

# 폴리머 폼-복합재료 샌드위치 구조의 성형 중 토우 구조의 변화

장승환<sup>†</sup>, 우종원\*, 김용수\*

## Variation of Tow Geometry for Polymer Foam-Composite Sandwich Structures during Forming

Seung Hwan Chang<sup>†</sup>, Jong Won Woo\*, Yong Soo Kim\*

**Key Words** : 폼 (Foam), 샌드위치 구조 (Sandwich structures), 주름각 (Crimp angle), 토우 구조 (Tow geometry), 현미경 관찰 (Microscopic observation)

### ABSTRACT

This paper aims to investigate the micro-mechanical behaviour of tow geometry with forming pressures and densities of foams during the curing process of plain weave carbon fibre fabric prepregs onto polymer foams. In order to find out and compare deformation patterns between different forming conditions, tow parameters such as amplitude and crimp angle etc. are investigated. From the observation results, geometric difference in the tow architecture with respect to forming conditions and foam characteristics were found. To observe the micro-deformation of the fabric structure, appropriate specimens from carbon fibre-foam sandwich structures are sectioned and observed under the microscope.

### 1. 서 론

폴리머 폼과 섬유강화 복합재료로 구성된 샌드위치 구조는 높은 비강성과 비강도에 기인하여 자동차, 선박 및 항공 산업에 폭 넓게 사용되고 있다. 일반적으로 샌드위치 구조의 면재로는 알루미늄 혹은 섬유강화 복합재료가 사용되며, 허니컴 혹은 폼 등은 면재 (Skin materials)를 중심으로부터 일정 거리를 유지시키며 재료의 좌굴을 억제하는 심재 (Core materials)로 사용된다 [1]. 여러 가지 종류의 심재 중에서 PVC 폼과 폴리우레탄 폼은 가공성과 성형성이 우수하여 산업 현장에서 많이 쓰인다. 샌드위치 구조의 초기 발전 단계에서는 그 형태가 비교적 단순한 보 (Beam)나 평판 (Plate)이었으나, 근래에 와서는 샌드위치 구조의 적용대상 구조가 반구형,

3 차원 비구면 등과 같이 점점 복잡해지고 있다. 따라서 이와 같은 요구에 부응하기 위한 드레이핑 (Draping) 기술은 폼과 같은 탄성 기초 위에 직물 복합재료로 구성된 복잡한 3 차원 구조를 가지는 샌드위치 구조를 제작하는데 필수적이다. 드레이핑 기술과 토우 변형 패턴에 관한 연구는 적절한 실험과 해석 알고리즘을 통한 기초적인 변형 해석으로부터 토우 변형의 현미경 관찰 혹은 특정한 제조 방법을 이용한 제품에의 응용까지 다양한 분야에 대해 많은 연구가 이루어졌다. 장승환 [2] 등은 건직물 (Dry Fabric)의 토우 진폭 (Tow Amplitude) 과 토우 간격 (Tow Intervals)과 같은 토우 변수의 변화에 대한 연구를 수행하여 부가 하중과 이에 상응하는 토우 변형의 관계를 알아내었으며, 또한 여러 가지 인장실험을 통해 전단각 (Shear Angle)에 대한 토우 변형 패턴을 검증하였다. Hofstee [3] 등은 얇은 구조에 대한 당김

