

CFRP FEM 비선형 해석을 위한 물성치 재확립에 관한 연구

김정호*, 김치중⁺, 차천석⁺⁺, 김지훈⁺⁺⁺

(Manuscript received: Mar, 12, 2012 / Revised: May, 4, 2012 / Accepted: May, 21, 2012)

Recalculation Research of Material properties for CFRP FEM Non-linear Analysis

Kim Jung Ho*, Chi Joong Kim⁺, Cheon Seok Cha⁺⁺, Kim Ji Hoon⁺⁺⁺

Abstract

To reduce these costs and time by finite element analysis program has been much research (3~4). At virtual CAE program as like Abaques, Ansys, Ls-dyna and Nastran, the input data of material is got bellow coupon test. In case of carbon composite, it is also put in lamina/laminate properties. There have big problem. If you want to simulate FW(filament winding or wind blade) how do you input material data. Each area of FW is different stacking conditions. It's too hard that each area is tested for inputting lamina or laminate properties. The composite structure increasing load is applied occurred as the matrix dependence of the crack-induced nonlinearity and nonlinear mobility appears since the initial damage. And uni-direction for this research applies the theory to have been confined to. On this study, we are going to get basically fiber properties and matrix than carbon composite properties for simulating according stacking method by GENOA-MCQ. It is help to simulate easily composite material. Also Calculate the matrix nonlinear for simulating non-linear

Key Words : CAE(유한요소해석), Lamina/Laminate(박판), Non-linear(비선형), Fiber properties(탄소요소), Matrix properties(기지요소)

1. 서론

현재 전 세계적으로 에너지 부족현상으로 대체 에너지원의 개발 및 환경오염을 줄이고자 많은 연구들이 진행되고 있다. 환경오염에 주원인이 되는 수송차량을 연비의 효율을 좋게 하고 배기가스 배출량을 줄이고자 기존의 강성과 강도를 유지하며 더불어 낮은 무게를 갖도록 설계가 되고 있다. 다른 금속에 비해 비강도와 비강성이 높은 탄소 섬유복합재료 핫이슈로 떠오르고 있다. 탄소 섬유복합재료는 1960년대 항공우주분야에서 시작으로 1980년대 이후 아라미드섬유 복합재, 탄소섬유 복합재

등의 재료 발전 및 생산가격 하락, 물성개선 등의 꾸준한 향상으로 자동차 분야들 여러분야로 사용이 증가하고 있다. 현재를 많은 분야에 적용되고 있다. 본 연구에 사용될 탄소섬유복합재료는 방향성을 갖는 이종재료인 탄소 복합재료는 정확한 환경조건에 따라 제작방법(curing condition, 적층방법, 흡습상태)을 달리 하여야 한다. 탄소 섬유복합재는 적층방법, 두께, 형상과 같은 제작 방법과 섬유와 에폭시 수지(Matrix)의 종류에 따라 매우 다양한 특성을 나타낸다. 정확한 환경 조건에 맞는 제작방법 및 종류를 이론계산으로 예측 한다는 건 매우 어려워 주로 실험에 의존하고 있다. 그러나 실험에 의존하기에는

* 조선대학교 첨단부품소재공학과
+ 조선대학교 첨단부품소재공학과
++ 동강대학 소방안전관리과
+++ 교신저자, 조선대학교 기계설공학과 (kjh@chosun.ac.kr)
주소: 501-759 광주광역시 동구 필문대로 309

CFRP를 적층하여 최종 실험에 적합한 형상으로 가공하기까지의 비용이 비싸며 이중재료라는 특성상 같은 형상의 같은 제작 방법의 시편이더라도 편차가 매우 커 일반 금속 실험보다 많은 양의 실험이 이루어져야 하며 미국재료시험협회(ASTM)에서도 명시되어 있다.

금속재료를 최적의 형상 설계를 하기에 앞서 유한요소법을 이용한 시뮬레이션 프로그램을 통한 여러 연구들이 되어 지고 있다.

