다축경편 복합재료의 거동에 관한 연구

김형우*·전흥재**·변준형***

Mechanical Behaviors of Multi-Axial Warp Knitted Fabric Composites

Hyung-Woo Kim, Heoung-Jae Chun, Joon-Hyung Byun

Abstract

An analytical model using expanded bridging model was proposed to predict the elastic properties and behaviors of stitched multi-axial warp knitted (MWK) fabric composites. The characteristics of MWK fabric composites are the assemblage of multi-layers of fiber bundles for in-plane reinforcement and stitch yarns for the through-the-thickness reinforcement. In the analysis, a representative volume of the MWK fabric composite was identified. The geometric limitations, effects of stitching yarns and design parameters of MWK fabric composites were considered in the model. Then, the elastic properties and behaviors of MWK fabric composites were predicted. Finally, the results of proposed model of the composites were verified through the experiments. The predicted results were in fair agreement with the experimental results.

Key Words: Micromechanics, Representative volume, Bridging model, Multi-axial warp knitted composite

1. 서 론

복합재료는 비강도, 비강성 특성으로 인해 구조물의 경량화를 달성하는데 매우 유리한 재료로서 그 사용범위가 점차 넓어지고 있다. 반면 기존의 적층형 복합재료에 있어서는 층간 결합력에 의한 두께방향 물성이 취약한 단점 등을 지니고 있다. 따라서 최근 복합재료에 관한 연구는 기존 2차원 복합재료의 단점인 층간 전단력과 충격흡수성 그리고 두께방향 물성향상의 필요성을 충족시키기 위해 3차원으로 스티칭 된 복합재료에 집중되고 있다. 그러나 복합재료의 이방성(anisotropic) 특성으로 전통적인 시험에 의한 방법으로 스티칭의 효과가 고려된 복합재료의 물성을 측정하는데 어려움이 있다. 따라서 시험을 통하지 않고 구성물질의 기계적 물성만으로 복합재료의 기계적 물성 및 거동을 동시에 예측하기 위한 이론적 모델이 필요하게 된다. A. P. Mouritz *et al.*[1]은 섬유강화 복합재료에서의 스티칭에 의한 면내 물성에의 영향에 대하여 연구하였으며, S. V. Lomov *et al.*[2]은 스티칭 된 프리폼의 기하학적 형상에 관한 연구를 하였고, Y. J. Wang[3]은 스티칭 된 다축 경편 섬유 복합재료의 기계적 물성에 관한 연구를 진행하였다. S. S. Suh *et al.*[4]은 직물형 복합재료의 스티칭 영향에 대한 연구를 하였고, Z. M. Huang *et al.*[5]은 브리징 모델을 사용하여 복합재료의 물성예측 및 평가 실시하였으나 대부분 제한적인 조건하에서의 연구 성과인 경우가 많으며 스티칭에 의한 효과를 고려하지 않았다.

본 연구에서는 구성재료의 기계적 물성값과 기하학적 구조를 고려하여, 다축경편 복합재료(MWK)에 대한 모델에 적용하여 3차원 구조를 갖는 복합재료의 단위 셀에 대한 기하학적 구조를 설정하고, 미소 역학적 물성예측 모델을 위해 Expanded Bridging 모델을 이용하여 강성 및 거동을 예측하였다.

* 연세대학교 기계공학과 대학원
** 연세대학교 기계공학부
*** 한국기계연구원 복합재료그룹

2. 복합재료의 물성 예측 모델

2.1 미소 단위 체적의 기하학적 구조

본 연구에 사용된 MWK (multi-axial warp knitted) fabric은 $[O_4]_n$ (T800)와 $[0/45/90/-45]_{sn}$ (DBLT 850)의 배열구성을 가지며 섬유 다발에는 유리(E-glass)섬유를 Knitting yarn에는 폴리에스터를 사용하였다. 이러한 MWK fabric을 케블라 섬유를 이용하여 스티칭 기계에 의해 보강섬유의 횡방향(90°: y-direction)으로 스티칭을 실시하였다. 이러한 3차원 구조를 갖는 복합재료의 물성 예측을 위해서는 먼저 복합재료의 기하학적 구조를 이상화하여 분석하는 것이 필요하다. 3차원 복합재료의 전체구조는 반복구조로 설정하여 정량화가 가능한데 이때의 최소 반복구조를 단위 셀이라 한다. 단위 셀을 이용한 모델링의 일반적 절차는 전체 구조물을 관찰하여 단위 셀의 치수를 설정하고, 단위 셀 내부에 존재하는 섬유다발의 단면형상 관찰을 통하여 이상화하게 된다.

