

論文

등가강도 개념에 의한 탄소섬유 복합재료의 이축강도 및 피로수명 예측

이창수* · 황운봉*

Prediction of Biaxial Strength and Fatigue Life using the Concept of Equivalent Strength

C. S. Lee* and W. Hwang*

ABSTRACT

A failure criterion must be considered in each failure mode and loading condition to provide easy determining strength parameters, flexibility and rational simplicity. In this study, new failure criterion was developed by introducing equivalent strength under biaxial loading of tension and torsion. The experimental results showed that the equivalent biaxial strength has a power law relation with respect to a parameter, $\cos(\tan^{-1}R_b)$. Failure strength under biaxial loadings could be predicted as a function of tensile strength, torsional strength and biaxial ratio. The scattering of experimental data could be predicted using a Weibull distribution function and the concept of equivalent biaxial strength. Also, in this study, a fatigue theory was developed based on a plane stress model which enabled the S-N curve for combined stress states to be predicted from the S-N data for uniaxial loading. The prediction models can be predicted a biaxial strength and fatigue life of general laminated composite materials under multi-axial loadings.

초 록

복합재료의 파단식은 강도계수의 산정이 쉽고, 형상이 유연하며, 논리적인 단순성을 유지하기 위하여 각 파단모드와 하중조건을 고려하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 인장 및 비틀림의 이축하중에 대한 등가강도를 도입함으로써 새로운 파단식을 유도하였다. 이축 실험 결과는 등가이축강도가 $\cos(\tan^{-1}R_b)$ 의 지수함수로 표현됨을 보였다. 이축하중하의 파단강도는 일방향 인장강도 및 비틀림강도와 이축비의 함수로 예측할 수 있다. 실험 데이터의 산포성은 Weibull 분포함수와 등가이축강도 개념을 이용하여 분석하였다. 또한, 일방향 인장 및 비틀림 S-N 선도로부터 복합하중하의 S-N 선도를 구할 수 있는 피로해석법을 평면 응력 모델을 기반으로 개발하였다. 예측결과는 적층복합재료의 이축강도와 피로수명의 실험 데이터와 잘 일치하였다.

1. 서 론

적층판 복합재료의 활용성의 증대에 따라 다양한 하중조건에 대한 하중 지탱 능력의 평가가 요구되고 있

다. 따라서 복합재료를 이용한 구조 설계의 관점에서 이러한 복합재료의 강도를 손쉽게 예측할 수 있는 모델 개발의 필요성이 커지고 있다. 지금까지 문헌상에 발표된 파단식은 Fig. 1과 같이 분류할 수 있으며, 각

* 정회원, 포항공과대학교 기계공학과

각의 특성은 참고문헌 [1-6]에 잘 나타나 있다. 이들 식의 대부분은 실험결과를 추정하기 위하여 경험적으로 근사 시킨 현상학적인 이론으로 이의 절대적인 타당성을 증명할 수는 없으며, 특수한 형태의 시편을 이용한 실험에 의하여 검증될 수 있다. 여러 가지의 파단식 가운데 텐서형의 다항 판정식은 가장 널리 알려진 파단 판정식이다. 이들 중에서도 Tsai-Wu 판정식[7]은 가장 많이 이용되는 파단식이다. Tsai-Wu 파단식은 파단응력 및 파단변형률에 대한 각각의 고차 관계식으로 유도된다. 이러한 형태의 판정식들의 주요 장점은 식이 매우 간단하다는데 있다. 그러나 이들 판정식에도 몇 가지 제한이 있다. 첫째, 상호작용계수(interaction coefficient) F_{12} 를 단축 실험으로 측정하기가 어려우므로 통상 이축실험을 통해서만 구할 수 있는데 이 값은 이축실험 방법에 따라 다르고, 실험이 달라질 때마다 다른 파단포락선이 나온다. 따라서 파단선은 섬유강화 단층의 실험을 분석하기 위한 유일한 해석 기법을 제공해주지는 못한다. 둘째, Tsai-Wu 파단 판정식은 파단모드를 제대로 도식으로 나타낼 수 없다는 것이다. 셋째, 많은 연구자들은 일반적으로 단층 파단방정식으로 잘 알려진 Tsai-Wu 판정식은 모재파단이 적층판의 파단과 동시에 발생하거나 극한 적층판의 파단을 유발시킬 경우에만 극한 적층판 파단에 관한 판정식에 적용할 수 있다고 제안하고 있다. 최근, Kim 등[8]의 연구 결과에 의하면 인장강도보다 압축강도가 큰 경우에 있어서 Tsai-Wu 파단지수가 음의 값을 갖는 모순이 발생하게 되어 문제점으로 지적되고 있다.

