

## 論文

### 직물 복합재료의 드레이핑 미소 거동 관찰 : 일방향 편향 인장실험과 이축 인장실험

장승환<sup>\*+</sup>

### MICROSCOPIC OBSERVATION OF DRAPED COMPOSITE MATERIALS : Bias Extension and Biaxial Tests

Seung-Hwan Chang<sup>\*+</sup>

#### ABSTRACT

This paper aims to correlate the micro-mechanical behaviour of tow geometry with applied in-plane forces during deformation of dry woven carbon-fibre fabric. These in-plane forces lead to differences in tow reorganisation during deformation and so changes in the way in which 'lock-up' occurs. In this paper, deformation of micro-mechanical parameters such as tow interval, crimp angle, 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. The variation in deformed tow geometry with shear angle is fitted using a simple parametric model.

#### 초 록

본 논문의 목적은 탄소섬유 건직물의 토우 구조의 미소 거동과 변형 중의 평면 하중과의 관계를 규명하는 것이다. 평면 하중은 변형 중에 토우들을 재배치하며, 결국에는 잠김 현상을 유발하게 된다. 본 논문에서는 토우 간격, 주름각 등의 미소 변형 변수들을 관찰하기 위해 일방향 편향 인장실험과 이축 인장실험을 겪은 시편들을 전단각에 따라 분류하여 현미경을 이용하여 변형 경향을 관찰하였다. 전단각에 따른 변형된 토우 구조의 변화를 간단한 설계 변수 모델을 이용하여 근사하였다.

**Key Words** : 잠김현상(lock-up phenomenon), 일방향 편향 인장실험(bias extension test), 이축 인장실험(biaxial test), 현미경 관찰(microscopic observation), 전단각(shear angle)

#### 1. 서론

섬유강화 복합재료는 우수한 비강성과 비강도 특성에 기 인하여 자동차나 비행기 산업 등 많은 분야에 폭넓게 사용 되어왔다. 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 구조 물의 물성에 주요한 영향을 미칠 수 있기 때문에 이중 곡

\*+ 중앙대학교 기계공학부, 교신저자(E-mail: phigs4@cau.ac.kr)

률(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 미시적 연구가 필수적이다. 토우 구조의 변형에 관한 미시적 관찰은 재료가 하중을 받을 때 발생하는 토우 슬립(tow slippage)과 섬유 잠김(fibre lock-up) 현상을 이해하는데 중요한 계기를 마련할 수 있다. 섬유 잠김 현상은 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 현상을 모델링하기 위한 연구가 수행되어 왔다. Hofstee와 van Keulen[1]은 드레이핑 된 평직(plain weave) 복합재료의 3차원 기하를 묘사하는 관계식을 제안하였으며, 토우의 국부적 변형을 평가하는 섬유 다발 구조를 제시하였다. Vandeuren[2] 등은 2차원 직조 구조를 위한 3차원 기하학적 표현을 제안하여 직물 복합재료의 강성과 강도의 모델링을 위한 기저로 사용될 수 있도록 하였다. Hofstee[3] 등은 평직 복합재료의 열성형공정 중 안 구조를 전단 변형과 직물 인장 변형의 함수로 표현하였으며, 안의 파장과 진폭을 측정하고 해석 해와 비교하였다. 또한 해석을 위해 전단 변형, 안 인장 뿐만 아니라 안의 주름 현상이 고려되었다. McBride[4] 등은 직물 구조를 표현하기 위한 안의 폭, 안 간격, 직물 두께 등의 항으로 구성된 4개의 조화함수의 단위 셀(unit cell)을 정의하였다. 이러한 단위 셀은 전단을 받는 평직에 적용이 가능하며, 기하학적 매개변수는 전단각(shear angle)의 함수로 표현될 수 있다. 본 논문에서는 변형 중 새틴 직조 직물에서 발생하는 토우 형상의 변화를 일방향 편향 인장실험(bias extension test), 이축 인장실험(biaxial test)과 같은 하중 조건을 겪은 시편의 현미경 관찰을 통해서 분석하였다. Fig. 1은 전단 변형 중 인접 토우간에 발생하는 측면 압축력과 상하 방향의 토우에 발생하는 수직 압축력의 개념도이다. 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 있다. 본 논문에서는 각 인장 실험 중에 발생하는 토우 구조의 기하학적 변수의 변화를 관찰하여 정량화하고, 재료 내부에서 발생하는 막력(membrane forces)을 기하학적 변화와 관련지었으며, 각 인장 실험을 통해 얻은 결과들을 서로 비교하였다.

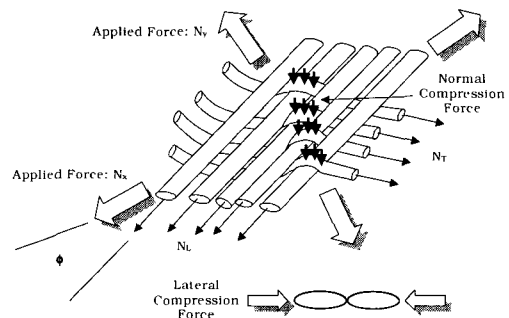


Fig. 1 Supposed forces in fabric material during deformation.