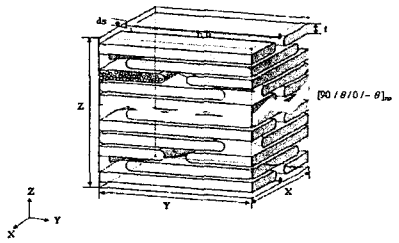

Fig. 1 이론적 해석을 위한 미소단위체적.

(a) fiber bundle (b) stitching yarn

Fig. 2 섬유단면의 형상.

먼저 단위구조의 관찰된 결과를 토대로 삽입섬유 다발 (insertion fiber bundle)의 두께 (t)와 폭 (w)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$w_x = X - d_s = f_x t_x \tag{1.a}$$

$$w_y = Y - d_s = f_y t_y \tag{1.b}$$

$$w_{\pm\theta} = \frac{\left(\sqrt{X^2+Y^2} - \left(1+\frac{1}{\sqrt{2}}\right)d_s\right)}{2} = f_{\pm\theta} t_{\pm\theta} \tag{1.c}$$

여기서 w_x, w_y, $w_{\pm\theta}$, d_s는 각각 x, y, $\pm\theta$방향 삽입섬유다발의 폭, stitching yarn 의 지름을 나타내며, X, Y, Z는 각각 단위구조의 폭, 두께, 높이를 나타낸다.

$$t_x = t_y = t_{\pm\theta} = (Z - 2d_s)/(Number\,of\,ply) \tag{2}$$

여기서 t_x, t_y, $t_{\pm\theta}$ 는 각각 x, y, $\pm\theta$방향 삽입섬유다발의 폭과 두께를 나타낸다.

$$S_x = \left(\frac{x}{4} + \frac{w_x}{t} - 1\right)t_x^2 \tag{3.a}$$

$$S_y = \left(\frac{\pi}{4} + \frac{w_y}{t} - 1\right)t_y^2 \tag{3.b}$$

$$S_{\pm\theta} = \left(\frac{\pi}{4} + \frac{w_{\pm\theta}}{t_{\pm\theta}} - 1\right)t_{\pm\theta} \tag{3.c}$$

$$S_s = \frac{\pi}{4} d_s^2 \tag{3.d}$$

여기서 $S_x, S_y, S_{\pm\theta}, S_s$ 는 각각 x, y, $\pm\theta$ 방향 삽입섬유다발의 단면넓이와 스티칭섬유 (stitching yarn)의 단면넓이를 나타낸다.

$$V_i = nV_{iy} + 2nV_{i\pm\theta} \tag{4.a}$$

$$V_s = V_{sy} + V_{sz} \tag{4.b}$$

$$V_{ix} = S_x X, \tag{4.c}$$

$$V_{iy} = S_y Y, \tag{4.d}$$

$$V_{i\pm\theta} = 2S_{\pm\theta}\sqrt{X^2+Y^2}, \tag{4.e}$$

$$V_{sy} = 2S_s Y, \tag{4.f}$$

$$V_{sz} = 2S_z(X - 2d_s) \tag{4.g}$$

여기서 V_{ix}, V_{it}, $V_{i\pm\theta}$는 각각 x, y, $\pm\theta$ 방향 섬유다발의 부피, V_{sy}, V_{sz} 는 stitch yarn의 y방향과 z방향의 부피, n는 단위배열 층수에 대한 전체섬유 층수 비를나타낸다.

이때 사용한 구성재료의 물성치는 다음의 Table 1과 같다.

