

## 열전도도 향상을 위한 직물섬유 복합재의 최적구조 설계

김명수\*<sup>†</sup> · 성대한\*\* · 박영빈\*\*<sup>†</sup> · 박기원\*\*\*

# Structural Optimization for Improvement of Thermal Conductivity of Woven Fabric Composites

Myungsoo Kim\*<sup>†</sup>, Dae Han Sung\*\*, Young-Bin Park\*\*<sup>†</sup>, Kiwon Park\*\*\*

**ABSTRACT:** This research presents studies on an improved method to predict the thermal conductivity of woven fabric composites, the effects of geometric structures of woven fabric composites on thermal conductivity, and structural optimization to improve the thermal conductivity using a genetic algorithm. The geometric structures of woven fabric composites were constructed numerically using the information generated on waviness, thickness, and width of fill and warp tows. Thermal conductivities of the composites were obtained using a thermal-electrical analogy. In the genetic algorithm, the chromosome string consisted of thickness and width of the fill and warp tows, and the objective function was the maximum thermal conductivity of woven fabric composites. The results confirmed that an improved method to predict the thermal conductivity was built successfully, and the inter-tow gap effect on the composite's thermal conductivity was analyzed suggesting that thermal conductivity of woven fabric composites was reduced as the gap between tows increased. For structural design, optimized structures for improving the thermal conductivity were analyzed and proposed. Generally, axial thermal conductivity of the fiber tow contributed more to thermal conductivity of woven fabric composites than transverse thermal conductivity of the tows.

**초 록:** 본 연구에서는 직물섬유 복합재의 열전도도를 구하는데 있어 기존의 연구보다 개선된 방법을 제시하고, 직물섬유의 기하학적 구조가 복합재의 열전도도 향상에 미치는 영향, 그리고 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 이용하여 복합재의 열전도도 향상을 위한 최적구조 설계에 관한 연구를 하였다. 직물섬유의 구조를 토우의 물결무늬와 너비 및 두께를 이용하여 구현하였고, 열전도도는 열전기유사법(Thermal-electrical analogy)을 이용하여 구하였다. 유전 알고리즘에서 염색체 문자열은 fill과 warp tow의 두께와 너비로 하였고 복합재의 열전도도를 향상시키는 방향으로 목적함수를 정하였다. 연구결과 직물섬유 복합재의 열전도도를 예측을 위한 향상된 방법이 제시되었고, 섬유토우 사이의 간격(inter-tow gap)이 넓어 질수록 복합재의 열전도도가 감소하는 것으로 나타났다. 직물섬유 복합재의 구조 최적화에서는 이론적 수치해석 결과가 제시되었는데, 전체적으로 섬유토우(tow)의 축의 수직 방향보다는 축 방향의 열전도도 성분이 복합재의 전체 열전도도 향상에 크게 기여를 하는 것으로 나타났다.

**Key Words:** 열전도도(Thermal conductivity), 직물섬유 복합재(Woven fabric composites), 최적화(Optimization), 유전 알고리즘(Genetic algorithm)

Received 7 October 2016, accepted 27 November 2016

\*<sup>†</sup>Department of Mechanical Design Engineering, Youngsan University, Corresponding author (E-mail: mskim@ysu.ac.kr)

\*\*Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

\*\*<sup>†</sup>Department of Mechanical Engineering, UNIST, Corresponding author (E-mail: ypark@unist.ac.kr)

\*\*\*Department of Smart Automobile Engineering, Youngsan University

## 1. 서 론

최근 들어 섬유강화 복합재의 높은 비강성과 우수한 기계적 물성으로 인해 항공우주 산업과 자동차 산업 등 다양한 분야에서 그 활용도가 높아지고 있다. 기계적 물성과 더불어 열적물성 또한 복합재의 활용에 있어 중요한 물성으로 여겨지고 있고, 이로 인해 실험적 연구 못지않게 열적물성 예측에 관한 수치 모델과 해석과 관련된 연구 또한 다양하게 진행되고 있다[1-6].

Dasgupta와 그의 동료들[2,3]은 균질화 방법(homogenization technique)을 이용해 직물섬유 복합재의 열전도도 예측에 관한 모델을 제시한 바 있다. 그들은 열 저항의 거동이 전기 저항의 거동과 유사한 점을 이용해 열전도도를 구하는 방법(열전기유사법)을 바탕으로 하였다. Ning과 Chou[3,4]는 열전기유사법을 이용하여 직물섬유 복합재의 열전도도에 관한 연구를 진행하여, 열전도도 예측 모델을 제시한 바가 있다. Seo와 그의 동료들[5] 또한 열전기유사법을 이용하여 eight-harness satin 직물섬유 복합재의 열전도도 예측에 관한 연구를 진행하였다.

섬유강화 복합재료는 섬유의 방향에 따라 복합재의 물성이 달라지는 이방성으로 인해 물성향상을 위한 최적구조 설계에 관한 연구도 진행되어왔다. 최적구조를 탐색하는 방법으로 유전 알고리즘이 자주 사용되는데, 유전 알고리즘은 자연세계의 진화 현상에 기초한 계산 모델로서 John Holland에 의해 1975년에 개발된 전역적인 최적화 알고리즘이다[7]. 유전 알고리즘은 복합재료의 최적화에도 다양하게 응용되며 사용되었는데, 복합재의 기계적 물성향상을 위한 최적적층구조를 탐색하는 연구에 유전 알고리즘이 사용된 예가 있다[8,9]. 또한 마이크로 유전 알고리즘을 사용하여 필라멘트 와인딩 복합재 원통의 최적설계를 수행하는 연구도 있었다[10].

최근까지 직물섬유 복합재의 열전도도 예측을 위한 수치모델에 관한 연구가 있었으나, 모델이 다소 복잡하거나 혹은 실제 직물섬유구조와 상이한 경우가 많았다. 본 연구에서는 직물섬유 복합재의 열전도도를 예측을 위해 개념적으로 간단하고 실제 직물섬유 복합재와 유사한 형상을 이용한, 보다 개선된 열전도도 예측 방법을 제시하고자 한다. 그리고 직물섬유의 형상이 복합재의 열전도도에 미치는 영향을 연구하고, 복합재의 열전도도 향상을 위해 유전 알고리즘을 이용하여 직물섬유의 형상을 최적 설계하는 연구를 수행하였다.

