

< 논문 >

반구형 드레이핑 공정 중 포움의 밀도와 전단각에 따른 토우의 미세변형

정지규* · 장승환†

(2006년 3월 2일 접수, 2006년 4월 24일 심사완료)

Micro-Deformation of Tows According to Foam Density and Shear Angle During Hemisphere Draping Process

Jee-Gyu Chung and Seung-Hwan Chang

Key Words : Draping(드레이핑), Fabric Composites(직물 복합재료), Tow Parameter(토우 파라미터), Crimp Angle(주름각), Microscopic Observation(현미경 관찰)

Abstract

In this paper, fabric composite draping on hemisphere moulds were studied to find out the deformation behaviour of micro-tow structures of fabrics during draping and thermoforming. Aluminium and PVC foams were used to fabricate the hemisphere moulds for draping tests. In order to observe the local tow deformation pattern during the draping several specimens for microscopic observation were sectioned from the draped hemisphere structures. The effect of forming condition and mould properties on tow deformation was investigated by the microscopic observation of the tow parameters such as crimp angle. Normalization scheme was performed to compare tow parameter variations with different forming conditions. Stress-strain relations of two different PVC foams (HT70 and HT110) were tested to investigate the effect of foam property on the micro-tow deformation during forming.

1. 서론

섬유강화 복합재료는 기존 금속재료에 비해 뛰어난 비강성, 비강도 및 높은 감쇠특성으로 인해 자동차 산업과 같은 많은 산업분야에서 널리 이용되고 있다. 특히 직물 복합재료는 3차원 곡면과 같은 복잡한 형상을 가지는 금형에 적용하기에 적합한 유연성을 가지고 있으며, 이러한 특성을 이용하여 열성형이나 RTM(Resin Transfer Molding) 공정에 많이 사용되고 있다. 직물이나 프리프레그의 드레이핑 기술은 반구와 같은 단순한 형상에서부터 3차원 곡면을 가지는 복잡한 형상까지 다양한 분야에 적용되고 있다.

드레이핑 공정 중 직물 복합재료의 미세 토우구조는 재료의 전단변형과 성형조건에 따라서 변화하게 되며, 이러한 변화는 최종 생산물의 기계적 물성에 영향을 줄 수 있다. 반구 형상이나 헬멧과 같은 3차원 곡면을 가지고 있는 구조물 위로의 드레이핑 과정 중 구조물의 기하학적 형상에 따라 드레이핑 된 직물 복합재료의 국부적인 위치에서 서로 다른 전단변형이 발생하며,⁽¹⁻³⁾ 금형의 강성에 따라 드레이핑 된 직물 복합재료의 미세 토우 구조의 변형경향이 달라질 것으로 예상된다.

직물의 미세 구조 변화가 기계적 물성에 미치는 영향에 대해서 몇몇 연구자들에 의해 제한적으로 연구가 수행되었다. 장승환 등⁽⁴⁾은 5매 주자직 직물을 이용하여 전단각에 따른 토우간격과 진폭과 같은 미세 토우구조의 변화와 하중의 관계에 대해서 연구를 수행하였으며, Zhao 등⁽⁵⁾은 GMT의 미소 구조와 기계적 물성과의 관계를 섬유다발의 구성에 대해 비교하는 연구를

* 중앙대학교 대학원 기계공학부

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : phigs4@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5354 FAX : (02)814-9476