Table 1 구성재료의 물성치

	Density (kg/m^3)	Modulus (GPa)	Poisson's ratio
E-glass	2460	80	0.2
Kevlar	1450	131.7	0.2
Epoxy	1218	3.5	0.3

3. Bridging모델을 통한 물성 예측 이론

3.1 브리징 모델

기지재와 보강섬유의 분포응력 간에 일정한 비례관계가 성립한다는 가정 하에 bridging 행렬을 결정하기 위하여 먼저 하나의 보강섬유로만 이루어진 단섬유 복합재료를 고려한다. 일반적으로 복합재료는 방향성을 가지는 이방성 재료이며 이때의 가정에 사용한 단섬유 복합재료는 일방향 복합재료로서 두개의 대칭면이 존재하므로 횡방향으로의 등방성재료 (transversely isotropic material)로 가정할 수 있다. 단섬유 복합재료의

기지재에 작용하는 응력 (σ^m)과 보강섬유에 작용하는 응력(σ^f)사이의 연관성을 bridging 행렬로 표현하여 단섬유의 복합재료의 유연성행렬을 구하면 다음과 같다.

$$S = (v_f S^f + v_m S^m A)(v_f I + v_m A)^{-1} \quad (5)$$

여기서 v_f, v_m는 각각 섬유와 기지재의 부피 체적율을 나타내고, S^f, S^m는 각각 섬유와 기지재의 유연성 행렬을 나타낸다.

탄성영역에서 브리징 행렬[5]은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{22} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$a_{11} = \frac{E_m}{E_f} = 1 + \alpha\left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right),\ \alpha = 1 \quad (7)$$

$$a_{12} = a_{13} = \frac{v_f E_m - v_m E_f)(a_{11} - a_{22})}{E_f - E_m} \quad (8)$$

$$a_{22} = 1 + \beta\left(1 - \frac{E_m}{E_f}\right) \quad (9)$$

$$b_{22} = 1 + \gamma\left(1 - \frac{G_m}{G_f}\right) \quad (10)$$

$$\beta = \gamma = -\frac{2}{3} \quad (11)$$

여기서 E_f, E_m는 각각 섬유와 기지재의 탄성계수를 나타내며, G_f, G_m는 각각 섬유와 기지재의 전단탄성계수를 나타낸다.

또한 보강섬유와 기지재의 유연성 행렬 (S)은 다음과 같다.

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} \end{pmatrix} \quad (12)$$

여기서 유연성행렬의 계수를 구하기 위한 탄성계수 항들은 섬유다발에서의 값들이 적용되게 된다. 섬유다발은 이방성의 특성을 갖는다. 이를 Chamis model[6]을 적용하여 각 층의 섬유다발에서의 물성 값을 구할 수 있다. 또한 각각의 섬유에서의 응력은 전체 섬유의 응력에 비례한다고 가정할 수 있다.

$$\sigma^{fi} = a^i \sigma^f \quad (13)$$

여기서 σ^f, σ^{fi}는 각각 전체섬유에 작용하는 평균응력, i번째 섬유 층에 작용하는 응력을 나타내며, a^i는 전체섬유에 작용하는 평균응력에 대한 각 층에서의 섬유가 받는 응력값의 비례상수를 나타낸다.

따라서 복합재료에 작용하는 응력은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\sigma = \sum_{i=1}^{M} v_f^i a^i \sigma^f + \frac{v_m}{v_f} \sum_{i=1}^{M} v_f^i A^i a^i \sigma^f \quad (14)$$

여기서 v_f^i, v_m^i는 각각 i번째 섬유층의 섬유체적율과 기지재 체적율을 나타내며, M은 복합재에 적층되어있는 전체 섬유 층의 개수를 나타낸다.

또한 위 식을 보강섬유에 작용하는 응력(σ_f) 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma^f = \left(\sum_{i=1}^{M} v_f^i a^i + \frac{v_m}{v_f} \sum_{i=1}^{M} v_f^i A^i a^i \right)^{-1} \sigma \quad (15)$$

기지재에 적용하는 응력(σ_m)는 다음의 식으로 얻어질 수 있다.

$$\sigma_m = \frac{1}{v_m} \sum_{i=1}^{M} v_m^i \sigma^{mi} = \frac{1}{v_m} \sum_{i=1}^{M} v_m^i A^i \sigma^{fi} \quad (16)$$

