

〈論 文〉

원공을 가진 CFRP 복합재료의 피로누적손상 및 피로수명에 대한 확률적 해석

김정규* · 김도식**

(1995년 3월 28일 접수)

A Probabilistic Analysis for Fatigue Cumulative Damage and Fatigue Life in CFRP Composites Containing a Circular Hole

Jung-Kyu Kim and Do-Sik Kim

Key Words : CFRP Composites(탄소섬유강화 복합재료), Stochastic Markov Chain Model(확률적 마르코프 연쇄모델), Secant Modulus(시컨트계수), Fatigue Cumulative Damage(피로누적손상), Fatigue Life(피로수명)

Abstract

The Fatigue characteristics of 8-harness satin woven CFRP composites with a circular hole are experimentally investigated under constant amplitude tension-tension loading. It is found in this study that the fatigue damage accumulation behavior is very random and history-independent, and the fatigue cumulative damage is linearly related with the mean number of cycles to a specified damage state. From these results, it is known that the fatigue characteristics of CFRP composites satisfy the basic assumptions of Markov chain theory and the parameter of Markov chain model can be determined only by mean and variance of fatigue lives. The predicted distribution of the fatigue cumulative damage using Markov chain model shows a good agreement with the test results. For the fatigue life distribution, Markov chain model makes similar accuracy to 2-parameter Weibull distribution function.

1. 서 론

피로하중을 받는 복합재료의 피로손상누적거동 및 피로수명은 변동성(variance)을 나타내는 경우가 많다. 따라서 이의 피로거동을 명확히 하기 위해서는 이들의 변동성을 고려할 수 있는 확률·통계적 개념을 도입한 신뢰성 해석이 필요하다.

피로하중을 받는 복합재료의 신뢰성 평가를 위한 대표적 모델인 잔류강도⁽¹⁻³⁾ 및 잔류강성 저하모델⁽⁴⁾

은 하중반복수에 따른 잔류강도 및 강성저하량의 변동성을 Weibull 또는 Log-normal 분포에 적합시켜 피로수명 및 임의의 하중반복수 후의 잔류강성의 분포를 비교적 정확히 예측할 수 있다. 그러나 통계적 연속분포를 사용한 이들 모델은 특정 독립변수에 대한 종속변수의 통계적 분포특성의 해석에만 국한되어 있으므로 피로손상누적과정에 대한 변동성의 묘사가 어렵고 계산이 복잡하다는 단점을 가지고 있다.

한편 Bogdanoff⁽⁵⁻⁷⁾ 등은 이상과 같은 기존 모델의 단점을 극복하기 위하여 stochastic Markov chain 이론을 이용한 새로운 피로누적손상모델을 제

*정회원, 한양대학교 기계설계학과

**정회원, 한양대학교 산업과학연구소

안하였으며, 금속재료의 피로균열진전거동에 대하여 이 모델의 적용성을 검토하였다. 그 후 Bogdanoff⁽⁸⁻¹⁰⁾ 등은 2024-T3 Al 합금, Shimada 등⁽¹¹⁾은 고장력강(APFH60) 그리고 Lassen⁽¹²⁾은 용접부에서 Markov chain model을 이용하여 일정진폭하중하의 피로균열진전의 변동성을 검토한 결과를 확률값으로 나타낼 수 있으며, 또한 이로부터 확률치이행렬을 구성하여 피로하중을 받는 부재의 손상누적과정에 대한 확률적인 묘사가 가능함을 입증하였다. 이상의 결과로부터 Markov chain model은 피로손상의 누적과정에 대한 총체적인 정보를 얻을 수 있으며, 이때의 예측을 위한 계산과정이 종래의 연속분포를 사용한 피로누적손상모델에 비하여 매우 간단하다는 등의 잇점이 확인되었다.

그러나 이와같은 장점에도 불구하고 Markov chain model을 사용한 피로손상누적과정 및 피로수명예측에 대한 연구는 금속재료에만 국한되어져 왔으며, 복합재료와 같은 이방성재료에 대한 Markov chain model의 적용성 여부는 아직까지 불확실한 실정이다.

본 연구에서는 원공을 가진 8-harness satin woven CFRP 복합재료를 사용하여 일정진폭피로시험을 수행하고, 하중반복수에 따른 잔류강성 저하량을 기초로 Markov chain model을 도입하여 피로누적손상 및 피로수명 분포를 검토하였다.

2. 이론해석

확률론적 Markov chain model(이하 M.C. 모델이라 함)은 피로손상누적과정에서의 변동성을 기본적인 현상으로 인정하고 이 변동성에 대한 물리적 특성을 이산분포(discrete distribution)를 통해 나타낸다는 것에 특징이 있다. 따라서 실험결과에 대한 통계적 특성의 규명에만 국한되어 있는 기존의 통계적 모델들과는 달리 M.C. 모델은 피로손상이 누

적되는 과정자체를 확률적으로 묘사하기 때문에 손상누적과정의 전반적인 정보를 얻어낼 수 있다. 또한 이 모델의 파라미터 들은 간단한 계산만으로 결정이 가능하다는 잇점을 가진다.

Bogdanoff⁽⁶⁻⁷⁾ 등은 Markov chain 이론을 피로손상의 누적과정 예측에 도입하기 위해 손상이 현 상태에서 다음 상태로 증가할 수 있는 최소한의 하중반복수를 duty cycle(이하 D.C.라 함)로 정의하고 다음과 같은 사항을 가정하였다.

- ① 피로손상은 현 손상상태에서 바로 이웃한 상태로 불연속적으로 증가한다. (unit jump)
- ② 피로손상이 증가될 확률은 D.C.가 시작할 때의 상황과 D.C. 그 자체에만 의존한다. (history independent)

Fig. 1은 이상과 같은 가정을 도식적으로 나타낸 것이다. 임의의 하중반복수 후의 피로손상은 현 상태 j 에서 바로 이웃한 상태 ($j+1$)로 진전하거나 또는 그대로 머물 수 있다. 이 그림에서 s_j 는 D.C.가 가해지는 동안 손상이 j 상태에 정체되어 있을 확률이고, t_j 는 D.C.가 가해지는 동안 손상이 $j+1$ 상태로 증가될 확률이며, 이들 사이에는 아래의 관계가 성립된다.

