

직물 탄소섬유 복합재료 드레이핑 헬멧의 미소변형에 관한 연구

장승환*

Microscopic Investigation on the Draped Helmet Structure Made of Carbon Fabric Composite

Seung Hwan Chang*

Key Words : Draping, Fabric Composites, Five Harness Satin Weave, Tow, Microscopic Observation

ABSTRACT

In this paper, various tow parameters such as equivalent tow thickness, amplitude of longitudinal tow and tow intervals were investigated and compared with each other by using microscopic observation to find out the exact deformation patterns between both directions of the fabric structure (Longitudinal and Transverse Directions). Specimens for the observation were taken from draped helmet which is made of fabric composite (Five Harness Satin Weave). From the observation results, it was found that there are different deformation pattern between tow directions and effect of geometric condition on the deformation of the fabric materials during draping process was verified.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 고강성, 고강도 특성으로 인해 자동차, 항공산업 등 폭넓은 응용 범위에 적용되고 있다. 특히 직물 복합재료 (Fabric Composites)는 취급이 용이하고, 유연성 (Flexibility)이 높기때문에 복잡한 형상을 가지는 금형에 적용하기가 수월하여, 열성형 (Thermoforming)이나 RTM 공정에 많이 사용되고 있다. 직물 복합재료 구조와 변형 형상은 최종 생산물의 기계적 물성에 영향을 미치기 때문에 복합 곡률반경 (Double Curvature)을 가지는 복잡한 구조의 성형을 위해서는 재료의 드레이핑 거동 (Draping Behaviour)을 이해하는 것이 매우 중요하다. 복합재료의 섬유 (Fibre)나 토우 (Tow) 구조의

미시적 변형 (Microscopic Deformation)을 관찰하는 것은 토우 크기, 직물의 짜임 구조 (Weave Style)등이 드레이핑 성능에 미치는 영향을 이해하는데 필수적이다. 일반적으로 직물 복합재료를 3 차원 구조에 적용하는 것은 복잡한 힘과 기하학적 형상을 수반하며, 이러한 조건은 정확한 변형 해석을 어렵게 한다. 복잡한 기하학적 형상은 드레이핑 과정에서 재료의 주름현상 (Wrinkling), 토우간 미끄러짐 현상 (Slippage) 그리고 국부적으로 과도한 변형을 야기하므로 재료의 변형 거동에 관한 정보가 필요하다. 직물 복합재료의 드레이핑 과정에서 재료 내부의 하중 및 변형에 대한 해석적, 실험적 연구가 수행되어 왔다. Mohammed [1] 등은 여러가지 직물 복합재료를 반구 (Hemisphere) 구조에 적용하여 드레이핑 (Draping) 및 성형 거동을 실험적으로 분석하고, 주름현상 (Wrinkling)과 섬유의 배열 방향 등을 관찰하였다. Hu [2] 등은 반구 구조에 적용된 다축 직물 복합재료 (Multi-axial Warp Knitted

* 156-756 서울특별시 동작구 흑석동 221 중앙대학교 기계공학부

Fabric)의 변형 형상을 예측하기 위한 수학적 모델을 제시하였다. Potluri [3] 등은 두층으로 이루어진 테이퍼 형상을 가지는 개방 표면 프리폼 (Open Surface Pre-form)을 형성하기 위해 평면 전단 변형 뿐만 아니라 다른 변형 모드를 모두 포함하는 일반적인 기구학적 상사 알고리즘 (Kinematic Mapping Algorithm)을 구현하였다. Sharma [4] 등은 해석과 실험적 연구를 통해서 새틴 직물 (5-Harness Satin Weave) 구조를 가지는 복합재료를 이용하여 복잡한 3 차원 구조의 드레이핑 거동을 예측하였으며, 드레이핑 공정 중 토우의 기하학적 변형에 관한 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 새틴 직물 (Five Harness Satin Weave)로 제작된 복합재료 헬멧의 드레이핑 과정시 발생하는 재료 내부의 미시적 변형 형상 (Microscopic Deformation)을 특정 위치에서 얻은 시편으로부터 관찰하고 분석하였다. 미소 변형의 주요 관찰 대상인 토우 두께 (Tow Thickness), 토우 간격 (Tow Interval), 토우 인장 (Tow Stretching) 및 토우의 주름 (Crimping) 현상 등과 같은 여러가지 기하학적 변수의 변형 형상을 정량화하여 드레이핑 공정 중 발생하는 하중을 정성적으로 분석하였다.

