

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(11), 941-948(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.11.941

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 평직 복합재료의 기하학적 모델링을 통한 기계적 물성 예측

김명준\*, 박정선\*\*

## Mechanical Properties Prediction by Geometric Modeling of Plain Weave Composites

Myung-jun Kim\* and Jung-Sun Park\*\*

Graduate School, Korea Aerospace Univ.\*

Aerospace and Mechanical Engineering Department, Korea Aerospace Univ.\*\*

## ABSTRACT

Textile composite materials have been widely applied in aerospace structures due to their various advantages such as high specific stiffnesses and strengths, better out-of-plane performances, impact and delamination resistances, and net shape fabrications. In this paper, a modified geometric model of repeating unit cell (RUC) is suggested based on the Naik's model for 2D plain weave textile composites. The RUC geometry is defined by various parameters. The proposed model considers another parameter which is a gap length between adjacent yarns. The effective stiffnesses are predicted by using the yarn slicing technique and stress averaging technique based on iso-strain assumption. And the stiffnesses of RUC are evaluated by adjusting the gap ratio and verified by comparing with Naik's model and experimental data for 2D plain weave composite specimens.

## 초 록

직물 복합재료는 높은 비강성과 비강도를 가지며 일방향 복합재료에 비해 면외 방향 특성과 충격 및 층간분리에 대한 특성이 우수하여 항공우주 구조물의 주재료로 적용되고 있다. 본 논문에서는 2차원 평직 복합재료의 반복단위격자에 대한 기하학적 모델을 정의하고 유효강성을 예측하였다. 반복단위격자의 기하학적 형상은 다양한 프리폼 제작변수에 의해 결정될 수 있으며, Naik의 모델을 바탕으로 섬유다발간의 간극을 추가적으로 고려하는 수정된 기하학적 모델을 제시하였다. 평직 복합재료의 유효 강성은 반복단위격자에 대한 섬유다발 이산화 기법과 등변형을 가정 기반의 응력 평균화 기법을 사용하여 예측되었다. 또한 섬유다발간의 간극의 크기에 따른 강성의 변화를 평가하였으며, 기존 모델과 시편 시험 데이터와의 비교를 통해 강성 예측 결과를 검증하였다.

**Key Words** : Textile Composites(직물 복합재료), Plain Weave Composites(평직 복합재료), Repeating Unit Cell(반복단위격자), Effective Stiffness(유효강성), Gap(간극)

† Received : August 9, 2016

Revised : October 12, 2016

Accepted : October 13, 2016

\*\* Corresponding author, E-mail : jungsun@kau.ac.kr

## 1. 서 론

섬유강화 복합재료는 크게 일방향 복합재료 (unidirectional composite)와 직물 복합재료 (textile composite)로 구분된다. 이 중 직물 복합재료는 섬유다발(yarn)의 꼬여짐을 통해 강화된 구조를 가지며, 꼬임 또는 직조방식(weaving, braiding, stitching)에 따라 다양한 형태로 제작이 가능하다. 직물 복합재료의 제작 공정 기술이 발전함에 따라 일방향 적층 복합재료에 비해 층간분리(delamination)와 같은 구조적 파손에 덜 취약하고 중량비가 높다는 장점과 함께 구조 성능면으로 더 높은 경쟁력을 갖게 되면서 항공우주 산업 분야에 적용되는 사례가 증가하고 있다. 직물 복합재료는 중대형 항공기의 스포일러(spoiler)와 에일러론(aileron) 등의 2차 구조물과 소형 및 군용 항공기의 주익 외피 등과 같은 1차 구조물에 적용되고 있으며, 발사체의 링 프레임 구조물과 로켓 노즐부 등의 우주 구조물에도 적용되고 있다[1-3].

직물 복합재료의 활용도가 높아짐에 따라 기계적 특성 예측 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Chou와 Ishikawa[4]는 고전 적층판 이론(classical laminate theory, CLT)을 기반으로 2차원 평직 복합재료에 대한 3가지 해석적 모델을 연구하였다. 3가지 반복단위격자 모델은 mosaic model, fiber undulation model, bridging model로 구성된다. Ko[5] 등은 고전 적층판 이론 기반의 또 다른 직물 복합재 해석 모델인 fabric geometry model(FGM)을 제안하였다. Pastore와 Gowayed[6]는 수정된 FGM 기법을 제안하고, 이를 통하여 직물 복합재의 거동을 예측하는 연구를 수행하였다. Yang 등[7]은 fiber inclination model(FIM)을 통해 기울어진 단일방향 복합재층(inclined unidirectional laminae)의 집합으로 직물 복합재료의 단위격자를 정의하였다. Naik과 Ganesh[8] 그리고 Raju와 Wang[9]은 평직 복합재료의 fill과 warp 방향 섬유다발에 대한 물결 모양의 기하학적 특성을 고려하여 반복단위격자 모델을 정의하였다. 이들은 iso-strain 또는 iso-stress 가정을 기반으로 반복단위격자에 대한 체적 적분의 개념으로 유효 강성을 예측하였다. 이 방법은 섬유다발의 단면 형상과 경로를 고려하여 체적 적분을 수행하기 까다롭기 때문에 비교적 복잡한 구조를 갖는 2축 또는 3축 브레이딩 복합재료에 적용하기는 어려웠다. 이러한 복잡한 기하학적 구조를 모델링하기 위해 유한요소법을 이용한 방법이 연구되었다. 먼저 평직 복합재료