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

또한 손상상태 j 는 초기상태 $j=1$ 로부터 파손시 $j=b$ 까지의 단계로 나눌 수 있으며, 하중반복수에 따른 피로손상의 누적은 한 단계씩 차례로 진행된다고 가정한다. 이와같은 불연속상태-불연속시간(discrete state-discrete time) Markov process는 Markov chain으로 간주될 수 있으며, 이의 특징을 가장 잘 내포하고 있는 이산확률분포는 기하분포(geometric distribution)이다. 또한 임의의 하중반복수 후에 손상이 정체되거나 증가될 확률값들은 기하분포의 실패확률 s_j 및 성공확률 t_j 값으로 나타내어질 수 있다.

Markov chain 이론으로부터 임의의 하중반복수

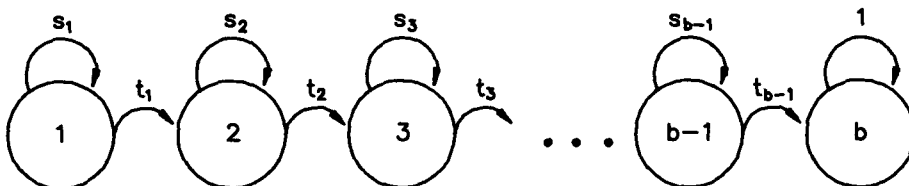


Fig. 1 Illustration of the principle in the Markov chain model

x 후의 재료의 손상상태에 대한 확률분포 p_x 는 기하분포의 확률값들로 구성된 확률천이행렬 P 와 초기 손상상태에 대한 확률분포 p_0 의 곱셈의 형태로 서 아래의 식으로 주어진다.

$$p_x = p_0 P^x \quad (2)$$

여기서, p_0 는 재료의 초기 손상상태에 대한 확률분포이며, 식(3)과 같이 정의된다.

$$p_0 = \{p_0(1), p_0(2), p_0(3), \dots, p_0(b)\} \\ \sum_{j=1}^b p_0(j) = 1 \quad (3)$$

식(3)에서 $p_0(j)$ 는 초기($x=0$)에 손상이 j 상태에 존재할 확률이다. 또한 P 는 확률천이행렬을 나타내며, 행렬의 요소는 기하분포의 실패확률 s_j 와 성공확률 t_j 의 값을 통하여 결정된다.

$$P = \begin{bmatrix} s_1 & t_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & t_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_3 & t_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & s_{b-1} & t_{b-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(2)는 식(3)과 (4)를 사용하여, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p_x = \{p_x(1), p_x(2), p_x(3), \dots, p_x(b)\} \\ \sum_{j=1}^b p_x(j) = 1 \quad (5)$$

여기서, $p_x(j)$ 는 임의의 하중반복수 x 후에 손상이 j 상태에 존재할 확률이다.

한편 손상 D^* 가 임의의 손상상태에 도달할 때의 하중반복수 δN_j 의 분포는 아래와 같이 기하분포의 형태로 주어진다.

$$P[\delta N_j = \delta n_j] = t_j s_j^{\delta n_j - 1} \quad (\delta N_j = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

여기서, δN_j 는 임의의 손상상태에 도달할 때까지의 D.C.수이며, 기하분포에서 최초로 성공할 때까지의 시행회수를 의미한다.

또한 재료가 한계 손상상태($D^*=1$)에 이르기까지의 하중반복수, 즉 피로수명 N_b 의 평균값 $E[N_b]$ 와 분산값 $Var[N_b]$ 는 식(6)으로부터 다음과 같이 나타내어진다.

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

$$= \sum_{j=1}^{b-1} \frac{1}{t_j} = (b-1) \frac{1}{t_j} \quad (7)$$

$$Var[N_b] = \sum_{j=1}^{b-1} Var[\delta N_j] \\ = \sum_{j=1}^{b-1} \frac{1-t_j}{t_j^2} = (b-1) \frac{s_j}{t_j^2} \quad (8)$$

$$\frac{Var[N_b]}{E[N_b]} = \frac{s_j}{t_j} = r \quad (9)$$

$$N_b = \sum_{j=1}^{b-1} \delta N_j \quad (10)$$

여기서, N_b 는 피로파손시의 D.C.수이며, b 는 파손 state수이다.

그리고 파손 state수 b 는 실험결과로부터 산출되는 평균값 $E[N_b]$ 및 분산값 $Var[N_b]$ 와 식(9)에서 결정되는 r 값을 이용하여 구한다. 얻어진 b 값은 행렬 식(4)의 크기와 같으며 행렬의 크기는 정수이어야만 하기 때문에, b 값이 정수가 아닌 경우는 반올림하여 정수로 고쳐준다. 이상과 같이 구한 파손 state수 b 를 식(1) 및 식(7)에 대입하여 t_j 및 s_j 값을 구하고 이로부터 확률천이행렬 P 를 구성한다.

이상과 같이 한계손상상태에 이르는 하중반복수 N_b 의 평균과 분산을 통해 확률천이행렬의 각 요소를 구할 수 있으며, 피로손상누적거동은 구성된 행렬 P 와 초기 손상상태에 대한 확률분포 p_0 의 곱셈으로 표현되는 M.C. 모델 식(2)로부터 평가될 수 있다.

