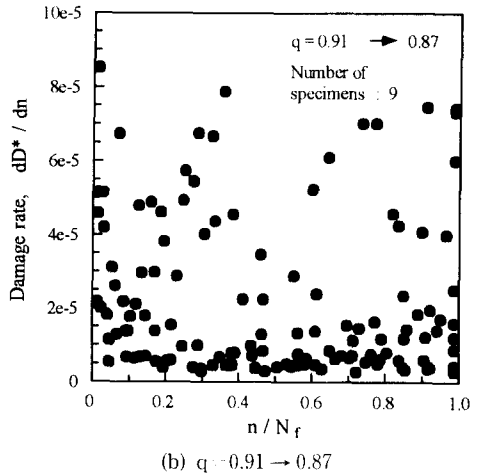
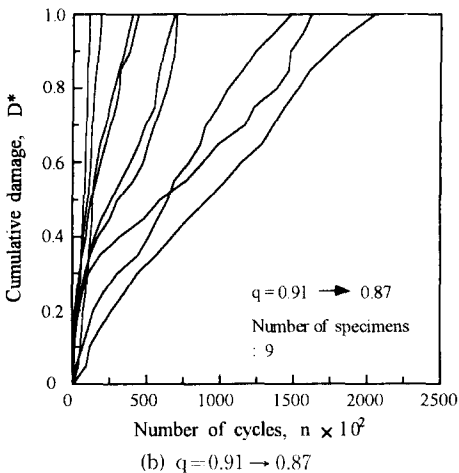
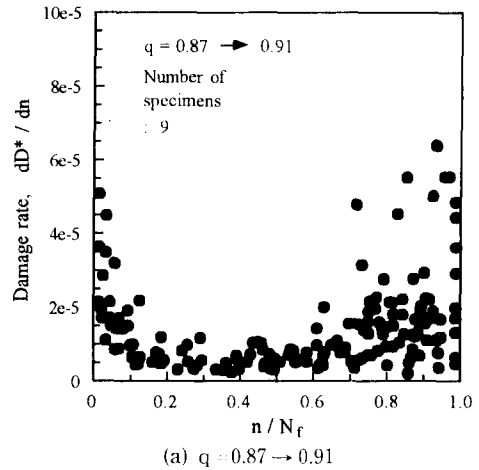
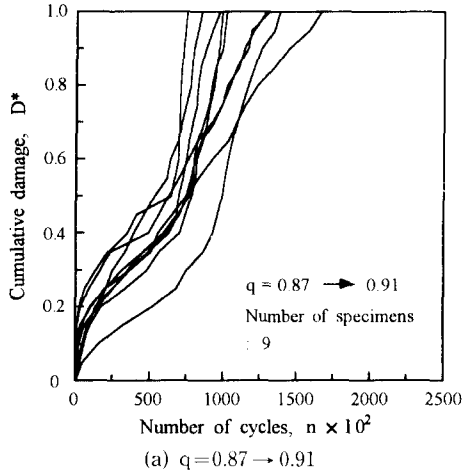


Fig. 7 Variation of cumulative damage with number of cycles under 2-level block loading

Fig. 8 Change of the rate of damage with number of cycles under 2-level block loading