## 2. 실험

본 연구에서는 건직물(dry fabric)을 이용하여 두 가지 서로 다른 인장 실험(일방향 편향 인장실험, 이축 인장실험)을 수행하였다. 실험에 사용된 재료는 탄소섬유 건직물(Tenax HTA 6k, five harness satin weave)이며, 재료의 물성은 Table 1과 같다. 실험의 세부 사항은 아래와 같으며, 모든 실험에서 전단각은 변형전 재료에 표시한 직선들의 최종 변형 각도를 계산하여 측정하였다.

Table 1 Properties of Tenax HTA 6k, five harness satin weave

Areal weight [ $g/m^2$ ]	370
Tow width [mm]	2.03
Centre-line tow spacing [mm]	2.17
Binder	2.5% per each side (5% total)

### 2.1 일방향 편향 인장실험

Fig. 2(a)는 일방향 편향 인장실험의 시편 체결 방법과 인장 방향을 표시한 개념도이다. 시편의 크기와 모양은 ASTM 표준(D1774-93)에 의거해  $200 \times 75 \text{ mm}^2$ 로 하였고 편향각은  $[\pm 45^\circ]$ 이다[5]. 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 인장실험의 개념도를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 이축 인장실험에 대해서는 구체적인 표준이 없기 때문에 일방향 편향 인장실험에 사용된 시편과 동일한 길이와 폭을 가지는 십자 형태의 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 mm/min를 사용하였으며 주방향과 부방향(minor direction: y-dir.)의 속도비(speed ratio:  $v_x/v_y$ )는 -0.25로 설정되었다. 속도비 -0.25는 시편이 양의 주방향(x-방향)으로 60 mm/min 인장시 음의 부방향(-y-방향)으로 15 mm/min으로 거동함을 의미한다. 본 실험에서는 일반방향 인장실험에 비해 높은 하중이 발생되었으며, 재료의 최고 전단각이 60° 정도였다.

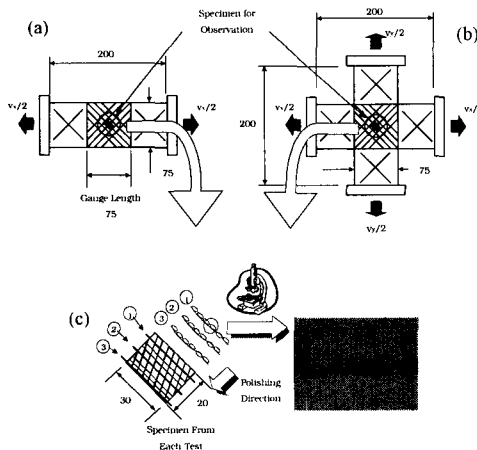


Fig. 2 Test arrangement; (a) bias extension test; (b) biaxial test; (c) sectioning details.

Table 2 Specimens for microscopic observations

Method Shear angle	Biaxial	Bias extension
Without shear	○	○
15°	○	○
30°	○	○
45°	○	○
60°	○	○
62°		○
66°		○
70°		○

### 3. 현미경 관찰방법

#### 3.1 관찰시편

여러 가지 인장실험으로부터 현미경 관찰을 위한 시편들을 준비하였다. 각각의 인장실험을 마친 후 건직물 시편

의 변형 형상의 유지하기 위해 시편의 변형 상태에서 표면에 고분자 수지를 도포하여 경화시켜서 변형 형상을 유지할 수 있도록 하였다. 상온에서 12시간 동안 경화된 인장시편을 토우의 방향으로 30×20 mm<sup>2</sup> 크기로 잘라서(Fig. 2(c)) 현미경 관찰 시편을 제조하기 위한 금형에 관찰 단면이 평행하도록 위치시킨 후 고분자 수지를 금형내로 주입하여 상온에서 12시간, 80 °C에서 5시간동안 경화 시켰다. 현미경 관찰 면을 얻기 위해 여러가지 등급의 사포 표면처리(#120, #400)와 6 μm 다이아몬드 입자 표면처리를 하였으며, 최종적으로 경면을 얻기 위해 1 μm 다이아몬드 입자를 이용한 표면 처리를 수행하였다. 모든 현미경 관찰 시편에 대해 Fig. 2에서 보인 바와 같이 연마 작업을 통하여 시편 두께 방향으로 2 mm의 간격을 가지는 3개의 관찰면을 준비하였다.

#### 3.2 현미경 관찰을 통한 데이터 확보

관찰에 사용된 모든 시편의 토우 단면 구조의 이미지를 관찰 및 저장하기 위해 디지털 사진기가 부착된 저출력 현미경을 이용하였다. 시편 단면의 토우의 기하학적 형상을 정량화하기 위해 각 토우의 외곽 경계를 따라 토우 한 개당 60여개의 점 데이터를 Matlab 코드를 이용하여 확보하였다(Fig. 3). 폐곡선을 정의하는 이 점들의 집합은 아래 식 (1)과 같이 표현된다.

