

평직 CFRP 적층복합재료의 섬유배열각도에 따른 파괴강도 예측[§]

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

* 넥센타이어(주), ** 한국전력기술(주), *** 현대자동차(주), **** 성균관대학교 기계공학부

Prediction of Fracture Strength of Woven CFRP Laminates According to Fiber Orientation

Min Sung Kang*, Hong Sun Park**, Jung Hun Choi****
Jae Mean Koo**** and Chang Sung Seok****†

* R&D center, Nexen Tire co.,

** KEPCO E&C

*** Durability & Reliability Team, HYUNDAI co.,

**** Dept. of Mechanical Engineering, SungKyunKwan Univ.

(Received December 21, 2011 ; Revised May 9, 2012 ; Accepted May 24, 2012)

Key Words: CFRP Laminates(탄소섬유 적층복합재료), Fracture Strength(파괴강도), Fiber Orientation(섬유방향)

초록: 섬유강화 복합재료는 금속 재료보다 비강성 및 비강도가 높아 경량화가 요구되는 산업에서 수요가 증가하고 있다. 이러한 섬유강화 복합재료는 방향성을 가진 섬유 원사를 일정한 규칙으로 배열하고 에폭시 수지와 같은 레진을 이용하여 경화한 후 사용하게 된다. 섬유강화 복합재료는 구조적인 특성상 섬유배열각도에 따라 서로 다른 재료물성을 나타내기 때문에 섬유강화 복합재료의 강도를 정확히 평가하는 것은 이들을 구성요소로 하는 복합재료 구조물의 설계 또는 파괴에 대응한 설계에서 매우 중요하다. 이에 본 논문에서는 평직 탄소섬유강화 복합재료 적층판을 대상으로 섬유배열각도(0°/90°, 30°/-60°, +45°/-45°)에 따른 인장시험을 통하여 정적 파괴강도를 평가하였으며, 복합재료를 구성하고 있는 섬유의 구조적인 주기성을 포함하는 Tan과 Cheng의 강도함수와 조화함수를 이용하여 섬유배열각도에 따른 평직 탄소섬유강화 복합재료의 정적 파괴강도를 예측하였다.

Abstract: CFRP composite materials have been widely used in various fields of engineering because of their excellent properties. They show high specific stiffness and specific strength compared with metallic materials. Woven CFRP composite materials are fabricated from carbon fibers with two orientation angles (0°/90°), which influences the mechanical properties. Therefore, woven CFRP composite materials show different types of fracture behavior according to the load direction. Therefore, the fracture behavior of these materials needs to be evaluated according to the load direction when designing structures using these materials. In this study, we evaluate the fracture strength of plain-woven CFRP composite materials according to the load direction. We performed tests for six different angles (load direction: 0°/90°, 30°/-60°, +45°/-45°) and estimated the fracture strength for an arbitrary fiber angle by using the modified Tan's theory and harmonic function.

1. 서론

섬유강화 복합재료는 금속재료에 비해 비강성 및 비강도가 좋기 때문에 구조물의 경량화를 위하여 산업 각 분야에서의 적용 비율이 급격히 증가하고 있다. 이러한 섬유강화 복합재료는 구조

적 특성으로 인해 섬유배열각도에 따라 기계적 물성이 변한다. 따라서 복합재료 구조물의 설계를 위해서는 섬유배열각도의 변화에 따른 강도를 예측하고, 복합 하중이 작용하는 경우에 강도를 계산하는 것이 매우 중요하지만 조직의 불연속성과 공정 상 발생하는 결함 때문에 정확한 결과를 얻기 어렵다.

본 논문에서는 평직 탄소섬유강화 복합재료의 섬유배열각도에 따른 정적강도를 인장강도시험을 통하여 평가하였다. 또한, 복합재료의 특성인 주

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, seok@skku.edu

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

기성을 포함하는 Tan과 Cheng의 강도함수와 조화함수 $\sin 2\theta$ 를 이용한 곡선 접합을 통하여 임의의 섬유배열각도에 따른 파괴강도를 예측하였다.