피로실험에서 얻어진 확률치이행렬 P 를 이용한 식 (8) 및 (9)로 행하여진다. 그러나 Table 3과 같이 각 작용응력비에 대한 확률치이행렬의 크기가 다르므로, M. C. 모델을 적용하여 블럭하중하의 피로손상누적과정을 예측할 수 없다. 따라서 식 (1)과 식 (11)~(15)의 관계로부터 행렬의 크기와 천이확률값을 수정하는 과정이 필요하다. 즉 1단의 작용응력비 q_1 에서 행렬의 크기가 b_1 , 2단의 작용응력비 q_2 에서 b_2 이고 이들 행렬의 크기가 $b_1 > b_2$ 라면, 행렬의 크기가 큰 q_1 의 경우에는 일정진폭하중에서 구한 s_1 과 t_1 으로 확률치이행렬 P_1 을 구성한다. 그러나 q_2 의 경우에는 행렬의 크기가 q_1 의 것보다 작기 때문에 그 크기를 일치시키기 위하여 과손시의 state수 $b_{2(2)}$ 를 b_1 에 맞추고 state $b_{2(1)}$ 은 $1 \sim (b_1 - 1)$ 까지의 수에서 임의로 가정한다. 따라서 q_2 일 때는 q_1 과 같이 초기상태부터 과손시까지 동일확률을 갖지 않고, state $b_{2(1)}$ 까지는 $s_{2(1)}$ 과 $t_{2(1)}$ 의 확률, state $b_{2(2)}$ 까지는 $s_{2(2)}$ 와 $t_{2(2)}$ 의 확률값을 가지는 확률치이행렬을 이용하여 M. C. 모델을 구성한다. 이상과 같은 행렬크기의 조절을 위해서는 아래와 같이 각 state에서 하중반복수의 평균과 분산값을 이용한다. ⁽¹⁰⁾

$$E[N_{b_{2(1)}}] = \{b_{2(1)} - 1\} \{r_{2(1)} + 1\} \quad (11)$$

$$Var[N_{b_{2(1)}}] = \{b_{2(1)} - 1\} \{r_{2(1)} + 1\} r_{2(1)} \quad (12)$$

$$E[N_{b_{2(2)}}] = \{b_{2(2)} - b_{2(1)}\} \{r_{2(2)} + 1\} + E[N_{b_{2(1)}}] \quad (13)$$

$$Var[N_{b_{2(2)}}] = \{b_{2(2)} - b_{2(1)}\} \{r_{2(2)} + 1\} r_{2(2)} + Var[N_{b_{2(1)}}] \quad (14)$$

$$r_{2(1)} = \frac{s_{2(1)}}{t_{2(1)}} \quad (15)$$

$$r_{2(2)} = \frac{s_{2(2)}}{t_{2(2)}}$$

여기서, $E[N_{b_{2(1)}}]$ 과 $Var[N_{b_{2(1)}}]$ 은 state $b_{2(1)}$ 에서

하중반복수의 평균 및 분산, $E[N_{b_{2(2)}}]$ 와 $Var[N_{b_{2(2)}}]$ 는 state $b_{2(2)}$ 에서 하중반복수(피로수명)의 평균 및 분산을 의미한다.

식 (15)의 $r_{2(1)}$ 과 $r_{2(2)}$ 는 식 (11)~(14)에서 이미 알고있는 $E[N_{b_{2(2)}}]$, $Var[N_{b_{2(2)}}]$, $b_{2(1)}$ 및 $b_{2(2)}$ 를 대입하여 구하고, 이 값들과 식 (1)로부터 $s_{2(1)}$, $t_{2(1)}$, $s_{2(2)}$ 및 $t_{2(2)}$ 를 각각 얻는다. 따라서 2단의 작용응력비 q_2 에서의 확률치이행렬 P_2 는 이들 확률값으로 구성되어진다. Table 4는 이의 결과이다.

Fig. 9(a), (b) 및 Fig. 10(a), (b)는 Table 4의 파라미터를 적용하여 예측한 피로수명 및 임의의 손상상태($D^*=0.50$)에 이르는 하중반복수 n 의 분포를 실험결과와 함께 나타낸 것이다. 주어진 실험조건에 따라 예측값이 과대 또는 과소평가되는 경향을 보이지만 이들 블럭하중하에서의 예측결과는 비교적 실험결과와 잘 일치한다고 할 수 있다. 또한 Fig. 10(a), (b)에서 예측값에 천이점이 생기는 것은 1단의 일정진폭하중에서 구한 확률치이행렬 P_1 에 의하여 손상누적분포를 구하고, 천이점 이후에서는 2단의 일정진폭하중에서 구한 확률치이행렬 P_2 에 의해 누적분포를 구하기 때문이다.

