

## 論文

## Twisted Yarn 복합재료의 물성치 시험 및 탄성계수 예측

변준형<sup>\*,</sup>, 이상관<sup>\*</sup>, 엄문광<sup>\*</sup>, 김태원<sup>\*</sup>, 배성우<sup>\*</sup>

## Characterization and Prediction of Elastic Constants of Twisted Yarn Composites

Joon-Hyung Byun<sup>\*,</sup>, Sang-Kwan-Lee<sup>\*</sup>, Moon-Kwang Um<sup>\*</sup>, Tae-Won Kim<sup>\*</sup>, Sung-Woo Bae<sup>\*</sup>

## ABSTRACT

A 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 angles were tested, and strength and Young's modulus under tensile, compressive, and shear loading have been obtained. The sample was 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.

## 초 록

끈 섬유(twisted yarn)로 이루어진 복합재료의 탄성계수를 예측하기 위한 강성모델을 제시하였다. 이 모델은 단위 셀 구조를 바탕으로 하여 좌표변환과 구성 재료의 연성 상수를 체적 평균함으로써 복합재료의 탄성계수를 예측하는 방법이다. 해석적인 결과와 실험치와의 비교를 위하여 두 종류의 꼬임 각을 가지는 섬유로 구성된 복합재료에 대한 시험을 하였으며 인장, 압축, 전단 강도와 탄성계수를 구하였다. 이 시험편은 유리섬유 및 에폭시 수지를 사용한 RTM 성형법으로 제조하였다. 탄성계수에 대한 비교 결과 예측치와 실험치는 비교적 잘 일치하였다. 이 모델에 의해 구해진 3차원적인 탄성계수 값은, 꼬인 섬유로 이루어진 직조형 복합재료 구조물의 구조해석을 위한 기본 물성치 입력값으로 사용될 수 있다.

## 1. 서 론

새로운 섬유 구조와 직조기술의 발달로 인하여 섬유 보강 복합재료의 응용분야가 크게 확대되고 있다. 보통 사용되고 있는 직조기술로는 위빙, 브레이딩, 니트 공정 등이 있으며 대부분은 평면 상으로 섬유가 배열된 2차원 구조의 직조이다. 흔히 볼 수 있는 것이 평직인데, 이 직조 형태는 서로 직교하는 섬유가 위, 아래로 한 번씩 엇갈리면서 반복되는 구조로서 [0/90]의 섬유 배열을 가진다. 2차원 브레이드의 경우는 기본적으로  $[\pm\theta]$ 의 배열을 가지나 축 방향

섬유에 의해 0도 배열이 추가될 수 있다. 니트 공정은 섬유가 루프를 이루면서 길이 및 폭 방향으로 제조된다. 위빙이나 브레이딩의 경우에는 여러 기계요소를 섬유가 지나게 되므로 마모를 일으키기 쉽고, 니트 공정의 경우에는 바늘의 훅(hook)이 섬유를 걸어 당겨서 루프를 형성하기 때문에 섬유가닥이 쉽게 분리되면 섬유가 훅에 완전히 걸리지 않기 때문에 직조가 되지 않는다. 즉, 많은 수의 필라멘트가 합쳐진 로빙(roving)사 보다는 섬유가 서로 꼬여진 형태의 끈 섬유(twisted yarn)를 사용하는 것이 직조성이 훨씬 뛰어나는데 그 이유는 섬유 가닥을 서로 꼬이게 하면

\*+ 한국기계연구원 재료기술연구소 복합재료그룹, 교신저자(E-mail:bjh1673@kmail.kimm.re.kr)

\* 한국기계연구원 재료기술연구소 복합재료그룹

섬유 사이에 폭 방향의 힘이 작용하게 되어 마찰력에 의해 섬유들을 서로 묶어주게 되기 때문이다.

한편, 최근에 관심을 끌고 있는 3차원 섬유배열 구조의 직조 프리폼의 경우에도 끈 섬유가 사용되는데, 이러한 3차원 직조형 복합재료는 두께 방향으로도 섬유가 배열되어 있기 때문에 두께 방향의 강도와 강성이 뛰어나며 기존의 적층 복합재료에서 흔히 볼 수 있는 층간 분리의 가능성을 현저히 줄일 수 있다[1]. 특히, 여러 층의 직물을 두께 방향으로 서로 계속시키는 직조 기술인 스티칭(stitching)에 있어서는 바늘을 통하여 공급되는 스티칭 섬유가 하부 보빈을 감으면서 보빈에서 나오는 섬유와 매듭을 만들게 되는데 이런 경우에는 끈 섬유가 아니면 스티칭이 되지 않는다.

