

論文

직물 복합재료를 이용한 드레이핑 헬멧의 미소 변형 관찰

장승환<sup>\*,\*</sup>

Microscopic Investigation on the Micro-Deformation of Draped Helmet Structure Made of Fabric Composite

S. H. Chang<sup>\*\*</sup>

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). And those observation results were compared with bias extension, biaxial tests results with dry fabric which has the same tow structure as the draped helmet materials and also compared with prepreg specimen which is cured by autoclave moulding without vacuum and pressure condition. 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.

초 록

본 논문에서는 직물 복합재료로 제조된 드레이핑 헬멧의 등가 토우 두께, 종방향 토우의 진폭, 토우 간격 등의 여러 가지 토우 파라미터들을 관찰하고, 현미경 관찰을 통해 직물 복합재료 구조의 각 방향에 따른 미세 변형을 서로 비교하였다. 또한 이러한 관찰 결과들을 동일한 토우 구조를 가지는 건축물 시편을 이용한 일방향 편향 인장실험, 이축 인장실험 결과와 비교하였으며, 오토클레이브에서 경화된 여러 가지 성형 조건을 가진 시편들과도 비교하였다. 직물 복합재료(새틴 직물 복합재료)로 제작된 드레이핑 헬멧으로부터 현미경 관찰 시편을 얻었으며, 각 시편의 종방향과 횡방향에 대해 각각 관찰하였다. 관찰 결과로부터, 토우 방향에 따른 서로 다른 변형 패턴을 확인할 수 있었으며, 드레이핑 공정 중 급형의 기하학적 조건이 직물 복합재료의 변형에 미치는 영향을 확인하였다.

**Key Words:** 현미경 관찰(Microscopic Observation), 새틴 직물(Satin Weave), 드레이핑 공정(Draping Process), 토우 간격(Tow Interval), 진폭(Amplitude), 전단각(Shear Angle)

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 고강성, 고강도 특성으로 인해 자

동차, 항공산업 등 폭 넓은 응용 범위에 적용되고 있다. 특히 직물 복합재료(Fabric Composites)는 취급이 용이하고, 유연성(Flexibility)이 높기 때문에 복잡한 형상을 가지는 금

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

형에 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 미세적 변형(Microscopic Deformation)을 관찰하는 것은 토우 크기, 직물의 짜임 구조(Weave Style) 등이 드레이핑 성능에 미치는 영향을 이해하는데 필수적이다. 일반적으로 직물 복합재료를 3차원 구조에 적용하는 것은 복잡한 휨과 기하학적 형상을 수반하며, 이러한 조건은 정확한 변형 해석을 어렵게 한다. 복잡한 기하학적 형상은 드레이핑 과정 중 재료의 주름현상(Wrinkling), 토우간 미끄러짐 현상(Slippage) 그리고 국부적으로 과도한 변형을 야기하므로 재료의 변형 거동에 관한 정보가 필요하다. 따라서 드레이핑 과정 중 제품의 정확한 변형형상을 파악하기 위해서는 구조의 각 위치에서의 미세적 관찰이 중요하다. 직물 복합재료의 드레이핑 과정 중 재료 내부의 하중 및 변형에 대한 해석적, 실험적 연구가 수행되어 왔다. Mohammed[1] 등은 여러 가지 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 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. Wang [4] 등은 핀 조인트 망사 모델(Pin-Jointed Net Model)을 이용하여 실험 결과와 해석 결과를 비교하였으며, 토우의 미끄러짐 현상(Slippage)을 연구하여 재료의 물성과 미끄러짐 현상과의 관계를 규명하였다. 직물 복합재료의 드레이핑 거동과는 별도로, Potter[5]는 직교 방향으로 적층된(Cross-Plied) 일방향 프리프레그의 변형성(Deformability)을 연구하였으며, 특정한 기하학적 형상으로의 드레이핑을 구현하기 위하여 보강재(Reinforcement)의 적절한 변형 조건을 고려하였다. Sharma[6-7] 등은 해석과 실험적 연구를 통해서 새틴 직물(Five Harness Satin Weave) 구조를 가지는 복합재료를 이용하여 복잡한 3차원 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 과정 시 발생하는 재료 내부의 미세적 변형 형상(Microscopic Deformation)을 특정 위치에서 얻은 시편으로부터 관찰하고 분석하였다. 본 연구의 목적은 드레이핑 공정 중 두께의 서로 다른 토우 방향(종방향, 횡방향)으로 작용하는 하중과 서로 다른 기하학적 조건 하에서

