건직물 복합재료의 미세거동 관찰: 사진틀 실험

장승환*

MICROSCOPIC INVESTIGATION OF DRY FABRICS: Picture Frame Test

Seung Hwan Chang*

Key Words : Picture Frame Test, Microscopic Observation , Tow Geometry, Five Harness Satin Weave

ABSTRACT

This paper presents the microscopic observation results from the picture frame test using five-harness satin weave fabric composite. Aligned and misaligned specimens are observed to verify the exact tow deformation pattern such as tow interval and change in tow amplitude. To observe the micro-deformation of the fabric structure, appropriate specimens from picture frame test are sectioned and observed under the microscope. From the observation results, it is found that a picture frame test with a misaligned fibre orientation angle shows large differences in deformation between tensile and compressive tow directions.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 우수한 비강성과 비강도 특성에 기인하여 자동차나 비행기 산업 등 많은 분야에 폭 넓게 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 물성 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 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 (Microscopic) 연구가 필수적이다. 위와 같은 필요성에 의해 직물 복합재료의 직조 형태 (Woven Fabric Geometry)의 변형 형상을 모델링하기 위한 연구가 수행되어왔다. Hofstee 와 van Keulen [1] 은 드레이핑 된 평직 (Plain Weave) 복합재료의 3 차원 기하를 묘사하는 관계식을 제안하였으며, 토우의 국부적 변형을 평가하는 섬유 다발 구조 (Fibre Bundle Architecture) 를 제시하였다. Vandeurzen [2] 등은 2 차원 직조 구조 (Woven Architecture)를 위한 3 차원 기하학적 표현을 제안하여 직물 복합재료의 강성과 강도의 모델링을 위한 기저로 사용될 수 있도록 하였다. Hofstee [3] 등은 평직 (Plain Weave) 복합재료의 열성형 (Thermoforming) 공정 중 얀 구조 (Yarn Geometry)를 전단 변형과 직물 인장 변형 (Fabric Stretching Deformation)의 함수로 표현하였으며, 얀 (Yarn)의 파장과 진폭을 측정하고 해석 해 (Analytical Solution)와 비교하였다. McBride [4] 등은 직물 구조를 표현하기 위한 얀의 폭 (Width), 얀 간격 (Spacing), 직물 두께 (Fabric Thickness)등의 항으로 구성된 4 개의 조화함수의 단위 셀 (Unit Cell)을 정의하였다. 이러한 단위 셀은 전단을 받는 평직 (Plain Weave)에 적용이 가능하며, 기하학적 매개변수는 전단각 (Shear Angle) 의 함수로 표현될 수 있다. 본 논문에서는 변형 중

* 중앙대학교 기계공학부 (email: phigs4@cau.ac.kr)

새틴 직조 직물 (Satin Weave Fabric)에서 발생하는 토우 형상의 변화를 사진틀 실험(Picture Frame Test)을 겪은 시편의 현미경 관찰 (Microscopic Observation)을 통해서 분석하였다. 또한 사진틀 실험 중에 발생하는 토우 구조의 기하학적 파라메터 (Geometric Parameters)의 변화를 관찰하여 정량화하고, 정렬 시편과 비정렬 시편을 통해 얻은 결과들을 기존 인장실험[5, 6]을 통해 얻은 결과와 서로 비교하였다.

2. 사진틀 전단 실험

본 연구에서는 건직물 (Dry Fabric)을 이용하여 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 재료는 탄소섬유 건직물 (Tenax HTA 6k, Five Harness Satin Weave) 이다. 모든 실험에서 전단 각 (Shear Angle)은 변형 전 재료에 표시한 직선들의 최종 변형 각도를 계산하여 측정하였다. 사진틀 전단실험 (Picture Frame Test)의 시편 치수와 실험 개요를 *Fig. 1* 에 나타내었다.

