

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.360

## Tan-Cheng 파손기준을 이용한 직물 CFRP 적층판의 원거리 하중에 대한 파괴강도 평가

김상영\* · 박홍선\* · 강민성\* · 최정훈\* · 구재민\*\* · 석창성†

(2009년 1월 19일 접수, 2009년 3월 9일 수정, 2009년 3월 26일 심사완료)

### Evaluation of Failure Strength of Woven CFRP Composite Plate Subject to Axial Load by Tan-Cheng Failure Criterion

Sang-young Kim, Hong-sun Park, Min-sung Kang, Woo-hyung Lee, Jung-hun  
Choi, Jae-mean Koo and Chang-sung Seok

**Key Words:** CFRP(탄소섬유강화 복합재료), Failure Strength(파손강도), Hole(원공)

#### Abstract

In the manufacture of CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite) composite structures, various independent components join by bolts and pins. Holes for bolts and pins have an effect on the failure strength of such structures, because those act as notches in structures. The failure characteristic of such structures are different from those of plain plate subject to remote load. In this paper, tensile properties of woven CFRP composite plates with laminates of 0°, 30° and 45° were obtained according to ASTM D 3039. By using obtained tensile failure strength and Tan-Cheng failure criterion, tensile failure strength of CFRP laminate with arbitrary fiber angle were evaluated. Also, the degradation of tensile properties by center hole( $\phi 10\text{mm}$ ) with a remote load was evaluated and the failure strengths were applied to Tan's failure criterion, similarly.

#### 1. 서론

실제 구조물의 설계, 제작시에는 체결부위가 없는 일체형의 제품을 만드는 것이 가장 이상적이기는 하나, 부품의 크기, 제작의 어려움, 또는 검사의 편리 등의 이유로 여러 개의 독립된 부재들의 조립을 통하여 전체 구조물을 제작하게 된다. 이때 독립된 부재들의 조립은 각 부재들의 결합부위를 적절한 체결방법을 이용하여 결합하

게 된다. 흔히 사용되는 결합방법은 접착과 기계적 체결로서, 접착에 의한 결합방식은 결합부위가 면대면으로 하중전달을 비교적 넓은 면적을 통하여 분산시킬 수 있고 체결부위와 무게가 크게 증가하지 않으나, 접착된 요소 사이의 변형률을 유지하기 위해서 응력집중이 발생할 뿐만 아니라, 손상된 부재의 교체가 쉽지 않고 결합면에 대한 특별한 가공이 필요한 단점이 있다. 기계적 체결에 의한 결합방식은 볼트, 핀 또는 리벳을 사용하여 구조요소들을 연결하여 제작하므로 결합부의 조사가 용이하며, 수리를 위한 분해조립이 편리하며, 구조물의 신뢰성이 보장되며, 표면처리가 불필요하거나 또는 최소로 할 수 있는 등의 이점을 가지고 있으나, 필연적으로 원공으로 인한 결합부에 응력집중이 발생하며 체결부위의 무게가 증가한다는 단점을 가지고 있다. 특히 복합재료는 볼트 등의 기계적 체결에 의한 결합방

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 (2008. 5. 29.-30., 충북대) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : seok@skku.edu

TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482

\* 성균관대학교 대학원 기계공학부

\*\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

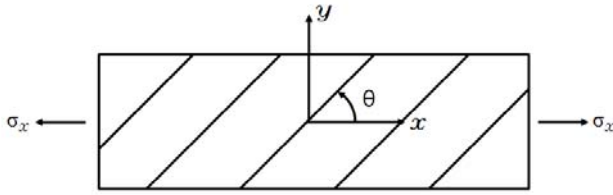


Fig. 1 Coordinates system of anisotropic lamina

법이 많이 쓰이고 있는 데 그 제작 특성상 응력 집중이 발생하므로 구조물의 설계, 제작 시에 체결부위의 특성에 대한 정확한 해석방법의 필요성이 요구된다.

