

# 탄소섬유 건직물의 일방향 편향 인장실험과 이축 인장실험

장승환\* · 전성식\*\*

## Bias Extension and Biaxial Tests for Carbon Dry Fabrics

Seung Hwan Chang, Seong Sik Cheon

**Key Words** : Bias Extension Test, Biaxial Test, Microscopic Observation, Lock-up Phenomenon, Shear Angle, Tow Parameters

### ABSTRACT

This paper aims to observe the micro-mechanical behaviour of tow geometry during deformation of dry woven carbon-fibre fabric. With the increment of shear angle fabric experiences 'lock-up' phenomenon. In this paper, deformation of micro-mechanical parameters such as tow interval, change in tow amplitude and wavelength are investigated. To observe the micro-deformation of the fabric structure, appropriate specimens from bias extension and biaxial tests are sectioned and observed under the microscope. It was found that different loading conditions cause geometric differences in the tow architecture.

### 1. 서론

섬유강화 복합재료는 우수한 비강성과 비강도 특성에 기인하여 자동차나 비행기 산업 등 많은 분야에 폭넓게 사용되어왔다. 특히 직물 복합재료 (Fabric Composites)는 우수한 성형성과 유연성 (Flexibility)으로 인해 열성형 (Thermoforming)이나 RTM (Resin Transfer Moulding) 공정을 이용하여 복잡한 형상의 제품을 생산하는 곳에 적절히 사용될 수 있다. 재료의 기본 구조와 변형 경향이 성형된 최종 복합재료 구조물의 물성에 주요한 영향을 미칠 수 있기 때문에 이중 곡률 (Double Curvature)을 가지는 복잡한 구조물의 성공적인 성형을 위해서는 재료의 드레이핑 거동 (Draping Behaviour)을 이해하는 것이 중요하다. 직물 복합재료 (Fabric Composites)의 토우 (Tow) 크기, 직조 형태 (Weave Style) 그리고 재료의 구성 물질들이 재료의 드레이핑 능 (Drapeability)에 미치는 효과를 이해하기 위해서는 섬유 (Fibre)나 토우 (Tow)구조의 변형 경향에 대한 미세적 (Microscopic) 연구가 필수적이다. 토우 구조의 변형에 관한 미세적 관찰 (Microscopic

Observation)은 재료가 하중을 받을 때 발생하는 토우 슬립 (Tow Slippage)과 섬유 잠김 (Fibre Lock-up) 현상의 이해하는데 중요한 계기를 마련할 수 있다. 섬유 잠김 현상 (Fibre Lock-up Phenomenon)은 주어진 전단 변형을 받은 후 토우들간의 상호작용이 재료의 부가적인 전단 변형을 억제하는 현상을 말한다. 위와 같은 필요성에 의해 직물 복합재료의 직조 형태 (Woven Fabric Geometry)의 변형 형상을 모델링하기 위한 연구가 수행되어왔다. 장승환 [1, 2]은 직물 복합재료를 이용한 헬멧 구조의 여러 부위에서 얻은 시편을 이용하여 각 부위별 토우의 미세 구조의 변화를 관찰하였으며, 건직물을 이용한 사진틀 실험을 통해 각 하중 조건에 따른 토우의 미세 거동을 관찰하였다. Hofstee[3] 등은 평직 (Plain Weave) 복합재료의 열성형 (Thermoforming) 공정 중 안 구조 (Yarn Geometry)를 전단 변형과 직물 인장 변형 (Fabric Stretching Deformation)의 함수로 표현하였으며, 안 (Yarn)의 파장과 진폭을 측정하고 해석 해 (Analytical Solution)와 비교하였다. 또한 해석을 위해 전단 변형 (Shear Deformation), 안 인장 (Yarn Stretching) 뿐만 아니라 안의 주름 현상 (Crimp Phenomenon) 이

\* 중앙대학교 공과대학 기계공학부 (교신저자)