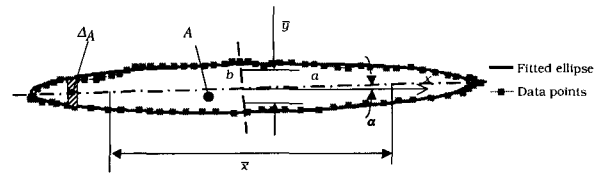


Fig. 3 Ellipse fitted to the raw data points.

$$P_i = \left\{ \begin{matrix} x_i \\ y_i \end{matrix} \right\} \quad (1)$$

이 점들의 집합을 이용하여 토우의 단면을 중심점 ( $x_c, y_c$ )을 가지는 타원으로 근사하였으며, 중심점 ( $x_c, y_c$ )은 다음 식 (2)로 표현되는 평면 상에서의 Green 정리 [6] 를 이용하여 폐곡선의 면적 중심으로 정의 되었다.

$$x_c = \frac{\frac{1}{6} \sum_i (x_{i+1} + x_i) a_i}{\frac{1}{2} \sum_i a_i} \quad y_c = \frac{\frac{1}{6} \sum_i (x_{i+1} + x_i) a_i}{\frac{1}{2} \sum_i a_i} \quad (2)$$

여기서  $a_i$ 는  $(x_i, y_i) - (x_{i-1}, y_{i-1})$ 으로 정해진다. 이 중심점은 최소 자승법에 의해 중심점, 주/부축 및 타원의 경사각 (a)

등을 조절하여 주어진 점들에 대한 최적의 타원을 근사하기 위한 초기 점으로 이용된다. Fig. 3 에 표시된  $a$ 와  $b$ 는 각각 근사된 타원의 장축과 단축을 나타내며,  $x, y$ 는 일반적인 좌표의 방향을 나타낸다.

전단각이 증가함에 따라 토우 내부에 발생된 내부 하중에 의해 토우의 변형 형상은 점차 불규칙해지므로 타원으로 근사된 치수의 신뢰도가 저하된다. 따라서 다음 식 (3)을 이용하여 토우 단면 형상에 대한 등가 토우 폭  $\bar{w}$  (equivalent tow width)과 토우 두께  $\bar{t}$  (tow thickness)를 도입하여 정량화하였다.

$$\bar{w} = \frac{2}{A} \sum_i |x'_i - x_c| \cdot \Delta A \quad \bar{t} = \frac{2}{A} \sum_i |y'_i - y_c| \cdot \Delta A \quad (3)$$

미소면적  $\Delta A$ 는 각각의 데이터 점들로 구성된 면적 요소이며,  $A$ 는 폐곡선으로 정의되는 총 면적이며 (Fig. 3), 윗식에서  $x_c$ 와  $y_c$ 는 선택된 토우의 중심점을 나타낸다.

횡방향 토우의 단면 사진으로부터 얻은 토우 폭과 토우 두께 이외에 Fig. 4에 보이는 바와 같이 토우간 거리(tow spacing) 등과 같은 다른 변수의 변화값도 측정하였다.

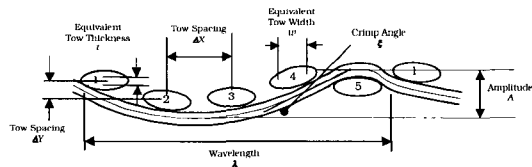


Fig. 4 Definition of tow geometry parameters.

각 방향 토우간 거리( $\Delta X, \Delta Y$ )는 인접 토우의 중심간 거리의 절대값으로 정의하였으며, 종방향 토우의 파장은 첫번째 토우(Fig. 4)의 왼쪽부터 다음번 첫번째 토우의 동일 위치까지의 거리로 정의하였다. 횡방향 토우의 중심선으로 구성된 파형의 최상 및 최하점 간의 거리를 측정하여 진폭으로 정의하였다. 토우의 단면 변수의 신뢰도를 위해 모든 측정치는 15개의 토우(한 단면당 5개의 토우 × 한 샘플당 3개의 단면)에서 측정된 값의 평균값을 사용하였으며, 종방향 토우의 진폭과 파장은 각 단면에서 측정된 3개의 값의 평균 값을 취하였다.

## 4. 결과

### 4.1 하중결과

본 논문에서 다루어진 시편 인장 실험(일방향 편향 인장 실험, 이축 인장실험) 중에 측정된 힘-변위 관계는 토우방

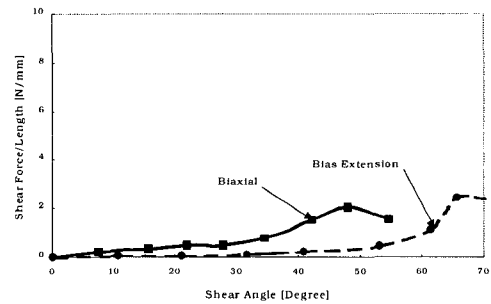
향의 평면 응력(in-plane stresses)을 유추하기 위해 Sharma 등[7]에 의해 제안된 결과를 이용하였다.

