대한기계학회 2000년도 추계학술대회논문집 A pp. 225~230 KSME 00F023

충격손상 CFRP 적층복합재료의 피로특성

강 기 원* · 김 정 규**

Fatigue Characteristics in CFRP Laminates with Impact Damage

Ki-Weon Kang and Jung-Kyu Kim

Key Words : CFRP Laminates(CFRP 적층복합재료), Impact Damage Parameter(충격손상 파라미터), Fatigue Life(피로수명), Stochastic Analysis(확률론적 해석)

Abstract

This paper presents the fatigue behavior of composite materials with impact-induced damage. The impact damage parameter is proposed to evaluate the effect of impact damage on fatigue life. Subsequently, a new model is developed to predict the fatigue life of impacted composite materials. Also, a stochastic model is proposed to describe the variation of fatigue life due to the material nonhomogeneity. For these models, the fatigue tests were performed on the unimpacted and impacted composite materials. The effect of impact damage on fatigue life can be characterized by the impact damage parameter. Additionally, the results by the present fatigue life prediction model agree well with experimental results regardless of applied impact energy. Also, the variation of fatigue life can be described by the present stochastic model and is reduced with applied impact energy.

1. 서 론

CFRP 적층복합재료는 두께방향 강화의 부족으로 인하여 외부물체충돌로 인한 충격손상의 발생가능성이 높으며[1] 또한 이러한 충격손상의 상태에서 피로하중을 받게되는 경우가 많다. 따라서 복합재료의 충격 및 피로하중간의 상호작용에 대한 정확한 이해는 기계구조물의 안전성에 있어서 매우 중요하다고 사료된다.

충격 및 피로하중의 상호작용에 대한 평가는 피로수명에 미치는 충격손상의 영향에 관한 연구를 통하여 수행되고 있다.[2~5] 일례로서 Gray[2]는 충격손상 복합재료의 굽힘 *S-N*선도를 구하였고 Tai 등[3]은 이의 피로수명과 파손확률을 평가하였다. 그러나 피로수명에 대한 충격손상의 영향 및 이를 고려한 피로수명 예측모델은 그 중요성에도 불구하고 제시되지 못하고 있다.

한편 복합재료는 특유한 불균질성으로 인하여 피로수명과 강도 등에 많은 변동성을 보이고 있다. 이를 고려하기 위하여 대수정규 및 와이블(Weibull) 분포와 잔류강성 및 잔류강도모델을 이용한 확률론적인 해석이 수행되고 있다.[6,7] 그러나 충격손상 복합재료의 피로강도 및 수명은 복합재료 자체의 변동성과 충격손상에 의한 불규칙성[3]이 복합되어 이를 고려한 피로특성의 평가는 쉽지 않다.

본 연구에서는 Carbon/Epoxy 적층복합재료의 피로수명에 미치는 충격손상의 영향을 정량적으로 평가하고 이의 피로수명 예측모델을 제시하였다. 또한 이를 바탕으로 피로수명의 변동성을 고려할 수 있는 확률론적인 해석을 수행하였다.

2. 이론해석

2.1 충격손상 파라미터

충격하중을 받은 복합재료는 그 내부에 발생한 손상으로 인하여 하중지지능력이 급격히 저하할 뿐만 아니라 이에 가해지는 피로하중으로 인하여 잔류강도 및 잔류강성 등의 기계적 특성도 저하

* 한양대학교 대학원
** 회원, 한양대학교 기계공학부

된다.[6,7] 따라서 충격손상을 갖는 복합재료의 피로수명 평가를 위해서는 충격 및 피로하중하에서 이들의 거동을 동시에 고려해야 하며, 이를 위해서는 충격 및 피로하중하에서 이의 특성을 함께 설명할 수 있는 잔류강도저하개념의 도입이 유용하다.

Broutman 등[6]은 하중반복수에 따라 잔류강도가 연속적으로 저하된다는 실험적 관찰에 근거하여 잔류강도의 함수로써 2단 블록하중하의 피로수명 예측식을 제안하였다.

$$\left(\frac{\sigma_0-\sigma_1}{\sigma_0-\sigma_2}\right)\frac{n_1}{N_1}+\frac{n_2}{N_2}=1 \tag{1}$$

여기서 n_i, N_i는 σ_i가 작용할 경우의 하중반복수와 피로수명이며 σ_0는 정적인장강도이다.