한편 2단 블럭하중하에서의 피로수명분포예측은 수정 Miner 법칙 및 2-parameter Weibull 분포 등의 통계적 연속분포에 퍼센트 파손법칙(percent failure rule)을 도입하여 행하여진 바 있으며, ⁽²⁾ 이들 모델과 M. C. 모델의 피로수명예측에 대한 적용성을 검토하여 보았다. Fig. 11(a), (b)은 M. C. 모델과 2-parameter Weibull 분포에 대한 피로수명의 예측결과 및 실험값을 비교한 것이다. 여기서, 2-parameter Weibull 분포를 적용하여 2단 블럭하중하의 피로수명을 예측하기 위해서는 1단에서 2단으로 부하하중이 변동될 때 1단의 하중반복수를 2단의 하중반복수로 환산(등가사이클수, number

Table 4 Revised transition probability and state number under 2-level block loading

q	Region	State no.	Probability of failure(s)	Probability of success(t)
0.87	I	5	0.9925	0.0075
	II	7	0.9959	0.0041
0.91	I	4	0.9584	0.0416
	II-I	7	0.9466	0.0534
	II-II	1	0.9920	0.0080

q: Stress ratio(= $\sigma_{max}/(\sigma_{ult})_{ave}$.)

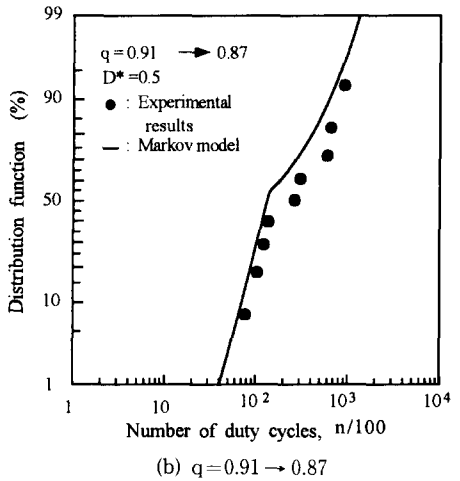
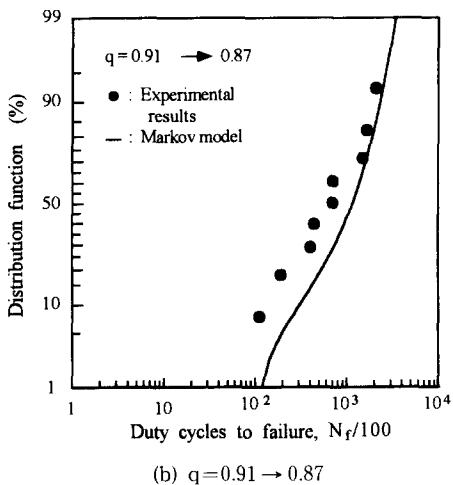
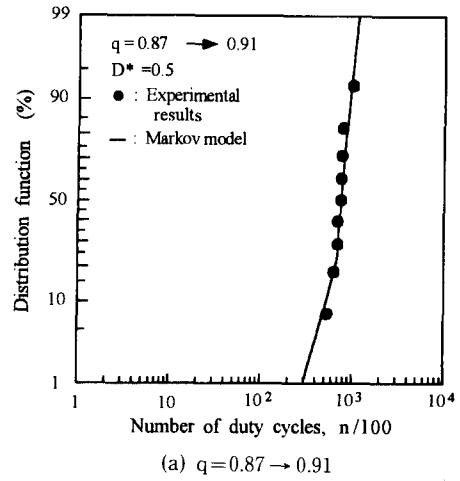
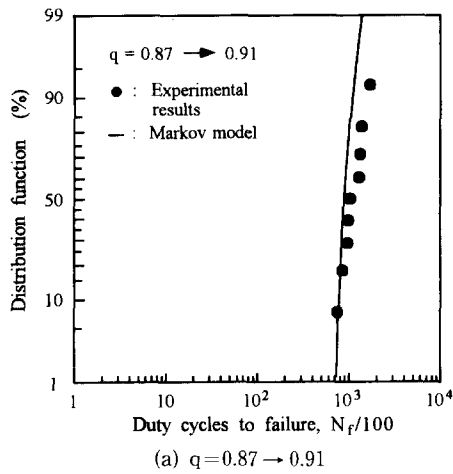


