

〈논 문〉

평직 및 주자직 복합재료의 탄성계수 예측

변 준 형*

(1996년 3월 18일 접수)

Prediction of Engineering Constants for Plain and 8-Harness Satin Woven Composites

Joon-Hyung Byun

Key Words : Composite Materials(복합재료), Elasticity(탄성), Mechanics(역학), Woven Fabric(직물), Unit Cell(단위구조), Elastic Constants(탄성계수), Coordinate Transformation(좌표변환)

Abstract

The geometric and elastic models based on the unit cell have been proposed to predict the geometric characteristics and the engineering constants of plain and satin woven composites. In the geometric model, length and inclined angle of the yarn crimp and the fiber volume fraction of woven composites have been predicted. In the elastic model, the coordinate transformation has been utilized to transform the elastic constants of the yarn crimp to those of woven composites, and the effective elastic constants have been determined from the volume averaging of the constituent materials. Good correlations between the model predictions and the experimental results of carbon/epoxy and glass/epoxy woven composites have been observed. Based on the model, the effect of various geometric parameters and materials on the three-dimensional elastic properties of woven composites can be identified.

1. 서 론

항공우주 및 방산 분야에는 높은 비강도 및 비강성도 뿐만 아니라 고인성화 및 효율적인 성형성을 요구하고 있기 때문에 일방향 복합재료와 병행하여 직물 복합재료의 응용이 증가되고 있다. 직물 복합재료의 특징은 복잡한 형상의 부품성형이 가능하고, 생산성이 향상되며 손상 허용치가 증가한다. 특히 Woven 직물은 상호 직각방향으로 안정성이 뛰어나고 일방향 복합재료보다 더 균형적인 평면성질을 가지고 있으며, 충격 저항치가 높다.

Woven 직물 복합재료의 기계적 특성은 직물의

조직에 따라 달라지는데, 직물조직을 결정하는 인자로서는 직물패턴, 직물 count, 섬유(yarn)의 두께, 섬유종류, 섬유의 굵곡정도 등이다. 복합재료의 기계적 특성에 대한 여러 인자의 영향을 알기 위해 실험에 의존한다는 것은 거의 불가능하기 때문에 해석적 모델에 의한 기계적 특성 예측이 필요하다. Ishikawa 와 Chou^(1,2)는 복합재료 적층이론을 바탕으로 하여 직물의 조직에 따른 여러 가지 모델을 제시하였으며, Naik 등⁽³⁾은 Ishikawa and Chou의 모델을 기하학적 면에서 수정을 가했으나 기본은 적층이론을 바탕으로 하였다. 또한, 유한요소법을 이용한 연구^(4~6)도 시도되고 있다. 기존의 모델은 복합재료 구조물을 해석할 때 요구되는 3차원적인 탄성계수 값이 필요하거나 직물의 기하학적

*회원, 한국기계연구원 복합재료그룹

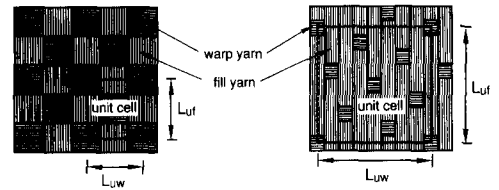
인자와 복합재료의 기계적인 특성간의 상호연관 관계를 인자변화를 통하여 연구(parametric study) 하는 경우, 다음과 같은 단점이 있다. 첫째는 복합재료 적층이론을 바탕으로 한 방법은 평판이론의 가정으로 인하여 직물 복합재료의 평면 성질인 2차원적 탄성계수만을 예측할 수 있고, 둘째는 유한요소법은 직물의 기하학적 형상이 바뀔 때마다 다시 모델링을 해야 하고 섬유 굵기를 고려한 3차원 solid 모델링을 할때 문제의 복잡성이 따르며, 셋째는 중요한 기하학적인 인자인 섬유굴곡각도 및 섬유체적률 등을 기하학적 관계에 의한 예측을 통하여 구하지 않고 복합재료 시편의 단면적을 관찰하여 얻도록 되어 있으므로 직물의 종류가 바뀔 때마다 시편을 제작하여 이러한 인자를 구해야 하는 번거로움이 있다.