한편 충격손상이 있는 복합재료에 일정진폭 피로하중이 작용하는 경우, 충격손상으로 인한 강도저하는 2단 블록하중의 첫 번째 블록하중에 의한 강도저하량에 등가 된다고 가정할 수 있으므로 이는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\sigma_0-\sigma_R=(\sigma_0-\sigma_1)\frac{n_1}{N_1} \tag{2}$$

여기서 σ_R은 충격손상 복합재료의 정적잔류강도로서 이는 정적잔류강도 예측모델 중에서 정확성과 적용성이 우수하다고 보고[8]되고 있는 식 (3)의 Caprion 모델[9]에 의해서 평가될 수 있다.

$$\frac{\sigma_R}{\sigma_0}=\left(\frac{E_{th}}{E_i}\right)^{\alpha} \tag{3}$$

여기서 E_{th}는 충격에너지 E_i의 하한계 값이며 α는 재료상수이다.

또한 충격손상을 가진 복합재료에 일정진폭 피로하중이 작용할 경우의 하중 및 파손조건은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_2=\sigma_{\max},\quad n_2=N_{imp} \tag{4}$$

식 (2)와 (4)를 식 (1)에 대입하고 N_2를 N_f로 일반화하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\sigma_0-\sigma_R}{\sigma_0-\sigma_{\max}}\right)=\frac{N_f-N_{imp}}{N_f} \tag{5}$$

여기서 N_f와 N_{imp}는 각각 충격손상이 없는 복합재료와 충격손상이 있는 복합재료에 일정진폭 피로하중 $\sigma_{\max}$가 작용할 경우의 피로수명이다.

식 (5)를 통하여 충격손상 복합재료에 일정진폭 피로하중이 작용하는 경우, 충격손상에 의하여 감소된 피로수명은 정적잔류강도로 구성된 관계식으로 표현됨을 알 수 있다. 따라서 좌변의 관계식은 피로수명에 미치는 충격손상의 영향을 의미하며 이는 충격손상 파라미터(impact damage parameter)로 정의될 수 있다.

$$[D_{imp}]_{THE}=\frac{\sigma_0-\sigma_R}{\sigma_0-\sigma_{\max}} \tag{6}$$

식 (6)에서 $[D_{imp}]_{THE}$는 정적잔류강도와 피로하중에 따라 0과 1 사이의 값을 가진다.

2.2 피로수명의 확률론적 해석

충격손상 복합재료의 피로수명은 손상의 크기와 피로하중에 따라 변화하므로[3] 이는 충격에너지와 피로하중의 함수로 표현될 수 있다.

$$N_{imp}=f(E_i,\sigma_{\max}) \tag{7}$$

그러나 이의 피로수명은 복합재료의 불균질성과 충격손상의 불확실성으로 인하여 많은 변동성을 나타내므로 이를 고려할 수 있는 확률변수 $Z(X)$를 도입하면 식 (8)과 같이 표현된다.

$$N_{imp}=Z(X)\cdot f(E_i,\sigma_{\max}) \tag{8}$$

여기서 $Z(X)$는 피로수명에 무관한 랜덤변수라고 가정하면, 이는 평균이 1이고 양의 값을 갖는 단순한 랜덤변수 Z로 나타낼 수 있다.

식 (8)의 양변에 대수를 취하고 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\Omega=\log Z=\log N_{imp}-\log f(E_i,\sigma_{\max}) \tag{9}$$

Z는 피로수명에 관계없는 랜덤변수로 가정하였으므로 식 (9)의 Ω는 평균이 0인 랜덤변수이

다. 이는 재료 및 충격손상의 변동성을 나타내므로 이의 확률적 특성은 일반적인 정규분포에 근사한다고 가정할 수 있다.

이와 같은 확률론적 특성을 갖는 Ω의 평균 μ_Ω과 표준편차 ψ_Ω를 이용하면 이의 신뢰도 (Reliability) $R(\Omega)$은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R(\Omega) = 1 - \Phi\left[\frac{\Omega - \mu_\Omega}{\psi_\Omega}\right] = 1 - \Phi\left[\frac{\Omega}{\psi_\Omega}\right] \qquad (10)$$

여기서 Φ는 표준정규분포의 누적함수이다.