수행하였으며, 변준형⁽⁶⁾은 복합재료의 섬유굴곡 각도 등과 같은 섬유의 기하학적 특성을 이용하여 탄성계수를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. Sharma 등⁽⁷⁾은 건직물의 일방향 편향 인장실험에 따른 재료의 변형 거동정보를 이용하여 대각선에 스프링 요소를 포함한 단순 트러스 요소를 사용하여 타원체 드레이핑을 시뮬레이션 하였다. 장승환 등⁽³⁾은 5매 주자직 직물 복합재료를 이용하여 헬멧 금형으로의 드레이핑 연구를 수행하여 재료의 서로 다른 위치에서 전단각에 따른 토우 구조의 변화를 관찰하였으며, 모든 토우 변수의 변형 경향은 이축 인장실험 및 일방향 편향 인장실험 결과와 비교하였다. van West 등⁽⁸⁾은 수지의 유동을 포함한 수학적인 모델을 제시하여 성형압력과 직조형태에 따른 토우의 거동을 관찰하였다. Robertson 등⁽⁹⁾은 평직물을 이용한 반구형 구조의 성형을 시도하였으며, 이는 공업용 섬유를 이용한 드레이핑 연구의 시초가 되었다. 이후 많은 연구에서 드레이핑과 관련된 연구가 수행되었으나 PVC 포움과 같은 연성체를 기반으로 한 금형으로의 드레이핑과 3차원의 복잡한 형상을 가지는 복합재료-포움 샌드위치 구조물에 대한 연구는 극히 미미한 실정이다. 몇몇 연구자에 의해 드레이핑 공정 중 전단변형과 금형의 기하학적 조건에 따른 토우의 미소변형 거동에 관한 연구가 수행되었지만 토우의 변형이 구조의 압축특성 등의 기계적 물성에 영향을 준다는 연구는 매우 드물다.⁽¹⁰⁾ 드레이핑과 성형 과정 중 재료의 평면 수직방향(Out-of-plane)으로의 거동에 의한 토우의 미소변형은 금형의 물성과 관련이 있다고 예상되며, 금형의 강성에 의한 복합재료 미세 구조의 변형 정보는 드레이핑 공정 중 토우의 변형과 항공기의 전방동체와 같이 동형상을 포움 샌드위치 구조물로 성형시 구조물의 정밀 성형 및 국부적 물성예측에 필수적인 자료가 될 것이다.

본 논문에서는 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 이용하여 여러 가지 재질의 반구형 금형으로의 드레이핑 거동을 실험하였다. 반구형 금형 재료로는 알루미늄(강체)과 PVC 포움(연성체)이 사용되었으며 오토클레이브를 사용하여 최적화된 경화사이클을 적용하여 프리프레그를 성형하였다. 전단각과 성형조건에 따른 토우의 변형을 현미경을 통해 관찰하고 비교하였으며, PVC 포움의 응력-변형률 거동을 고려하여 포움의 변형에 의한 토우 형상의 변형 거동을 관찰하였다.

2. 재료 및 성형

2.1 재료

평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그(WSN-3k, SK

Chemical, Korea)와 PVC 포움(Closed cell, Divinycell)을 사용하여 반구형 금형 위로의 직물 복합재료 드레이핑 성능을 실험하였다. 사용된 프리프레그의 섬유 부피분율과 두께는 각각 60%와 0.2mm이며, 탄성계수는 토우의 길이방향으로 70GPa이다(Table 1).

2.2 포움의 물성 : 응력-변형률

프리프레그 경화를 위한 오토클레이브 진공백 성형은 일반적으로 압력과 고온을 사용하기 때문에 성형과정 중 포움의 변형을 수반한다. 토우의 변형 경향은 포움의 압축강성이나 항복 응력과 같은 포움의 물성에 영향을 받게 되며 포움의 밀도, 드레이핑 공정, 경화과정과 매우 밀접한 관계를 가질 것으로 판단된다. 그러므로 온도와 압력과 같은 성형조건으로 인한 포움의 거동을 이해하는 것은 복합재료-포움 샌드위치 구조 성형 및 변형 경향을 이해하는데 매우 중요하다. Table 1에 실험에서 사용된 포움의 물성을 나열하였다.

오토클레이브 진공백 성형 시 가압 환경에 따른 포움의 거동을 이해하기 위해서 ASTM⁽¹¹⁾에 근거하여 주변온도에 따른 포움의 압축특성을 측정하였다. 시편의 크기는 50×50×30mm³이며, 온도챔버를 장착한 만능시험기(STATIC 4206, INSTRON, USA)를 사용하여 실험온도를 프리프레그의 경화온도(125℃)로 설정하였다. 시편의 압축속도는 2mm/min으로 하여 실험을 수행하였다. Fig. 1은 125℃ 온도환경에서 두가지 PVC포움(HT70과 HT110)의 응력과 변형률의 관계를 실험을 통해 얻은 결과를 보여준다.