2. 시편

재료의 미소변형 관찰을 위해서, Fig. 1 에 표시된 바와 같이 드레이핑 헬멧 구조의 서로 다른 부분에서 시편들을 잘라내었으며, 재료의 변형 전/후를 비교하기 위해 원재료 (탄소섬유/에폭시 직물 프리프레그)의 관찰 시편을 준비하였다. 시편들은 모든 경우 (A1, A2, A3 부분)에 대해 종방향 (Longitudinal Direction)과 횡방향 (Transverse Direction)의 단면을 관찰 할 수 있도록 준비하였다. 시편들은 드레이핑 공정 전 원재료에 표시한 격자선을 따라 길이방향과 폭방향으로 3 단위, 2 단위로 각각 잘라내었으며, 변형 전 격자 폭은 1 단위당 10mm 이다. 시편의 미시적 단면 관찰을 위해서, 잘라진 시편들을 금형에 세워서 고정한 후 액상 수지를 금형내에 주입하고 상온에서 12 시간 경화 시킨 후 5 시간동안 80℃로 경화시켰다. 현미경 관찰 면을 얻기 위해 여러가지 등급의 사포 표면 처리 (#120, #400)와 6 μ m 다이아몬드 입자 표면처리를 하였으며, 최종적으로 경면을 얻기 위해 1 μ m 다이아몬드 입자를 이용한 표면 처리를 수행하였다. 모든 시편에 대해 측정과 표면처리를 3 번씩 반복하여 (각 관찰 면의 두께 간격은 2mm) 측정 대상의 평균값을 얻을 수 있도록 하였다.

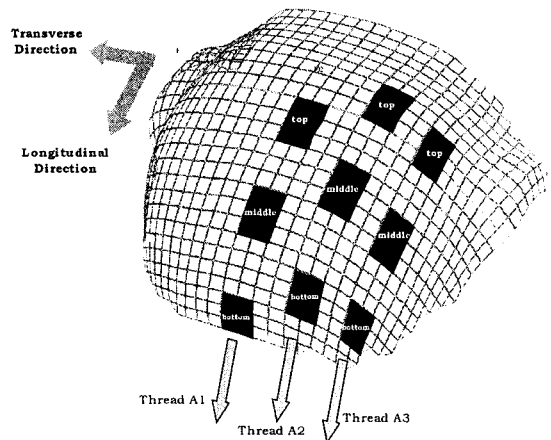


Fig. 1 Draped helmet structure and positions of specimens

Table 1 은 드레이핑 공정으로 제작된 헬멧 구조로부터 얻은 시편의 전단각 (Shear Angle) 이다.

Table 1 Shear angles of the specimens

Shear Angle [°]	Top	Middle	Bottom
Thread A1	5°	6°	7°
Thread A2	5°	8°	21°
Thread A3	7°	10°	30°

Table 1 의 L 과 T 는 각각 종방향과 횡방향 절단을 나타낸다. 관찰 면의 토우 구조를 분석하기 위해 저출력 현미경 (Low Powered Microscope)에 부착된 디지털 카메라를 이용하여 영상 데이터를 확보하였다. 영상 데이터로부터 전단각 및 드레이핑 공정에 의한 토우 구조의 변형량을 정량화 하기 위해 매틀랩 계수화 방법 (Matlab Digitising Routines)을 이용하여 변형 전/후의 토우 형상의 기하학적 데이터를 얻었다 [5]. 변형 과정중 토우의 미소 구조 변화량을 정량화 하기 위해, Fig. 2 에 보이는 바와 같이, 등가 토우 두께 (Equivalent Tow Thickness), 종방향 토우의 진폭 (Amplitude of Longitudinal Tow), X 와 Y 방향의 토우 간격 (X and Y Directional Tow Intervals) 등의 기하학적 변수를 수치화 하였다. 전단각이 증가함에 따라 토우의 원래 형상이 심하게 왜곡되어 변형후의 토우 형상을 타원과 같은 간단한 도형으로 근사하기 힘들어 짐을 고려하여 식 (1)의 등가 토우 두께 (Equivalent Tow Thickness)와 토우 폭 (Equivalent Tow Width)을 계산하여 각 시편에 대해 그 값들을 서로 비교하였다. 식 (1)에서 x_c 와 y_c 는 선택된 토우의 중심점을 나타내며, ΔA 와 A 는 매틀랩 프로그램으로부터 얻은 토우 경계를 구성하는 60 여 개의 점으로 형성된 국부 미소면적과 전체 토우 면적을 나타낸다.

