

탄소섬유강화 직조복합재의 탄성 거동의 이론적 예측 및 검증

황연택* · 임재영** · 남병균** · 김학성***†

Analytical Prediction and Validation of Elastic Behavior of Carbon-Fiber-Reinforced Woven Composites

Yeon-Taek Hwang*, Jae-Young Lim**, Byeung-Gun Nam**, Hak-Sung Kim***†

ABSTRACT: In this paper, elastic behavior of woven fabric composites with various fiber yarn structure were predicted through a theoretical calculation model. A representative volume elements (RVE) that can represent the mechanical properties of the woven composites were selected and crimp angle of the weave yarn was defined by several sinusoidal functions. The effective material properties of the woven composite such as young's modulus, shear modulus and poisson's ratio was predicted by classical laminate theory (CLT). The fiber volume fractions were calculated according to the shape and pattern (plain, twill weave) of the fiber yarn, and the elastic behavior of each woven composite was obtained through a theoretical calculation model. Also, to verify the theoretical predictions, woven composite specimens of plain and twill weave were fabricated by vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process and then mechanical test was conducted. As a results, a good correlation between theoretical and experimental results for the elastic behavior of woven composites could be achieved.

초 록: 본 논문에서는 이론적인 계산 모델을 이용하여 다양한 섬유 다발 구조를 갖는 직조섬유강화 복합재의 탄성 거동을 예측하였다. 직조 복합재의 기계적 물성을 대표할 수 있는 대표체적요소 (RVE)을 설정하였으며, 직조 다발의 굴곡을 다양한 정현파 함수로 정의하였다. 고전적층이론 (CLPT)를 이용하여 영률, 전단 탄성계수, 포아송 비와 같은 직조복합재의 유효물성을 예측하였다. 섬유 다발의 구조와 형태 (평직, 능직)에 따라 섬유 부피 분율을 계산하였으며 각각의 탄성 거동을 이론적인 계산 모델을 통해 예측하였다. 또한, 이론적 예측 결과의 검증을 위해 진공수지주입(VARTM) 공정을 사용하여 평직 및 능직 형태의 복합재 시편을 제작 후 물성 시험을 진행하여 실험 결과를 이론적 예측 결과와 비교하였다. 결과적으로 직조 복합재의 탄성 거동에 대한 이론적 결과와 실험 결과 간에 매우 높은 정확도를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words: 직조복합재(Woven composite), 탄소섬유(Carbon-fiber), 탄성 거동(Elastic behavior), 대표체적요소(RVE), 고전적층이론(CLT), 굴곡 각도(Crimp angle)

1. 서 론

세계적으로 연비 및 배기가스 규제에 따른 고하중 자동차 부품을 섬유강화 복합재료와 같은 경량화 소재로 대체

하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 섬유강화 복합재료는 높은 비강성, 비강도 등의 우수한 기계적 성질로 인해 기계, 항공우주, 자동차 산업 등 다양한 분야에서 활용도가 높아지고 있다. 일반적으로 널리 사용되는 일방향 섬유복합

Received 6 August 2018, received in revised form 11 October 2018, accepted 26 October 2018

*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

**Vehicle Safety CAE team 1, Hyundai Motor Company, Gyeonggi-do, 445-709, Korea

***†Institute of Nano Science and Technology, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea, Corresponding author (E-mail: kima@hanyang.ac.kr)

재료의 경우 우수한 면내 특성을 가지고 있지만 상대적으로 낮은 면외 두께방향 물성으로 인해 층간 분리 등의 문제가 있다. 이에 따른 해결 방안으로 사용되는 직조 형태의 섬유강화 복합재료의 경우 일방향 복합재료에 비하여 우수한 면외 방향 기계적 특성을 가지고 있으며 이에 따라 충격에 따른 파괴 저항 특성이 뛰어난 장점이 있다. 또한, 면내 직각 방향으로 보다 균형된 물성을 가지고 있기 때문에 성형성 측면에서도 매우 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 이유로 복잡한 형상과 안정성이 요구되는 자동차 분야에서 비필러(B-plier), 배터리 트레이, 트렁크 바닥재 등에 직조 섬유강화 복합재를 적용하고자 연구 개발이 진행되고 있다[1-3].