\* 중앙대학교 기계공학부 대학원

<sup>†</sup> 교신저자: 중앙대학교 기계공학부 (E-mail: phigs4@cau.ac.kr) -198-

효과와 전단 변형 모드의 효과를 해석적 방법과 현미경 관찰을 통한 실험적 방법으로 조사하였다. McBride [4] 등은 네 개의 조화함수 곡선으로 정의되는 단위 셀을 이용하여 직물 복합재료의 전단 변형을 평가하고 실험 결과와 해석 결과를 비교하였다. Rozant [5] 등은 열가소성 샌드위치 패널을 이용하여 3 차원 구조를 위한 적절한 공정 조건에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 열성형 공정 중 샌드위치 패널의 열적 거동을 위한 수치적 시뮬레이션을 도입하였다. 또한 Chang [6] 은 헬멧 형상의 금형으로의 드레이핑 연구를 수행하여 각 부위의 전단각에 따른 토우 구조의 변화를 관찰하였다. 본 논문에서는 탄성 금형으로의 3 차원 드레이핑 연구의 첫번째 단계로서 탄소섬유 에폭시 직물 복합재료와 PVC 폼으로 이루어진 샌드위치구조의 성형공정 중 폼의 밀도와 성형 압력에 따른 토우 구조의 변형 패턴을 관찰 및 조사하였다.

## 2. 시편

### 2.1 샌드위치 시편

현미경 관찰을 위한 시편 제조에 사용된 직물 복합재료는 두께 0.2mm 인 평직 (Plain Weave) 탄소섬유/에폭시 (WSN-3k, SK Chemical, Korea)이며, 4 가지 서로 다른 밀도를 가지는 PVC 폼 (Divinycell, Closed Cell)을 사용하였다. 폼의 밀도를 Table 1 에 나타내었다. 폼의 양면에 직물 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 한 장씩 적층하여 샌드위치 구조를 제작하였다. 샌드위치 구조 성형은 진공백 (Vacuum bag) 성형 공정을 이용하여 진공 (0.1MPa), 1 기압 (0.2MPa), 2 기압 (0.3MPa), 3 기압 (0.4MPa), 6 기압 (0.7MPa)의 압력을 사용하였으며, 성형 된 복합재료-폼 샌드위치 구조의 표면이 평면을 유지하게 하기 위해 프리프레그 양면을 알루미늄 평판으로 지지한 후 진공백 포장을 하였다. 제작된 탄소섬유/에폭시-폼 샌드위치 시편은 사각 보 (Beam) 형상이며, 폭과 길이는 각각 35mm 와 100mm 이고, 폼의 두께는 10mm 이다. 성형 이 완료된 복합재료-폼 샌드위치 구조의 두께는 폼의 밀도와 성형 압력에 따라 변화하였다. PVC 폼의 밀도가 70kg/m<sup>3</sup> 이상인 경우에는 0.1MPa 의 성형 압력을 제외하고는 거의 일정한 압축률을 나타내었으며, 이러한 폼의 영구 변형은 면재와 심재 사이의 하중을 변화시켜서 면재로 사용된 직물 탄소섬유 복합재료를 구성하는 토우 구조의 미소 변형 (Micro-deformation)을 유발 시킬 것으로 판단된다.

Table 1. Material properties of various foams at room temperature

Foam	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
HT50	54
HT70	70
HT90	95
HT110	115

### 2.2 현미경 관찰 시편

성형된 샌드위치 시편을 토우의 방향으로 30 × 20 mm<sup>2</sup> 크기로 잘라서 현미경 관찰 시편을 제조하기 위한 금형에 관찰 단면이 평행하도록 위치시킨 후 에폭시 수지를 금형 내로 주입하여 상온에서 12 시간동안 경화 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 표면처리를 수행하였다. 현미경을 이용하여 토우의 단면 구조 사진을 이미지 데이터로 확보한 후 AutoCad™를 이용하여 종방향 토우 (Longitudinal tow)의 주름각 (Crimp angle), 진폭 (Amplitude) 등의 토우 파라미터를 측정하였다. 관찰 데이터의 신뢰도를 위해 표면처리를 수행한 단면에서 5 쌍의 토우 구조를 관찰하여 종방향 토우의 주름각 및 진폭의 평균값을 구하였다.