의 주요 변형 형상을 관찰하여 발생 하중과 변형과의 관계를 규명하는 것이다. 미소 변형의 주요 관찰 대상인 토우 두께(Tow Thickness), 토우 간격(Tow Interval), 토우 인장(Tow Stretching) 및 토우의 주름(Crimping) 현상 등과 같은 여러 가지 기하학적 변수의 변형 형상을 정량화 하여 드레이핑 공정 중 발생하는 하중을 정성적으로 분석하였다.

## 2. 시편의 준비

재료의 미소변형 관찰을 위해서, Fig. 1에 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 관찰할 수 있도록 준비하였다.

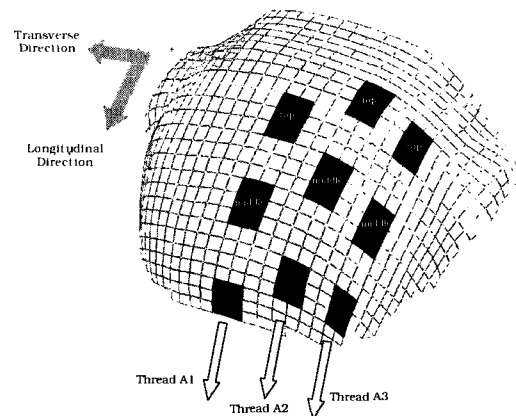


Fig. 1 Draped helmet structure and positions of specimens.

시편들은 드레이핑 공정 전 원재료에 표시한 격자선을 따라 길이방향과 폭방향으로 3단위, 2단위로 각각 잘라내었다. 변형 전 격자 폭은 1단위당 10 mm이다. 시편의 미세적 단면 관찰을 위해서, 잘라진 시편들을 금형에 세워 고정 후 액상 수지를 금형내에 주입하고 상온에서 12시간 경화 시킨 후 5시간동안 80 °C로 경화시켰다. 현미경 관찰 면을 얻기 위해 여러 가지 등급의 사포 표면 처리(#120, #400)와 6 μm 다이아몬드 입자 표면처리를 하였으며, 최종적으로 경면을 얻기 위해 1 μm 다이아몬드 입자를 이용한 표면 처리를 수행하였다. 모든 시편에 대해 측정과 표면처리를 3번씩 반복하여(각 관찰 면의 두께 간격은 2 mm) 측정 대상의 평균값을 얻을 수 있도록 하였다. Table 1은 드레이핑 공정으로 제작된 헬멧 구조로부터 얻은 시편의 전단각(Shear Angle) 이다.

Table 1 Shear angles of the specimens

Shear Angle [°]	Top		Middle		Bottom	
	L	T	L	T	L	T
Cutting Direction						
Thread A1	5°	4°	6°	4°	7°	5°
Thread A2	5°	5°	8°	8°	21°	22°
Thread A3	7°	7°	10°	10°	30°	38°

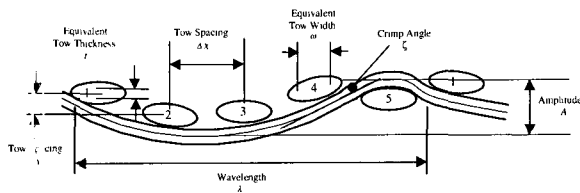


Fig. 2 Definition of tow geometry parameters.

Table 1의  $L$  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 매트랩 계승화 방법(Matlab Digitising Routines)을 이용하여 변형 전/후의 토우 형상의 기하학적 데이터를 얻었다[8]. 변형 과정 중 토우의 미소 구조 변화량을 정량화 하기 위해, Fig. 2에 보이는 바와 같이, 등가 두께(Equivalent Tow Thickness), 종방향 토우의 진폭(Amplitude of Longitudinal Tow), X와 Y방향의 토우 간격(X and Y Directional Tow Intervals) 등의 기하학적 변수를 수치화 하였다.

