

# 3D 복합재료의 구조해석 및 기계적 물성 예측

유근수\* · 전홍재\* · 변준형\*\* · 이상관\*\*

## Analysis of Structure and Prediction of Mechanical Properties for 3D Composites

K. S. Ryu, H-J. Chun, J-H. Byun, S-K Lee

**Key Words :** MWK composites, mechanical properties, micromechanics.

### Abstract

In this paper, an analytical model for the prediction of the elastic properties of multi-axial warp knit fabric (MWK) composites is proposed. The geometric limitation, effect of stitching fibers and design parameters of MWK composites are considered in the model. The elastic behavior of MWK composites was conducted by using an averaging method. The predicted elastic properties are in reasonably good agreement with experimental values. Finally the effect of stitching in the MWK composites are discussed.

### 1. 서 론

비강성, 비강도 특성이 우수한 복합재료는 점차 1차 구조재료의 적용이 확대되고 있으며 이를 위해 두꺼운 복합재료의 제조방법도 계속 발전하고 있다. 그중에서 RTM (resin transfer molding)에 의한 복합재료의 제작은 생산 단가가 저렴하며, 복잡한 형상의 대형 부품 성형이 가능하다. RTM은 보강섬유로된 예비 성형체(preform)를 금형 속에 넣고 채결한 다음 수지를 금형내에 주입하고 열과 압력을 가하여 성형하는 공정으로 예비 성형체 제작을 위해서 3차원 복합재를 사용한다. 3차원 복합재는 섬유 배열에 의해 두께방향으로의 보강구조를 가지므로 층간 분리, 충격 흡수성 및 구조 보지성이 매우 우수하다. 이러한 3차원 복합재 중에서 다축경편(MWK, Multi-axial Warp Knit) 복합재료는 각 층별로 일정한 방향으로 배열된

다층구조를 stitching으로 고정된 형태를 가지며, 이러한 구조적 특성으로 인하여, 섬유의 배열이 쉽게 변형되지 않아 예비성형체 제작이 용이하고, 작업공정이 간단하여 생산성이 높으며, 제품의 균일성이 향상된다. 다축경편 복합재료에 관한 연구는 복합소재의 사용범위가 확대됨에 따라 90년대 중반 이후 주로 선진국의 연구기관을 중심으로 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 대부분의 연구를 살펴보면 3차원 복합재가 최근에 개발되어 쓰이기 시작하였기 때문에, 각각의 연구는 제한적인 조건하에서의 연구성과인 경우가 많으며, stitch에 의한 효과를 고려하지 않았다. 따라서, 이번 연구에서는 다축경편 복합재료를 구성하는 기본 재료의 기계적 물성값과 기하학적 구조를 고려하여, 다축경편성 복합재료의 기하학적 구조를 해석하고, 이를 통해 강성을 예측하고자 한다.

### 2. 다축경편 복합재료의 강성예측 모델

#### 2.1 다축경편 복합재료의 특징

\* 연세대학교 기계공학과

\*\* 한국기계연구원, 재료기술연구소, 복합재료그룹

일반적인 다축경편성 복합재료는 insertion fiber 들이 각각 warp ( $0^\circ$  : x-direction), weft ( $90^\circ$  : y-direction)와 bias ( $\pm\theta$ ) 방향으로 roving의 형태로 배열되며, 이것들은 stitching에 의해 두께 방향으로 결합되어 있다. 본 연구의 MWK는  $[0^\circ / \theta / 90^\circ / -\theta]$ 의 배열을 가지며, insertion roving에는 유리섬유를, stitch thread에는 케블라 섬유를 사용한 다축경편 복합재료에 대한 강성을 예측하였다.

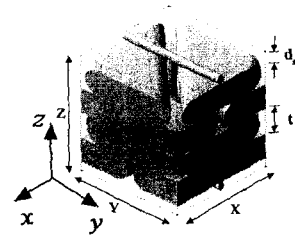


그림 2. Geometric structure of representative volume.

