

조합하중을 받는 Kraft 판지의 강도예측

Strength Prediction of Kraft Paperboard under Combined Stress

임 원 균† 정 우 길*
Lim, Won-Kyun Jeong, Woo-Kil

요 지

본 논문에서는 Tsai-Hill기준을 변형하여 조합하중을 받는 이방성재료의 강도를 정확히 예측할 수 있는 새로운 파손기준을 제안하였다. 이 기준의 유효성은 조합하중을 받고 있는 Kraft 판지에 대한 실험결과와 비교하여 나타내었다. 재료축 방향의 전단응력이 주어진 경우, Tsai-Hill기준은 매우 보수적인 결과를 보여주고 있으나, 본 해석에서 제안한 기준은 실험결과와 잘 일치하고 있다. 또한 Tan-Cheng기준과 비교하여 강도를 더욱 단순하게 해석할 수 있는 능력을 갖고 있다.

핵심용어 : 파손기준, 이방성재료, 2축강도, 조합응력

Abstract

Based on the form of the Tsai-Hill criterion, a new failure criterion for anisotropic material subjected to combined stress is developed and demonstrated. It is capable of accurately calculating the strength of anisotropic materials. The generality and accuracy of the present failure criterion are illustrated by examination through the use of Kraft paperboards under various loading conditions. Compared to the Tsai-Hill theory, which is much too conservative at high levels of shear stress, the present criterion has a good agreement with the experimental data. It also has the ability to calculate the strength more simply, compared to the Tan-Cheng theory.

Keywords : failure criterion, anisotropic material, biaxial strength, combined stress

1. 서 론

복잡한 응력을 받고 있는 이방성재료에서 재료강도를 정확히 예측하는 일은 이들을 구성요소로 하는 재료 구조물의 설계 또는 파괴에 대응한 설계에서 매우 중요하다. 그러나 재료가 2축수직응력과 전단응력 등 여러 하중을 동시에 받는 경우에 강도계산을 실험실에서 수행하는 일은 경제적으로나 기술적으로 매우 어려운 일이다. 특히 2축수직응력이 주어진 경우에서보다도 전단응력이 함께 주어진 경우에 더욱 그렇다. 더욱이 이러한 조합하중 하에서 이방성재료의 실험을 수행할 수 있는 시험장비를 보유한 연구실도 많지 않다. 비록 단순하중 실험은 비교적 쉽게 수행할 수 있다고 하더라도, 이의 결과는 복잡한 하중에서의 재료강도를 나타내 주지는 않는다. 그러므로 이들 재료구조물을 공학적으로 설계하는 문제에서는 조합하중 하에서의 파손강도거동에 대한 연구를

필요로 한다(Rowlands, 1985; Daniel, 2006; 2008).

이런 목적으로 개발된 이방성재료의 파손강도기준은 일반적으로 응력 또는 변형률을 기초로 하고 있다. 여기에는 미시적 관점과 거시적 관점에 의한 해석으로 나눌 수 있다. 미시적 관점에 의한 해석(Gutkin 등, 2010; Pimenta 등, 2009; Hashin, 1985; Hahn 등, 1986)은 재료를 비균질한 것으로 생각하여 해석을 수행하는 것으로서 섬유나 에폭시 레진 같은 재료 구성요소의 거동을 고려한다. 한편 거시적 관점에 의한 해석(Kim 등, 2009; Daniel 등, 2005; 2009; Tan 등, 1993)은 재료를 균질이방성인 것으로 생각하고 응력장 해석을 수행하여 파손을 예측, 평가하는 것으로서 인장강도와 전단강도 같은 재료특성치를 이용한다. 일반적으로 미시적 관점의 파손해석에서는 재료를 비균질성으로 생각해야 하기 때문에 파손과정을 보다 정확히 나타낼 수 있다. 그러나 해석과정이 복잡하므로 이의 해법은 작용하중이

† 책임저자, 정회원 · 명지대학교 기계공학과 교수
Tel: 031-330-6422 ; Fax: 031-330-6957
E-mail: limwk@mju.ac.kr

* 명지대학교 기계공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

간단하거나 비교적 단순한 이방성재료에만 한정되어 있다. 그러나 공학해석과 설계의 과정에서 이와 같은 자세한 기구는 필요하지 않으므로, 재료가 균질하다고 가정하는 거시적 해석은 공학문제의 적용에서 해석의 단순화를 이룰 수 있는 실용적인 방법이라고 생각할 수 있다.