하지만, 이러한 직조 복합재료는 매우 복잡한 기하학적 형상을 가지고 있으며 직조 형태와 섬유 다발 간 상호작용으로 인해 섬유 부피 분율 및 기계적 거동이 크게 변화하는 특성이 있다. 때문에, 직조 복합재료의 부품 적용 및 부품 단위의 구조 해석에 어려움이 있는 실정이다. 이를 해결하기 위한 방법으로 직조 섬유의 단위 구조인 대표체적(Representative Volume Elements, RVE)을 설정하여 섬유 다발 간의 미세 구조를 고려한 모델링 및 대표체적 물성 예측 연구가 다양하게 진행되고 있다. 소재 단위의 물성 예측 기법에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 최근에는 직조 섬유의 굴곡을 직조 패턴(평직, 능직 등)에 따라 정의하고 직조 복합재료의 섬유 부피 분율 및 기초 물성을 이론적으로 계산하는 연구들이 진행되고 있다[4-7].

본 논문에서는 직조 섬유강화 복합재료의 탄성거동을 고전 적층 이론(Classical laminate theory, CLT)을 응용하여 예측하였다. 평직 및 능직 형태의 직조 섬유의 굴곡 함수화를 진행하였으며 굴곡 정도에 따라 변화되는 섬유방향 물성을 미소 단위로 분리하여 계산해 주었다. 또한, 진공수지주입(VARTM) 공정을 통해 직조 섬유강화 복합재 시편을 제작 후 물성 시험을 진행하였으며 개발된 이론적 계산 모델의 검증에 수행하였다. 최종적으로, 직조 섬유강화 복합재료의 물성에 크게 영향을 주는 변수인 섬유 부피 분율에 따라 변화되는 기계적 물성을 예측하였다.

2. 이론 모델 및 실험

2.1 굴곡 각도에 따른 물성 및 고전 적층 이론

직조 섬유로 구성된 복합재료의 물성은 직물 구조의 기하학적 형태에 매우 큰 영향을 받기 때문에 복합재 전체의 물성을 대표할 수 있는 대표체적(RVE)을 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 설정해 주었다. 물성 예측 모델에서 계산이 가능한 가장 작은 반복 구조의 대표체적을 평직 및 능직 직조 섬유에서 지정해 주었다. 또한, 지정된 대표체적 모델은 완전히 규칙적이며 반복적인 섬유 구조로 가정하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 직조 섬유 복합재를 구성하는 날실(fill), 씨실(warp) 및 기지재(matrix)로 경계를 분리하여 물성 예측

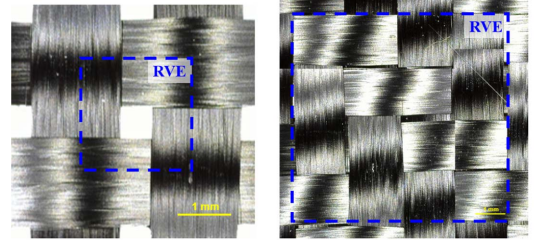


Fig. 1. Photographs of woven fabric (Plain and Twill weave)

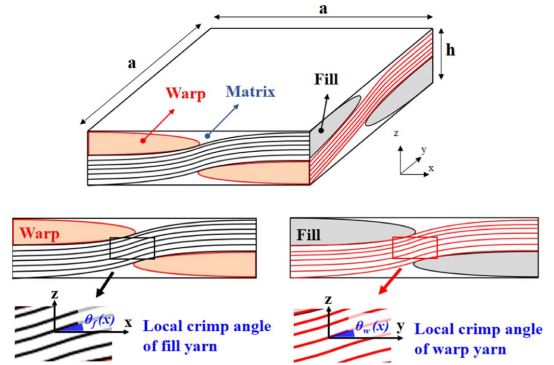


Fig. 2. Local crimp angle of fiber yarn

계산을 수행하였다. 상이한 물성을 갖는 소재들로 이루어진 직조 복합재료의 탄성 거동을 고전 적층 이론(CLT)을 응용하여 계산하였다.