Fig. 9 Comparisons between the test result and the prediction of the fatigue life distribution by Markov chain model

Fig. 10 Comparisons between the test result and the prediction of the distribution of number of duty cycles at specified damage state ($D^*=0.50$) by Markov chain model

Table 5 Parameters of 2-parameter Weibull distribution under constant amplitude loading

q	$\alpha (\times 10^2)$	$\beta (\times 10^4)$
0.87	3.41	2483.04
0.91	2.46	369.09

q : Stress ratio ($= \sigma_{max}/(\sigma_{ult})_{ave.}$)
 α : Shape parameter
 β : Scale parameter

Table 6 Number of equivalent cycles of 2-parameter Weibull distribution under 2-level block loading

$q_1 \rightarrow q_2$	$n_1 (\times 10^2)$	$n_{eq.} (\times 10^2)$
0.87 \rightarrow 0.91	687	62
0.91 \rightarrow 0.87	137	1215

q_1 : First applied stress ratio
 q_2 : Second applied stress ratio
 n_1 : Applied number of cycles at q_1
 $n_{eq.}$: Number of equivalent cycles

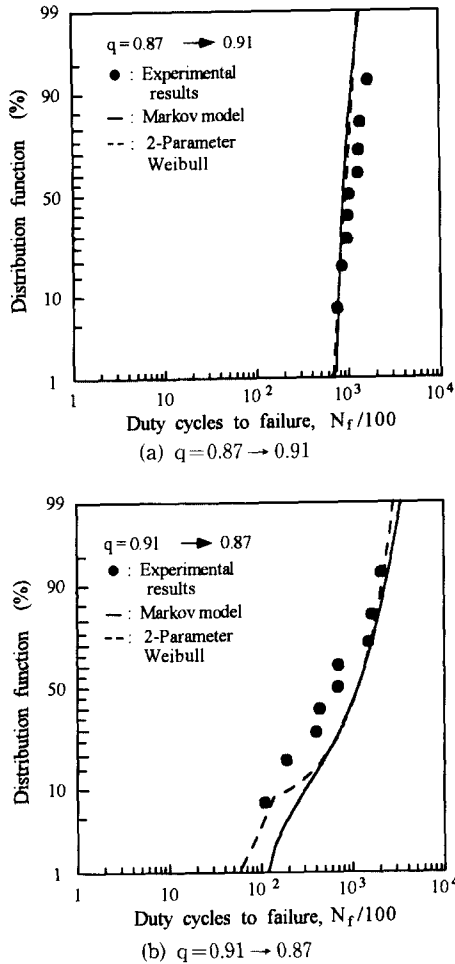


Fig. 11 Comparisons between the test result and the prediction of the fatigue life distribution by Markov chain model and 2-parameter Weibull distribution

of equivalent cycles) 함으로써 피로수명의 전 영역이 2단의 하중을 받고 있다고 가정한다. Table 5 및 Table 6은 2-parameter Weibull 분포에서의 형상계수 및 척도계수와 등가사이클수를 나타낸 것이다. 이들 그림에서 M. C. 모델은 저→고 및 고→저 블럭하중에 대하여 2-parameter Weibull 분포와 거의 유사한 예측결과를 나타내고 있다.