## 3. PVC 폼의 응력-변형을 관계

성형 중 폼과 직물 복합재료의 토우 구조의 거동을 설명하기 위해 여러 가지 PVC 폼의 온도에 따른 응력-변형을 관계를 측정하였다. 압축 실험을 위한 폼 시편은 ASTM [9]에 근거하여 시편 크기를 50(W) × 50(L) × 30(t)로 제작하였다. 온도 챔버 (Heating chamber)가 장착된 인장시험기 (STATIC 4206, INSTRON, USA)를 이용하여 압축 시험을 수행하였다. 압축 시험을 위한 시험 온도는 80℃와 125℃에서 일정 시간 온도가 유지되는 직물 탄소섬유 프리프레그의 경화 사이클을 고려하여 상온 (약 25℃), 80℃, 125℃로 설정하였으며 압축 속도는 2 mm/min 으로 하였다. Fig. 1 은 복합재료의 경화온도인 125℃에서 측정한 폼의 응력-변형을 곡선이다.

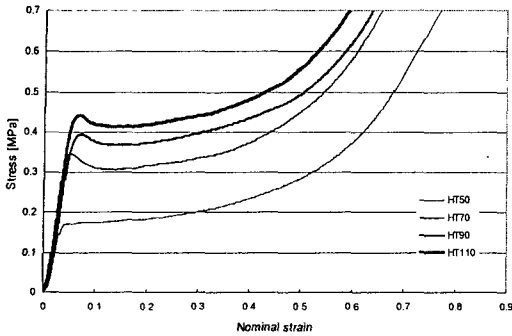


Fig. 1 Stress-strain relation of various PVC foams with respect to temperature

그림에서 보는 바와 같이 모든 폼들은 변형량이 증가함에 따라 선형구간과 평탄 (Plateau 혹은 Plastic yielding) 구간, 그리고 고밀화 (Densification) 구간을 겪었으며, 실험 온도가 상승함에 따라 항복응력 (Yield stress) 이 급격히 감소하였다. 특히 125℃에서 수행한 압축 실험의 경우 서로 다른 밀도를 가지는 폼들의 항복 응력의 차이가 두드러지게 감소하였다.

#### 4. 관찰 결과

Fig. 2 는 서로 다른 성형 압력으로 제작된 복합재료-폼 샌드위치 구조를 구성하는 직물 탄소 섬유 복합재료 단면의 현미경 사진이다. 타원형으로 보이는 한 쌍의 구조는 탄소 섬유로 구성된 토우이며, 토우 구조 아래에 보이는 어두운 부분은 폼 구조이다. Fig. 2 (a) 는 직물 탄소 섬유 복합재료만을 상압에서 경화시킨 시편이며, 이는 서로 다른 성형 압력과 밀도를 가지는 샌드위치 구조의 토우 변형량을 계산하기 위한 기본 값으로 사용되었다. 본 연구에서 측정된 주름각, 토우 진폭 등의 모든 파라미터는 이 시편의 측정값으로 나누어 정규화 (Normalisation)를 수행한 후 서로 비교되었다.

Fig. 2 (b) ~ (f) 는 각각 PVC 폼 (HT50)과 직물 탄소 섬유 복합재료로 이루어진 샌드위치 구조를 여러 가지 성형 압력을 사용하여 경화한 시편의 현미경 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 성형 압력이 낮은 경우에는 직물 복합재료의 토우 구조가 폼 면에 밀착되는 거동을 보이다가 성형 압력이 증가함에 따라 폼과의 접촉면에서 평탄화 (Flattening) 현상이 관찰되었으며 (Fig. 2 (e)), 더욱 큰 성형 압력 (0.7 MPa)을 받을 경우 토우 구조가 폼에 국부적으로 파고드는 압입 (Indentation) 현

상이 관찰되었다 (Fig. 2 (f)).