이방성재료의 강도예측을 위한 여러 가지 파손강도이론이 제시 (Linero, 2002)되어 있으며, WWFE(World-Wide Failure Exercise)에서는 기존이론의 강점과 약점에 대하여 분석하였다(Hinton 등, 2004). 일반적으로 Tsai-Wu 기준이 균질 이방성재료의 강도예측에 비교적 정확한 것으로 알려져 있으며, 널리 사용되고 있다. 그러나 이 기준의 중요한 문제점은 기준식에 나와 있는 응력상호작용항을 어떻게 결정하느냐에 있다. 이를 구하기 위해서는 2축하중실험을 해야 하는 어려움이 있다(Wu, 1972). 이와 비교하여 Tsai-Hill기준은 단순하중을 받는 재료의 강도와 전단강도만을 필요로 하므로 파손해석이 비교적 간편하다. Tsai-Hill기준의 유효성은 Kraft 판지에 대한 Rowlands 등의 실험결과(Rowlands 등, 1985)와의 비교로 이루어졌다. 일반적으로 전단응력이 작은 경우에는 실험결과와 비교적 일치하는 결과를 보여주고 있으나, 전단응력이 큰 값을 가질 수록 보수적인 결과를 보여준다.

한편 Tan-Cheng은 경사각을 가진 이방성재료의 강도를 코사인급수로 나타낼 수 있음을 제안(Tan 등, 1993)하였으며, 이의 재료강도를 이용하여 2축하중을 받는 이방성재료의 강도를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 이는 Tsai-Wu 기준을 변형한 것으로서 실험결과와 비교적 일치하는 결과를 보여준다. 그러나 인장-인장, 압축-인장, 압축-압축, 인장-압축의 각 상한마다 독립적인 응력상호작용항을 얻기 위하여 적어도 3개씩의 2축하중실험을 수행해야 하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 Tsai-Hill기준을 변형하여 섬유각을 가진 이방성재료가 2축으로 수직하중을 받는 경우의 파괴기준을 제안한다. 이는 섬유각에 따라 변화하는 재료강도를 이용하여 나타내었다. 여기서는 실험적으로 구하기 힘든 재료의 전단강도는 필요하지 않으며, 오로지 섬유각을 가진 이방성재료의 강도와 축방향의 강도만이 필요하다. 이로부터 해석의 단순화를 이룰 수 있다. 해석결과는 2축하중의 실험으로부터 얻어진 값(Rowlands 등, 1985; Gunderson 등, 1986; Suhling 등, 1985)과 Tan-Cheng기준식(Tan 등, 1993)과 비교하여 나타내었다.

2. Tan-Cheng 기준식

섬유이방성재료의 좌표계를 그림 1에 나타내었다. 여기서 θ 는 x 축으로부터의 섬유각을 나타내며 σ_x 는 멀리서 작용하

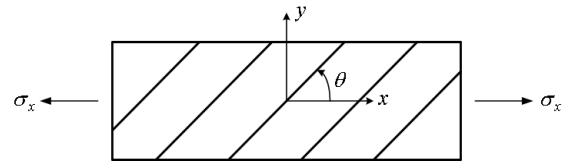


그림 1 이방성평판의 좌표계

는 수직응력이다. 이러한 이방성재료의 강도는 섬유각 θ 에 따라 주기적인 변화를 보인다. Tan-Cheng은 섬유방향에 대한 재료강도의 대칭성을 고려하여 강도함수를 다음과 같은 코사인급수로 나타내었다(Tan 등, 1993).