2. 정적강도 시험

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 Table 1과 같은 조성비를 갖는 SK chemical(주)에서 시판되는 직물구조 탄소섬유 프리프레그(Plain Woven Carbon Fiber Prepreg)인 WSN-3K(두께 0.227mm)이다. 이를 이용하여 시험편은 최종 두께가 3.52mm로 되도록 16Ply로 적층하여 Autoclave에서 140℃, 5.89MPa의 온도와 압력에서 60분간 성형하였다. 제작된 시험편의 각 성분의 함량은 Table 2와 같으며, 기계적인 특성은 Table 3과 같다. 시험편은 ASTM D3039(Standard Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials)⁽⁷⁾에 준하여 Fig. 1과 같은 형상으로 NC 머신으로 절단 및 가공하여 제작하였다. 시험편의 채취방향은 Fig. 2와 같이 본 연구에 사용된 평직 적층판의 구조와 섬유배열각도와 하중 방향에 대한

정의에 따라 0°/90°와 5°/-85°, 10°/-80°, 15°/-75°, 30°/-60°, +45°/-45°이며, 시험편 끝단에는 그림으로부터의 손상과 슬립을 방지하기 위하여 시험편 그림부에 #100의 에머리 페이퍼로 거칠게 연마하고 GFRP탭(두께: 2mm)을 부착하였다.

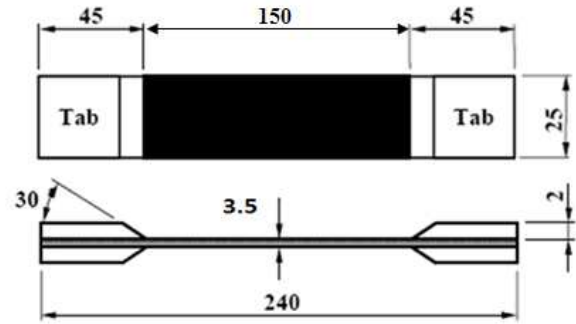


Fig. 1 Configuration of tensile specimen

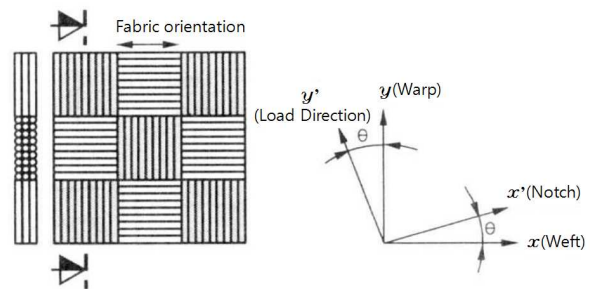


Fig. 2 Texture and load orientation of plain woven CFRP laminate composite

Table 1 Compositions of prepreg

Fabric Wt., (g/m ²)	Resin Wt., (g/m ²)	Resin Content, %	Total Wt., (g/m ²)
205	148	42±2	353

Table 2 Physical properties of WSN-3K

Wet Resin Content, Wt. %	Resin Areal Weight, (g/m ²)	Fiber Areal Weight, (g/m ²)	Total Areal Weight, (g/m ²)
32	148	197	353

Table 3 Mechanical properties of WSN-3K

E _{xx} , GPa	E _{yy} , GPa	ν _{xy}	G _{xy} , GPa
55	55	0.13	4.75

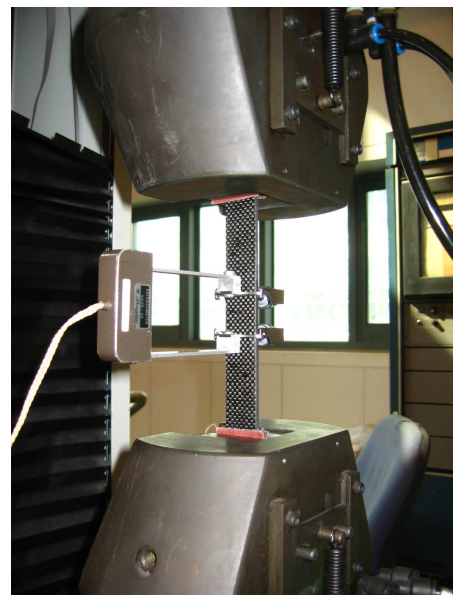


Fig. 3 Installed specimen for tensile test

2.2 정적 파괴시험

Fig. 3과 같이 시마즈(Shimadzu, Japan)사 25ton 용량의 전기모터식 만능시험기(Model AG-25TG)를 사용하여 상온에서 2mm/min의 속도로 인장시험을 수행하였다. 변형률 측정을 위해 시험편에 Extensometer를 부착하였고 시험기와 연결된 데이터 수집 장치(Data acquisition system)를 통해 하중 및 변위 데이터를 저장하였다. 정적 파괴시험은 섬유배열각도에 따라 각 3회씩 시험을 수행하였으며 그 평균값을 해당 섬유배열각도의 정적강도로 정의하였다.