이처럼 파단식은 역학적인 것이 아니라 현상학적이고 실험이나 경험에 의존하는 경향을 가지며, 복합재료의 경우에 강도의 함수로 표현되는 유일한 형태의 수학식은 존재하지는 않는다. 앞에서 언급한 Tsai-Wu 이론에서 상호작용계수 F_{12} 의 경우에도 결국 모사의 정확성을 제어하는 계수의 역할을 하게 된다. 따라서 복합재료의 파단식은 강도계수의 산정이 쉽고, 형상이 유연하며, 논리적인 단순성을 유지하기 위하여 각 파단 모드와 하중조건을 고려하는 것이 바람직하다. 다축 응력 하에서의 피로해석법은 일방향 복합재료에 대해서만 개발되어 있고, 여러 적층각도를 갖는 일반적인 복합재료에 적용할 수 있는 다축 하중 피로수명 예측 방법은 아직 발표되지 않았다[9].

본 연구에서 등가강도 개념을 도입하여 인장과 비틀림의 이축 하중 하에서 단지 하나의 재료 상수만을 갖는 파단식을 개발하였다. 복합재료는 동질의 재료들보

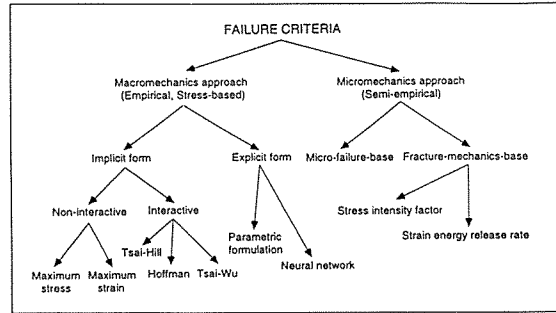


Fig. 1. Hierarchy of structural failure criteria

다 넓은 산포도를 가지므로 이러한 재료들로 구조물을 설계할 때 중요한 것은 매개 변수의 평균값뿐만 아니라 산포 범위도 고려해야 한다는 것이다. 본 연구에서 나타난 결과들은 Weibull 분포 함수를 사용해서 분석되었다. 본 연구의 또 다른 하나의 목적은 이축 하중 하에서 피로수명을 예측하는 해석적인 절차를 개발하는데 있다. 일방향 인장 및 비틀림 S-N 선도로부터 복합하중하의 S-N 선도를 구할 수 있는 피로해석법을 평면 응력 모델을 기반으로 개발하고 실험결과와 비교하였다.

2. 이론 전개

2.1 이축강도의 통계적 분석

재료의 강도는 log-normal이나 Weibull 분포함수에 의해 효과적으로 평가될 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 본 연구에서는 실험 데이터 분석을 위해 다음과 같이 표현되는 2-모수 Weibull 분포를 사용하였다[10].

$$F(X_i) = P(X \leq X_i) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X_i}{X_0} \right)^\alpha \right] \quad (1)$$

여기서 F 는 누적분포함수이며, X_i 는 실험치이며, X_0 는 규모모수(scale parameter)이며, α 는 형상모수(shape parameter)이다. 규모모수는 실험치의 평균값을 의미하며, 형상모수는 실험치의 분포정도를 잘 나타낸다. α 와 X_0 는 최소 자승법에 의해 결정되어질 수 있다. $F(X_i)$ 는 시편이 정하중을 받고 있을 때의 파단확률을 표시한다. 식 (1)은 각각 단축인장과 순수 비틀림 하중에 대해 다음과 같이 다시 쓰여질 수 있다.

$$F_{\sigma}(X_{\sigma}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X_{\sigma}}{X_{\infty}} \right)^{\alpha_{\sigma}} \right] \quad (2)$$

$$F_{\tau}(X_{\tau}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X_{\tau}}{X_{\infty}} \right)^{\alpha_{\tau}} \right] \quad (3)$$

여기서 첨자 σ 와 τ 는 각각 단축인장과 순수비틀림의 경우를 표시한다. 또한, 식 (2)와 (3)은 FRP가 이축하중을 받고 있는 경우에 대해 다음과 같이 확장되어 질 수 있다.

$$F_b(X_{bi}) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X_{bi}}{X_{bo}} \right)^{\alpha_b} \right] \quad (4)$$

여기서 기호 b 는 이축 상태를 표시한다. 엄밀한 의미에서 이축 강도 데이터 분석을 위해서는 두 개의 변수를 갖는 함수가 적절하나[11], 이 경우에 필요한 2-변수 확률밀도함수(two-variable probability density function)를 구하기 위하여 매우 많은 실험 데이터를 확보해야 하기 때문에 본 연구에서는 이축강도를 하나의 변수로 처리하였다. 각각의 하중비를 이용하여 적절하게 다축 강도를 표현하기 위해서 von-Mises 형의 등가강도(equivalent strength)의 개념을 도입하고 이축강도에 대해 다음과 같이 X_{bo} 를 정의하였다.