따라서 신뢰도 $R(\Omega)$에 해당되는 충격손상 복합재료의 피로수명은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$N_{imp} = 10^{\psi_\Omega \Phi^{-1}[1-R(\Omega)]} \cdot f(E_i, \sigma_{\max}) \qquad (11)$$

3. 실험방법

3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 Carbon/Epoxy 적층 복합재료로서 일방향 프리프레그시트(prepreg sheet)를 적층하여 오토클레이브방법으로 제작하였다. 이에 사용된 적층복합재료의 기계적 특성은 ASTM D3039-93[8]의 규정에 따른 단축인장시험으로부터 구하였으며 그 값은 Table 1과 같다.

시험편의 형상은 판폭 W=20㎜, 길이 L=250㎜, 두께 B=2㎜이며, 적층순서는 $[0_4/90_8/0_4]$이다.

3.2 충격 및 피로시험

충격시험은 수평형 충격시험기를 제작하여 사용하였다. 시험편과 직접 접촉하는 충격체 팁(tip) 부분의 지름은 12.7㎜, 충격체의 총 질량은 57.2g이다. 이와 같은 충격시험기를 사용하여 충격손상으로 인한 정적잔류강도 저하량 평가를 위해 1J~6J의 범위의 충격에너지를 가하였다. 또한 충격손상 복합재료의 피로시험을 위해서는 2.6J과 3.4J의 충격에너지를 부과하였다. 이 때의 경계조건은 종방향 고정, 횡방향 자유지지조건이다.

한편 충격손상을 갖는 시험편과 손상이 없는 시험편의 정적잔류강도와 피로수명을 평가하기 위해 INSTRON Model 1332를 사용하였다. 이때 인장시험은 1㎜/㎜의 일정변위 속도 조건하에서 행하였으며 피로시험은 정현파 형태의 하중을 가하여 실시하였다. 이때, 주파수는 5~8Hz, 응력비 R은 0.01로 고정하였다.

Table 1 Mechanical properties of laminae

E_{xx} (GPa)	E_{yy} (GPa)	G_{xy} (GPa)	ν_{xy}
116.04	7.69	4.92	0.204

4. 실험결과 및 고찰

4.1 충격손상 복합재료의 피로수명 평가

Fig. 1은 복합재료의 피로수명에 미치는 충격손상의 영향을 검토하기 위하여 충격손상이 없는 경우와 2.6J 및 3.4J의 충격에너지에 의한 충격손상을 받은 경우의 피로시험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 복합재료의 피로수명은 충격손상으로 인하여 저하되고 있음을 알 수 있다.

이러한 충격손상의 영향은 식 (6)의 충격손상 파라미터를 통하여 평가될 수 있다. Fig. 2는 식 (6)에 의한 평가결과를 인장강도에 의해 정규화된 피로하중에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 실선과 점선은 각각 2.6J와 3.4J에 대한 식 (6)에 의한 예측 결과를 나타내며 중실점은 각각에 대한 실험결과이다. 이의 예측에 필요한 정적잔류강도는 식 (3)의 Caprion 모델[9]에 의한 예측결과를 사용하였다.

그림에서와 같이 충격손상 파라미터 식 (6)은 충격에너지에 상관없이 실험값과 일치하고 있으며 또한 충격에너지가 클수록 피로수명에 미치는 영향이 증가하는 거동을 잘 묘사하고 있다. 따라서 정적잔류강도 저하의 상사성을 이용한 충격손상 파라미터 식 (6)은 복합재료에 충격에너지가