## 2.2 단위구조의 기하학적 해석

3차원 복합재료의 전체구조는 반복구조를 설정하여 정량화가 가능한데, 이때의 최소 반복구조를 단위구조 (representative volume)라 한다. 단위구조를 이용한 모델링의 일반적 절차는, 전체 구조물을 관찰하여 단위구조의 치수를 결정하고, 단위구조 내부에 존재하는 섬유다발의 단면형상을 이상화한다. 그 다음 각 층의 구성과 보강섬유의 배치를 고려하여 전체 단위구조의 기하학적 구조를 결정하고, 이를 통해 기하학적 변수와 한계를 유도 할 수 있다.

단위구조의 치수를 결정할 때는 반복구조로서의 정의를 만족하면 어떤 부분이든 단위구조로 설정이 가능하나, 가급적 완전한 knitting stitch를 포함하고, 단위구조 내에서 insertion roving이 대칭이 되도록 설정하는 것이 바람직하다. 단면형상을 이상화하면 다음 그림 1.과 같이 insertion 및 stitch roving의 단면형상을 가정할 수 있다.

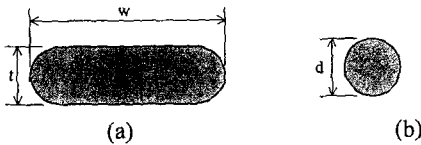


그림 1. Shape and dimension of roving cross-section  
(a) Insertion roving with the width-to-thickness aspect ratio  $f > 1$ , (b) Stitch roving with  $f = 1$ .

이때 insertion roving의 두께-폭 비율 (width-to-thickness aspect ratio:  $f$ )은 3~7 정도의 값을 가지는 경주용 트랙의 형상을 가지고 있다. 또한 stitch roving은 insertion roving에 비해 매우 낮은 선밀도를 가지고 있으며, 두께-폭 비율은 1이다.

이후에 각 roving의 구성과 배치를 고려하여 전체적인 단위구조의 기하학적 구조를 다음 그림 2와 같이 결정하고, 이를 통해 기하학적 변수를 유도한다.

먼저 insertion roving의 두께( $t$ )와 폭( $w$ )은 단위구조의 기하학적 구조와 관찰된 결과를 토대로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$w_x = X - d_s \quad (1.a)$$

$$w_y = Y - d_s \quad (1.b)$$

$$w_{\pm\theta} = (\sqrt{X^2 + Y^2} - d_s) / 2 \quad (1.c)$$

$$t = (Z - 2d_s) / 4 \quad (1.d)$$

이때 첨자로 쓰인  $x, y, \pm\theta$  와  $s$ 는 각각 warp, weft, bias insertion roving 과 stitching roving을 가르킨다. 따라서 각 roving의 단면적과 부피는 다음과 같다.

$$S_x = \left( \frac{\pi}{4} + w_x/t - 1 \right) t^2 \quad (2.a)$$

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

$$S_{\pm\theta} = \left( \frac{\pi}{4} + w_{\pm\theta}/t - 1 \right) t^2 \quad (2.c)$$

$$S_s = \frac{\pi}{4} d_s^2 \quad (2.d)$$

$$V_{ix} = S_x X \quad (3.a)$$

$$V_{iy} = S_y Y \quad (3.b)$$

$$V_{i\pm\theta} = 2S_{\pm\theta} \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.c)$$

$$V_{sy} = 2S_s Y \quad (3.d)$$

$$V_{sz} = S_s (Z - 2d_s) \quad (3.e)$$

또한 fiber packing fraction( $\kappa$ )은 전체 섬유체적율과 roving의 부피를 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\kappa = \frac{\text{insertion roving 내의 fiber volume}}{\text{insertion roving의 volume}} = \frac{V_F \times v_c - v_{Fs}}{v_r} \quad (4)$$

여기서  $V_F, v_c, v_{Fs}, v_r$ 은 각각 단위구조의 섬유

체적율, 단위구조의 부피, stitching fiber의 부피, roving의 부피를 의미한다.