## 2. 이론적 배경

본 연구는 직물섬유 복합재의 열전도도 예측을 위한 모델링과 최적구조 설계로 이루어져 있다. 이를 위해 세 가지의 이론적 배경이 이용되었는데, (1) 직물섬유의 기하학적

구조 모델링, (2) 열전도도 예측, (3) 구조 최적화이다. 먼저 직물섬유의 기하학적 구조 모델링은 Scida와 그의 동료들이 제시한 모델[11,12]을 사용하였다. 그리고 열전도도 예측에서는 열전기유사법(Thermal-electrical analogy)을 사용하였고, 최적화를 위한 기법으로 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 사용하였다. 본 연구의 모든 수치해석은 Matlab(The MathWorks Inc.)을 이용하여 수행되었다.

### 2.1 직물섬유구조

직물섬유는 가장 작은 크기의 단위구조(unit cell)의 연속적인 반복으로 이루어져 있다. 그러므로 단위구조의 물성이 직물섬유 전체의 물성을 대표한다고 가정할 수 있다. 직물섬유의 기본적인 구조는 평직(plain woven fabric)이고 본 연구에서 평직을 기준으로 연구를 진행하였다. 평직은 fill tow(토우)와 warp tow(토우)로 이루어져 있으며, 구조는 Fig. 1과 같다.

직물섬유 복합재의 열전도도를 예측하기 위해 먼저 직물섬유의 구조를 수식적으로 규명을 하여야 한다. Fill과 warp 토우는 평면에서의 방향( $0^\circ$ 와  $90^\circ$ )과 off-axis 각도( $\theta_f$ 와  $\theta_w$ )로 구성이 되는데, off-axis 각도는 토우의 단면에서 중간부분을  $x_1$ 과  $x_2$  방향(또는  $x$ 와  $y$  방향)으로 연결한  $H_f$ 와  $H_w$ (토우의 물결구조를 형성하는 중립면)가 수평면과 이루는 각

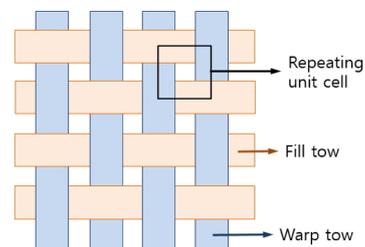


Fig. 1. Structure of plain woven fabric

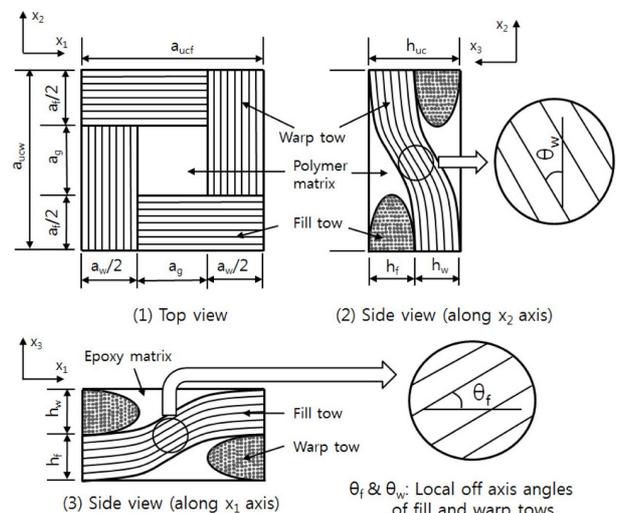


Fig. 2. Plain woven fabric and off-axis angle  $\theta_f$ ,  $\theta_w$  [13]

을 의미하고(Fig. 2 참조) 다음 식으로 나타낼 수 있다[11].

$$\theta_f(x_1) = \arctan \frac{dH_f(x_1)}{dx_1} \quad (1)$$

$$\theta_w(x_2) = \arctan \frac{dH_w(x_2)}{dx_2} \quad (2)$$

평직의 fill과 warp 토우는 식 (3)-(10)을 이용하여 구현하였고, Fig. 2에 관련형상이 보여진다[13]. 식 (3)은 fill 토우의 중립면  $H_f$ 를 나타낸다.

$$H_f(x_1) = \pm \frac{h_f}{2} \cos\left(\frac{\pi x_1}{a_{ucf}}\right) \quad 0 \leq x_1 \leq a_{ucf} \quad (3)$$

여기서  $h_f$ 와  $a_{ucf}$ 는 각각 fill 토우의 최대 두께와 단위구조(unit cell)의 fill 방향( $x_1$  방향) 너비를 나타낸다. 토우의 두께  $e_f$ 는 식 (4)-(6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$e_f(x_2) = \frac{h_f}{2} \cos\left(\frac{\pi x_2}{a_f}\right) \quad 0 \leq x_2 \leq \frac{a_f}{2} \quad (4)$$

$$e_f(x_2) = 0 \quad \frac{a_f}{2} < x_2 < \frac{a_f}{2} + a_g \quad (5)$$

$$e_f(x_2) = \frac{h_f}{2} \cos\left\{\frac{\pi(x_2 - a_g)}{a_f}\right\} \quad \left(\frac{a_f}{2} + a_g\right) \leq x_2 \leq a_{ucw} \quad (6)$$

여기서  $a_f$ 와  $a_g$ 는 각각 fill 토우의 너비와 토우간의 간격(intertow gap)을 나타내고,  $a_{ucw}$ 는 unit cell의 warp 방향( $x_2$  방향) 너비를 의미한다. 같은 방법으로 warp 토우의 중립면  $H_w$ 와 두께  $e_w$ 는 식 (7)과 (8)-(10)을 이용하여 구할 수 있다.

$$H_w(x_2) = \pm \frac{h_w}{2} \cos\left(\frac{\pi x_2}{a_{ucw}}\right) \quad 0 \leq x_2 \leq a_{ucw} \quad (7)$$

$$e_w(x_1) = \frac{h_w}{2} \cos\left(\frac{\pi x_1}{a_w}\right) \quad 0 \leq x_1 \leq \frac{a_w}{2} \quad (8)$$

$$e_w(x_1) = 0 \quad \frac{a_w}{2} < x_1 < \frac{a_w}{2} + a_g \quad (9)$$

$$e_w(x_1) = \frac{h_w}{2} \cos\left\{\frac{\pi(x_1 - a_g)}{a_w}\right\} \quad \left(a_g + \frac{a_w}{2}\right) \leq x_1 \leq a_{ucf} \quad (10)$$

여기서  $h_w$ 와  $a_w$ 는 각각 warp 토우의 최대 두께와 너비를 나타낸다.  $a_{ucf}$ 는 unit cell의 fill 방향( $x_1$  방향) 너비를 의미한다.