본 연구에서는 Tan<sup>(1,2)</sup>의 파손기준을 적용하여 직물형 복합재료 평활재의 섬유방향에 대한 각도별 파단강도를 예측하고자한다. 또한, 원공노치를 가진 직물형 복합재료에 원거리 하중을 부여하여, 평활재와 마찬가지로의 파손기준을 적용해보고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 Tan파손기준

Hankinson<sup>(3)</sup>에 의해 이방성복합재료의 강도예측을 위한 최초의 실험식이 제안되었다. 이후 등방성재료에 대한 Von Mises 파손기준을 확장한 Tsai-Hill이론<sup>(4)</sup>이 제시되었고, 이를 더욱 발전시켜 응력상호계수를 포함시킨 Tsai-Wu이론<sup>(5)</sup>이 제안되었다. 그 후, Tan은 복합재료의 강도가 섬유각에 따라서 주기성을 갖고 있음을 고려하여 이를 Fourier급수로 나타낸 Tan강도이론<sup>(1,2)</sup>을 제안하였으며, 이 기준식은 비교적 적용이 간단하며 비교적 정확하게 강도를 예측할 수 있다.

#### 2.1.1 Tan파손기준

이방성 섬유경사 복합재료의 좌표계를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서  $\theta$ 는 x축으로부터의 섬유각을 나타내며  $\sigma_x$ 는 멀리서 작용하는 수직응력이다. 이러한 복합재료의 강도는 섬유각  $\theta$ 에 따라 주기적인 변화를 보인다.

Tan과 Cheng<sup>(1)</sup>은 섬유방향에 대한 재료강도의 대칭성을 고려하여 강도함수를 다음과 같은 cosine급수로 나타내었다.

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

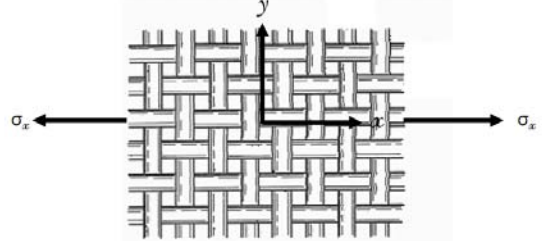


Fig. 2 Coordinates system of fabric lamina

위의 식에서  $X_\theta$ 는 섬유 경사각  $\theta$ 를 가진 이방 복합재료에서 x방향의 강도를 나타낸다. 여기서 x방향의 강도는  $\pi$ 를 주기로 변하기 때문에  $\theta$ 는  $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ 의 범위를 가진다. 그러나 본 논문에서 다루고 있는 직물형 복합재료의 경우에는 Fig. 2와 같이  $\pi/2$ 를 주기로 변하기 때문에 식 (1)을 다음의 식 (2)와 같이 수정하였다.

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

이 cosine 급수에서 전개되는 n의 개수에 따라 재료강도의 정확도가 결정된다. 만약 n의 개수를 3으로 취하면  $C_0, C_2, C_4$ 의 정수가 나타나므로, 이의 정수를 구하기 위해서는 3종류의 재료강도가 필요하다.

Tan과 Cheng은 강도함수를 나타내기 위해 n=3인 다음의 식을 이용하였다.

$$X_\theta = (C_0 + C_2 \cos 4\theta + C_4 \cos 8\theta)^{-1} \quad (3)$$

섬유경사 복합재료의 인장강도인  $X_\theta$ 의 완전식을 구하기 위하여 섬유방향의 인장강도  $X_T$ , 45° 섬유각의 인장강도  $Y_T$  그리고 30° 섬유각의 인장강도  $U_T$ 를 사용하였다. 이들 값을 식 (3)에 적용한 결과는 다음과 같다.