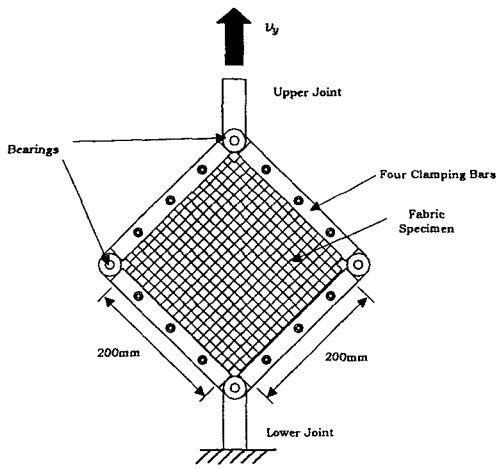

Fig. 1 Testing rig and specimen for picture frame tests.

시편의 크기는 200 × 200mm^2 이며, 인장 속도 (v_y)는 다른 실험 (일방향 편향 인장실험, 이축 인장실험) 결과 [6] 와의 비교를 위해 60 mm/min을 사용하였다. 고정 치구와 시편과의 정렬의 불일치가 재료의 변형에 미치는 효과를 알아보기 위해 정렬 불일치 각 (Misalignment Angle)이 2.5°인 시편을 준비하였다. 또한 실험 결과를 바탕으로 원래 정렬 시편 (Aligned Specimen)이 장착 과정에서 약간의 불일치가 발생할 경우 의도적인 정렬 불일치 각을 가진 시편과 유사한 변형 거동을 보이는 것을 발견하였다. 이와 같은 관찰로부터 본 시편의 정렬 불일치 각이 1° 정도 발생 한 것으로 판단된다. 건직물 재료가 전단 변형을 할 때 실험 방법 및 전단 각에 따른 재료 내부의 토우 (Tow) 변형 경향을 확인하기 위해 여러 가지 전단 각을 가지는 시편을 준비하였으며, 사진틀 전단실험 결과를 기존 인장 실험 (일방향 편향 인장실험, 이축 인장실험) [6]의 결과와 비교하였다.

3. 현미경 관찰

3.1 시편

사진틀 전단실험 (Picture Frame Test) 으로부터 현미경 관찰을 위한 시편들을 준비하였다. 모든 실험을 마친 후 건직물 시편의 변형 형상을 유지하기 위해 시편의 변형 상태에서 표면에 고분자 수지를 도포하여 경화 시켜서 변형 형상을 유지할 수 있도록 하였다. 상온에서 12 시간 동안 경화된 시편을 토우의 방향으로 30 × 20 mm^2 크기로 잘라서 현미경 관찰 시편을 제조하기 위한 금형에 관찰 단면이 평행하도록 위치시킨 후 고분자 수지를 금형 내로 주입하여 상온에서 12 시간, 80℃에서 5 시간동안 경화를 시켰다. 현미경 관찰 면을 얻기 위해 여러 가지 등급의 사포 표면 처리 (#120, #400)와 6μm 다이아몬드 입자 표면처리를 하였으며, 최종적으로 경면을 얻기 위해 1μm 다이아몬드 입자를 이용한 표면 처리를 수행하였다. 모든 현미경 관찰 시편에 대해 연마 작업을 통하여 시편 두께 방향으로 2 mm 의 간격을 가지는 3 개의 관찰면을 준비하였다.

3.2 데이터 획득 및 현미경 관찰로부터의 파라메터 추출

관찰에 사용된 모든 시편의 토우 단면 구조의 이미지를 관찰 및 저장하기 위해 디지털 사진기가 부착된 저 출력 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 여 개의 점 데이터를 Matlab 코드를 이용하여 확보하였다. 이 점들의 집합을 이용하여 토우의 단면을 중심점 (x_c, y_c)을 가지는 타원으로 근사하였으며, 중심점 (x_c, y_c)은 다음 식 (1)로 표현되는 평면 상에서의 Green 정리 (Green's Theorem) [7] 를 이용하여 폐곡선의 면적 중심 (Area-Centroid)으로 정의 되었다.