본 연구에서도 시간과 비용을 절약하기 위해 시뮬레이션 프로그램을 적용하고자 한다. 일반적인 금속을 이용한 유한요소 해석을 하기 위해서는 인장실험을 통한 Stress-Strain 선도와 강도, 탄성계수, 푸아송비등과 같은 재료의 물성치가 요구된다. 탄소 섬유복합재료의 경우에는 Lamina 혹은 Laminate에서 x축 그리고 y축인장, x축 그리고 y축압축, 전단과 같은 5종류의 기본적인 쿠폰실험을 하여 얻어진 인장/압축/전단강도와 탄성계수가 일반 범용 시뮬레이션 소프트웨어에서 섬유복합재료의 물성으로 사용된다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 탄소 섬유복합재료는 탄소 섬유(선형재료)와 에폭시 수지(비선형재료)가 복합된 이중재료이다. 이 두 재료의 상호 관련을 고려하지 않고 한 개의 재료로 취급하여 시뮬레이션이 진행될 경우 실제실험과 시뮬레이션과 정확성 및 신뢰성이 떨어지게 된다. 그리고 FW (Filament Winding)과 풍력 블레이드와 같은 섬유복합재료 이루어진 Component를 보면 각 부위마다 복합재의 적층 방향 및 두께가 각기 다르다⁽¹⁾. 이러한 경우 각 부위의 쿠폰시편을 각각 추출하여 물성 데이터를 얻어야 하는데 이런 경우 시간과 비용을 절약하고자 하는 취지에 어긋난다. 에폭시 수지의 물성의 경우 실험조건이 매우 까다로워 에폭시 수지의 비선형선도를 포함한 에폭시 수지 물성을 얻는 것 매우 힘들다. 세라믹 계열의 물성치를 공급하는 회사가 있으나 상상 이상의 비용을 지불 하여야 한다.

본 연구에서는 탄소섬유복합재료의 인장, 압축, 전단 실험을 통해 재료의 물성을 얻고, GENOA(복합재료 전용 해석프로그램)을 이용하여 탄소섬유와 에폭시 수지의 물성(비선형 선도)을 역계산을 통해 얻은 후 실제 쿠폰 실험 결과와 해석결과의 신뢰성을 평가하고 적층별 변화에 따른 예측을 하고자 한다^(2,3).

2. 실험방법

탄소 섬유복합재료는 물성을 얻기 위해 기본적으로 인장(0°, 90°), 압축(0°, 90°) 그리고 전단(V-notched or In-plane)실험을 진행하였다. 인장, 압축 그리고 전단의 시험편 크기 및 지그는 ASTM에 따라 진행하였다^(5,6). GENOA-MCQ(Alphastar Corp) 프로그램을 사용하여 각 탄소섬유와 에폭시 수지의 물성을 역계산을 통해 얻었고, 얻어진 각 물성치를 사용하여 실제

쿠폰실험과 동일한 조건으로 시뮬레이션 하여 타당성 평가를 하고, 이를 이용하여 적층각도 변화에 따른 강도 및 강성을 예측 하였다.

2.1 시험편

인장0°, 인장 90°, 압축0°, 압축90° 그리고 전단(V-notched)을 ASTM규격에 따라 복합재료 전문업체인 KCA(Korea Composites Application)에 핫프레스 방법으로 제작하였으며, 시편의 재료는 Uni-direction prepreg sheet(SK Chemical, USN125A)을 사용하였다. 시편의 개수는 최소 7개로 하였다. 시편에 중앙에 스트레인게이지를 부착한 후 UTM에서 하중을 얻고 스트레인메타에서 변형량을 얻어 Stress-Strain Curve를 얻어 각 시편의 강도와 강성을 얻었다. 실험이후 각 종류의 실험결과값들간의 편차가 30% 이상 차이가 나는 경우 실험과정이나 제작과정에 불량발생으로 판단하고 그 결과값들은 제외하였다.