2.3 섬유배열각도에 따른 정적 인장시험 결과

섬유배열각도에 따른 정적강도시험 결과를 Table 4에 정리하였다. Fig. 4에 나타난 섬유배열 각도에 따른 인장강도 그래프를 보면, 0°/90°인 시험편의 인장강도는 평균 829.8MPa이었으며, 섬유배열각도가 증가함에 따라 비선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 섬유배열각도가 30°보다 큰 영역에서는 강도의 감소폭이 현저하게 줄어들음을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 5에 나타난 연신율 그래프를 살펴보면, 연신율이 선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

Table 4 Results of tensile test with direction of fiber array

Direction of Fiber Array, (deg)	No.	Tensile Strength, (MPa)	Average, (MPa)	Elongation
0°/90°	1	830.8	829.8	0.829
	2	827.5		
	3	831.2		
5°/-85°	1	715.6	693.2	0.975
	2	670.9		
10°/-80°	1	514.7	506.3	1.121
	2	497.9		
15°/-75°	1	381.8	375.5	1.267
	2	381.8		
	3	362.8		
30°/-60°	1	245.6	243.9	1.648
	2	244.2		
	3	242.1		
+45°/-45°	1	233.6	232.8	1.990
	2	234.7		
	3	230.2		

3. 섬유배열각도에 따른 파괴강도 예측

3.1 Mohr's Circle에 의한 예측식

김성집 등^(1,2)은 평면응력(Plane Stress) 상태에서 좌표 변환식인 Mohr's Circle을 이용하여 계산할 수 있다고 하였다. 고전적응판 이론을 이용하여 직교이방성을 갖는 재료인 WSN-3K에 대한 임의의 각도 θ 에서의 탄성계수와 전단계수, 푸아송 비를 구하였는데, 그 결과는 Table 5와 Figs. 6~7과 같다.

Table 5와 Figs. 6~7에서 보는 바와 같이 탄성계수는 각도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 전단계수는 반대로 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 섬유배열각도가 증가함에 따라 하중을 지지하는 섬유의 지지 능력 감소에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 푸아송 비는 섬유

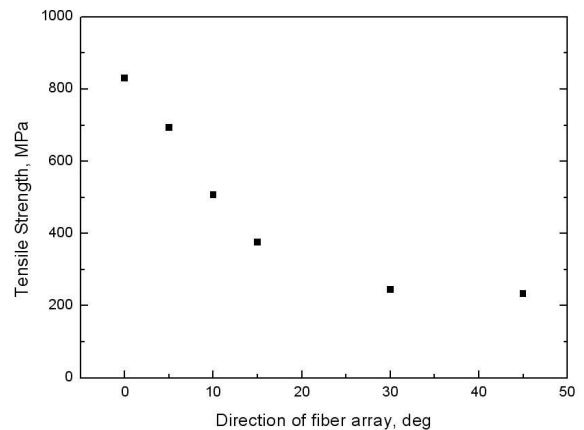


Fig. 4 Comparison of tensile strength with direction of fiber array

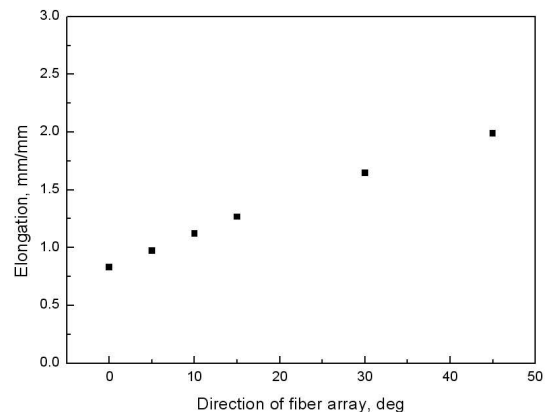


Fig. 5 Comparison of elongation with direction of fiber array

Table 5 Material property by direction of fiber array

Direction of Fiber Array, deg	Transformed Young's Modulus E_{xx}, E_{yy} (GPa)	Transformed Shear Modulus G_{xy} (GPa)	Transformed Poisson's Ratio ν_{xy}
0°/90°	55.0	4.75	0.13
5°/-85°	51.4	4.87	0.19
10°/-80°	43.2	5.24	0.32
15°/-75°	34.8	5.95	0.45
30°/-60°	20.0	12.0	0.68
45°/-45°	16.5	24.3	0.74