각 시편으로부터 얻은 토우의 기하학적 변수의 효과적인 비교를 위해 Fig. 2에 보이는 바와 같이 종방향 토우의 파장(Wavelength)은 첫번째 토우의 왼쪽으로부터 다음 첫번째 토우의 같은 위치까지의 거리로 정의하였다. 전단각이 증가함에 따라 토우의 원래 형상이 심하게 왜곡되어 변형후의 토우 형상을 타원과 같은 간단한 도형으로 근사하기 힘들어짐을 고려하여 식 (1)의 등가 토우 두께와 토우 폭을 계산하여 각 시편에 대해 그 값들을 서로 비교하였다.

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

$$\bar{y} = \frac{\sum_i |y_i - y_c| \cdot \Delta A}{A}$$

윗 식에서  $x_c$  와  $y_c$  는 선택된 토우의 중심점을 나타내며,  $\Delta A$  와  $A$  는 매트랩 프로그램으로부터 얻은 토우 경계를 구성하는 60여개의 점으로 형성된 곡부 미소면적과 전체 토우 면적을 나타낸다(Fig. 3).

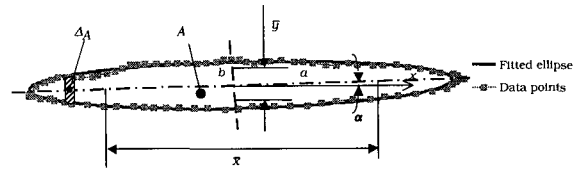


Fig. 3 Ellipse fitted to the raw data points.

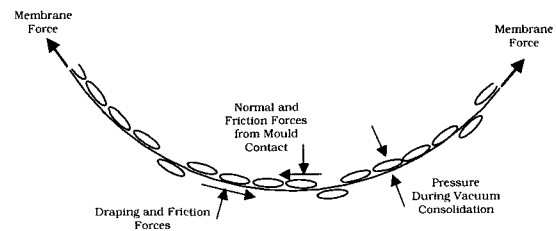


Fig. 4 Schematic of the forces on the material during draping.

종방향 토우 파형(Waviness)의 진폭(Amplitude)을 측정하기 위해 Fig. 2에 보이는 바와 같이 토우 두께를 이분하는 중심선을 이용하였으며, X와 Y방향의 토우 간격을 측정하기 위해 각 토우 단면의 중심점을 이용하였다. 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 여러 가지 외력이 발생한다(Fig. 4).

모든 시편의 전단각 측정 결과 A3 부분(Fig. 1)에 있는 시편들이 가장 큰 전단각을 가짐을 알 수 있었으며, 이는 곡률 반경(Radius of Curvature)과 같은 기하학적 특성과 직물 복합재료의 물질 특성([0°/90°] 적층 패턴)에 기인한다고 판단된다. 따라서 이 부분에서의 결과력(Resultant Forces)은 주로 0°와 90°의 대각선 방향으로 작용하여 결과적으로 전단력을 발생시키기 용이하다.

반면 A1 부분(Thread A1 in Fig. 1)의 시편들은 헬멧의 정중상부(0°: Fig. 1)에 위치하고 있기 때문에 대부분의 외력은 재료를 0° 방향으로 인장하는데 사용되므로 가장 작은 전단각을 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 관찰 결과, 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)[8]의 변형 특성으로 설명되어질 수 있다. 헬멧의 다른 부분과는 달리 세 부분의 하부(Bottom Part)는 재료와 금형 사이에 충분하지 못

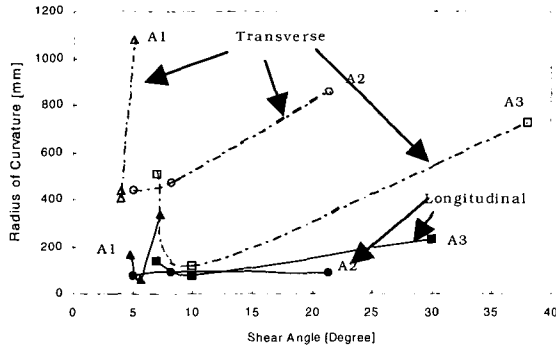


Fig. 5 Radii of Curvatures of along the two directions.