직물섬유의 물결구조와 함께 고려되어야 할 물성이 있는데, fill과 warp 토우내의 섬유부피비(fiber volume fraction)이다. 토우는 단방향 복합재로 간주할 수 있고 토우 내에는 단방향 섬유와 기지(matrix)가 존재한다. 토우내의 섬유부피비는 다음의 공식으로 구할 수 있다[11].

$$v_f = v_{ff} \frac{V_{ff}}{V} + v_{fw} \frac{V_{wf}}{V} \quad (11)$$

여기서  $v_f$ ,  $v_{ff}$ 와  $v_{fw}$ 는 각각 복합재의 섬유부피비, fill과 warp 토우의 섬유부피비를 나타낸다.  $V$ ,  $V_{ff}$ 와  $V_{wf}$ 는 복합재 전체 부피, 복합재 내의 fill 토우의 부피 그리고 warp 토우의 부피를 각각 나타낸다. 만약 fill과 warp 토우의 섬유부피비를 같다고 가정하면 식 (11)은 식 (12)와 같이 간략하게 나타낼 수 있다.

$$v_f = v_{ffw} \left( \frac{V_{ff}}{V} + \frac{V_{wf}}{V} \right) \quad (12)$$

여기서  $v_{ffw}$ 는 토우내의 섬유부피비를 의미한다. 본 연구에서는 fill과 warp 토우 내의 섬유부피비는 같다고 가정하였다.

## 2.2 열전도도 모델링

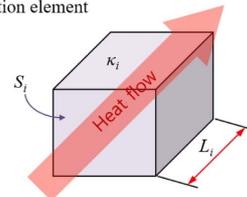
### 2.2.1 열전기유사법(Thermal-electrical analogy)

복합재의 열전도도 예측 모델링에서 많이 사용되는 방법 중 하나가 열전기유사법(Thermal-electrical analogy)이다 [2-6]. 열전기유사법은 열적 퍼텐셜(온도)와 전기적 퍼텐셜(기전력)의 유사성에 바탕을 두고 있다. 즉 열시스템에서의 열저항  $R$ 과 열유속  $q$  ( $=\Delta T/R$ )는 전기시스템에서의 저항  $r$ 과 전류  $i$  ( $=\Delta E/r$ )가 서로 대비된다. 여기서  $\Delta T$ 와  $\Delta E$ 는 각각 온도차와 전기적 퍼텐셜의 차이를 나타낸다. 이 유사성을 바탕으로 복합재의 열전도도는 옴의 법칙의 전기저항과 유사하게 열저항을 분석함으로써 다음과 같이 구할 수 있다. 재료의 특정요소( $i$  번째)의 열저항( $R_i$ )은 식 (13)을 이용하여 구할 수 있다(Fig. 3 참조)[2,4].

$$R_i = \frac{L_i}{\kappa_i S_i} \quad (13)$$

여기서  $L_i$ ,  $\kappa_i$  그리고  $S_i$ 는 각각 열이 흐르는 방향으로  $i$  요소의 길이,  $i$  요소의 열전도도, 열이 흐르는 방향과 수직인  $i$  요소의 단면을 나타낸다. 열이 흐르는 방향과 수직하지 않은 다른 면들은 단열 상태에 있는 것으로 가정한다. 그리고 열저항의 직렬(series)과 병렬(parallel)의 경우의 전체 열저항은 식 (14)와 (15)를 이용하여 구할 수 있다(Fig. 4 참조).

$i$ th conduction element



$$R_i = \frac{L_i}{\kappa_i S_i}$$

$R_i$ : thermal resistance  
 $S_i$ : cross-section area  
 $L_i$ : length  
 $\kappa_i$ : effective thermal conductivity

Fig. 3. Thermal resistance  $R_i$

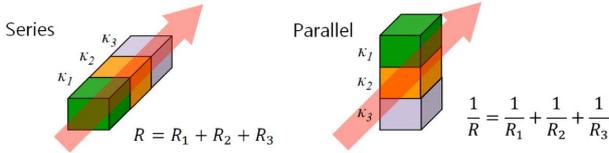


Fig. 4. Thermal resistances in series and parallel

$$\text{직렬: } R = \sum_i R_i \quad (14)$$

$$\text{병렬: } \frac{1}{R} = \sum_i \frac{1}{R_i} \quad (15)$$

### 2.2.2 토우의 섬유방향과 열전도도

섹션 2.1에서 언급하였듯이 각 토우는 단방향 섬유 복합재로 간주된다. 단방향 섬유 복합재의 축방향 열전도도( $\kappa_a$ )와 축의 수직방향 열전도도( $\kappa_t$ )는 차이를 보이는데 이는 각각 식 (16)과 (17)을 이용하여 구할 수 있다[2-4].

$$\kappa_a = \nu_{ft} \kappa_{fa} + (1 - \nu_{ft}) \kappa_m \quad (16)$$

$$\kappa_t = \frac{\kappa_m}{4} \left[ \sqrt{(1 - \nu_{ft})^2 \left( \frac{\kappa_{ft}}{\kappa_m} - 1 \right)^2 - \frac{4\kappa_{ft}}{\kappa_m} - (1 - \nu_{ft}) \left( \frac{\kappa_{ft}}{\kappa_m} - 1 \right)} \right]^2 \quad (17)$$

여기서  $\kappa_{fa}$ ,  $\kappa_{ft}$ 와  $\kappa_m$ 은 각각 섬유의 축방향 열전도도, 섬유의 축의 수직방향 열전도도와 기지(matrix)의 열전도도를 나타낸다.