$$\begin{Bmatrix} N_i \\ M_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{ij}(x, y) & B_{ij}(x, y) \\ B_{ij}(x, y) & D_{ij}(x, y) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_j^0 \\ k_j \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$A_{ij}(x, y), B_{ij}(x, y), D_{ij}(x, y) = \int_{-h/2}^{h/2} (1, z, z^2) Q_{ij}^I dz \quad (2)$$

여기서 $A_{ij}(x, y), B_{ij}(x, y), D_{ij}(x, y)$ 는 각각의 미소 한 요소에 해당하는 면내 강성 계수들을 의미하여 Q_{ij}^I 값은 다음과 같다.

$$\bar{Q}_{ij}^I = \begin{bmatrix} \frac{E_x^I}{P_v^I} & \nu_{xy}^I \frac{E_y^I}{P_v^I} & 0 \\ \nu_{yx}^I \frac{E_x^I}{P_v^I} & \frac{E_y^I}{P_v^I} & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy}^I \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P_v^I = 1 - \nu_{xy}^I \nu_{yx}^I \quad (4)$$

위첨자 I 는 날실(fill), 씨실(warp) 그리고 기지재(matrix)를 의미하며 대응하는 Q_{ij}^I 값은 국소 굴곡 각도(local crimp angle)에 기초하여 각각의 소재 별로 계산된다.

$$s_f = \sin(\theta_f), \quad c_f = \cos(\theta_f) \quad (5)$$

$$E(\theta_f)_x^F = \left[\frac{1}{E_1} c_f^4 + \left(\frac{1}{G_{13}} - 2 \frac{V_{13}}{E_1} \right) s_f^2 c_f^2 + \frac{1}{E_3} s_f^4 \right]^{-1} \quad (6)$$

$$E(\theta_f)_x^F = E_2 \quad (7)$$

$$\nu(\theta_f)_{xy}^F = E(\theta_f)_x^F \left[c_f^2 \frac{V_{12}}{E_1} + s_f^2 \frac{V_{23}}{E_2} \right] \quad (8)$$

$$G(\theta_f)_{xy}^F = \left[\frac{s_f^2}{G_{23}} + \frac{c_f^2}{G_{12}} \right]^{-1} \quad (9)$$

$$s_w = \sin(\theta_w), c_w = \cos(\theta_w) \quad (10)$$

$$E(\theta_w)_x^W = E_2 \quad (11)$$

$$E(\theta_w)_y^W = \left[\frac{1}{E_1} c_w^4 + \left(\frac{1}{G_{13}} - 2 \frac{V_{13}}{E_1} \right) s_w^2 c_w^2 + \frac{1}{E_3} s_w^4 \right]^{-1} \quad (12)$$

$$\nu(\theta_w)_{xy}^W = E(\theta_w)_x^W \left[c_w^2 \frac{V_{12}}{E_1} + s_w^2 \frac{V_{23}}{E_2} \right] \quad (13)$$

$$G(\theta_w)_{xy}^W = \left[\frac{s_w^2}{G_{23}} + \frac{c_w^2}{G_{12}} \right]^{-1} \quad (14)$$

X방향의 날실(fill) 섬유 다발 및 Y방향의 씨실(warp) 섬유 다발의 국소 영역에 해당하는 유효물성을 위와 같은 식 (5)~(14)를 통해 구할 수 있다. 또한, 대표체적 모델에 대한 A, B, D 전역 강성 매트릭스 값들은 미소 영역의 강성 매트릭스 값들의 x 방향 평균 및 y 방향 평균을 통해 계산하였다.

$$(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{D})(y) = \frac{1}{a} \int_0^a (\mathbf{A}(x), \mathbf{B}(x), \mathbf{D}(x)) dx \quad (15)$$

$$(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{D})_{global} = \frac{1}{a} \int_0^a (\mathbf{A}(y), \mathbf{B}(y), \mathbf{D}(y)) dy \quad (16)$$

위 식 (16)을 통해 얻은 A 매트릭스 행렬 값을 통해 대표체적 모델의 영률, 전단 탄성 계수, 포아송비와 같은 유효물성치를 계산할 수 있었다.