이축 인장실험의 경우 단위길이당 부가 하중  $N_x = F_x/L$ 과  $N_y = F_y/L$ ( $L$ 은 하중이 작용하는 직물 시편의 길이)은 모어원(Mohr's circle)을 이용하여 분해되어 토우방향으로 작용하는 단위길이당 전단력  $N_s$ 을 계산하는데 사용되었다.

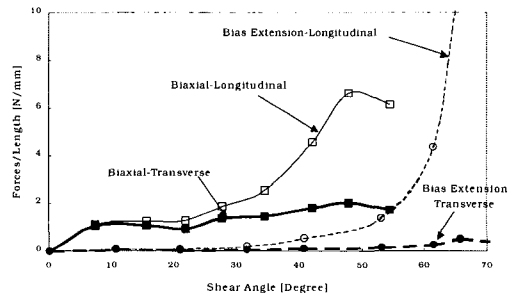
$$N_s = (N_y - N_x) \sin \phi \cos \phi \quad (4)$$

여기서  $\phi$ 는 토우가  $x$ 축과 이루는 각도이며  $N_L$ 와  $N_T$ 는 각각 토우 방향과 토우의 수직 방향으로 작용하는 단위 길이당 힘을 나타낸다.

$$N_L = N_x \cos^2 \phi + N_y \sin^2 \phi \quad N_T = N_x \sin^2 \phi + N_y \cos^2 \phi \quad (5)$$



(a)



(b)

Fig. 5 Variation of resolved line load with shear angle for biaxial and bias extension tests; (a) shear line load( $N_s$ ) (b) longitudinal( $N_L$ ) and transverse line loads( $N_T$ ).

이와 같은 하중식은  $N_y = 0$  조건을 부가하면 일방향 편향 인장실험에도 동일하게 적용될 수 있다. 분해된 단위 길이당 하중의 전단각에 따른 변화값을 Fig. 5에 나타내었다. 일방향 편향 인장실험의 경우 단위 길이당 전단력은 전단각이  $55^\circ - 60^\circ$  일때 급격히 증가하였으며, 이축 인장실험의 경우에는 전단각이  $30^\circ$ 와  $35^\circ$  사이일때 급격한 증가를

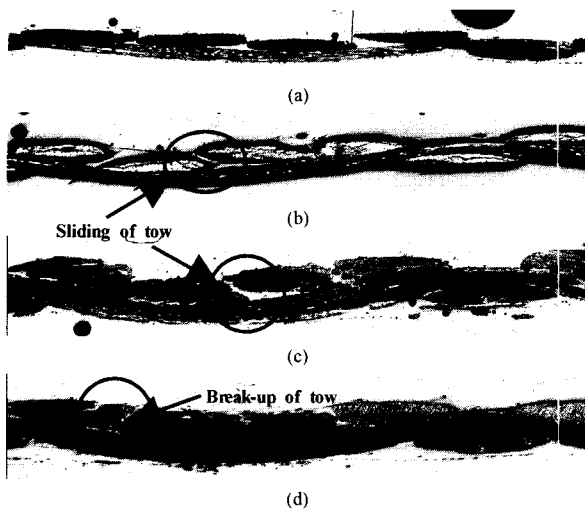


Fig. 6 Micrographs of the evolution of tow structure with shear angle for a bias extension test specimen; (a) Initial geometry before shear (b) 30° sheared specimen (c) 60° sheared specimen (d) 70° sheared specimen.

나타내었다. 전단각의 변화에 따른 각 방향의 하중 변화량을 Fig. 5(b)에 나타내었다. Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 이축 인장실험 시편은 일방향 편향 인장실험에 비해 토우 방향과 토우에 수직인 방향으로 매우 큰 하중을 전달하는 것을 알 수 있었다. 상기 실험 결과를 통해서 서로 다른 인장실험에 의해 발생하는 하중의 변화는 토우 구조의 변화를 야기시킬 것으로 판단된다.

## 4.2 현미경 관찰결과

인장 실험 후 각 시편의 전단 변형에 따른 토우의 변형을 관찰하기 위해 현미경을 이용한 관찰을 수행하였으며, 토우 변형량의 효과적인 비교를 위해 토우 두께, 토우의 진폭 및 파장 등의 '토우 변형(tow deformation)'과 토우 간격(tow spacing) 등의 '토우간 변형(inter-tow deformation)'으로 나누어 관찰 하였다. Fig. 6은 일방향 편향 인장실험 후 몇 가지 선택된 전단각에 대한 변형된 토우 구조의 현미경 사진이다. 전단각이 증가함에 따라 x-방향 토우 간격  $\Delta X$ 는 감소하며, 종방향과 횡방향 토우 사이의 간격은 증가한다. 전단각이 작은 경우(Fig. 6(b)) 각 토우간의 미끄러짐 현상이 다소 발견 되었지만 과도한 토우간 접촉현상은 발견되지 않았다. 반면, 전단각이 큰 경우(Fig. 6(c), (d)) 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 5번째 토우를 제외한 토우에서 토우 단면의 파단 현상이 관찰되었다(Fig.