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

$$\theta = 45^\circ (X_{45^\circ} = Y_T): C_0 - C_2 + C_4 = \frac{1}{Y_T} \quad (4)$$

$$\theta = 30^\circ (X_{30^\circ} = U_T): C_0 - \frac{1}{2}C_2 - \frac{1}{2}C_4 = \frac{1}{U_T}$$

위의 식을 연립하여 풀면 상수들은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{1}{3} \left( \frac{1}{X_T} + \frac{2}{U_T} \right) \\ C_2 &= \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_T} - \frac{1}{Y_T} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$C_4 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{3X_T} + \frac{1}{Y_T} - \frac{4}{3U_T} \right)$$

### 3. 인장시험

#### 3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 (주) SK chemical에서 시판되는 직물구조 탄소섬유 프리프레그인 WSN3K(1ply 두께 0.27mm)를 이용하여 제작하였으며 최종두께가 3.27mm로 되게 하였다. 적층판은 16ply로 Autoclave에서 140℃, 60kg/cm<sup>2</sup>의 온도와 압력에서 60분간 성형, 제작되었다. 제작된 시험편의 각 성분의 함량은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 시험편은 ASTM D-3039-02를 참조하여 NC 머신으로 절단가공 하였으며, 시험편 끝단에는 그림으로부터 미끄러짐과 손상을 방지하기 위해 ASTM을 참조하여 사포(Emery cloth)를 사용하였으며, 시험편의 채취방향은 0°/90°, 30°/60° 및 +45°/-45°로 하였다. Fig. 4에는 사용된 인장 시험편의 형상을 나타내었으며, Fig. 5에는 본 연구에 사용된 평직 적층판의 구조를 나타내었다.

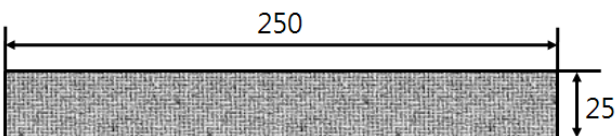
시험편 중앙의 원공노치 가공은 적층분리와 같은 손상을 최소화하기 위하여 직경 10mm인 원통형 초경합금 드릴을 사용하여 가공하였다. Fig. 6에는 원공노치 인장시험편의 형상을 나타내었다.

#### 3.2 시험방법

평활재 및 중앙원공 인장시험은 시마즈(Simadzu)사의 25ton용량의 전기모터식 인장시험기(model AG-25TG)를 사용하여 수행하였으며, 시험속도는 3mm/min으로 상온에서 수행하였다. Fig. 7에는 시험을 수행하는 모습을 나타내었다.

**Table 1** Physical properties of woven carbon fiber reinforced composite material (WSN3K)

Wet Resin Content	39±2 (Wt. %)
Resin Areal Weight	148±5g/m <sup>2</sup>
Fiber Areal Weight	197±8g/m <sup>2</sup>
Total Areal Weight	353±10g/m <sup>2</sup>

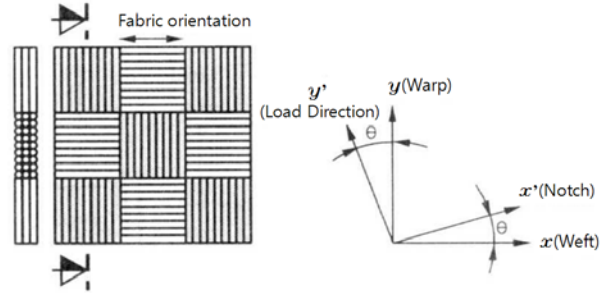


**Fig. 4** Tensile specimen configuration

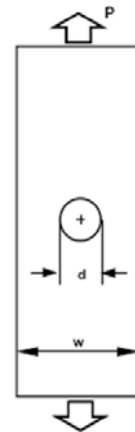
#### 3.3 시험결과

인장시험은 각 2회 수행되었고, 시험결과의 평균값을 사용하여 비교하였다.