$$E_x = \left(A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} \right) / h \quad (17)$$

$$E_y = \left(A_{22} - \frac{A_{12}^2}{A_{11}} \right) / h \quad (18)$$

$$G_{xy} = A_{66} / h \quad (19)$$

$$\nu_{xy} = \frac{A_{12}}{A_{22}} \quad (20)$$

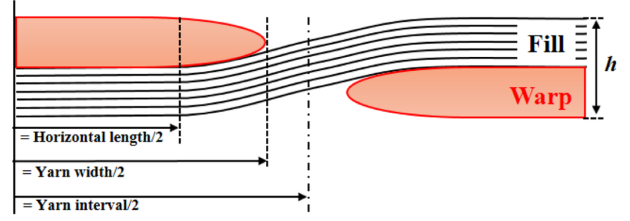
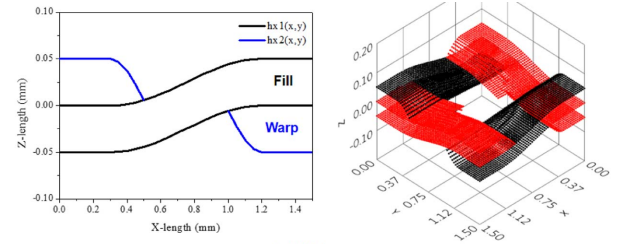
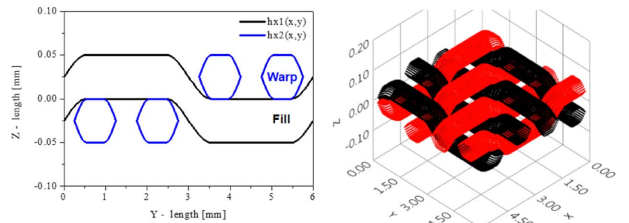


Fig. 3. Geometry of woven fabric RVE



(a) Plain weave



(b) Twill weave

Fig. 4. Geometric functions and 3D weave structure

2.2 직조 섬유 구조

직조 섬유강화복합재에서 차지하는 섬유 부피분율은 섬유 다발의 폭과 다발 간의 간격에 따라 차이가 크게 나타나며 이에 따른 기계적 거동이 크게 변화하는 성질이 있다. 때문에, 정확한 기계적 물성 예측을 위해 Fig. 3과 같이 섬유 다발 폭 및 섬유 다발 간의 간격 그리고 수평 영역을 구분해서 정의해 주었다.

$$H = (w-l)/w \quad (21)$$

여기서, w 는 섬유 다발 폭, l 은 수평 영역 길이 그리고 H 는 수평 영역 길이 비에 해당된다.

대표체적 모델에서 섬유 다발이 차지하는 부피 분을 계산 및 미소 영역에서의 국소 굴곡 각도를 계산하기 위해서 섬유 굴곡 함수화를 수행하였다. 수평인 영역을 제외한 섬유 다발의 굴곡을 사인, 코사인 함수 등의 정현파 형태로 정의하였으며 날실(fill)과 씨실(warp)의 영역을 구분하였다. 평직 모델의 경우 날실과 씨실이 완전히 붙어있다는 가정 하에 굴곡 함수를 정의 하였으며 능직 모델의 경우에는 섬유 다발이 수평인 영역에서만 서로 붙어 있다고 가정 하였다. Fig. 4는 이를 2D 굴곡 함수 그래프 및 3D 직조 구조 그래프로 보인 것이다.

본 연구에서는 섬유 다발의 수평 영역 비가 변화함에 따라 섬유 부피 분율을 계산 해 주었으며 이에 따른 대표체적 탄성 거동을 예측하였다. 또한, 굴곡 각도가 바뀌는 대표체적 모델의 탄성 거동을 확인하였다.

2.3 시편 제작 및 기계적 시험

본 연구에서 개발한 직조 섬유강화 복합재의 탄성 물성 예측 이론 모델의 검증에 위해 직조 복합재의 시편을 제작 후 물성 시험을 진행하였다. 프랑스 Chomarat 사의 평직 직조(Plain 150 gsm, 200 gsm)와 능직 직조(Twill 160 gsm, 245 gsm, 285 gsm) 섬유를 사용하였으며, 국내 국도화학 사의 에폭시 수지(KFR-120V, KFH-163)를 진공수지주입 공정(VARTM)을 통해 주입 후 시편을 제작 하였다. 제작된 시편의 무게/부피를 측정하여 섬유 부피 분율을 계산 해 주었다. 기계적 시험의 경우 ASTM D3039 기준에 맞춰 정적 인장 시험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이론 모델 물성 및 기하학적 변수

본 연구에서 개발한 이론 모델에 사용된 섬유 다발 및 지지재의 물성은 Table 1과 같으며, 섬유 다발에서 차지하는 섬유의 부피분율이 0.7이라고 가정하였다.