Fig. 2에 보이는 것처럼 직물섬유는 물결무늬의 형상을 이루고 있고 그로 인해 토우내의 섬유들의 방향이 위치에 따라 바뀐다(식 (3)과 (7) 참조). 토우 내의 각 지점에서의 섬유 방향은 off-axis 각도( $\theta_i$ 와  $\theta_w$ )로 정의되고, in-plane 열전도도를 구하는 경우 섬유방향의 변화에 의해 변화된 각 토우의 열전도도는 식 (18)과 (19)를 이용하여 구할 수 있다[2-4].

$$\kappa_{ti} = \kappa_a \cos^2 \theta_i + \kappa_t \sin^2 \theta_i \quad (i = \text{fill or warp}) \quad (18)$$

$$\kappa_{tj} = \kappa_t \quad (j = \text{warp or fill}) \quad (19)$$

복합재의 두께방향(out-of-plane 또는 through-thickness) 열전도도를 구할 때는 각 토우의 열전도도는 식 (20)을 이용하여 구할 수 있다[5]. 이는 in-plane 열전도도와 90°를 이루는 경우로 식 (18)에서 변형된 것이다.

$$\kappa_{ti} = \kappa_a \sin^2 \theta_i + \kappa_t \cos^2 \theta_i \quad (i = \text{fill or warp}) \quad (20)$$

### 2.2.3 복합재의 열전도도

앞서 언급하였듯이 직물섬유 복합재의 열전도도는 반복

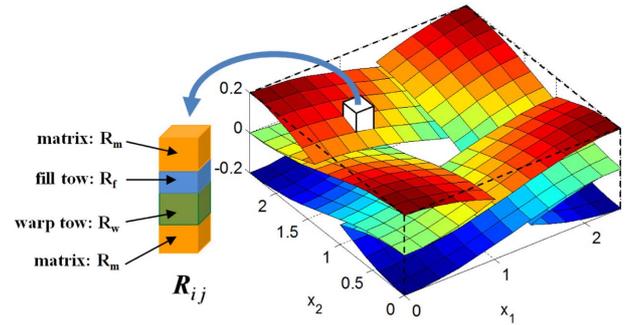


Fig. 5. Computer-generated unit cell of woven fabric composites and a lattice

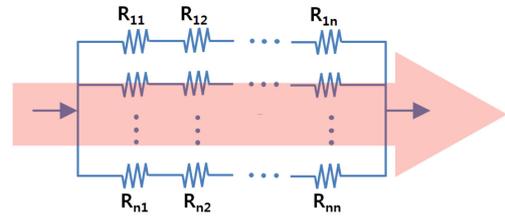


Fig. 6. Thermal resistance circuit for in-plane heat flow composed of thermal resistances of lattices

되는 단위구조(unit cell)의 열전도도를 구함으로써 예측될 수 있다. 복합재의 열전도도를 구하기 위해 단위구조는  $x_1$ 과  $x_2$  방향으로  $n$ 개의 구획으로 나누어 격자 모양을 형성하였고(Fig. 5), 각 격자의 열저항( $R_{11}, R_{12}, \dots, R_{nn}$ )은 전체 열저항을 구하기 위한 요소로 작용한다. 즉 Fig. 6에 보이는 것처럼 전체 열저항은 각각의 격자의 열저항으로 이루어진 저항회로의 형태로 가정할 수 있다. 이와 같이 구현된 열저항회로의 전체 열저항은 식 (14)와 (15)를 이용하여 구하고, 그런 다음 식 (13)을 이용하여 복합재의 전체 열전도도를 구하게 된다.

### 2.3 유전 알고리즘 (Genetic Algorithm)

자연계의 적자생존의 이론을 기본 개념으로 한 유전 알고리즘은 자연 선택의 원리와 자연계의 생물 유전학에 기본 이론을 바탕으로 병렬적이고 전역적인 탐색을 하는 알고리즘이다. 즉, 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 해들을 정해진 형태의 자료 구조로 표현한 다음 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 만들어 낸다. 유전 알고리즘은 생물학적 유전인자인 염색체에 해당하는 문자열을 가지고 생물과 같은 재생산(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)를 거쳐 다음 세대의 새로운 자손(offspring)을 인공적으로 만들어 낸다. 각각의 문자열은 목적함수(objective function)를 이용하여 적합도를 평가하고 우수한 형질의 개체들은 다음 세대에 더 많은 자식을 생성할 수 있도록 유도된다. 본 연구에서는 염색체 문자열은 식 (21)과 같이 설정하였고, 열 개의 문자열을 생성하였다.

$$(h_w, h_f, a_w, a_f) \quad (21)$$

식 (22)는 목적함수를 나타내는데, 복합재의 열전도도  $\kappa$ 를 높게 생성하는 염색체 문자열은 우성으로 간주한다.

$$\max \kappa \quad (22)$$

재생산은 열 개의 염색체 문자열중 가장 우수한 문자열은 다음세대로 복사하는 형식을 취하였다. 교배는 가장 우수한 염색체 문자열과 가장 열등한 문자열을 제외한 나머지 여덟 개의 문자열중 임의로 두 문자열씩 짝을 지어 시행하였다. 1, 2, 3 중 임의로 숫자를 선택하여 1이 선택될 경우 식 (21)의 문자열에서 교배점(crossover site)이  $h_w$ 와  $h_f$  사이가 되고, 2는  $h_f$ 와  $a_w$  사이가 교배점이 되고, 3이 선택될 경우는  $a_w$ 와  $a_f$ 를 교배점으로 설정하였다. 교배에 관한 상세한 설명은 [7]을 참고 바란다. 본 연구에서는 돌연변이(mutation) 대신 새로운 염색체 문자열을 추가하는 형식을 취하였다. 즉 가장 열등한 염색체 문자열을 제거하고 임의로 생성된 염색체 문자열을 추가하였다. 여기서 임의로 생성한다는 의미는 탐색구간내의 임의 숫자(random number)를 이용하여 생성한다는 의미이다. 본 연구에서 사용된 유전 알고리즘의 순서를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 검색구간내의 임의숫자(random number)를 이용하여 열 개의 염색체 문자열을 생성.
- (2) 각 염색체 문자열의 두께와 너비 정보를 이용하여 직물섬유 복합재를 생성(섹션 2.1의 식 (3)-(10) 사용).
- (3) 열전도도 모델링(섹션 2.2)를 이용하여 각 문자열에 의해 생성된 복합재의 열전도도를 구함.
- (4) 열 개의 염색체 모두에 대해 (2)와 (3)의 과정을 반복하여 모든 염색체 문자열에 대해 열전도도를 구함.
- (5) 열 개의 염색체중 목적함수에 가장 부합하는 최고 우성 문자열과 이전세대의 최고 우성 문자열과 비교하여 더 나은 문자열(더 높은 열전도도를 생성하는 염색체 문자열)을 최고-염색체(best chromosome)로 보관함.
- (6) 열 개의 염색체 문자열중 목적함수에 가장 부합하는 우성 문자열은 다음 세대로 복사함.
- (7) 가장 우성과 가장 열등 문자열을 제외한 나머지 여덟 개의 문자열을 대상으로 교배과정을 실시함.
- (8) 가장 열등한 염색체를 제거하고, 검색구간내의 임의 숫자를 이용하여 생성된 새로운 염색체를 추가함.
- (9) 최고-염색체가 100 세대를 연산하는 동안 변화가 없으면 최고-염색체를 높은 열전도도를 갖는 최적구조의 변수로 정하고 유전 알고리즘을 끝냄. 만약 동일한 최고-염색체의 반복이 100 세대 미만이면 과정 (2)-(9)를 반복함.
- (10) (1)-(9)의 과정을 10회 반복하고, 최적화된 토우의 두께와 너비 및 열전도도의 평균과 표준편차를 구함.