$$X_{\theta} = \left(\sum_{n=0, 2, 4, \dots} C_n \cos n\theta \right)^{-1} \quad (1)$$

위의 식에서 X_{θ} 는 섬유각 θ 를 가진 이방재료에서 x 방향의 강도를 나타낸다. 여기서 θ 는 $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ 의 범위를 가진다. 이 코사인급수에서 전개되는 n 의 개수에 따라 재료강도의 정확도가 결정된다. Tan 등은 $n=3$ 으로 취한 경우에 만족할 만한 결과를 얻을 수 있음을 보여 주었다. 이때 X_{θ} 는 다음과 표시된다.

$$X_{\theta} = (C_0 + C_2 \cos 2\theta + C_4 \cos 4\theta)^{-1} \quad (2)$$

위의 식에서 계수인 C_0, C_2, C_4 를 구하기 위하여 다음과 같은 조건에서의 재료특성치를 이용하였다. 즉, 섬유방향의 인장강도 X_T , 섬유직각방향의 인장강도 Y_T 그리고 30°섬유각의 인장강도 U_T 또는 45°섬유각의 인장강도 V_T . 이들을 식 (2)에 적용한 결과는 다음과 같다.

$$\theta = 0^\circ (X_0 = X_T) : C_0 + C_2 + C_4 = \frac{1}{X_T}$$

$$\theta = 90^\circ (X_{90} = Y_T) : C_0 - C_2 + C_4 = \frac{1}{Y_T}$$

$$\theta = 45^\circ (X_{45} = V_T) : C_0 - C_4 = \frac{1}{V_T}$$

위의 식을 연립하면 풀면 계수들은 다음과 같이 주어진다.

$$C_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{X_T} + \frac{1}{Y_T} + \frac{2}{V_T} \right) \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{Y_T} \right)$$

$$C_4 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{X_T} + \frac{1}{Y_T} - \frac{2}{V_T} \right)$$

만약 $n=2$ 이면 두 가지 재료강도 X_T, Y_T 를 이용하여 계수를 구할 수 있으며, 이의 결과는 Hankinson의 파손식과 일치한다. 섬유각을 가진 이방성재료의 압축강도인 X_θ^i 의 완전식도 위와 비슷한 방법으로 구할 수 있다.

Tsai-Wu 텐서다항식과 대칭성을 고려하여 Tan-Cheng은 다음과 같은 2차원 조합하중에서의 강도기준을 제안하였다.

$$\left(\frac{\sigma_x}{X_\theta^i}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{Y_\theta^i}\right)^2 - \left[\sum_{n=0,2,4,\dots} a_n \cos n(|\theta|-45)\right] \left(\frac{\sigma_x}{X_\theta^i}\right) \left(\frac{\sigma_y}{Y_\theta^i}\right) = 1 \quad (4)$$

σ_x, σ_y : x, y 방향의 수직응력

X_θ^i, Y_θ^i : x, y 방향의 재료강도

i : 공란이면 인장, '이면 압축

여기서, 중괄호안의 값이 응력상호작용항이다. 아울러 섬유직 각방향의 강도 Y_θ^i 는 X_θ^i 와 다음의 관계를 갖는다.

$$Y_\theta^i = X_{90-\theta}^i$$

그러므로 Y_θ^i 의 값도 식 (2)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$Y_\theta^i = (C_0 - C_2 \cos 2\theta + C_4 \cos 4\theta)^{-1} \quad (5)$$

3. 조합하중에서의 파손예측

그림 2와 같은 평면 내의 조합하중을 받는 섬유이방성재료의 파손을 예측하기 위한 기준으로 Tsai-Hill기준이 있다. 이는 von Mises의 등방성 항복기준을 이방성재료에서 확장 적용한 것으로서 다른 기준과 비교하여 적용이 비교적 간단하다는 이점이 있다. 이의 표현식은 평면응력상태에서 다음과 같은 형태로 주어진다.

