

論文

직물 복합재료의 드레이핑 미소 거동 관찰: 사진틀 전단실험

강재훈*, 장승환**

MICROSCOPIC OBSERVATION OF DRAPED COMPOSITE MATERIALS: Picture Frame Test

Jae-Hoon Kang*, Seung-Hwan Chang**

ABSTRACT

In this paper deformation of micro-mechanical parameters such as tow interval, tow thickness and change in tow amplitude are investigated by using dry fabrics (Five-harness satin weave) under shear deformation. To evaluate the observation results according to the generated in-plane forces in the material, bias extension, biaxial test results are compared with. It was found that a picture frame test with a misaligned fibre orientation angle shows large differences in deformation between tensile and compressive tow directions.

초 록

본 논문에서는 전단 변형을 받은 새틴 건직물을 이용하여 토우간격, 토우 두께, 토우 진폭변화 등의 토우 파라미터의 미소 변형을 관찰하였다. 재료 내부에 발생한 평면 하중에 따른 관찰 결과를 평가하기 위해 일방향 편향 인장실험과 이축 인장실험 결과와 비교하였다. 불균일한 하중분포를 유발하는 정렬 불일치각을 가지는 재료의 사진틀 전단실험 결과 인장방향과 압축방향의 토우에서와 다른 변형 거동을 보이는 것을 확인하였다.

Key Words: 드레이핑(draping), 토우 간격(tow interval), 정렬 불일치각(misaligned fibre orientation angle), 사진틀 전단실험 (picture frame test)

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 우수한 비강성과 비강도 특성에 기인하여 자동차나 비행기 산업 등 많은 분야에 폭넓게 사용되어 왔다. 특히 직물 복합재료 (Fabric Composites)는 우수한 성형성과 유연성으로 인해 열성형 (Thermoforming)이나 RTM (Resin Transfer Moulding) 공정을 이용한 복잡한 형상의 제품 성형에 적절히 사용되고 있다. 재료의 기본 구조와 변형 경향이 성형된 최종 복합재료 구조물의 물성에 주요한 영향을 미칠 수 있기 때문에 이중 곡률을 가지는 복잡한 구조물의 성공적인 성형을 위해서는 재료의 드레이핑 (Draping) 거동을 이해하는 것

이 중요하다. 드레이핑이란 반쯤 경화된 복합재료 혹은 건직물 복합재료 등의 재료가 불규칙한 형상에 적합해질 수 있는 특성 및 제반 공정을 말한다. 직물 복합재료의 토우 (Tow) 크기, 직조 형태 그리고 재료의 구성 물질들이 재료의 드레이핑 능력 (Drapeability)에 미치는 효과를 이해하기 위해서는 섬유나 토우 구조의 변형 경향에 대한 미시적 연구가 필수적이다. 이러한 필요성에 의해 직물 복합재료의 직조 형태의 변형 형상을 모델링하기 위한 연구가 수행되어 왔다. 장승환[1-2]은 주자직 복합재료의 일방향 인장실험과 이축인장실험을 통해 직물 구조의 전단변형에 따른 미소 토우구조의 변형에 관한 관계를 규명하였으며, 복잡한 3차원 구조인 헬멧으로의 드레이핑 성형