본 논문에서는 평직(plain weave) 및 주자직(8-harness satin weave) 직물 복합재료의 단위구조 해석 모델을 이용하여 기하학적 특성(섬유의 굴곡각도, 섬유체적비율 등)을 구하고 좌표변환과 체적평균법을 바탕으로 직물 복합재료의 평면에서 뿐만 아니라 두께방향의 탄성계수를 예측하고자 한다. 체적평균법은 3차원 직물 복합재료의 탄성계수 예측^(7,8)에 처음으로 적용하여 비교적 정확한 결과를 얻었으며, 2차원 직물인 평직이나 주자직 복합재료에 대한 적용은 시도되지 않았다.

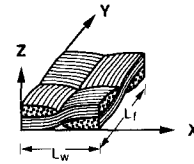
본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 직물의 기본적인 특성, 즉 직물종류, 단면형상 및 요구하는 복합재료 두께나 직물 적층수 등이 주어졌을 때 직물 복합재료의 기하학적인 특성인 섬유굴곡각도, 굴곡길이 및 섬유부피비율을 예측하고, 그 다음, 이 기하학적인 특징으로부터 섬유굴곡부위의 탄성계수를 복합재료 전체 좌표계로 좌표변환한 후 경사 및 위사섬유의 탄성계수를, 각각의 섬유가 복합재료 전체에 차지하는 부피에 대하여 체적평균함으로써 복합재료의 탄성계수를 구하였다. 이론적 모델의 유효성을 검증하기 위하여 평직 탄소섬유/에폭시 및 주자직 유리섬유/에폭시 복합재료에 대한 실험치와 비교하였다.

2. 기하학적 특성

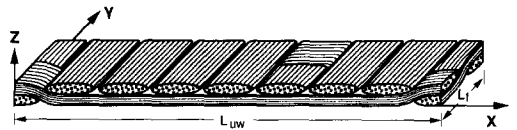
Woven 직물은 2차원적 구조로서 둘 이상의 섬유가 서로 직각방향으로 짜여진 것인데, 직물의 길이방향으로 배열된 섬유를 경사(warp), 폭방향의



(a) Plain weave (b) 8-harness satin weave
Fig. 1 Woven fabric patterns and their unit cells



(a) Plain weave



(b) 8-harness satin weave

Fig. 2 Schematics of woven fabrics

섬유를 위사(fill 혹은 weft)라고 한다. 반복적으로 짜여진 부분의 모양에 따라 평직, 능직(twill weave), 주자직 등으로 분류할 수 있다. Fig. 1(a), (b)는 평직 및 주자직을 나타낸 것이다.

2.1 단위구조

단위구조란 직물 제조과정 자체의 기계적인 반복성에 의해 직물의 기하학적 형상이 반복되는 구조를 말하며, Fig. 1에 단위구조가 나타나 있다. Fig. 2(a), (b)는 섬유단면 형상과 경사 및 위사섬유가 서로 엇갈리며 지나가는 모습을 보여주기 위해 평직 및 주자직 단위구조의 일부분을 도식적으로 나타낸 것이다.

Fig. 3은 평직 복합재료 시편의 단면을 보인 것인데, 여기서 특징적인 것은 섬유의 굴곡과 섬유단면형상이다. 섬유굴곡부분을 도식적으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 섬유단면을 두개의 원으로 이루어지는 형상인 렉비공모양이라 가정하고, 경사 및 위사의 두께를 d_w, d_f , 섬유두께에 대한 폭의 비(단면 형상계수)를 각각 a_w, a_f 라고 하면, 각 섬유의 굴곡반경(r_w, r_f)과 굴곡각도(θ_w, θ_f)는 다음 식으로 나타낼 수 있다.