2.2 실험장치

섬유복합재료 실험을 위한 인장, 압축 그리고 전단 역시 ASTM 규격에 따라 제작하였다. 이들 장치들은 UTM에 장착하여 2 mm/min으로 정적실험을 하였다. 보편적으로 알려진 인장지그를 제외한 압축과 전단 지그는 Fig. 1에 나타내었다. 23±3°C and 50±10% 상대습도(relative humidity) 환경조건에서 실험을 진행

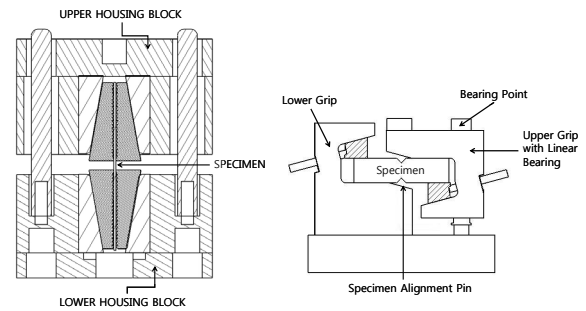


Fig. 1 Schematic of Coupon Test Apparatuses

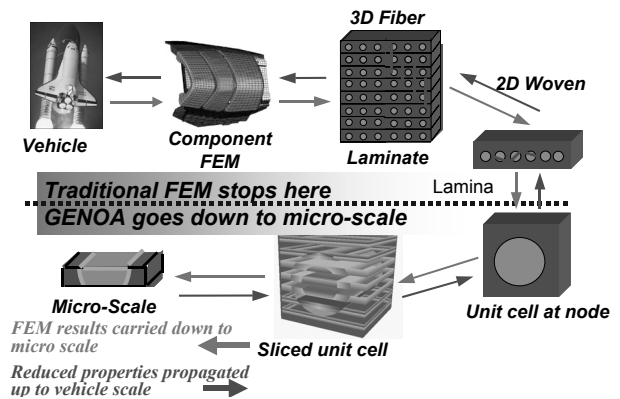


Fig. 2 About GENOA

하였다. 이는 환경요인에 의한 실험적 실패를 방지하고자 함이다.

2.3 Simulation – GENOA-MCQ

기존의 FEA code는 복합재 lamina/laminate 수준까지만 파단을 예측하므로 실제로 Micro scale의 Fiber/Matrix에서 발생하여 파급되는 복합재 구조물의 Failure를 정확히 예측할 수 없다. NASA 연구결과로 AlphaStar(www.ascgenoa.com)사에서 개발한 GENOA는 Micro scale에서 생기는 Failure 발생 및 이에 따른 복합재 물성변화를 순차적으로 고려하여 정확히 복합재 구조물의 Failure를 해석할 수 있는 도구이다⁽²⁻⁴⁾.

3. 결과 및 고찰

인장, 압축, 전단의 각 실험시 UTM에 해당 지그를 장착하여 실험 후 얻어진 하중과 변위량을 식 (1), (2)에 의하여 Stress-Strain Curve와 강성계수를 얻었다. 압축90°와 전단의 경우 비선형이 나타나 0.2% 오프셋으로 허용강도를 얻었다. 실험의 강도와 강성계수를 Table 1에 나타내었다.

$$\sigma = \frac{P_{max}}{A} \tag{1}$$

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \tag{2}$$

인장 0°, 인장 90°의 경우 기울기는 거의 같으나 파단 강도가 각기 다름이 나타났다. 파단 강도 값의 차이는 제작과정이나 시편절단 과정에 미세한 크랙발생이 영향을 미쳤거나 실험진행

Table 1 Types of CFRP hat-shaped sectional members

	Stress (GPa)	Modulus (GPa)
Tension 0°	1.7980	123.3651
Tension 90°	0.0262	7.9383
Compression 0°	0.5204	102.2490
Compression 90°	0.0368	8.3225
Shear	0.0052	9.7025

Table 2. Material Properties of Fiber and Matrix

Fiber	Modulus (GPa)				Poisson Ratio		Strength (GPa)	
	E11	E22	G12	G23	NU12	NU23	S11T	S11C
	230.1	7.304	23.04	2.516	0.282	0.451	3.131	0.815
Matrix	Modulus (GPa)		Poisson Ratio		Strength (GPa)			
	E	NU	ST	SC	SS			
	10.41	0.34	0.033	0.236	0.078			

과정시 미세한 크랙발생이 원인이 될 수 있으나 그러나 기울기는 거의 일치함을 보여 이는 무시하였다. 탄소섬유복합재료의 특징인 압축90°와 전단실험 결과 비선형이 나타났다.

Table 1에서의 값을 사용하여 GENOA-MCQ 시뮬레이션을 이용하여 탄소섬유와 에폭시 수지의 각 물성치를 역계산하여 얻었고 Table 2에 나타내었다. 역계산으로 얻은 시 기본적으로 탄소 섬유의 탄성계수와 에폭시 수지의 푸아송 비는 실제 CFRP prepreg sheet에 표기된 값을 사용하였다.

