

## 論文

## 편향 인장 및 트렐리스 시험에 의한 직물 복합재료의 면내 전단 물성 평가

이원오<sup>\*+</sup>, 엄문광<sup>\*</sup>, 변준형<sup>\*</sup>, Jian Cao<sup>\*\*</sup>**Characterization of In-plane Shear Behaviors of Woven Fabrics  
by Bias-extension and Trellis-frame Tests**Wonoh Lee<sup>\*+</sup>, Moon-Kwang Um<sup>\*</sup>, Joon-Hyung Byun<sup>\*</sup>, and Jian Cao<sup>\*\*</sup>**ABSTRACT**

Three types of glass woven fabrics (plain, balanced twill, and unbalanced twill) having various sample sizes and aspect ratios were tested using the bias-extension tests. Real-time deformation images, force, and displacement data were collected. For the bias-extension test, the shear angle of the fabrics from the equation based on the crosshead displacement and fabric size was compared with direct manual measurements of the warp and weft angles as well as the optical measurement software. To determine the shear force, an analytical equation was introduced considering the kinematics of the bias-extension test. The obtained shear behaviors were further compared with the results by the trellis-frame test. The optical measurement methods showed that the mathematical method was reasonable before the shear angle of the fabrics reaches 30° in the bias-extension tests. Also, the bias-extension test gave consistent behaviors with the trellis-frame test only for isotropic and homogeneous fabrics such as balanced plain and twill weaves.

**초 록**

서로 다른 길이비를 갖는 세 종류의 유리 직물 복합재료(평직, 균형능직, 비균형능직)의 면내 전단 물성 평가를 위해 편향 인장 시험을 실시하였다. 직물 복합재료의 전단각을 결정하기 위하여 인장 변형량과 직물의 크기에 기인한 이론식, 직접측정법 및 이미지 분석법등을 이용하여 서로의 장단점을 비교하여 보았으며, 편향 인장 시험의 기하구조를 이용하여 유도된 식을 통해 면내 전단력을 계산하였다. 또한 트렐리스 시험(trellis-frame test)에 의한 결과와의 비교를 통해 편향 인장 시험에 의한 전단 물성 측정법의 정확도를 평가하였다. 실험 결과, 이론식에 의한 전단각 계산법은 전단각이 30도 이내일 경우에 이미지를 통한 직접 측정의 결과와 유사하였으며, 면내 전단력은 평직이나 균형 능직과 같은 등방형 직물의 경우에만 측정 샘플의 길이비에 무관한 균일한 결과를 보였다. 또한 편향 인장 시험과 트렐리스 시험 모두 비등방성이 큰 직물에 대한 전단 평가를 수행하는 데 있어서 많은 편차를 나타내었다.

**Key Words** : 직물복합재료(woven fabrics), 면내전단거동(in-plane shear behavior), 편향인장시험(bias-extension test), 트렐리스 시험(trellis-frame test)

**1. 서론**

직물복합재료는 소재의 무게 대비 뛰어난 강도 및 강성을 가지기 때문에 충격 에너지 흡수용 헬멧이나, 비행기용 엔진

\*+ 한국기계연구원부설재료연구소 복합재료연구그룹, 교신저자(E-mail:wonohlee@kims.re.kr)

\* 한국기계연구원부설재료연구소 복합재료연구그룹

\*\* Northwestern University, U.S.A.

커버 및 로터 블레이드와 같은 우주 항공 분야 및 풍력 발전기 블레이드와 같은 에너지 분야등에서 활발히 이용되고 있다 [1,2]. 뿐만 아니라 직물복합재료의 면내전단변형에 의한 높은 성형성에 기인하여 복잡한 형상 및 대량 생산이 요구되는 자동차 분야에서의 배터리 트레이나 트렁크 바닥재 및 외관등에 응용하고자 노력이 진행되고 있다[3]. 따라서 직물복합재료를 이용한 최종제품의 생산에 있어서 설계 사이클과 비용 감소를 도모하기 위해서는 직물 복합재료의 정확한 기계적 거동을 이해하고 이에 따른 정교한 구성방정식이 요구된다[4].

