

Twisted Yarn 복합재료의 탄성계수 예측모델

변준형* · 이상관* · 엄문광*

Elastic Model of Twisted Yarn Composites

J-H Byun, S-K Lee and M-K Um

Key Words : twisted yarn, twist angle, elastic constants, unit cell, coordinate transformation, volume averaging, RTM

ABSTRACT

The stiffness model has been proposed to predict elastic constants of twisted yarn composites. The model is based upon the unit cell structure, the coordinate transformation, and the volume averaging of compliance constants for constituent materials. For the correlation of analytic results with experiments, composite samples of various yarn twist angle were tested. The samples were fabricated by the RTM process using glass yarns and epoxy resin. The correlations of elastic constants showed relatively good agreements. The model provides the predictions of the three-dimensional engineering constants, which are valuable input data for the analytic characterization of textile composites made of twisted yarn.

기호설명

E : 탄성계수 ; ν : 포와송비
G : 전단탄성계수 ; α, β, γ : 방향여현각
 θ : 꼬임각도 ; ϕ : 방위각
[S], S_{ij} : 복합재료 compliance
[T] : 좌표변환행렬
첨자 1,2 : 길이방향 및 폭 방향

1. 서론

새로운 섬유 구조와 직조기술의 발달로 인하여 섬유 보강 복합재료의 응용분야가 크게 확대되고 있다. 새롭게 주목 받고 있는 분야는 위빙, 브레이딩, 니트 직조 공정에 의해 제조되는 3 차원 프리폼으로 보강된 직조형 복합재료이다. 이러한 3 차원 직조형 복합재료는 두께방향으로도 섬유가 배열되어 있기 때문에 두께방향의 강도와 강성이 뛰

어나며 기존의 적층 복합재료에서 흔히 볼 수 있는 층간 분리의 가능성을 현저히 줄일 수 있다.[1] 평직 등이나 니트 프리폼에 사용되는 섬유는 직조 중 기계요소의 접촉이나 섬유 상호간의 마찰로 인한 섬유손상을 방지하기 위하여 주로 꼬임(twist)이 가해진 형태의 섬유가 사용된다. 많은 수의 필라멘트가 서로 평행하게 합쳐진 형태의 로빙 혹은 tow 는 섬유간의 응집력이 없기 때문에 여러 필라멘트나 더 작은 bundle 로 쉽게 분리되기 때문에 직조하기가 힘들다. 그러나 2 개 이상의 로빙 섬유 혹은 tow 를 서로 꼬이게 하면 섬유들 사이에 폭 방향의 힘이 작용하게 되어 마찰력에 의해 섬유들을 서로 묶어주게 된다.

끈 섬유(twisted yarn)의 영율은 몇몇 연구자[2,3]에 의해 구해진 바 있으나 해석은 섬유의 역학 계산을 바탕으로 하였다. 개개 필라멘트와 yarn 특성 사이의 단순한 관계식은 $E_y = E_r \cos^4 \theta$ 로 나타낼 수 있는데, 여기서 E_y 및 E_r 는 yarn 과 필라멘트의 영율이며 θ 는 꼬임 각도이다. 직물의 변형은 서로의 마찰력에 의해서만 제한되고 있는 개개 섬유의 운

* 한국기계연구원, 재료기술연구소

동에 의해 일어나는데 반해 이 직물이 모재에 간히게 되면 더 딱딱한 특성을 보이고 변형은 크게 감소하게 된다. 따라서 위에 제시된 수식은 복합재료에 있어서는 유용하지 않다. 더욱이, 끈 섬유로 직조된 평직이나 니트 직조형 복합재료의 경우 복합재료의 거시적 탄성계수를 구하기 위해서는 끈 섬유 복합재료에 대한 탄성계수를 알아야만 한다. 따라서 본 연구의 목표는 끈 섬유 복합재료의 탄성계수 예측을 통하여 기본 물성치를 확보하며 또한 섬유의 꼬임 정도에 따른 복합재료의 탄성계수 변화를 연구하는데 있다.

