

# 3 차원 곡면 드레이핑 중 금형의 물성과 전단각에 따른 토우구조의 변화

정지규\*, 장승환\*\*

## Variation of Tow Geometry according to Mold Property and Shear Angle during Draping on 3D Curved Surfaces

Jee Gyu Chung\*, Seung Hwan Chang\*\*

### Abstract

This paper aims to investigate the tow deformation pattern with respect to shear angle and mold property during draping of plain weave carbon/epoxy prepreg. Aluminum and PVC foams with different foam density are used for the draping hemisphere molds with 250 mm diameters. Microscopic observation reveals that tow parameters like crimp angle and Y-directional tow intervals are influenced by shear angle and mold density at the same time. The correlation between crimp angle and Y-directional tow interval is also found out.

**Key Words:** 드레이핑(Draping), 직물 복합재료(Fabric composites), 토우 파라미터(Tow parameter), 주름각(Crimp angle), 현미경 관찰(Microscopic observation)

### 1. 서론

섬유강화 복합재료는 높은 비강성과 비강도에 기인하여 자동차, 선박 및 항공산업에 폭넓게 사용되고 있다. 특히 직물 복합재료(Fabric Composites)는 취급이 용이하고, 유연성이 높기 때문에 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 3 차원곡면을 가지는 복잡한 구조의 성형을 위해서는 재료의 드레이핑 거동(Draping Behaviour)을 이해하는 것이 매우 중요하다. 복합재료의 섬유나 토우(Tow) 구조의 미시적 변형을 관찰하는 것은 토우 크기, 직물의 짜임 구조 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 과정 중 재료의 주름현상(Wrinkling), 토우간 미끄러짐 현상(Slippage) 그리고 국부적으로 과도한 변형을 야기하므로 재료의 변형거동에 관한 정보가 필요하다. 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 및 성형 거동을 실험적으로 분석하였으며, Hu [2] 등은 반구 구조에 적용된 다축 직물 복합재료 변형거동을 예측하기 위한 수학적 모델을 제시하였다. Sharma [3] 등은 해석과 실험적 연구를 통해서 5 매 주자직 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. 또한 장승환

\*\*교신저자 : 중앙대학교 기계공학부

\*중앙대학교 기계공학부 대학원

[4],[5]등은 토우 진폭과 토우 간격 과 같은 토우 변수의 변화에 대한 연구를 수행하여 부가하중과 이에 상응하는 토우변형의 관계를 알아냈으며, 인장실험을 통해 전단각(Shear Angle)에 대한 토우의 변형패턴을 검증하였다. 또한 헬멧 형상의 금형으로의 드레이핑 연구를 수행하여 각 부위의 전단각에 따른 토우구조의 변화를 관찰하였다. 본 논문에서는 여러 가지 재질의 반구형 금형 위로 드레이핑된 직물 복합재료가 성형 중 전단변형과 금형의 물성에 따라 토우의 변형 패턴에 미치는 영향을 관찰하고 조사하였다.

## 2. 시 편

### 2.1 금형을 이용한 반구의 성형

현미경 관찰을 위한 시편 제조에 사용된 직물 복합재료는 두께 0.2mm 인 평직(Plain Weave) 탄소섬유/에폭시(WSN-3k, SK, Korea)이며 알루미늄 금형과 2 가지의 서로 다른 PVC 폼(Divinycell, closed cell)을 사용하였다. 금형으로 사용된 재질의 밀도는 Table 1 에 나타내었다.

Table 1. Mold property

Mold	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]
PVC foams	HT70	70
	HT110	115
Aluminum	2800	70000

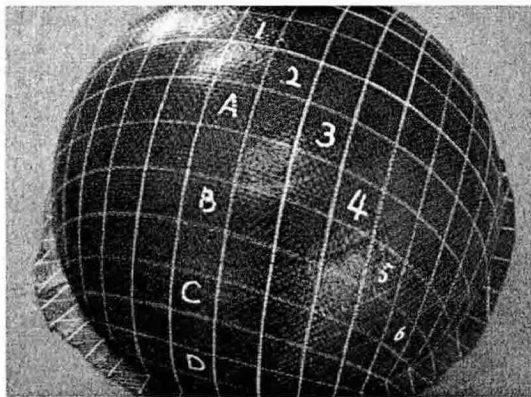


Fig. 1 Draped hemisphere and sectioning positions of the specimens

알루미늄 금형은 지름 250mm 의 반구로 가공을 하고 폼의 경우에는 각각의 폼(HT70, HT110)을 재단 후 적층을 통해서 알루미늄을 이용한 금형과 같은 크기의 지름으로 250mm 로 가공하여 금형을 완성하였다. 진공성형 전 시편절취와 부위별 전단각의 측정을 용이하게 하기 위해서 드레이핑 전에 직물 복합재료 표면에 20×20 mm<sup>2</sup>의 간격으로 선을 그어놓았다.(Fig. 1)