그러나, 직조가 가능하도록 사용되는 끈 실은 복합재료 성형면이나 성능 면에서 보면 불리할 수 있다. 즉, 섬유가 꼬여지게 되면 섬유 내부로 수지 침투가 어려워 완전함 함침이 일어나지 않을 수 있으며, 꼬임에 의하여 섬유방향도 함께 틀어지게 되므로 복합재료의 강도 및 강성이 낮아진다. 따라서, 이러한 끈 섬유로 직조된 프리폼으로 복합재료를 제조하게 되면 강도나 강성의 저하를 감수해야 하나, 실제로 어느 정도의 정량적인 감소가 발생하는지에 대한 정보가 없다면 설계 시 많은 어려움이 따른다. 일 방향으로 배열된 섬유인 경우 보통, 혼합법칙(rule of mixture)을 사용하여 보강재와 기지재료의 물성치와 섬유 포함량으로 일방향 복합재료의 기본 물성치를 계산할 수 있고 이 결과를 바탕으로 복합재료 구조해석 및 설계가 이루어진다. 그러나, 끈 섬유로 제조된 직조형 복합재료의 경우에는 끈 섬유 복합재료에 대한 기본적인 물성치가 확보되지 않으면 구조 설계/해석에 대한 정확한 결과를 얻을 수 없다.

끈 섬유는 매우 다양한 섬유 굵기와 꼬임 형태가 있으며 재료도 달라지므로 이 모든 경우에 대하여 실험적인 방법으로 기본 물성치를 구한다는 것은 어렵다. 따라서, 해석적인 방법으로 예측치를 구하기 위한 모델 개발에 관심이 집중되고 있다. 끈 섬유(twisted yarn)의 영율은 몇몇 연구자 [2,3]에 의해 구해진 바 있으나 해석은 섬유의 역학 계산을 바탕으로 하였다. 개개 필라멘트와 yarn특성 사이의 단순한 관계식은  $E_y = E_f \cos^4 \theta$ 로 나타낼 수 있는데, 여기서  $E_y$  및  $E_f$ 는 yarn과 필라멘트의 영율이며  $\theta$ 는 꼬임 각도이다. 직물의 변형은 서로의 마찰력에 의해서만 제한되고 있는 개개 섬유의 운동에 의해 일어나는데 반해 이 직물이 모재에 갇히게 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 실험을 통하여 기본 물성치를 확보하고 예측결과와 실험치를 비교함으로써 탄성계수 예측 모델을 검증하는데 있다.

## 2. Twisted yarn 복합재료의 탄성모델

### 2.1 좌표변환

Fig. 1(a)는 3개의 섬유 가닥으로 꼬여진 yarn을 보여주고 있으며 여기서 섬유가닥의 비틀림 각도는  $\theta$ 이다. 전체 끈 섬유의 탄성 특성을 구하기 위해서는 섬유가닥의 수와 관계없이 하나의 섬유가닥만을 고려하면 된다. 즉, Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이, 이 섬유가 한 번 회전하게 되면 길이 방향으로 h만큼 전진하게 되고 다른 가닥의 섬유도 같은 길이 만큼 계속 반복하게 된다. 만약, 끈 섬유의 직경(D)을 알고 있고 반복길이(h)를 구하면 꼬임 각도를 Fig. 1(b)와 같이 구할 수 있다. 하나의 섬유가닥이 한 바퀴만큼 회전할 때의 길이를 단위 셀이라고 정의하고 이 단위 셀은 가장 작은 단위의 반복 구조이므로 탄성해석은 이 단위 셀을 바탕으로 수행한다.

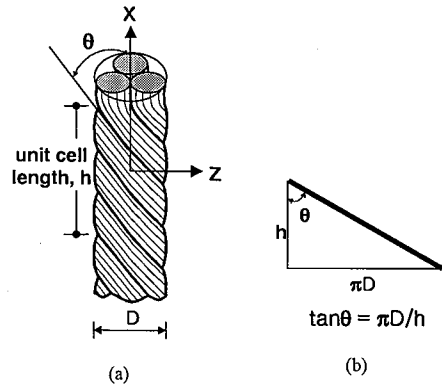


Fig. 1 Geometry of a twisted yarn: (a) 1/3 yarn; (b) parametric relationship.

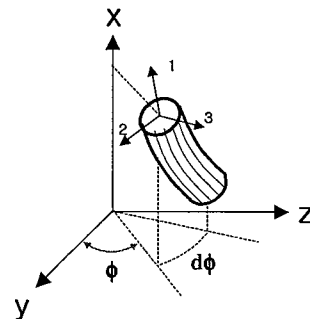


Fig. 2 Coordinate system of an infinitesimal element for twisted yarn composites.