* 중앙대학교 건축학부 조교수

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

후 헬멧 구조 각 부분의 서로 다른 전단변형 및 하중 조건에 따른 토우 구조의 미소 변형을 관찰하였다. 이와 같은 실험적 접근 뿐 만 아니라 직물 복합재료의 단위 구조에 대한 해석적 연구도 수행되었는데, Hofstee[3] 등은 드레이핑 된 평직 복합재료의 3차원 기하를 묘사하는 관계식을 제안하였으며, 토우의 국부적 변형을 평가하는 섬유 다발 구조 (Fibre Bundle Architecture) 를 제시하였다. Hofstee[4] 등은 평직 복합재료의 열성형 공정 중 안(Yarn) 구조를 전단 변형과 직물 인장 변형의 함수로 표현하였으며, 안의 파장과 진폭을 측정하고 해석해와 비교하였다. 또한 해석을 위해 전단 변형, 안 인장 뿐 만 아니라 안의 굴곡 (Crimp) 현상이 고려되었다. McBride[5] 등은 직물 구조를 표현하기 위한 안의 폭, 안 간격, 직물 두께 등의 향으로 구성된 4개의 조화함수의 단위 셀 (Unit Cell)을 정의하였다. 이러한 단위 셀은 전단 변형 및 하중을 받는 평직에 적용이 가능하며, 기하학적 매개변수는 전단각 (Shear Angle)의 함수로 표현될 수 있다. 성형 공정중 직물 복합재료 미세구조의 변형과 그에 따른 물성의 변화에 관한 연구도 수행되었는데, 장승환 [6] 등은 고분자 폼 (Foam)과 평직 탄소섬유/에폭시 복합재료로 구성된 샌드위치 구조재를 진공백 성형 공정을 통해 제작하는 경우 발생할 수 있는 직물 토우구조의 변화에 따른 샌드위치 구조재의 압축 및 인장 물성을 예측하고 이러한 샌드위치 구조재가 굽힘하중을 받을 경우 국부적으로 발생하는 기계적 특성에 대한 연구를 수행하였다. 전성식 [7] 등은 서로 다른 적층 조건을 가지는 직물 복합재료의 압축 시편을 이용한 압축 특성을 연구하여 직조 구조와 적층 각도에 따른 기계적 물성을 비교하였다.

본 논문에서는 주자직 탄소섬유 건직물을 이용하여 사진틀 전단실험을 통해 재료 내부에 발생하는 전단변형에 따른 미세토우 형상의 변화를 관찰하였으며, 재료 내부에 발생하는 하중의 조건과 연관시켰다. 사진틀 전단실험에 의한 재료 내부의 변형 경향을 재료 내부에 발생한 하중의 조건과 연관시키기 위해 이축 인장실험 및 일방향 편향 인장실험(Biaxial, Bias Extension)의 결과와 비교하였다.

재료 내부에 발생하는 힘의 변화는 상기에 언급한 서로 다른 인장실험 시 토우들의 재배열에 영향을 미칠 수 있으며, 결국 전반적인 직물 거동에 영향을 주게 된다. 드레이핑 공정 중 발생하는 평면 내 하중은 인장실험에서 얻은 하중 변화의 분석을 통해 예측될 수 있다. 본 논문에서는 사진틀 전단실험 중에 발생하는 토우 구조의 기하학적 파라미터의 변화를 관찰하여 정량화하고, 재료 내부에서 발생하는 막력 (Membrane Forces)을 기하학적 변화와 관련지었으며, 상기에 언급한 서로 다른 인장실험을 통해 얻은 결과들과 서로 비교하였다. 또한 사진틀 전단실험 중 발생한 정렬 불일치각에 따른 토우구조의 서로다른 변형 형상에 대한 현미경 관찰 결과를 제시하였다.

2. 사진틀 전단실험 (Picture Frame Test)

본 연구에서는 건직물 (Dry Fabric)을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 재료는 탄소섬유 5매 주자직 (Tenax HTA 6k) 이며, 재료의 물성은 Table 1과 같다. 모든 실험에서 재료의 전단변형에 의한 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)