Fig. 3 Cross-section of plain woven composites

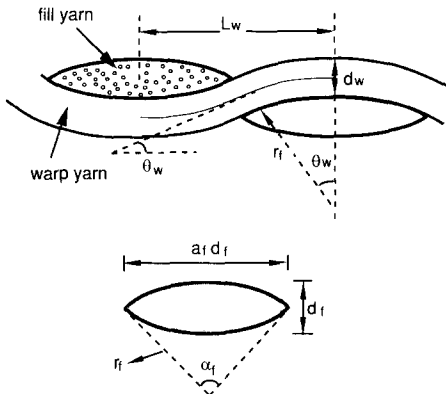


Fig. 4 Geometric model of the yarn crimp

$$\begin{aligned}
 r_w &= \frac{d_w}{4} (1 + a_w^2) \\
 r_f &= \frac{d_f}{4} (1 + a_f^2) \\
 \theta_w &= \cos^{-1} \left(\frac{2r_f}{2r_f + d_w} \right) \\
 \theta_f &= \cos^{-1} \left(\frac{2r_w}{2r_w + d_f} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)로부터 경사 및 위사의 직선길이 (L_w , L_f)를 구할 수 있으며, 단위구조의 경사 및 위사방향의 길이 (L_{uw} , L_{uf})는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 L_w &= (2r_f + d_w) \sin \theta_w \\
 L_f &= (2r_w + d_f) \sin \theta_f \\
 L_{uw} &= 2L_w + a_f d_f (n_p - 2) \\
 L_{uf} &= 2L_f + a_w d_w (n_p - 2)
 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, n_p 는 직물의 형태를 나타내며, $n_p=2$ 는 평직, $n_p=8$ 은 주자직의 경우이다.

2.2 섬유부피비율

Fig. 4에서 경사 및 위사의 단면적 (A_w , A_f)을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 A_w &= r_w^2 (\alpha_w - \sin \alpha_w) \\
 A_f &= r_f^2 (\alpha_f - \sin \alpha_f) \\
 \alpha_w &= 2 \sin^{-1} \left(\frac{2a_w}{1 + a_w^2} \right) \\
 \alpha_f &= 2 \sin^{-1} \left(\frac{2a_f}{1 + a_f^2} \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, α 는 섬유단면의 내부 각도이다(Fig. 4). 경사 및 위사의 단면 형상계수는 직조할 때 섬유의 인장정도나 두께방향으로의 압축정도에 따라 달라지나 각 섬유의 단면적은 일정하다고 가정할 수 있다. 따라서 위의 식에서 A_w 와 A_f 를 같게 놓으면 경사 및 위사의 두께 비율은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{d_w}{d_f} = \frac{1 + a_f^2}{1 + a_w^2} \sqrt{\frac{\alpha_f - \sin \alpha_f}{\alpha_w - \sin \alpha_w}} \tag{4}$$

한편, 복합재료 시편의 전체 두께를 T , 적층수를 N 이라고 하면,

$$d_w + d_f = T/N \tag{5}$$

이므로 섬유의 단면 형상계수, 시편 전체 두께 및 적층수가 주어지면 식 (4)와 (5)에서 각 섬유의 두께를 구할 수 있다. 각 섬유의 굵क길이를 식 (1)을 이용하여 구하고 식 (3)에 표시한 단면적을 이용하면 단위구조 내의 경사섬유 체적 (V_{yw}), 위사 섬유 체적 (V_{yf}) 및 단위구조 체적 (V_u)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{yw} &= A_w [(n_p - 2) a_f d_f + 2(2r_f + d_w) \theta_w] \\
 V_{yf} &= A_f [(n_p - 2) a_w d_w + 2(2r_w + d_f) \theta_f] \\
 V_u &= (d_w + d_f) L_{uw} L_{uf}
 \end{aligned} \tag{6}$$

따라서, 단위구조 내의 경사 및 위사섬유의 전체 체적을 계산하면 평직 및 주자직 복합재료의 섬유 체적률 (V_f)은 다음과 같이 구해진다.

$$V_f = n_p (V_{yw} + V_{yf}) k / V_u \tag{7}$$

여기서, k 는 섬유다발내의 섬유체적비율로서, 식 (6)의 V_{yw} 및 V_{yf} 는 섬유다발이 아닌 실린더와 같은 구조로 가정하여 계산한 것이므로 섬유 자체의

부피를 구하고자 할 때는 섬유다발내의 섬유체적비율을 곱해 주어야 한다.