Table 2를 사용하여 다시 쿠폰시편과 동일한 적층각도 및 적층수를 동일시하여 실제 실험과 동일한 방법으로 시뮬레이션을 하였다. 이는 역계산된 탄소섬유와 에폭시 수지의 물성이 올바르게 얻어 졌는지 타당성 평가를 하기 위함이다. 실제실험에서 얻어진 S-S선도와 탄소섬유와 에폭시 수지의 물성을 이용하여 시뮬레이션으로 얻어진 S-S선도를 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3에서 ST와 RT는 시뮬레이션 실험과 실제 시험을 나타내며 T, C 그리고 S는 인장, 압축, 전단을 나타내고 xx, yy 그리고 xy는 0°, 90° 그리고 전단을 나타낸다. 쿠폰실험과 시뮬레이션을 비교해본 결과 인장 0°, 인장 90° 그리고 압축 0°는 일치함을 보였으나, 쿠폰실험에서 비선형으로 나타난 압축 90°와 전단에서는 시뮬레이션이 선형으로 나타나 일치하지 않았다. 그 이유는 서론에서 언급한 바와 같이 에폭시 수지의 비선형을 고려하지 않음이다.

GENOA-MCQ에서 MCO와 MUA 모듈을 사용하여 에폭시

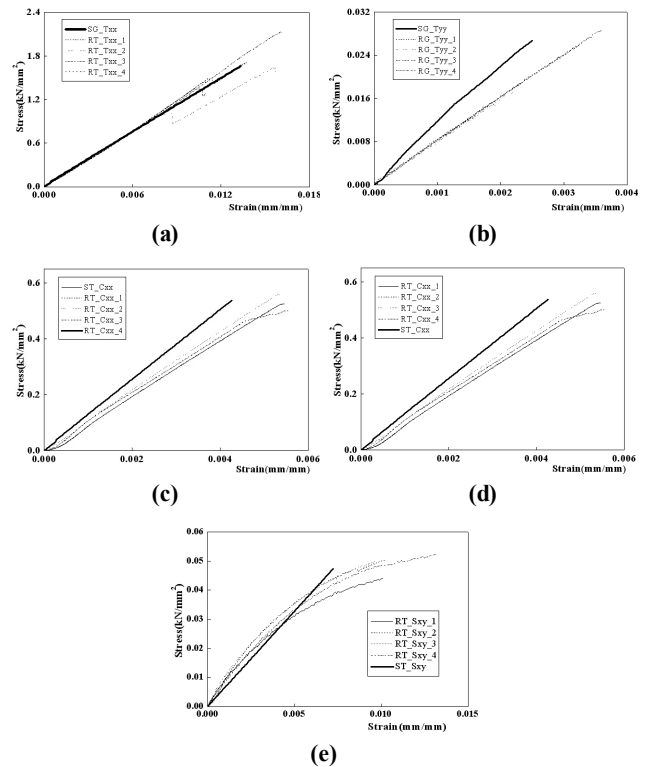


Fig. 3 Comparison with Virtual Test and Simulation Data

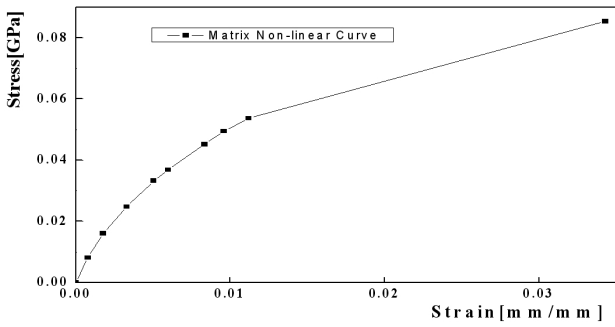


Fig. 4 Stress-Strain Curve for Matrix

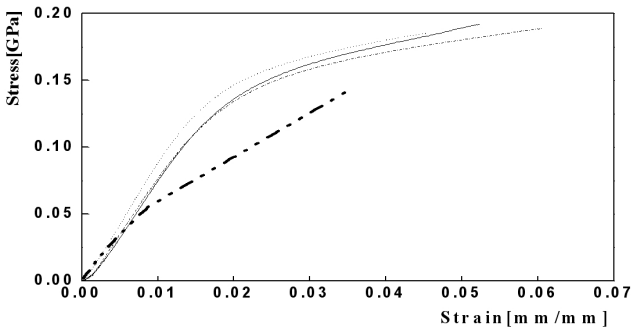


Fig. 5 Comparison with Test and Re-Simulation for Compression 90°

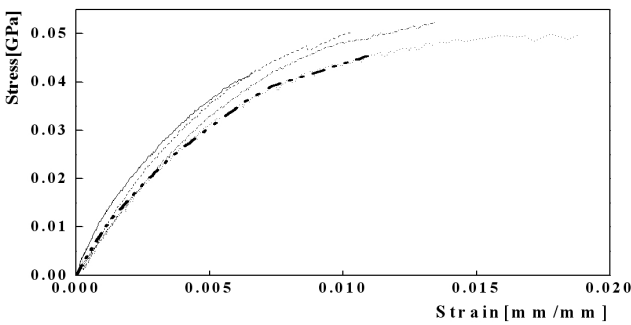