사진틀 전단실험의 시편 치수와 실험 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 시편의 크기는 200×200mm 이며, 시편과 고정구 사이의 미끄러짐을 방지하기 위해 시편의 네 면에 보 형태의 압축 치구를 이용하였다. 시편을 실험 치구에 고정된 후 인장 시험기 (Instron 5584)에 장착하였다. 인장 속도는 다른 실험 (일방향 편향 인장실험, 이축 인장실험) 결과[1] 와의 비교를 위해 60 mm/min을 사용하였다. 실험 결과 재료의 중앙 부분은 균일한 전단 변형이 발생하였으나, 경우에 따라 실험치구 쪽으로부터 주름 (Wrinkle) 현상과 같은 재료의 국부적 변형이 발생하는 것을 확인하였다. 이와 같은 현상은 재료를 고정 치구에 장착시 의도적이지 않은 정렬각 불일치에 기인하는 것으로 판단되며, 이러한 고정 치구와 시편과의 정렬의 불일치가 재료의 변형에 미치는 효과를 알아보기 위해 직물의 토우 방향과 고정 치구에 장착되는 방향과의 불일치각으로 정의되는 (Fig. 1 참조) 정렬 불일치각 (Misalignment Angle)이 2.5°인 시편을 준비하여 실험을 수행하였다. 또한 실험 결과를 바탕으로 원래 정렬 시편이 의도적인 정렬 불일치각을 가진 시편과 동일한 변형 거동 (5장에서 제시될 각방향 토우의 서로 다른 변형 형상)을 보이는 것을 발견하였다. 이와 같은 관찰로부터 본 시편의 정렬 불일치각이 1° 정도 발생 한 것으로 판단하였다. 건직물 재료가 전단 변형을 할 때 실험 방법 및 전단각에 따른 재료 내부의 토우 변형 경향을 확인하기 위해 Table 2에 보이는 바와 같이 여러 가지 시편을 준비하였으며, 사진틀 전단실험 결과를 기존 인장실험 (일방향 편향 인장실험, 이축 인장실험)의 결과와 비교하였다. Fig. 2는 실험 중 각 토우에 발생하는 하중과 인근 토우간에 발생하는 측면 압축력 (Lateral Compressive Forces)과 상하 방향의 토우에 발생하는 수직 압축력 (Normal Compressive Forces)의 개념도이며, 재료 내에서 발생하는 이러한 하중은 서로 다른 인장실험 (일방향 편향 인장실험 및 이축 인장실험)과 사진틀 전단실험에 대해 서로 다른 값을 가질 것으로 예상할 수 있다. 서로 다른 발생 하중은

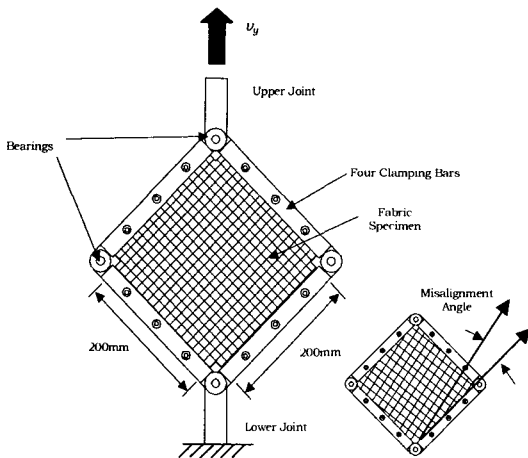


Fig. 1 Testing rig and specimen for picture frame tests.

Table 2 Specimens for microscopic observations

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

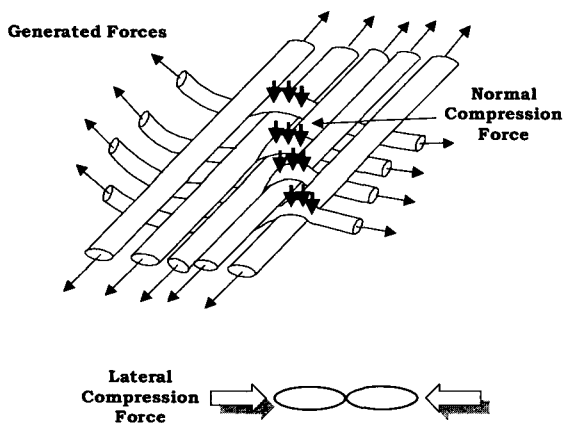


Fig. 2 Supposed forces in fabric material during deformation.

재료의 토우 구조의 미소 변형상의 변화를 야기할 것으로 판단된다.

3. 현미경 관찰

3.1 관찰 시편

사진틀 전단실험으로부터 현미경 관찰을 위한 시편들을 준비하였다. 인장실험을 마친 후 건축물 시편의 변형 형상을 유지하기 위해 시편이 체결된 치구를 그대로 유지한 상태에서 시편의 표면에 에폭시 수지를 도포하여 경화시켜서 변형 형상을 유지할 수 있도록 하였다. 상온에서 12시간 동안 경화된 시편을 토우의 방향 (Fig. 1의 방사형 줄무늬 방향)으로 30×20 mm 크기로 잘라서 (Fig. 3(b)) 현미경 관찰 시편을 제조하기 위한 금형에 관찰 단면이 평행하도록 위치시킨 후 고분자 수지를 금형내로 주입하여 상온에서 12시간 경화시킨 후 완벽한 경화를 위해 부가적으로 80℃에서 5시간동안 경화를 시켰다. 현미경 관찰면을 얻기 위해 여러 가지 등급의 사포 표면 처리 (#120, #400)와 6μ m 다이아몬드 입자 표면처리를 하였으며, 최종적으로 경면을 얻기 위해 1μ m 다이아몬드 입자를 이용한 표면 처리를 수행하였다. 모든 현미경 관찰 시편에 대해 Fig. 3에서 보인 바와 같이 연마 작업을 통하여 시편 두께 방향으로 2 mm의 간격을 가지는 3개의 관찰면을 준비하였다.