2. Twisted Yarn 복합재료의 탄성모델

2.1 좌표변환

Fig. 1(a)는 3 개의 섬유 가닥으로 꼬여진 yarn 을 보여주고 있으며 여기서 섬유가닥의 비틀림 각도는 θ 이다. 전체 끈 섬유의 탄성 특성을 구하기 위해서는 섬유가닥의 수와 관계없이 하나의 섬유가닥만을 고려하면 된다. 즉, 이 섬유가 한 번 회전하게 되면 길이 방향으로 h 만큼 전진하게 되고 다른 가닥의 섬유도 같은 길이 만큼 계속 반복하게 된다. 하나의 섬유가닥이 한 바퀴만큼 회전할 때의 길이를 단위 셀이라고 정의하고 이 단위 셀은 가장 작은 단위의 반복 구조이므로 탄성해석은 이 단위 셀을 바탕으로 수행한다. Fig. 1(b)과 같이 미소길이의 섬유가닥을 고려하면 이 섬유가닥의 위치는 평면 상의 원주방향 각도 ϕ 및 그 미소 각도 $d\phi$ 로 놓여져 있다고 정의한다.

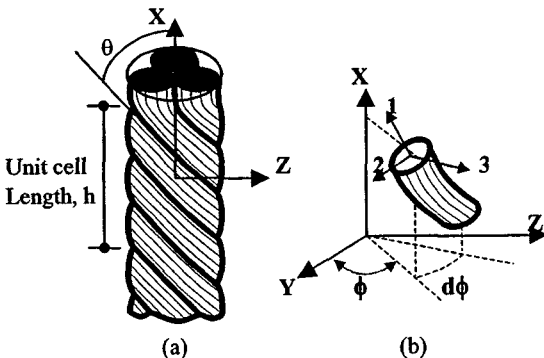


Fig. 1 Coordinate system of an infinitesimal element for twisted yarn composites.

미소길이의 섬유가닥을 보면 각각의 섬유는 섬유길이 방향과 평행하게 배열되어 있는 일방향 복합재료로 가정할 수 있으므로 횡등방성 (transverse isotropy) 에 따라 연성상수 행렬은 다음 식과 같

이 나타낼 수 있다.

$$[S] = \begin{bmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & -\nu_{31}/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & -\nu_{32}/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & -\nu_{23}/E_{22} & 1/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 탄성계수 및 전단탄성계수는 미세역학 해석에 의한 공식을 사용하여 섬유와 수지 특성으로부터 얻을 수 있다. [4]

Fig. 1 (b)에 표시한 미소섬유에서 전체 좌표계를 x-y-z 로 표시하고 부분 좌표계를 1-2-3 으로 표시하면 이 두 좌표계 간의 변환행렬은 다음과 같이 표시된다. [5]

$$[T] = \begin{bmatrix} \alpha_1^2 & \alpha_2^2 & \alpha_3^2 & 2\alpha_2\alpha_3 & 2\alpha_3\alpha_1 & 2\alpha_1\alpha_2 \\ \beta_1^2 & \beta_2^2 & \beta_3^2 & 2\beta_2\beta_3 & 2\beta_3\beta_1 & 2\beta_1\beta_2 \\ \gamma_1^2 & \gamma_2^2 & \gamma_3^2 & 2\gamma_2\gamma_3 & 2\gamma_3\gamma_1 & 2\gamma_1\gamma_2 \\ \beta_1\gamma_1 & \beta_2\gamma_2 & \beta_3\gamma_3 & \beta_2\gamma_3 + \beta_3\gamma_2 & \beta_1\gamma_3 + \beta_3\gamma_1 & \beta_1\gamma_2 + \beta_2\gamma_1 \\ \gamma_1\alpha_1 & \gamma_2\alpha_2 & \gamma_3\alpha_3 & \gamma_2\alpha_3 + \gamma_3\alpha_2 & \gamma_1\alpha_3 + \gamma_3\alpha_1 & \gamma_1\alpha_2 + \gamma_2\alpha_1 \\ \alpha_1\beta_1 & \alpha_2\beta_2 & \alpha_3\beta_3 & \alpha_2\beta_3 + \alpha_3\beta_2 & \alpha_1\beta_3 + \alpha_3\beta_1 & \alpha_1\beta_2 + \alpha_2\beta_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 α, β, γ 는 방향 여현각으로서 다음 식과 같이 나타내어 진다.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \cos(1, x) ; \alpha_2 = \cos(1, y) ; \alpha_3 = \cos(1, z) \\ \beta_1 &= \cos(2, x) ; \beta_2 = \cos(2, y) ; \beta_3 = \cos(2, z) \\ \gamma_1 &= \cos(3, x) ; \gamma_2 = \cos(3, y) ; \gamma_3 = \cos(3, z) \end{aligned} \quad (3)$$