위에서 구하여진σ^f, σ^m을 평균값이론과 Hook's law를 적용하여 단위 셀의 연성행렬 (S)에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$S = \left(\sum_{i=1}^{M} v_f^i S^{fi} a^i + \frac{v_m}{v_f} S^m \sum_{i=1}^{M} v_f^i A^i a^i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{M} v_f^i a^i + \frac{v_m}{v_f} \sum_{i=1}^{M} v_f^i A^i a^i \right)^{-1} \quad (17)$$

3.2 복합재료의 거동예측

앞서 유도한 Expanded bridging 모델을 이용하면 복합재료의 거동을 쉽게 예측할 수 있다. 먼저 복합재료에 부가되는 응력이 일정하게 증가할 때 응력증분에 대한 변형률은 후크의 법칙에 의해 $d\varepsilon = Sd\sigma$ 이므로 복합재료의 응력과 변형률은 다음과 같다.

$$\sigma^{k+1} = \sigma^k + d\sigma \quad (18)$$

$$\varepsilon^{k+1} = \varepsilon^k + d\varepsilon = \varepsilon^k + Sd\sigma \quad (19)$$

복합재료의 기지재는 거동에 있어 응력이 증가함에 따라 비선형적 특성을 갖는다. 특히 섬유보강의 수직방향에서의 거동은 기지재의 물성이 중요한 요소로 작용한다. 이러한 기지재의 비선형 거동 특성을 이론적 해석 모델에 적용하기 위하여 거동특성에 따라 몇 개의 구간으로 나누어 각 구간에서의 Tangential 강성 (E_m^T)을 적용할 수 있다.[7] 기지재에 부가되는 응력이 증가함에 따라 탄성계수는 matrix hardening modulus (tangent to the stress-strain curve in plastic region)로 바뀌게 된다.

$$E_m^T = \begin{cases} 3.5GPa & when\ 0 \leqq \sigma_e^m \leqq 23MPa \\ 2.3GPa & when\ 23MPa < \sigma_e^m \leqq 37MPa \\ 1.5GPa & when\ 37MPa < \sigma_e^m \leqq 55MPa \\ 0.8GPa & when\ \sigma_e^m > 55MPa \end{cases} \quad (20)$$

따라서 복합재료의 거동은 초기응력을 점증법에 의해 증가시키면서 증가된 응력에 의한 상당응력을 항복강도와 비교하여 유연성 행렬을 계산하기 위한 섬유와 기지재의 탄성계수를 결정한다.

4. 물성 예측 결과 및 고찰

4.1 강성예측 결과

4.1.1 이론적 모델에 의한 스티칭 효과 분석

본 연구에서 사용된 재료의 두께와 간격은 셀의 크기와 관련되어 있다. 또한 재료의 두께 및 스티칭 줄간격의 변화는 스티칭 섬유의 밀도와 관련이 있다. 즉 동일한 두께에서 스티칭 줄간격이 감소할수록 스티칭 밀도는 증가하게 된다.

Table 2 Properties of stitched unidirectional MWK composites (T800)

	t=3mm						t=6mm	
	Unstitched		Ls: 3mm		Ls: 5mm		Ls: 5mm	
	Predict	Exp.	Predict	Exp.	Predict	Exp.	Predict	Exp.
Exx	41.78	42.6	41.38	38.6	41.64	39.7	42.36	39.4
Eyy	10.09	11.6	11.55	13.8	11.0	12.0	10.79	11.1
Ezz	10.09	11.28	11.28	-	10.84	-	10.81	13.5
Gxy	3.88	5.0	4.13	5.5	4.02	5.1	4.03	5.0
ν_{12}	0.21	0.28	0.23	0.23	0.23	0.25	0.23	0.25

Ls : Stitch line spacing.