### 3. 결과 및 토의

본 연구에서는 유리섬유(E-glass)/에폭시 복합재를 기준으로 수치해석을 진행하였고, 유리섬유의 열전도도는 1.03 W/m-k (섹션 3.1과 3.2에서 사용) 또는 1.05 W/m-k (섹션 3.3에서 사용), 에폭시의 열전도도로는 0.19 W/m-k가 사용되었다[2,4,14]. 섹션 3.1과 3.2의 수치해석에서는 fill과 warp 토우의 두께는 0.2 mm, 너비는 2 mm를 사용하였다. 토우 사이의 간격은 0 mm로 설정하였는데, 토우 사이의 간격의 효과에 관한 수치해석(섹션 3.2, Fig. 10)에서는 여러 간격이 설정되었다. 모델링에서 섬유와 기지 사이의 계면접착(interfacial bonding)은 완전한 것으로 가정하였다. 그리고 직육면체 모양의 단위구조(unit cell)에서 열이 흐르는 방향과 수직하지 않은 면들은 열흐름이 없는 것(단열)으로 가정하였다(Fig. 2와 3 참조).

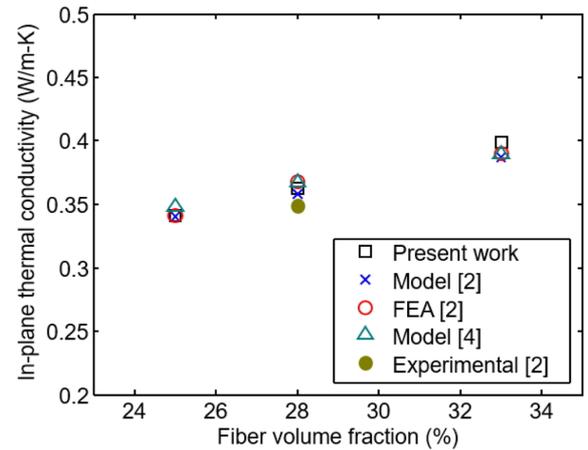


Fig. 7. In-plane thermal conductivity of E-glass fabric/epoxy composites

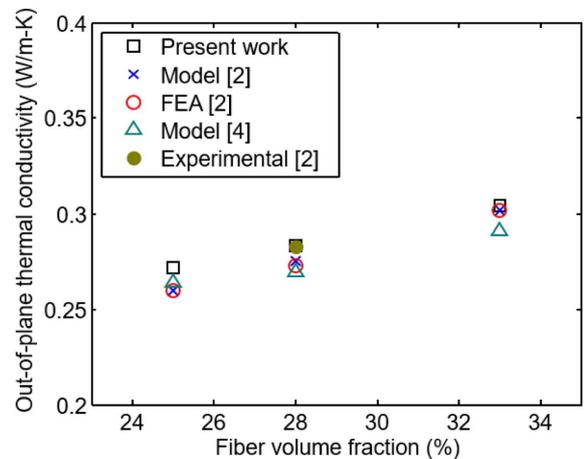
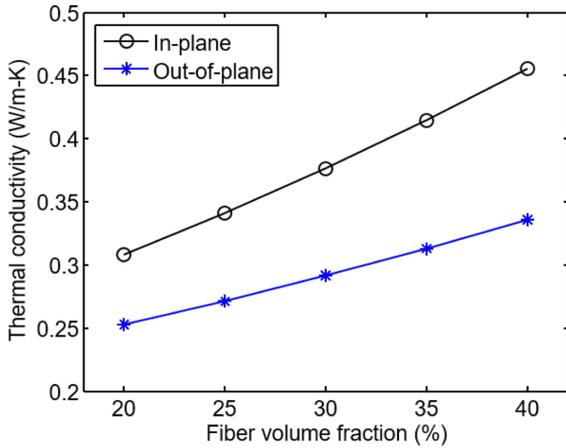
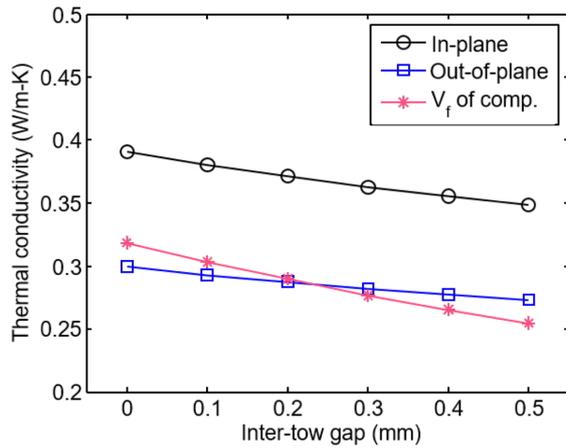


Fig. 8. Out-of-plane thermal conductivity of E-glass fabric/epoxy composites



**Fig. 9.** Effect of fiber volume fraction on thermal conductivity (E-glass fabric/epoxy composites)



**Fig. 10.** Inter-tow gap effect on thermal conductivity (E-glass fabric/epoxy composites),  $V_f$  denotes fiber volume fraction,  $v_{ffw} = 0.5$

### 3.1 수치모델과 실험결과의 비교

먼저 제안된 수치모델의 검증을 위해 모델의 결과값을 참고문헌의 모델과 실험 결과값과 비교하였다. Fig. 7과 8은 복합재의 섬유부피비 25%, 28%, 33%에서의 비교 결과를 보여준다. 전체적으로 문헌의 결과와 잘 부합하므로 모델이 적절히 구현된 것으로 간주될 수 있다.