\*\* 국립 공주대학교 기계공학부

고려되었다. McBride[4] 등은 직물 구조를 표현하기 위한 안의 폭 (Width), 안 간격 (Spacing), 직물 두께 (Fabric Thickness) 등의 항으로 구성된 4 개의 조화함수의 단위 셀 (Unit Cell)을 정의하였다. 본 논문에서는 변형 중 새틴 직조 직물 (Satin Weave Fabric)에서 발생하는 토우 형상의 변화를 일방향 편향 인장실험 (Bias Extension Test), 이축 인장실험 (Biaxial Test)과 같은 하중 조건을 겪은 시편의 현미경 관찰 (Microscopic Observation)을 통해서 분석하였다. 재료 내부에 발생하는 힘의 변화는 서로 다른 인장 실험 (일방향 편향 인장실험, 이축 인장실험) 시에 토우들의 재배열에 영향을 미칠 수 있으며, 결국 전반적인 재료 거동에 영향을 주게 된다. 드레이핑 공정 중 발생하는 평면 내 하중 (In-Plane Forces)은 인장 실험에서 얻은 힘의 변화의 분석을 통해 예측될 수 있을 것이다. 본 논문에서는 각 인장 실험 중에 발생하는 토우 구조의 기하학적 파라미터 (Geometric Parameters)의 변화를 관찰하여 정량화하고, 각 인장 실험을 통해 얻은 결과들을 서로 비교하였다.

## 2. 실험

본 연구에서는 건직물 (Dry Fabric)을 이용하여 두 가지 서로 다른 인장 실험 (일방향 편향 인장 실험, 이축 인장실험)을 수행하였다. 실험에 사용된 재료는 탄소섬유 건직물 (Tenax HTA 6k, five harness satin weave)이다. 모든 실험에서 전단각 (Shear Angle)은 변형전 재료에 표시한 직선들의 최종 변형 각도를 계산하여 측정하였다.

### 2.1 일방향 편향 인장실험

Fig. 1(a)은 일방향 편향 인장실험 (Bias Extension Test)의 시편 체결 방법과 인장 방향을 표시한 개념도이다. 시편의 크기는  $200 \times 75 \text{mm}^2$ 로 하였고 편향각 (Bias Angle)은  $[\pm 45^\circ]$ 이다. 시편 양 끝단을 고정하고 x 방향으로  $60 \text{mm/min}$ 의 속도 ( $v_x$ )로 인장실험을 수행하였다.

### 2.2 이축 인장실험

직물 시편의 직교 방향으로 동시에 인장을 가하는 이축 인장실험 (Biaxial Test)의 개념도를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 이축 인장실험에 대해서는 구체적인 표준이 없기 때문에 일방향 편향 인장실험에 사용된 시편과 동일한 길이와 폭을 가지는 십자 형태 (Cruciform)의 시편을 이용하였다. 이축 인장실험용 시편의 좌/우측 부분은 각각 속도  $v_x$ 로 이동하며, 상/하 부분은 각각 속도  $v_y$ 로 이동한다. 인장 시험 중 재료 내부에 발생하는 응력의

변화를 관찰하기 위해 두 방향 (x, y)의 속도비를 조절하여 실험을 수행하였다. 주 방향 (Major Direction: X-dir.) 상대 속도 ( $v_x$ )는  $60 \text{mm/min}$ 를 사용하였으며 주방향과 부방향 (Minor Direction: Y-dir.)의 속도비 (Speed Ratio:  $v_y/v_x$ )는  $-0.25$ 로 설정되었다. 속도비  $-0.25$ 는 시편이 양의 주방향 (x-방향)으로  $60 \text{mm/min}$ 인장시 음의 부방향 (-y-방향)으로  $15 \text{mm/min}$ 으로 거동함을 의미한다. 본 실험에서는 일방향 편향 인장실험에 비해 높은 하중이 발생되었으며, 재료의 최고 전단각 (Shear Angle)이  $60^\circ$  정도였다.