에 대한 3차원 유한요소모델을 통해 기계적 거동을 예측하는 여러 연구가 시도되었다[10]. 하지만 이러한 3차원 유한요소모델에 대한 해석을 위해서는 모델 생성을 위한 많은 시간과 노력이 요구되는 문제점이 있다. Foye[11]는 이러한 문제를 해결하기 위해서 반복단위격자 내에 sub-cell의 개념의 비균일 유한요소(inhomogeneous finite element)를 새롭게 정의하고, 평직, 주자직, 브레이딩 복합재료에 대한 기계적 특성을 예측하였다. 이를 통해 직물 복합재료의 유한요소모델링 과정에서 발생하는 비효율성을 해결하고자 하였다. 하지만 직물 복합재료의 제작 공정상에 존재하는 많은 변수들에 의한 영향을 분석하기 위해서는 각 변수들에 대한 새로운 유한요소모델을 생성해야한다는 한계점이 그대로 나타났고, 유한요소모델에 따라 계산되는 결과를 직접 추출하여 유효 강성을 구해야하기 때문에 후처리 과정에서의 비효율성은 크게 개선하지 못하였다. Naik, Masters, 그리고 Ifju[12]는 더 간단하고 효과적인 기하학적 모델링 및 해석 기법을 제안하였다. 이를 바탕으로 Naik[13]은 평직, 주자직, 브레이딩 복합재료 등 다양한 직물 복합재료에 대한 기하학적 모델을 정의하고, 이산화(discretization)된 섬유다발을 고려하여 반복단위격자에 대한 체적 평균 개념을 통해 유효 강성 및 기계적 물성을 예측하였다.

현재까지 평직 복합재료의 다양한 기하학적 모델들이 연구되어왔다. 본 논문에서는 앞서 소개된 문헌들의 연구 결과를 바탕으로 다음과 같은 관점에서 기하학적 모델을 개선하고자 하였다. 대부분의 연구는 섬유다발 거동을 나타내는데 단일 사인함수를 사용하였다. 하지만 반복단위격자 전체의 섬유체적분율이 높을 경우 다른 하나의 사인 곡선으로 섬유다발의 거동 및 형상을 정의하지 못하는 경우가 존재한다. Naik은 섬유다발 거동 및 형상을 곡선/직선구간의 조합 모델로 정의하였지만 섬유다발 간극을 고려하지 않았다. 간극을 고려한 연구는 유한요소해석 기법에 적용된 경우가 있지만 등변형을 가정(iso-strain assumption)과 섬유다발 이산화(yarn discretization) 개념을 이용하는 해석적 방법(analytical method)에는 적용된 바가 없다. 본 논문에서는 Naik의 기하학적 모델에서 섬유다발 간극을 추가적으로 고려하여 실제적인 섬유다발 형상 및 구조를 나타낼 수 있도록 수정된 평직 복합재료의 반복단위격자 모델을 제안하였다. 이때 섬유다발 간극의 경우 다른 프리폼 제작변수에 대한 비율을 통해 가정하였다. 또한 반해석적

기법을 통해 섬유다발 간극의 크기에 따른 유효 물성의 특성을 평가하고, 본 논문의 물성 예측 결과를 Naik의 모델에 의한 예측 결과 및 시편 시험 데이터[13]와 비교, 검증하였다.

## II. 평직 복합재료의 반복단위격자

### 2.1 반복단위격자(RUC) 정의

이차원 평직 복합재료는 weaving 방식의 직물 복합재료 중 가장 기본적인 구조로 씨실(fill)과 날실(warp)로 구분되는 두 가지의 섬유다발이 서로 직각으로 교차하는 구조를 갖는다. 이러한 평직 복합재료의 반복단위격자(RUC)는 다음 Fig. 1 과 같이 정의된다. 이때 재료의 길이방향(longitudinal direction) 섬유다발을 날실 방적사(warp yarn)라고 정의하며 그림의 백색 영역에 해당한다. 또한 가로방향(transverse direction) 섬유다발의 경우 씨실 방적사(fill yarn)라고 정의하며 그림의 흑색 영역에 해당한다. 이러한 섬유다발간의 규칙적인 교차 구조에 대한 기계적 거동을 예측하기 위해서 그림에 표시된 영역과 같이 평직 복합재료에 대한 반복단위격자(repeating unit cell, RUC)를 정의한다.