### 2.2 현미경 관찰 시편

반구형 금형 위에 드레이핑 된 직물 복합재료를 두 가지 대표적인 방향(0°, 45°, Fig. 1)으로 드레이핑 전 직물 복합재료에 그어놓은 선을 따라서 20×20 mm<sup>2</sup>의 시편을 각각 절취하였다. 현미경 관찰 시편을 제조하기 위한 금형에 횡방향 관찰단면이 평행하도록 위치시킨 후 에폭시 수지를 금형 내로 주입하여 상온에서 12 시간 동안 경화시켰다. 현미경 관찰 면을 얻기 위해 여러 가지 등급의 사포표면처리(#220, #400, #800, #1000)와 최종적인 경면을 얻기 위해 6 μm 다이아몬드 입자를 이용한 표면처리를 수행하였다. 모든 시편에 대해서 측정과 표면처리를 2 번씩 반복하여 (각 관찰 면의 두께 간격은 2 mm) 총 180 여 개의 토우 쌍을 디지털 현미경을 이용하여 촬영하였으며, 측정대상의 평균값을 얻기 위한 데이터로 사용하였다. 절사평균(Trimmed mean) 방법을 사용하여 최대값과 최소값을 제외시킴으로 측정상의 오차로 인한 측정 결과의 불확실성을 최소화하였다.

Table 2 는 드레이핑 공정으로 제작된 반구형상의 구조로부터 얻은 시편의 각 관찰 위치에 따른 전단각이다.

Table 2. Shear angles of the specimens

Specimen's Number	AL	HT70	HT110
1	0°	0°	0°
2	4°	3°	1°
3	5°	4°	5°
4	10°	12°	11°
5	26°	25°	23°
6	36°	35°	35°

관찰 면의 토우구조의 변형경향을 분석하기 위해 저출력 현미경(Low powered microscope)에 부착된 디지털 카메라를 이용하여 영상 데이터를 획득하였다. 영상 데이터로부터 전단각 및 드레이핑시 사용된 금형의 재질에 의한 토우구조의 변형량을 정량화 하기 위해 매트랩 계수화 방법(Matlab disitising routines)과 AutoCad™ 를 이용하여 변형된 토우 형상의 기하학적 데이터를 얻었다[6]. 변형 과정 중 토우의 미소구조 변화량을 정량화하기 위해 Fig. 2 에 보이는 바와 같이 등가 토우두께(Equivalent tow thickness), 종방향 토우의 진폭, Y 방향의 토우간격(Y directional tow intervals), 토우의 주름각(Crimp angle)등의 기하학적 변수를 수치화하였다.

각각의 시편은 시편의 원래 위치에 따라 서로 다른 전단각을 가지고 있으며, 이러한 결과는 드레이핑 공정과 진공백 성형공정 중 시편의 위치에 따라 다른 하중환경에 의한 토우의 전단력 혹은 토우 인장력(Stretching or De-crimping force)등의 변화에 기인한다. 드레이핑 성형공정 중 재료 내부에는 드레이핑력, 진공에 의한 압력 등의 여러 가지 외력이 발생한다.

또한 관찰에 사용된 각각의 시편은 동일한 성형조건에서 각기 다른 물성의 금형에 직물 복합재료가 드레이핑 된 것으로 3 차원 곡면 금형의 물성(Table 1)에 따른 토우구조의 변형을 관찰 할 수 있다.

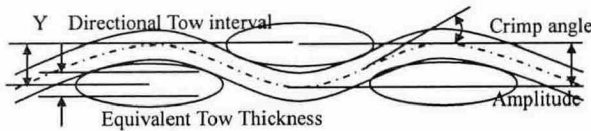


Fig 2. Definition of Tow geometry parameter

### 3. 토우구조의 변형

재료의 드레이핑 공정 중 발생한 직물 복합재료의 전단각과 사용된 금형의 물성이 토우구조에 미치는 영향을 관찰하기 위해 토우형상을 현미경을 이용하여 관찰하였으며, 토우의 기하학적 치수는 상압에서 성형된 직물 복합재료의 토우치수로 나누어 표준화(Normalisation) 하였다.