### 3.2 섬유부피비 및 토우 사이의 간격(inter-tow gap)의 영향

Fig. 9는 섬유의 부피비가 복합재의 열전도도에 미치는 영향을 나타내고 있다. 섬유부피비가 증가할수록 열전도도가 높아지는데, 이는 섬유가 기지보다 열전도도가 높은 것에서 기인한다. 섬유부피비가 증가할수록 in-plane 열전도도가 out-of-plane 열전도도 보다 더 가파르게 높아지는 것으로 나타났는데, 이는 in-plane 열전도도에 토우(단방향 섬유 복합재)의 섬유 축방향 열전도도가 더 많은 영향을 미치기 때문이다.

Fig. 10은 토우와 토우 사이의 간격(inter-tow gap)과 열전도도 사이의 상관관계를 보여준다. 간격이 증가할수록 열전도도가 감소하는 현상을 보여주는데, 토우간의 간격의 증가가 섬유부피비의 감소로 이어지기 때문이다. 여기서 fill 방향의 간격(gap)과 warp 방향의 간격(gap)은 같다고 가정하였고, 토우내의 섬유부피비( $v_{ffw}$ )는 0.5로 가정하였다.

### 3.3 열전도도 향상을 위한 최적구조 설계

유전 알고리즘을 이용한 열전도도 향상을 위한 구조 최적화를 위해 두 가지 경우(Case 1, Case 2)의 검색구간을 설정하여 진행하였는데, 두 검색구간은 다음과 같다.

Case 1:

$$0.5 \leq h_w, h_f, a_w, a_f \leq 2.5 \quad (23)$$

Case 2:

$$0.1 \leq h_w, h_f \leq 0.9 \quad (24)$$

$$h_w + h_f = 1 \quad (25)$$

$$0.1 \leq a_w, a_f \leq 2.9 \quad (26)$$

$$h_w + h_f = 3 \quad (27)$$

Case 1의 검색구간은 fill과 warp 토우의 너비와 두께 변수들이 탐색구간 내에서 각각 독립적으로 설정되는 반면, Case 2의 경우는 fill과 warp의 너비와 두께가 종속적인 관계를 가진다. Case 2는 직물섬유 복합재의 두께와 너비가 한정될 경우 각 토우의 두께와 너비의 변화에 대해 열전도도가 어떤 현상을 보이는가에 대한 궁금증에서 출발하였다. Case 2에서는 유전 알고리즘 수행 순서 중 (7)과정을 생각하였다. 그 이유는 문자열의 변수들이 종속적이라, 교배의 과정을 진행할 경우 검색조건에 맞지 않는 문자열이 생성되기 때문이다.

유전 알고리즘은 목적함수는 식 (22)에 있는 것처럼 향상된 열전도도를 지닌 직물섬유 복합재의 구조를 설계하는 것이다. 본 연구에는 열전도도를 Table 1에 보이는 것처럼

**Table 1.** Six Cases of thermal conductivity of woven fabric composites (TC: thermal conductivity)

Symbol	The direction of TC
$IP_f$	TC in fill tow direction ( $x_1$ axis), (one direction)
$IP_w$	TC in warp tow direction ( $x_2$ axis), (one direction)
OP	TC in out-of-plane direction, (one direction)
$IP_{fw}$	TC in fill and warp direction, (two directions)
$IP_f$ -OP	TC in fill and out-of-plane direction, (two directions)
$IP_{fw}$ -OP	TC in fill, warp and out-of-plane direction, (three directions)

**Table 2.** Initial thermal conductivity with random variables

	Initial thermal conductivity (W/m-k)	
	Case 1	Case 2
$IP_f$	$0.4707 \pm 0.0126$	$0.5025 \pm 0.0139$
$IP_w$	$0.4681 \pm 0.0194$	$0.5014 \pm 0.0172$
OP	$0.3718 \pm 0.0044$	$0.3596 \pm 0.0062$
$IP_{fw}$	$0.8876 \pm 0.0075$	$0.9046 \pm 0.0010$
$IP_f$ -OP	$0.8235 \pm 0.0148$	$0.8473 \pm 0.0182$
$IP_{fw}$ -OP	$1.2354 \pm 0.0054$	$1.2518 \pm 0.0010$

여섯 가지의 경우로 나누어 각각 별도의 검색과정을 거쳤다. Table 1의 표시에서  $IP$ 와  $OP$ 는 각각 in-plane과 out-of-plane을 나타내고,  $f$ 와  $w$ 는 각각 fill과 warp을 의미한다. 유전 알고리즘을 이용한 최적구조 설계 과정에서 복합재의 전체 섬유부피비  $v_f$ 는 0.4로 가정하였다.

Table 2는 Case 1과 2의 최적화 과정 이전의 초기 열전도도를 나타낸다. 섹션 2.3의 유전 알고리즘 순서 (1)과 (10)에서 언급하였듯이 초기에 열 개의 염색체 문자열을 이용하여 생성하였고, 최적화 과정을 10회 반복하였다. Table 2의 값은 초기 열 개의 염색체 문자열을 이용하여 복합재의 열전도도를 계산 후 열전도도가 제일 높은 것을 선택하고 이를 10 회 반복한 후 얻어진 열전도도의 평균과 표준 편차를 구한 것인데, 여섯 가지 각각의 경우에 따라 개별적으로 구하였다. 사용된 토우의 너비와 두께는 임의 숫자(random number)로 생성된 초기 값들이라 큰 의미가 없어 기술하지

않았다. 유전 알고리즘을 이용하여 최적화된 결과는 Table 3과 4에 나타나 있다.

Case 1의 검색 결과가 Table 3에 있는데, Table 2와 비교해 볼 때 향상된 결과를 보여준다. 본 연구의 유전 알고리즘을 이용한 검색에서 많은 경우 전역 최적 값보다는 지역 최적 값으로 수렴하는 경우가 많았다. 그러므로 fill과 warp 토우의 너비와 두께의 각각의 수치에 대한 상세한 분석 보다는 전체적인 경향을 분석하는 것이 바람직한 것으로 여겨진다. 여기서 한가지 언급할 사항은 두 방향 또는 세 방향 열전도도 향상의 경우는 각각의 열전도도를 구한 다음 구해진 열전도도를 합하는 형식을 취하였고(예를 들어  $IP_f$ -OP의 경우, 전체 열전도도 = fill 방향 열전도도 + 두께방향 열전도도), 그 합해진 열전도도를 향상시키는 방법으로 진행하였다. 이로 인해 두 방향 이상의 열전도도에서는 특정방향의 열전도도가 다른 하나 또는 두 개의 열전도도보다 전체 열전도도의 향상에 더 많은 영향을 미칠 수가 있다.