3. 실험방법

사용한 재료는 8-harness satin woven CFRP 복합재료($v_f \approx 60\%$, 두께 $B=2.2$ mm)로서, 이 재료의 기계적 특성은 Table 1과 같다. 시험편은 다이어몬드 컷터를 사용하여 섬유배열방향이 하중방향에 $0^\circ/90^\circ$ 가 되도록 폭 $W=20$ mm, 길이 $L=150$

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)

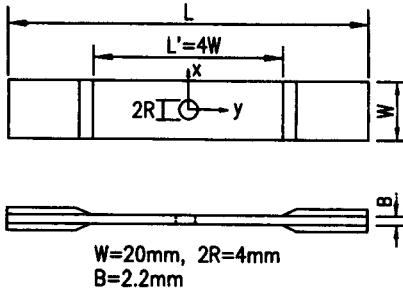


Fig. 2 Configuration of test specimen

mm의 크기로 채취하였다. 한편 복합재료의 체결 방법으로는 볼트 등의 기계적 방법이 널리 이용되고 있으며, 이러한 경우 원공은 응력집중원으로서 파손의 기점이 된다. 따라서 시험편의 형상은 Fig. 2와 같이 시험편 중앙에 직경 $2R=4$ mm의 원공을 주의깊게 가공하였다.

정적극한강도의 분포를 구하기 위한 인장시험은 총 10개의 시험편에 대하여 실온($25 \pm 3^\circ\text{C}$)에서 일정 변위속도($=0.5$ mm/min)로 행하였다. 일정진폭 피로시험은 10 Hz의 인장-인장 정현파(sinusoidal waveform)로 하였으며, 이때 응력비 $R(=\sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ 은 0으로 유지하였다. 또한 평균정적극한강도 $(\sigma_{ult.})_{ave.}$ 에 대한 피로하중시의 최대반복응력 $\sigma_{\max}(=P_{\max}/B(W-2R))$ 의 비로서 정의되는 작용응력비 q 는 0.84와 0.87로 설정하였다.

피로시험 동안의 잔류강성은 일정 게이지길이($=50$ mm)의 변위신장계(extensometer)를 시험편에 부착한 후, 작용응력비 $q=0.84$ 와 0.87인 일정진폭 피로시험으로부터 측정되었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 피로손상누적거동

Table 2는 정적인장시험결과를 정리한 것이다. 10개의 동일한 시험편에 대한 정적극한강도 $\sigma_{ult.}$ 는 최소 531.9 MPa에서 최대 582.6 MPa사이에서 분포하였으며, 평균정적극한강도 $(\sigma_{ult.})_{ave.}$ 는 560.6 MPa이었다.

복합재료의 피로수명에측은 하중반복수에 따른 잔류강성 또는 강도의 변화양상을 기초로 시도되고 있다. 이들중 잔류강성은 잔류강도와는 달리 하나의 시험편에 대하여 연속적인 측정이 가능하다는 잇점을 가진다. 그러므로 본 연구에서 피로손상누

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)

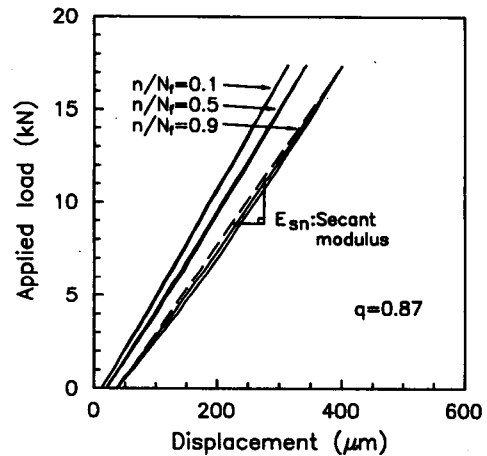


Fig. 3 Degradation of residual stiffness at specified number of cycles

적거동에 대한 검토는 반복하중에 따른 히스테리시스 루프(hysteresis loop)로부터 측정된 잔류강성을 기초로 행하여졌다.

Fig. 3은 피로수명 N_f 의 각각 10%, 50%, 90%의 하중반복수 n 에 대한 히스테리시스 루프의 일례를 나타낸 것이다. 이 그림에서 하중반복수비 n/N_f 가 증가함에 따라 변위에 대한 하중값 즉 강성이 저하하는 현상을 나타내며, 부하곡선과 제하곡선의 차이에 의해 루프가 벌어지는 것을 알 수 있다. 이는 모재의 균열형성 및 층간분리 등의 손상이 누적됨에 따라 에너지의 손실이 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

따라서 잔류강성의 저하양상은 Fig. 3의 최대하중점(P_{\max})과 최소하중점(P_{\min})을 연결한 직선의 기

을기인 시컨트계수(secant modulus) E_{sn} 을 사용하여 평가하였다. 이로부터 피로누적손상을 정량적으로 평가하기 위하여 누적손상량 D^* 는 다음 식(11)로 정의하였다.

$$D^* = \frac{E_o - E_{sn}}{E_o - E_{sf}} \quad (11)$$

여기서, E_o 는 첫번째 사이클에서의 탄성계수, E_{sf} 는 파손시의 시컨트계수 그리고 E_{sn} 은 하중반복수 n 후의 시컨트계수이다. 이 식에서 D^* 는 재료의 초기상태($E_{sn}=E_o$)에서 $D^*=0$ 이고, 파손시($E_{sn}=E_{sf}$)에는 $D^*=1$ 이 된다.

Fig. 4(a, b)는 작용응력비 $q=0.84$ 와 0.87 에 있

어서 식(11)에 의하여 산출한 누적손상량 D^* 와 하중반복수 n 의 관계를 나타낸 것이다. 각 시험편의 손상누적곡선은 매우 랜덤(random)한 경향을 보이고 있으며, 서로 엉켜있는(intermingle) 상태임을 알 수 있다. 따라서 손상누적의 평균적 거동만으로 피로손상누적의 전체적인 과정을 묘사하는 것은 불가능하며, 변동성을 포함하는 확률적 개념이 필요하게 된다. Fig. 5는 시험편의 잔류강성 E_{sn}/E_o (E_{sn} : 하중반복수 n 후의 시컨트계수, E_o : 첫번째 사이클에서의 탄성계수)를 하중반복수비 n/N_f 에 대하여 나타낸 대표적인 예이다. 모든 작용응력비 q 에 대하여 잔류강성은 피로수명의 약 20%까지