한 집축에 기인하여 다른 두 부분(Top, Middle Parts) 과는 상이한 변형 특성을 가진다. 금형의 기하학적 조건이 재료 변형에 미치는 효과를 파악하기 위해 Fig. 5와 같이 각 부분에서 얻은 현미경 관찰 시편의 곡률 반경(Radius of Curvature)의 변화량을 측정하였다. 측정 결과 횡방향의 곡률 반경이 종방향 곡률 반경에 비해 매우 큰 값을 알 수 있었다.

### 3. 미세 구조의 변형

재료의 드레이핑 공정 중 발생된 하중과 서로 다른 기하학적 조건이 종방향과 횡방향 토우에 미치는 영향을 검증하기 위해 두가지 방향(종방향, 횡방향)의 절단면을 현미경을 이용하여 관찰하였으며, 토우의 기하학적 변수의 변화량은 변형전 원재료인 프리프레그 치수를 이용하여 정규화(Normalise)되었다.

전단각에 따른 토우의 기하학적 변수의 변화량은 사용된 프리프레그와 동일한 짜임 구조(Woven Structure)를 가진 건조물(Dry Fabrics)을 이용한 단축 편향 실험(Bias Extension Test), 이축 인장실험(Biaxial Test) 결과와 비교하였다[8]. Fig. 6은 헬멧 금형에 직물 복합재료를 드레이핑(Draping) 할 때 각 방향으로 발생하는 하중의 크기와 재료의 미세 변형 거동을 개념적으로 나타낸 것이다.

#### 3.1 드레이핑 헬멧의 중앙부 시편: A1 부분

Fig. 7은 A1 부분에서 얻은 시편의 현미경 단면 사진이다. A1 부분에서 얻은 시편들은 헬멧 중앙부의 기하학적 특성과 재료의 적층각도( $0^\circ/90^\circ$ )에 기인하여, 드레이핑력(Draping Force)을 포함한 모든 외력이 주로 토우 방향( $0^\circ$ 와  $90^\circ$ )의 인장력(Extension Force)으로 작용하게 되어 상대적으로 매우 작은 전단각을 가짐을 알 수 있다.

이러한 하중 조건은 각 토우의 당김 효과(Stretching 혹

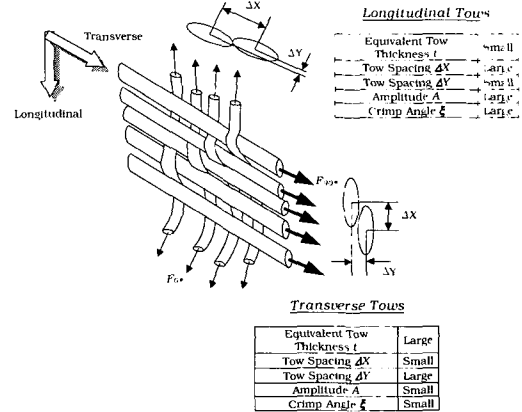


Fig. 6 Conceptual forces and deformation patterns in the fabric.

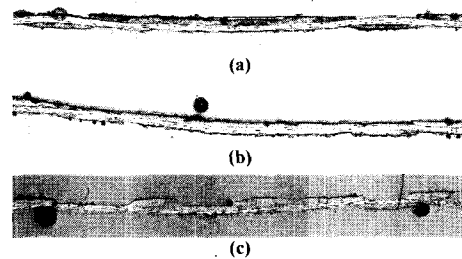


Fig. 7 Micrographs of longitudinal sections(i.e. the longitudinal thread runs horizontally). The mould surface is at the top of each cross section; (a) thread A1 - top, (b) thread A1 - middle, (c) thread A1, bottom.

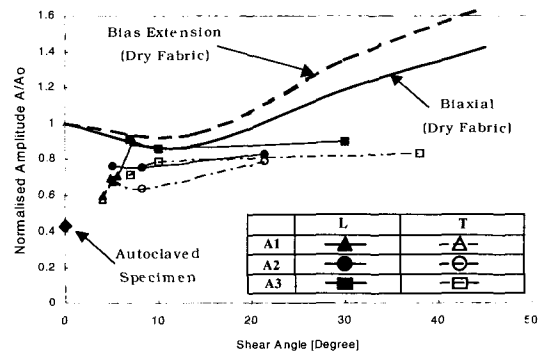


Fig. 8 Variation of normalised amplitude  $A/A_0$  of longitudinal tow with shear angle.