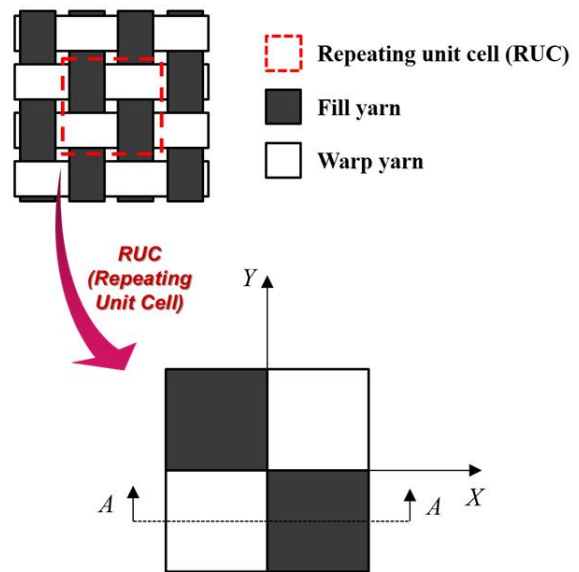


Fig. 1. Determination of RUC for the plain weave composite

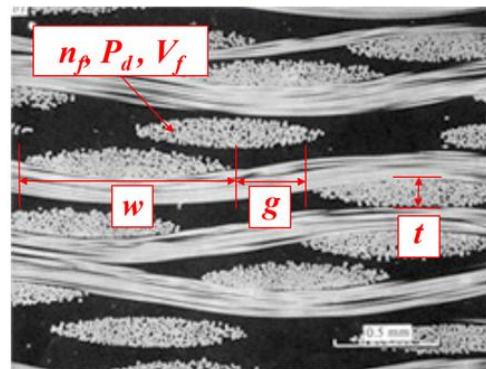
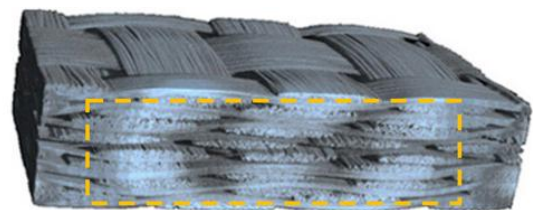


Fig. 2. Microscopic cross-section of a 2D plain weave composite

### 2.2 반복단위격자의 기하학적 모델

#### 2.2.1 단면 형상을 고려한 제작 변수 정의

Naik[13] 등은 평직 복합재료의 반복단위격자 구조에 대한 기하학적 모델링을 통하여 제작 변수에 따른 기하학적 파라미터를 정의하였다. 이때 반복단위격자 구조는 섬유다발 및 수지(resin)로 구성되며, 단위격자 내부는 섬유다발 사이의 간극(gap)이 전혀 없는 이상적인 구조로 존재한다고 가정되었다. 하지만 실제 제작되는 평직 복합재료는 성형시 교차되는 섬유다발이 완벽하게 붙는 구조를 갖지 않고, Fig. 2와 같이 인접한 섬유다발 사이에 임의의 수평 간극이 존재하는 것을 알 수 있다[14].

본 논문에서는 섬유다발 사이에 존재하는 수평 간극을 포함한 제작공정 상의 변수를 고려하여 평직 복합재료의 기하학적 모델을 정의하였다. 이를 통하여 2차원 평직 복합재료에 대한 기계적 물성을 예측하였다. 평직 복합재료에 대한 제작 변수는 섬유 체적 분율(fiber volume fraction,  $V_f$ ), 섬유다발의 섬유 체적 밀도(fiber packing density,  $p_d$ ), 섬유 필라멘트 직경(fiber filament diameter,  $d_f$ ), 섬유 필라멘트 변수(fiber

filament count,  $n_f$ ), 섬유다발의 간격(yarn spacing,  $a$ ), 섬유다발의 두께(yarn thickness,  $t$ ), 그리고 섬유다발 사이의 간극(gap between adjacent yarns,  $g$ )이 있다.

#### 2.2.2 반복단위격자의 기하학적 모델 정의

본 논문에서는 2차원 평직 복합재료의 반복단위격자인 Fig. 1의 단면 'A-A'에 대한 기하학적 모델을 Fig. 3과 같이 정의하였다. 이때 섬유다발

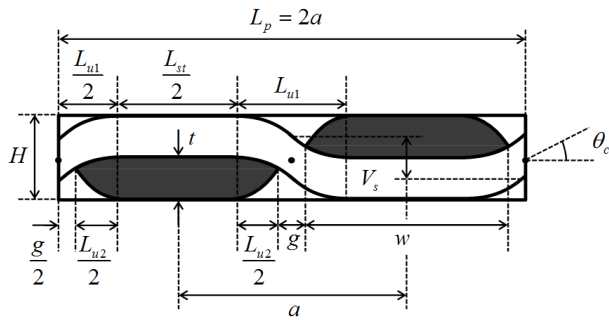


Fig. 3. Cross-section geometry of RUC for 2D plain weave composites

은 서로 교차되는 곡선 구간과 나머지 직선 구간으로 이루어지는 경로를 가지며, 섬유다발의 단면은 경로에 따라 기하학적 형상이 정의된다. 또한 그림의 직선 및 곡선 구간의 길이는 앞서 정의되는 평직 복합재료의 제작 변수에 따라 결정되며, 섬유다발 간극의 길이는 초기 섬유다발 간격에 대한 비율( $g/a_0$ )로 표시된다. 여기서  $a_0$ 는 간극이 없는 상태( $g=0$ )에서의 섬유다발 간격을 의미한다.