일반적인 직물복합재료는 마이크로 미터(mm) 크기의 두께를 갖는 연속섬유의 다발로 이루어진 토우(tow)을 직조해서 만들어지고, 이를 이용한 대표적인 성형방법은 직물복합재료 판재를 가열하여 연화시켜 여기에 외력을 가하는 열성형법(thermoforming)이 이용되고 있다[5]. 특히 열가소성 직물 복합재료의 성형 공정은 수지에 유동성을 부여하기 위해 가열하는 히팅 공정, 가열된 프리프레그를 특정한 형태로 만드는 형상화 공정, 이후 냉각 공정으로 이루어 진다. 형상화 공정에서는 복잡한 곡면을 갖는 시트형태의 재료를 만들기 위해 진공압 성형(vacuum thermoforming)이나 금속분야에서 많이 사용되고 있는 매치 다이 포밍 (matched die forming)이나 다이아프램(diaphragm) 포밍이 활용되고 있다. 특히 이러한 형상화 공정 중에 직물 복합재료의 주된 변형 모드는 면내 전단 변형이다. 따라서 직물 복합재료의 면내 전단 변형의 정확한 이해가 선행되어야 최적의 성형 설계 조건을 찾을 수 있다.

직물 복합재료의 면내 전단 변형의 평가법으로는 주로 편향 인장 시험법과 트렐리스 시험법이 사용되고 있다. 편향 인장 시험법은 인장 방향에 대해 경사(warp)와 위사(weft)의 방향이 45도를 이루도록 한 직물 복합재료 사각 시편을 그림에 고정하여 힘과 변형길이를 측정하는 방법으로 장비 설계의 이점 때문에 널리 이용되고 있다. Harrison등[6]은 편향 인장 시험이 전단한계각(shear locking angle) 측정에 매우 유용하며 시편에 인여 인장력이 걸리지 않도록 해준다는 장점이 있다고 보고하였다. 그러나 편향 인장 시험은 시편 전체 영역의 변형이 불균일하고, 전단각의 측정을 위해서 마킹이나 이미지 분석이 요구되며, 전단변형속도를 조절하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 또한 장승환[7]은 편향 인장 시험의 미세 거동 측정을 통하여 토우의 간격 및 두께에 기인한 토우의 변형이 직물의 전단 거동에 미치는 영향에 관해 분석하였다.

트렐리스 시험법은 인장축에 대해 45도로 배향된 정사각형의 직물복합재료 시편을 사용하며 4개의 전단프레임을 이용하여 순전단 변형을 부과할 수 있도록 설계되어 있기 때문에 편향 인장 시험법에 비해 전단각과 전단력을 비교적 정확하고 직관적으로 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 트렐리스 시험을 통해서 시편 영역 전체에 걸쳐 균일한 변형을 부과할 수 있으며 면내 인장력과 전단 변형 속도를 조절할 수 있다[6]. 그러나 트렐리스 시험을 위해 특별히 고안된 치구가 필요하며 이에 따른 시편이 설치가 까다로운 편이다. 관련된 연구로서 Prodromou와 Chen[8]은 트렐리스 시험을 통해 토우의 기하구조가 전단한계각에 미치는 영향을 조사하였고, 강재훈

과 장승환[9]은 미세 관찰을 통해 트렐리스 시험과 편향 인장 시험에 따른 전단 변형의 차이를 규명하고자 하였다. 특히 Sharma등[10]은 테스트 방법에 따른 전단 거동의 차이는 트렐리스 시험에서 발생하는 인여 인장력에 기인한다고 설명하였다.

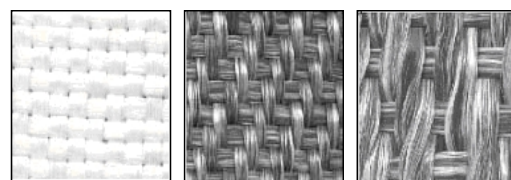
본 연구에서는 위와 같은 전단 물성 평가를 위한 시험법의 적용 및 활용 가능성과 한계를 제시하고자 다음과 같은 시험을 수행하였다. 재료의 등방 및 비등방성에 따른 효과를 살펴보고자 평직(plain weave), 균형 능직(balanced twill weave), 및 비균형 능직(unbalanced twill weave)의 세 종류의 유리 직물 복합재료를 고려하였다. 또한 편향 인장 시험에서의 시편의 길이비를 달리하여 초기 기하 조건이 전단 거동에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 뿐만 아니라 직물 복합재료의 전단각을 이론식, 직접측정법 및 이미지 분석법등을 이용하여 서로의 장단점을 비교하여 보았다. 더 나아가 전단력 커브의 트렐리스 시험에 의한 결과와의 비교를 통해 편향 인장 시험에 의한 전단 물성 측정법의 정확도를 평가하였다.