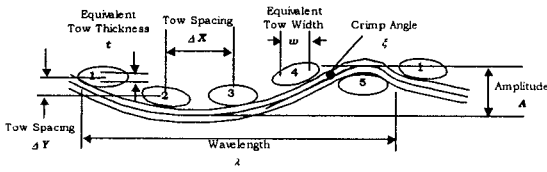


Fig. 2 Definition of tow geometry parameters

$$\bar{x} = \frac{\sum_i |x_i - x_c| \cdot \Delta A}{A}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_i |y_i - y_c| \cdot \Delta A}{A} \quad (1)$$

각각의 시편은 시편의 원래 위치에 따라 서로 다른 전단각과 기하학적 조건을 가지고 있으며, 이러한 조건은 드레이핑 공정과 진공백 성형 공정 중 시편의 위치에 따라 토우의 전단력 (Shear Force) 혹은 토우 인장력 (Stretching or De-crimping Forces) 등 서로 다른 하중 환경을 야기할 수 있다. 드레이핑 공정 중 재료 내부에는 드레이핑력 (Draping Force), 진공에 의한 압력 등의 여러가지 외력이 발생한다.

관찰에 사용된 세가지 부분 (A1, A2, A3 부분)은 주요 하중 환경을 바탕으로 인장 하중부 (Stretching or De-crimping Forces; Thread A1), 전단 하중부 (Shear Forces; Thread A3) 그리고 복합 하중부 (Thread A2)로 구분할 수 있다. 서로 다른 하중 조건은 시편의 최종 변형 형상을 결정하며, 기본적인 인장 실험 (Basic Extension Tests for Fabric Materials) [5]의 변형 특성으로 설명되어질 수 있다.

3. 미소구조의 변형

재료의 드레이핑 공정 중 발생된 하중과 서로 다른 기하학적 조건이 종방향과 횡방향 토우에 미치는 영향을 검증하기 위해 두가지 방향의 절단면을 현미경을 이용하여 관찰하였으며, 토우의 기하학적 변수의 변화량은 변형전 원재료인 프리프레그 치수를 이용하여 표준화 (Normalise)되었다. 전단각에 따른 토우의 기하학적 변수의 변화량은 사용된 프리프레그와 동일한 짜임 구조 (Woven Structure)를 가진 건직물 (Dry Fabrics)을 이용한 단축 편향 실험 (Bias Extension Test), 이축 인장실험 (Biaxial Test) 결과와 비교하였다 [5].

3.1 A1 부분의 변형 경향

A1 부분에서 얻은 시편들은 헬멧 중앙부의 기하학적 특성과 재료의 적층각도 ([0/90])에 기인하여, 드레이핑력 (Draping Force)을 포함한 모든 외력이 주로 토우 방향 (0° 와 90°)의 인장력 (Extension Force)으로 작용하게 되어 상대적으로 매우 작은 전단각을 가짐을 알 수 있다. 이러한 하중 조건은 각 토우의 당김 효과 (Stretching or

De-crimping Effect)로 인해 종방향 토우의 진폭을 다른 부분 (Thread A2, Thread A3)의 시편에 비해 감소시킨다 (Fig. 3). 토우 방향으로의 큰 하중은 근접한 토우들의 겹침 현상 (Overlapping Phenomenon)을 야기하여 Y 방향 토우 간격 (Tow Interval)을 증가시키게 된다 (Fig. 4).