인장시험결과 0°/90°시험편이 가장 큰 파손응력



**Fig. 5** Texture and load orientation of plain woven CFRP laminate composite



**Fig. 6** Shapes of notched specimens and boundary condition



**Fig. 7** Installed specimen for tensile test

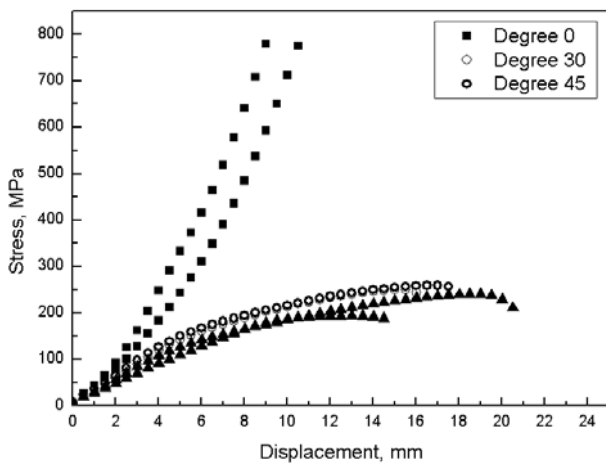
을 나타내었고, 30°/60°시험편은 0°/90°시험편에 비해 약 32.5%의 파손응력을 나타내었으며, +45°/-45°시험편은 0°/90°시험편에 비해 약 27.8%의 응력을 나타내었다.

중앙원공노치 시험편의 경우에는 중앙원공을 제외한 단면적을 이용한  $\sigma_{net}$ 을 계산하여 비교하였다. 최대 파손응력이 0°/90°, 30°/60°, +45°/-45°의 경우 각각 417.8MPa, 232.8MPa 및 204.5MPa로 나타났으며 이는 인장시험편에 비하여 각각 53.4%, 91.4%, 94.1%에 해당된다. 일반적으로 인장시험으로부터  $\sigma$ - $\epsilon$  선도를 획득하지만 중앙원공노치 시험편의 경우 변형률을 정의하기 어렵고 인장시험과 파손강도를 비교하기 위하여  $\sigma$ - $\delta$  선도를 사용하였다. 인장시험 및 중앙원공노치 시험편에서 획득한  $\sigma$ - $\delta$  선도를 Fig. 8과 9에 나타내었다.

이상에서 획득한 최대파손응력을 Table 2에 정리하였다.

**Table 2** Result of tensile test

Tensile test	Load direction	Strength(ave.), MPa
No hole	0°/90°	782.9
	30°/60°	254.7
	+45°/-45°	217.4
Center Hole	0°/90°	417.8
	30°/60°	232.8
	+45°/-45°	204.5



**Fig. 8**  $\sigma$ - $\delta$  curves for no hole specimens

### 3.4 파손강도 예측

#### 3.4.1 평활재

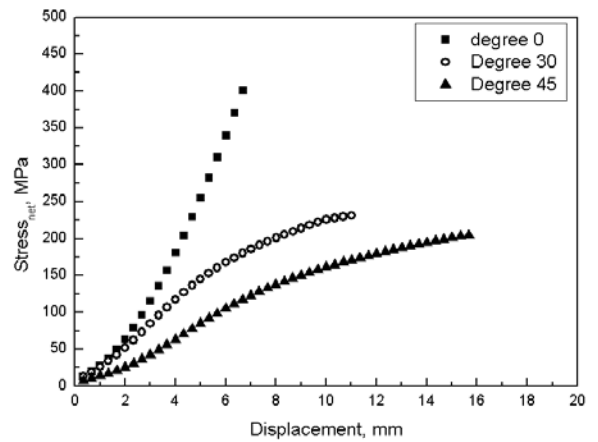
평활재의 인장시험결과를 식 (5)에 대입하면, 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} C_0 &= 3.043225 \times 10^{-3} [\text{MPa}^{-1}] \\ C_2 &= -1.661256 \times 10^{-3} [\text{MPa}^{-1}] \\ C_4 &= -0.104666 \times 10^{-3} [\text{MPa}^{-1}] \end{aligned} \quad (6)$$