$$F_{11} \sigma_1^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \tau_{12}^2 = 1 \quad (6)$$

여기서, σ_1, σ_2 는 각각 섬유방향(1방향)과 섬유직각방향(2방향)으로의 수직응력이고, τ_{12} 는 전단응력 그리고 $F_{11}, F_{12}, F_{22}, F_{66}$ 는 재료강도정수들이다. 파손면을 나타내는 식 (6)이 타원형이 되려면 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$F_{11}, F_{22}, F_{66} > 0 \quad (7)$$

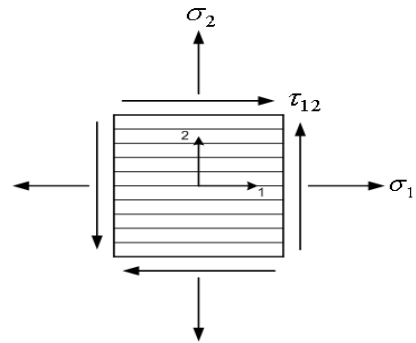


그림 2 평면응력 성분

$$F_{12}^2 - F_{11} F_{22} < 0 \quad (8)$$

전단응력 τ_{12} 의 고정된 값에서 식 (6)은 $\sigma_1 - \sigma_2$ 평면에서 타원이 된다. 식 (6)에 나오는 정수를 구하기 위해서는 4가지의 경계조건이 필요하다. Tsai-Hill기준에서 얻어진 완전한 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\left(\frac{\sigma_1}{X}\right)^2 - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}\right) \sigma_1 \sigma_2 + \left(\frac{\sigma_2}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

위의 식에서 X 는 섬유방향의 강도 Y, Z 는 각각 섬유직각방향의 강도이고, S 는 전단강도를 나타낸다. 섬유방향의 좌표축을 1로 하는 횡방향 등방성재료($Y=Z$)라고 하면 상기 식은 다음이 된다.

$$\frac{\sigma_1^2}{X^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X^2} + \frac{\sigma_2^2}{Y^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} = 1 \quad (10)$$

위의 식이 타원의 형태가 되기 위해서는 식 (7)과 (8)의 조건을 만족해야 한다. 따라서 식 (10)의 왼쪽부터 둘째 항에 있는 X 의 값은 $\sigma_1 - \sigma_2$ 의 모든 상한에서 인장강도의 값을 가져야 한다. 그림 2와 같은 2차원 일반응력상태는 모아원을 이용하여 주응력상태로 나타낼 수 있다. 그림 3은 이러한 응력상태를 나타내는 것으로서 섬유각 θ 를 가진 이방성재료가 2축으로 주응력 σ_x, σ_y 를 받고 있다. 이러한 주응력이 작용할 때에, 이의 항으로 표시한 파손기준으로 다음과 같은 식을 제안한다. 이는 식 (9)의 Tsai-Hill기준식을 변형하여 나타낸 것이다.

$$\left(\frac{\sigma_x}{X_\theta}\right)^2 - \left(\frac{1}{X_\theta^2} + \frac{1}{Y_\theta^2} - \frac{1}{Z^2}\right) \sigma_x \sigma_y + \left(\frac{\sigma_y}{Y_\theta}\right)^2 = 1 \quad (11)$$

여기서, X_θ 는 섬유각을 가진 이방성재료의 강도로서 식 (2)

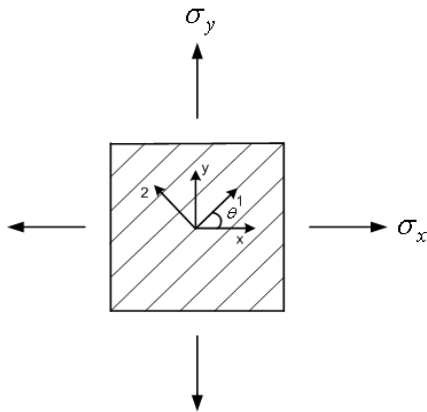


그림 3 임의의 섬유각을 가진 요소에서 2축수직응력

와 같이 주어진다. $\theta=0^\circ$ 의 경우에 식 (11)은 Tsai-Hill의 기준식과 같게 된다. 다른 파손기준들과 달리 본 해석에서 제안한 기준에서는 전단강도를 필요로 하지 않는다. 전단응력이 주어지면 모어원을 이용하여 주응력상태로 변환하여 적용할 수 있다.