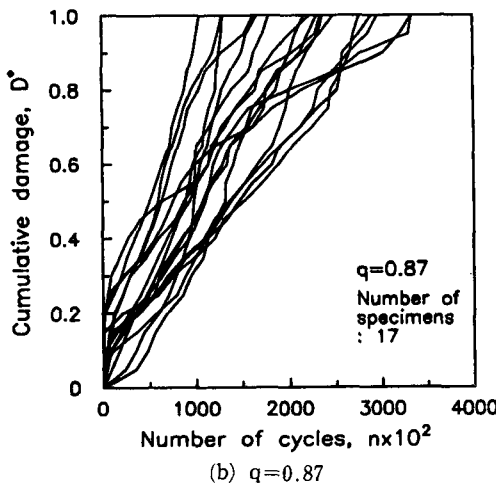
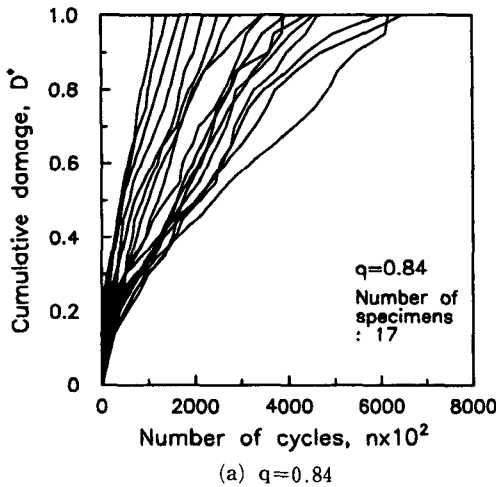


Fig. 4 Variation of cumulative damage with number of cycles

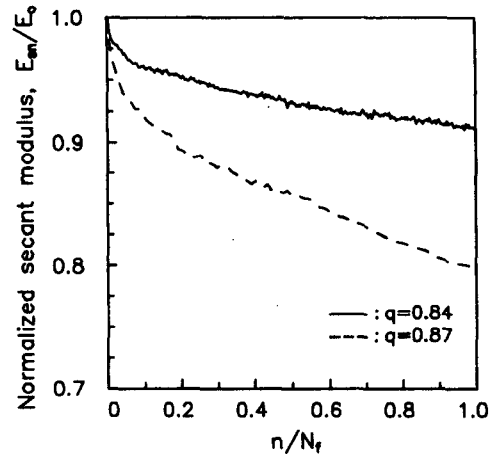


Fig. 5 Variation of normalized secant modulus for each stress ratio

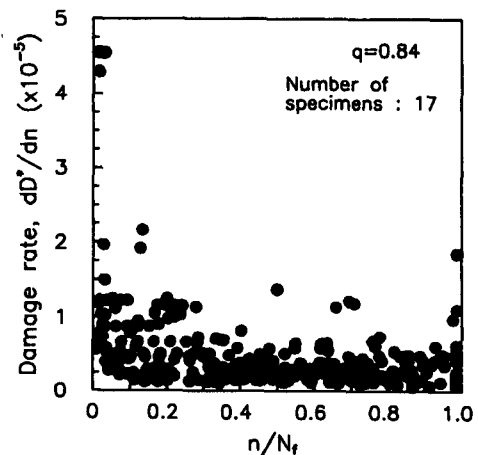


Fig. 6 Change of the rate of damage i $q=0.84$

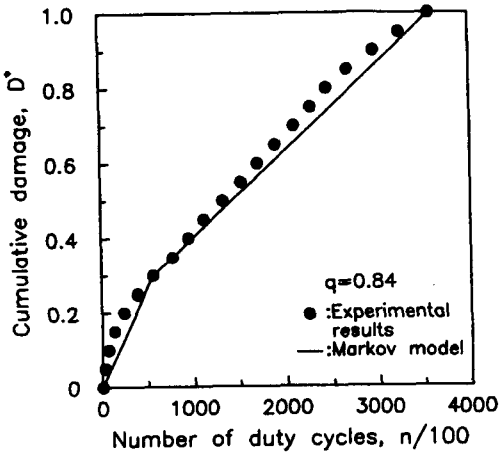
급격한 저하를 나타내지만 그 후는 비교적 완만한 저하거동을 보이고 있다. 이와같은 경향은 하중반복수의 증가에 대한 누적손상량, 즉 손상누적속도

$dD^*/dn = (D_{i+1}^* - D_i^*) / (n_{i+1} - n_i)$ 의 변화를 나타낸 Fig. 6에서도 알 수 있다. 이상과 같은 피로손상누적거동은 피로수명의 초기단계에서 원공주위의 응

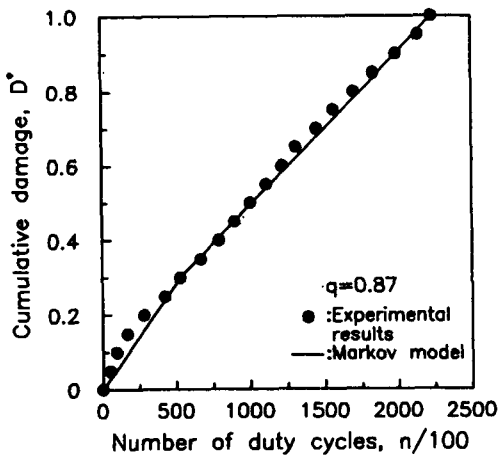
Table 3 Transition probability and state number in Markov chain model

State no.	q=0.84		q=0.87	
	6	4	5	7
Mean($\times 10^2$)	561.7	3576.9	529.6	2232.8
Variance($\times 10^4$)	74880.6	282181.7	71551.6	492171.7
Probability of failure(s)	0.9911	0.9987	0.9925	0.9959
Probability of success(t)	0.0089	0.0013	0.0075	0.0041