큰 섬유에 대한 탄성해석을 하기 위하여 Fig. 1 (a)의 섬유 중의 일부를 떼내어 Fig. 2와 같은 미소 길이의 섬유가닥을 고려한다. 이 섬유가닥의 위치는 평면 상의 원주방향 각도  $\phi$  및 그 미소각도  $d\phi$ 로 놓여져 있다고 정의한다.

미소길이의 섬유가닥을 보면 각각의 섬유는 섬유길이 방향과 평행하게 배열되어 있는 일방향 복합재료로 가정할 수 있으므로 횡 등방성(transverse isotropy)에 따라 연성상수 행렬은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$[S] = \begin{bmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & -\nu_{31}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & -\nu_{32}/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_{11} & -\nu_{23}/E_{22} & 1/E_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 탄성계수(E) 및 전단 탄성계수(G)는 미세역학 해석에 의한 공식을 사용하여 섬유와 수지 특성으로부터 얻을 수 있다[4].

Fig. 2에 표시한 미소섬유에서 전체 좌표계를 x-y-z로 표시하고 부분 좌표계를 1-2-3으로 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  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 방향 여현각 (direction cosine)으로서 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

좌표계 1-2-3의 축 3을 x축과 직각으로 놓으면 식(3)의 방향 여현각은 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 1-2-3의 일방향 복합재료 rod에 대한 연

성상수 (compliance) 행렬인 식(1)의  $[S]$ 는 다음 식에 의하여 x-y-z좌표계의  $[S']$ 으로 변환된다.

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

여기서,  $[T]^t$ 는  $[T]$ 의 전치 행렬이다. 위 식을 각 요소에 대하여 전개하면 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} S'_{11} &= S_{11} \cos^4 \theta + S_{22} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \\ S'_{12} &= (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \sin^2 \phi \\ &\quad + S_{12} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \sin^2 \phi \\ &\quad + (S_{12} \cos^2 \theta + S_{23} \sin^2 \theta) \cos^2 \phi \\ S'_{22} &= S_{11} \sin^4 \theta \sin^4 \phi \\ &\quad + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \sin^2 \phi (\cos^2 \theta \sin^2 \phi + \cos^2 \phi) \\ &\quad + S_{22} (\cos^4 \theta \sin^4 \phi + \cos^4 \phi) \\ &\quad + (2S_{23} + S_{44}) \cos^2 \theta \cos^2 \phi \sin^2 \phi \\ S'_{23} &= [S_{11} \sin^4 \theta + 2S_{12} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + S_{22} (1 + \cos^4 \theta) \\ &\quad - S_{44} \cos^2 \theta - S_{66} \sin^4 \theta] \cos^2 \phi \sin^2 \phi \\ &\quad + (S_{12} \sin^2 \theta + S_{23} \cos^2 \theta) (\cos^4 \phi + \sin^4 \phi) \\ S'_{44} &= 4[S_{11} \sin^4 \theta - 2S_{12} \sin^4 \theta + S_{22} (1 + \cos^4 \theta) \\ &\quad - 2S_{23} \cos^2 \theta + S_{66} \cos^2 \theta \sin^2 \theta] \cos^2 \phi \sin^2 \phi \\ &\quad + (S_{44} \cos^2 \theta + S_{66} \sin^2 \theta) \cos^2 2\phi \\ S'_{55} &= 4(S_{11} - 2S_{12} + S_{22}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \cos^2 \phi \\ &\quad + S_{66} \cos^2 2\theta \cos^2 \phi \\ &\quad + (S_{44} \sin^2 \theta + S_{66} \cos^2 \theta) \sin^2 \phi \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 표현되지 않은 다른 요소성분은 모두 0이다.

## 2.2 유효탄성계수

큰 섬유 복합재료는 Fig. 3과 같이 미소 길이의 섬유가닥이 연결되어 있다고 볼 수 있다. 여기서 각 요소는 Fig. 2의 미소요소에 해당하는 체적과 식(6)에 의한 연성 상수 값을 가지는 탄성요소이다.

하중이 이 복합재료의 길이 방향으로 작용한다면 각 미소요소의 응력은 균일한 상태(iso-stress)라고 가정할 수 있으므로 복합재료의 유효 연성상수는 미소요소의 연성상수를 적분하여 구할 수 있다. 즉,

$$S_{ij}^a = \frac{1}{V} \int S_{ij}^* dV = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} S_{ij}^* d\phi \quad (i, j=1 \sim 6) \quad (7)$$

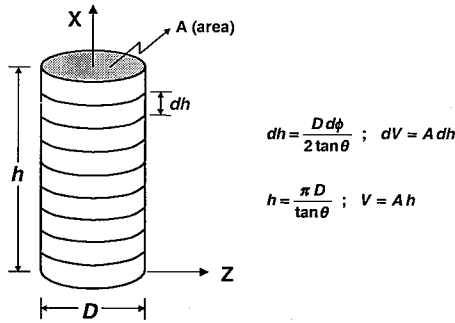


Fig. 3 Schematic of volume averaging method for twisted yarn composites.