식 (11)이 $\sigma_x - \sigma_y$ 평면에서 타원 형태를 갖기 위해서는 식 (7)과 (8)과 같은 비슷한 조건을 만족해야 한다. 즉, 1-2축을 $x-y$ 축으로 바꾸어 표시하면 그 조건식을 그대로 이용할 수 있다. 이러한 조건을 만족하는 각 상한의 파손표면식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

1상한($\sigma_x \geq 0, \sigma_y \geq 0$):

$$\left(\frac{\sigma_x}{X_\theta}\right)^2 + 2F_{xy}\sigma_x\sigma_y + \left(\frac{\sigma_y}{Y_\theta}\right)^2 = 1 \quad (12)$$

2상한($\sigma_x \leq 0, \sigma_y \geq 0$):

$$\left(\frac{\sigma_x}{X'_\theta}\right)^2 + 2F_{xy}\sigma_x\sigma_y + \left(\frac{\sigma_y}{Y_\theta}\right)^2 = 1 \quad (13)$$

3상한($\sigma_x \leq 0, \sigma_y \leq 0$):

$$\left(\frac{\sigma_x}{X'_\theta}\right)^2 + 2F_{xy}\sigma_x\sigma_y + \left(\frac{\sigma_y}{Y'_\theta}\right)^2 = 1 \quad (14)$$

4상한($\sigma_x \geq 0, \sigma_y \leq 0$):

$$\left(\frac{\sigma_x}{X_\theta}\right)^2 + 2F_{xy}\sigma_x\sigma_y + \left(\frac{\sigma_y}{Y'_\theta}\right)^2 = 1 \quad (15)$$

여기서, $F_{xy} = -\frac{1}{2}\left(\frac{1}{X_\theta^2} + \frac{1}{Y_\theta^2} - \frac{1}{Z^2}\right)$ (16)

식의 표시에서 (')는 압축을 의미한다.

4. 해석 및 고찰

새로 제안한 파손강도기준의 신뢰성을 나타내기 위하여 그림 3과 같이 섬유각을 가지며 2축으로 수직응력을 받는 이방성재료를 해석모델로 하여 강도를 예측하였다. 재료는 이방성특성을 가진 Kraft 판지를 선정하여 해석을 수행하였으며, 이의 결과는 2축하중의 실험자료(Rowlands 등, 1985; Gunderson 등, 1986; Suhling 등, 1985)와 Tan-Cheng의 기준식(Tan 등, 1993)과 비교하였다.

섬유각 θ 가 각각 $0^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 인 4가지의 경우에 대하여 해석을 수행하였으며, 이 때 축방향 전단응력은 6.9MPa, 10.3MPa, 15.9MPa로 주어졌다. 재료의 강도와 특성치는 표 1과 같다. 여기서 V, V' 는 각각 45° 경사각을 가진 이방성재료의 인장강도와 압축강도를 나타낸다.