## 2. 시험 직물

본 연구에 사용된 직물은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 평직, 균형 능직 및 비균형 능직으로 Vetrotex Saint-Gobain사에서 제조된 유리섬유/PP 직물복합재료이며 Table 1에 물성을 나타내었다. 테스트를 통해 힘, 변위등을 측정하였고, 실시간으로 이미지를 얻어내었다. 실험에 사용된 직물들은 최근 자동차용 복합재료 판재용 재료로서 각광받고 있는 연속유리섬유 복합재료이며 대부분 열성형을 통해 최종제품으로 생산된다.

Table 1 Fabric properties

Type	Plain	Balanced twill	Unbalanced twill
Area density (g/m <sup>2</sup> )	743	1485	1816
Yarn linear density (tex)	1870	1870	2400
Thickness (mm)	1.2	2.0	3.3
Yarn count (picks/cm)			
Warp	1.95	5.56	3.39
Weft	1.95	3.75	1.52
Yarn width (mm)			
Warp	4.27	1.62	2.72
Weft	4.27	2.32	3.58



Plain weave Balanced twill weave Unbalanced twill weave

Fig. 1 Three types of woven fabrics.

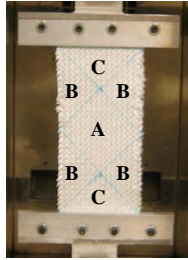


Fig. 2 A bias extension test sample.

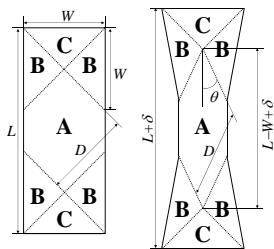


Fig. 3 Illustration of a fabric specimen under the bias-extension test.

### 3. 편향 인장 시험

Fig. 2와 같은 편향 인장 시험은 직물 복합재료의 비선형 순전단(pure shear) 물성을 측정하는 데 사용된다. 직물을 인장축에 대하여 45도의 방향을 갖도록 시험기에 장착하고 인장 시험을 수행하여 힘과 변위를 얻는다. 사용되는 시편의 크기는 넓은 범위의 순전단 거동 영역(A)을 얻기 위하여 인장 길이 대 폭의 비가 2:1 이상이 되도록 하고 있다. 편향 인장 시험 동안 인장 속도는 일정하게 유지되고 힘과 변위를 측정하고, 추가적으로 카메라를 설치하여 시편의 전단각 측정에 이용할 수 있다.

#### 3.1 전단각의 결정

Fig. 2에서 보듯이 인장 시험동안 직물 시편의 중심부(A)는 순전단 변형을 하게 된다. 영역 B의 전단각은 영역 A의 값의 반이 되며 영역 C에서는 어떠한 변형도 일어나지 않는다는 가정을 통해 시편의 전단각 및 전단력을 계산할 수 있기 때문에 편향 인장 시험법은 트렐리스 시험법의 대안으로 활용될 수 있다. 이와 같은 가정을 통해 편향 인장 시험의 기하 구조를 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 초기에 폭이 W이고 길이가 L인 직물이 δ만큼의 길이로 인장되었을 경우, 영역 A에서의 순전단 변형에 의해 각도 θ만큼 변하게 된다. 이를 고려하여 전단각 γ를 계산하면

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\theta = \frac{\pi}{2} - 2\cos^{-1}\left(\frac{L-W+\delta}{\sqrt{2}(L-W)}\right) \quad (1)$$

가 되고, Fig. 3에서  $D=(L-W)/\sqrt{2}$  이다.