은 De-crimping Effect)로 인해 종방향 토우의 진폭을 다른 부분(Thread A2, Thread A3)의 시편에 비해 감소시킨다(Fig. 8). 토우 방향으로의 큰 하중은 근접한 토우들의 겹침 현상(Overlapping Phenomenon)을 야기하여 Y방향 토우 간격(Tow Interval)을 증가시키게 된다(Fig. 9).

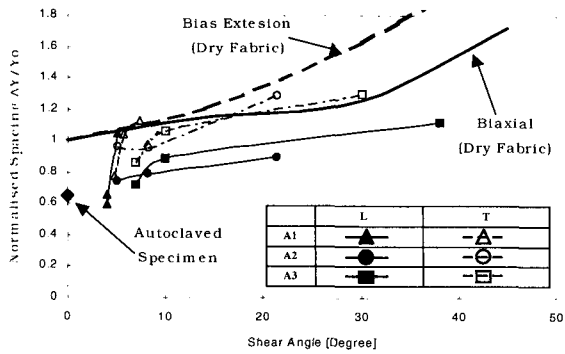


Fig. 9 Variation of normalised out-of-plane tow spacing  $\Delta Y/\Delta Y_0$  with shear angle.

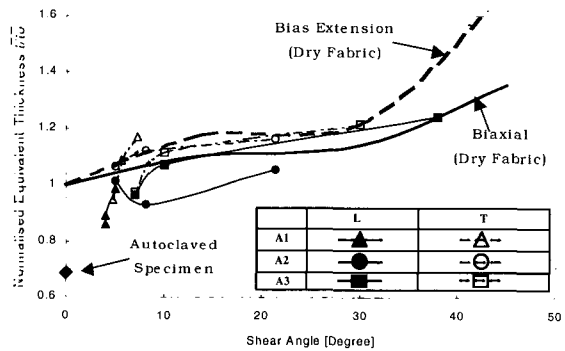


Fig. 10 Variation of normalised equivalent tow thickness  $t/t_0$  with shear angle.

한편, 헬멧의 정 중앙부인 상부는 매우 작은 Y방향 토우 간격과 토우의 진폭을 가지게 되는데, 이는 기하학적 특성상 과도한 드레이핑력과 진공에 의한 수직 압력에 기인한 수직 압축력(Normal Compressive Force)에 의한 영향으로 판단된다. 이 부분에서의 작은 토우 두께는 위와 같은 판단의 중요한 증거가 될 수 있다(Fig. 10). 직물 프리프레그를 드레이핑 한 경우 건직물(Dry Fabric)을 이용한 인장실험(Bias Extension, Biaxial Tests)결과와 비교하면, 상대적으로 낮은 진폭(A)을 가지는 것을 알 수 있는데, 이 또한 드레이핑의 경우 진공백 성형 공정에 의한 수직 압축력에 의한 영향으로 판단된다.

그림에서 보는 바와 같이 헬멧의 하부에서는 두 방향 모두 Y방향 토우 간격과 토우의 진폭이 다른 부분(Thread A2 and A3)에 비해 급격히 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 이 부분의 기하학적 특성상(금형의 끝부분) 진공에 의한 재료와 금형 사이의 접촉이 다른 부분에 비해 적약하고, 외부에서 가해주는 드레이핑력의 방향이 0°로 직중되는 것으로 설명할 수 있다.

A1부분에서는 토우간의 심한 접촉 현상이나 겹침 현상은 관찰되지 않았다.

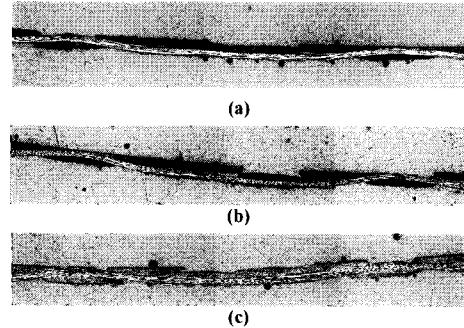


Fig. 11 Micrographs of longitudinal sections(i.e. the longitudinal thread runs horizontally). The mould surface is at the top of each cross section; (a) thread A3 - top, (b) thread A3 - middle, (c) thread A3, bottom.