그림 4는 섬유각 $\theta=0^\circ$ 인 경우의 해석결과이다. 인장-인장인 1~4분면에서는 다소 보수적인 경향을 보이거나 나머지 상한에서는 실험결과와 잘 일치하고 있다. 이의 해석결과는 Tsai-Hill기준으로부터 얻은 것과 동일하게 된다. 아울러 섬유각 θ 가 각각 $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 인 경우의 해석결과를 그림 5, 6, 7에 나타내었다. 이때 응력상호작용항은 Tan-Cheng의 일방향강도식을 이용한 식 (16)으로부터 구하였다. Tsai-Hill 기준을 적용한 Rowlands 등의 해석결과에서는 축방향 전단응력이 작을수록 실험결과와 잘 일치하며, 큰 전단응력이 작용할수록 많은 오차를 보여 주었다(Rowlands 등, 1985). 그러나 본 해석에서의 강도예측결과는 비록 1상한에서 다소 보수적인 결과를 보이고 있으나, 축방향 전단응력이 크게 주어진 경우에서도 실험결과와 잘 일치하고 있음을 보여준다. Tan-Cheng기준에서도 본 해석과 유사하게 주응력 σ_x, σ_y 를 이용하고 있고, 이의 결과는 실험결과와 비교적 잘 일치함을 보여주고 있다. 그러나 각 상한에서 기준식의 응력상호작용항을 얻기 위해서 각 상한마다 최소한 3종류의 2축하중실험을 하여 이를 근사식으로 나타내어야만 한다. 이런 이유로 각 상한의 연결부에서는 불연속점이 나타난다. 이는 매우 번

표 1 판지의 강도와 재료특성치

X	55.9MPa
X'	20.5MPa
Y	30.8MPa
Y'	12.7MPa
V	37.2MPa
V'	19.3MPa
S	16.6MPa
E_{11}	7.24GPa
E_{22}	3.37GPa
ν_{12}	0.36