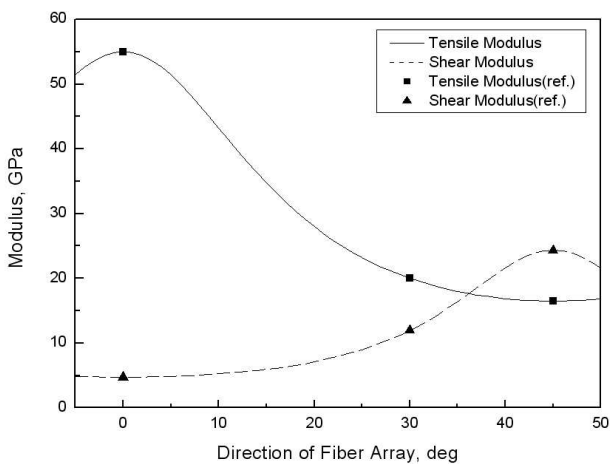


Fig. 6 Tensile and shear modulus with direction of fiber array

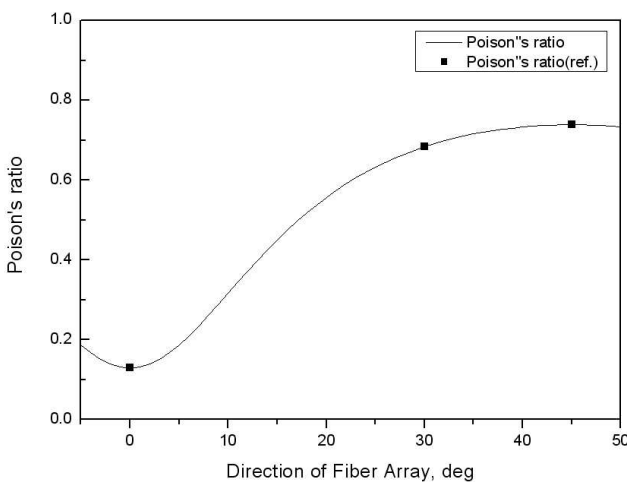


Fig. 7 Poisson's ratio with direction of fiber array

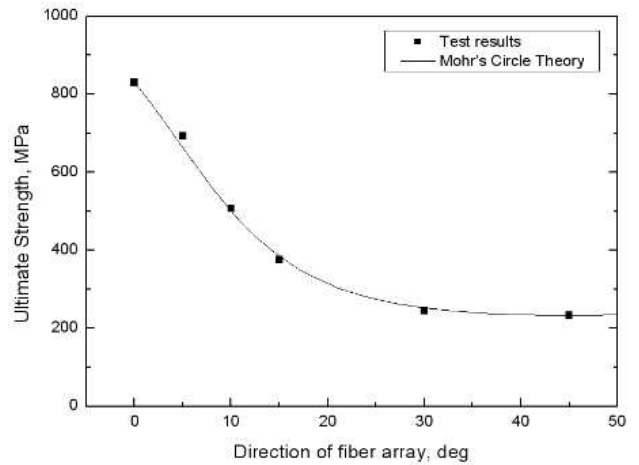


Fig. 8 Comparison of the test results and the predicted results

배열각도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

김성집⁽¹⁾은 식 (1)과 같은 조화함수를 이용한 곡선 접합을 통하여 임의의 각도 θ 에 대한 인장강도 예측식을 구하였다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{E_{\theta}}{E_0} S_0 (1 - \sin 2\theta) + \frac{E_{\theta}}{E_{45}} S_{45} \sin^2 2\theta \quad (1)$$

Fig. 8은 식 (1)의 예측식을 이용하여 구한 결과를 시험 결과와 함께 비교한 것으로 시험 결과와 예측식은 최대 약 4%의 오차를 보이는 것으로 일치함을 확인할 수 있다.