섬유 다발의 기하학적인 변수는 Table 2에 나타난 바와 같으며 이를 이론 모델에 적용하여 직조 섬유강화 복합재의 3D 굴곡 계산 및 물성 계산을 수행하였다. 평직 및 능직 직

Table 1. Mechanical properties of carbon fiber yarn assuming a fiber volume fraction of 0.7

Longitudinal Young's modulus, E_{11} (GPa)	150
Transverse Young's modulus, E_{22} (GPa)	10
In-plane shear modulus, G_{12} (GPa)	5
In-plane Poisson's ratio, ν_{12}	0.28
Matrix Young's modulus, E_m (GPa)	3
Matrix shear modulus, G_m (GPa)	1.5
Matrix Poisson's ratio, ν_m	0.3

Table 2. Geometry parameters for the woven fabric

Weave pattern	gsm (g/m^2)	Yarn interval (mm)	Yarn width (mm)	Yarn thickness (mm)
Plain	150	2.5	1.75	0.15
	200	2.0	1.6	0.2
Twill	160	2.5	1.7	0.17
	245	1.7	1.5	0.18
	285	1.4	1.3	0.22

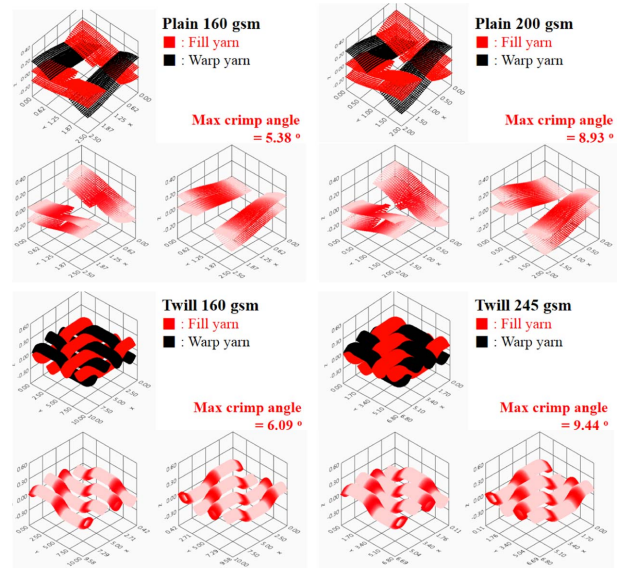


Fig. 5. 3D weave structure and crimp angle distribution of plain and twill weave

조 구조의 gsm의 값에 따라 상이한 섬유 다발 폭, 간격 그리고 두께 값이 나타나며 이에 따른 이론적 모델 적용을 Fig. 5에 보는 바와 같이 수행하였다.

본 연구를 통해 개발한 굴곡 함수화를 통해 국소 굴곡 각도를 계산 하였으며, 날실(fill), 씨실(warp) 섬유 다발별로 굴곡 각도 분포를 확인하였다. 본 연구에서는 동일한 날실과 씨실 구조를 사용하였으며 최대 굴곡 각도는 평직 160 gsm에서 5.38° 값이 나타났고, 200 gsm에서는 8.93° 값으로 굴곡 각도가 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 능직의 경우에도 160 gsm에서 6.09° 값이 나타났으며, 245 gsm에서 9.44°로 굴곡 각도가 크게 상승하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과를 통해 섬유 다발간의 간격이 좁아지고 섬유 다발의 두께가 커지면 최대 굴곡 각도 값 또한 커지는 것을 확인 할 수 있었다.