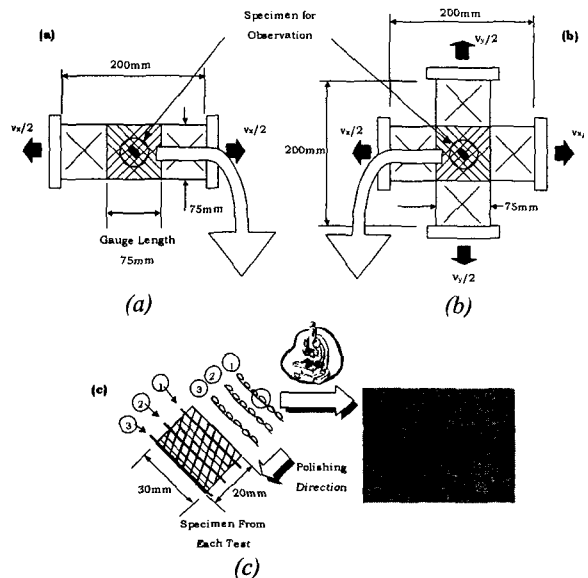


Fig. 1. Test arrangement; (a) bias extension test; (b) biaxial test; (c) sectioning details.

## 3. 현미경 관찰

### 3.1 관찰시편

각각의 인장실험을 마친 후 건직물 시편의 변형 형상의 유지하기 위해 시편의 변형 상태에서 표면에 고분자 수지를 도포하여 경화시켜서 변형 형상을 유지할 수 있도록 하였다. 상온에서 12 시간 동안 경화된 인장 시편을 토우의 방향으로  $30 \times 20 \text{mm}^2$  크기로 잘라서 (Fig. 1(c)) 현미경 관찰 시편을 제조하기 위한 급형에 관찰 단면이 평행하도록 위치시킨 후 고분자 수지를 급형내로 주입하여 경화 시켰다. 현미경 관찰 면을 얻기 위해 여러가지 등급의 사포 와 다이아몬드 입자 표면처리를 하였다.

### 3.2 데이터 확보

관찰에 사용된 모든 시편의 토우 단면 구조의 이미지를 관찰 및 저장하기 위해 디지털 사진기가

부착된 저출력 현미경 (Low Powered Microscope)을 이용하였다. 시편 단면의 토우의 기하학적 형상을 정량화 하기 위해 각 토우의 외곽 경계 (Perimeter)를 따라 토우 한 개당 60 여개의 점 데이터를 Matlab 코드를 이용하여 토우 외곽을 이루는 타원 정보를 확보하여 등가 토우두께와 폭을 측정하였다. 또한 Fig. 2 에 보이는 바와 같이 토우 간 거리 (Tow Spacing) 등과 같은 다른 파라미터의 변화값도 측정하였다.

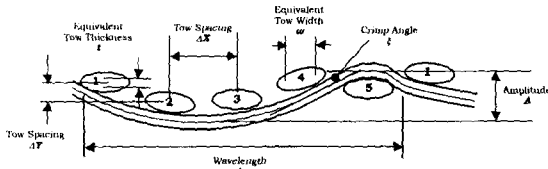


Fig. 2 Definition of tow geometry parameters.

각 방향 토우간 거리 ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ )는 인접 토우의 중심간 거리의 절대값으로 정의하였으며, 횡방향 토우의 중심선 (Centre Line)으로 구성된 파형의 최상 및 최하점 간의 거리 (Peak-to-Peak)를 측정하여 진폭 (Amplitude)으로 정의하였다.

#### 4. 시편 관찰 결과

##### 4.1 현미경 관찰 결과

Fig. 3 은 일방향 편향 인장실험 (Bias Extension Test) 후 전단각에 대한 변형된 토우 구조의 현미경 사진이다. 전단각이 작은 경우 각 토우간의 미끄러짐 현상이 다소 발견 되었지만 과도한 토우간 접촉현상은 발견되지 않았다. 반면, 전단각이 큰 경우 토우간 접촉이 점차 심화되어 토우 형상의 변화에 직접적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 이 단계부터 횡방향 토우의 단면 형상이 타원 형태에서 불규칙한 형상으로 변화하기 시작하며, 다른 토우와의 접촉이 없는 5 번째 토우를 제외한 토우에서 토우 단면의 파단 현상 (Break-up)이 관찰되었다. 이측 인장실험 (Biaxial Test)의 경우 전반적인 토우 변형 형상은 일방향 편향 인장실험과 유사하였으나 토우간의 과도한 접촉 현상은 더 작은 전단각에서 관찰되었다. 두 가지 실험 결과에서 모두 뚜렷한 토우 두께의 증가가 관찰되었다.