좌표계 1-2-3 의 축 3 을 x 축과 직각으로 놓으면 식 (3)의 방향여각은 다음과 같이 단순화 된다.

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \cos\theta ; \alpha_2 = -\sin\theta \sin\phi ; \alpha_3 = \sin\theta \cos\phi \\ \beta_1 &= \sin\theta ; \beta_2 = \cos\theta \sin\phi ; \beta_3 = -\cos\theta \cos\phi \\ \gamma_1 &= 0 ; \gamma_2 = \cos\phi ; \gamma_3 = \sin\phi \end{aligned} \quad (4)$$

따라서, 좌표계 1-2-3 의 일방향 복합재료 실린더에 대한 compliance 행렬인 식 (1)의 $[S]$ 는 x-y-z 좌표계의 $[S']$ 으로 다음 식에 의하여 변환된다.

$$[S'] = [T]^t [S] [T] \quad (5)$$

여기서, $[T]^t$ 는 $[T]$ 의 전치행렬이다.

2.2 평균법

Fig. 1(a)에서와 같이 끈 섬유 복합재료는 미소

길이의 섬유가닥이 연결되어 있다고 볼 수 있으며, 하중이 이 복합재료의 길이방향으로 작용한다면 각 미소요소는 iso-stress 상태라고 가정할 수 있으므로 복합재료의 유효 compliance 는 미소요소의 compliance 를 적분하여 구할 수 있다. 즉,

$$S_{ij}^a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} S_{ij}' d\phi \quad (ij = 1\sim 6) \quad (6)$$

위의 적분을 수행하면 6 개의 compliance 성분이 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} S_{11}^a &= S_{11} \cos^4 \theta + S_{22} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \\ S_{12}^a &= S_{13}^a = \frac{1}{2} [(S_{11} + S_{22} - S_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + S_{12} (2 \cos^4 \theta \\ &\quad + \sin^2 \theta) + S_{23} \sin^2 \theta] \\ S_{22}^a &= S_{33}^a = \frac{1}{8} [3S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta (1 + 3 \cos^2 \theta) \\ &\quad + 3S_{22} (1 + \cos^4 \theta) + (2S_{23} + S_{44}) \cos^2 \theta] \quad (7) \\ S_{23}^a &= \frac{1}{8} [S_{11} \sin^4 \theta + S_{22} (1 + \cos^4 \theta) + 2S_{12} \sin^2 \theta (3 + \cos^2 \theta) \\ &\quad + 6S_{23} \cos^2 \theta - S_{44} \cos^2 \theta - S_{66} \sin^4 \theta] \\ S_{44}^a &= \frac{1}{2} [(S_{11} - 2S_{12}) \sin^4 \theta + S_{22} (1 + \cos^4 \theta) \\ &\quad + (S_{44} - 2S_{23}) \cos^2 \theta + S_{66} \sin^2 \theta (1 + \cos^2 \theta)] \\ S_{55}^a &= S_{66}^a = \frac{1}{2} [(S_{11} - 2S_{12} + S_{22}) \sin^2 2\theta + S_{44} \sin^2 \theta \\ &\quad + S_{66} (\cos^2 2\theta + \cos^2 \theta)] \end{aligned}$$