다른 방식의 전단각 측정법은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 편향 인장 시험 시 사진을 기록하여 각 이미지 상에 투우의 방향에 따라 직선을 그어 경사와 위사가 이루는 각을 측정하여 직접적으로 전단각을 결정하는 방법이다. 이 방법은 가장 직관적인 방법이지만 오차가 포함될 염려가 있으며 매 순간마다 임의로 데이터를 샘플링해야 한다는 단점을 가지고 있다.

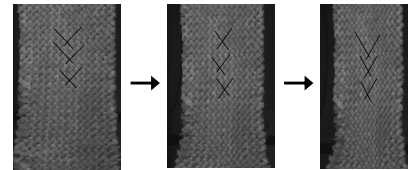


Fig. 4 Manual shear angle measurement.

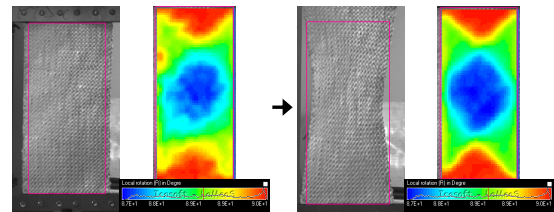


Fig. 5 Optical image measurement.

마지막 방법은 실시간 이미지 분석법을 이용하는 것이다. 앞서 설명한 직접 측정법은 측정하는 위치마다 편차가 존재하며 어느 위치가 균일한 순전단 거동을 보이는지 결정하기가 어렵다. 이러한 단점을 피하기 위해 Fig. 5와 같은 이미지 분석법을 활용할 수 있다. 본 연구에서는 이카소프트(IcaSoft)라는 이미지 분석 프로그램[11]을 이용하였다. 이와 같은 이미지 분석 프로그램은 일반적으로 금속 판재의 거동이나 성형성 테스트에서 많이 이용되는데 미세한 검은색의 아크릴 페인트를 시편에 뿌리고 이를 추적하여 변형률 값을 얻게 된다. 특히 능직과 같이 어두운 색상의 시편일 경우에는 흰색의 페인트가 이용되기도 한다.

#### 3.2 전단력의 결정

Fig. 3을 보면 편향 인장 시험 동안 변형을 하는 영역은 A와 B이다. 따라서 인장 길이 δ에 의해 발생하는 에너지는 모두 영역 A와 B에만 영향을 주게 된다. 앞서 설명한 편향 인장 시험의 가정 즉, 인장 시험동안 직물 시편의 중심부(A)는 순전단 변형을 하고 영역 B의 전단각은 영역 A의 값의 반이 되며 영역 C에서는 어떠한 변형도 일어나지 않는다는 조건을 고려하면 인장력 F에 의해 발생하는 에너지는

$$F \cdot d\delta = \tau(\gamma) \cdot A_A \cdot d\gamma + \tau(\gamma/2) \cdot A_B \cdot d(\gamma/2) \quad (2)$$

가 되고 식 (2)에서  $\gamma$ 는 전단변형률,  $A_A$ 는 영역 A의 초기 면적,  $A_B$ 는 영역 B의 초기 면적이고  $\tau(\gamma)$ 는 전단변형에 필요한 단위 면적당 토크량이다. 식 (1)로부터

$$d\gamma = -2d\theta = \frac{\sqrt{2}}{(L-W)\sin\theta} d\delta \quad (3)$$

가 되고  $A_A = (2LW - 3W^2)/2$  이고  $A_B = W^2$  이므로 이를 식 (3)과 함께 식 (2)에 대입하고  $\theta$ 와  $\gamma$ 간의 사인공식을 고려하여  $\tau(\gamma)$ 에 대하여 정리하면 아래와 같은 회귀식을 얻게 된다.

$$\tau(\gamma) = \frac{1}{2L-3W} \left[ F \left( \frac{L}{W} - 1 \right) \left( \cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \right) - W \tau \left( \frac{\gamma}{2} \right) \right] \quad (4)$$

또한 토크량은 전단력과  $\tau(\gamma) = F_{sh}(\gamma)\cos(\gamma)$ 의 관계에 있으므로 전단력은

$$F_{sh}(\gamma) = \frac{1}{(2L-3W)\cos\gamma} \left[ F \left( \frac{L}{W} - 1 \right) \left( \cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \right) - W F_{sh} \left( \frac{\gamma}{2} \right) \cos \frac{\gamma}{2} \right] \quad (5)$$

으로 결정된다. 식 (5)에서  $F_{sh}$ 는 단위 길이당 전단력을 의미하며 전단각에 대해 순차적으로 계산된다.