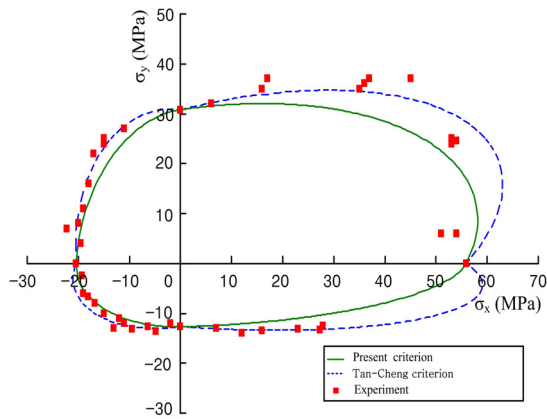


그림 4 섬유각 $\theta=0^\circ$ 에서의 강도계적

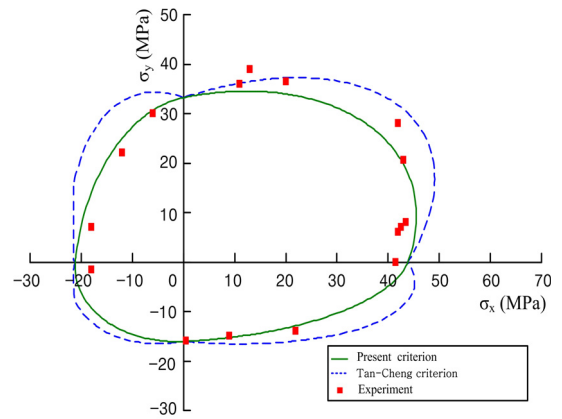


그림 6 섬유각 $\theta=30^\circ$ 에서의 강도계적

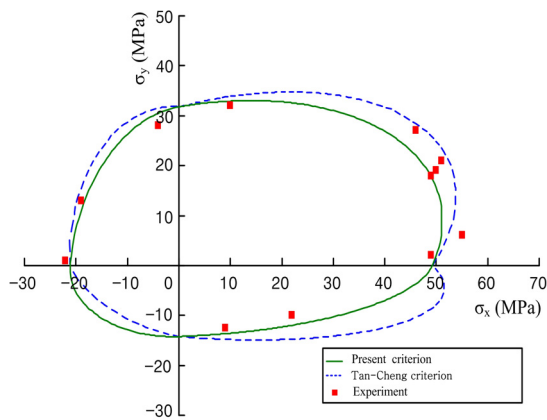


그림 5 섬유각 $\theta=20^\circ$ 에서의 강도계적

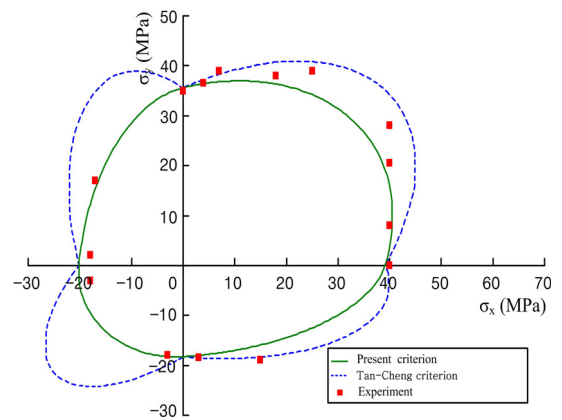


그림 7 섬유각 $\theta=40^\circ$ 에서의 강도계적

표 2 $\tau_{12} > S=16.6\text{MPa}$ 의 조합하중에서 섬유각 0° 인 재료의 계산된 강도값과 실험결과와의 비교

Strength and error	Tsai-Hill	Tsai-Wu ($F_{12}^* = 0.05$)	Tan-Cheng	Present criterion	Experimental Data
$X: Y: S$	15.1:15.1:15.1	22.0:22.0:22.0	17.8:17.8:17.8	18.6:18.6:18.6	18.2:18.2:18.2
%	-17	21	-2	2	-
$X: Y: S$	17.6:14.6:14.7	26.9:22.4:22.6	21.3:17.7:17.9	22.1:18.3:18.4	22.2:18.4:18.6
%	-21	21	-4	-0.7	-
$X: Y: S$	17.7:12.5:14.9	27.5:19.4:23.0	22.0:15.5:18.4	23.0:16.2:19.2	23.3:16.4:19.5
%	-24	18	-6	-1.5	-
$X: Y: S$	21.3:7.1:12.3	38.6:12.9:22.3	31.6:10.5:18.3	32.8:10.9:19.0	31.8:10.6:18.4
%	-33	21	-0.6	3	-
$X: Y: S$	21.3:7.1:12.3	38.6:12.9:22.3	31.6:10.6:18.3	32.9:11.0:18.9	31.5:10.5:18.2
%	-32	23	0.3	3.8	-
$X: Y: S$	12.3:17.6:14.4	17.1:24.4:20.4	14.1:20.1:16.8	14.7:20.9:17.5	14.6:20.8:17.4
%	-16	17	-3	0.5	-

거롭고 귀찮은 일이다. 본 기준은 재료의 전단강도를 필요로 하지 않으며, Tan-Cheng기준과 비교하여 강도를 단순하면 서 정확하게 예측할 수 있는 이점을 갖고 있다.

본 기준의 적용에 대한 일반성을 나타내기 위하여 전단응 력이 재료의 전단강도보다 크게 작용하는 경우의 강도값을 계산하였으며, 다른 여러 파손기준의 결과와 함께 비교하였 다. 이의 결과는 표 2에 나타내었다. 이런 경우에도 본 연구

에서 제안한 기준은 재료의 2축강도를 정확히 예측할 수 있 음을 알 수 있다.

5. 결 론

Tsai-Hill기준을 변형하여 조합하중을 받고 있는 이방성 재료의 강도예측을 위한 새로운 파손기준을 개발하였다. 이

기준의 유효성은 이방성특성을 가진 판지에 대한 실험결과와 비교하여 나타내었다. 재료 축방향의 전단응력이 주어진 경우, Tsai-Hill기준은 매우 보수적인 결과를 보여주고 있으나, 본 해석에서 제안한 기준은 전단응력의 크게 주어진 경우에서도 재료강도를 정확히 예측할 수 있었다. 이와 유사한 결과는 Tan-Cheng기준으로 예측할 수 있으나, 이의 기준식에 있는 응력상호작용항을 구하기 위해서는 각 상한마다 여러 종류의 실험을 수행해야 하는 번거로움이 있다. 그러나 본 기준에서는 해석의 단순화를 이룰 수 있으며, 오로지 섬유각을 가진 이방성재료의 강도와 축방향의 강도만이 필요하다.