3. 탄성계수 예측

3.1 좌표변환

Fig. 5는 굴곡섬유의 일부분을 나타낸 것으로서 $x-z$ 평면상에 배열된 섬유와 그 좌표계를 보여주고 있다.

부분(local)좌표계는 1-2-3으로 표시하고, 축 1은 섬유의 종축방향이다. 전체(global)좌표계의 x, y, z 축은 직물 복합재료의 경사, 위사 및 두께방향이다. Fig. 5의 섬유를 횡등방성(transverse isotropy)의 일방향 복합재료라고 가정하면, 부분 좌표계에서의 연성상수는,

$$[S] = \begin{Bmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{12}/E_{11} & -\nu_{12}/E_{11} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & -\nu_{32}/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & -\nu_{23}/E_{22} & 1/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

이고, 여기서 E, G, ν 는 일방향 복합재료의 영률, 전단상수 및 푸아송비이며, 첨자 1은 섬유방향, 첨자 2는 섬유와 직각방향이다. 이 값은 미시역학(micromechanics)⁽⁹⁾ 및 섬유다발내의 섬유체적비율(k)을 이용하여 섬유와 기지의 탄성계수로부터 구할 수 있다. Fig. 5에 표시한 굴곡섬유에서, 부분좌표계 1-2-3으로 표시된 일방향 복합재료의 연성상수 행렬은 다음과 같이 전체좌표계 $x-y-z$ 로 변환된다.

$$[S'] = [T]'[S][T] \quad (9)$$

여기서, $[T]$ 는 좌표변환행렬, $[T]'$ 는 전위(transpose) 행렬이며, $[T]$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$[T] = \begin{Bmatrix} m^2 & 0 & n^2 & 0 & 2mn & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n^2 & 0 & m^2 & 0 & -2mn & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m & 0 & -n \\ -nm & 0 & mn & 0 & m^2 - n^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n & 0 & m \end{Bmatrix} \quad (10)$$

여기서, $m = \cos \theta$, $n = \sin \theta$ 이다. 위의 식 (9)는 임의의 각도 θ 를 갖는 섬유의 전체좌표계에 대한

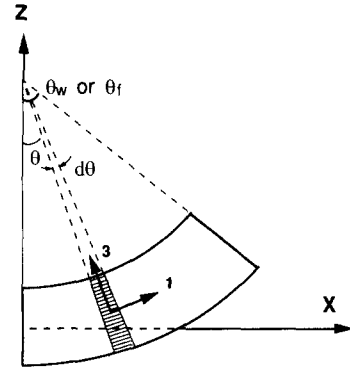


Fig. 5 Coordinate systems of a crimp yarn

연성상수인데, Fig. 4에 나타낸 굴곡섬유 전체의 유효 연성상수는 위의 연성상수를 굴곡선을 따라 평균함으로써 구할 수 있다. 즉,

$$S_{ij}^c = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta S_{ij}^s d\theta \quad (11)$$