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

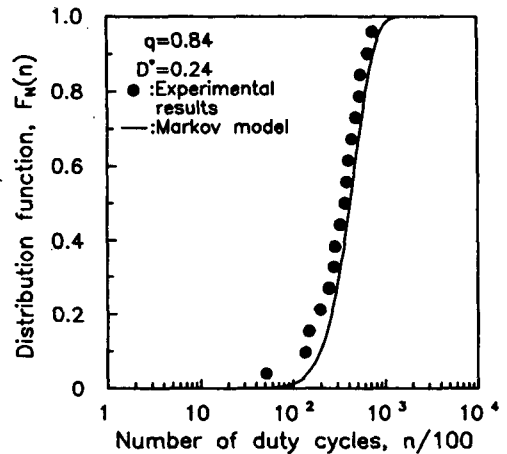


(a) q=0.84

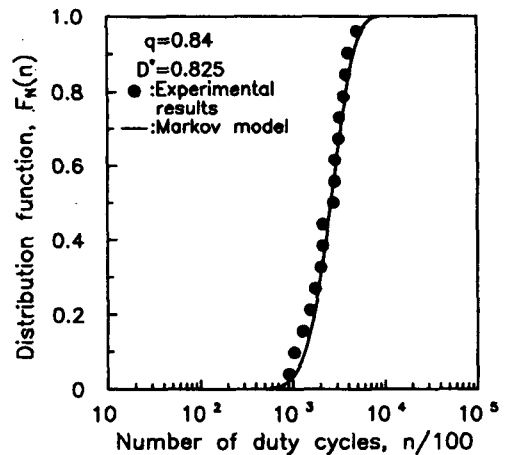


(b) q=0.87

Fig. 7 Correlation between the test results and the predictions of mean number of cycles



(a) $D^*=0.24$



(b) $D^*=0.80$

Fig. 8 Comparisons between the test results and the predictions of the distribution of number of cycles at specified damage state in q=0.84

력집중으로 인해 손상이 빨리 축적되고, 그 후 하중반복수가 증가함에 따라 원공선단에서 발생하는 피로손상이 그 주위의 응력집중을 완화시키기 때문⁽¹³⁾인 것으로 생각된다.

4.2 Markov Chain Model의 적용성 검토

Bogdanoff^(8,9) 등은 불연속상태와 불연속시간(discrete state-discrete time)을 가정한 M.C. 모델을 도입하여 2024-T3 Al합금에 대한 피로균열진전의 평균적 거동을 비교적 정확히 예측하였으나, 이의 변동성은 과대평가되는 연구결과를 보고한 바 있다. 이의 원인으로는 금속의 피로균열진전경향이

하중반복수에 대하여 연속적이며, 이전의 균열진전 상황에 의존한다(history dependent)는 것이 지적되었다. 이를 고려하여 Bogdanoff 등⁽¹⁰⁾은 음이항분포와 상관계수 등을 도입한 Semi-M.C. 모델을 개발하여 피로균열진전거동에 대한 매우 정확한 예측을 행하였다.

본 실험결과를 M.C. 모델에 의하여 검토하기 위해서는 먼저 M.C. 모델 식(2)의 파라미터를 결정하여야 한다. Table 3은 이론해석의 식(1)~(10)의 관계로부터 구한 M.C. 모델의 천이확률값 및 state수를 나타낸 것이다. 이 표에서 state수를 2개의 영역으로 나눈 이유는 Fig. 5에서 알 수 있는

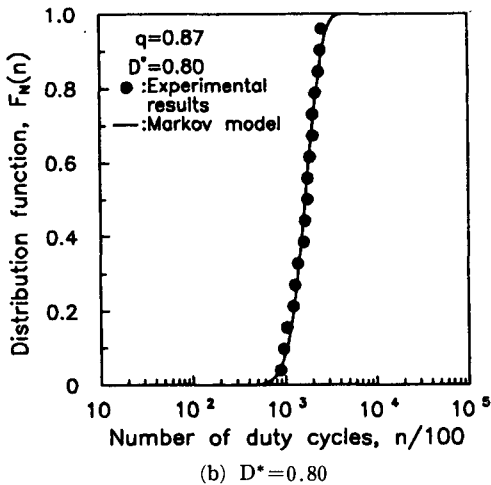
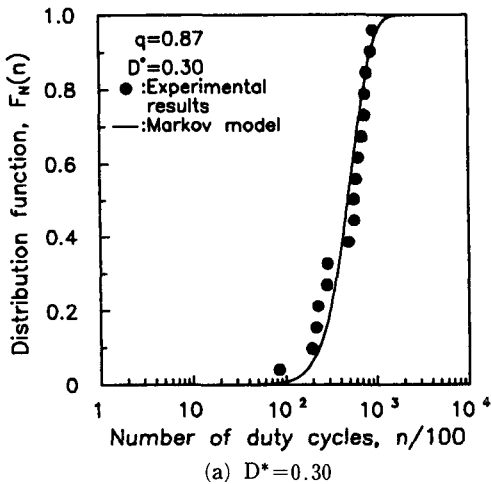


Fig. 9 Comparisons between the test results and the predictions of the distribution of number of cycles at specified damage state in $q=0.87$

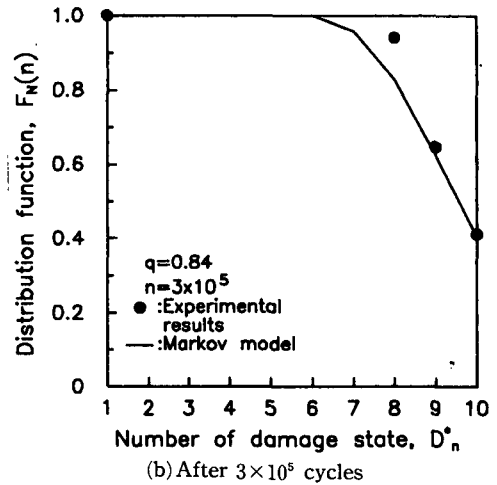
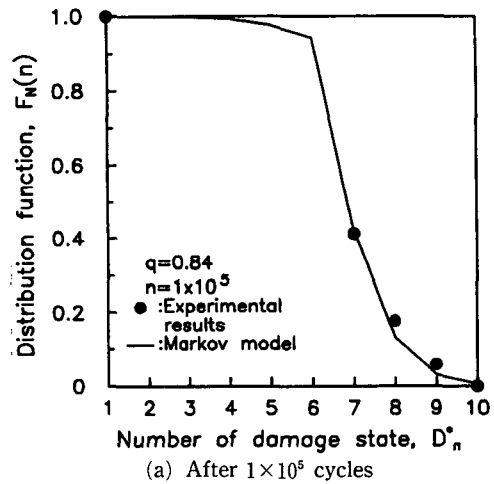