Table 1 Material properties of foams

| Foam | Density [kg/m ³] | Relative Density (ρ^*/ρ_s) | Young's Modulus [MPa] at 125°C |
|-----------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| PVC HT70 | 70 | 0.050 | 6.53 |
| PVC HT110 | 115 | 0.079 | 7.13 |

Note- ρ^* ; Foam density ρ_s ; Corresponding solid material density

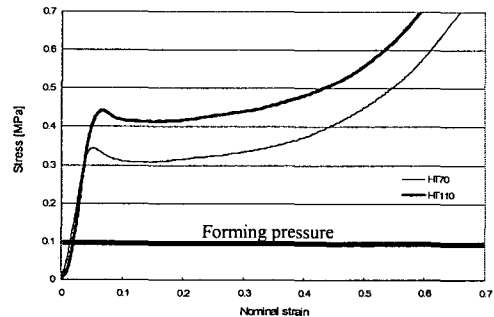


Fig. 1 Stress-strain relation of PVC foams at curing temperature (125°C) of prepregs

PVC 포움의 응력-변형률 선도는 Fig. 1 에서보 이는 바와 같이 탄성, 항복, 평탄 그리고 포움의 고밀화 구간으로 구성되며 프리프레그 성형압력 (0.1MPa)에서는 실험에 사용된 모든 포움이 탄성 거동 구간임을 확인하였다.

2.3 반구 드레이핑(알루미늄과 포움 금형)

반구형 드레이핑 실험을 수행하기 위해 강제 금형(알루미늄) 및 연성체 금형(PVC 포움: HT70, HT110)을 제작하였다. 준비된 반구의 직경은 250mm이며 PVC 포움으로 제작된 금형은 10mm 두께의 평판을 적층하여 CNC 가공을 통해 반구 형태로 가공하였다.

Fig. 2는 직물 복합재료를 반구형 금형 위로 드레이핑 시 구조의 각 부분에서 일어나는 서로 다른 전단 변형량을 보여준다. 드레이핑 전후의 전단변형량 관찰을 용이하게 하기 위해 프리 프레그의 토우 방향(0°, 90°)을 따라 프리프레그 위에 20mm 간격으로 흰색선을 그었다. 드레이핑 후 직물 복합재료 위에 3mm 두께의 셀타입의 실리콘 고무 윗금형을 덮고 진공백을 쌓아주어 경화하였다. 경화사이클 동안 절대압력 0.1MPa의 압력만이 작용할 수 있도록 진공 상태를 유지시켰다.

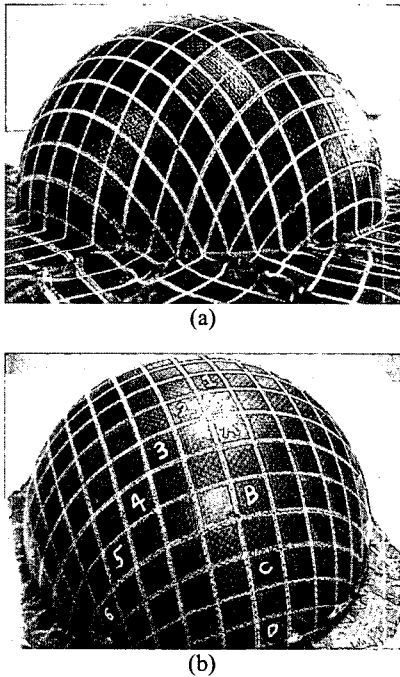


Fig. 2 Draped hemisphere and shear deformation of the material. (a) Before curing; (b) After curing using autoclave degassing molding (The numbers and alphabets indicate the sectioning parts for microscopic observation)

3. 현미경 관찰

3.1 성형중 포움과 토우의 변형

직물 복합재료 드레이핑 성형 중 복합재료 미세 토우구조의 변형에는 재료의 전단변형과 열팽창에 의한 금형의 변형 및 성형압력이 복합적인 영향을 주게 된다. 실제 관찰결과 연성체 금형 위로 드레이핑 된 복합재료는 금형 표면의 수직방향으로 토우의 변형이 상당히 일어나는 것을 확인하였다. 반구형 금형 위로 드레이핑 된 복합재료의 변형 경향을 성형조건과 금형특성 등을 고려하여 비교하기 위해 드레이핑 된 각 반구형 구조물의 동일한 위치에서 관찰시편을 절취하였다. 전단 변형에 의한 토우구조의 변형 경향을 파악하기 위해 Fig. 2(b)와 같이 두 방향(A-D, 1-6 in Fig. 2 (b)) 시편열 중 최대 전단각을 가지고 있는 사선방향(1-6) 시편열을 통해 전단각에 따른 토우 구조의 변형을 관찰하였다. 각 금형간 동일위치에서 절취한 시편의 전단각 차이(Table 2)는 토우의 변형에 중요한 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다.