위의 적분을 수행하면 6개의 연성상수 성분이 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 S_{11}^a &= S_{11} \cos^4 \theta + S_{22} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \\
 S_{12}^a &= S_{13}^a = \frac{1}{2} [(S_{11} + S_{22} - S_{66}) \cos^2 \theta \sin^2 \theta \\
 &\quad + S_{12} (2 \cos^4 \theta + \sin^2 \theta) + S_{23} \sin^2 \theta] \\
 S_{22}^a &= S_{33}^a = \frac{1}{8} [3S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta (1 + 3 \cos^2 \theta) \\
 &\quad + 3S_{22} (1 + \cos^4 \theta) + (2S_{23} + S_{44}) \cos^2 \theta \\
 S_{23}^a &= S_{32}^a = \frac{1}{8} [S_{11} \sin^4 \theta + S_{22} (1 + \cos^4 \theta) \\
 &\quad + 2S_{12} \sin^2 \theta (3 + \cos^2 \theta) \\
 &\quad + 6S_{23} \cos^2 \theta - S_{44} \cos^2 \theta - S_{66} \sin^4 \theta] \\
 S_{44}^a &= \frac{1}{2} [(S_{11} - 2S_{12}) \sin^4 \theta + S_{22} (1 + \cos^4 \theta) \\
 &\quad + (S_{44} - 2S_{23}) \cos^2 \theta + S_{66} \sin^2 \theta (1 + \cos^2 \theta)] \\
 S_{55}^a &= S_{66}^a = \frac{1}{2} [(S_{11} - 2S_{12} + S_{22}) \sin^2 2\theta \\
 &\quad + S_{44} \sin^2 \theta + S_{66} (\cos^2 2\theta + \cos^2 \theta)]
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, 곧 섬유 복합재료는 일방향 복합재료와 마찬가지로 횡등방 특성을 보여주고 있다.

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

$$\begin{aligned}
 E_{xx} &= 1/S_{11}^a ; E_{yy} = 1/S_{22}^a ; E_{zz} = 1/S_{33}^a \\
 G_{yz} &= 1/S_{44}^a ; G_{zx} = 1/S_{55}^a ; G_{xy} = 1/S_{66}^a \\
 \nu_{yz} &= -S_{23}^a/S_{22}^a ; \nu_{zx} = -S_{13}^a/S_{33}^a ; \nu_{xy} = -S_{12}^a/S_{11}^a
 \end{aligned} \tag{9}$$

### 3. 시험

#### 3.1 시편준비

복합재료의 기본 물성치를 얻기 위해서는 일방향 복합재료 시편을 제작해야 한다. 시편제조에 있어서 주의해야 할 점은 섬유의 굴곡이 일어나지 않도록 하고 섬유 분포가 가능한 한 균일하게 섬유배열을 해야 한다. 본 연구에서 사용한 유리섬유는 한국화이버 제조이며 Table 1에 각 종류에 대한 기본적인 자료를 정리하였다.

Yarn의 표시에서 1/0은 1가닥의 섬유이고, 1/2 및 1/3은 각각 2가닥 및 3가닥의 섬유를 합쳐서 곧 것이다. 0.7Z는 단위 인치 당 0.7회 Z방향으로 곧 것이며, 3.8S는 단위 인치당 3.8회 S방향으로 곧 것이다. 수지는 에폭시 (KBR 1729, 국도화학)를 사용하였다.

Table 1 Characteristics of E-glass yarns

Yarn Description	Filament Dia. (μm)	Tex (g/1000m)
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

복합재료 시편 제조를 위하여, 유리섬유를 스텐레스 판에 적당한 인장력을 주면서 여러 층으로 와인딩하여 두께를 약 4mm 정도가 되도록 하였으며, 와인딩된 스텐레스 판 전체를 금형 내부에 넣고 수지를 주입하였다. 복합재료 평판의 치수는 260×180×2.3mm 였다.

#### 3.2 미세구조

Fig. 4 (a), (b)는 ECH 37 1/2 3.8S 및 ECH 37 1/3 3.8S 섬유를 보인 것인데 2가닥 혹은 3가닥의 섬유가 합쳐져서 서로 꼬인 것을 볼 수 있다. Fig. 5 (a), (b)는 각 섬유에 대한 복합재료의 단면을 보인 것이다. 2가닥 및 세 가닥의 섬유가 서로 합쳐져 있음을 볼 수 있고, 섬유 다발 내 및 섬유 다발 사이에서의 수치 함침도 완벽하게 이루어졌음을 알 수 있다.