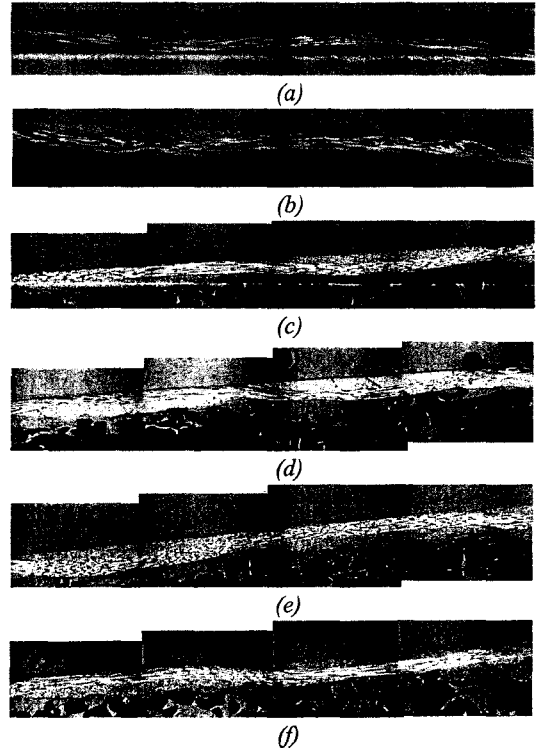


Fig. 2 Micro-structure of carbon fibre/epoxy fabric prepregs. (a) Without pressure; Prepreg only); (b) 0.1 MPa; (c) 0.2 MPa; (d) 0.3 MPa; (e) 0.4 MPa; (f) 0.7 MPa

Fig. 3 에 보이는 바와 같이 최저 밀도를 가지는 폼 (HT50)의 경우 성형 압력이 증가함에 따라 응력-변형률 선도 (Fig. 1)의 선형 구간과 항복 구간 (Fig. 2 (b), (c))에서는 비교적 낮은 주름각을 보이지만 폼의 고밀화가 시작되는 구간 (Fig. 2 (d))에서 급격한 증가를 보임을 알 수 있다. 이러한 현상은 폼의 선형 구간에서는 직물 복합재료가 폼의 표면에 밀착되는 과정에서 폼과의 미끄럼 (Slipping) 현상에 의한 당김 효과 (Stretching effect)가 발생하여 상대적으로 낮은 주름각을 나타내고, 재료가 항복함에 따라 이러한 현상이 유지되거나 횡방향 토우들 간에 작용하던 힘이 감소하여 오히려 주름각이 더 작아지는 것으로 판단된다. 그러나 재료가 더욱 압축되어 폼의 고밀화가 시작되면 토우 구조의 압밀을 저항하는 힘에 의해 종방향 토우와 금형 사이에 위치하는 토우에 작용하는 압축력이 증가하게 되어 주름각을 증가시키는 것으로 설명될 수 있다. 그 이상의 성형 압력 (0.4~0.7MPa)에서는 Fig. 2 (e)에서 보이는 바와 같이 폼의 고밀화가 더욱 진행됨에 따라 재

료의 강성 (Stiffness)이 증가하여 토우의 두께방향 거동을 억제하게 되어 주름각을 감소시키는 역할을 한다. 그러나 과도한 고밀화는 토우와 포움이 직접 접촉하는 부분에서 국부적인 압입을 발생시켜 (Fig. 2 (f)) 주름각이 다시 증가하는 것으로 판단된다.