반구형 드레이핑 구조에서 절취된 시편을 마운트 몰드 위에 놓고 폴리머 레진을 몰드 안에 부어 상온에서 12시간 경화시켰으며, 현미경 관찰을 위한 경면을 얻기 위해서 #120, #240, #400, #800 사포를 순차적으로 사용하였다. 미세 토우구조의 이미지 데이터는 디지털 현미경을 이용하여 확보하였으며, 각각의 토우 파라미터의 측정은 이미지 프로세싱 프로그램(Davolite, Korea)을 이용하여 수행하였다. 측정의 신뢰도를 향상시키기 위해 각 시편당 15개 이상의 데이터를 얻어서 산술평균하였다. 이때 측정된 데이터는 전단변형을 겪지 않은 복합재료를 상압에서 경화시킨 시편을 이용하여 표준화(Normalization) 작업을 수행하였다. 각 측정값을 산술평균 한 후 전단변형량과의 관계를 규명하기 위해 2 차 곡선으로 근사(Curve fitting)하였다.

Fig. 3은 본 논문에서 사용된 직물 복합재료의 단위 구조와 주요 토우 파라미터를 나타낸다. Fig. 4는 서로 다른 금형의 물성에 따른 미세 토우구조의 변형된 형상을 촬영한 현미경 사진이다.

Table 2 Shear angles measured in various parts of hemisphere

| Position | Shear Angle [°] | | |
|----------|-----------------|------|-------|
| | Aluminum | 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 |

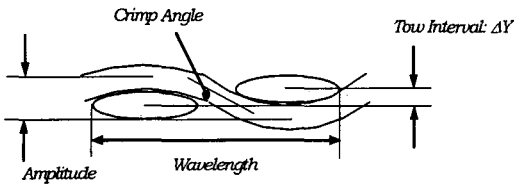


Fig. 3 The unit cell of plain weave fabrics and tow parameters

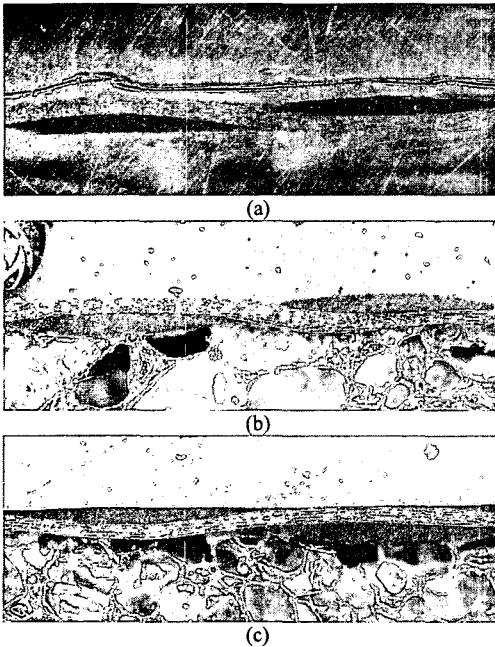


Fig. 4 Photographs of fabric structures from; (a) Aluminum mold; (b) HT70 PVC mold; (c) HT110 PVC mold

사진에서 보이는 한 쌍의 렌즈모양의 구조가 횡방향 토우이며, 물결모양의 구조는 종방향 토우이다. 사진에서 보는 바와 같이 알루미늄 금형 위에서 성형된 복합재료는 금형과의 접촉으로 인해 아래쪽 면이 편평한 형태를 보인다. 반면 연성체 금형인 PVC 폼 위에서 성형된 복합재료의 경우 토우 구조가 폼의 표면을 파고드는 현상을 보임을 확인하였다. 드레이핑 및 잉여레진에 의해서 섬유와 금형 사이에 미끄러짐 현상이 발생하게 되며, 알루미늄의 경우 표면조도가 PVC 금형에 비해 매우 낮고, 탈형을 위해 도포된 금형 이형제의 영향으로 토우의 미끄러짐 현상이 촉진되었으며, 폼 금형의 경우 Fig. 4(b), (c)에 보이는 바와 같이 폼의 셀구조 위에 고착되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 거동은 밀도가 서로 다른 폼의 경우 해당 셀의