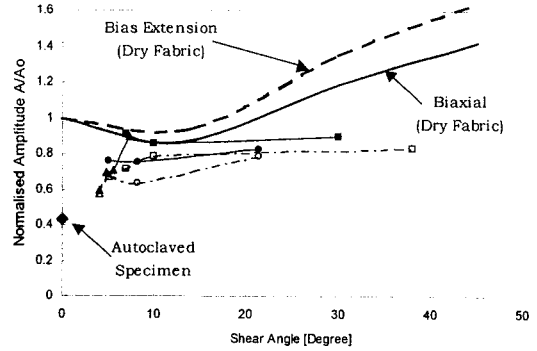


Fig. 3 Normalised amplitudes of the tows with the shear angles

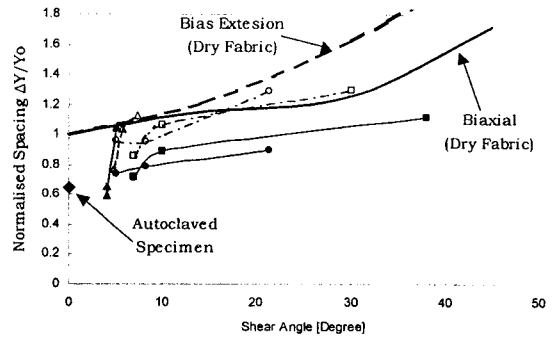


Fig. 4 Variation of normalised out-of-plane tow spacing $\Delta Y/\Delta Y_0$ with shear angle.

위의 그림에서 각 기호는 다음 조건을 나타낸다.

	Longitudinal	Transverse
Thread A1	—▲—	---△---
Thread A2	—●—	---○---
Thread A3	—■—	---□---

그림에서 보는 바와같이 헬멧의 하부 (Bottom Part)에서는 두 방향 모두 Y 방향 토우 간격 (Tow Interval)과 토우의 진폭이 다른 부분에 비해 급격히 증가함을 알 수 있다. 이와같은 현상은 이 부분의 기하학적 특성상 (금형의 끝부분) 진공에 의한 재료와 금형 사이의 접촉이 다른 부분에 비해 취약하고, 외부에서 가해주는 드레이핑력의 방향이 0°로 집중되는 것으로 설명할 수 있다. 반면, 헬멧의 정중앙부인 상부 (Top Part)는 매우 작은 Y 방향 토우 간격 (Tow Interval)과 토우의 진폭을 가지게 되는데, 이는 과도한 드레이핑력과

진공에 의해 발생된 수직 압축력 (Normal Compressive Force)에 의한 영향으로 판단된다. 이 부분에서의 작은 토우 두께는 위와같은 판단의 중요한 증거가 될 수 있다. (Fig. 5)

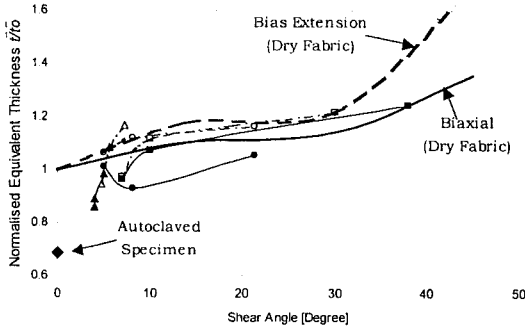


Fig. 5 Normalised equivalent tow thickness with the shear angles

3.2 A2 와 A3 부분의 변형 경향

A3 부분은 재료의 적층방향 ([0/90])의 대각선 방향에 위치하고 있으므로 드레이핑력을 포함한 모든 외력이 재료의 전단 변형을 일으키기 쉽게 작용하므로 세 부분중 가장 큰 전단각을 가진다. 이러한 하중 조건은 건직물 (Dry Fabric)의 이축 인장실험 (Biaxial Test)의 결과와 매우 유사하며, Fig. 5의 결과에서 보이는 바와 같이, 등가 토우 두께는 변형 경향이 건직물 실험과 거의 같은 경향을 가짐을 알 수 있었다. 그러나 Y 방향 토우 간격과 토우의 진폭과 같은 토우간 변형 (Inter-tow Deformation)은 건직물 실험에서는 존재하지 않는 재료와 금형간의 접촉력에 기인하여 높은 전단각 범위에서 건직물 실험 결과에 비해 낮은 값을 가지게 되는 것으로 판단된다 [5]. A3 부분의 전단각은 0° 방향을 따라서 작은 전단각 영역에서 준대칭 전단 영역 (Quasi-Symmetric Shear Region)으로 변화한다.