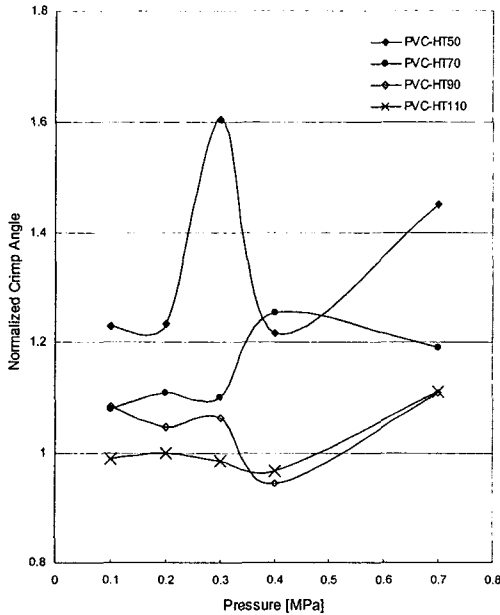


Fig. 3 Variation of crimp angle with respect to the forming pressure

HT70 PVC 포움의 경우에는 0.2MPa 까지 재료의 선형성이 유지되고 0.3MPa 부근에서 항복이 발생 되므로 종방향 토우의 주름각의 변화가 거의 없었으나, 포움의 고밀화가 시작되는 압력 (0.4MPa)에서는 HT50 PVC 포움의 경우와 마찬가지로 주름각의 급격한 증가가 관찰되었다. HT90 PVC 포움의 경우는 재료의 선형 구간에서 역시 일정한 주름각이 관찰되었으며, 그러나 이전 포움 들에서 관찰된 봉우리 현상은 관찰되지 않았다. 본 연구에서는 수행되지 않았으나, 재료가 평탄 응력 구간을 지나 포움의 고밀화가 발생하는 0.5 MPa 이상의 압력에서 이전 실험에서 관찰된 봉우리 현상이 발생될 것으로 예측된다. 마지막으로 가장 밀도가 높은 HT110 PVC 포움의 경우에는 0.4MPa 의 성형 압력까지 재료가 선형성을 유지하기 때문에 그림에서 보는 바와 같이 주름각이 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있으며, 0.7MPa 의 고압이 부가된 경우 주름각이 증가하였다. 이상의 결과에서 관찰한 바와 같이 포움의 밀도와 성형 압력이 증가함에 따라 종방향 토우의 주름각

이 변화함을 확인하였으며, 특히 재료의 밀도가 증가함에 따라 과도한 주름각이 발생하는 성형 압력과 그 원인을 파악하였다.

## 5. 결론

본 논문에서는 밀도가 서로 다른 PVC포움과 적물 탄소섬유 복합재료를 이용한 샌드위치 구조의 성형 압력에 따른 종방향 토우의 주름각과 진폭 등의 토우 파라미터의 변화를 관찰하고 비교하였다. 고온 환경에서의 포움의 변형 거동이 토우 구조의 변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 125℃ 환경에서의 압축실험을 통해 포움의 응력-변형률 곡선을 얻었다. 토우의 주름각은 포움이 선형 구간과 항복 구간에서는 비교적 낮은 값을 가졌으나, 고밀화가 시작되는 부분에서는 포움의 국부적인 저항력에 의해 급격히 증가하였으며, 고밀화가 더욱 진행됨에 따라 그 값이 감소하는 것을 확인하였다. 종방향 토우의 진폭은 포움의 항복구간에서 가장 큰 값을 나타내었으며, 그 외의 선형구간과 고밀화 구간에서는 낮은 값을 보임을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2003 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-003-D00009).

## 참고문헌

- (1) Gibson LJ, Ashby MF. Cellular solids. 2<sup>nd</sup> ed., Cambridge university press, 1997, [chapter 9].
- (2) 장승환, "탄소섬유 건직물의 일방향 편향 인장 실험과 이축 인장실험," 한국복합재료학회추계 학술대회 논문집, 2003, pp.99-102.
- (3) Hofstee J, de Boer H, van Keulen F. Elastic stiffness analysis of a thermo-formed plain-weave fabric composite Part I : geometry. Composites Science and Technology, Vol. 60, 2000, pp. 1041-1053.
- (4) Rozant O, Bourban PE, Manson JAE. Manufacturing of three dimensional sandwich parts by direct thermoforming. Composites: Part A, Vol. 32, 2001, pp. 1593-1601.
- (5) ASTM D 1621, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics. American Society for Testing and Materials, 1994.
- (6) 장승환, "적물 복합재료를 이용한 드레이핑 헬멧의 미소 변형 관찰," 한국복합재료학회지 Vol. 16, No. 4, 2003, pp.29-35.