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

여기서 a_i 는 $(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$로 정해진다. 이 중심점은 최소 자승법 (Least Square Minimisation Routine)에 의해 중심점, 주/부축 및 타원의 경사각 (Inclination of Ellipse) 등을 조절하여 주어진 점들에 대한 최적의 타원을 근사하기위한 초기 점으로 이용된다. 전단 각이 증가함에 따라 토우 내부에 발생된 내부 하중에 의해 토우의 변형 형상은 점차 불규칙해지므로 타원으로 근사된 타원의 치수의 신뢰도가 저하된다. 따라서 토우 단면 형상에 대한 등가 토우 폭 $\overline{w}$ (Equivalent Tow Width)과 토우 두께 $\overline{t}$ (Tow Thickness)를 도입하여 정량화 하였다[7].

횡방향 토우의 단면 사진으로부터 얻은 토우 폭과 토우 두께 이외에 *Fig. 2* 에 보이는 바와 같이 토우간 거리 (Tow Spacing) 등과 같은 다른 파라메터의 변화 값도 측정하였다. 각 방향 토우간 거리 (ΔX and ΔY)는 인접 토우의 중심간 거리의 절대값으로 정의하였으며, 종방향 토우 (Longitudinal Tow)의 파장 (Wavelength)은 첫번째 토우의 왼쪽부터 다음 번 첫번째 토우의 동일 위치까지의 거리로 정의하였다. 횡방향 토우 (Transverse Tow)의 중심선 (Centre Line)으로 구성된 파형의 최상 및 최하점 간의 거리 (Peak-to-Peak)를 측정하여 진폭 (Amplitude)으로 정의하였다. 토우의 단면 파라메터의 신뢰도를 향상시키기 위해 모든 측정치는 15 개의 토우 (한 단면당 5 개의 토우 × 한 샘플당 3 개의 단면)에서 측정한 값의 평균값을 사용하였으며, 종방향 토우의 진폭과 파장은 각 단면에서 측정된 3 개의 값의 평균 값을 취하였다.

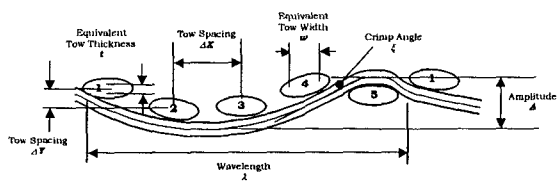

Fig. 2 Definition of tow geometry parameters

4. 현미경 관찰 결과

사진틀 전단실험 후 시편의 전단 변형에 따른 토우의 변형을 관찰하기 위해 현미경을 이용한 관찰을 수행하였으며, 토우 변형량의 효과적인 비교를 위해 토우 두께 (Tow Thickness), 토우의 진폭 (Amplitude) 및 토우 간격 (Tow Spacings) 등을 관찰 하였다. 사진틀 전단실험을 통해 얻은 시편의 전단 각에 대한 변형량을 변형 전 값을 이용하여 정규화 (Normalisation) 한 후 기존 인장실험의 결과 [6]와 비교하였다.

정렬된 시편의 사진틀 실험 (Picture Frame Test)을 거친 시편의 현미경 관찰 결과를 *Figs. 3 ~ 4* 에 다른 인장실험의 결과 값들과 비교하였다. 그림에서 보는 바와 같이 사진틀 실험을 통해 얻은 시편의 경우 y-방향 토우 간격은 이축 인장실험 (Biaxial Test)과 일방향 편향 인장실험 (Bias Extension Test) 결과의 사이 값을 가지며, 토우의 진폭과 두께는 다른 두 인장 실험 결과보다 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 사진틀 실험의 경우 재료 내부에 발생되는 막력 (Membrane Forces)의 크기를 알 수 없기 때문에 이러한 결과를 분석하는 것은 매우 어렵다. 그럼에도 불구하고 다른 인장 실험에 대한 평면 하중 (In-plane Forces) 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. 사진틀 실험의 경우 전단 각에 따른 토우의 진폭의 변화가 다른 실험의 경우에 비해 거의 없는 것은 이러한 가정을 뒷받침 한다고 판단된다. 사진틀 실험에 사용된 지그 (Jig)의 특성상 프레임 간격 (혹은 한 토우의 파장)은 변형동안 일정하게 유지되므로 토우는 비인장성 (Inextensible)이고, 따라서 토우의 주름 진폭 (Crimp Amplitude)은 재료가 전단 변형을 겪는 동안 일정하게 제한된다.