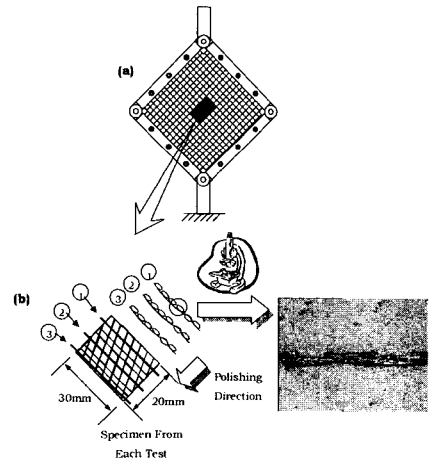


Fig. 3 Test arrangement; (a) picture frame test; (b) sectioning details.

3.2 현미경 관찰을 통한 이미지 데이터 획득

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

$$P_i = \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} \quad (1)$$

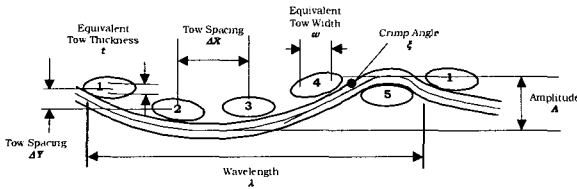


Fig. 4 Definition of tow geometry parameters.

이 점들의 집합을 이용하여 토우의 단면을 중심점(x_c, y_c)인 타원으로 근사하는 경우, 중심점(x_c, y_c)은 식 (2)와 같이 표현된다[8].

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

여기서 a_i 는 $(x_i \cdot y_{i+1} \times x_{i+1} \cdot y_i)$ 로 정해진다. 이 중심점은 최소사승법에 의해 중심점, 주/부축 및 타원의 경사각 등을 조절하여 주어진 점들에 대한 최적의 타원을 근사하기 위한 초기점으로 이용된다 [1].

전단각이 증가함에 따라 토우 내부에 발생된 내부 하중에 의해 토우의 변형 형상은 점차 불규칙해지므로 근사된 타원의 치수 신뢰도가 저하된다[1]. 따라서 다음 식 (3)을 이용하여 토우 단면 형상에 대한 등가 토우 폭 \bar{w} 과 등가 토우 두께 \bar{t} 를 도입하여 정량화하였다. 상기 두 개의 등가값은 근사된 타원의 중심에 대해서 각각 타원의 장축과 단축 방향으로 선택된 네 개의 점들로 구성된 미소 사각형 면적과 그 면적의 중심의 곱을 모두 더해서 구한 등가 장축 및 단축을 의미한다[8].

$$\bar{w} = \frac{2}{A} \sum_i |x'_i - x_i| \cdot \Delta A$$

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

여기에서 ΔA 는 각각의 데이터 점들로 구성된 요소의 미소 면적이며, A 는 폐곡선으로 정의되는 총 면적이다. 횡방향 토우의 단면 사진으로부터 얻은 토우 폭과 토우 두께 이외에 Fig. 4에 보이는 바와 같이 토우간 거리 등과 같은 파라미터의 변화값도 측정하였다. 각 방향 토우간 거리 ($\Delta X, \Delta Y$)는 인접 토우의 중심간 거리의 절댓값으로 정의하였으며, 종방향 토우 (Longitudinal Tow)의 파장은 첫번째 토우의 왼쪽부터 다음번 첫번째 토우의 동일 위치까지의 거리로 정의하였다. 또한 종방향 토우가 형성하는 곡선과 평행선이 이루는 최대 각도를 굴곡각 (Crimp Angle)으로 정의하였으며, 횡방향 토우의

중심선으로 구성된 파형의 최상 및 최하점 간의 거리 (Peak-to-Peak)를 측정하여 진폭으로 정의하였다. 토우의 단면 파라미터 측정값의 신뢰도를 향상시키기 위해 모든 측정치는 15개의 토우 (한 단면당 5개의 토우 × 한 샘플당 3개의 단면)에서 측정한 값의 평균을 사용하였으며, 종방향 토우의 진폭과 파장은 각 단면에서 측정된 3개 값의 평균을 취하였다.