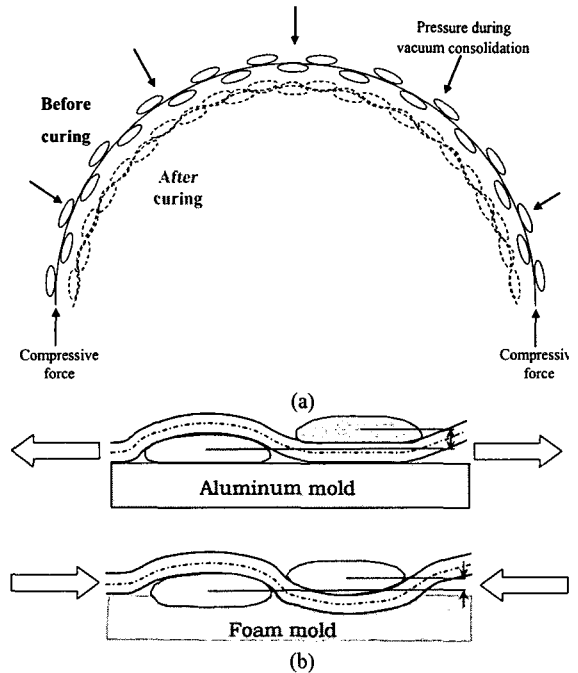


Fig. 5 Deformation mechanism of draped structure (a) Foam hemisphere, (b) Unit tows

크기가 토우의 변형거동에 영향을 줄 수 있음을 보여주는 것이다.

Fig. 5는 직물 복합재료의 반구형 드레이핑 성형 중 토우구조의 변형 거동을 개념적으로 나타낸 그림이다. 폼의 경우 성형압력에 의해 반경방향의 수축이 발생하여 복합재료 내부에 평면 압축력(In-Plane compressive force)을 유발한다. 반면 알루미늄 금형의 경우 폼 금형에 비해서 강성이 매우 높기 때문에 0.1MPa의 성형압력에 의한 변형량이 극히 작아 고려하지 않았다. 반구 금형의 성형 시 반경방향 변형량을 확인하기 위해 성형온도에 의한 열팽창과 경화과정 중 작용하는 0.1MPa의 압력에 의한 영향을 고려하여 변형량을 계산하였다. 폼의 탄성계수는 성형조건인 125℃일 때 Fig. 1에서 보이는 응력-변형률 곡선을 이용하여 계산하였다(Table 1). 폼의 포아송 비(Poisson's ratio)는 0.33⁽¹²⁾이며 재료의 체적탄성률(Bulk modulus)을 다음의 공식을 이용하여 계산하였다. 계산의 용이성을 위해 고온(125℃)과 정수압을 받는 구(Sphere)에 대한 계산을 수행하였다.

$$K = \frac{P}{\Delta V/V} = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (2)$$

Table 3 Radial deformation of molds due to the applied pressure and thermal expansion

| Material | δ_p [mm] | δ_T [mm] | δ [mm] | Remark |
|----------|--------------------|--------------------|------------------|-------------|
| Aluminum | 0.00 | 0.28 | 0.28 | Tensile |
| HT70 | -0.67 | 0.44 | -0.23 | Compressive |
| HT110 | -0.60 | 0.44 | -0.16 | Compressive |

Note- δ_p and δ_T are the radial deformation of molds due to the applied pressure and thermal expansion, respectively and δ represents total radial deformation.