#### 3.3 시험방법

복합재료의 섬유 체적비는 연소법에 의해 측정하였으며 인장, 압축, 전단특성은 ASTM D3039, ASTM D3410 Procedure B, ASTM D5379에 의하여 실시하였다. 탄성계수 및 포와송비 측정은 스트레인 게이지를 이용하였다.

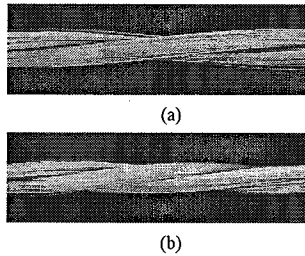


Fig. 4 SEM micrographs of twisted yarn composites: (a) ECH 37 1/2 3.8S ; (b) ECH 37 1/3 3.8S.

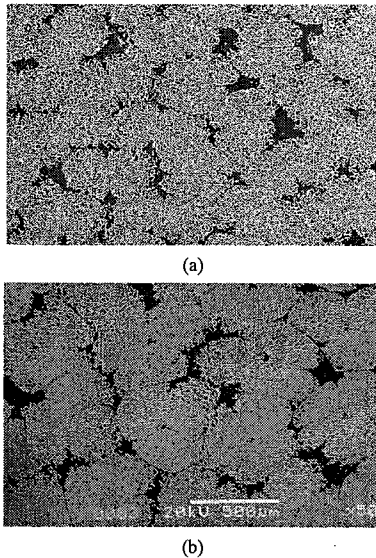


Fig. 5 SEM micrographs of composites cross-section: (a) ECH 37 1/2 3.8S ; (b) ECH 37 1/3 3.8S.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 실험 결과

세 가지 종류의 섬유를 사용한 복합재료에 대한 섬유 꼬임 각도 및 섬유체적비율이 Table 2에 나타나있다. 유리 섬유 및 에폭시에 대한 기계적인 물성치는 재료 공급사로부터 얻었으며 복합재료의 탄성계수 예측을 위한 입력값으로 사용하였다. 섬유 끈 작은 Fig. 4로부터 측정하였다. 인장, 압축 및 전단에 대한 탄성계수, 강도 및 파손 변형율을 Table 3에 정리하였다. 괄호 안의 값은 표준 편차이다. 아래 첨자 x는 0도 방향, y는 90도 방향이며, 첨자 t 및 c는 각각 인장 및 압축을 나타낸다. 시험 도중 스트레인 게이지가 시편으로부터 이탈하거나 게이지의 파손이 시편의 파손보다 먼저 일어날 경우 외삽법으로 파손 변형율을 추정하였다.

Table 2 Summary of input data for the model prediction

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

Table 3 Experimental results of twisted yarn composites

		1/0	1/2	1/3
Tensile modulus (GPa)	$E_{xt}$	45.2 (1.63)	40.1 (1.84)	41.4 (2.45)
	$E_{yt}$	16.07 (0.83)	14.26 (0.75)	14.99 (0.9)
Tensile strength (MPa)	$F_{xt}$	1191 (101)	1199 (83.6)	1070 (44.5)
	$F_{yt}$	46.4 (4.46)	41.5 (5.23)	37.6 (6.58)
Ultimate tensile strain (%)	$\epsilon_{xt}$	2.68 (0.31)	3.13 (0.25)	2.45 (0.11)
	$\epsilon_{yt}$	0.30 (0.04)	0.30 (0.04)	0.26 (0.05)
Poissons ratio	$\nu_{xy}$	0.283 (0.01)	0.287 (0.01)	0.296 (0.02)
Compressive modulus (GPa)	$E_{xc}$	47.1 (2.49)	46.2 (3.30)	44.5 (8.50)
	$E_{yc}$	13.42 (1.08)	13.89 (1.31)	17.48 (1.63)
Compressive strength (MPa)	$F_{xc}$	1299 (68.8)	907 (77.2)	908 (68.4)
	$F_{yc}$	164.8 (5.58)	152.3 (16.0)	140.9 (10.3)
Ultimate compressive strain (%)	$\epsilon_{xc}$	2.96 (0.16)	2.35 (0.12)	2.30 (0.2)
	$\epsilon_{yc}$	3.43 (0.58)	1.80 (0.66)	0.91 (0.15)
Shear modulus (GPa)	$G_{xy}$	5.31 (0.55)	5.60 (0.61)	6.27 (0.58)
Shear strength (GPa)	S	109.7 (7.42)	101.5 (5.32)	82.4 (8.1)
Ultimate shear strain (%)	$\gamma_{xy}$	11.8 (0.61)	9.10 (2.49)	4.78 (0.86)