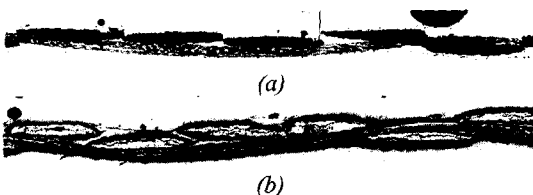


Fig. 3. Micrographs of the evolution of tow structure with shear angle for a bias extension test specimen; (a) Initial geometry before shear (b) 30° sheared specimen (c) 60° sheared specimen (d) 70° sheared specimen.

Fig. 4 는 인장 실험 시 발생하는 전단각에 대한 y-방향 토우 간격 (Tow Spacing)  $\Delta Y$ 의 변화를 두 가지 실험에 대해 비교한 결과이다. 모든 값은 전단을 받지 않은 초기 토우 간격  $\Delta Y_0$ 에 대한 정규화 (Normalisation) 값으로 표시 되었다.

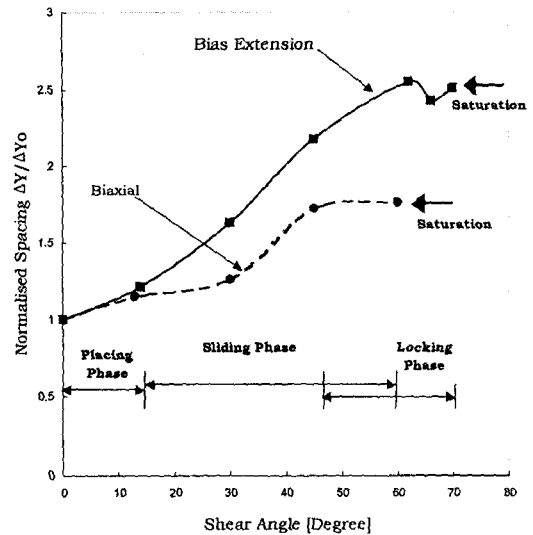


Fig. 4. Variation of normalised out-of-plane tow spacing  $\Delta Y/\Delta Y_0$  with shear angle.

Fig. 5 와 Fig. 6 은 변형 전의 값에 대한 토우 두께와 종방향 토우 진폭의 변화 경향을 보여준다. 재료의 전단변형이 시편의 파손 영역까지 진행됨에 따라 두께방향으로의 기하학적 변수는 계속 증가하는 경향을 나타내었다. 작은 전단각 영역 (~15°)에 대해서는 Fig. 4 ~ Fig. 6 에서 보이는 바와 같이 토우 구조의 작은 변화만이 관찰되었다. 이 영역에서의 작은 토우 변형은 직물 섬유에 가해지는 하중이 상대적으로 작음에 기인한 것으로 판단된다. 시편의 변형 경향의 다음 단계인 '미끄러짐 영역 (Sliding Phase)'에서는 토우 구조의 주요한 변화가 관찰되었으며, 토우간의

미끄러짐과 겹침현상이 관찰되었다 (Fig. 3(c)).

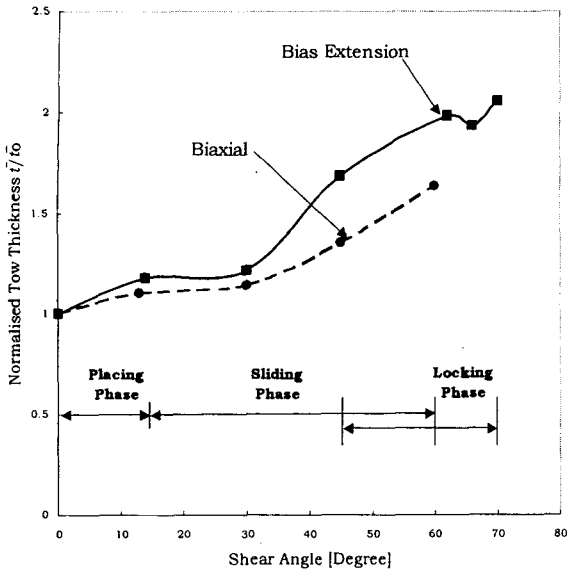


Fig. 5. Variation of normalised tow thickness  $\bar{t}/\bar{t}_0$  with shear angle.