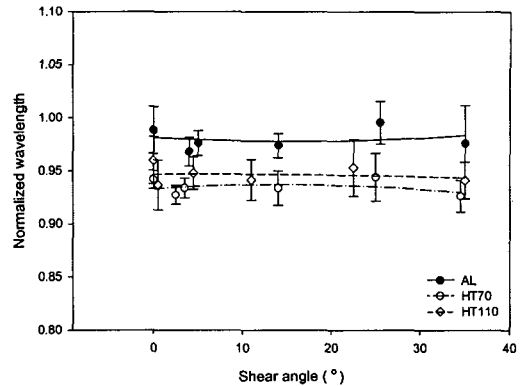
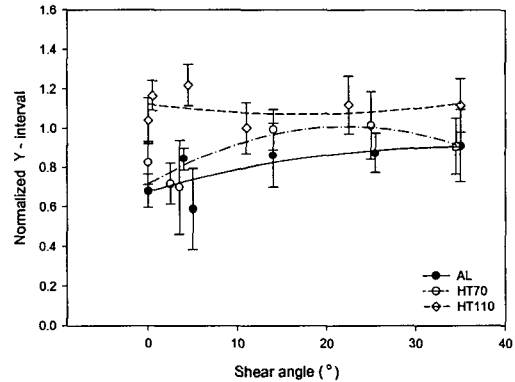
수식의 K 와 P 는 포움의 체적탄성률과 실험 시 적용된 성형압력(0.1MPa)을 나타내며, V 와 R 은 구의 체적과 반지름을 나타낸다. 위의 식으로 계산된 결과에 의하면 0.1MPa의 압력을 받는 PVC 포움(HT70, HT110) 금형의 경우 각각 0.67, 0.60mm의 반경 감소(δ_p)를 확인하였다.

또한 PVC 포움 금형의 성형온도에 따른 열변형을 계산하기 위해 열팽창계수 $35\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ ⁽¹³⁾를 이용하여 계산을 수행하여 각각의 금형에서 0.44mm의 열팽창이 발생하는 것을 확인하였다. 알루미늄 금형의 경우 열팽창에 의한 반경방향 증가량이 0.28mm였으며, 이는 드레이핑 된 복합재료 내부에 평면내 인장응력이 생성됨을 의미한다. 반대로 포움은 열팽창과 성형압력에 의한 영향을 고려할 경우 드레이핑 된 복합재료 내부에 평면내 압축력이 작용하게 된다. 성형 중의 열팽창과 성형압력에 의한 반지름의 증감을 Table 3에 표시하였다.

평면내 압축력에 의한 토우의 변형은 Fig. 3에서 정의한 토우의 파장(Wavelength)을 측정함으로써 간접적으로 확인하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 알루미늄 금형이 가장 큰 파장을 보이는데 이는 성형온도에 의한 알루미늄 반구의 열팽창이 복합재료 평면내 인장력을 발생시켜 토우의 퍼짐현상을 유발한 것에 기인하며, 이와는 대조적으로 포움 금형의 경우 상대적으로 작은 파장을 보이는데 이는 성형압력과 온도에 의한 반경방향 수축에 의해 복합재료 내부에 발생한 평면내 압축력의 영향으로 판단된다. 밀도가 가장 낮은 HT70 금형의 경우 약 8.5%의 감소를 보이고 있으며 알루미늄과 PVC 포움을 비교하여 보았을 경우 주목할 만한 차이를 확인할 수 있다.

3.2 토우간 수직 간격(ΔY)

Fig. 7은 서로 다른 물성의 반구형 금형 위에서 성형된 직물 복합재료의 토우간 수직간격이 전단변형에 따라 변화하는 경향을 보여준다. 알루미늄 금형 위에 드레이핑 된 직물 복합재료의 토우는 성형 압력에 의해 금형 표면에 밀착되고 재료 내부에 발생한 평면내 인장력에 의해 퍼짐

**Fig. 6** Normalized wavelength according to the various molds**Fig. 7** Normalized Y-directional tow intervals with respect to the mold materials

현상이 발생하여 상대적으로 작은 토우간 수직간격을 가지게 된다. 반면에 반구형 포움 위에 드레이핑 된 직물 복합재료의 토우는 성형압력의 영향으로 포움의 표면에 파고드는 거동을 보이게 되며 이 과정 중 한 쌍의 횡방향 토우는 서로 효과적으로 분리되어 알루미늄 금형 위에 드레이핑 된 직물 복합재료의 토우간 수직간격에 비해 증가하게 된다[Fig. 5(b)]. 그러나 강성이 가장 낮은(최저밀도) HT70 포움의 경우 큰 포움 셀들의 영향과 높은 평면내 압축하중에 의해 토우의 파고들 효과(Digging effect)가 심화되어 포움과 접촉하고 있는 토우의 수직간격은 도리어 다소 감소하게 되는 것으로 판단된다(Fig. 5).