이상에서 검토한 바와 같이 M. C. 모델은 2단 블럭하중하에서 복합재료의 피로손상누적거동의 변동성을 예측함에 있어서 기존의 연속분포를 기초로 한 모델에 비하여 계산이 간단하고 손상누적과정에

대한 방대한 정보를 제공할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

5. 결 론

원공을 가진 8-harness satin woven CFRP 복합재료에 대한 2단 블럭하중하에서의 피로손상누적거동을 평가하기 위하여 일정진폭하중하의 피로수명의 평균과 분산으로부터 얻어진 확률치이행렬로 구성된 M. C. 모델을 적용하여 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 일정진폭하중하의 시컨트 계수로부터 얻어진 누적손상량은 하중반복수의 증가에 따라 매우 불규칙하고 서로 엉켜있는 양상을 보였다. 또한 손상누적속도는 피로수명의 약 20%까지는 급격한 저하를 보이지만 그 이후는 완만한 증가를 나타내는 2단계의 변화양상을 나타내었다.

(2) 2단 블럭하중하의 누적손상량은 저→고하중의 경우 2단의 고하중이 가해짐에 따라 급격히 증가하지만, 고→저하중하에서는 저하중 영역의 손상거동에 고하중의 영향이 그대로 나타나는 하중상호간섭이 나타난다.

(3) 2단 블럭하중하의 M. C. 모델은 일정진폭하중으로부터 얻어진 확률치이행렬을 기본으로 하여 구성하였다. 이에 의한 임의의 손상상태에 이르는 하중반복수 및 피로손상누적거동의 예측값은 실험결과와 좋은 일치를 보였다.

(4) 2단 블럭하중하의 피로수명 예측에 있어서 M. C. 모델은 2-parameter Weibull 분포와 거의 유사한 적용성을 보였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 '94 핵심전문연구 지원과제(과제번호 941-1000-011-2)로 수행된 연구결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드리는 바입니다.

참고문헌

(1) Johnson, S. E. J. and Doner, M. A., 1981, "A Statistical Simulation Model of Miner's Rule," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 103, 12, pp. 113~117.

- (2) Hwang, W. and Hahn, K. S., 1987, "Statistical Study of Strength and Fatigue Life of Composite Materials," *Composites*, Vol. 18, No. 1, pp. 47~53.
- (3) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1978, "A New Cumulative Damage Model-Part 1," *Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 246~250.
- (4) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1978, "A New Cumulative Damage Model-Part 2," *Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 251~257.
- (5) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1978, "A New Cumulative Damage Model-Part 3," *Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 733~739.
- (6) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1978, "A New Cumulative Damage Model-Part 4," *Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, pp. 40~44.
- (7) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1981, "A Critical Analysis of Some Probabilistic Models of Fatigue Crack Growth," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 14, pp. 59~81.
- (8) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1983, "On the Probabilistic Modeling of Fatigue Crack Growth," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 18, pp. 623~632.
- (9) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1982, "On Nonstationary Cumulative Damage Models," *Trans. of ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 49, pp. 37~42.
- (10) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1983, "On Life Behavior under Spectrum Loading," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 18, No. 2, pp. 271~283.
- (11) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1983, "Cumulative Damage: Reliability and Maintainability," *ASTM STP 798*, pp. 131~146.
- (12) Tanaka, S., Ichikawa, M. and Akita, S., 1984, "A Probabilistic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 20, No. 3, pp. 501~513.
- (13) 김정규, 김도식, 1995, "원공을 가진 CFRP 복합재료의 피로누적손상 및 피로수명에 대한 확률적 해석," *대한기계학회논문집*, 제19권, 제8호, pp. 1915~1926.
- (14) Stinchcomb, W. W. and Bakis, C. E., 1990, Fatigue Behavior of Composite Laminates, in *Fatigue of Composite Laminates* edited by Reifsnider, K. L., pp. 105~177.