6(d)). 이축 인장실험의 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.

## 4.3 토우 구조 변화의 정량화

여러 가지 인장 실험을 통해 얻은 시편의 현미경 관찰 결과의 전단각에 대한 변형량을 정량화하고 비교하였다. 특히 두 가지 인장 조건을 받는 시편의 서로 다른 평면 하중이 재료의 토우 구조의 변형에 미치는 영향을 비교하였다. Fig. 7은 인장 실험 시 발생하는 전단각에 대한 y-방향 토우 간격  $\Delta Y$ 의 변화를 두 가지 실험에 대해 비교한 결과이다. 모든 값은 전단을 받지 않은 초기 토우 간격  $\Delta Y_0$ 에 대한 정규화 값으로 표시 되었다. Fig. 8, 9는 변형 전의 값에 대한 상대 토우 두께와 종방향 토우 진폭의 변화 경향을 보여준다. 상기 그림의 y축 값은 각각의 물리량을 변형 전 값(아래첨자 0로 표시)으로 나눈 정규화 값으로 표현 하였다. 재료의 전단변형이 시편의 파손 영역까지 진행됨에 따라 두께방향으로의 기하학적 변수는 계속 증가하는 경향을 나타내었으며, 변형 경향에 따라 '정착 영역(placing phase)', '미끄러짐 영역(sliding phase)' 그리고 '잠김 영역(locking phase)'으로 구분하였다. 작은 전단각 영역( $\sim 15^\circ$ )에 대해서는 Fig. 7~9에서 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'에서는 토우 구조의 주요한 변화가 관찰되었으며, 이 영역에서는 토우간의 미끄러짐과 겹침(overlapping) 현상이 관찰되었다 (Fig. 6(c)). 마지막으로 '잠김 영역'에서는 전단각의 증가에 따른 토우들의 잠김 현상(lock-up phenomenon)에 기인한 변형의 포화 현상(saturation)이 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. 6(d)에 보이는 토우 단면의 파손 현상(break-up phenomenon)은 이러한 하중 증가의 예 중 하나이며, 토우 방향으로의 증가된 하중은 인접한 토우들 사이의 압축력을 증가시켜 결국에는 토우 구조의 파손 현상을 일으키는 것으로 판단된다.

Fig. 7~9에서 보이는 바와 같이 이축 인장실험을 통해 얻은 시편의 전단각에 대한 재료의 두께방향 변형량들은 일방향 편향 인장실험을 통해 얻은 시편에 비해 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 이축 인장실험이 재료

내부에 더 큰 평면 힘을 발생시켜 두께 방향의 변형을 억제하는 것에 기인한 것으로 판단된다. 더구나 Fig. 7에서 보인 바와 같이 이축 인장실험의 경우 잠김 현상은 전단각이 약 45° 일때 시작하는데 반해 일방향 편향 인장 실험의 경우에는 이보다 높은 60° 근처에서 발생하는 것으로 미루어보아 이축 인장실험의 경우 재료 내부에 더 큰 하중이 발생한다는 가정은 타당한 것으로 판단된다.

이러한 재료 변형의 관찰 결과는 Fig. 5에서 보인 전단력의 증가와 관련되며, 전단력이 갑자기 증가하는 전단각이 변형상의 잠김 현상이 발생하는 전단각과 잘 일치한다. 이와 같은 관찰 결과는 평면 하중이 전단 변형중인 재료 내부에서의 토우들의 재배열(reorganisation)에 미치는 영향, 하중에 대한 재료의 응답 및 잠김 거동에 대한 영향을 설명해준다.

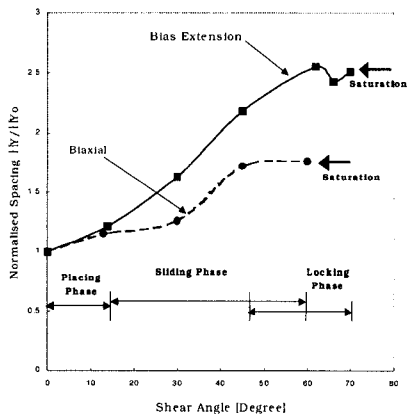


Fig. 7 Variation of normalized out-of-plane tow spacing  $\Delta Y/Y_0$  with shear angle.