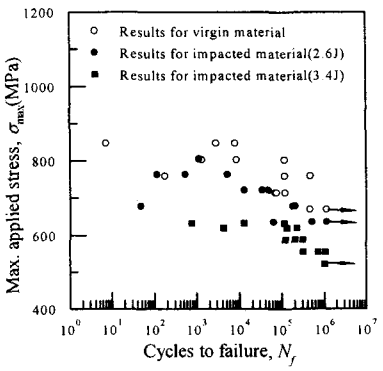


Fig. 1 Fatigue behavior of carbon/epoxy laminates with impact energy

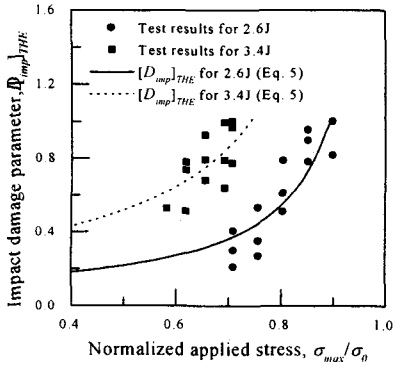


Fig. 2 Impact damage parameter

가해졌을 경우 피로수명에 미치는 충격손상의 영향을 평가할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 충격손상 파라미터를 이용하면 충격손상 복합재료의 피로수명을 예측할 수 있다. 즉 식 (6)을 식 (5)에 대입하고 이를 정리하면 충격손상 복합재료의 피로수명은 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{imp} = N_f(1-[D_{imp}]_{THE}) \tag{12}$$

식 (12)는 충격손상 파라미터 $[D_{imp}]_{THE}$와 손상이 없는 부재의 일정진폭 피로수명을 의미하는 N_f로 구성되어 있다. 여기서 $[D_{imp}]_{THE}$는 Fig. 2에서 이미 평가되었으므로 N_f에 대한 평가만 가능하다면 이들을 통하여 충격손상 복합재료의 피로수명을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

한편 $[D_{imp}]_{THE}$는 피로하중 σ_{max}가 복합재료의 정적잔류강도와 같아질 때 최대값에 이르게 되는 경계조건을 갖고 있다. 따라서 손상이 없는 부재의 일정진폭 피로수명 N_f에 대한 관계식이 식 (12)에 적용되었을 경우에도 이와 동일한 경계조건을 가져야 한다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 *S-N* 관계식이나 Basquin 식 등과는 다른 Hwang 등[11]의 예측식을 도입하였다.

$$N_f = p(1-\sigma_{max}/\sigma_0)^q \tag{13}$$

여기서 p와 q는 충격손상이 없는 복합재료의 피로수명으로부터 얻어지는 재료상수이다.

식 (6)과 (13)을 식 (12)에 대입하고 정리하면

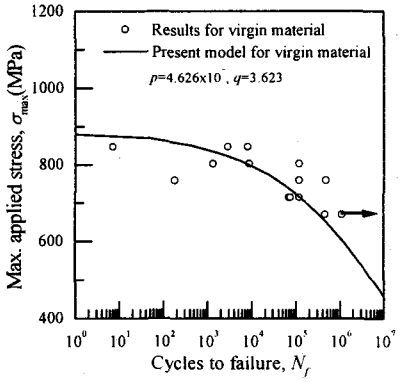


Fig. 3 Fatigue behavior of unimpacted laminates

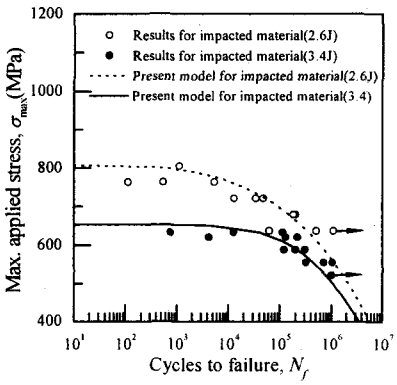


Fig. 4 Fatigue behavior of impacted laminates

다음과 같은 충격손상 복합재료의 피로수명 예측식을 얻을 수 있다.

$$N_{imp} = \frac{\sigma_R - \sigma_{max}}{\sigma_0 - \sigma_{max}} \cdot p\left(1-\frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}\right)^q \tag{14}$$

식 (14)를 이용하여 피로수명을 예측하기 위해서는 재료상수 p와 q가 필요하므로 먼저 손상이 없는 복합재료에 대한 피로시험을 실시하여 이들을 구하였다. Fig. 3은 이의 결과로서 p와 q는 각각 4.626×10^7과 3.623으로 평가되었다.