4. 측정결과

4.1 재료 내부에 발생하는 힘

사진틀 전단실험의 경우 단위길이당 전단력 N_s (Shear Line Force)는 하중의 평형조건에 의해 시험 지그 끝단에서 가해진 힘 F 와 식 (4)와 같은 관계를 가진다 [9].

$$N_s = \frac{F}{2L \cos\left(\frac{\pi - \theta}{4}\right)} \quad (4)$$

여기서 L 은 사진틀 지그의 한면의 길이이며, θ 는 전단각이다. 그러나 사진틀 전단실험의 경우 외부 하중으로부터 토우의 인장 방향으로 발생하는 하중을 계산하는 것은 구조적으로 불가능하며 이는 이 방법의 최대 단점이기도 하다. 사진틀 전단실험결과 얻은 분해된 단위 길이당 전단력의 변화를 전단각에 대해 나타내고 다른 인장실험 결과와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 일방향 편향 인장실험의 경우 단위 길이당 전단력은 전단각이 55° - 60° 일때 급격히 증가하기 시작하였으며, 이축 인장실험의 경우에는 전단각이 30°와 35° 사이일 때 급격하게 증가하기 시작하였다[1].

Fig. 5에서 보는 바와 같이 사진틀 전단실험에 의한 시편의 변형과 발생하는 단위길이당 전단력은 일방향 편향 인장실험의 특성[1]에 기인하여 유사한 값을 가짐을 알 수 있었으나, 이축 인장실험의 경우 토우 방향으로의 큰 하중이 발생하므로 이러한 하중 상태가 재료의 전단 변형을 억제하여 전단각이 다른 두 실험 결과에 비해 작은 것을 알 수 있다. 이러한 변형상의 차이는 사진틀 전단실험의 경우 시편 전체구간에 대해 거의 완벽한 전단력을 발생시키는 데 비해 다른 두가지의 인장실험의 경우에는 토우방향의 인장하중이 상대적으로 크게 발생하여 재료의 전단 변형에 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다[1]. 따라서 상기 실험결과를 통해서 서로 다른 실험에 의해 발생하는 하중의 변화는 토우 구조의 변화를 야기시킬 것으로 판단된다.

4.2 현미경 관찰

사진틀 전단실험 후 시편의 전단 변형에 따른 토우의 변형을

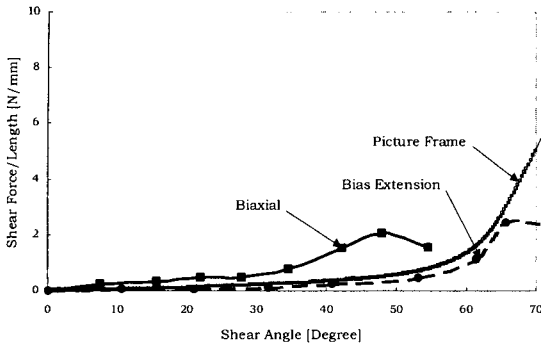


Fig. 5 Variation of shear line load with shear angle for picture frame test.

현미경을 통해 관찰하였으며, 토우 변형량의 효과적인 비교를 위해 토우 두께, 토우 진폭 및 토우 간격 등을 조사 하였다. 사진을 전단실험을 통해 얻은 시편의 전단각에 대한 변형량을 변형 전 값을 이용하여 정규화 (Normalisation) 한 후 기존 인장실험의 결과와 비교하였다. 특히 서로 다른 평면 하중 (In-plane forces)이 재료의 토우 구조의 변형에 미치는 영향을 비교하였다.