### 3.2 드레이핑 헬멧의 다른 부분 시편: A2, A3 부분

Fig. 11은 A3부분에서 얻은 시편의 현미경 단면 사진이다. 이 부분은 재료의 직중방향(0°/90°)의 대각선 방향에 위치하고 있으므로 드레이핑력을 포함한 모든 외력이 재료의 전단 변형을 일으키기 쉽게 작용하므로, 세 부분 중 가장 큰 전단각을 가진다.

이러한 하중 조건은 건직물의 이축 인장실험(Biaxial Test)의 결과와 매우 유사하며, Fig. 10의 결과에서 보이는 바와 같이, 등가 토우 두께는 변형 경향이 건직물 실험과 거의 같은 경향을 가짐을 알 수 있었다. 그러나 Y방향 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 됨을 알 수 있었다 [8]. A3 부분의 전단각은 종방향(Top Part ⇒ Bottom Part)을 따라서 작은 전단각 영역에서 준대칭 전단 영역(Quasi-Symmetric Shear Region)으로 변화한다.

마지막으로, A1부분과 A3부분의 혼합 하중 조건을 가진 A2 부분은 현미경 관찰 결과 A1과 A3부분의 과도기적 변형 형상을 가짐을 알 수 있었다. 특히 이 부분은 기하학적으로 가장 큰 비대칭 구조(Un-symmetry)를 가지며, 두 방향의 기하학적 곡률 반경(Fig. 5)이 서로 큰 차이를 가지기 때문에 두 방향(종방향, 횡방향)의 토우에 큰 하중 차이를 발생시켜서 결과적으로 Fig. 8~10에서 보이는 바와 같이 두 방향의 토우 변형 형상이 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 또한 오토클레이브(Autoclave)에서 진공과 압력을 부가하지 않은 채 경화 시킨 프리프레그의 경우 Fig. 8~10에서 보이는 바와 같이, 토우 진폭, Y방향 토우 간격 및 토우 두께가 가장 작은 값을 가지는 것을 확인하였으며, 이는 경화 중 재료 내부에 특별한 하중이 발생하지 않음에 기인한다. 이와 같은 관찰 결과 재료의 성형 시, 재료 내부에 발생한 하중이 재료의 미소 변형에 미치는 효과를 알 수 있었다.

### 3.3 두 방향의 서로 다른 변형 패턴: 종방향과 횡방향 토우

헬멧 구조는 각 위치마다 서로 다른 곡률 반경을 가지는 매우 복잡한 구조이고, 사용된 직물 복합재료(Fabric Composites; Five Harness Satin Weave)의 구조적 복잡성에 기인하여 Fig. 6에서 보인 바와 같이 종방향(0°) 토우와 횡방향(90°) 토우에 발생하는 하중과 변형 형상이 달라지게 된다. 두 방향의 서로 다른 변형 형상을 확인하기 위해 종방향과 횡방향 관찰 시편의 변형 경향과 변형률을 비교하였다. 현미경 관찰결과 Fig. 8~10에서 보이는 바와 같이, 종방향 토우(0°)는 Y방향 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. Chang[8] 등은 같은 토우 구조를 가지는 건직물의 인장 실험을 통해 부가 하중에 따른 재료의 동일한 거동을 입증하였다. 구곡면(Spherical Surface)에 작용하는 표면 압력에 의해 발생하는 재료내의 인장력(Traction Forces)과 곡률 반경(Radius of Curvature)과의 관계는 많은 연구자에 의해 제안되었다[9]. 드레이핑 헬멧의 경우, 만약 진공백 공정(Vacuum Bag Process)에 의해 발생된 재료와 금형 사이에서 발생한 압력(P)이 양방향 토우에 균일한 영향을 준다고 가정하면, 부가 압력과 발생 인장력과 평형 조건을 고려하여 헬멧 각 위치에서의 곡률 반경( $R_{0^\circ}$ ,  $R_{90^\circ}$ )과 재료 내부의 인장력( $F_{0^\circ}$ ,  $F_{90^\circ}$ )과의 관계는 다음의 식으로 유도된다;

$$\frac{P}{2} \times (2 \times R_i \sin \Phi_i) = 2 \times F_i \times \sin \Phi_i \quad (2)$$

$$\Rightarrow P = \frac{2 \times F_i}{R_i} \quad (3)$$

$$\therefore \frac{F_i}{R_i} = \text{const.} \quad (4)$$

여기서,

$P$  = Pressure [ $N/m^2$ ]