이며, 이것을 각 연성상수 요소에 대하여 풀어쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{11}^{sw} &= S_{22}^{sf} = U_1 + (U_2/2\theta) \sin 2\theta + (U_3/4\theta) \sin 4\theta \\ S_{12}^{sw} &= S_{12}^{sf} = U_6 + (U_7/2\theta) \sin 2\theta \\ S_{13}^{sw} &= S_{23}^{sf} = U_4 - (U_3/4\theta) \sin 4\theta \\ S_{15}^{sw} &= S_{24}^{sf} = (U_2 \sin^2 2\theta + U_3 \sin^2 2\theta) / \theta \\ S_{22}^{sw} &= S_{11}^{sf} = S_{22} \\ S_{23}^{sw} &= S_{13}^{sf} = U_6 - (U_7/2\theta) \sin 2\theta \\ S_{25}^{sw} &= S_{14}^{sf} = (2U_7/\theta) \sin^2 \theta \\ S_{33}^{sw} &= S_{33}^{sf} = U_1 - (U_2/2\theta) \sin 2\theta + (U_3/4\theta) \sin 4\theta \\ S_{35}^{sw} &= S_{34}^{sf} = (U_2 \sin^2 \theta - U_3 \sin^2 2\theta) / \theta \\ S_{34}^{sw} &= S_{55}^{sf} = U_8 + (U_9/2\theta) \sin 2\theta \\ S_{46}^{sw} &= S_{56}^{sf} = - (U_9/2\theta) \sin^2 \theta \\ S_{55}^{sw} &= S_{44}^{sf} = 4U_5 - (U_3/\theta) \sin 4\theta \\ S_{66}^{sw} &= S_{66}^{sf} = U_8 - (U_9/2\theta) \sin 2\theta \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, 첨자 w 와 f 는 각각 경사와 위사방향을 나타내며, 경사방향의 값은 각 식의 θ 에 θ_w 를, 위사방향의 값은 θ_f 를 대입하면 된다. 상수 U 는 일방향 복합재료의 연성상수의 항[식 (8)]으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} U_1 &= (3S_{11} + 3S_{33} + 2S_{13} + S_{55}) / 8 \\ U_2 &= (S_{11} - S_{33}) / 2 \\ U_3 &= (S_{11} + S_{33} - 2S_{13} - S_{55}) / 8 \\ U_4 &= (S_{11} + S_{33} + 6S_{13} - S_{55}) / 8 \\ U_5 &= (S_{11} + S_{33} - 2S_{13} + S_{55}) / 8 \end{aligned}$$

Table 1 Summary of input data for the model prediction

Mechanical data	Geometric data
T300 Carbon fiber $E_{1f}=250$ GPa ; $E_{2f}=20$ GPa $G_{12f}=26$ GPa ; $G_{23f}=6$ GPa $\nu_{12f}=0.28$	Plain weave $T=1.91$ mm ; $N=10$ $k=0.78$ $a_w=12$; $a_f=14$
Glass fiber $E_f=72$ GPa ; $\nu_f=0.28$	8-Harness satin weave $T=2.6$ mm ; $N=10$ $k=0.7$ $a_w=4.5$; $a_f=6$
Epoxy $E_m=6$ GPa ; $\nu_m=0.4$	

(Note) E : Young's modulus, G : Shear modulus, ν : Poisson's ratio, f : Fiber, m : Matrix
 1 : Longitudinal direction, 2 : Transverse direction

$$\begin{aligned}
 U_6 &= (S_{12} + S_{32})/2 \\
 U_7 &= (S_{12} - S_{32})/2 \\
 U_8 &= (S_{44} + S_{66})/2 \\
 U_9 &= (S_{44} - S_{66})/2
 \end{aligned} \tag{13}$$

3.2 체적평균법

주자직 복합재료에 대하여 먼저 고찰해 보면, 하중이 경사방향으로 작용할 때, 경사섬유의 굴곡부분과 일방향부분은 응력이 일정하게 작용(iso-stress)한다고 가정할 수 있으므로 이 두 부분의 연성상수를 체적 평균하여 유효 연성상수를 구할 수 있다.

$$S_{ij}^w = S_{ij}^{cw} \left(\frac{2L_w}{L_{uw}} \right) + S_{ij}^{sw} \left(\frac{L_{uw} - 2L_w}{L_{uw}} \right) \tag{14}$$

여기서, 첫번째 항은 굴곡부분, 두번째 항은 직선 부분에 해당되며, 첨자 w 는 경사섬유(warp)을 뜻한다. 마찬가지로 위사섬유의 유효 연성상수도 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{ij}^f = S_{ij}^{cf} \left(\frac{2L_f}{L_{wf}} \right) + S_{ij}^{sf} \left(\frac{L_{wf} - 2L_f}{L_{wf}} \right) \tag{15}$$