Fig. 6 Comparison with Test and Re-Simulation for Shear

수지의 비선형 S-S선도를 Fig. 4와 같이 얻었고 에폭시 수지 비선형 S-S선도를 포함하여 다시 시뮬레이션을 하여 Fig. 5~6에 나타내었다. 선형으로 나타난 인장 0°, 인장 90° 그리고 압축 0°는 나타내지 않았다. 압축 90°에서는 비선형적으로 시뮬레이션이 되었으나 Fig. 5와 같이 실제 값과 맞지 않음이 나타났고, 전단 시뮬레이션의 경우는 실제 실험과 매우 근접한 결과를 보였다. 이러한 경우 Alphastar 본사에 문의한 결과 탄소섬유복합재로 구성된 구조체 해석을 위한 데이터로 사용한다고 가정할 때, 압축 90°의 비선형이 구조체에 미치는 영향이 미비하여 압축 90° 대한 결과에 큰 문제가 없다는 답변을 얻었다. 이는 추후 본 연구에서 얻어진 데이터를 사용하여 CFRP으로 제작된 구조물 시뮬레이션에서 나타내도록 한다. Re-simulation 결과 탄소섬유와 S-S선도를 포함한 에폭시 수지 물성치를 사용하여

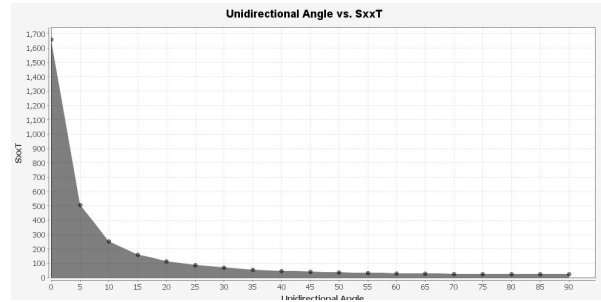


Fig. 7 The simulation data of tension test according changing angles

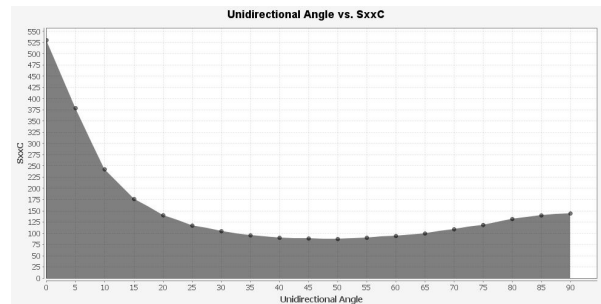


Fig. 8 The simulation data of compression test according changing angles

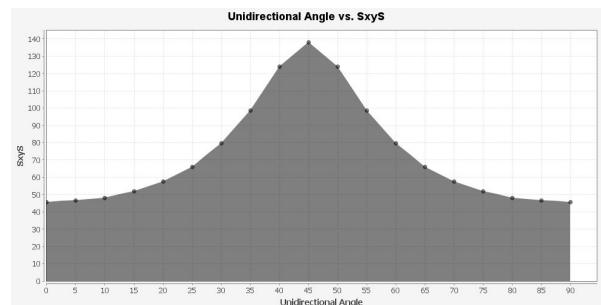


Fig. 9 The simulation data of shear test according changing angles

쿠폰 실험에 얻어진 결과 값과 일치함을 보였다.