이에 따라 섬유다발 간격( $a$ )는 초기 섬유다발 간격( $a_0$ )에서 간극( $g$ )의 크기에 따라 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$J(X) \tag{1}$$

섬유다발 간극( $g$ )이 존재함에 따라 섬유다발의 곡선구간은 두 가지로 구분된다. 하나는 단위격자 단면에서의 섬유다발 경로에 대한 곡선구간이며, 다른 하나는 섬유다발 단면에 대한 곡선구간이다. 각각의 곡선구간 길이는  $L_{u1}$ ,  $L_{u2}$ 로 정의되며, 이는 간극의 크기와 다른 제작 변수에 따라 결정된다. 이때 서로 교차하는 섬유다발의 두께( $t$ )는 서로 동일하다고 가정하였다.

섬유다발 두께( $t$ )와 반복단위격자의 높이( $H$ )는 식 (2)의 관계를 가지며, 제작 변수인 섬유 체적분율( $V_f$ )과 섬유다발의 단면적( $A$ )은 섬유다발의 섬유 체적 밀도( $p_d$ ), 섬유 필라멘트 직경( $d_f$ ) 및 개수( $n_f$ ), 그리고 섬유다발 간격( $a$ )의 함수이며, 각각 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{H}{2} \tag{2}$$

$$V_f = \frac{2p_d A}{Ha} \tag{3}$$

$$A = \frac{\pi d_f^2 n_f}{4p_d} \tag{4}$$

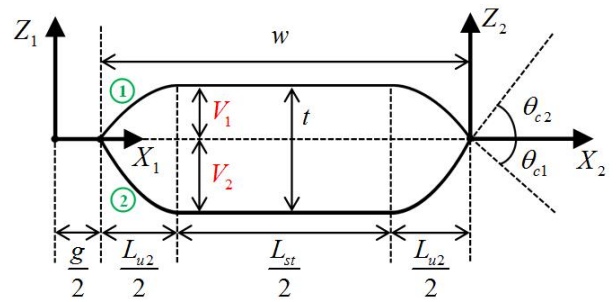


Fig. 4. Cross-section geometry of yarn

간극이 고려된 평직 복합재료에 대한 섬유다발 단면의 기하학적 형상은 Fig. 4와 같이 정의된다.

단면 상단부와 하단부의 곡선구간 경로는 좌표 ( $X_1-Z_1$ )과 ( $X_2-Z_2$ )에 의해 각각 식 (5), (6)과 같이 정의하였다. 이때 상단부의 곡선구간의 경우 섬유다발 경로에 존재하는 곡선구간의 범위에 따라서 수직방향 위치 함수가 정의되며, 하단부의 곡선구간의 경우 해당 구간의 높이( $V_2$ )와 길이( $L_{u2}$ )에 따라 정의된다.

$$Z_1 = \begin{cases} \frac{V_s}{2} \sin\left(\frac{\pi X_1}{L_{u1}}\right) - \frac{V_s}{2} \sin\left(\frac{\pi g}{2L_{u1}}\right) & ; \frac{g}{2} \leq X_1 \leq \frac{L_{u1}}{2} \\ -\frac{V_s}{2} \sin\left(\frac{\pi X_1}{L_{u1}}\right) + \frac{V_s}{2} \sin\left(\frac{\pi g}{2L_{u1}}\right) & ; -\frac{L_{u1}}{2} \leq X_1 \leq -\frac{g}{2} \end{cases} \tag{5}$$

$$Z_2 = \pm V_2 \sin\left(\frac{\pi X_2}{L_{u2}}\right) \tag{6}$$

여기서,  $Z_1$ 은 섬유다발 단면 상단부 곡선구간에 대한 수직방향 위치,  $Z_2$ 는 하단부 곡선구간에 대한 수직방향 위치를 의미한다.  $V_s$ 는 섬유다발 중립축간의 수직 거리를 의미하며 이는 섬유다발의 두께  $t$ 와 동일하다. 또한  $V_2$ 는 섬유다발 단면의 하단부 곡선구간에 대한 높이를 의미하며 전체 두께에서  $V_1$ 을 뺀 값으로 정의한다. 이때  $V_1$ 과  $V_2$ 를  $V_s$ 와 곡선구간 길이, 그리고 수평 간극에 대한 함수로 나타내면 식 (7), (8)과 같다.

$$V_1 = \frac{V_s}{2} \left(1 - \sin \frac{\pi g}{2L_{u1}}\right) \tag{7}$$

$$V_2 = V_s - V_1 = \frac{V_s}{2} \left(1 + \sin \frac{\pi g}{2L_{u1}}\right) \tag{8}$$

정의된 섬유다발의 기하학적 변수를 이용하여 단면적을 다시 정의하면 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned}
 A = & V_s(w - L_{u2}) + 2 \int_{\frac{g}{2}}^{\frac{L_{u1}}{2}} \frac{V_s}{2} \sin\left(\frac{\pi X_1}{L_{u1}}\right) dX_1 \\
 & + 2 \int_0^{\frac{L_{u2}}{2}} \frac{V_s}{2} \sin\left(\frac{\pi X_2}{L_{u2}}\right) dX_2 \\
 & - L_{u2} \left( \frac{V_s}{2} - V_1 \right)
 \end{aligned} \tag{9}$$