#### 3.1 전단각에 따른 토우구조의 변형

동일한 금형의 재질에서 절취된 각각의 시편은 드레이핑 공정 중 재료의 중방향 및 횡방향 토우에 인장력이 발생하여 전단각이 거의 발생하지 않으며, 대각선 방향(45°)으로는 드레이핑력에 의한 인장 및 전단력이 발생하여 반구의 중심은 0° 에 가까운 전단각을 가지며 아래쪽으로 갈수록 전단각이 커짐을 알 수 있다. 이러한 변형조건에 따른 차이는 대각선 방향(45°)의 토우의 진폭을 점점 증가시킨다(Fig. 3~5). 이는 금형의 물성에 상관없이 관찰이 되었으며, 토우의 진폭은 금형의 물성보다는 전단각에 더 많은 영향을 받는다고 판단된다. 또한 동일한 성형 하중조건에서 전단각이 증가함에 따라 각 방향의 토우의 주름각이 증가하는 경향을 보이는 것을 확인하였으며 이는 선행연구의 결과와도 일치하는 경향이다[6].

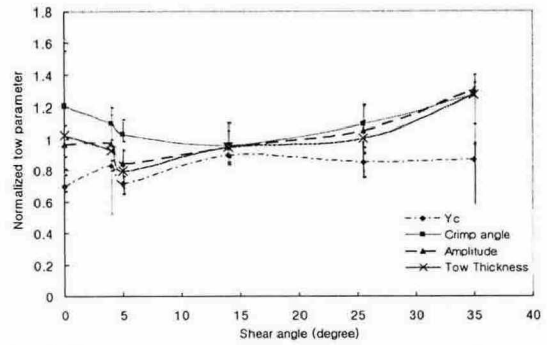


Fig. 3 Variation of normalized tow parameter draped on Aluminum mold

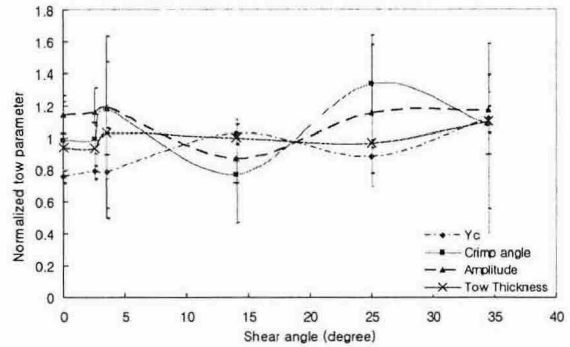


Fig. 4 Variation of normalized tow parameter draped on HT70 foam mold

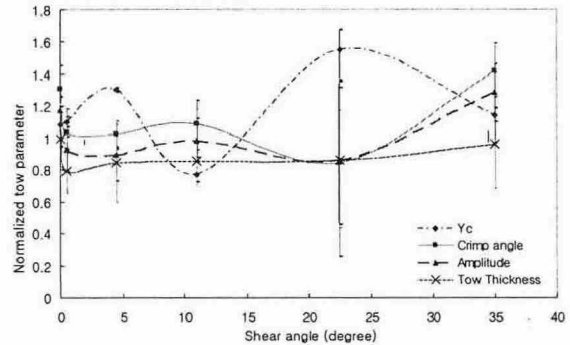


Fig. 5 Variation of normalized tow parameter draped on HT110 foam mold

#### 3.2 금형의 물성에 따른 토우구조의 변형

각각의 금형 재질에서 동일한 전단각을 갖는 시편을 이용해서 금형의 재질에 따른 토우의 미소변형을 비교하였다. 알루미늄 금형에 드레이핑 된 복합재료의 주름각은 전단각에 따라서 일정하게 증가하는 현상을 관찰할 수 있었으나 포움을 이용한 경우 전체적으로는 증가하는 경향을 보이나 각각의 전단각에 따른 측정값의 편차가 심하게 나타났으며 Y 방향 토우 간격은 주름각과 반대되는 경향을 보였다(Fig. 6). 이러한 역비례 형태의 변형현상은 포움의 밀도에 따라서 성형 중 받게 되는 수직 압축력에 의해

포움과 같은 저밀도 재질의 금형을 파괴하기 때문이라 판단이 되어진다. Fig. 3 에서 보는 바와 같이 강제형 알루미늄을 이용한 경우 위에서 언급한 두 개의 토우변수가 전반적으로 약한 역비례 거동을 보였다. 그러나 포움(HT70, HT110)을 금형으로 이용한 경우(Fig. 4~5) 두 변수의 변형경향이 뚜렷하게 대비되는 것을 알 수 있었다.