다음, 단위구조 전체에 대하여 고찰해 보면, 하중이 단위구조의 경사방향으로 작용할 때, 경사 및 위사층의 변형률은 일정(iso-strain)하다고 가정할 수 있으므로 식 (14), (15)의 유효 연성상수 행렬을 역변환(inverse)한 강성상수를 체적평균하면 주자직 복합재료의 유효 강성상수 $[C^c]$ 를 구할 수 있다.

$$C_{ij}^c = C_{ij}^{cw} \left(\frac{V_{yw}}{V_u} \right) + C_{ij}^{cf} \left(\frac{V_{yf}}{V_u} \right) + C_{ij}^m \left(\frac{V_m}{V_u} \right) \tag{16}$$

여기서, $[C^m]$ 은 기지재료의 강성상수(6×6 matrix)이며, $V_m = V_u - V_{yw} - V_{yf}$ 이다.

평직 복합재료의 경우에는 일방향 섬유부분이 없으므로 식 (14), (15)의 과정이 필요없다. 따라서, 식 (12)의 유효 연성상수 행렬을 역변환(inverse)한 강성상수를 식 (16)에서와 같이 체적평균하면 평직 복합재료의 강성상수 $[C^c]$ 를 구할 수 있다. 마지막으로, $[C^c]$ 를 역변환하여 $[S^c]$ 를 구하면, 직물 복합재료의 탄성계수는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 E_{xx} &= \frac{1}{S_{11}^c}, \quad E_{yy} = \frac{1}{S_{22}^c}, \quad E_{zz} = \frac{1}{S_{33}^c} \\
 G_{yz} &= \frac{1}{S_{44}^c}, \quad G_{zx} = \frac{1}{S_{55}^c}, \quad G_{xy} = \frac{1}{S_{66}^c} \\
 \nu_{xy} &= -\frac{S_{12}^c}{S_{22}^c}, \quad \nu_{zx} = -\frac{S_{31}^c}{S_{11}^c}, \quad \nu_{yz} = -\frac{S_{32}^c}{S_{22}^c}
 \end{aligned} \tag{17}$$

4. 결과 및 비교

계산을 위해 사용된 입력데이터와 모델링에 의한 예측치 및 직물 복합재료에 대한 실험데이터를 Tables 1, 2에 각각 정리하였다.

입력데이터는 섬유와 기지재료의 탄성계수 및 푸아송비(E, G, ν)를 필요로 하는데 본 모델링에 의하면 복합재료의 3차원적 탄성계수를 예측할 수 있으므로 섬유의 탄성계수도 모든 성분에 대한 값을 필요로 한다. 실제로, 섬유공급자는 이 모든 값에 대한 자료를 제공하고 있지 않으므로 본 연구에서는 일방향 적층 복합재료의 인장 및 전단시험에서 얻은 탄성계수로부터 미시역학 공식에 의해 역

Table 2 Summary of the model prediction and experimental results

Properties		Plain		8-harness satin	
		Pred.	Exp.	Pred.	Exp.
Engineering constants	E_{xx} (GPa)	69.7	72.3 (± 5.7)	25.9	23.1 (± 1.4)
	E_{yy} (GPa)	60.9	58.3 (± 2.1)	24.2	22.3 (± 0.9)
	E_{zz} (GPa)	14.7		14.3	
	G_{xy} (GPa)	5.72	4.62 (± 0.3)	4.81	
	G_{yz} (GPa)	4.65		4.88	
	G_{zx} (GPa)	4.81		4.85	
	ν_{xy}	0.052	0.058 (± 0.01)	0.175	0.138 (± 0.02)
	ν_{yz}	0.54		0.40	
	ν_{zx}	0.53		0.41	
Geometric characteristics	V_f	0.52	0.51 (± 0.03)	0.48	0.47 (± 0.05)
	θ_w	8.45	6.5 (± 2.5)	19.7	25.0 (± 3.5)
	θ_t	9.11	7.0 (± 3.0)	22.4	25.5 (± 4.5)