Table 3 Properties of stitched quard-axial MWK composites (DBLT850)

	t=3mm						t=6mm	
	Unstitched		Ls: 3mm		Ls: 5mm		Ls: 5mm	
	Predict	Exp.	Predict	Exp.	Predict	Exp.	Predict	Exp.
Exx	20.06	16.8	20.26	19.3	19.90	18.1	19.03	17.5
Eyy	20.06	16.8	21.15	21.4	20.78	19.8	19.65	18.3
Ezz	10.01	11.7	11.3	-	10.71	-	10.0	14.4
Gxy	7.51	-	8.26	-	7.83	-	6.91	-
ν_{12}	0.41	0.32	0.33	-	0.34	0.31	0.38	0.32

Table 2과 Table 3는 이론적 모델에 의하여 예측된 강성값과 물성평가 시험에 의해 얻어진 강성값을 비교하였다. Unidirectional (UD)와 Double biased longitudinal transverse (DBLT)에서 각각 스티칭 된 섬유 방향의 강성은 스티칭 줄간격이 줄어들수록 다시 말해서 스티칭의 밀도가 증가할수록 스티칭 섬유의 부피 체적율이 증가하게 되어 증가하는 경향을 나타내게 된다. 이를 시험결과를 통해 비교한 결과 타당한 결과를 나타내었다. 또한 예측된 강성에 있어서 스티칭 된 복합재의 강성 증가 효과는 두께에 의한 영향보다는 스티칭 줄간격에 의한 영향이 더 큼을 시험적 결과와 이론적 예측값을 통하여 확인할 수 있다.

4.2 복합재료의 거동예측 결과

4.2.1 이론적 모델에 의한 스티칭 효과 분석

Expanded bridging 모델을 이용한 물성의 예측은 강성뿐만 아니라 응력의 미소 증분에 대하여서도 bridging 행렬은 유효하므로 쉽게 거동예측을 위한 모델로 확장이 가능하다. 이러한 모델을 이용하여 설계변수 중에서 두께가 3mm, 6mm로 변화하는 각각의 경우에 대하여 스티칭 줄간격 (Ls: stitching line spacing)을 변화시키며 응력-변형률 선도를 예측하였다.

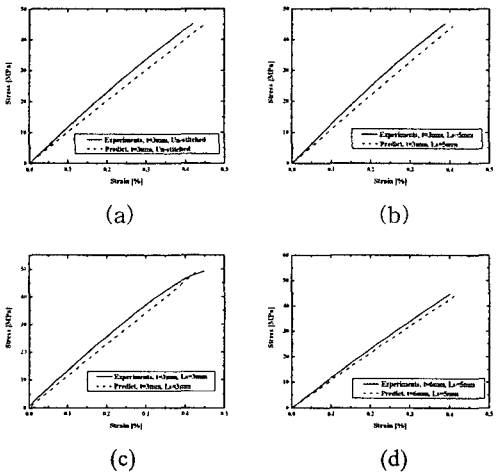

Fig. 3 스티칭된 일방향 복합재료의 섬유 횡방향 인장 응력-변형율 선도.
(a)t=3mm, Unstitched, (b)t=3mm, Ls=5mm, (c)t=3mm, Ls=3mm, (d)t=6mm, Ls=5mm

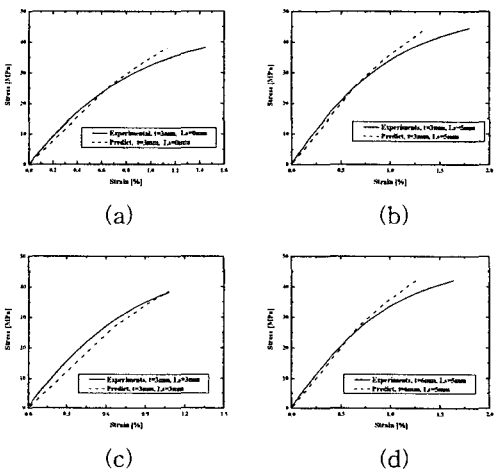

Fig. 4 스티칭된 일방향 복합재료의 면내 전단 응력-변형율 선도.
(a)t=3mm, Unstitched, (b)t=3mm, Ls=5mm, (c)t=3mm, Ls=3mm, (d)t=6mm, Ls=5mm