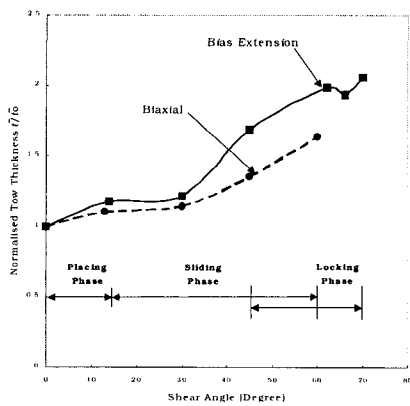


Fig. 8 Variation of normalized tow thickness with shear angle.

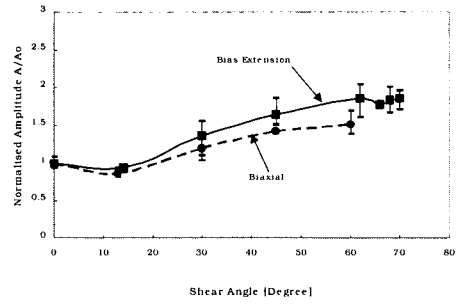


Fig. 9 Variation of normalized amplitude  $A/A_0$  of longitudinal tow with shear angle.

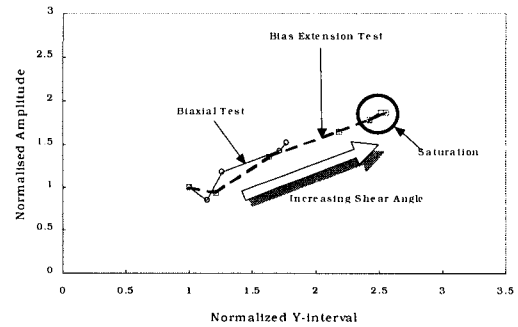


Fig. 10 Correlation between Y-directional tow interval and Amplitude of longitudinal tow.

### 5. 토우 구조 변화의 상관관계

현미경 관찰결과 몇 개의 변형 인자(deformation parameters)는 서로 긴밀한 관계를 가지고 있음이 밝혀졌으며, 이러한 인자들간의 관계는 서로 다른 전단 환경을 가지는 여러 가지 실험에서 토우 구조의 특별한 거동을 이해하는데 도움이 되며, 특히 전단 변형에 따른 잠김 현상을 결정하는데 유익한 정보를 제공할 수 있다. 재료의 변형 중 토우의 변형 인자들간의 관계를 규명하기 위해 모든 변형 인자들은 변형전 재료의 값을 이용하여 정규화 되었다. Fig. 10은 y-방향 토우 간격(y-directional tow interval)과 종방향 토우의 진폭 간의 관계를 보여준다. 두 개의 인장실험(이축 인장실험, 일방향 편향 인장실험)에 대한 y-방향 토우 간격과 종방향 토우의 진폭은 서로 선형적인 관계를 가짐을 알 수 있었다. 이 결과는 직물 시편의 전단 변형이 심화됨에 따라 y-방향 토우 간격과 종방향 토우의 진폭이 함께 증가함을 나타내며, 이 두가지 변형 거동은 서로 밀접한 관계가 있음을 나타낸다. 높은 전단각 영역에서는

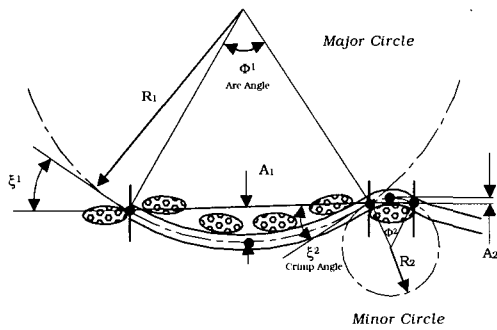


Fig. 11 Circular arc model of deformed tow shape.

(일방향 편향 인장실험의 경우 62°, 66°, 70° 그리고 이축 인장실험의 경우 45°와 60°) 두 개의 변형 거동이 별다른 변화를 나타내지 않고 포화되는 경향을 나타내었다. 이와 같은 관찰로부터 일방향 편향 인장실험의 경우 50°~60° 사이에서, 이축 인장실험의 경우 30°~45° 사이에서 재료의 잠김 거동이 발생한다고 판단되어지며, 이는 재료에 가해지는 하중이 재료의 과도한 변형 후에 횡방향 하중으로 전환되어 재료의 전단 변형 대신 평면 수직방향 하중(out of plane forces)을 서로 엇갈린 두 방향의 토우 사이에 발생시키기 때문으로 판단된다.

### 6. 변수 모델

전단각에 따른 종방향 토우의 기하학적 변형 형상을 특성화하기 위해 Fig. 11에 보이는 바와같이 각각의 종방향 토우의 파형을 두 개의 원호(major, minor arcs)로 근사하였다[3,8]. 원호를 이용한 종방향 토우의 변형 형상 관찰을 통해 최대 주름각(maximum crimp angle)을 평가하였다. 종방향 토우의 주원호는 5번째 토우의 오른쪽 끝에서 다음 5번째 토우의 왼쪽 끝을 연결하는 원호로 정의되며, 부원호는 5번째 토우의 왼쪽 끝에서 오른쪽 끝을 연결하는 원호로 정의된다. 각 원호는 종방향 토우의 중심선과 두개의 끝점 및 중심점을 지나는 원의 일부로 형성된다. 상기 방법으로 정의된 두 개의 원을 이용하여 Fig. 11에 보인 바와 같이 곡률 반경  $R_1$ ,  $R_2$ 와 원호각  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  그리고 종방향 토우의 진폭  $A_1$ ,  $A_2$ 를 계산하였다.