#### 4. 트렐리스 시험

Fig. 6과 같은 트렐리스 시험은 인장축에 대해서 45도로 배향된 정사각형 모양의 샘플을 사용하며 4개의 전단 프레임이 적절한 순전단 변형을 줄 수 있도록 설계되었다. 편향 인장 시험과는 달리 샘플의 변형 영역 전체가 전단 변형을 하기 때문에 상대적으로 데이터 처리 기법이 간단하고 정확한 전단 물성을 얻을 수 있다. [9]

인장 시험 동안 직물에 발생하는 전단각은 인장 길이  $\delta$ 에 대해

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\theta = \frac{\pi}{2} - 2\cos^{-1} \left( \frac{\sqrt{2}L_{frame} + \delta}{2L_{frame}} \right) \quad (6)$$

로 간단히 계산이 가능하며 앞서 설명한 방법과 같이 이미지 분석법으로도 얻을 수 있다.

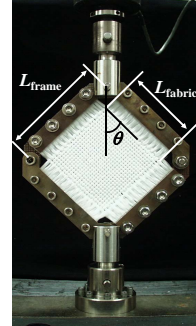


Fig. 6 Trellis-frame test.

또한 전단력은

$$F_{sh} = \frac{F L_{frame}}{2\cos\theta L_{fabric}^2} \quad (7)$$

으로서 트렐리스 시험 치구 프레임에 걸리는 에너지와 실제 직물에 걸리는 에너지의 등가원리를 이용하여 얻을 수 있다 [12].

#### 5. 실험 및 결과

본 연구에서는 서로 다른 길이비를 갖는 세 종류의 직물에 대해서 편향 인장 시험을 수행하였고 각각의 길이비에 대해서 Table 2에 정리하였다. 고려된 샘플의 크기는 같은 길이비에 대해서 다른 크기와, 같은 폭에 대해서 다른 길이비를 갖는 경우에 대해 실험하였다. 길이비가 큰 샘플은 전단 변형을 이루는 영역이 넓지만 좌우 끝단에서 구속되지 않은 토우의 개수 또한 상대적으로 많게 된다. 모든 편향 인장 시험은 상온에서 실시하였고, 인장 속도는 10mm/min으로 설정하였다. 시험 동안에 힘과 변위 데이터를 기록하였고 이와 동시에 이미지 촬영을 병행하였다. 이미지 촬영은 인장 시험기의 그림부에 부착되어 그림의 수직 거동과 동일한 속도로 움직이며 수행되었다.

Table 2 Sample size in the bias extension test

Type	Length (mm)	Width (mm)	Ratio (L:W)
Plain	230	115	2:1
	300	150	2:1
	300	100	3:1
	450	150	3:1
Balanced twill	240	120	2:1
	300	150	2:1
	300	100	3:1
	450	150	3:1
Unbalanced twill	200	100	2:1
	400	200	2:1
	300	100	3:1

트렐리스 시험은 240mm 크기의 직물에 대하여 245mm의 프레임을 사용하여 시험을 수행하였고, 인장 속도는 10mm/min 이었다. 불필요한 토우에 의해 발생하는 주름이나 압축 거동을 막기 위하여 전단 영역 외의 프레임에 고정되는 부위에서 힘을 받지 않는 방향의 토우들은 모두 제거하고 시험하여 끝단 효과에 의해 발생하는 잉여힘을 최소화하고자 하였다.

또한 시험전에 임의로 수차례 전단변형을 가하는 전처리 (mechanical conditioning)을 실시하여 정렬 불일치에서 기인하는 잉여 인장력[9]을 최소화하고자 하였다.