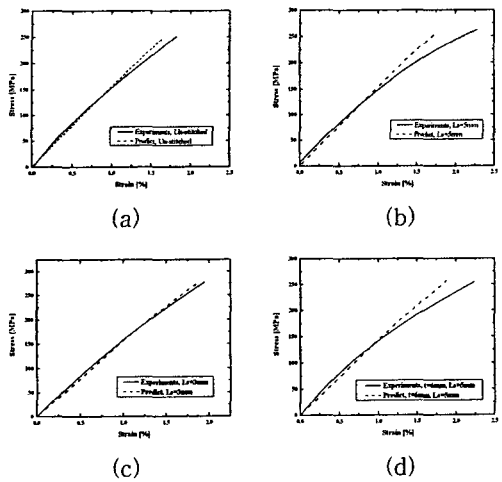

Fig. 5 스티칭된 다축경편 복합재료의 섬유 종방향 인장 응력-변형율 선도.
(a)t=3mm, Unstitched, (b)t=3mm, Ls=5mm, (c)t=3mm, Ls=3mm, (d)t=6mm, Ls=5mm

Fig. 3과 Fig. 4는 스티칭된 일방향 복합재료의 인장거동과 면내 전단거동, Fig. 5는 스티칭된 다축경편 복합재료의 인장거동을 예측한 응력-변형률 선도이다. 스티칭 줄간격 (unstitch, 3mm, 5mm)에 따라 거동을 예측하여 실험값과 비교 하였고, 복합재의 두께 (3mm, 6mm)에 따른 거동 곡선을 예측하였다. 거동 곡선을 통해 앞에서의 스티칭 효과에 따른 강성 예측 결과를 확인 할 수 있으며, 또한 복합재료의 거동은 두께의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 3과 같이 선형적인 거동으로 나타나는 구간이 시험값과의 비교에서 적은 오차로 예측되었다. Fig. 4와 Fig. 5에서와 같이 비선형적인 거동을 보이는 구간에서도 비교적 일치하는 결과를 볼 수 있으나 파단점 부근에서는 예측치와 시험치가 다른 경향을 보인다. 시험값과의 차이가 선형적인 구간보다는 비선형적인 거동을 보이는 구간에서 오차가 생김을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 스티칭 된 다축경편 복합재료의 기하학적 형상 관찰을 통한 미소체적을 설정하여 단위셀에서 설정된 변수를 Expanded 브리징 모델에 적용하여 복합재에 대한 강성 및 거동을 예측하였다. 미소 단위 체적에서의 두께, 스티칭 줄간격 등의 설계변수를 변화시키면서 강성과 거동예측을 하였다. 스티칭 줄간격과 두께 변화에 따른 강성 변화를 확인 한 결과 스티칭 줄간격이 줄어들수록 강성의 증가 효과가 나타났고, 응력-변형률 선도 또한 스티칭에 따른 보강효과를 볼 수 있었으나, 두께에 변화에 대한 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 이를 물성 평가 시험을 통한 시험 값과 비교해본 결과 대체로 일치하였다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 소재성형 기술개발사업에서 지원된 연구결과입니다.

참고문헌

(1) A. P. Mouritz, K. H. Leong, I. Herszberg, "A Review of the Effect of Stitching on the In-Plane Mechanical Properties of Fibre -Reinforced Polymer Composites", Composites: Part A, Vol. 28A, 1997, pp. 979-991

(2) S. V. Lomov, E. B. Belov, T. Bishoff, S. B. Ghosh, T. Truong Chi, I. Verpoest, "Carbon Composites Based, on Multiaxial, Multiply Stitched Preforms. Part I: Geometry of the Preform", Composites: Part A, Vol. 33, 2002, pp. 1171-1183

(3) Y. J. Wang, "Mechanical Properties of Stitched Multiaxial Fabric Reinforced Composites from Mannual Layup Process", Applied Composite Materials, Vol. 9, 2002, pp. 81-97

(4) S. S. Suh, J. H. Park, H. Thomas Hahn, "Stitching Effect on Textile Composites", Proceedings of 2nd Asian-Australians Conference on Composite Materials, Vol. 2, 2000, pp. 1199-1204

(5) Z. M. Huang, "A unified micromechanical model for the mechanical properties of two constituent composite materials. Part I: Elastic behavior", J. Thermoplastic composite materials, Vol. 13, 2000, pp. 252-271

(6) CC. Chamis, Mechanics of composite materials: past, present, and future, J. Compos Technol Res, Vol. 11, 1989, pp. 3-14

(7) Z. M. Huang, "Simulation of the mechanical properties of fibrous composites by the bridging micromechanics model", Composites :Part A 32, 2001, pp. 143-172