Table 3에서 보면 0도 방향 인장 탄성계수( $E_{xt}$ ) 및 탄성 강도( $F_{xt}$ )는 섬유의 꼬임이 생길수록 섬유배열 각도가 0도에서 멀어지기 때문에 감소함을 보인다. 한편, 섬유 1/2의 경우가 1/3의 경우보다 꼬임의 각도가 작음에도 불구하고 탄성계수가 작는데 그 이유는 Table 2에서 나타난 대로 1/2의 섬유체적비율이 작기 때문이기도 하지만 꼬임 각도의 변화에 의한 탄성계수 변화가 비교적 작기 때문이다. 끈 섬유 복합재료는 Fig. 4에서 보는 바와 같이  $[\pm\theta]$  angle-ply 복합재료와 유사하다고 볼 수 있는데, 일방향 복합재료는

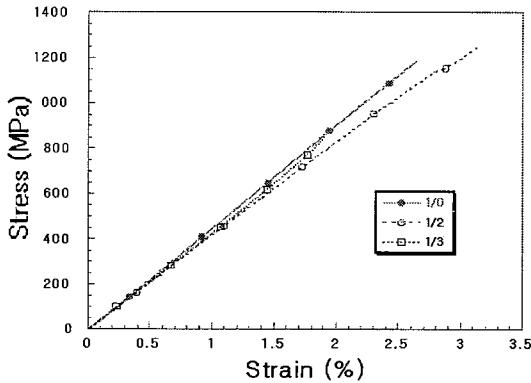


Fig. 6 Tensile stress-strain response for twisted lass/epoxy specimens of 0-degree fiber orientation.

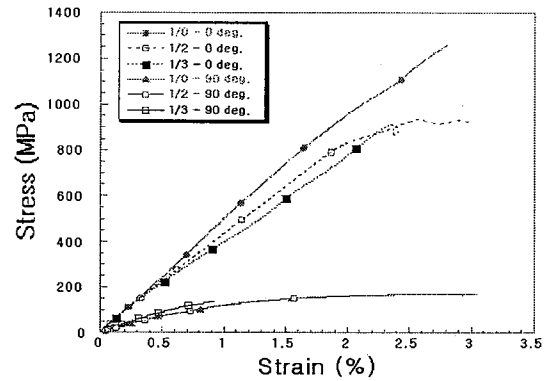


Fig. 8 Compressive stress-strain response for twisted glass/epoxy specimens of 0-degree and 90-degree fiber orientations.

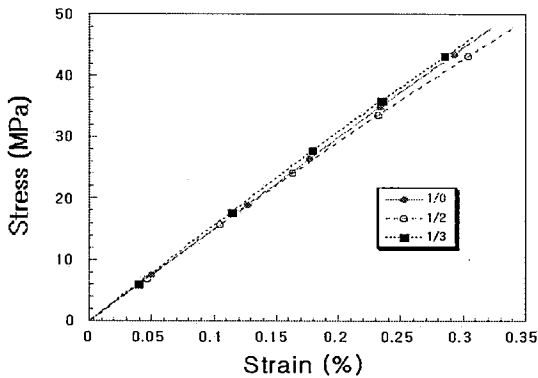


Fig. 7 Tensile stress-strain response for twisted glass/epoxy specimens of 90-degree fiber orientation.

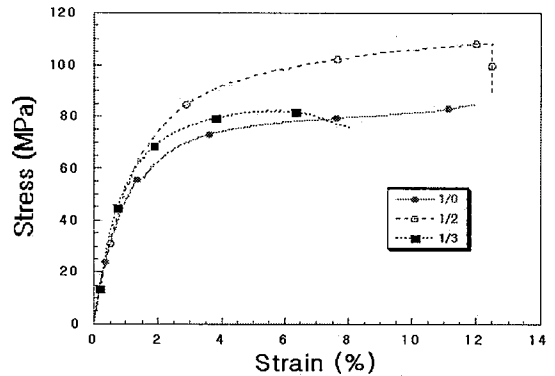


Fig. 9 Shear stress-strain response for twisted glass/epoxy specimens.

섬유 각도가 0도에서 멀어질수록 탄성계수 감소가 매우 크게 일어나는 반면에 angle-ply 복합재료의 경우는 그 감소가 비교적 완만하다.

그러나 인장 강도의 경우, Tsai-Wu 파손식에 의한 일방향 복합재와 angle-ply 복합재를 비교하면, 섬유각도의 증가에 따른 강도 감소는 탄성계수 감소보다 훨씬 크다[6]. 따라서, 섬유의 꼬임으로 인한 강도 감소는 인장탄성계수의 감소에 비해 더 급격하기 때문에 Table 3에서 보는 대로 1/3의 인장강도가 1/2에 비해 많이 감소함을 볼 수 있다. 그러나, 섬유의 꼬임이 있는 1/2의 인장강도가 섬유 꼬임에 거의 없는 1/0의 경우보다 높게 나타났는데 그 이유는 1/2 복합재료의 인장 파손 변형율이 1/0 보다 17% 정도 높았기 때문이다. 섬유의 꼬임이 있으면 각각의 섬유 필라멘트에 작용되는 인장응력 성분이 섬유의 꼬임이 없는 일방향 필라멘트에 작용되는 인장응력 성분보다 낮기 때문에 파손 변형율이 높다고 볼 수 있다. 그러나 섬유 꼬임 각도가 너무 커지게 되면 전단 응력 성분에 의해 파손이 일어

나기 때문에 인장강도는 감소하게 된다.