Fill 토우 방향( $x_1$  축)의 열전도도( $IP_b$ ,  $0.5063 \pm 0.0015$ )에서는 fill 토우는 두껍고 warp 토우는 얇은 경향을 보였다(Table 3). 이는 fill 토우 축 방향의 열전도도를 향상시키는 경우로, fill 토우의 열전도도가 복합재의 전체적인 열전도도 향상에 크게 영향을 미치므로 나타나는 현상이다. Warp 토우는 섬유방향의 수직이므로 두께가 상대적으로 얇은 것이 전체 열전도도 향상에 기여를 하는 것으로 나타났다. 토우의 너비에 대해서는 warp 토우가 비교적 크고 Fill 토우의 너비는 검색범위(0.5 mm~2.5 mm)의 중간 값 정도(1.56 mm)로 나타났다. Warp 토우의 너비가 넓다 것은 상대적으로 fill

**Table 3.** Optimized structures and thermal conductivities for Case 1

	$h_w$	$h_f$	$a_w$	$a_f$	Thermal conductivity (W/m-k)
$IP_f$	$0.52 \pm 0.021$	$2.37 \pm 0.095$	$2.37 \pm 0.119$	$1.56 \pm 0.578$	$0.5063 \pm 0.0015$
$IP_w$	$2.40 \pm 0.070$	$0.53 \pm 0.018$	$1.61 \pm 0.662$	$2.38 \pm 0.110$	$0.5053 \pm 0.0018$
OP	$2.31 \pm 0.205$	$2.34 \pm 0.090$	$0.58 \pm 0.074$	$0.63 \pm 0.169$	$0.3867 \pm 0.0016$
$IP_{fw}$	$0.52 \pm 0.018$	$0.54 \pm 0.036$	$2.42 \pm 0.075$	$2.37 \pm 0.122$	$0.9158 \pm 0.0008$
$IP_f$ -OP	$0.53 \pm 0.027$	$2.35 \pm 0.152$	$2.22 \pm 0.168$	$0.92 \pm 0.454$	$0.8611 \pm 0.0032$
$IP_{fw}$ -OP	$0.56 \pm 0.040$	$0.55 \pm 0.031$	$2.18 \pm 0.159$	$2.13 \pm 0.156$	$1.2585 \pm 0.0013$

**Table 4.** Optimized structures and thermal conductivities for Case 2

	$h_w$	$h_f$	$a_w$	$a_f$	Thermal conductivity (W/m-k)
$IP_f$	$0.11 \pm 0.016$	$0.89 \pm 0.016$	$1.87 \pm 0.650$	$1.13 \pm 0.650$	$0.5198 \pm 0.0027$
$IP_w$	$0.89 \pm 0.011$	$0.11 \pm 0.011$	$1.03 \pm 0.518$	$1.97 \pm 0.518$	$0.5201 \pm 0.0011$
OP	$0.51 \pm 0.284$	$0.48 \pm 0.284$	$1.51 \pm 1.446$	$1.49 \pm 1.446$	$0.3732 \pm 0.0054$
$IP_{fw}$	$0.33 \pm 0.301$	$0.67 \pm 0.301$	$1.30 \pm 0.449$	$1.70 \pm 0.449$	$0.9089 \pm 0.0004$
$IP_f$ -OP	$0.12 \pm 0.015$	$0.88 \pm 0.015$	$2.31 \pm 0.698$	$0.69 \pm 0.698$	$0.8720 \pm 0.0022$
$IP_{fw}$ -OP	$0.57 \pm 0.384$	$0.43 \pm 0.384$	$1.58 \pm 0.405$	$1.42 \pm 0.405$	$1.2595 \pm 0.0013$

토우가 길다는 뜻이고(Fig. 2 참조), fill 토우의 너비가 warp 보다 적다는 것은 warp 토우의 길이가 fill 토우 보다 짧다는 의미이다. 이 또한 fill 토우가 fill 방향 열전도도에 영향을 많이 미치는 것에서 나타나는 현상으로 여겨진다. 다만 fill 토우 너비의 표준편차가 크다는 점 즉 너비 값의 분산이 크다는 점은 감안하여야 할 것이다.

Warp 토우 방향( $x_2$  축)의 열전도도를 향상시키는 경우(IP<sub>w</sub>)는 warp 토우의 두께가 두꺼운 것으로 나타났다. 두께방향 열전도도(OP,  $x_3$  축) 향상의 경우는 fill과 warp 토우 모두 두꺼운 것이 열전도도 향상에 도움이 되고, 너비는 적은 것이 두께방향의 열전도도 향상에 도움이 되는 것으로 나타났다. 참고로 두께 방향(OP)의 경우는 fill과 warp 토우 모두 섬유방향의 수직방향(단방향 섬유 복합재에서 섬유방향의 수직) 열전도도가 복합재의 열전도도에 큰 영향을 미친다. Fill과 warp 토우 방향의 열전도도를 모두 높이는 경우(IP<sub>fw</sub>)는 두께는 얇고 너비는 큰 것이 두 방향 모두의 열전도도를 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. Fill 토우 방향과 두께 방향의 두 방향(IP<sub>f-OP</sub>)으로 열전도도를 향상시키는 경우는 fill 토우 방향으로 향상시키는 경우와 유사하게 나타났다. 다만 fill 토우의 너비가 조금 적게 나타났다. 두께 방향의 경우(OP) 너비가 작은 것이 열전도도 향상에 도움이 되는 것과 유사한 현상으로 여겨진다. Fill, warp 과 두께 방향 세 방향(IP<sub>fw-OP</sub>)의 열전도도 향상의 경우는 fill과 warp의 두 방향 향상과 유사한 경우로 나타났는데, 이는 in-plane 열전도도가 두께 방향 열전도도보다 커서 전체 결과에 더 많은 영향을 미치는 것에서 기인한 것으로 생각된다.