Fig. 10 Comparisons between the test results and the predictions of the distribution of damage state after specified number of cycles in $q=0.84$

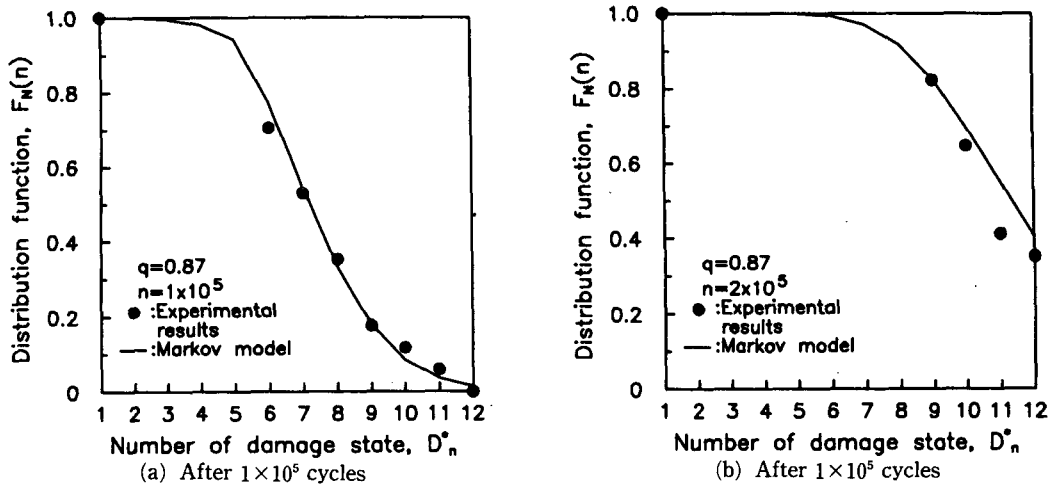


Fig. 11 Comparisons between the test results and the predictions of the distribution of damage state after specified number of cycles in $q=0.87$

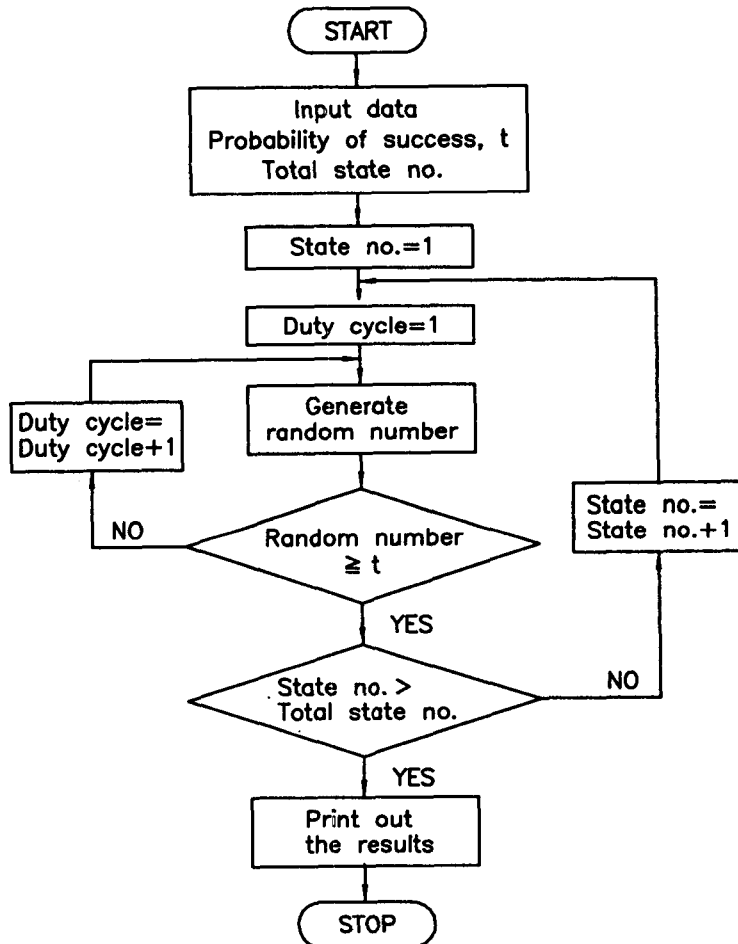


Fig. 12 Flow chart of the simulation using random number generator

바와 같이 피로수명의 약 20%까지 급격한 잔류강성의 저하 그리고 그 후 파손시까지의 비교적 완만한 저하과정을 나타내는 피로손상누적거동을 보이기 때문이다. 이와같이 산출된 파라미터들의 타당성을 검토하기 위하여 임의의 손상상태에 이르는 하중반복수 n 의 평균값을 예측하여 보았으며, 이의 결과를 Fig. 7(a, b)에 실선으로 나타내었다. 이 그림에서 하중반복수의 예측값은 실험결과와 잘 일치하고 있다. 따라서 본 연구의 경우 M.C. 모델은 피로손상누적거동에 따른 2개의 영역으로부터 얻어진 천이확률값 및 state수에 의하여 구성되어야 할 수 있다.