Fig. 6은 전단각에 대한 y-방향 토우 간격 (ΔY)의 변화를 세 가지 실험에 대해 비교한 결과이다. 토우 간격의 변화는 복합재료를 이용한 제품 성형 중 발생하는 미소 변형의 대표적인 예이며, 재료의 물질특성에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. Fig. 7과 8은 변형 전의 값에 대한 상대 토우 두께와 종방향 토우 진폭의 변화 경향을 보여준다. 재료의 전단변형이 시편의 파손 영역까지 진행됨에 따라 두께방향으로의 기하학적 변수는 계속 증가하는 경향을 나타내었다. 이전에 수행한 일방향 편향 인장실험과 이축 인장실험 결과를 바탕으로 실험에 사용된 탄소섬유 건직물의 전단변형에 따른 토우구조의 변형 경향에 따라 '정착 영역 (Placing Phase)', 미끄럼 영역 (Sliding Phase) 그리고 '잠김 영역 (Locking Phase)' 으로 구분하여 사진을 전단실험을 통해 얻은 결과와 비교하였다. Figs. 6 ~ 8 에서 보는 바와 같이 사진을 실험을 통해 얻은 시편의 경우 y-방향 토우 간격은 이축 인장실험과 일방향 편향 인장 실험 결과의 사이 값을 가지며, 토우의 진폭과 두께는 다른 두 인장실험 결과보다 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 사진을 실험의 경우 재료 내부에 발생하는 막력의 크기를 알 수 없기 때문에 이러한 결과를 분석하는 것은 매우 어렵다. 그럼에도 불구하고 다른 인장실험에 대한 평면 하중 상의 차이가 있을 것이며, 이러한 하중의 차이는 이 실험을 통한 토우의 변형 경향과 다른 실험들을 통해 얻은 토우 변형 경향 간에 주요한 차이를 야기할 것이다. 사진을 실험의 경우 전단각에 따른 토우의 진폭의 변화가 다른 두 가지 인장실험의 경우에 비해 거의 없는 것은 이러한 가정을 뒷받침 한다고 판단된다. 사진을 실험에 사용된 지그의 특성상 프레임 간격 (혹은 한

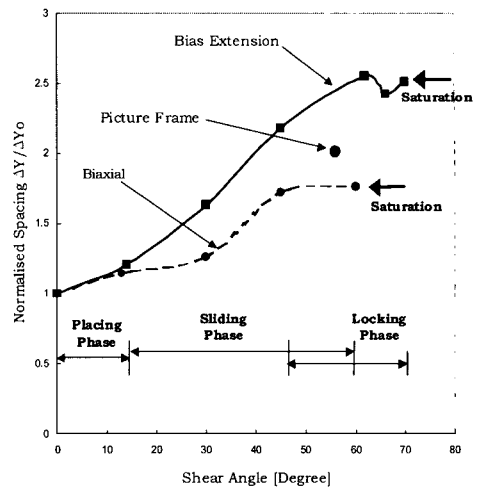


Fig. 6 Variation of normalised out-of-plane tow spacing $\Delta Y/Y_0$ with shear angle.

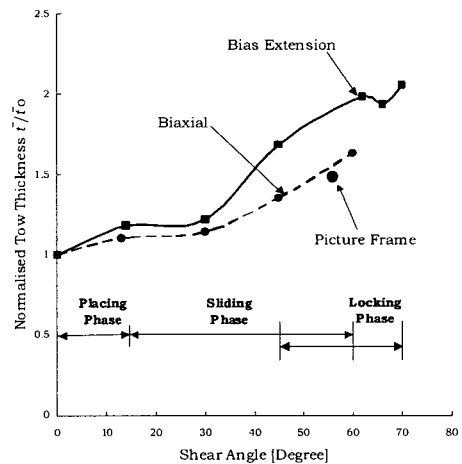


Fig. 7 Variation of normalised tow thickness with shear angle.

토우의 파장)은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 압축 치구로 체결되므로 압축 치구와 평행한 토우들은 재료의 전단 변형동안 일정하게 유지되므로 토우는 비인장성 (Inextensible)이고, 따라서 토우의 굴곡 진폭은 재료가 전단 변형을 겪는 동안 일정하게 제한된다.

5. 정렬 불일치 시편: 사진을 전단실험

사진을 전단실험 중 재료의 공칭 토우 방향 (Nominal Tow Direction)이 사진을틀과 상대각을 가질 경우에 대한 실험을 수행하였다(Fig. 1 참조).