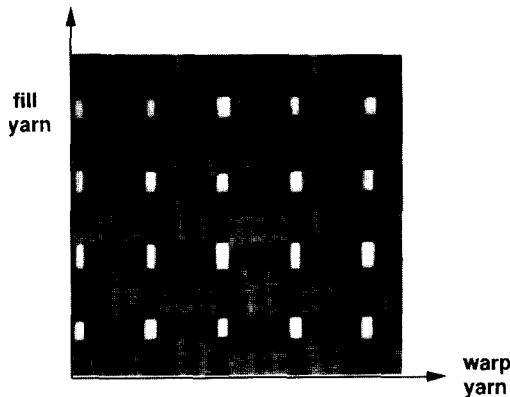


Fig. 6 Single layer of a plain woven fabric which shows the width difference between warp and fill yarns

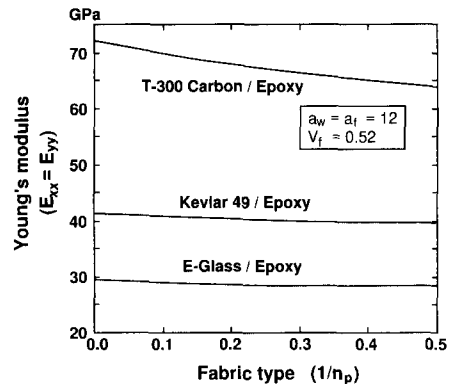


Fig. 7 Variations of Young's moduli as a function of fabric types ($n_p=2$: plain, $n_p=3$: twill, $n_p=5$: 5 harness satin, $n_p=8$: 8-harness satin)

계산함으로써 섬유에 대한 기본적인 탄성계수 값을 얻었다.

Table 2에서 보면 예측치와 실험치가 비교적 잘 일치하며, 본 모델에 의하면 복합재료의 평면뿐만 아니라 두께방향의 탄성계수도 예측할 수 있음을 알 수 있다. 특히, 두께방향의 탄성계수는 기존의 복합재료 적층이론을 바탕으로 한 이론적인 모델에서는 구하지 못하였다. 실험치에서 공란으로 남겨진 부분은 실험을 하지 않은 것으로서 복합재료의

두께방향 탄성계수를 구하는 실험은 아직 확립되어 있지 않고 계속 연구하고 있는 부분이다. 경사방향의 탄성계수가 위사방향보다 큰 이유는 직조시 작용되는 인장력으로 인하여 경사방향의 섬유길이 증가하면서 폭이 감소했기 때문인데 실제로 실험에 사용되었던 시편을 관찰한 결과 평직 복합재료의 위사섬유의 폭이 경사섬유보다 크게 나타났다. Fig. 6은 경사 및 위사섬유의 폭이 다르다는 것을 보여주기 위하여 한 층의 평직직물을 나타낸 것인데, 실

제의 평직 복합재료에서는 그림에서 보이는 직물의 비어있는 공간은 수지로 채워지게 된다. 경사섬유에 작용하는 인장력은 위사섬유의 두께를 감소시키므로 Table 2에서 보는 바와 같이 단면형상계수는 위사섬유가 경사섬유보다 크다.