최종적으로, 끈 섬유 복합재료의 유효 탄성계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{xx} &= 1/S_{11}^a ; E_{yy} = 1/S_{22}^a ; E_{zz} = 1/S_{33}^a \\ G_{yz} &= 1/S_{44}^a ; G_{xz} = 1/S_{55}^a ; G_{xy} = 1/S_{66}^a \quad (8) \\ \nu_{yz} &= -S_{23}^a/S_{22}^a ; \nu_{xz} = -S_{13}^a/S_{33}^a ; \nu_{xy} = -S_{12}^a/S_{11}^a \end{aligned}$$

3. 시 험

3.1 시편준비

복합재료의 기본 물성치를 얻기 위해서는 일방향 복합재료 시편을 제작해야 한다. 주의해야 할 점은 섬유의 굴곡이 일어나지 않도록 하고 섬유 분포가 가능한 한 균일하게 섬유배열을 해야 한다. 본 연구에서 사용한 유리섬유는 한국화이버 제조이며 Table 1 에 각 종류에 대한 기본적인 자료를 정리하였다. Yarn 의 표시에서 1/0 은 1 가닥의 섬유이고, 1/2 및 1/3 은 각각 2 가닥 및 3 가닥의 섬유를 합쳐서 끈 것이다. 0.7Z 는 단위 인치 당 0.7 회 Z 방향으로 끈 것이며, 3.8S 는 단위 인치당 3.8 회

S 방향으로 끈 것이다. 수지는 에폭시 (KBR 1729 국도화학)이다.

복합재료 시편 제조를 위하여, 유리섬유를 스텐레스 판에 적당한 인장력을 주면서 여러 층으로 와인딩하여 두께를 약 4mm 정도가 되도록 하였으며, 섬유굴곡이 일어나지 않도록 와인딩된 스텐레스 판 전체를 금형 내부에 넣고 수지를 주입하였다. 복합재료 평판의 치수는 260x 180x 2.3mm 이며 인장 및 압축시편 (0 도 및 90 도)과 Iosipescu 전단 시편 (0 도)을 절취하였다.

Table 1 Characteristics of the utilized E-glass yarns

Yarn Description	Filament Dia. (μm)	Tex (g/100m)
ECH 37 1/0 0.7Z	11	136.8
ECH 37 1/2 3.8S	11	273.6
ECH 37 1/3 3.8S	11	410.4

3.2 미세구조

Figure 2 (a), (b)는 1/3 yarn 에 대한 꼬임의 정도와 미세 단면구조를 보여주고 있다. 세 가닥의 yarn 이 서로 합쳐져서 꼬인 모습을 볼 수 있고, 수지 함침도 거의 완벽하게 이루어졌음을 알 수 있다. 1/2 yarn 의 경우에도 완벽한 수지함침을 관찰할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 2 SEM micrographs of twisted yarn composites: (a) yarn surface; (b) cross-section of the composites.

3.2 시험방법

복합재료의 섬유체적비는 연소법에 의해 측정하였으며 인장, 압축, 전단특성은 ASTM D3039, ASTM D3410 Procedure B, ASTM D5379 에 의거하여 실시하였다. 탄성계수 및 포와송비 측정은 스트레

인게이지를 이용하였다.

4. 결과 및 비교

계산을 위해 사용한 원재료의 기계적 특성 및 복합재료의 기하학적 입력 데이터를 Table 2 에 요약하였다.

Table 2 Summary of input data for the model prediction

Material	Mechanical Property	Yarn Comp.	Twist Angle	V_f (%)
Glass Fiber	E = 72 GPa	1/0	0	63.6
	G = 29.5 GPa $\nu = 0.22$	1/2	7°	60.0
Epoxy	E = 5 GPa $\nu = 0.35$	1/3	10°	61.4

위의 입력 데이터를 이용하여 계산한 끈 섬유 복합재료의 탄성계수 예측결과가 Table 3 에 나타나 있으며 시험결과는 Table 4 에 정리하였다.