Fig. 4는 피로수명 예측모델 식 (14)가 충격손상을 가진 복합재료의 피로수명을 예측할 수 있는 가를 평가하기 위하여 2.6J 및 3.4J의 충격에너지를 받은 복합재료의 실험결과와 식 (14)에 의

Table 2 Parameters of present fatigue life prediction model, Eq. (14)

Parameters	0J	2.6J	3.4J
$\sigma_{R,i}$	σ_0(885.3MPa)	$\sigma_{R,1}$(816.0MPa)	$\sigma_{R,2}$(652.6MPa)
p	4.626×10^{7}	←	←
q	3.623	←	←

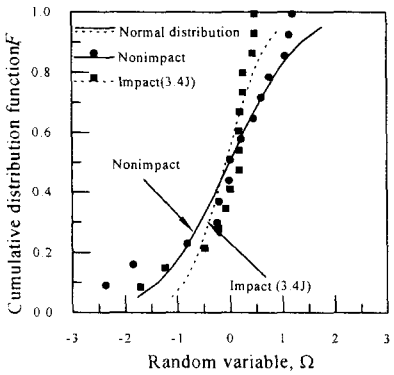
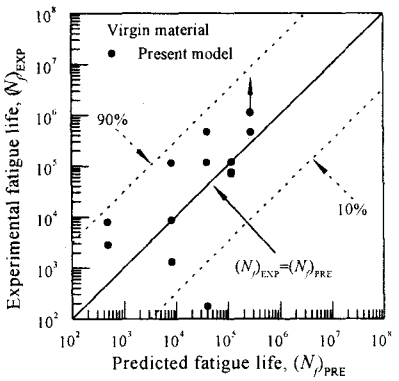
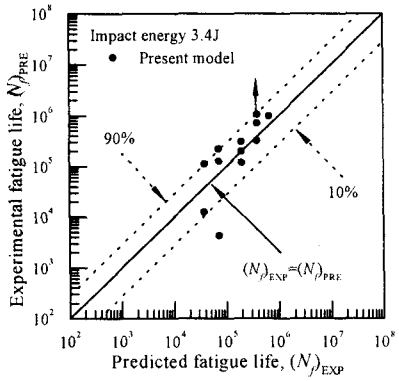


Fig. 5 Cumulative distribution function of random variable, Ω



(a) Virgin laminates



(b) Impacted laminates (3.4J)

Fig. 6 Fatigue life with reliability

한 예측결과를 함께 나타낸 것이다. 여기서 p와 q는 Fig. 3의 값을 사용하였으며 또한 정적잔류강도 σ_R은 식 (3)으로 평가하였다. 그림에서 본 모델에 의한 예측결과는 충격에너지의 크기에 관계없이 실험결과를 잘 묘사하고 있으며 이는 충격에너지의 크기에 상관없음을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 피로수명 예측모델 식 (14)는 Table 2에 정리된 충격손상으로 인하여 저하된 정적잔류강도와 손상이 없는 복합재료의 피로특성을 사용하면 충격손상 복합재료의 피로수명을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 피로수명의 확률론적 특성

복합재료의 피로수명에 대한 정확한 평가는 구조물의 안전성 및 신뢰성 향상을 위해 매우 중요하다. 그러나 Fig. 3과 4에서와 같이 피로수명은 흩어짐 현상을 보이고 있으며 또한 이는 충격손상의 정도에 따라 변화하고 있다. 따라서 피로수명의 변동성과 이에 대한 충격손상의 영향을 묘사하기 위해서는 확률론적인 해석이 요구된다.

충격손상 복합재료의 피로수명을 평가하기 위하여 제시된 식 (14)에 랜덤변수 Z를 도입하고 이의 양변에 대수를 취하면 다음과 같다.

$$\Omega_i = \log Z_i = \log N_{imp,i} - \log\left\{\frac{\sigma_R-\sigma_{\max}}{\sigma_0-\sigma_{\max}}\cdot p\left[1-\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0}\right]^q\right\} \qquad (15)$$

여기서 $i = 1, 2, \cdots, n$이다.

Fig. 5는 충격손상이 없는 경우와 충격손상이 있는 경우에 대하여 랜덤변수 Ω_i의 누적확률분포를 구하고 이의 대표적인 0J 및 3.4J에 해당되는 충격손상을 갖는 경우에 대하여 나타낸 것이

다. 그림에서와 같이 랜덤변수 Ω_i의 누적분포는 두 경우 모두 0을 중심으로 좌우 대칭적인 경향을 보이고 있으며 또한 누적확률분포곡선에 일치하고 있다. 따라서 Ω는 평균이 0인 정규분포를 따르는 랜덤변수라 할 수 있다.