Fig. 6은 섬유 방향으로 인장 하중이 작용할 때의 끈 섬유 복합재료의 응력-변형도 곡선을 보인 것인데, 1/0의 경우는 파손까지 거의 직선 거동을 보이거나, 끈 섬유의 경우는 파손이 가까워 지면서 비선형 거동을 보인다. 여기서, 인장 파손 변형율은 1/2가 가장 높고 1/3이 가장 낮음을 볼 수 있다. 따라서, 인장 강도도 같은 순서를 보인다.

90도 인장 거동은 섬유 특성이 지배적인 요인이 아니므로 섬유 꼬임 각도에 따른 탄성계수와 강도 변화가 그리 크지 않지만 끈 섬유 복합재료가 일방향 복합재료 보다 90도 인장 탄성계수( $E_{y1}$ ) 및 인장 강도( $F_{y1}$ )는 감소함을 볼 수 있다. 포와송비( $\nu_{xy}$ )의 경우에도 꼬임 각의 변화에 대해 영향을 받지 않음을 알 수 있다. Fig. 7은 섬유 폭 방향으로 인장 하중이 작용할 때의 응력-변형도 곡선을 보인 것인데, 끈 섬유 복합재료인 1/2 및 1/3의 경우가 비선형 거동을 보이고 있으며 Fig. 6과 비교해 볼 때, 꼬임 각 변화에 의한 90도 인장 강도 및 탄성계수 차이는 0도 인장 특성에 비해

여 매우 작다는 것을 알 수 있다.

0도 압축 탄성계수( $E_{xx}$ )는 꼬임 각의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이거나 그 크기는 표준편차 범위 내에 있으므로 직접적인 영향은 없다고 볼 수 있다. 90도 압축 탄성계수( $E_{yy}$ )는 꼬임 각이 증가할수록 다소 증가함을 보이는 데 그 이유는 꼬임 각이 커질수록 섬유 각도가 90도에 가까워지기 때문이다. 압축 강도( $F_{yc}$ )의 경우에는 일반적으로 꼬임 각도가 증가하면 감소하는 경향을 보인다. Fig. 8은 0도 및 90도 압축하중에서의 응력-변형도 곡선을 보인 것인데, 0도의 경우에는 끈 섬유 복합재료의 비선형 거동이 보이며, 90도의 경우에는 응력-변형도 거동이 기지재료 특성에 좌우되기 때문에 모든 경우에 대해 비선형 거동을 보인다.

전단특성을 보면, 꼬임 각이 증가할수록 섬유의 배열각도가 0도에서 멀어지게 되므로 전단 탄성계수( $G_{xy}$ )는 증가한다. 그러나, 전단 강도( $S$ )의 경우에는 개개 섬유의 꼬임 각도 보다는 일방향의 섬유 배열로 인하여 강도 특성이 좌우되며, 1/3의 시편이 섬유체적비율이 높고 더 굵은 섬유로 배열되어 모체가 하중을 지지하는 능력이 떨어지기 때문에 1/2 시편보다 강도가 낮게 나온 것으로 보인다. Fig. 9는 전단응력-변형도 관계를 보여주고 있는데, 전체적으로 비선형 거동을 나타내고 있다.

#### 4.2 탄성계수 예측

제 2장에서 전개한 탄성계수 모델을 이용하여 끈 섬유 복합재료의 탄성계수 예측을 하였다. 계산을 위해 사용한 원재료의 기계적 특성 및 복합재료의 기하학적 입력 데이터를 Table 2에 요약하였으며, 탄성계수 예측 결과를 Table 4에 정리하였다. 본 모델에 의하면 끈 섬유 복합재료의 평면 뿐만 아니라 두께 방향의 탄성계수도 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Table 4 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
$\nu_{yz}$	0.247	0.248	0.244
$\nu_{zx}$	0.083	0.088	0.096
$\nu_{xy}$	0.267	0.275	0.276

일반적으로 복합재료의 섬유길이 방향과 폭 방향의 탄성계수는 인장일 때와 압축일 때 다르게 나타나고 있지만, 모델의 유효성은 예측치와 인장 탄성계수와의 비교를 통해