여기서  $V_s$ ,  $w$ ,  $g$ 는 제작변수로 결정되는 상수이며,  $V_1$ 은 식 (7)에 의해 제작 변수와  $L_{u1}$ 에 대한 함수로 변환할 수 있다. 두 곡선구간의 길이는 기하학적으로 식 (10)과 같은 관계를 갖기 때문에 하나의 변수로 정리할 수 있으며, 식 (9)를 적분한 뒤 섬유다발 경로에 대한 곡선길이,  $L_{u1}$ 에 대한 함수로 정리하면 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{u2} = L_{u1} - g \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 A = & V_s \left( a - \frac{g}{\pi} \right) + V_s \left( \frac{1 - \pi}{\pi} \right) L_{u1} \\
 & + V_s \left( \frac{1}{\pi} - \frac{1}{2} \right) (L_{u1} - g) \sin\left(\frac{\pi g}{2L_{u1}}\right) \\
 & + \frac{V_s L_{u1}}{\pi} \cos\left(\frac{\pi g}{2L_{u1}}\right)
 \end{aligned} \tag{11}$$

이때 식 (4)를 통해 예측된 단면적 값을 이용하면 주어진 제작변수에 따라 섬유다발 및 반복단위격자의 기하학적 변수들을 예측할 수 있다.

### III. 평직 복합재료의 유효강성 예측

#### 3.1 반복단위격자의 섬유다발 이산화

직물 복합재료의 기계적 물성은 시편 실험을 통해 측정될 수 있지만, 반복단위격자(RUC)에 대한 유효 강성(effective stiffness)을 해석적 또는 수치적 방법으로 예측할 수 있다. 본 논문에서는 반복단위격자의 섬유다발을 이산화하여 응력 평균화 기법(stress averaging technique)을 통해 유효 강성을 예측하였다[3]. 이때 이산화된 섬유다발 조각과 반복단위격자의 변형률이 서로 동일하다는 등변형률(iso-strain) 가정을 적용하였다.

섬유다발 조각은 총  $n_{slice}$ 개의 조각으로 이산화하였으며, 곡선구간에 위치에 따라 Fig. 5와 같이 섬유다발 조각의 국부좌표계가 정의된다. 이때 적절한 섬유다발 조각의 개수를 결정하기 위

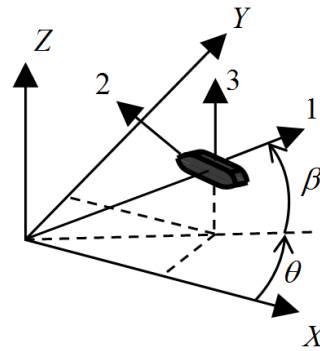


Fig. 5. Coordinate system of yarn slice

해 충분히 증가시키면서 물성이 수렴했을 때의 개수를 찾는다. 본 논문의 문제에서는  $n \geq 12$ 일 때에 섬유다발 조각의 개수에 따른 복합재료의 기계적 물성의 변동이 거의 없었다. 직선구간 섬유다발의 경우 전체 길이에 따라 국부좌표계의 변화가 없으므로 하나의 조각으로 정의하였다.

섬유다발 조각에 대한 방향각도(orientation angle)는 전체좌표계의 X축에 대한 면내방향 각도(in-plane angle),  $\theta$ 와 X-Y 평면에 대한 면외방향 각도(out-of-plane angle),  $\beta$ 로 정의된다. 먼저  $\theta$ 는 평직 복합재료의 경우  $0^\circ$ (warp yarns)와  $90^\circ$ (fill yarns)으로 정의되며,  $\beta$ 의 경우 각 섬유다발 조각에 대해 해당 위치 X에서 곡선구간의 수직방향 위치 함수를 미분한 기울기를 통해 정의된다. 직선구간의 경우는 면외방향 각도가 모두 0으로 정의된다. 섬유다발 영역 사이에 채워지는 수지(interstitial resin)는 등방성 재료이기 때문에 국부좌표계의 방향이 의미가 없으므로 방향각도의 경우  $\theta = \beta = 0$ 의 값으로 정의한다.

#### 3.2 반복단위격자의 유효강성

평직 복합재료의 유효강성을 예측하기 위하여 섬유다발 조각은 단일방향 복합재료 프리프레그(prepreg)와 같이 가로 등방성(transversely isotropic) 재료의 특성을 갖는다고 가정하며, 재료의 길이방향 좌표축은 전체좌표계에 대해 방향각도  $\theta$ 와  $\beta$ 에 의해 정의된다. 또한 반복단위격자가 등변형률 상태라는 가정을 기반으로 체적에 대한 응력 평균화 기법을 이용하여 유효 강성을 계산한다.