포움 샌드위치 구조성형 시 성형압력 조건이 변할 때 저밀도의 포움일수록 압력에 따른 토우 주름각의 변화가 뚜렷하게 일어나게 되는 현상[7]을 감안할 때 성형 시 받게 되는 수직압력으로 인한 포움의 재질에 따른 토우구조의 변형과 전단력에 의한 토우구조의 변형이 복합적으로 발생해서 위와 같은 현상이 일어난다고 판단된다.

Fig. 6 에 보이는 바와 같이 알루미늄 금형의 경우 두 토우의 변수들의 분산이 역비례 관계를 이루는 범위가 크지 않음을 볼 수 있고 이와는 대조적으로 포움을 금형으로 이용한 경우에는 토우의 두 변수의 분산이 뚜렷한 역비례 관계를 보임을 알 수 있다.

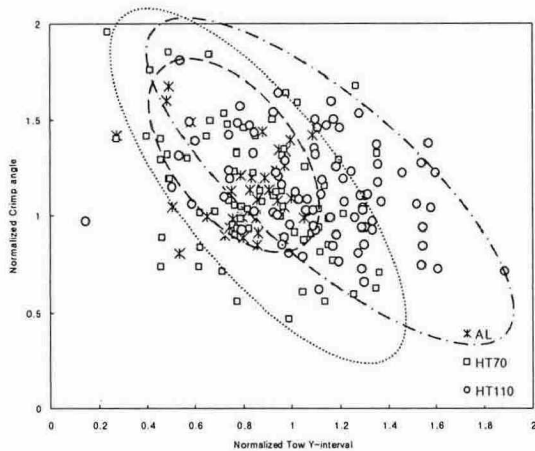


Fig. 6 Relation of Crimp angle - Y Directional Tow Intervals

이는 Y 방향의 토우 간격과 주름각의 관계는 전단변형을 일으키는 하중 조건과 함께 금형의 재질이 토우의 변형거동에 많은 영향을 준다는 판단에 근거가 될 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 직물 복합재료를 이용한 3 차원 곡면 드레이핑 중 금형의 물성과 전단각을 일으키는 하중조건에 따른 토우구조의 변화를

물성이 서로 다른 반구형상의 금형에 드레이핑한 후 전단각에 따른 시편을 절취 하여 현미경 관찰을 통해서 토우두께, 토우진폭 등 다양한 토우구조를 관찰하고 비교하였다. 전단변형을 일으키는 하중조건에 의해서 토우의 진폭과 주름각이 증가하는 것을 확인하였다. 또한 금형의 물성에 따라서 주름각과 종방향 토우의 Y 방향 간격과의 관계가 역비례 특성을 이루는 것을 관찰할 수 있었다. 저밀도 포움의 경우 전단변형을 일으키는 하중뿐만 아니라 성형 시 받는 수직압력이 토우의 구조에 많은 영향을 준다는 것을 확인 할 수 있었다. 본 연구를 통해서 전단각과 금형의 재질에 의한 토우변수 변화의 관계를 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 wrap knitted fabric on a hemisphere. Composites a 2002;33:725-734
- (3) 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 material forming vol. 1. ed. a m Hbraken, Liege, Belgium, 2001
- (4) 장승환, '탄소섬유 건직물의 일방향 편향인장 실험과 이축인장실험,' 한국복합재료학회추계 학술대회 논문집, 2003, pp.99-102
- (5) 장승환, '직물 복합재료를 이용한 드레이핑 헬멧의 미소변형 관찰,' 한국 복합재료학회지 Vol. 16, No.4, 2003, pp.29-35
- (6) Chang SH, Sharma SB and Sutcliffe MPF. Microscopic investigation of tow deformation of dry fabric during draping. Composites Science and Technology. 2003, 63, pp. 99-111
- (7) Chang SH, Changes in micro tow geometry of plain weave carbon fabrics composing foam-composite sandwich beam during forming, Composites Science and Technology, 2004 : submitted