$$X_{bo} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \tau \sqrt{R_b^2 + 3} \quad (5)$$

여기서 R_b 는 축방향응력(수직응력) σ 와 비틀림 응력(전단응력) τ 의 비로써 정의되는 이축 하중비(biaxial ratio)이다. X_{bi} 도 같은 방법으로 정의할 수 있으며, 등가응력은 항상 양의 부호를 가진다. 식 (5)로부터 등가전단응력(equivalent shear stress)은 $\tau_{eq} = \sqrt{3} \tau$ 와 같이 정의되어질 수 있다. 등가전단응력이 일반 전단응력 대신 사용되어질 때 Weibull 분포가 이축 하중시 전단효과를 더 잘 고려해주기 때문에 데이터들이 더 잘 맞는 결과를 보였다. 식 (2)에서 X_{∞} 는 σ_f (인장강도)이고, 식 (3)에서 X_{∞} 는 $\tau_{eq, f}$ (등가전단강도)가 된다. 이축강도는 인장 및 비틀림 강도뿐만 아니라 이축비 등에 영향을 받는 반면 형상변수는 파괴모드의 변화가 발생하는 이축비에 많이 의존한다[5]. 따라서 이축 실험 데이터에 대한 Weibull 매개변수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$X_{bo} = X_{bo}(\sigma_f, \tau_f, R_b) \quad (6)$$

$$\alpha_b = \alpha_b(R_b) \quad (7)$$

임의의 R_b 에 대해서 파괴확률분포와 이축강도를 예측하는데 모델의 목적을 두고, 등가 이축 강도는 실험 데이터를 기반으로 다음과 같은 지수형의 관계를 가지는 것으로 가정하였다.

$$X_{bo} = U [k \cos(\tan^{-1} R_b) + 1]^v \quad (8)$$

여기서 $(\tan^{-1} R_b)$ 는 σ - τ 평면상에서 파괴벡터의 길이와 전단응력의 비를 나타내는 매개변수이다. 그리고 U, V, k 는 재료상수들이며, U 와 V 는 다음과 같은 2개의 경계조건들에 의해 구해질 수 있다.

$$X_{bo} = \tau_{eq, f} \quad \text{for } R_b = 0 \quad (9a)$$

$$X_{bo} = \sigma_f \quad \text{for } R_b = \infty \quad (9b)$$

식 (8)에 식 (9)를 적용하면 U 와 V 는 다음과 같다.

$$U = \sigma_f \quad \text{and} \quad V = \log_{k+1} \left(\frac{\tau_{eq, f}}{\sigma_f} \right) \quad (10)$$

따라서 등가 이축강도는 재료에 따라 변화할 수 있는 k 의 값을 선택함으로써 얻어질 수 있다. 식 (7)에 가정된 형상변수는 다음과 같이 가정하였다.

$$\alpha_b = u \exp [v \cos(\tan^{-1} R_b)] \quad (11)$$

여기서 u 와 v 는 실험으로 구할 수 있는 재료상수들이다. 식 (8)은 다음과 같이 등가전단응력에 대한 이축비의 함수로써 다시 쓸 수 있다.

$$\tau_{eq} = \frac{\sqrt{3} U}{\sqrt{R_b^2 + 3}} \left[\frac{k}{\sqrt{R_b^2 + 1}} + 1 \right]^v \quad (12)$$

따라서 인장 및 비틀림의 이축 하중 하에서의 파괴강도는 다음과 같이 예측되어 질 수 있다.

$$\tau^* = \frac{\sigma_f}{\sqrt{R_b^2 + 3}} \left[\frac{k}{\sqrt{R_b^2 + 1}} + 1 \right]^{\log_{\dots} \left(\frac{\tau_{\sigma, f}}{\sigma_f} \right)} \quad (13a)$$

$$\sigma^* = R_b \tau^* \quad (13b)$$

파괴지수(FI) 형태는 식 (13)을 이용해서 만들 수 있다. 이는 현재 파손 벡터의 길이 대 파단시의 파괴 벡터의 길이의 비로 정의된다. 새로운 FI 가 다음과 같이 제시될 수 있다.

$$FI = \frac{1}{\sigma_f} \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \left[\frac{k}{\sqrt{R_b^2 + 1}} + 1 \right]^{\log_{\dots} \left(\frac{\sigma_f}{\tau_f} \right)} \quad (14)$$

FI 가 1과 같거나 더 클 때 파단이 발생한다. 이러한 파괴지수는 이축하중하의 파괴예측뿐만 아니라 응력 상태의 지수로서도 사용될 수 있다. 대부분의 간접형 파괴기준이 단축을 기준으로 유도되는 반면 여기에 제시한 실험적 모델은 적층판 파괴에 바로 적용되어 질 수 있다. 식 (14)는 Hashin [2]에 의해 제안된 파단식의 일부를 대신하는 파괴기준으로 사용될 수 있다.