반복단위격자의 3차원 응력-변형률 관계는 유효강성 행렬( $[C_{eff}]$ )을 이용하여 식 (12)와 같이 정의된다.

$$\{\bar{\sigma}\} = [C_{eff}] \{\bar{\epsilon}\} \tag{12}$$

이때 반복단위격자의 평균 응력은 내부 요소

의 체적 평균을 통해 식 (13)과 같이 정의된다.

$$\{\bar{\sigma}\} = \sum_{m=1}^N V_m \{\sigma\}_m \quad (13)$$

여기서  $V_m$ 은  $m$ 번째 섬유다발 조각의 단위격자에 대한 체적 분율을 의미하며,  $N$ 은 단위격자 내에 존재하는 섬유다발과 수지 조각의 총 개수를 의미한다.

전체좌표계(XYZ)에 대한 섬유다발 조각의 응력은 Fig. 5의 국부좌표계(123)에 대한 응력과 좌표변환행렬( $[T]_m$ )을 통해 식 (14)와 같이 나타낼 수 있으며, 국부좌표계에 대한 응력은 다시 식 (15)와 같이 정의된다. 국부좌표계에 대한 섬유다발 조각의 변형을 또한 식 (16)과 같은 관계를 가지며, 이때 전체좌표계에 대한 변형률은 등변형률 가정에 따라 식 (17)과 같이 정의된다.

$$\{\sigma\}_m = [T]_m^T \{\sigma'\}_m \quad (14)$$

$$\{\sigma'\}_m = [C']_m \{\varepsilon'\}_m \quad (15)$$

$$\{\varepsilon'\}_m = [T]_m \{\varepsilon\}_m \quad (16)$$

$$\{\varepsilon\}_m = \{\bar{\varepsilon}\} \quad (17)$$

식 (12)~(17)을 이용하여 유효 강성행렬  $[C_{eff}]$ 를 식 (18)과 같이 섬유다발 조각의 강성행렬과 변환 행렬, 그리고 각 조각들의 체적 분율의 함수로 나타낼 수 있다.

$$[C_{eff}] = \sum_{m=1}^N (V_m [T]_m^T [C']_m [T]_m) \quad (18)$$

### 3.3 유효강성 예측 및 검증

본 논문에서는 Naik의 모델을 기반으로 섬유다발 간극을 추가적으로 고려하여 수정된 2차원 평직 복합재료의 기하학적 모델을 통하여 유효강성을 예측하고, 이를 시편 시험 데이터와 비교, 검증하였다. 또한 섬유다발 간극의 크기에 따른 기계적 물성의 특성을 평가하였다.

논문에서 사용된 섬유다발 및 수지의 기계적 물성과 평직 복합재료의 제작 변수는 각각 Table 1, 2와 같다.

인접한 섬유다발간의 간극(gap)의 길이는 실제로 임의의 값으로 존재하기 때문에 초기 섬유다발 간격에 대한 수평 간극의 비(gap ratio,  $g/a_0$ )를 0~0.1 범위의 값으로 가정하여 사용하였다. 여기서 0인 경우는 섬유다발 사이의 간극이 전혀 없이 완벽하게 배치되는 구조를 의미한다.

섬유다발 간극의 비에 따라 변화하는 기하학적 변수 특성은 Fig. 6과 같다. 섬유다발 간극의 크기가 증가함에 따라 모든 기하학적 변수가 선형에 가깝게 변화하는 것을 알 수 있다.

또한 섬유다발 간극의 비에 따라 변화하는 평직 복합재료의 방향별 기계적 물성은 Fig. 7~9와 같다. 이때 각 물성의 변화를 비교 평가하기 위하여 최대값에 대해 정규화(normalizing)하여 나타내었다.

Table 1. Mechanical properties of yarn and resin

Material	$E_{11}$ [GPa]	$E_{22}$ [GPa]	$G_{12}$ [GPa]	$\nu_{12}$	$\nu_{23}$
Yarn	144.80	11.73	5.52	0.23	0.30
Resin	3.45	3.45	1.28	0.35	0.35

Table 2. Manufacturing parameters

Yarn packing density, $p_d$	Overall fiber volume fraction, $V_f$	Yarn spacing, $a$ [mm]	Yarn filament diameter, $d_f$ [mm]	Yarn filament count, $n$ [k]
0.75	0.64	1.411	0.007	3