$F_i$  = Traction force per unit length [ $N/m$ ]

$R_i$  = Radius of curvature [ $1/m$ ]

$\Phi_i$  = Curved angle [ $^\circ$ ]

$i = 0^\circ \text{ and } 90^\circ$

헬멧 금형의 기하학적 형상 관찰에 의하면, 횡방향 토우 방향의 곡률 반경이 종방향 토우의 곡률 반경보다 큰 값을 가짐을 알 수 있었으며(Fig. 5), 이러한 기하학적 조건은 드레이핑 공정중 횡방향 토우에 더 큰 인장력을 발생시킴을

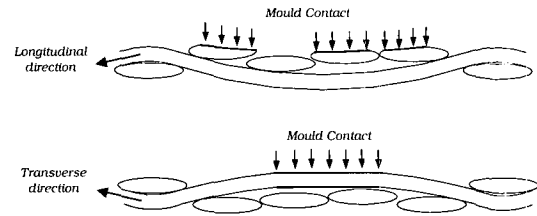


Fig. 12 Mould contact conditions of the two directions.

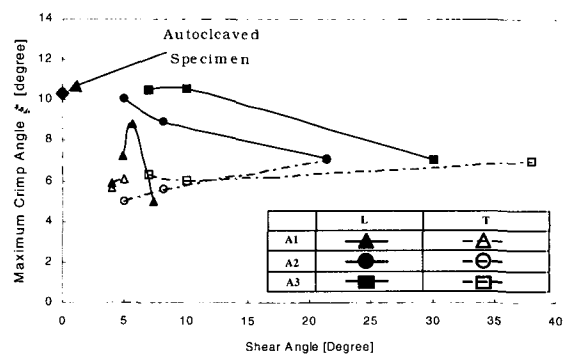


Fig. 13 Variation of maximum crimp angle with shear angle.

식 (4)를 통해 유추할 수 있다. 특히, 횡방향 토우의 경우 Fig. 12에서 보이는 바와 같이 드레이핑 공정중 헬멧 금형과 직접 접촉을 하고, 이러한 조건은 Fig. 13에서 보이는 바와 같이 재료의 경화 공정중 당김 효과를 촉진시켜 최대 주름각을 감소시키게 된다. 양 방향 토우의 주름각의 변화 관찰 결과로부터, 횡방향 토우는 종방향 토우에 비해 작은 주름각을 가짐을 알 수 있었으며, 이는 종방향 토우가 더 큰 하중을 전달한다는 중요한 증거가 된다고 판단된다. 그러나 A1 부분의 하부는 종방향 토우가 최소 주름각을 가지는데, 이는 재료의 적층각([0°/90°])과 금형의 특이한 기하학적 형상에 기인한 과도한 토우 인장에 의한 것으로 판단된다.

횡방향 토우(90°)는 금형과의 직접적인 접촉으로 인해 성형 공정 중 원래의 형상의 대부분을 잃게 된다.

건직물을 이용한 실험결과[8]에 의하면, 토우에 작용하는 하중이 증가함에 따라 토우의 두께와 폭은 증가하게 되며, 이는 토우를 구성하는 섬유(Fibre)간 간격이 증가함을 의미하며, 이러한 현상은 Fig. 14에서 보이는 바와 같이, 토우 내부에 빈 공간(Vacancy)을 형성한다. 횡방향 토우의 큰 하중은 토우 내부의 빈 공간을 증가시켜, 결과적으로 종방향 토우의 경우에 비해 횡방향 토우의 단면적을 증가시킨다.

또한 토우에 작용하는 하중이 증가할수록 근접해있는 토우들과의 겹침 현상(Overlapping Phenomenon)이 증가함을 알 수 있었다.