2.2 피로 파단식

여기서 단축 피로 실험 결과로부터 이축 피로 수명을 예측할 수 있는 해석방법을 제안하고자 한다. 이러한 해석법의 중요한 가치는 이축 하중들에 대한 피로 시험의 양을 줄이는데 있다. 이는 식 (13)을 정적 거동뿐만 아니라 피로를 포함하는 식으로 확장하기 위하여 정적강도를 피로주기의 함수로 대체함으로써 가능하다. 정적강도 저하식으로 정의될 수 있는 $\sigma_f(N)$ 과 $\tau_f(N)$ 을 식 (13)에 대입하면 $\tau^*(N)$ 과 $\sigma^*(N)$ 을 얻게 되고, 이를 이용하여 비율 하중에서 응력비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \frac{\tau^*(N)}{\tau^*} = \frac{\sigma^*(N)}{\sigma^*} \quad (15)$$

여기서 N 은 임의의 가한 응력수위에서의 피로수명이다. 식 (13)과 식 (15)로부터 다음과 같은 피로파단식을 얻을 수 있다.

$$q(N) = q_{\sigma}(N) \left[\frac{k}{\sqrt{R_b^2 + 1}} + 1 \right]^{\log_{\dots} \left(\frac{q_{\tau}(N)}{q_{\sigma}(N)} \right)} \quad (16)$$

여기서 $q_{\sigma}(N)$ 과 $q_{\tau}(N)$ 은 각각 단축 인장 및 비틀림 피로실험에서 얻을 수 있는 S-N 곡선으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q_{\sigma}(N) = a + b \log N \quad (17a)$$

$$q_{\tau}(N) = c + d \log N \quad (17b)$$

여기서 a, b, c 와 d 는 재료상수들이다. 식 (17)과 같은 단축 피로실험 결과가 주어졌을 때, 비율 피로하중 작용시의 피로수명을 식 (16)과 같은 이축하중비의 함수로 구할 수 있다. 식 (16)에 $R_b = \infty$ 을 대입하면 식 (17a)가 되고, $R_b = 0$ 을 대입하면 식 (17b)가 된다.

3. 실험방법

본 연구에서 복합재료 튜브는 겹침법(lapped moulding technique)[5]을 이용하여 제조하였다. 섬유는 T300 grade 탄소섬유이며, 에폭시 레진을 모재로 사용하였다. 섬유의 체적율(volume fraction)은 약 58%였다. 제조된 튜브를 100mm 간격으로 자른 후 외경이 30mm이고, 길이가 35mm인 glass cloth end-tab을 튜브의 바깥 부분에 접착시켜 시편을 제조하였다.

축 및 비틀림 실험이 가능한 MTS 시스템을 이용하여 일축 및 이축 실험을 하였다. 순수 인장 실험에서는 단위분당 1mm씩 그리고 순수 비틀림 실험일 때는 단위분당 0.12도로 변위가 일어나는 일축 실험을 하였다. 이축 실험일 때는 이축비를 제어하기 위해서 인장 하중과 비틀림 하중 조절모드를 채택하였다. 인장 실험 시 100 ~ 500N/sec로, 압축 실험일 때는 100 ~ 250N/sec로 하중률을 주었다. 비틀림 하중에서의 하중률은 이축비에 따라 다르게 주었다. 로드셀(load cell)로 실험 데이터를 측정하였고 PC-LAB DAS 소프트웨어를 이용하여 컴퓨터 메모리에 기록하였다. 본 연구에서는 $R_b = \infty$ (일축 인장), 20/1, 10/1, 5/1, 2/1, 1/1, 0/1(순수 비틀림) 등 7개의 이축비가 이용되었다. 각각의 이축비에 대해서 5개 정도의 시편을 실험하였다. 피로 진동수는 0.25-2Hz이며, 응력수위는 강도의

Table 1. Experimental data and Weibull parameters

Biaxial ratio (R_b)	Data scatter(MPa)		Average (MPa)		Number of specimens	Shape parameter (α)	Scale parameter(MPa) (X_0)
	Axial	Shear	Axial	Shear			
0	.	81-102	.	87.5	6	10.747	158.25
1	105-119	101-113	113.8	108.6	5	21.676	224.70
2	228-307	113-151	266.4	131.2	5	9.214	367.47
5	523-573	102-114	554.4	108.4	5	26.746	595.92
10	628-720	62-71	656.8	65.2	5	15.744	686.78
20	687-716	34-35	706.0	34.8	4	51.109	715.24
∞	692-749	.	723.6	.	5	31.837	734.51

60-90%가 되도록 하중제어 모드에서 제어하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 강도데이터의 통계적 분석

강도분포에서 실험적 파단확률 $F(X_i)$ 은 다음과 같이 중앙 순위(median rank)로 주어졌다.

$$F(X_i) = \frac{Q_i - 0.3}{Q + 0.4} \quad (18)$$

여기서 X_i 는 i 번째 시편의 실험강도를 표시하고, Q 와 Q_i 는 각각 데이터 포인트의 총 갯수와 파단순위이다. 이축강도 실험 데이터의 분산을 Table 1에 나타내었고, 이는 Weibull 분포함수를 사용하여 분석되어졌다. 식 (1)을 다시 쓰면 다음과 같이 주어진다.