한편 구성된 M.C. 모델의 유용성을 확인하기 위

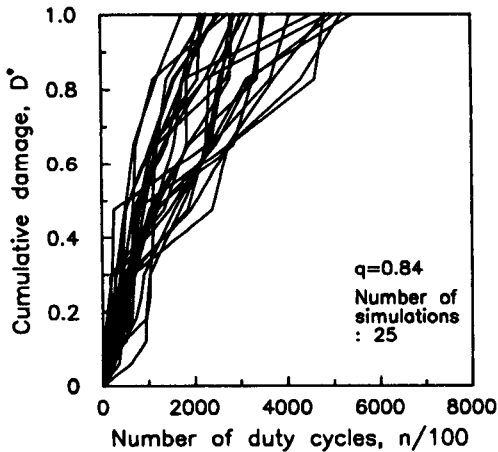
하여 복합재료 시험편의 피로누적손상의 변동성에 대한 예측을 시행하여 보았다. Fig. 8(a, b) 및 9(a, b)는 각 응력비($q=0.84, 0.87$)에서 임의의 손상상

Table 4 Parameters of 2-parameter Weibull distribution function

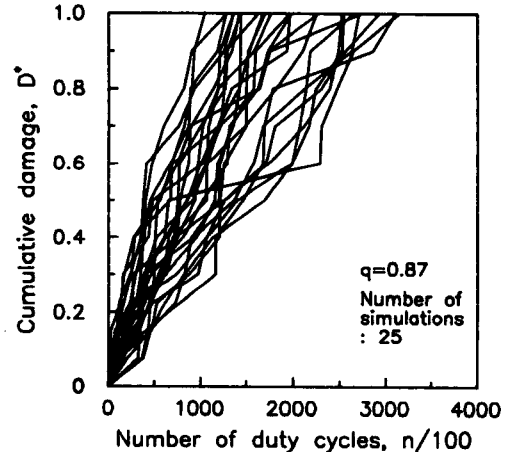
q	$\alpha (\times 10^2)$	$\beta (\times 10^4)$
0.84	2.22	4048.36
0.87	3.41	2483.04

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

α : Shape parameter β : Scale parameter

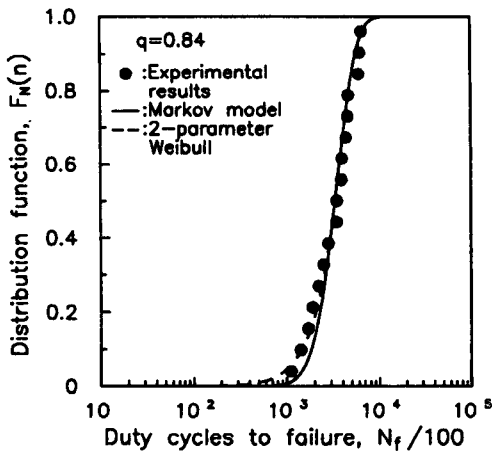


(a) $q=0.84$

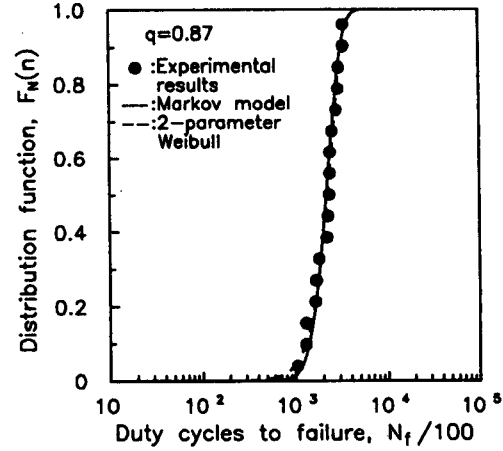


(b) $q=0.87$

Fig. 13 25 sample functions generated by Markov chain model using random number generator



(a) $q=0.84$



(b) $q=0.87$

Fig. 14 Comparisons between the test results and the predictions of the fatigue life distribution using Markov chain model and 2-parameter Weibull distribution

태에 도달할 때까지 가해진 하중반복수 n 의 분포를 나타낸 것이다. 이 그림에서 M.C. 모델에 의한 예측결과와 실험결과가 잘 일치하고 있다. 또한 Fig. 10(a, b)와 11(a, b)는 일정진폭 피로하중이 하중반복수 n 만큼 작용된 후 시험편의 누적손상 D^* 가 임의의 손상상태 D_n^* 에 존재할 분포에 대한 실험결과와 예측값을 비교한 $q=0.84$ 와 0.87 의 대표적인 예이다. 누적손상 분포의 예측은 식(2)의 M.C. 모델을 이용하였으며, 초기 손상상태에 대한 확률분포 p_0 는 다음과 같이 가정하였다.

$$p_0 = [1, 0, 0, \dots, 0] \quad (12)$$

그림에서 알 수 있듯이 두 경우에 대하여 예측된 분포는 실험결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 12는 각 시험편에 대한 피로손상누적거동을 모의실험하기 위한 프로그램의 흐름도(flow chart)로서 기하분포의 특성과 uniform random number generator를 사용하였다. 이의 실행결과는 Fig. 13(a, b)에 나타내었으며, 그림에서 보듯이 피로손상의 누적양상은 Fig. 4의 실제 실험결과와 유사하게 랜덤(random)하고 이전의 손상누적상황에 독립적(history independent)인 경향을 나타내고 있다.

한편 M.C. 모델의 피로수명분포예측에 대한 적합성을 기존의 통계적 연속분포와 비교하기 위해 M.C. 모델과 Table 4의 2-parameter Weibull 분포를 사용한 예측결과를 검토하였다. Fig. 14(a, b)는 이의 결과로서, M.C. 모델은 피로수명분포에 있어서도 기존의 Weibull 분포와 거의 유사한 예측의 정확도를 나타내고 있다. 또한 Fig. 15(a, b)는 심등⁽¹⁴⁾의 CFRP 적층재 (0/45/90/-45)_{2S}에 대한 실험