Case 2의 구간 검색 결과도 Case 1의 결과와 유사한 현상을 보였다(Table 4 참조). 먼저 fill 방향( $x_1$  축)으로 직물섬유 복합재의 단위구조(unit cell)의 열전도도 향상의 경우(IP<sub>f</sub>) fill 토우는 두께가 두껍고 너비는 warp 토우보다 작게 나타났다. 이는 Case 1의 IP<sub>f</sub>의 설명이 적용될 수 있다. Fill 토우의 섬유 축방향 열전도도가 복합재의 fill 방향 열전도도에 크게 영향을 미치므로 fill 토우의 두께가 두껍고 길게 나타났다. Warp 토우 방향( $x_2$  축) 열전도도 향상의 경우(IP<sub>w</sub>)는 fill 방향 열전도도 향상의 결과와 반대 현상을 보였다. 즉 warp 토우가 두껍게 길게 나타났다. 두께 방향( $x_3$  축)의 직물섬유 복합재의 열전도도(OP)에서는 각 토우의 두께와 너비가 균형을 이루는 것으로 나타났다. Fill과 warp의 두 방향 열전도도를 동시에 향상시킬 경우(IP<sub>fw</sub>) Case 1과는 다소 상이한 결과가 나타났다. Case 1에서는 두 토우의 두께는 얇고 너비는 크게 나타났지만 Case 2에서는 warp 토우는 얇고 길게 그리고 fill 토우는 두껍고 가는 형상을 보였다. 이는 각 토우의 두께와 너비가 종속적인 관계에 있어 이러한 현상이 나타난 것으로 보인다(식 (24)-(27) 참조). IP<sub>f-OP</sub>의 경우 즉 fill 방향과 두께 방향 열전도도를 동시에 향상시키는 경우도 Case 1의 경우와 유사하게 fill 토우의 두께는 두껍고 너비는 작게 그리고 warp 토우는 반대현상 즉

두께는 얇고 너비는 크게 나타났다. Fill, warp과 두께방향의 열전도도를 동시에 향상시킬 경우(IP<sub>fw-OP</sub>)도 Case 1과 유사하게 전체적으로 균형을 이루었다. 즉 fill과 warp 토우의 두께와 너비가 서로 비슷하게 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 직물섬유 복합재의 열전도도를 예측을 위한 모델에서 기존의 모델보다 간단하고 실제 직물섬유 복합재와 유사한, 개선된 방법을 제시하였고, 섬유부피비와 토우간의 간격(inter-tow gap)이 직물섬유의 열전도도에 미치는 영향을 연구하였다. 아울러 유전 알고리즘을 사용하여 열전도도 향상을 위한 구조 최적화를 실시하였다.

섬유의 부피비가 증가할수록 열전도도도 증가하였는데, in-plane 열전도도가 out-of-plane 열전도도 보다 크게 증가하는 것으로 나타났다. 토우간의 간격은 커질 수록 직물섬유 복합재의 열전도도는 감소하였다. 유전 알고리즘을 이용한 구조 최적 탐색에서는 여섯 가지의 경우로 나누어 탐색을 실시하였고, 각각 경우에 적절한 결과를 도출 하였다. 전체적으로 토우의 축방향 성분이 열전도도 향상에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

#### 후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 기초연구사업(과제번호: 2016R1C1B1011533)과 2016년 영산대학교 교내연구비로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사 드립니다.

#### REFERENCES

- Villière, M., Lecoite, D., Sobotka, V., Boyard, N., and Delaunay, D., "Experimental Determination and Modeling of Thermal Conductivity Tensor of Carbon/epoxy Composite," *Composites: Part A*, Vol. 46, 2013, pp. 60-68.
- Dasgupta, A., and Agarwal, R.K., "Orthotropic Thermal Conductivity of Plain-Weave Fabric Composites Using a Homogenization Technique," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 18, 1992, pp. 2736-2758.
- Dasgupta, A., Agarwal, R.K., and Bhandarkar, S.M., "Three-Dimensional Modeling of Woven-Fabric Composites for Effective Thermo-Mechanical and Thermal Properties," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, 1996, pp. 209-223.
- Ning, Q.G., and Chou, T.W., "Closed-form Solutions of the In-plane Effective Thermal Conductivities of Woven-Fabric Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 55, 1995, pp. 41-48.
- Ning, Q.G., and Chou, T.W., "A General Analytical Model for Predicting the Transverse Effective Thermal Conductivities of Woven Fabric Composites," *Composites Part A*, Vol. 29A, 1998,

- pp. 315-322.
6. Seo, B.H., Cho, Y.J., Youn J.R., Chung, K., Kang, T.J., and Park, J.K., "Model for Thermal Conductivities in Spun Yarn Carbon Fabric Composites," *Polymer Composites*, 2005, pp. 791-798.
  7. Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison Wesley Pub. Co., Reading, Massachusetts, USA, 1989.
  8. Le-Manh, T., and Lee, J., "Stacking Sequence Optimization for maximum strengths of laminated composite plates using genetic algorithm and isogeometric analysis," *Composite Structures*, Vol. 116, 2014, pp 357-363.
  9. Kim, D.H., and Lee, I., "Static Aeroelastic Optimization of a Composite Using Genetic Algorithm," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 13, No 2, 2000, pp. 61-71.
  10. Moon, C.J, Kweon, J.H., and Choi, J.H., "Optimal Design of Filament Wound Composite Cylinders under External Hydrostatic Pressure using a Micro-Genetic Algorithm," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 4, 2010, pp. 14-20.
  11. Scida, D., Aoura, Z., Benzeggagh, M.L., and Bocherens, E., "Prediction of the Elastic Behaviour of Hybrid and Non-hybrid Woven Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 57, 1997, pp. 1727-1740.
  12. Scida, D., Aboura, Z., Benzeggagh, M.L., and Bocherens, E., "A Micromechanics Model for 3D Elasticity and Failure of Woven-fibre Composite Materials," *Composites Science and Technology*, Vol. 59, 1999, pp. 505-517.
  13. Kim, M., and Song, J.I., "Geometry Effect on Mechanical Properties of Woven Fabric Composites," *Journal of Central South University of Technology*, Vol. 18, 2011, pp. 1985-1993.
  14. Barbero, E.J., *Introduction to Composite Materials Design*, Taylor & Francis Group, New York, NY, USA, 1999.