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F} \right) \right] = \alpha \ln(X_i) - \alpha \ln(X_0) \quad (19)$$

따라서 식 (19)가 나타내는 그림은 선형적이고, 기울기는 실험데이터의 상대분산을 나타낸다. Fig. 2는 실험을 수행한 이축비에 대하여 대수 강도 데이터와 파단강도의 관계를 보여주고 있다. 이축비 2와 10에 대한 데이터들이 다른 이축비에서 보다 더 넓은 분포를 가지고 있음을 관찰할 수가 있다. 그러나 더 정확한 비교를 위해서는 평균강도의 크기가 고려되어야 하므로 Table 1에 주어져 있는 Weibull 모수들을 비교해 보아야 한다. R_b 가 0, 2, 10인 경우에 형상모수(shape parameter)가 비교적 작으므로 데이터들이 보다 넓게 분포되어 있음을 알 수 있다.

4.2 이축강도예측

등가이축강도는 식 (8)에 따라 Fig. 3에 나타난 바와 같이 매개변수 $\cos(\tan^{-1}R_b)$ 의 함수로 감소한다. 등가이축강도의 모델은 Fig. 3에서 보여지는 것처럼, A, B 혹은 C의 세 가지 유형으로 대별할 수 있다. 본 연구에서 행한 실험결과들은 유형 A의 지수법칙을 따르는 것으로 가정할 수 있다. Fujii 등[12]의 실험 결과는 유형 B의 지수법칙(선형관계)을 따른다.

식 (11)에서 가정된 형상변수는 다음처럼 얻어진다.

$$\alpha_b = 29.429 \exp [-1.026 \cos(\tan^{-1}R_b)] \quad (20)$$

식 (8), 식 (10) 및 식 (20)을 식 (4)에 대입하면 이축시험에 대한 Weibull 분포는 Fig. 4에 보인 것처럼 예측될 수 있다. 예측 결과를 살펴보면 낮은 이축비에서는 실험데이터와 잘 일치하지만, 높은 이축비에서는

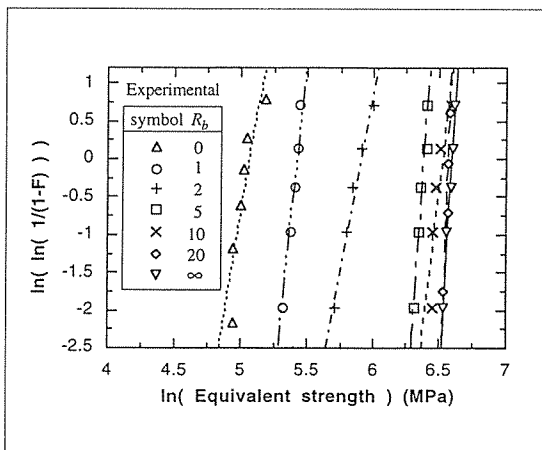


Fig. 2. Rearranged Weibull distribution of biaxial equivalent strength at various biaxial ratios

약간의 편차가 존재한다. Fig. 5에서 식 (13)을 이용한 예측 결과와 비교하였다. 본 연구에서 제안된 모델이 Tsai-Wu이론 보다 실험데이터를 더 잘 예측할 수 있음을 보여 준다. 제안된 식에서 상수 k 는 SAS 프로그램[13]을 사용하여 평가되었으며, 0.1012의 값을 갖는다. 제안된 모델과 Tsai-Wu이론의 SSR(residual sum of square)은 각각 0.0301과 0.1198이다. Fig. 6에서 wet winding 기법으로 만들어진 평직유리섬유/폴리에스테르(plain woven glass cloth/polyester)를 이용한 Fujii 등[12]의 정하중 이축 실험데이터를 예측 결과와 비교하였다. Fig. 6에 대한 입력 강도데이터와 k 값은 다음과 같다.

$$\sigma_f = 224.3 \text{ (MPa)}$$

$$\tau_f = 76.8 \text{ (MPa)}$$

$$k = -0.6576$$

예측 결과는 비교적 이축 하중하에서 측정된 실험데이터와 잘 일치한다.