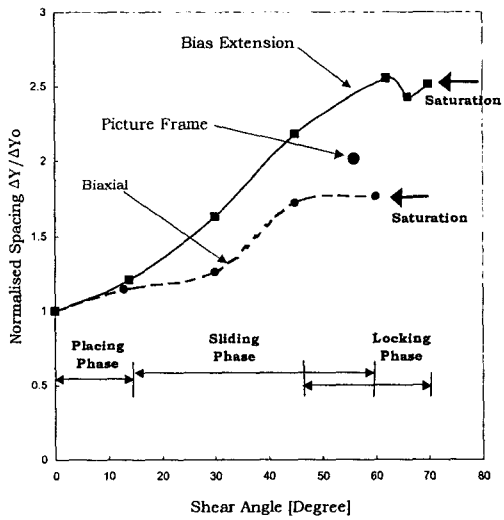

Fig. 3 Variation of normalised out-of-plane tow spacing □Y/Yo with shear angle.

사진틀 인장실험 중 재료의 공칭 토우 방향 (Nominal Tow Direction)이 사진틀과 상대 각 (Relative Angle)을 가질 경우에 대한 실험을 수행하였다. 변형이 진행됨에 따라 사진틀 지그의 한쪽 대각선은 줄어들고 다른 쪽 대각선은 늘어난다. 또한 재료와 사진틀 지그 간의 비정렬 각 (Misalignment Angle)이 존재하는 상태에서 서로 마주보는 사진틀 지그 중 한 쌍은 거리가

줄어들고, 다른 한 쌍은 그 거리가 늘어나게 된다. 지그의 이러한 변형 상태 하에서 한쪽 방향 토우들은 변형 중 과도한 인장력을 받아 주름 진폭 (Crimp Amplitude)이 감소하며, 다른 쪽 방향 토우들은 이와는 반대로 상대적으로 낮은 인장력 혹은 압축력을 받게 되어 주름 진폭이 증가하게 된다. 두 가지 방향 토우의 서로 다른 변형 형상을 규정하기 위해 편의상 압축 (Compressive) 방향 및 인장 (Tensile) 방향 토우라고 한다.

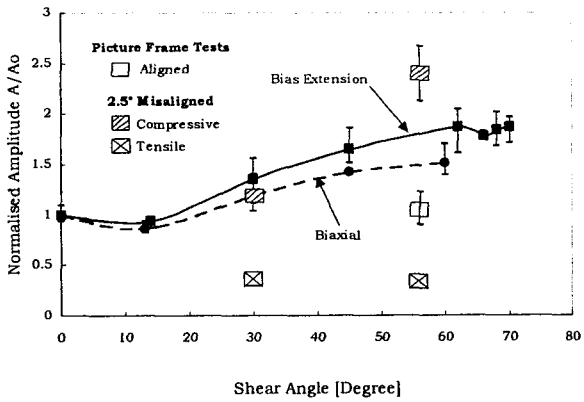

Fig. 4 Variation of normalised amplitude A/A_0 of longitudinal tow with shear angle.