또한, roving은 횡등방재료로 가정하면 roving의 유효강성은 섬유와 모재의 물성치로부터 Chamis의 이론[1]을 이용하여 얻을 수 있으며, 단위구조에서 roving의 배치를 고려한 좌표계는 다음 그림 3과 같다.

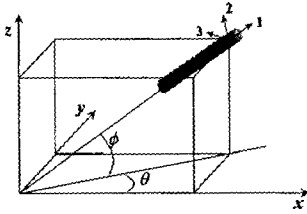


그림 3. Global and local coordinate systems for the roving.

여기서 roving의 강성행렬은 국소좌표계에서의 강성행렬 ( $[C_{123}]$ )에서  $\theta, \phi$ 를 이용해 전체좌표계에서의 강성행렬( $[C_{xyz}]$ )로 좌표변환을 할 수 있다.

$$[C_{xyz}] = [T]^T [C_{123}] [T] \quad (5)$$

### 2.3 Unit cell의 강성 예측

그림 4와 같이 y축에 수직인 두 개의 평행단면으로 이루어진 미소체적(infinitesimal volume)을 고려해보자.

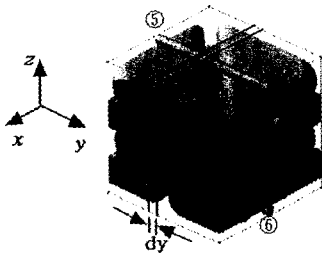


그림 4. Infinitesimal volume.

이때 각각의 미소체적은 x축방향으로 연속해서 일렬로 연결되어 있으므로 다음과 같이 단위구조의 연성행렬을 얻을 수 있다.

$$[S] = \frac{1}{X} \int_0^X [S^*] dx \quad (6)$$

또한  $[S^*]$ 는  $[C^*_{xyz}]$ 의 역행렬로 얻을 수 있다. 소체적을 iso-strain으로 가정한다면[2], 미소체적 강성행렬은 rule-of-mixture에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[C^*_{xyz}] = \sum_{i=1}^n V_i^r [C_{xyz}]_i^r + V_m [C]_m$$

여기서  $V_i^r$ 와  $V_m$ 은 각각 i번째 roving과 모재의 체적율 나타낸다.

## 3. 다축경편성 복합재료의 강성예측 결1

### 3.1 다축경편성 복합재료의 강성예측 방법

다축경편성 복합재료의 기계적물성을 예측하기 위하여, 먼저 구성재료의 기계적 물성치로부터 roving의 유효강성을 구하고, 이로부터 단위구조의 연성을 stitch를 고려한 단위구조의 기하학적 구조를 이용하여 구할 수 있었다. 이때 사용한 구성재료의 물성치는 다음 표 1과 같다.

표 1. Mechanical properties of component

	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Modulus (GPa)	Poisson's ratio
S-glass	2490	85.6	0.2
Kevlar	1450	131.7	0.2
Epoxy	1218	3.0	0.3

### 3.2 MWK의 기계적 물성치 예측

이와 같은 방법으로 예측한 MWK의 연성상수 ( $[S]$ )로부터 기계적 물성치를 계산하고, 이를 실험에 의해 측정된 값과 같이 표 2에 나타내었다.

표 2. Elastic constants of MWK

	Experimental result(GPa)	Predicted result(GPa)
$E_{xx}$	17.6	21.6
$E_{zz}$	-	11.6
$\nu_{xy}$	0.295	0.294

이때 이론에 의한 예측값은 실험결과와 대체로 일치하고 있으며,  $E_{xx}$ 의 예측값이 실험값 보다 약간 큰 값을 보였다.