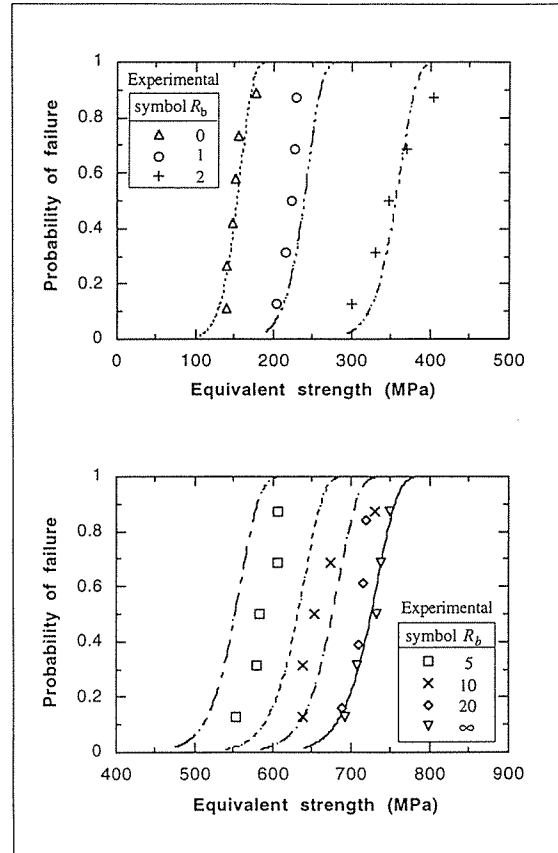


Fig. 4. Theoretical prediction of failure probability and experimental data at various biaxial ratios

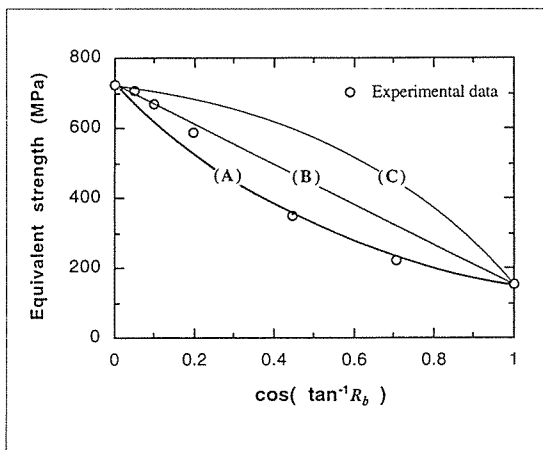


Fig. 3. Plots of equivalent strength with biaxial ratios

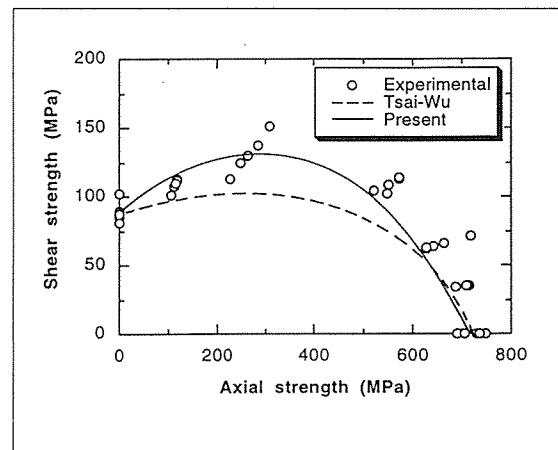


Fig. 5. Comparison of predictions with biaxial strength data

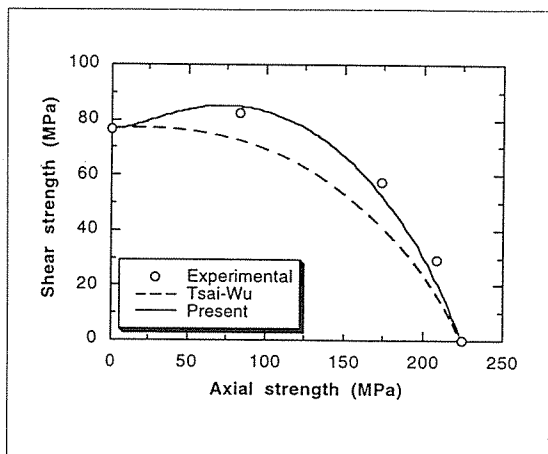


Fig. 6. Comparison of the prediction with the experimental data of Fujii et al.[12] for plain woven glass cloth/polyester

4.3 피로수명예측

Fig. 7에 이축비에 따른 피로 실험 결과를 나타내었다. S-N 곡선의 기울기는 이축비가 클수록 감소하는데, 이는 시편 길이 방향으로 배열된 탄소섬유의 높은 피로강성 때문에 이축비에 따라 피로수명이 증가하기 때문이다. Fig. 8에 $R_b = \infty$ 와 0에 대해 실험데이터와 S-N 곡선을 보였다. 식 (17)의 상수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a &= 1.0194 & b &= -0.04426 \\ c &= 0.8483 & d &= -0.06272 \end{aligned}$$