3.2 섬유 부피 분율에 따른 물성 계산

앞서 계산한 국소 굴곡 각도 값들을 이용하여 미소 영역별 고전 적용 이론 계산을 수행 하였으며 이를 통해 직조 섬유강화 복합재 대표체적의 유효 물성을 구할 수 있었다. 또한, 날실(fill)과 씨실(warp) 섬유 다발의 면적을 각각 적분하여 전체 섬유 다발의 부피를 계산 하였으며 이를 통해 섬유 다발이 복합재에서 차지하는 부피 분율을 계산 하였다. 아래 식 (22)를 통해 섬유가 복합재에서 차지하는 섬유 부피 분율을 계산하였다.

$$V_{\text{fiber in composite}} = V_{\text{fiber in yarn}} \times V_{\text{yarn in composite}} \quad (22)$$

여기서 V 는 각각 섬유가 복합재에서 차지하는 부피 분율,

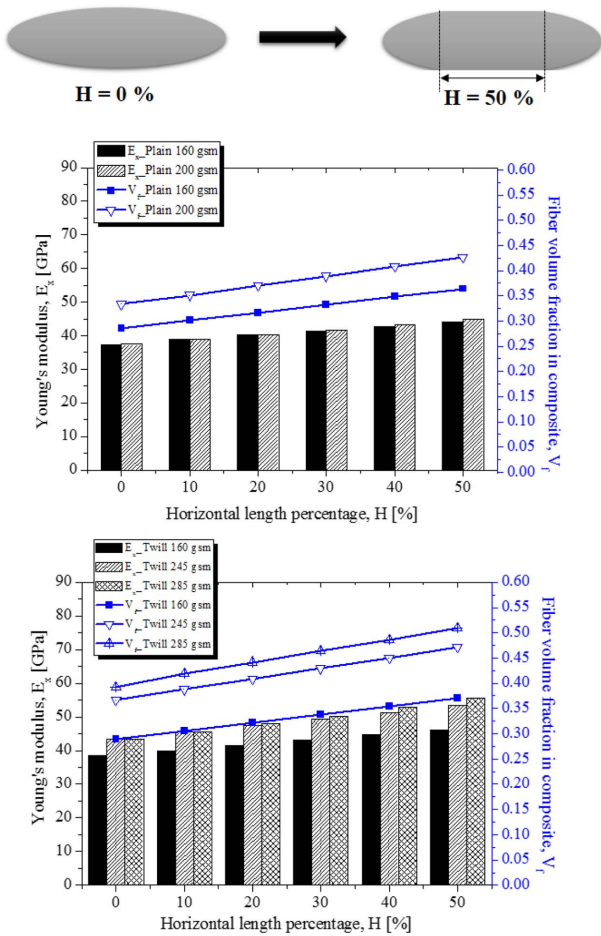


Fig. 6. Effect of horizontal length on the elastic modulus and fiber volume fraction

섬유가 섬유 다발에서 차지하는 부피 분율 그리고 섬유 다발이 복합재에서 차지하는 부피 분율이다. 섬유가 다발에서 차지하는 부피 분율을 0.7로 가정하여 계산하였다.

Fig. 6은 이론적 모델을 통해 계산한 값들이며, 섬유 다발의 수평 영역 퍼센트에 따라 변화하는 섬유 방향 영률 및 섬유 부피 분율을 비교한 그래프이다. 전체적으로 수평 영역 비율이 증가할수록 섬유 부피 분율이 증가하는 공통된 경향을 확인 할 수 있었다. 평직(plain) 직조 구조의 경우 160 gsm 경우 보다 200 gsm 직조 복합재의 섬유 부피 분율이 0.05 정도 크게 계산되었다. 하지만, 섬유 방향 영률의 경우 큰 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있었다. 이는 200 gsm 직조 복합재의 경우 굽곡 각도가 160 gsm 복합재보다 크게 나타났고 이에 따른 결과로 판단된다. 능직(twill) 직조 구조의 경우 gsm 값에 따라 부피 분율이 크게 증가하였으며 섬유 방향 영률도 비슷하게 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 능직 직조 구조의 경우 상대적으로 평직 직조 구조 보다 수평인 구조가 많기 때문에 섬유 굽곡의 영향보다 섬유 부피 분율의 영향이 복합재의 섬유방향 영률에 크게 나타난 것으로 판단된다.