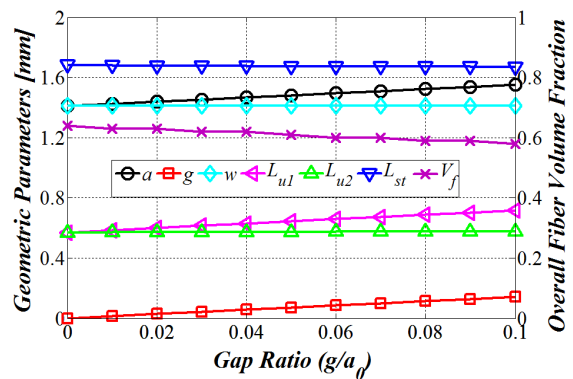


Fig. 6. Geometric parameters for gap ratio

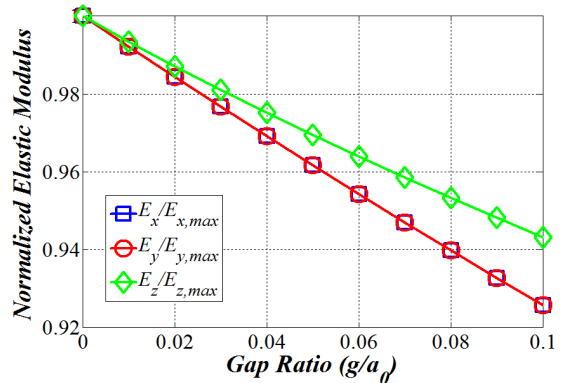


Fig. 7. Normalized elastic moduli for gap ratio

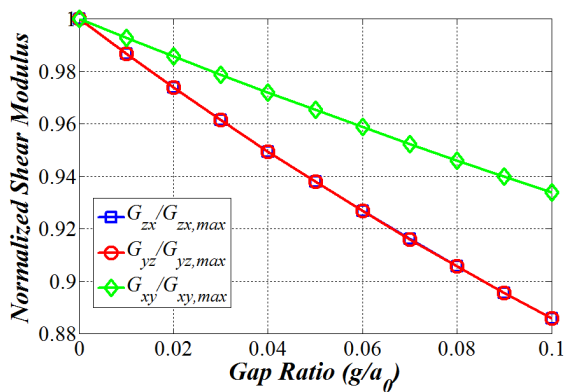


Fig. 8. Normalized shear moduli for gap ratio

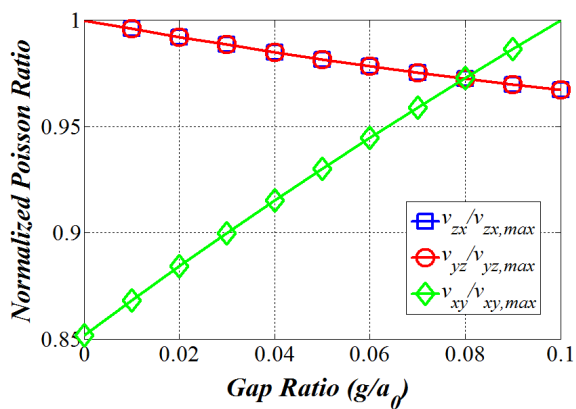


Fig. 9. Normalized Poisson's ratios for gap ratio

평직 복합재료는 전체좌표계에 대해 섬유다발이 직교하기 때문에 X축과 Y축에 대한 재료 특성이 동일하게 나타난다. 인장 탄성계수의 경우  $E_x$ 와  $E_y$ 는 같은 특성을 보이며 섬유다발 간극 증가에 따라 RUC의 섬유체적분율이 선형에 가깝게 감소(Fig. 6)하기 때문에 탄성계수 역시 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 다만 면내(in-plane)방향 탄성계수가 면외(out-of-plane)방향 탄성계수보다 더 큰 감소율을 갖는 것을 확인하였다. 면내방향 탄성계수인  $E_x$ ,  $E_y$ 의 경우 섬유다발 간극비가 10%까지 증가함에 따라 약 8% 감소하였으며, 면외방향 탄성계수인  $E_z$ 의 경우 약 6% 감소하는 것을 확인하였다. 전단 탄성계수의 경우 인장 탄성계수와 동일하게 섬유다발 간극이 커짐에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 이때 면내방향 전단 탄성계수인  $G_{xy}$ 의 경우 면외방향 전단 탄성계수인  $G_{yz}$ ,  $G_{zx}$ 의 경우보다 더 작은 감소율을 갖는 것을 확인하였다. 면내방향 전단 탄성계수는 섬유다발 간극비가 10%까지 증가함에 따라 약 12% 감소하였으며, 면외방향 전단 탄성계수는 약 7% 감소하였다.

Table 3. Effective stiffness results ( $g/a = 0.05$ )

Approach	$E_{xx} = E_{yy}$ [GPa]	$E_{zz}$ [GPa]	$G_{yz} = G_{zx}$ [GPa]	$G_{xy}$ [GPa]	$\nu_{yz} = \nu_{zx}$	$\nu_{xy}$
Test data[13]	61.92	-	-	-	-	-
Naik's model	64.38	11.49	5.64	4.87	0.396	0.027
Error (%)	3.97	-	-	-	-	-
Modified model	61.90	11.14	5.29	4.71	0.39	0.03
Error (%)	0.03	-	-	-	-	-

포아송 비의 경우 탄성계수와는 조금 상이한 결과를 보여주었다. 섬유다발 간극비가 10%까지 증가함에 따라 면내방향 포아송 비인  $\nu_{xy}$ 의 경우 약 15% 증가하였고, 면외방향 포아송 비인  $\nu_{yz}$ ,  $\nu_{zx}$ 의 경우 약 4% 감소하는 것을 확인하였다.