Table 3 Model predictions of twisted yarn composites

Yarn type Property	1/0	1/2	1/3
E_{xx} (GPa)	47.6	42.1	40.3
E_{yy} (GPa)	14.7	13.5	14.0
E_{zz} (GPa)	14.7	13.5	14.0
G_{yz} (GPa)	5.90	5.41	5.60
G_{zx} (GPa)	6.58	6.07	6.34
G_{xy} (GPa)	6.58	6.07	6.34
ν_{yz}	0.247	0.248	0.244
ν_{zx}	0.083	0.088	0.096
ν_{xy}	0.267	0.275	0.276

Table 4 Experimental results of twisted yarn composites

		1/0	1/2	1/3
Tensile modulus (GPa)	E_{xx}	45.2 (± 1.64)	40.8 (± 1.15)	40.2 (± 1.96)
	E_{yy}	16.56 (± 1.39)	14.26 (± 0.75)	15.96 (± 1.89)
Poisson's ratio	ν_{xy}	0.283 (± 0.01)	0.287 (± 0.01)	0.296 (± 0.03)
Comp-modulus (GPa)	E_{xx}	47.1 (± 2.49)	45.5 (± 2.07)	41.5 (± 3.56)
	E_{yy}	17.12 (± 4.56)	13.89 (± 1.31)	17.48 (± 1.63)
Shear modulus (GPa)	G_x	5.20 (± 0.51)	5.75 (± 0.51)	6.27 (± 0.58)
	ν_y			

Table 3,4 에서 보는 바와 같이 예측치와 실험치가 비교적 잘 일치하며, 본 모델에 의하면 복합재료의 평면 뿐만 아니라 두께 방향의 탄성계수도 예측할 수 있음을 알 수 있다. 1/0 의 경우 길이방

향 탄성계수에 있어서 예측치는 섬유굴곡이 전혀 없는 경우이고 실험치는 인치 당 0.7 회의 꼬임이 있는 경우이므로 예측치가 더 높게 나왔다. 1/2 의 경우에도 길이방향 탄성계수가 실험치보다 예측치가 높게 나오고 있으나 오차범위에 근접하므로 비교적 정확하다고 볼 수 있다.

섬유와 직각 방향의 결과에서는 탄성계수는 실험치보다 낮게 예측되고 있으나 실험오차 범위에 근접하고 있다. 또한, 예상할 수 있는 바와 같이 꼬임 각도가 증가할수록 섬유 각도가 0 도에서 커지므로 길이방향의 탄성계수가 감소함을 알 수 있다. 1/0 의 형태는 일방향 복합재료로 간주할 수 있으나, 엄밀하게는 Table 1 에서 보는 바와 같이 약간의 꼬임이 있기 때문에 프리프레그를 사용한 완전한 일방향 복합재료에 비하면 물성치가 약간 떨어짐을 예상할 수 있다.

5. 결론

끈 섬유 복합재료에 대한 3 차원 탄성계수를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 탄성계수 예측은 좌표변환과 compliance 평균법을 이용하였으며 실험치와 비교한 결과 그들은 비교적 잘 일치하였다. 본 모델은 꼬임이 있는 섬유를 사용한 복합재료에 대한 구조해석이나 다양한 꼬임에 의한 기계적 특성을 구하는 데 유용하게 적용할 수 있다.

후 기

본 연구는 21 세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 소재성형 기술개발 사업에서 수행된 연구결과임 (과제코드: C0-A1).

참고문헌

1. Byun, J-H., Gillespie, Jr., J.W., and Chou, T-W., " Mode I Delamination of a Three-Dimensional Fabric Composites," Journal of Composite Materials, Vol. 24, pp. 497-518, 1990.
2. Hearle, J.W.S., The Mechanics of Twisted Yarn: The Influence of Transverse Forces on Tensile Behavior, Journal of Textile Institute, Vol. 49, T 389, 1958.
3. Treloar, L.R.G and Riding, G., A Theory of the Stress-Strain Properties of Continuous Filament Yarn, Journal of Textile Institute, Vol. 54, T 156, 1963.
4. Chou, T-W., Microstructural Design of Fibrous Composites, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
5. Lekhnitskii, S. G, Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Body, Holden-Day, San Francisco, p. 35, 1963.