압축 및 인장방향 토우간의 서로 다른 진폭을 현미경을 이용하여 관찰하였다. 관찰 결과의 비교를 위해 두 가지 서로 다른 비정렬 각 (Misalignment Angle)을 가지는 시편을 비교하였다. 한 시편은 비정렬 각 이 2.5° 이며, 나머지 한 개는 원래는 정렬 시편이었으나 실험 중 재료 내부에 과도한 하중이 발생하여 현미경 관찰을 해 본 결과 비정렬 각을 가지는 시편의 변형 구조를 가짐을 확인하였으며, 이 시편의 비정렬 각은 다른 실험들과의 비교를 통해 약 1° 정도인 것으로 판단된다. 비정렬 각을 가지는 사진틀 실험을 통해 얻은 시편은 각각 30° 와 56°의 전단 각을 가진다. 비정렬 각을 가지는 모든 시편들의 토우는 수평방향으로 정렬되었으며, 반면 정렬 각을 가진 시편은 이축 인장실험 (Biaxial Test) 및 일방향 편향 인장실험 (Bias Extension Test) 결과와 유사한 변형 형상을 가짐을 알 수 있었다. 따라서 비정렬각을 가지는 시편과 정렬 각을 가지는 시편과의 변형 형상에는 뚜렷한 차이가 있음을 알 수 있다. 토우 방향으로 인장력이 작용하는 경우 종방향 토우 (Longitudinal Tow)의 변형은 거의 직선 형태로 발생하며, 반면 압축방향 토우의 경우에는 큰 파형 진폭 (Waviness Amplitude)를 가진다 (*Fig. 4*). 사진틀 실험에서 관찰된 시편 간의 이와 같은 진폭의 큰 차이는 이축 인장실험과 일방향 편향 인장실험 중에 발생된 토우 인장하중 (Tow Tensile Forces)이 변형 거동상의 이러한 차이를 일으킨다는 가정을 뒷받침한다. 또한 비정렬 각 시편을 이용한 실험 결과는 사진틀 실험 시 토우와 사진틀 지그 간의 정렬 (Alignment)의 중요성을 강조하며, 의도하지 않은 비정렬 각이 실험중인 재료의 거동에 주요한 영향을 미치는 것을 의미한다.

5. 결론

본 논문은 사진틀 인장실험을 통한 전단 변형 경향을 다른 인장실험 (이축 인장실험, 일방향 편향 인장실험)의 결과와 비교하였다. 현미경 관찰을 통해 전단 변형을 겪은 직물 복합재료의 토우 간격 (Tow Spacing), 토우 두께 (Tow Thickness) 등의 여러 가지 기하학적 파라메터들 (Parameters)을 측정하였다. 직물 복합재료의 토우가 사진틀 지그에 대해 상대 각을 가지는 경우에 대한 사진틀 인장실험을 수행하였으며, 이 경우 인장 및 압축 하중을 받는 토우의 뚜렷한 변형 상의 차이를 확인하였다. 이러한 변형 상의 차이는 재료의 전단 변형 중 평면 토우 하중 (In-plane Tow Forces)이 재료 변형에 미치는 중요한 효과를 설명한다.

참고문헌

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

(2) Ph. Vandeurzen., J. Ivens and I. Verpoest, "A three-dimensional micromechanical analysis of woven-fabric composites: Ⅰ. Geometric analysis," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, 1996, pp. 1303-1315.

(3) J. Hofstee, H. de Boer and F. van Keulen, "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) T. M. McBride and J. Chen, "Unit-cell geometry in plain-weave fabrics during shear deformations," *Composites Science and Technology*, Vol. 57, 1997, pp. 345-351.

(5) S. B. Sharma, M. P. F. Sutcliffe, "Material characterisations in the draping of woven composites," *Composites Part A*, submitted, 2002.

(6) S. H. Chang, S. B. Sharma and M. P. F. Sutcliffe, "Microscopic observation of tow geometry of a dry satin weave fabric during draping," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, 2003, pp. 99-111.

(7) C. R. John, *The image processing handbook*, IEEE PRESS, third edition, 1998, Chap. 8.