여 확인하고자 한다. Table 3과 4에서 보는 바와 같이 예측치와 실험치가 비교적 잘 일치하며, 1/0의 경우 길이 방향 탄성계수에 있어서 예측치는 섬유굴곡이 전혀 없는 경우이고 실험치는 인치 당 0.7회의 꼬임이 있는 경우이므로 예측치가 더 높게 나왔다. 1/2의 경우에도 길이 방향 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 0도에서 커지므로 길이 방향의 탄성계수가 감소함을 알 수 있다. 1/0의 형태는 일방향 복합재료로 간주할 수 있으나, 엄밀하게는 Table 1에서 보는 바와 같이 약간의 꼬임이 있기 때문에 프리프레그를 사용한 완전한 일방향 복합재료에 비하면 물성치가 약간 떨어짐을 예상할 수 있다.

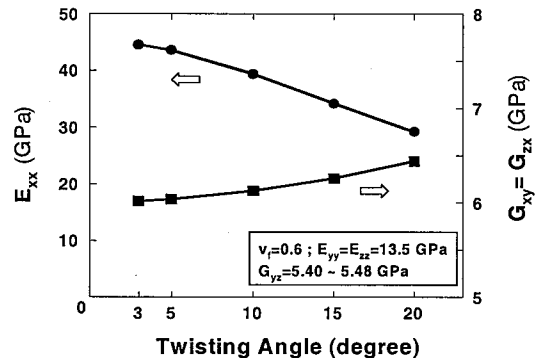


Fig. 10 Variation of Young's modulus and shear moduli of twisted glass/epoxy composites as a function of the twisting angle.

Fig. 10은 섬유체적비율이 0.6인 유리섬유/에폭시 복합재료의 경우 섬유 꼬임 각도 변화에 대한 인장 및 전단 탄성계수 변화를 보인 것이다. 섬유 폭 방향의 탄성계수인  $E_{yy}$  및  $E_{zz}$ 는 일정한 값을 보이며,  $G_{yz}$ 는 꼬임 각도에 따라 거의 변화가 없다. 그러나, 섬유 길이 방향의 탄성계수  $E_{xx}$ 는 큰 변화를 보이고 있으며,  $G_{xy}$ 와  $G_{zx}$ 는 비교적 변화가 작다. 꼬임 각도가 증가할수록 섬유 각도가 0도에서 멀어지므로 인장 탄성계수는 감소하고 전단 탄성계수는 증가함을 알 수 있다.

따라서, 본 모델은 끈 섬유 복합재료의 탄성계수를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있으며, 복합재료의 평면 뿐만 아니라 두께 방향의 탄성계수도 예측할 수 있다. 또한 본 모델을 이용하면 원하는 섬유 재료의 임의의 끈 각도에 대한 탄성계수 변화를 알 수 있기 때문에 끈 섬유로 이루어진 복합재 구조물의 기계적 특성 거동에 대해

여 정확한 이해를 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 끈 섬유로 이루어진 복합재료에 있어서의 기본적인 물성치를 확보하고 탄성계수 모델을 제시하여 예측결과와 실험치를 비교함으로써 모델의 유효성을 확인하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 끈 섬유 복합재료에 대한 3차원 탄성계수를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 탄성계수 예측은 단위 셀을 기본으로 하여, 미소요소에 대한 부분 좌표계에서의 탄성특성을 전체 좌표계로 좌표 변환한 후 단위 셀에 대하여 체적 평균법을 이용하여 끈 섬유 복합재료의 유효 탄성계수를 구하였다.
- 2) 끈 섬유 복합재료에 대한 기본 물성치를 구하기 위하여 1/0, 1/2 및 1/3 형태의 유리섬유를 사용하여 평판 위에 와인딩 한 후 수지충전 성형법으로 시험 평판을 제조하였다. 이 방법으로 제조된 평판은 섬유체적율이 0.6 이상이었고 완벽하게 수지가 함침되었음을 미세구조 관찰을 통하여 확인하였다.
- 3) 1/0, 1/2 및 1/3 형태의 시험편에 대한 인장, 압축 및 전단 시험을 실시하여 0도 및 90도 방향의 인장 및 압축 강도와 탄성계수를 얻었으며 전단강도 및 전단 탄성계수도 구하였다.
- 4) 끈 섬유 각도에 따른 기계적 물성치의 변화를 실험을 통하여 확인할 수 있었으며 탄성계수 모델을 이용한 인자 연구를 통하여 본 모델의 유용함을 보였다. 본 모델에 의한 탄성계수 예측치를 실험치와 비교한 결과 그 둘은 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 21세기 프론티어 연구개발 사업인 차세대 소재성형 기술개발 사업에서 수행된 연구 결과임.

## 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.
- 6) Daniel, I. M. and Ishai, O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*, Oxford University Press, New York, 1994.