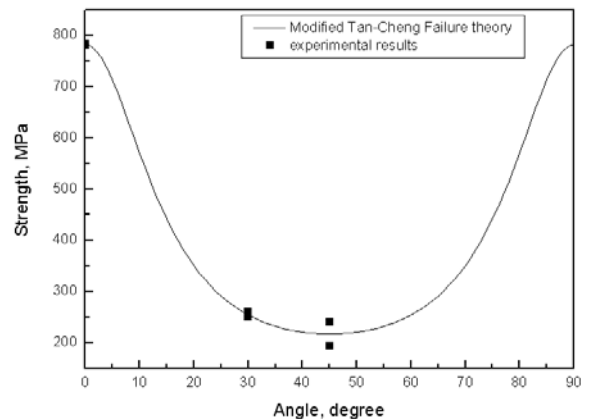
이 결과를 식 (3)에 대입하면, 파괴강도 예측식은 다음과 같이 유도된다.

$$X_\theta = (0.003043225 - 0.001661256 \times \cos 4\theta - 0.000104666 \times \cos 8\theta)^{-1} \quad (7)$$

유도된 평활재의 파괴강도 예측식은 0°에서 가장 높은 파괴강도를 나타내었으며 약 30°부근까지 급속한 강도의 저하를 나타내었다. 그러나 30°에서 45°까지는 파괴강도가 다소 완만하게 감소하는 경향을 나타내었다. 실험결과 또한 이와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.



**Fig. 9**  $\sigma$ - $\delta$  curves of center hole specimens



**Fig. 10** Failure strength of analysis and test

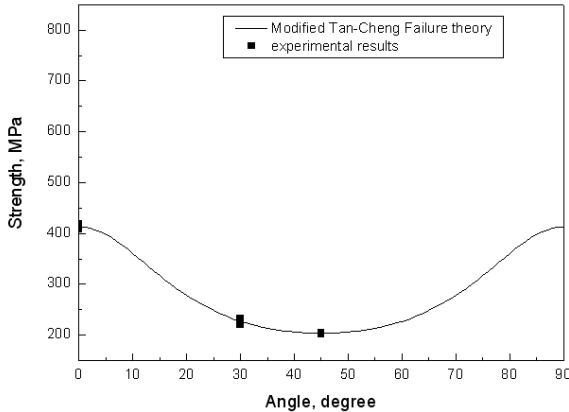


Fig. 11 Failure strength of analysis and test

이로써 Tan-Cheng 파손기준을 이용하여 직물형 CFRP 적층판의 파손강도를 예측할 수 있을 것이라 생각된다. 평활재의 파괴강도 예측결과와 실험결과를 Fig. 10에 나타내었다.

#### 3.4.2 중앙원공 노치재

중앙원공 노치가 있는 경우의 파손강도를 Tan-Cheng 파손기준식을 이용하여 예측하여 평활재의 경우와 비교하여 보았다.

앞 절과 마찬가지로 중앙원공 노치재의 인장시험결과를 식 (5)에 대입하면, 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} C_0 &= 3.661518 \times 10^{-3} [\text{MPa}^{-1}] \\ C_2 &= -1.248242 \times 10^{-3} [\text{MPa}^{-1}] \\ C_4 &= -0.019785 \times 10^{-3} [\text{MPa}^{-1}] \end{aligned} \quad (8)$$

이 결과를 식 (3)에 대입하면, 파괴강도 예측식은 다음과 같이 유도된다.

$$X_\theta = (0.003661518 - 0.001248242 \times \cos 4\theta - 0.000019785 \times \cos 8\theta)^{-1} \quad (9)$$

유도된 중앙원공 노치재의 파괴강도 예측식과 실험결과를 Fig. 11에 나타내었다.

#### 3.5 고찰

평활재의 인장시험 결과, 0°/90°에서 30°/60°까지 섬유 각도가 변화함에 따라 파손강도가 급격하게 변화함을 알 수 있었다. 그러나 30°/60°에서 +45°/-45°까지 변화하는 동안에는 다소 완만한 감소를 보이는 것으로 확인되었다.