참 고 문 헌

Daniel, I.M., Ishai, O. (2005) Engineering Mechanics of Composite Materials, 2nd ed., Oxford University Press.

Daniel, I.M. (2006) Failure of Composite Materials, Proc. 16th European Conference of Fracture, Alexandroupolis, Greece.

Daniel, I.M., Luo, J.J., Schubel, P.M. (2008) Three-Dimensional Characterization of Textile Composites, *Composites Part B*, 39, pp.13~19.

Gunderson, D.E., Bendtsen, L.A., Rowlands, R.E. (1986) A Mechanistic Perspective of the Biaxial Strength of Paperboard, *Journal of Engineering Materials and Technology, ASME*, 108, pp.135~140.

Gutkin, R., Pinho, S.T, Robinson, P., Curtis, P.T. (2009) Micro-Mechanical Modelling of Shear-Driven Fiber Compressive Failure and of Fibre Kinking for Failure Envelope Generation in CFRP Laminates, *Composites Science and Technology*, 70, pp.1214~1222.

Hashin, Z. (1985) Analysis of Cracked Laminates: A Variational Approach, *Mechanics of Materials*, 4, 1985, pp.121~136.

Hahn, H.T., Williams, J.G. (1986) Compressive Failure Mechanism in Unidirectional Composites, in Composite Materials: Testing and Design, *ASTM STP 893*, pp.115~139.

Hinton, M.J., Kaddour, A.S., Soden, P.D. (2004) Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites: World-Wide Failure Exercise, Oxford, Elsevier.

Kim, S.Y., Park, H.S., Kang, M.S., Choi, J.H.,

Koo, J.M., Seok, C.S. (2009) Evaluation of Failure Strength of Woven CFRP Composite Plate Subjected to Axial Load by Tan-Cheng Failure Criterion, *Trans. KSME(A)*, 33(4), pp.360~365.

Hankinson, R.L (1921) Investigation of Crushing Strength of Spruce at Varying Angles of Grain, Air Service Information Circular No. 259, US Air Service.

Linero, L.G. (2002) Global Fracture Analysis of Laminated Composite Materials for Aerospace Structures, Ph. D dissertation, Caltech.

Milkovich, S.M., Sykes, G.F., Herakovich, C.T. (1986) Space Radiation Effects on the Thermo-mechanical Behavior of Graphite-Epoxy Composites, *Journal of Composite Materials*, 20, pp.579~593.

Pimenta, S, Gutkin, R.,Pinho, S.T.,Robinson, P. (2009) A Micromechanical Model for Kink-Band Formation: Part II-Analytical Modelling, *Composites Science and Technology*, 69, pp.956~964.

Rowlands, R.E. (1985) Strength (Failure) Theories and Their Experimental Correlations, in Failure Mechanics of Composites, Handbook of Composites, 3, Sih, G.C. and Skuda, A.M eds, NY, North-Holland, pp.71~128.

Rowlands, R.E., Gunderson, D.E., Suhling, J.C., Johnson, M.W. (1985) Biaxial Strength of Paperboard Predicted by Hill-Type Theories, *Journal of Strain Analysis*, 20(2), pp.121~127.

Suhling, J.C., Rowlands, R.E., Johnson, M.W., Gunderson, D.E. (1985) Tensorial Strength Analysis of Paperboard, *Experimental Mechanics*, 25, pp.75~84.

Tan, S.C., Cheng, S. (1993) Failure Criteria for Fibrous Anisotropic Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*, 5(2), pp.198~211.

Wu, E.M. (1972) Optimal Experimental Measurements of Anisotropic Failure Tensors, *Journal of Composite Materials*, 6, pp.472~489.

- 논문접수일 2010년 6월 28일
- 논문심사일 1차 2010년 6월 29일
2차 2010년 8월 31일
- 게재확정일 2010년 10월 4일