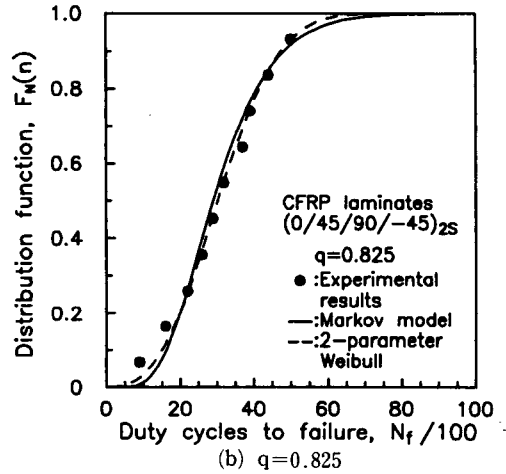
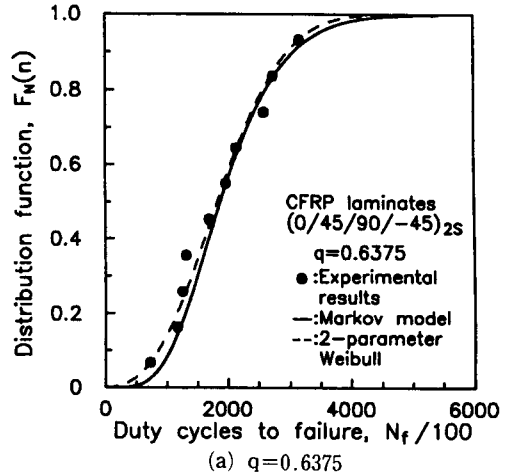


Fig. 15 Comparisons between the test results and the predictions of the fatigue life distribution using Markov chain model and 2-parameter Weibull distribution in (0/45/90/-45)_{2S} CFRP laminates⁽¹⁴⁾

Table 5 Parameters of Weibull distribution and transition probability and state number in Shim's reference data⁽¹⁴⁾

	q=0.6375	q=0.825
State no.	7	6
mean ($\times 10^2$)	1870.8	30.5
Variance ($\times 10^4$)	555127.4	146.5
Probability of failure(s)	0.9968	0.8361
Probability of success(t)	0.0032	0.1639
α ($\times 10^2$)	2.46	2.17
β ($\times 10^4$)	2119.25	35.02

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

험결과로부터 산출된 Table 5의 파라미터들을 사용하여 예측된 피로수명 분포와 실험값을 나타낸 것이다. 이 그림에서 M.C. 모델은 적층재료에 대해서도 2-parameter Weibull 분포와 거의 유사한 정확성을 지니고 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 M.C. 모델은 복합재료의 피로손상 누적거동의 변동성에 대하여 상당히 우수한 적응성을 가지고 있으며, 기존의 통계적 연속분포를 사용한 모델에 비해 계산이 간단하고 피로손상누적과정에 대한 정확하고도 방대한 정보를 얻을 수 있다는 잇점을 지니고 있다. 또한 피로수명분포예측에 있어서도 기존의 통계적 연속분포와 유사한 정확도를 나타내었다. 따라서 M.C. 모델은 피로하중을 받는 복합재료의 신뢰성 해석에 유용한 평가방법이라 할 수 있다.

5. 결 론

원공을 가진 8-harness satin woven CFRP 복합재료에 대하여 일정진폭 피로시험을 행하고, 잔류강성의 저하양상을 기초로 피로손상누적거동을 검토하였다. 또한 M.C. 모델을 사용하여 CFRP 복합재료의 피로누적손상 및 피로수명 분포를 예측하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 잔류강성을 사용하여 평가된 누적손상은 하중반복수에 따라 매우 랜덤한 경향을 보였으며, 이전의 손상거동에 거의 영향을 받지 않았다. 또한 손상누적속도는 피로수명의 약 20%까지는 저하하지만 그 후는 거의 일정한 양상을 나타낸다.

(2) 2단계의 피로손상누적거동을 고려하여 M.C. 모델을 구성하였으며, 이에 의하여 예측된 임의의 손상상태에 이르는 하중반복수, 임의의 하중반복수 후의 손상상태 및 각 시험편의 피로손상누적거동은 실험결과와 잘 일치하였다.

(3) 피로수명분포의 예측에 있어서 M.C. 모델은 실험결과에 대하여 기존의 2-parameter Weibull 분포와 거의 유사한 적합성을 나타내었다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Yang, J. N. and Liu, M. D., 1977, "Residual Strength Degradation Model and Theory of Periodic Proof Tests for Graphite/Epoxy Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 11, pp. 176~203.
- (2) Yang, J. N., 1978, "Fatigue and Residual Strength Degradation for Graphite/Epoxy Composite Under Tension-Compression Cyclic Loadings," *Journal of Composite Materials*, Vol. 12, pp. 19~39.
- (3) Yang, J. N. and Jones, D. L., 1981, "Load Sequence Effects on the Fatigue of Unnotched Composite Materials," *ASTM STP 723*, pp. 213~232.
- (4) Yang, J. N., Jones, D. L., Yang, S. H. and Meskini, A., 1990, "A Stiffness Degradation Model for Graphite/Epoxy Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 24, pp. 753~769.
- (5) Bogdanoff, J. L., 1978, "A New Cumulative Damage Model-Part 1," *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 246~250.
- (6) Bogdanoff, J. L. and Krieger, W., 1978, "A New Cumulative Damage Model-Part 2," *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 251~257.
- (7) Bogdanoff, J. L., 1978, "A New Cumulative Damage Model-Part 3," *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 733~739.
- (8) Bogdanoff, J. L. and Kozin, F., 1980, "A New Cumulative Damage Model-Part 4," *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 47, pp. 40~44.
- (9) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1981, "A Critical Analysis of Some Probabilistic Models of Fatigue Crack Growth," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 14, pp. 59~89.
- (10) Kozin, F. and Bogdanoff, J. L., 1983, "On The Probabilistic Modeling of Fatigue Crack Growth," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.

- 18, No. 3, pp. 623~632.
- (11) Shimada, Y., Nakagawa, T. and Tokuno, H., 1984, "Reliability Analysis of Fatigue Crack Propagation Life by Markov Chain," *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 33, No. 367, pp. 475~481.
- (12) Lassen, T., 1991, "Markov Modelling of the Fatigue Damage in Welded Structures under In-Service Inspection," *International Journal of Fatigue*, Vol. 13, No. 5, pp. 417~422.
- (13) 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.
- (14) 심봉식, 성낙원, 옹장우, 1991, "탄소섬유/에폭시 복합재료의 잔류강도저하 해석에 의한 피로 수명 평가," 대한기계학회논문집, 제15권, 제6호, pp. 1908~1918.