본 연구 이후 적층각도가 복잡한 여러 시편을 제작·실험하고 본 실험에서 얻어진 탄소섬유와 에폭시 수지 물성치를 이용한 시뮬레이션 결과 비교하는 연구가 진행 중이다.

본 연구에서 얻어진 탄소섬유와 에폭시 수지 물성을 이용하여 간단한 적층각 변화에 따른 인장강도, 압축강도 그리고 전단 강도를 시뮬레이션으로 예측한 결과를 Fig. 7~9에 나타냈다.

Fig. 7은 적층방향에 따른 인장강도를 나타낸다. 0에서 약 1700(MPa)으로 가장 큰 값을 갖고 적층각이 증가할수록 강도가 로그형태로 감소함을 예측할 수 있다. Fig. 8에서는 적층방향에 따른 압축강도를 나타냈다. 인장강도와 비슷하게 초기 0도에서 525(MPa)으로 가장 높은 값이 나타났고 20도~90도 구간에서 중앙을 기점으로 넓은 U형태의 그래프가 나타났다.

Fig. 9는 적층방향에 따른 전단강도를 나타냈다. 45도에서 145(MPa)으로 가장 높은 값을 갖고 양쪽으로 전단강도가 감소함을 예측할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 이중재료를 탄소섬유 복합재료를 Lamaina 혹은 Laminate형태로 이루어진 시뮬레이션을 GENOA-MCQ를 사용하여 비선형 해석이 가능한 탄소섬유와 S-S전도를 포함한 에폭시 수지 물성치를 얻었으며, 실험과 일치함을 보였다.

- (1) 인장0°, 인장 90°, 압축0°, 압축90° 그리고 전단 쿠펜실험에서 얻어진 데이터를 가지고 GENOA-MCQ를 사용하여 Lamina/Laminate보다 원초적인 탄소섬유와 에폭시 수지의 물성을 얻었다.
- (2) 비선형 선도 해석을 위해서는 에폭시 수지의 비선형 S-S 선도를 MCO와 MUA 모듈을 사용하여 최적의 탄소섬유 물성과 에폭시 수지의 물성을 얻었고, 이들 물성치를 사용하여 실제 실험과 비교하였고 거의 일치함을 보였다.
- (3) 에폭시 수지의 물성과 비선형 선도 그래프는 복합재료의 유한요소 해석에 중요한 요소이다.
- (4) 이들의 물성을 사용하여 적층변화별 인장강도, 압축강도 그리고 전단강도를 예측하였고 인장강도에서는 0도에서 1700(MPa), 압축강도에서는 0도에서 525(MPa) 그리고 전단강도에서는 45도에서 145(MPa)의 최고값을 나타남을 예측할 수 있다.

후 기

이 논문은 2010년 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

References

- (1) Lee, S. P., Kang, K. W., Chang, S. M., and Lee, J. H., 2011, "Structural Design for 2kW Class Wind Turbine Blade by using Design of Experiment," *KSMTE*, Vol. 20, No. 1, pp. 28~33.
- (2) Minnetyan, L., Su, X., Abdi, F., and Chamis, C. C., 2008, "Fiber-matrix Interphase Effects on Damage Progression in Composite Structures," *49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA 2008-1732, pp. 092407.
- (3) Soden, P. D., Hinton, M. J., and Kaddour, A. S., 1998, "A Comparison of The Predictive Capabilities of Current Failure Theories for Composite Laminates," *Composites Science and Technology*, No. 58, pp. 1225~1254.
- (4) Dávila, C. G., Jaunky, N., and Goswami, S., 2003, "Failure Criteria for FRP Laminates in Plane Stress," *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Confere*, AIAA 2003-1991, pp. 1~11.
- (5) ASTM, D3039, *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, D3039/D3039M-00(April 10, 2000)
- (6) ASTM, D3410, *Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading*, D3410/D3410M-03(June 10, 2003)
- (7) ASTM, D5379, *Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-notched Beam Method*, D5379/D5379M-98(Dec. 10, 1998)