3.2 수정된 Tan 강도함수를 이용한 예측식

Tan과 Cheng 등^(3~6)은 섬유배열화 복합재료의 강도가 섬유배열각도에 따라서 주기성을 갖고 있음을 고려하여 이를 Fourier급수로 나타낸 Tan 강도이론을 제안하였다. 본 연구에서 다루고 있는 평직 탄소섬유 복합재료의 경우에는 섬유구조가 Fig. 9와 같이 $\pi/2$ 를 주기로 변하기 때문에 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 Cosine급수에서 전개되는 항의 개수에 따라 재료강도의 신뢰도가 결정된다. 만약 항의 개수를 3으로 할 경우, 강도함수는 3개(C_0, C_2, C_4)의 상수로 표현되므로, 이들 상수를 구하기 위해서

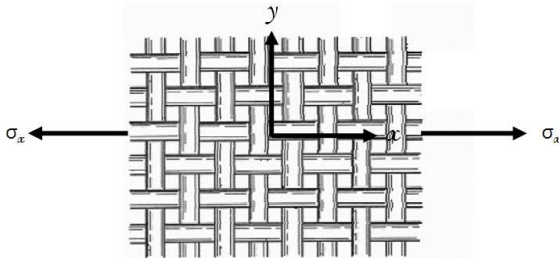


Fig. 9 Coordinates system of fabric lamina

는 3종류의 재료강도가 필요하다. Tan의 강도합수를 나타내기 위해 3개의 항을 가진 식 (3)을 이용하였다.

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

식 (3)의 상수 C_0, C_2, C_4 를 구하기 위하여 섬유 방향의 인장강도 X_T , 30° 섬유배열각도의 인장강도 U_T 그리고 45° 섬유배열각도의 인장강도 Y_T 를 사용하였다. 이들 값을 식 (3)에 적용한 결과는 식 (4)와 같다.

$$\theta = 0^\circ (X_{0^\circ} = X_T) : C_0 + C_2 + C_4 = \frac{1}{X_T} \quad (4)$$

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

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

위의 식을 연립하여 정리하면 각 상수들은 다음과 같이 표현된다.

$$C_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{X_T} + \frac{2}{U_T} \right) \quad (5)$$

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

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

본 연구에서 수행한 평활재의 인장시험 결과를 식 (5)에 대입하면, 아래와 같이 계산된다.

$$C_0 = 3.135 \cdot 10^{-3} (MPa^{-1}) \quad (6)$$

$$C_2 = -1.550 \cdot 10^{-3} (MPa^{-1})$$

$$C_4 = -0.380 \cdot 10^{-3} (MPa^{-1})$$

이 결과를 식 (3)에 대입하면, 파괴강도 예측식은

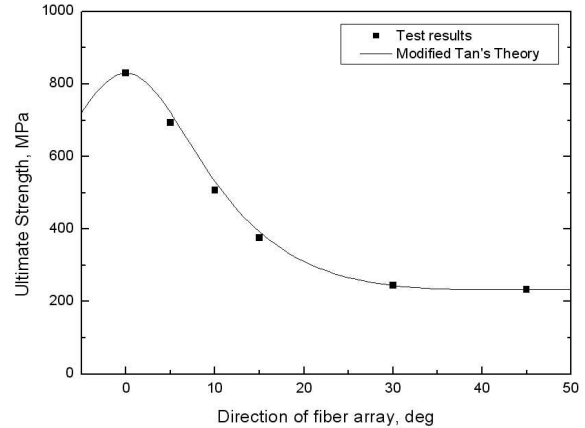


Fig. 10 Tensile strength of analysis and test with direction of fiber array

다음과 같이 유도된다.

$$X_{\theta} = (3.135 - 1.550 \cdot \cos 4\theta - 0.380 \cdot \cos 8\theta)^{-1} \cdot 10^3 (MPa) \quad (7)$$

Fig. 10에 나타난 것과 같이 평활재의 파괴강도 예측식은 인장시험으로 획득한 강도값을 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 볼 수 있다. 또한, 예측식은 임의의 섬유배열각도에 따른 강도 변화 거동에 대한 경향을 잘 보여주고 있는 것으로 평가된다. 시험 및 예측 결과를 살펴보면, 섬유배열각도가 $0^\circ \sim 30^\circ$ 구간에서는 섬유배열각도에 따라 인장강도가 급격하게 변화하고, $30^\circ \sim 45^\circ$ 구간에서는 다소 완만하게 감소하는 경향을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

식 (3)의 상수 C_0, C_2, C_4 를 구하기 위하여 30° 섬유각의 인장강도 U_T 가 아닌 15° 섬유각의 인장강도 W_T 를 사용할 경우, 상수를 구하기 위한 식은 식 (8)과 같다.