**5.1 전단각 측정법의 비교**

Fig. 7에 편향 인장 시험시, 세 가지의 전단각 측정법 (이론식에 의한 방법, 직접측정법, 이미지 분석법)에 의한 결과를 비교하여 도시하였다. 그림에 사용된 시편은 450mm x 150mm 평직이고 2:1 시편에 대해서도 거의 동일한 결과를 얻었다. 시험 결과, 이미지 분석법과 직접 측정법은 거의 동일한 결과를 나타내었으나 이론식에 의한 결과(식 (1))는 다른 양상을 보였다. 비교적 낮은 전단각인 30도 이내에서는 이론식에 의한 결과가 직접 혹은 이미지에 의한 측정 결과와 비슷하지만 전단각이 커질수록 많은 오차가 나타나게 된다. 따라서 이론식에 의한 전단각 측정법은 비교적 전단 변형이 적은 경우에 적용하는 것이 바람직하며 전단 변형량이 큰 경우에는 이미지 분석법을 이용하는 것이 정확한 전단각을 얻는 데 합당하다.

동일한 결과가 트렐리스 시험에 대해서도 보고되었다 [13]. 특히 평직인 경우 이미지 분석법에 의한 결과와 이론식 (6)에 의한 결과가 매우 일치하며 유효한 전단각의 범위 또한 약 50도 정도로 넓다. 그러나 비균형 능직인 경우 전단각이 33도 이상이 되면 두 방법에 의한 차이가 커진다고 밝힌바 있다.

**5.2 전단력 비교**

Fig. 8에 각각의 직물에 대한 편향 인장 실험 결과를 도시하였다. 세로축은 시험에서 얻은 인장력이며 각 샘플의 크기 및 길이비에 따라 다양한 편차를 보여준다. 이는 시험에 사용되는 직물의 크기를 고려하지 않고 단순히 인장력으로부터 전단력을 얻게 될 경우 나타나는 에러를 의미한다. 따라서 직물의 크기에 따른 편차를 보정하기 위해서는 식 (5)와 같은 평준화(normalized)된 전단력을 계산하여 비교하여야 한다.

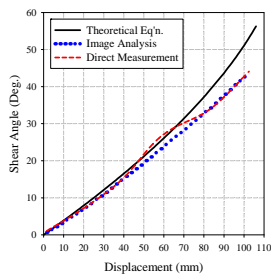


Fig. 7 Plot of shear angle vs displacement in bias-extension test.

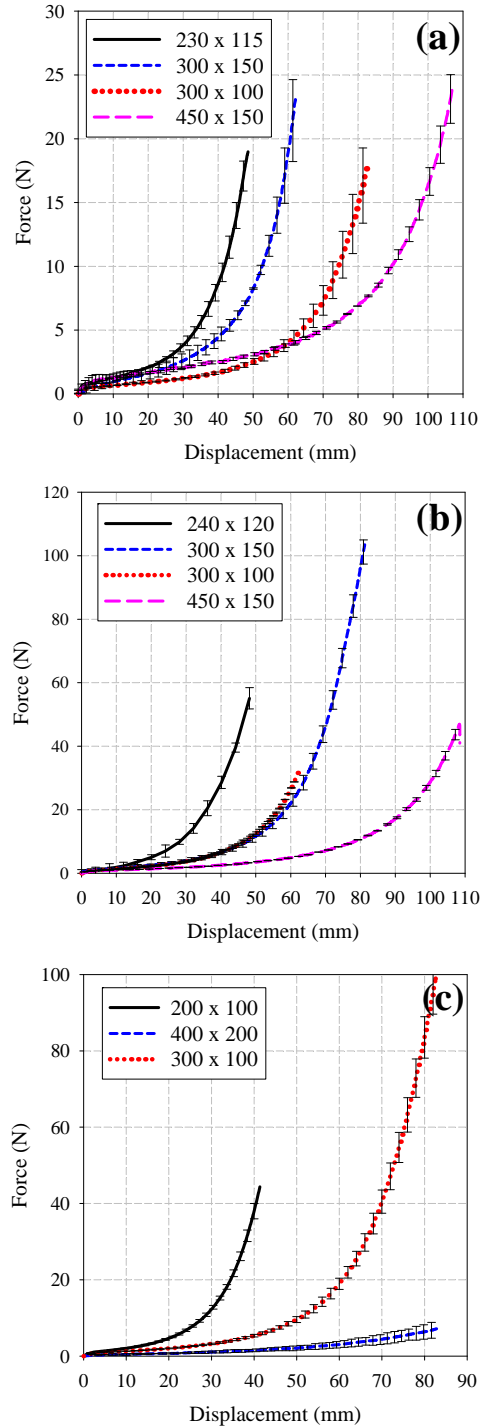


Fig. 8 Tensile force vs. crosshead displacement: (a) plain weave, (b) balanced twill, (c) unbalanced twill.