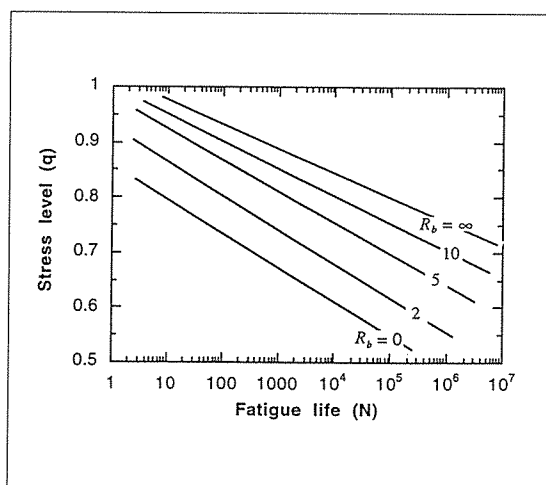
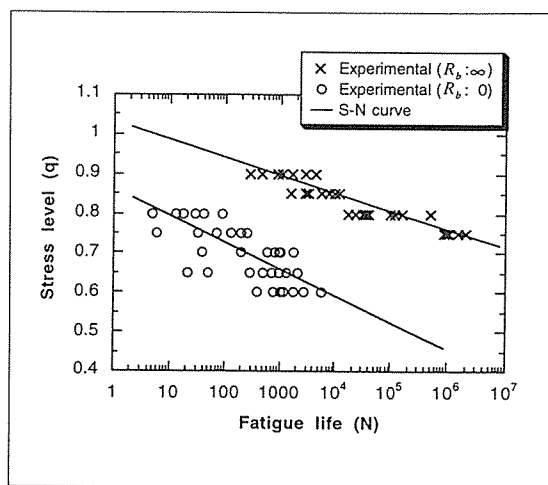
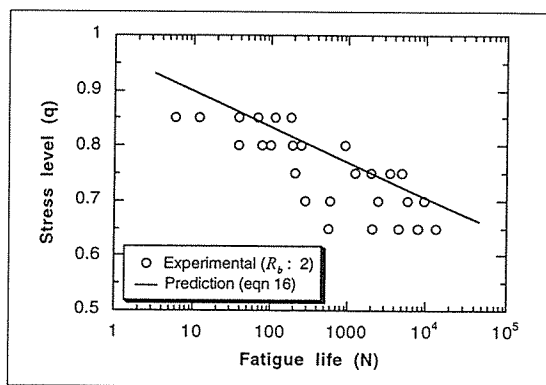


Fig. 7. S-N data at various biaxial ratios

식 (16)을 사용하여 다양한 이축비하에서 CFRP시편의 피로수명을 예측하였으며, 계산 결과를 Fig. 9부터 Fig. 11에서 실험데이터와 비교하였다. 작은 이축비에서는 약간의 오차가 있으나, 전체적으로 실험데이터와 비교적 좋은 상관관계를 보이고 있다. 식 (16)을 이용하여 모든 이축비에 대해서 일정 피로 수명곡선을 σ - τ 평면상에 나타내면 Fig. 12와 같다. 본 연구를 통하여 제안된 예측식과 해석법은 복합재료 비전공자가 복합재료를 이용하여 구조강도설계 및 안전수명설계 (safe life design)를 하려고 할 때 편리한 기초자료를 제공할 수 있다.