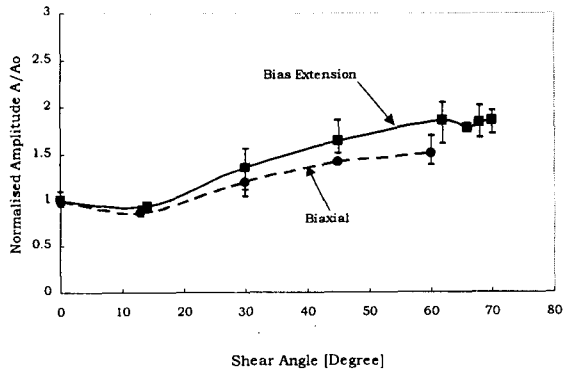


Fig. 6. Variation of normalised amplitude  $A/A_0$  of longitudinal tow with shear angle.

마지막으로 ‘잠김 영역 (Locking Phase)’에서는 전단각의 증가에 따른 토우들의 잠김 현상에 기인한 변형의 포화 현상이 관찰되었다. 변형의 포화 현상은 y-방향 토우 간격의 변화에서는 뚜렷하게 관찰되었으나, 토우 두께의 관찰 결과에서는 상대적으로 포화 현상이 두드러지지 않았다. 이와 같은 거동은 토우 두께의 경우, 잠김 현상에 의해 토우들이 상대운동을 자유롭게 할 수 없는 조건에서도 토우 방향으로의 하중에 의해 추가적인 토우 두께의 증가가 가능하기 때문으로 판단된다. Fig. 3(d)에 보이는 토우 단면의 파손 현상은 이러한 하중 증가의 예 중 하나이며, 토우 방향으로의 증가된 하중은 인접한 토우들 사이의 압축력을 증가시켜 결국에는 토우 구조의 파손

현상을 일으키는 것으로 판단된다. Figs. 4~6에서 보이는 바와 같이 이축 인장실험 (Biaxial Test)을 통해 얻은 시편의 전단각에 대한 재료의 두께방향 변형량들은 일방향 편향 인장실험 (Bias Extension Test)을 통해 얻은 시편에 비해 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 이축 인장실험이 재료 내부에 더 큰 평면 힘 (In-Plane Forces)을 발생시켜 두께 방향의 변형을 억제하는 것에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 재료 변형의 관찰 결과는 변형상의 잠김 현상이 발생하는 전단각 비교를 통해서도 유추할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문은 두 가지 서로 다른 인장실험을 통해 전단 변형을 겪은 직물 복합재료의 미소역학적 변화 경향을 현미경 관찰을 통해 제안하였다. 높은 전단각 영역에서의 잠김 현상을 포함한 재료의 변형은 직물의 변형 기구 (Deformation Mechanisms)에 의해서 해석되었다. 현미경 관찰을 통해 전단 변형을 겪은 직물 복합재료의 토우 간격 (Tow Spacing), 토우 두께 등의 여러 가지 기하학적 파라미터들을 측정하였다. 일방향 편향 인장실험 (Bias Extension Test)과 이축 인장실험의 경우 잠김 현상은 각각 약 60°와 45°에서 발생하였다. 이러한 변형 상의 차이는 재료의 전단 변형 중 평면 토우 하중이 재료 변형에 미치는 효과가 크다는 것을 의미한다.

## 후 기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-003-D00009).

## 참고문헌

- (1) 장승환, “직물 복합재료를 이용한 드레이핑 헬멧의 미소 변형 관찰,” 한국복합재료학회지 Vol. 16, No. 4, 2003, pp. 29-35.
- (2) 장승환, “건직물 복합재료의 미세거동 관찰: 사진틀 실험,” 한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집, 2003, pp. 211-214.
- (3) Hofstee, J., de Boer, H and van Keulen, F., “Elastic stiffness analysis of a thermo-formed plain-weave fabric composite - Part I: geometry observation,” *Composite Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 1041-1053.
- (4) McBride T. M. and Chen J., “Unit-cell geometry in plain-weave fabrics during shear deformations,” *Composites Science and Technology*, Vol. 57, 1997, pp. 345-351.