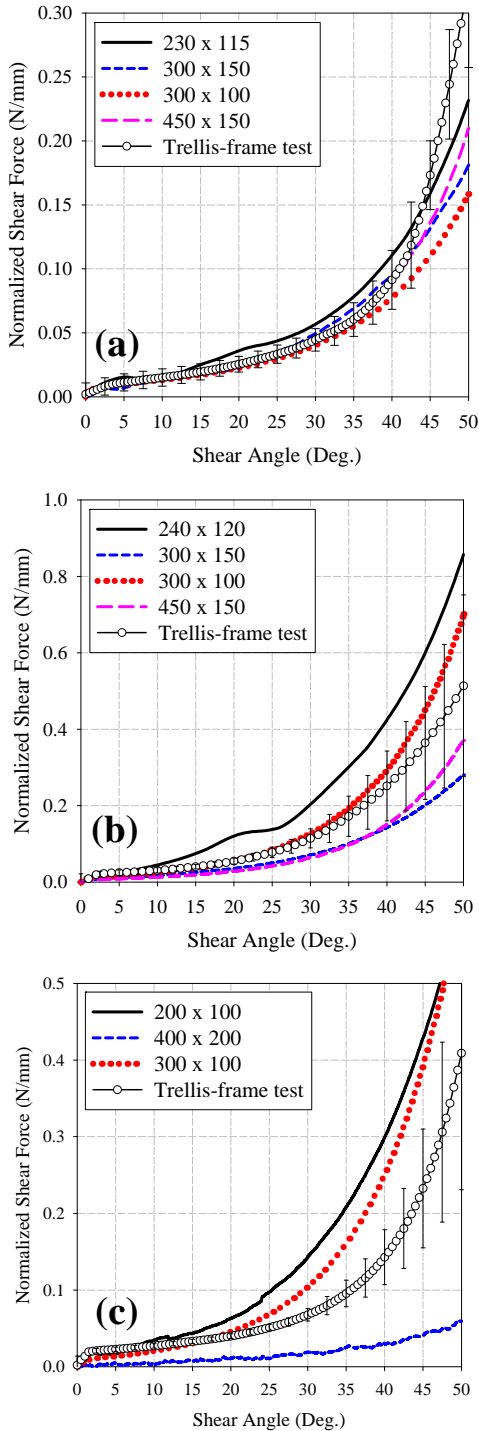


Fig. 9 Normalized shear force curves: (a) plain weave, (b) balanced twill, (c) unbalanced twill.

이론식 (1)에 의한 전단각, 식 (5)~(7)을 이용한 평균화된 전단력 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 트렐리스 시험의 경우 5회 시험을 실시한 데이터를 평균한 결과를 에러 바(error bar)와 함께 표기하였다. 우선 편향 인장 시험 결과를 살펴보면 평직의 경우 모든 샘플에 대해서 고른 균일성을 보여주고 있으며 트렐리스 시험에 의한 결과와 거의 일치하지만 반대로 비균형 능직의 경우 편차가 매우 큰 결과를 나타내고 있다. 트렐리스 시험의 경우에도 마찬가지로 직물의 비등방성이 커질수록 시험 간의 에러가 크게 나타났다. 특히 능직인 경우, 시험 샘플의 길이비에 무관하게 편차의 범위가 매우 크다. 이는 비등방 직물일수록 순수한 전단 거동뿐만 아니라 토우간 인장 및 뒤틀림이 크게 발생하는 데서 나타난다. 이러한 결과는 등방성 직물의 경우, 편향 인장 시험이 트렐리스 시험에 의한 결과에 필적할 정도로 신뢰성이 크며, 시험에 사용된 샘플의 길이비에 무관한 전단 물성 결과를 줄 수 있다는 것을 의미한다. 이는 등방성 직물의 경우, 두 시험에서 모두 고른 순수 전단 거동을 줄 수 있기 때문이다. 그러나 능직과 같은 비등방성 직물에 편향 인장 시험을 직접 적용하기에는 부적합하다는 것을 나타낸다.