$$\theta = 0^\circ (X_{0^\circ} = X_T) : C_0 + C_2 + C_4 = \frac{1}{X_T} \quad (8)$$

$$\theta = 15^\circ (X_{15^\circ} = W_T) : C_0 + \frac{1}{2}C_2 - \frac{1}{2}C_4 = \frac{1}{W_T}$$

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

위의 식을 연립하여 정리하면 각 상수들은 다음과 같이 표현된다.

$$C_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{2}{W_T} + \frac{1}{Y_T} \right) \quad (9)$$

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

$$C_4 = \frac{1}{6} \left(\frac{3}{X_T} - \frac{4}{W_T} - \frac{1}{Y_T} \right)$$

평활재의 인장시험 결과를 식 (9)에 대입하면, 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 C_0 &= 3.207 \cdot 10^{-3} (MPa^{-1}) & (10) \\
 C_2 &= -1.550 \cdot 10^{-3} (MPa^{-1}) \\
 C_4 &= -0.460 \cdot 10^{-3} (MPa^{-1})
 \end{aligned}$$

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

$$X_\theta = (3.207 - 1.550 \cdot \cos 4\theta - 0.460 \cdot \cos 8\theta)^{-1} \cdot 10^3 (MPa) \quad (11)$$

수정된 Tan 예측식의 상수를 구하기 위하여 사용된 강도 중, 섬유배열각도가 30°/60°인 인장강도 대신에 섬유배열각도가 15°/75°인 인장강도를 이용하여 구한 식 (11)의 계산결과를 Fig. 11에 나타내었다. 시험결과와 예측결과는 오차율 2% 이내로 일치하는 것을 알 수 있다. 또한, 섬유배열각도가 0°/90°와 30°/60°, 45°/45°인 인장강도를 이용하여 구한 식 (6)과 섬유배열각도가 30°/60° 인장강도 대신에 15°/75°인 인장강도를 이용하여 구한 식 (11)의 예측결과를 시험결과와 함께 Fig. 12에 나타내었다. 섬유배열각도가 15°인 인장강도를 사용하여 구한 식 (11)에 의한 결과가 인장강도가 급격하게 변화하는 0°와 30°사이의 강도 변화 경향을 더욱 잘 묘사하는 것으로 나타났으며, 수정된 Tan의 식을 이용하여 임의의 섬유배열각도에 따른 인장강도를 구하는 데 있어서, 급격하게 변화하는 구간에 있는 인장강도를 이용하여 예측하는 것이 더 유용하다고 판단된다.

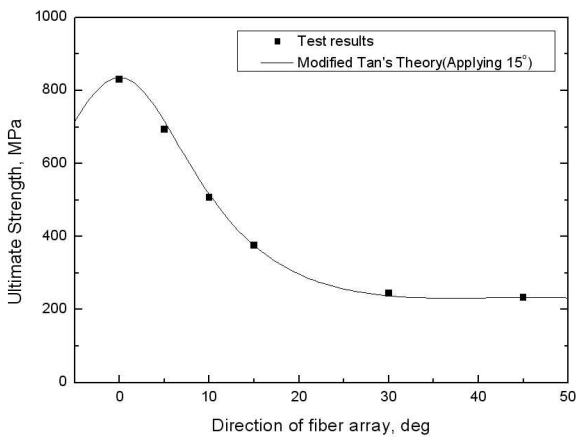


Fig. 11 Comparison of the test results and the predicted results

4. 고찰

수정된 Tan의 예측식인 식 (11)과 Mohr's Circle을 이용한 예측식인 식 (1)을 이용하여 구한 섬유배열각도에 따른 강도를 Fig. 13에 비교하여 나타내었으며, 두 식 모두 섬유배열각도가 45°로 증가하는 경우 동일한 강도 저하를 나타냈다. 특히, 15° 이후의 경우에는 두 식이 유사한 경향을 나타내었으나 0°에서 15°사이에서 예측결과에 차이가 있음을 확인할 수 있다.