일방향 편향 인장실험과 이축 인장실험을 통해 얻은 시편의 현미경 사진으로부터 전단각에 대한 곡률 반경의 변화량을 Fig. 12에 나타내었다. 곡률 반경은 전단을 받기 전 시편의 값으로 정규화 되었다. Fig. 12에서 보이는 바와 같이 각 시편의 곡률 반경은 전단각이 증가함에 따라 급격하게 감소하는 것을 확인하였다. 주원의 곡률 반경이 초반부에 상대적으로 작은 변형만을 가지는 것은 전단을 받는 재

료의 변형 단계 중 초반기에 해당하는 '정착 영역'에 관련된 것으로 판단된다. 전단각이 증가함에 따라 시편의 곡률 반경은 잠김 현상이 발생할 때까지 감소한다. 전단각에 따른 주, 부 원호각의 변형 경향을 Fig. 13에 나타내었으며, 이 또한 곡률 반경의 변형 형태와 유사함을 알 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13에 표시된 굵은 선은 주변형 곡선(master curves)이며 최소 자승법을 이용하여 각 원에 해당하는 측정값을 근사한 결과이다. 전단각에 따른 종방향 토우의 변형 변수의 최소 자승법에 사용한 함수들은 아래와 같은 삼각함수가 제안되었다.  $R_i(\theta)$ 와  $\Phi_i(\theta)$ 는 각각 근사된 곡률반경과 원호각을 나타낸다:

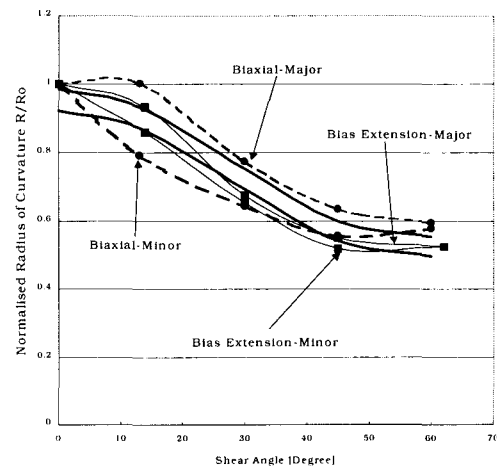


Fig. 12 Variation of normalised radius of curvature with shear angle.

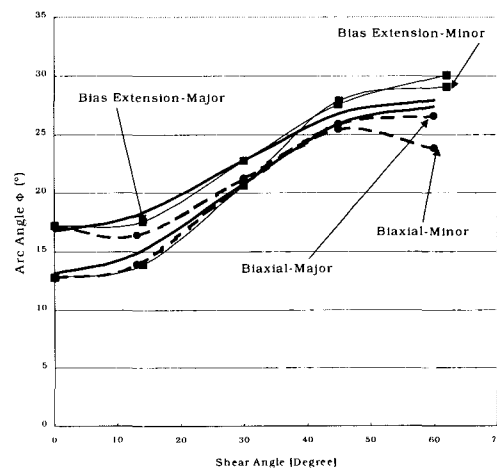


Fig. 13 Variation of arc angle with shear angle.

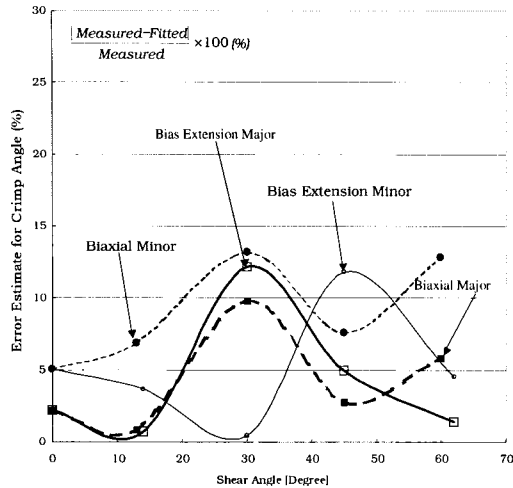


Fig. 14 Error in estimating the crimp angle using the parametric model.

$$R_i(\theta) = \epsilon_i \left( \frac{R_{max} + R_{min}}{2} + \frac{R_{max} - R_{min}}{2} \cos \frac{\theta}{\theta_i} \pi \right), i = 1, 2 \quad (6)$$

$$\Phi_i(\theta) = \eta_i \left( \frac{\Phi_{max} + \Phi_{min}}{2} + \frac{\Phi_{max} - \Phi_{min}}{2} \cos \frac{\theta}{\theta_i} \pi \right), i = 1, 2$$