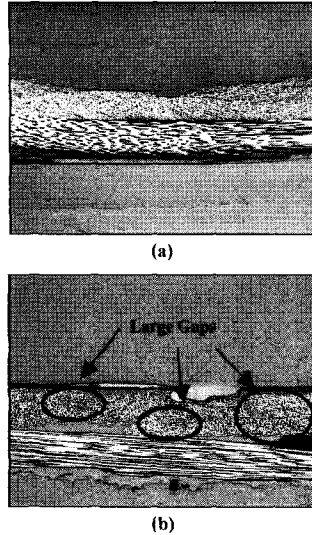


Fig. 14 Details of tow structure taken from the bottom specimen, thread A2 (about 22° shear angle); (a) longitudinal tows seen in cross-section, (b) transverse tows seen in cross-section.

#### 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. 전단각과 금형의 기하학적 조건이 드레이핑 공정에 미치는 영향을 확인하기 위해 드레이핑 헬멧의 여러 부위에서 종방향 및 횡방향 단면 관찰용 시편을 준비하여 관찰하였다. 현미경 관찰 결과와 하중-기하학적 조건의 관계를 분석한 결과로부터 횡방향 토우가 더 큰 하중을 전달함을 알 수 있었으며, 이와 같은 하중 조건은 당김 효과로 인해 횡방향 토우의 Y 방향 토우 간격과 등가 토우 두께를 증가시키며, 토우의 진폭과 주름각을 감소시키는 것을 확인하였다. 이와 같은 관찰 결과를 경화 시 압력과 진공을 가하지 않은 프리프레그와 비교한 결과, 성형 과정 중 재료 내부에 하중이 발생하지 않는 경우 토우 두께, Y 방향 토우 간격 및 토우 진폭이 매우 작은 것을 확인하였으며, 이는 재료의 성형 공정 중 재료 내부에 발생하는 하중이 토우 구조의 변형에 미치는 효과를 설명해 준다. 더우기 횡방향 토우의 내부에는 종방향 토우에 비해 섬유간에 더 큰 공간(Vacancy)을 가짐을 알 수 있었으며, 이는 횡방향 토우에 큰 인장력이 작용하는 증거라고 판단된다. 본 연구를 통해 복잡한 형상의 금형을 이용한 드레이핑 공정 중 직물 복합재료 내부에서 발생하는 변형 경향을 부분적으로 이해할 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2003년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

#### 참고문헌

- 1) Mohammed, U., Lekakou, C. and Bader, M.G., "Experimental studies and analysis of the draping of woven fabrics," *Composites A*, Vol. 31, 2000, pp. 1409-1420.
- 2) Hu, J. and Jiang, Y., "Modelling formability of multi-axial warp knitted fabrics on a hemisphere," *Composites A*, Vol. 33, 2002, pp. 725-734.
- 3) Prtluri, P., Sharma, S. B. and Ramgulum, R., "Comprehensive drape modelling for moulding 3D textile performs," *Composites A*, Vol. 32, 2001, pp. 1415-1424.
- 4) Wang, J., Paton, R. and Page, J.R., "The drape of woven fabric performs and prepregs for production of polymer composite components," *Composites A*, Vol. 30, 1999, pp. 757-765.
- 5) Potter, K., "Beyond the pin-jointed net: maximising the deformability of aligned continuous fibre reinforcements," *Composites A*, Vol. 33, 2002, pp. 677-686.
- 6) Sharma, S. B., and Sutcliffe, M. P. F., "Draping of woven composites over irregular surfaces," *Proceedings of the thirteenth international conference on composite materials, ICCM-13, Beijing, China, 2001.*
- 7) Sharma, S. B., Sutcliffe, M. P. F., Clifford, M. J., and Long, A. C., "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, Liege, Belgium, 2001.
- 8) Chang, S. H., Sharma, S. B., and Sutcliffe, M. P. F., "Microscopic investigation of tow deformation of dry fabrics during draping," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, 2003, pp. 99-111.
- 9) Ugural, A. C., and Fenster, S. K., *Advanced strength and applied elasticity*, 3<sup>rd</sup> edition, Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey, 1995.