평직 복합재료의 유효강성 예측 결과를 Naik의 모델을 통한 예측 결과 및 시편 시험 데이터와 비교한 결과는 Table 3과 같다. 이때 간극( $g$ )의 길이는 초기 섬유다발 간격( $a_0$ )의 5%로 가정하였다. 이를 통해 Naik의 모델에 비하여 길이방향 탄성계수( $E_{11}$ )의 시험 결과에 대한 오차를 3.97%에서 0.03%로 개선할 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 2차원 평직 복합재료의 반복단위격자에 대한 수정된 기하학적 모델을 통하여 유효강성을 예측하는 연구를 수행하였다. 제안된 기하학적 모델은 다양한 제조변수에 따라 정의되며 Naik의 모델을 기반으로 하였다. 고려된 제조변수는 반복단위격자의 섬유 체적 분율, 섬유다발의 섬유 체적 분율, 섬유다발 간격, 그리고 섬유 필라멘트 직경 및 개수가 있으며, 추가적으로 인접한 섬유다발 사이의 간극을 고려하였다. 반복단위격자 내에 임의의 값으로 존재하는 섬유다발 간극의 길이는 섬유다발 간격의 0에서 10% 값으로 가정하였으며, 간극비의 변화에 따른 기하학적 변수 및 기계적 물성의 특성을 분석하였다. 또한 섬유다발 간극비가 5%인 경우에 대하여 평직 복합재료의 유효 물성을 예측하고, Naik의 모델을 이용한 결과 및 시편 시험 데이터와 비교하였다. 본 논문에서 제안된 모델을 통해 예측된 유효 물성 결과는 기존 모델을 이용한 결과

보다 시편 시험 데이터를 기준으로 개선된 예측 정확도를 보였다.

해석적 방법의 경우 일반적으로 직물 복합재료의 길이방향 탄성계수에 대한 정확도는 높은 편이지만 그 외 물성의 경우 수치적 방법에 비해 예측 정확도가 낮다고 알려져 있다. 하지만 다수의 물성예측 및 설계가 필요한 상황에서 수치적 방법은 비용과 시간 측면에서 단점을 갖고 있으며, 길이방향 물성이 주요한 설계 요소인 경우 본 논문에서의 연구 방법을 적용한다면 보다 효율적으로 물성을 예측할 수 있을 것이다. 또한 기존의 제작변수 외에 섬유다발 간극을 추가적으로 고려하여 물성을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 한국과학기술원 초고속비행체특화센터에서 수행되었습니다.

## References

- 1) Niu, M. C., *Composite Airframe Structures*, Conmilit Press Ltd., Hong Kong, 1992.
- 2) Niranjana K. Naik, *Woven fabric composites*, Technomic Publishing Co., Inc., 1994.
- 3) Brian N. Cox, *Handbook of Analytical Methods for Textile Composites*, NASA Contractor Report 4750, Contract NAS1-19243, 1997.
- 4) Chou, T-W., Ishikawa, T., "Analysis and Modeling of Two-Dimensional Fabric Composites," *Composite Materials Series 3, Textile Structural Composites*, 1989, pp. 210-264, Elsevier Science Publishers B. V.
- 5) Ko, F. K., Pastore, C. M., Lei, C. and Whyte, D. W., "A Fabric Geometry Model for 3-D Braid Reinforced FP/Al-Li Composites," *International SAMPE Metals Conference: Competitive Advances in Metals/Metal Processing*, Cherry Hill, NJ, August 1987.
- 6) Pastore, C. M. and Gowayed, Y. A.: "A Self-Consistent Fabric Geometry Model: Modification and Application of a Fabric Geometry Model to Predict the Elastic Properties of Textile Composites," *Journal of Composites Technology and Research*, JCTRER, Vol. 16, No. 1, Jan. 1994, pp. 32-36.
- 7) Yang, J-M., Ma, C-L. and Chou, T-W., "Fiber Inclination Model of Three-Dimensional Textile Structural Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, September 1986, pp. 472-484.
- 8) Naik, N. K. and Ganesh, V. K., "Prediction of On-Axes Elastic Properties of Plain Weave Fabric Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 45, 1992, pp. 135-152.
- 9) Raju, I. S. and Wang, J. T., *Classical Laminate Theory Models for Woven Fabric Composites*, NASA Technical Memorandum 109087, February 1994, National Aeronautics and Space Administration, Hampton, Virginia.
- 10) Woo, K. S., Suh, Y. W., "Prediction of Effective Properties of Laminated Plain Weave Textile Composites," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 30, No. 10, 2003, pp. 10-20.
- 11) Foye, R. L., *Finite Element Analysis of the Stiffness of Fabric Reinforced Composites*, NASA Contractor Report 189597, Feb. 1992, National Aeronautics and Space Administration, Hampton, Virginia.
- 12) Naik, R. A., Ifju, P. G. and Masters, J. E., "Effect of Fiber Architecture Parameters on Deformation Fields and Elastic Moduli of 2-D Braided Composites," *Journal of Composite Materials*, 1994, Vol.28, pp.656-681.
- 13) Rajiv A. Naik, *Analysis of Woven and Braided Fabric Reinforced Composites*, NASA Contractor Report 194930, Contract NAS1-19399, 1994.
- 14) Home Made Composite, [http://www.composites.ugent.be/home\\_made\\_composites/what\\_are\\_composites.html](http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/what_are_composites.html)