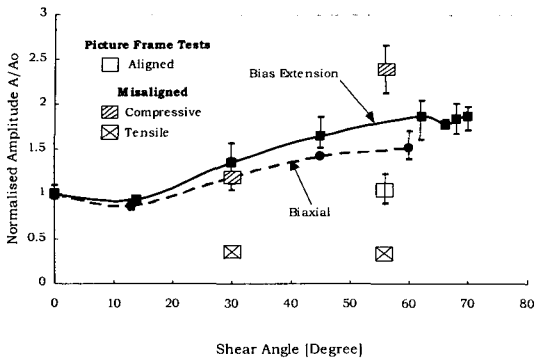


Fig. 8 Variation of normalised amplitude A/A_0 of longitudinal tow with shear angle.

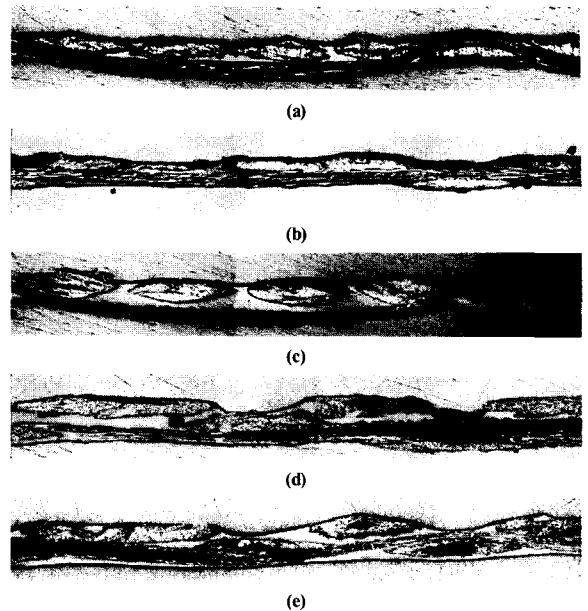


Fig. 9 Micrograph of tow geometry from picture frame test. Captions for 'compressive' or 'tensile' directions denote which tows are seen in longitudinal section, running horizontally across the micrograph. (a) Compressive tow, 30° shear; accidentally misaligned; (b) Tensile tow, 30° shear; accidentally misaligned; (c) Compressive tow, 56° shear, 2.5° misaligned; (d) Tensile tow, 56° shear, 2.5° misaligned; (e) Aligned specimen: 56° shear.

변형이 진행됨에 따라 사진을 지그의 한쪽 대각선은 줄어들고 다른쪽 대각선은 늘어난다. 또한 재료와 사진을 지그간의 비정렬각이 존재하는 상태에서 서로 마주보는 사진을 지그 중 한쌍은 거리가 줄어들고, 다른 한쌍은 그 거리가 늘어나게 된다. 지그의 이러한 변형 상태 하에서 한쪽 방향 토우들은 변형 중 과도한 인장력을 받아 굴곡 진폭이 감소하며, 다른쪽 방향 토우들은 이와는 반대로 상대적으로 낮은 인장력 혹은 압축력을 받게 되어 굴곡 진폭이 증가하게 된다. 두 가지 방향 토우의 서로 다른 변형 형상을 규정하기 위해 편의상 압축방향 및 인장방향 토우라고 한다. 압축 및 인장방향 토우간의 서로 다른 진폭을 현미경을 이용하여 관찰하였다. 관찰 결과의 비교를 위해 두 가지 서로 다른 비정렬각을 가지는 시편을 비교하였다. 한 시편은 비정렬각이 2.5°이며, 나머지 한개는 원래는 정렬 시편이었으나 실험 중 재료 내부에 과도한 하중이 발생하여 현미경 관찰을 해 본 결과 비정렬각을 가지는 시편의 변형 구조를 가짐을 확인하였으며, 이 시편의 정렬 불일치각은 다른 실험들과의 비교를 통해 약 1° 정도인 것으로 판단하였다. Fig. 9는 사진을 전단실험을 통해 각각 30°와 56°의 전단각을 가지는 시편의 압축방향 및 인장방향의 현미경 구조 사진이며, 이들의 구조를 정렬 시편 (Aligned Specimen)을 사용한 사진을 전단실험 결과와 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 비정렬각을 가지는 모든 시편들의 토우는 수평방향으로 정렬되어 있는 것을 알 수 있으며, 반면 정렬각을 가진 시편 (Fig. 9(e))은 이축 인장실험 및 일방향 편향 인장실험 결과와 유사한 변형 형상을 가짐을 알 수 있다 [1]. 따라서 비정렬각을 가지는 시편과 정렬각을 가지는 시편과의 변형 형상에는 뚜렷한 차이가 있음을 알 수 있다. 토우 방향으로 인장력이 작용하는 경우 (Fig. 9(b)와 (d)) 종방향 토우의 변형은 거의 직선 형태로 발생하며, 반면 압축방향 토우 (Fig. 9 (a)와 (c))의 경우에는 큰 파형 진폭을 가진다. 비정렬각 2.5°를 가지는 시편의 진폭을 다른 실험을 통해 얻은 시편의 진폭과 비교하여