Table 3. Geometry parameters for the woven fabric

Weave pattern	Analytical model		Experimental result	
	E_x (GPa)	V_f	E_x (GPa)	V_f
Plain 160 gsm	35.5	0.33	41.45	0.33
Plain 200 gsm	42.7	0.413	43.57	0.426
Twill 160 gsm	38.3	0.294	39.99	0.305
Twill 245 gsm	46.5	0.43	49.33	0.429
Twill 285 gsm	60.4	0.53	55.52	0.508

이론적 모델을 통해 예측한 평직, 능직 구조의 직조섬유 강화 복합재의 물성 값을 검증하기 위해 기계적 물성 시험 결과와 비교하였다. 여기서, 이론적 모델의 섬유 부피 분율 및 영률의 경우 실험값에 가까운 섬유 부피분율의 H 값을 선택해서 비교 하였다. 결과적으로, Table 3에 나타난 바와 같이 실험을 통해 측정된 섬유 방향 영률 및 섬유 부피분율이 이론적 모델을 통해 예측한 값들과 매우 유사하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 본 연구에서 개발된 이론적 모델을 이용하면 직조섬유 강화복합재의 영률 이외에 전단 탄성 계수 및 포아송비와 같은 유효물성 예측이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 직조 섬유강화 복합재료의 탄성거동을 고전 적층 이론(CLT)을 응용하여 예측하였다. 평직, 능직 형태의 직조 섬유의 굽곡 함수화를 통해 3D 직조 구조와 굽곡 각도 분포를 나타내는 그래프를 도출하였다. 섬유 다발 간의 간격이 좁아지고 다발 두께가 증가할수록 최대 굽곡 각도가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 굽곡 정도에 따라 변화되는 미소 단위의 물성을 고전 적층 이론을 통해 계산해 주었으며, 이를 통해 섬유 다발의 형상에 따라 변화되는 섬유 부피 분율 및 기계적 물성을 예측할 수 있었다. 예측된 물성 값은 실제 실험을 통해 구한 값과 매우 유사한 것을 확인 할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 이론적 모델은 복잡한 기하학적 형상의 직조 섬유강화 복합재의 물성 예측에 유용하게 적용 될 것으로 사료된다.

후 기

This work was supported by the Industrial Strategic technology development program (10076562, Development of fiber reinforced thermoplastic nano-composite via fiber bundle spreading for high quality resin impregnation process and its application to the underbody shield component for protecting battery pack of an electric-vehicle) funded By the Ministry of Trade, industry & Energy (MI, Korea).

This research was also supported by a National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (Nos. 2012R1A6A1029029, 2013M2A2A9043280). This work was also supported by a Collaborative Project between Hanyang University and Hyundai Motors Co. Ltd.

REFERENCES

1. (Korean Journal) Ji, K.H., and Kim, S.J., "Low Velocity Impact Behavior Analysis of 3D Woven Composite Plate Considering its Micro-structure," *Composites Research*, Vol. 18, No. 4, 2005, pp. 44-51.
2. (Korean Journal) Choi, Y.S., and Woo, K., "Crimp Angle Dependence of Effective Properties for 3-D Weave Composite," *Composites Research*, Vol. 29, No. 1, 2016, pp. 33-39.
3. (Korean Journal) Lee, W.O., Um, M.K., Byun, J.H., and Cao, J., "Characterization of In-plane Shear Behaviors of Woven Fabrics by Bias-extension and Trellis-frame Tests," *Proceeding of the 8th Korea-Japan Joint Symposium on Composites Research*, Vol. 23, No. 5, 2010, pp. 8-14.
4. (Korean Journal) Chun, H.J., and Cho, H.S., "New Constitutive Models for Tensile/Compressive Nonlinear Elastic Behaviors of Composite Materials with Fiber Waviness," *Composites Research*, Vol. 12, No. 1, 1999, pp. 59-67.
5. (Korean Journal) Woo, K.S., "Effect of Fiber Tow Waviness and Harness Number on Mechanical Properties of Plain Woven Textile Composites," *Composites Research*, Vol. 8, No. 3, 1995, pp. 60-73.
6. (International Journal) Donadon, M.V., Falzon, B.G., Iannucci, L., and Hodgkinson, J.M., "A 3-D Micromechanical Model for Predicting the Elastic Behaviour of Woven laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, Iss. 11-12, 2007, pp. 2467-2477.
7. (International Journal) Scida, D., Aboura, 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, Iss. 12, 1998, pp. 1727-1740.