마지막으로, A1 부분과 A3 부분의 혼합 하중 조건을 가진 A2 부분은 현미경 관찰 결과 A1 과 A3 부분의 과도기적 변형 형상을 가짐을 알 수 있었다. 특히 이 부분은 기하학적으로 가장 큰 비대칭 구조 (Un-symmetry)를 가지기 때문에 두 방향의 토우에 큰 하중 차이를 발생시켜서 결과적으로 Fig. 3 ~ Fig. 5에서 보이는 바와 같이 두 방향의 토우 변형 형상이 큰 차이를 보임을 알 수 있었다.

3.3 토우 방향에 따른 변형 경향

헬멧 구조는 각 위치마다 서로 다른 곡률 반경을 가지는 매우 복잡한 구조이고, 사용된 직물 복합재료 (Fabric Composites; 5 Harness Satin Weave)의 구조적 복잡성에 기인하여 종방향 (0°) 토우와 횡

방향 (90°) 토우에 발생하는 하중과 변형 형상이 달라지게 된다. 두 방향의 서로 다른 변형 형상을 확인하기 위해 종방향과 횡방향 관찰 시편의 변형 경향과 변형량을 비교하였다. 현미경 관찰결과, 종방향 토우 (0°)는 Y 방향 토우 간격과 등가 토우 두께가 횡방향 토우 (90°)에 비해 상대적으로 작았으며, 토우의 진폭은 상대적으로 큰 값을 가짐을 알 수 있었으며, 이러한 각 방향의 변형 경향은 횡방향 토우 (90°)에 더 큰 인장력이 작용함을 의미한다. 양 방향 토우의 주름각 (Crimp Angle)의 관찰 결과로부터, 횡방향 토우는 종방향 토우에 비해 작은 주름각을 가짐을 알 수 있었으며, 이는 종방향 토우가 더 큰 하중을 전달한다는 중요한 증거가 된다고 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 직물 프리프레그를 이용한 드레이핑 헬멧의 여러 부분으로부터 얻은 시편의 현미경 관찰을 통해서 종방향과 횡방향의 토우 두께, 토우의 파장과 진폭 등 다양한 토우 구조를 관찰하고 비교하였다. 전단각 (Shear Angle)과 금형의 기하학적 조건에 따른 재료의 현미경 관찰 결과로부터 횡방향 토우가 더 큰 하중을 전달함을 알 수 있었으며, 이와같은 하중 조건은 당김 효과로 인해 횡방향 토우의 Y방향 토우 간격과 등가 토우 두께를 증가시키며, 토우의 진폭과 주름각을 감소시키는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 복잡한 형상의 금형을 이용한 드레이핑 공정중 직물 복합재료 내부에서 발생하는 변형 경향을 부분적으로 이해할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Mohammed U, Lekakou C and Bader MG. Experimental studies and analysis of the draping of woven fabrics. Composites A 2000; 31: 1409-1420.
- (2) Hu J and Jiang Y. Modeling formability of multiaxial warp knitted fabrics on a hemisphere. Composites A 2002; 33: 725-734.
- (3) Prtluri P, Sharma S and Ramgulam R. Comprehensive drape modelling for moulding 3D textile performs. Composites A 2001; 32: 1415-1424.
- (4) Sharma SB, Sutcliffe MPF, Clifford MJ, and Long AC. Experimental investigation of tow deformation during draping of woven fabrics. Proceedings of the fourth international ESAFORM conference on materials forming vol. 1. Ed. A M Habraken, Liège, Belgium, 2001.
- (5) Chang SH, Sharma SB and Sutcliffe MPF. Microscopic investigation of tow deformation of dry fabrics during draping. Composites Science and Technology. 2002; submitted.