Fig. 8에 나타내었다. 사진을 실험에서 관찰된 시편 간의 이와 같은 진폭의 큰 차이는 이축 인장실험과 일방향 편향 인장실험 중에 발생된 토우 방향의 인장하중이 변형 거동상의 차이를 일으킨다는 가정을 뒷받침한다. 또한 비정렬각 시편을 이용한 실험 결과는 사진을 전단실험 시 토우와 사진을 지그간의 정렬 (Alignment)의 중요성을 강조하며, 의도하지 않은 비정렬각이 실험중인 재료의 거동에 주요한 영향을 미치는 것을 의미한다.

6. 결론

본 논문은 사진을 전단실험을 통해 순수 전단변형을 받는 탄소섬유 건직물의 하중조건에 따른 미소 토우구조 변형 경향의 현미경 관찰 결과를 제시하였으며, 두 가지 서로 다른 인장실험 (이축 인장실험, 일방향 편향 인장실험) 결과와 비교하여 재료 내부에 발생하는 하중의 종류에 따른 토우 구조의 변형 경향을 파악하였다. 하중 조건에 따른 토우의 서로 다른 미소변형을 확인하기 위해 현미경 관찰을 통해 전단 변형을 겪은 직물 복합재료의 토우 간격, 토우 두께 등의 여러 가지 기하학적 파라미터들을 측정하였다. 각각의 실험 방법에 의해 발생하는 서로 다른 하중 조건에 따른 변형 경향의 차이를

관찰하였다. 직물 복합재료의 토우가 사진을 지그에 대해 상 대각을 가지는 경우에 대한 사진을 전단실험을 수행하였으며, 이 경우 인장 및 압축 하중을 받는 토우의 변형 차이를 뚜렷이 확인하였다. 이러한 변형 상의 차이를 통해 재료의 전단 변형 중 평면 토우 하중 (In-plane Tow Forces)이 재료 변형에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2004년도 한국과학재단의 젊은과학자연구활동 지원연구 (과제번호: R08-2004-000-10171-0)에 의하여 지원 되었으며 이에 재단측에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 장승환, “직물 복합재료의 드레이핑 미소 거동 관찰: 일방 향 편향 인장실험과 이축 인장실험,” 한국복합재료학회지, 제17권, 제1호, 2004, pp. 38-46.
- 2) 장승환, “직물 복합재료를 이용한 드레이핑 헬멧의 미소 변형 관찰,” 한국복합재료학회지, 제16권, 제4호, 2003, pp. 29-35.
- 3) Hofstee, J. and van Keulen F., “3-D geometric modelling of a draped woven fabric,” *Composite Structures*, Vol. 54, 2001, pp. 179-196.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 장승환, 장태성, 최진호, 전성식, “직조 탄소섬유 발포 고분자 샌드위치 구조의 굽힘특성,” 한국복합재료학회 추계 학술대회, 2004, pp. 131-134.
- 7) 전성식, 오재훈, 장승환, “여러 가지 조건을 가진 직물 복합재료 시편의 압축특성,” 한국복합재료학회 추계 학술 대회, 2004, pp. 135-138.
- 8) John C. Russ, *The image processing handbook*, third edition, IEEE PRESS, October, 1998, Chap. 8.
- 9) Sharma, S. B, Sutcliffe, M. P. F., Chang, S.H. “Characterisation of material properties for draping of dry woven composite material,” *Composites Part A*, Vol. 34, 2003, pp. 1167-1175.