이와 같은 랜덤변수 Ω의 통계적 특성과 식 (10)을 이용하면 임의의 신뢰도에 해당되는 피로수명을 구할 수 있으며 Fig. 6은 10% 및 90%의 신뢰도에 해당되는 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 예측결과는 실험결과를 잘 묘사하고 있으며 또한 충격손상이 있는 경우가 손상이 없는 경우보다 산포가 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상의 원인은 Tai 등[3]에 의해서 보고된 바와 같이 충격손상이 일종의 응력집중부의 역할을 하여 이로부터 피로파손이 야기되므로 피로수명의 변동성이 작아졌기 때문이라고 할 수 있다. 이를 명확히 평가하기 위하여 충격손상에 따른 랜덤변수 Ω의 분산 ψ^2_{Ω}를 구하고 이를 충격손상이 없는 경우의 분산 $\psi^2_{\Omega_0}$로 정규화 한 후, 이를 충격에너지 E_i에 대하여 나타내었다. Fig. 7은 이의 결과로서 충격에너지가 증가함에 따라 Ω의 분산은 지수적으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Carbon/Epoxy 적층복합재료의 피로수명에 미치는 충격손상의 영향을 평가하고 이의 피로수명 예측모델을 제안하였다. 또한 피로수명의 변동성을 고려할 수 있는 확률론적 모델을 제시하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

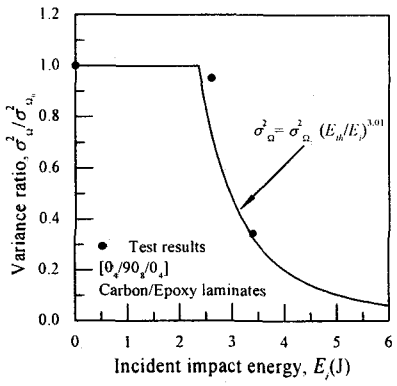


Fig. 7 Variance of random variable with impact energy

(1) 적층복합재료의 피로수명에 미치는 충격손상의 영향을 평가하기 위하여 정적인장강도와 정적잔류강도로 이루어진 충격손상 파라미터를 도입하였으며 이의 예측결과는 충격에너지에 상관없이 실험결과와 일치하였다.

(2) 충격손상 복합재료의 피로수명 예측모델은 충격손상으로 인한 정적잔류강도 및 손상이 없는 복합재료의 피로특성을 나타내는 상수로써 구축되었으며 이는 충격손상 복합재료의 피로수명을 예측함에 있어서 유용하였다.

(3) 피로수명의 변동성을 묘사하기 위하여 확률론적 모델을 제시하였으며 이는 피로수명의 변동성을 잘 묘사하고 있다. 또한 이로부터 평가된 피로수명의 변동폭은 충격손상이 심해질수록 감소하였다.

참고문헌

(1) Abrate, S., 1991, *Applied Mechanics Rev.* Vol. 44, No 4, pp 155~190

(2) Gray, T. D., 1975, *ASTM STP* 569, pp. 262~279

(3) Tai, N.H., Yip, M.C. and Lin, J.L., 1998, *Composites Science and Technology*, Vol. 58, No. 1, pp. 1~8

(4) Ramkumar, R. L., *ASTM STP* 813, pp 116~135

(5) Beheshty, M.H and Harris, B, 1998, *Composites Science and Technology*, Vol. 58, No. 1, pp. 9~18

(6) Broutman, L. J. and Sahu, S., 1972, *ASTM STP* 497, pp. 170~188

(7) Yang, J. N., 1977, *J. of Composite Materials*, Vol. 11, pp. 176~203

(8) 김정규, 강기원, 1999, 대한기계학회논문집 A권, 제23권, 제2호, pp. 294~303

(9) Caprino, G., 1984, *J. of Composite Materials*, Vol. 18, pp. 508~518

(8) ASTM D 3039-93, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Resin Composite"

(11) Hwang, W. and Han, K.S., 1989, *ASTM STP* 1012, pp. 87~102