수식에 사용된 아래 첨자  $i$ 는 각각 주원(1: major circle)과 부원(2: minor circle)을 나타내며,  $\theta_i$ 는 각각의 인장실험에서 측정된 최대 측정각을 나타낸다. 이축 인장실험의 최대 측정각은  $60^\circ$ 이며, 일방향 편향 인장실험의 최대 측정각은  $62^\circ$ 이다. 변수  $\epsilon_i$ 와  $\eta_i$ 는 각각의 근사 계획(fitting scheme)을 위한 전이요소(shifting factors)이며,  $R_{max}$ ,  $R_{min}$ ,  $\Phi_{max}$ ,  $\Phi_{min}$ 는 각각 최대, 최소 곡률 반경과 최대, 최소 원호각을 나타낸다. 근사 함수에 사용된 각 계수와 전이요소를 Table 3에 나타내었다.

주름각의 크기는 복합재료 적층판의 압축 강도를 예측하는데 중요한 정보를 주므로 직물 복합재료의 변형 시 전단각에 대한 주름각의 변형 경향을 이해하는 것은 매우 중요하다. Fig. 14는 측정된 최대 주름각과 식 (6)에서 제안된 원호각의 1/2 값을 비교하였다. 식 (6)으로 근사된 원호에 근거한 주름각 평가치는 실제 측정치와 작은 오차를 가짐을 알 수 있었으며, 측정된 토우 진폭과 근사된 원호로부터 계산된 진폭과도 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

따라서 제안된 단순 변수 근사 모델(simple parametric fitting model)은 재료가 전단 변형을 겪을 때 재료 내부의 토우 구조의 기하학적 변화를 잘 묘사하는 것으로 판단된다.

Table 3 Coefficients of the fitted functions

	Coefficients/ Shifting factors	Major(1)	Minor(2)
$R_i(\theta)$	$\epsilon_i$	0.985	0.923
	$R_{max} (mm)$	29.10	10.85
	$R_{min} (mm)$	16.31	5.84
$\Phi_i(\theta)$	$\eta_i$	0.989	1.029
	$\Phi_{max} (^\circ)$	28.308	26.673
	$\Phi_{min} (^\circ)$	16.952	12.734

### 결론

본 논문은 두 가지 서로 다른 인장실험(이축 인장실험, 일방향 편향 인장실험)을 통해 전단 변형을 겪은 직물 복합재료의 미소역학적 변화 경향을 현미경 관찰을 통해 제안하였다. 높은 전단각 영역에서의 잠김 현상을 포함한 재료의 변형은 직물의 변형 기구에 의해서 해석되었다. 현미경 관찰을 통해 전단 변형을 겪은 직물 복합재료의 토우 간격, 토우 두께 등의 여러 가지 기하학적 변수들을 측정하였다. 각각의 실험 방법에 의해 발생하는 서로 다른 하중 조건에 따른 변형 경향의 차이를 관찰하였으며, 전단각에 따른 토우의 변형 경향을 분석하여 재료의 변형을 '정착 영역', '미끄럼 영역' 그리고 '잠김 영역' 등 세 가지 변형 영역으로 나누었다. 일방향 편향 인장실험과 이축 인장실험의 경우 잠김 현상은 각각 약  $60^\circ$ 와  $45^\circ$ 에서 발생하였다. 이러한 변형 상의 차이는 재료의 전단 변형 중 평면 토우 하중이 재료 변형에 미치는 효과가 크다는 것을 의미한다. 전단 변형에 대한 종방향 토우의 기하학적 변형량을 특성화하기 위해 원과 간단한 근사 함수를 이용하여 측정값들을 근사하였으며, 제안된 근사식으로 계산된 곡률 반경과 원호 각과 같은 변형 변수를 측정값과 비교하였다.

### 후기

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

### 참고문헌

- 1) Hofstee, J. and van Keulen F., "3-D geometric modelling of a draped woven fabric," *Composite Structures*, Vol. 54, 2001, pp. 179-196.



- 2) Vandeurzen Ph., Ivens J. and Verpoest I., "A three-dimensional micromechanical analysis of woven-fabric composites: I. Geometric analysis," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, 1996, pp. 1303-1315.
- 3) Hofstee, J., de Boer, H and van Keulen, F., "Elastic stiffness analysis of a thermo-formed plain-weave fabric composite - Part 1: 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.
- 5) ASTM D1774-93
- 6) John C. Russ, *The image processing handbook, third edition*, IEEE PRESS, October, 1998, Chap. 8.
- 7) Sharma, S. B and Sutcliffe, M. P. F., "Material characterisations in the draping of woven composites," *Composites Part A*, submitted, 2002.
- 8) Newton, A., Georgallides, C. and Ansell, M.P. "A geometrical model for a two-layer woven composite reinforcement fabric," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, 1996, pp. 329-337.