 Fig. 8. Experimental data and S-N curve for $R_b = \infty$ and 0

 Fig. 9. Comparison of the prediction with the experimental data for $R_b = 2$

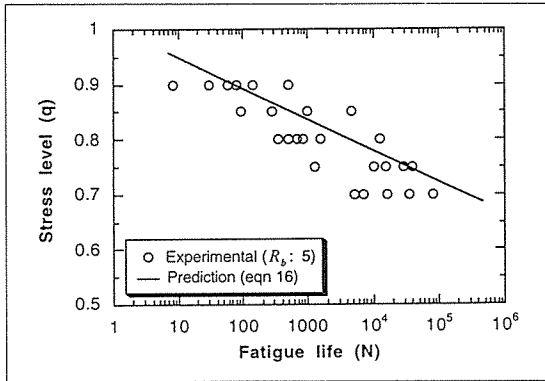


Fig. 10. Comparison of the prediction with the experimental data for $R_b = 5$

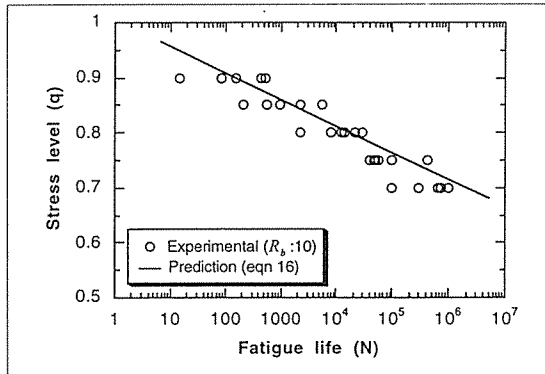


Fig. 11. Comparison of the prediction with the experimental data for $R_b = 10$

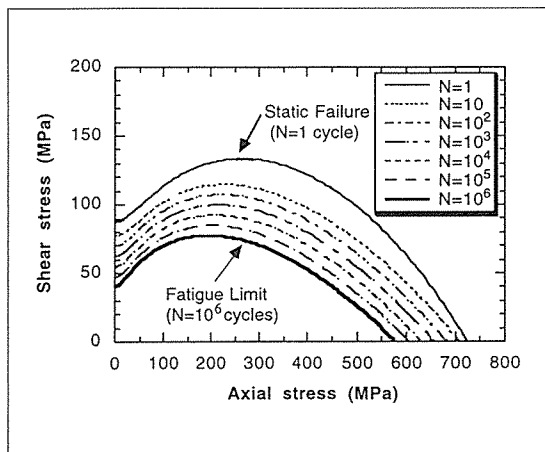


Fig. 12. Fatigue life contours predicted under biaxial cyclic loadings

5. 결 론

본 연구에서 이축강도와 피로수명을 예측하기 위해서 등가강도 개념을 도입하였다. 실험을 통하여 등가이축강도가 매개변수 $\cos(\tan^{-1}R_b)$ 에 관해서 지수 함수 관계를 가진다는 것을 밝혔으며, 인장과 비틀림의 이축하중하의 파단강도는 인장강도, 비틀림강도, 이축비 등의 함수로서 예측될 수 있었다. 제안된 파단식을 이용하여 예측된 이축강도는 실험데이터와 비교적 잘 일치하였다.

정적강도저하식을 이용하여 이축강도식을 피로수명 예측을 위하여 확장함으로써 일축하중하의 피로함수 $\sigma_f(N)$ 과 $\tau_f(N)$ 로부터 다양한 이축비에서의 피로수명 예측이 가능하였으며, 이는 실험데이터와 좋은 상관관계를 보여주었다.

후 기

본 연구는 1998년도 과학재단 핵심전문연구과제(과제번호: 981-1003-021-2)의 일부 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Rowlands, R. E., "Strength (Failure) Theories and Experimental Corelation," Handbook of Composites (Vol.3): Failure Mechanics of Composites, G. C. Sih and A. M. Skudra, eds., North-Holland-Amsterdam, New-York, Oxford: Elsevier Science Publishers, Vol. 2, 1985, pp. 71-125.
2. Hashin, Z., "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites," J. Applied Mechanics, Vol. 47, 1980, pp. 329-334.
3. Swanson, S. R. and Christoforou, A. P., "Response of Quasi-isotropic Carbon/Epoxy Laminates to Biaxial Stress," J. Comp. Mater., Vol. 20, 1986, pp. 457-471.
4. Labossiere, P. and Neale, K. W., "A General Strength Theory for Orthotropic Fiber-Reinforced Composite Laminates," Polymer Composites, Vol. 9, No. 5, 1988, pp. 306-317.
5. Lee, C. S., Hwang, W., Park, H. C. and Han, K. S., "Static Strength and Failure Mechanism of

CFRP under Biaxial Loadings," *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 34, No. 1, 1998, pp. 38-56.

6. Echaabi, J. and Trochu, F., "A Methodology to Drive the Implicit Equation of Failure Criteria for Fibrous Composite Laminates," *J. Comp. Mater.*, Vol. 30, 1996, pp. 1088-1114.

7. Tsai, S. W. and Wu, E. M., "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *J. Comp. Mater.*, Vol. 5, 1971, pp. 58-80.

8. Kim, C. W., Song, S. R., Hwang, W., Park, H. C. and Han, K. S., "On the Failure Indices of Quadratic Failure Criteria for Optimal Stacking Sequence Design of Laminated Plate," *Applied Composite Materials* Vol. 1, 1994, pp. 81-85.

9. Fawaz, Z. and F. Ellyin, "Fatigue Failure

Model for Fibre-Reinforced Materials under General Loading Conditions," *J. Comp. Mater.*, Vol. 28, 1994, pp. 1432-1451.

10. Weibull, W., "Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *J. Appl. Mech.*, 1951, pp. 293-297.

11. Hogg, R. V. and Tanis, E. A., *Probability and Statistical Inference*, 1989.

12. Fujii, T., Amijima, S. and Lin, F., "Study on Strength and Nonlinear Stress-strain Response of Plain Woven Glass Fiber Laminates under Biaxial Loading," *J. Comp. Mater.*, Vol. 26, 1992, pp. 2493-2510.

13. Cary, N. C., *SAS user's guide : Statistics*, Version 6 ed., SAS Institute, 1987.