두 예측식은 시험을 통해 획득한 파괴강도를 잘 묘사하고 있는 것으로 보이나, Fig. 13과 같이 0°와 45°의 탄성계수, 인장강도를 조화함수 형태로 전개한 Mohr's Circle을 이용한 예측 결과에 비해 Fourier급수 형태로 0°/90°와 45°/45°의 인장강도, 임의의 각도에서의 인장강도를 이용한 수정된 Tan의 예측결과가 시험결과를 보다 잘 예측

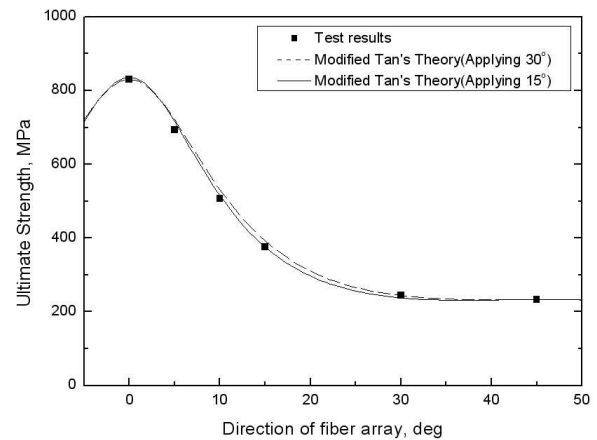


Fig. 12 Comparison of the predicted results

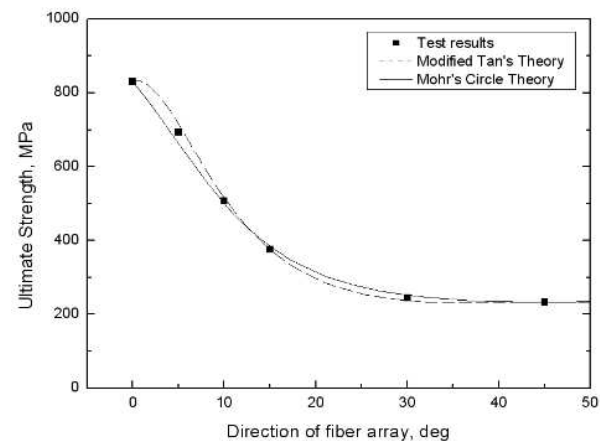


Fig. 13 Comparison of each proposed equation

하는 것을 알 수 있다. 특히 수정된 Tan의 예측식의 경우, 파괴강도가 수렴하는 $30 \sim 45^\circ$ 부근의 데이터를 적용하는 것보다 파괴강도가 급격히 변화하는 15° 부근의 데이터를 적용하는 것이 강도가 급격하게 변화하는 0° 와 30° 사이의 값을 더욱 잘 묘사하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

섬유배열각도에 따른 강도를 예측하기 위한 수정된 Tan 강도함수는 섬유배열 각도가 서로 다른 3개의 인장강도 값을 필요로 하는 반면, Mohr's Circle을 이용한 예측식은 두 개의 강도 값과 두 개의 탄성계수 값, 두 개의 탄성계수 값으로부터 구한 임의의 각도 θ 에 대한 탄성계수를 필요로 한다.

따라서 두 식은 섬유배열각도에 따른 강도를 잘 예측하는 것으로 나타났으나 수정된 Tan의 예측식이 섬유배열각도에 따른 강도를 예측하는데 적은 수의 인수를 요구하므로, 수정된 Tan의 예측식을 적용하는 것이 더 유용하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0020442, 2012M2A8A1029423).

참고문헌

- (1) Kim, S. J. and Jang, S. H., 2006, "The Effect of Bias and Shear Angles on Compressive Characteristics of Carbon/Epoxy Plain Weave Fabrics," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 7, pp. 857~864.
- (2) Jeong, W. K. and Lim, W. K., 2005, "Failure Criteria of Fibrous Composites Under Combined Stress," *KSME proceeding of annual fall conference*.
- (3) Tan, S. C. and Cheng, S., 1997, "Failure Criteria for Fibrous Anisotropic Materials," *International J. of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.5, No.2, pp.198~211.
- (4) Kim, S. Y., Park, H. S., Kang, M. S., Choi, J. H., Koo, J. M. and Seok, C. S., 2009, "Evaluation of Failure Strength of Woven CFRP Composite Plate Subject to Axial Load by Tan-Cheng Failure Criterion," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 4, pp. 360~365.
- (5) Hankinson, R. L., 1929, "Investigation of Crushing Strength of Spruce at Varying Angles of Grain," *Air Service Information Circular*, No. 259, US air Service
- (6) Lim, W. K., Lee, S. K. and Jeong, W. K., 2005, "Simple Analysis of the Tan's Failure Criterion on Fibrous Anisotropic Materials," *KSME proceeding of annual spring conference*, pp. 518~523
- (7) ASTM D3039-93, 1993, "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Resin Composite,"