직물 복합재료의 탄성계수에 대한 직물종류의 영향을 평가하기 위하여 인자연구(parametric study)를 수행하였다. 직물의 단면형상 및 섬유체적분을 일정하게 유지하고 섬유 및 직물의 종류를 변화시켜 탄성계수를 구한 결과가 Fig. 7에 도시되어 있다. 직물의 종류로서는 평직($n_p=2$), 능직($n_p=3$), 5-주자직($n_p=5$) 및 8-주자직($n_p=8$)이며, n_p 값의 역수를 그림의 x축으로 취하였다. n_p 값이 무한대인 경우는 실제의 직물이 아닌 0° 및 90° 의 섬유배열을 가진 구조이다. 직조에 의한 섬유굴곡부분으로 인하여 직물 복합재료의 탄성계수는 감소하는데, 이 굴곡부분의 반복이 더 빈번히 일어나는 평직의 경우가 8-주자직의 경우보다 낮은 최소값을 보이며 섬유굴곡부분이 없는 n_p 값이 무한대인 형태가 최대값을 보이고 있다. Fig. 7에서, 카본/에폭시 복합재료의 경우, 평직의 주자직에 대한 탄성계수의 차이가 유리섬유/에폭시의 경우보다 큰 이유는 카본섬유의 탄성계수가 유리섬유보다 훨씬 크기 때문이다. 여기서는 섬유 및 직물의 종류를 변화시킨 인자 연구에 대하여 그 결과를 보여 주었지만 섬유 단면형상의 직물 복합재료 탄성계수에 대한 영향도 구할 수 있다. 따라서, 본 모델로부터 섬유와 기지재료, 직물형상, 미세구조 등의 인자에 대한 직물 복합재료의 탄성계수를 예측하고, 그 결과를 property map으로 작성함으로써, 요구탄성계수를 만족시켜 주는 인자를 적절하게 선택할 수 있다.

5. 결 론

(1) 직물의 최소 단위구조를 바탕으로 평직 및 주자직 복합재료의 기하학적 특성(섬유굴곡각도 및 섬유체적분)과 탄성계수를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. 탄성계수 예측은 좌표변환과 강성 및 연성의 체적평균방법을 이용하였으며, 실험치와 비교한 결과, 그 둘은 비교적 잘 일치하였다.

(2) 본 모델링에 의하면 직물 복합재료의 평면뿐만 아니라 두께방향의 탄성계수도 구할 수 있으므로 복잡한 하중상태에 대한 직물 복합재료 구조

물에 대한 해석에 매우 중요한 데이터를 제공할 수 있다. 또한, 직물 복합재료 탄성계수에 대한 기지재료, 직물형상, 미세구조 등의 인자의 영향을 알아보는 연구를 통하여, 요구하는 성질을 만족시켜 주는 인자를 적절하게 선택할 수 있다.

후 기

본 연구에서 인용한 평직 복합재료의 탄성계수 실험치는 국방과학연구소의 수탁연구 과제에 의해 수행된 실험결과이며, 주자직 프리프레그를 제공한 대우중공업주식회사에 감사로 드립니다.

참고문헌

- (1) Ishikawa, T. and Chou, T-W., 1982, "Stiffness and Strength Behavior of Woven Fabric Composites," *J. of Materials Science*, Vol. 17, pp. 3211~3220.
- (2) Ishikawa, T. and Chou, T-W., 1982, "Elastic Behavior of Woven Hybrid Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 16, pp. 2~19.
- (3) Naik, N. K. and Ganesh, V. K., 1992, "Prediction of On-axis Elastic Properties of Plain Weave Fabric Composites," *Composites Science and Technology*, pp. 1~18.
- (4) Kriz, R. D., 1985, "Influence of Damage on Mechanical Properties of Woven Composites at Low Temperatures," *J. of Composites Technology and Research*, Vol. 7, pp. 55~58.
- (5) Zhang, Y. C. and Harding, J., 1990, "A Numerical Micromechanics Analysis of the Mechanical Properties of a Plain Weave Composite," *Computers and Structures*, Vol. 36, pp. 839~844.
- (6) Whitcomb, J., Woo, K. and Gundapaneni, S., 1994, "Macro Finite Element for Analysis of Textile Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 28, No. 7, pp. 607~618.
- (7) Byun, J-H., Whitney, T. J, Du, G-W and Chou, T-W., 1991, "Analytical Characterization of Two-step Braided Composites," *J. of Composite Materials*, Vol. 25, pp. 1599~1618.
- (8) Byun, J-H., 1992, "Process-Microstructure-Performance Relationships of Three-Dimen-

- sional Textile Composites," Ph. D. Dissertation, University of Delaware.
- (9) Tsai, S. W. and Hahn, H. T., 1980, *Introduction to Composite Materials*, Technomic Publishing Co., Westport, Connecticut, USA.