그림 5는 roving의 배치 각도에 의한 탄성계수 값의 변화를 나타낸다. 여기서 stitch의 영향으로  $\theta=45^\circ$ 일 때  $E_{yy}$ 가  $E_{xx}$ 보다 약간 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

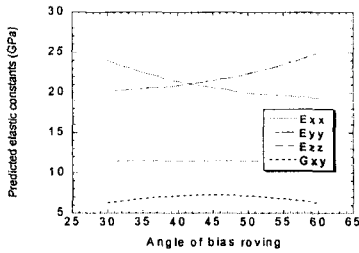


그림 5 Elastic constants as a function of angle of bias roving.

다음 그림 6은 전체 섬유체적율( $V_F$ )의 변화에 따른 탄성계수의 변화를 표시한 것이고, 그림 7은 stitching thread의 직경( $d$ )과 단위구조의 폭 ( $Y$ )의 비율 변화에 따른 탄성계수의 변화를 나타낸 것이다. 이때  $V_F$ 가 0.68이상일 경우, 또한  $d/Y$ 가 0.2이상 일 경우 insertion roving의 fiber packing fraction( $\kappa$ )가 이론적 최대값을 초과하게 된다.

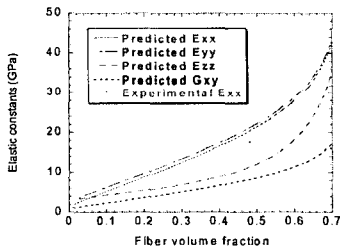


그림 6. Elastic constants as a function of fiber volume fraction.

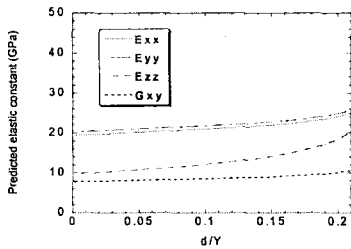


그림 7. Elastic constants as a function of fiber stitch thread diameter to representative volume width ratio.

결과에서 살펴볼 때 섬유체적율과 stitching thread의 직경이 증가할수록 단위구조의 탄성계수가 향상됨을 알 수 있으며, 특히 stitching thread의 직경이 증가함에 따라 두께방향의 탄성계수가 급격히 향상됨을 알 수 있다. 그러나 stitching

thread의 직경의 증가는 stitching density를 증가시키고, 다축경편 복합재료를 실제로 제작할 때 insertion roving의 굴곡 정도와 defect를 심화시키는 결과를 초래하므로 오히려 기계적 물성치의 저하를 나타낸다.

#### 4. 결론

이 연구를 통하여 stitching에 의해 두께 방향으로 보강된 다축경편 복합재료의 단위구조를 설정하고, 기하학적 구조해석을 통해 설계변수와 제약조건을 알 수 있었다. 또한 구성재료의 기계적 물성치로부터, 횡등방재료로 가정한 roving의 기계적 물성치를 계산하였다. 이를 통해 stitching에 의해 두께 방향으로 보강된 다축경편 복합재료에 대한 물성치를 단위구조의 기하학적 구조를 이용한 미소역학모델을 이용하여 예측할 수 있었다. 또한 이를 통하여 실험값과 대체로 일치하는 예측값을 얻을 수 있었으며, stitching에 의한 효과를 살펴보았다. 이때 단위구조의 유효탄성계수는 섬유체적율과 stitching thread의 직경에 따라 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 소재성형 기술개발사업에서 수행된 연구 결과임.

#### 참고문헌

- (1) F. Ko, Composites Science and Technology, Vol.56, 1996, pp.253-260
- (2) Ruan, X. & Chou, T.-W., Composites Science and Technology, Vol.56, 1996, pp.1391-1403
- (3) Du, G.W., Popper, P. & Chou, T. W., J. Mater. Sci., Vol.26, 1991, pp.3438-3448
- (4) F. Ko, International Man-Made Fibers Congress, Austria, Sep.1986
- (5) J. S. Yoo, S. E. Lee, C.-G. Kim, Composites Structure, Vol.54, 2001, pp.57-65