중앙원공 노치재의 파손강도와 평활재의 파손강도를 비교한 결과, 섬유의 방향에 따라 파손강도의 감소비율이 현저하게 차이가 나는 것을 확

인할 수 있었다. 다시 말하면, 0°/90°의 경우 가장 높은 파손강도를 나타내지만, 원공과 같은 노치가 존재할 경우 약 53%로 파손강도가 확연히 감소하게 된다. 하지만 +45°/-45°의 경우에는 가장 낮은 파손강도를 나타내지만, 원공이 존재할 경우에도 약 94%의 파손강도를 유지하는 것으로 나타났다. 이는 섬유 방향이 0°/90°일 때의 노치 민감도가 +45°/-45°일 때의 노치 민감도보다 훨씬 높다는 것을 의미한다.

파손강도를 사용하여, 평직 CFRP 복합재료의 각도별 파손강도를 예측한 결과, 평활재의 경우에는 각도에 따라 파손강도의 변화폭이 큰 반면, 원공노치재의 경우에는 변화폭이 상대적으로 작은 것을 알 수 있었다. 이는 0°/90° 섬유방향일 때의 높은 노치 민감도 때문인 것으로 보인다.

## 5. 결론

평활재 및 중앙 원공 노치 시험편을 이용한 인장시험을 수행하였고, 그로부터 섬유방향에 따른 각도별 파손강도를 예측하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수 있었다.

(1) 직물형 CFRP 복합재료의 섬유방향에 대한 각도별 파손강도를 평가하였고, Tan의 파손기준식을 이용하여 예측식을 구하였다. 예측식은 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있었다.

(2) 평활재를 이용한 인장시험결과, 섬유방향 0°/90°일 때, 가장 높은 파손강도를 나타냈으며, 이에 비하여 섬유방향 30°/60°일 때 약 32.5% 섬유방향 +45°/-45°일 때 약 27.8%의 파손강도를 나타내었다.

(3) 중앙원공노치재를 이용한 인장시험결과, 중앙원공 노치재의 경우 평활재에 비하여 약 53.4% (0°/90°), 약 91.4% (30°/60°), 약 94.1% (+45°/-45°) 강도저하가 발생하였다.

(4) 섬유방향 0°/90°인 경우의 노치 민감도가 다른 경우에 비해 월등히 높았으며, 섬유방향 +45°/-45°인 경우의 노치 민감도가 가장 낮은 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 2단계 두뇌한국 21 (BK21) 사업과 한국과학재단의 국가지정연구실(NRL) 사업

(R0A-2007-000-10049-0)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Seng C. Tan and Shun Cheng, 1997, "Failure Criteria for Fibrous Anisotropic Materials," *J. Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.5, No.2, pp. 198~211.
- (2) Seng C. Tan, 1994, "Stress Concentrations in Laminated Composites," *Technomic Publishing Co.*, p. 63.
- (3) Hankinson, R. L., 1929, "Investigation of Crushing Strength of Spruce at Varying Angles of Grain., Air Service Information Circular, No. 259, Us air Service.
- (4) Azzi, V. D. and Tsai, S. W., 1965, "Anisotropic Strength of Composites," *Experimental Mechanics*, Vol. 5, No. 9, pp. 283~288.
- (5) Tsai, S. W. and Wu, E. M., 1971, "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *J. of Composite Materials*, Vol. 5, pp. 58~80.
- (6) Whitney, J.M. and Nuismer, R. J., 1974. "stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations." *J. of Composite Materials*, Vol. 8, pp. 253~265
- (7) Jong Wook Kim, Won Ho Yang, 1999, "Stress Analysis And Prediction of Failure for the Pin-Loaded Composite Laminates," *Annual Spring & Fall Conferences 1999 of the KSME*, Vol. 2, No. 1, pp. 214~219.
- (8) Belmontea, H.M.S., Ogina, S.L., Smitha, P.A. and Lewin, R., 2004, "A Physically-Based Model for the Notched Strength of Woven Quasi-Isotropic CFRP Laminates," *Composites: Part A* 35, pp. 763~778.