## 6. 결론

본 연구에서는 평직, 균형능직, 비균형 능직의 면내 전단 물성 평가 비교를 위해 편향 인장 시험 및 트렐리스 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 이론식, 직접측정법 및 이미지 분석법등을 이용하여 전단각을 비교한 결과, 이론식에 의한 방법은 적은 전단 변형에 적용하는 것이 바람직하며 전단 변형량이 큰 경우에는 이미지 분석법을 이용하는 것이 유리하다. 또한 직물의 비등방성이 커질수록 전단 물성의 편차가 커지며 편향 인장 시험의 정확도 또한 같은 경향을 보인다.뿐만 아니라 평직과 같이 등방형 직물의 경우에만 측정 샘플의 길이비에 무관한 균일한 결과를 나타낸다. 따라서 비등방성이 큰 직물에 대한 보다 정교한 평균화 기법 및 전단 실험법 개발이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 GRL 과제인 “구조용 다기능성 마이크로/나노 복합재료 개발” 및 한국기계연구원 부설 재료연구소의 주요 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Rudd C.D., Turner M.R., Long A.C., and Middleton V.,

- “Tow Placement Studies for Liquid Composite Moulding,” *Compos. Pt. A: Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 30, 1990, pp. 1105.
- 2) Kong H., Mouritz A.P., and Paton R., “Tensile Extension Properties and Deformation Mechanism of Multiaxial Non-crimp Fabrics,” *Compos. Struct.*, Vol. 66, 2004, pp. 249.
  - 3) Long A.C., Wilks C.E., and Rudd C.D., “Experimental Characterisation of the Consolidation of a Commingled Glass/Polypropylene Composite,” *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 61, 2001, pp. 1591.
  - 4) 이원오, 변준형, Cao J., “비선형 인장-전단 거동을 고려한 직물복합재료의 비직교 구성방정식,” 한국복합재료학회 추계학술대회, 2008, pp. 123.
  - 5) Yu W.R., Zampaloni M., Pourboghra F., Chung K., and Kang T.J., “Sheet Hydroforming of Woven FRT Composites: Non-orthogonal Constitutive Equation Considering Shear Stiffness and Undulation of Woven Structure,” *Compos. Struct.*, Vol. 61, 2003, pp. 353.
  - 6) Harrison P., Clifford M.J., Long A.C., “Shear Characterization of Viscous Woven Textile Composites: A Comparison between Picture Frame and Bias Extension Experiments,” *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 64, 2004, pp. 1453.
  - 7) 장승환, “직물 복합재료의 드레이핑 미소 거동 관찰: 일 방향 편향 인장실험과 이축 인장실험,” 한국복합재료학회지, 제17권 제1호, 2004, pp. 38.
  - 8) Prodromou A.G. and Chen J., “On the Relationship between Shear Angle and Wrinkling of Textile Composite Preforms,” *Compos. Pt. A: Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 28, 1997, pp. 491.
  - 9) 강재훈, 장승환, “직물 복합재료의 드레이핑 미소 거동 관찰: 사진틀 전단실험,” 한국복합재료학회지, 제18권 제2호, 2005, pp. 13.
  - 10) Sharma S.B., Sutcliffe M.P.F., and Chang S.H., “Characterization of Materials Properties for Draping of Dry Woven Composite Material,” *Compos. Pt. A: Appl. Sci. Manuf.*, Vol. 34, 2003, pp. 1167.
  - 11) <http://www.techlab.fr/strain.htm#icasoft>
  - 12) Peng X.Q., Cao J., Chen J., Xue P., Lussier D.S., and Liu L., “Experimental and numerical analysis on normalization of picture frame tests for composite materials,” *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 64, 2004, pp. 11.
  - 13) Lomov S.V., Willems A., Verpoest I., Zhu Y., Barburski M., Stoilova T., “Picture frame of woven fabrics with a full-field strain registration,” *Text. Res. J.*, Vol. 76, 2006, pp. 243.