위의 결과들은 토우간 수직간격의 변화가 재료의 전단변형에 의한 영향보다는 금형의 강성과 포움의 미소구조 및 평면내 압축하중에 기인함을 설명한다.

3.3 주름각과 토우 진폭

토우의 주름각 변화는 전단변형량에 의한 영향에 매우 민감하며, 복합재료의 전단변형에 의한 주름각의 변화는 이축 및 편향 인장실험과 드레이핑 실험을 통해서 확인되었다.^(3,4) 연성 금형인 HT70 금형의 경우 토우의 주름각이 적당한 전단변형 영역 내(10°~)에서 일부분 금형의 물성에 영향을 받음을 알 수 있다. 알루미늄 금형의 경우 섬유의 퍼짐현상과 평면내 인장력으로 인해 상대적으로 작은 주름각을 보인다. HT70 금형의 경우 평면내 압축력과 국부적인 파고들 현상으로 인해 큰 주름각을 가짐을 알 수 있다. 그러나 HT110 금형과 같이 HT70 금형에 비해서 밀도가 높은 포움의 경우 토우의 파고들 현상이 다소 줄어들게 된다. 이미 언급되었던 평면내 압축력의 영향으로 HT70 금형의 경우 가장 큰 주름각을 보이게 되며, 최대 전단변형 구간에서 토우의 주름각은 전단변형을 겪지 않은 재료보다 1.4배 높은 값을 보임을 확인하였다(Fig. 8).

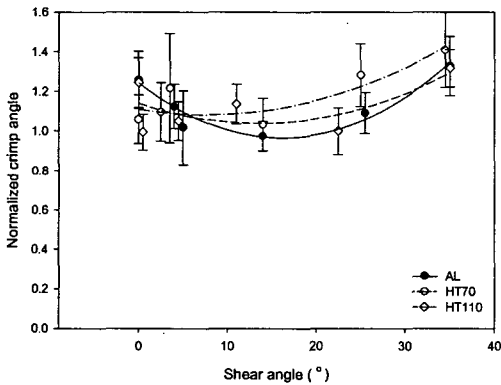


Fig. 8 Normalized crimp angle with respect to the mold materials

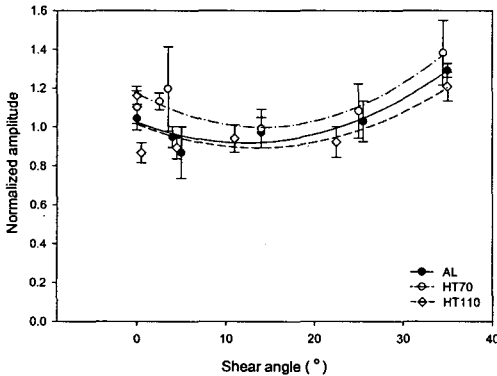


Fig. 9 Normalized amplitude with respect to the mold materials

길이방향 토우 진폭은 적당한 전단변형 구간(10°~)에서 전단각의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다(Fig. 9 참조). 토우 진폭의 변화는 전반적으로 주름각의 변화와 유사한 관계를 보이지만 금형 물성의 영향보다 전단변형의 영향에 크게 의존하는 것을 확인하였다.

밀도가 낮은 포움(HT70)으로 제작된 반구금형 위에 드레이핑 된 직물 복합재료의 토우 진폭은 평면내 수직 압축력에 의해서 전단변형을 겪지 않은 토우의 진폭보다 최대 전단변형 구간에서 1.3배의 높은 값을 보였으며, 다른 종류의 금형과 유사한 거동을 가짐을 확인하였다. 이와 같은 거동은 토우의 진폭이 금형의 강성보다는 전단변형에 더 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다. 이상의 관찰을 통해서 토우의 주름각은 주로 전단변형에 의해 변화하며, 성형압력에 의한 토우의 파고들 현상에 영향을 주는 금형의 강성에도 영향을 받는 것으로 판단된다. 토우 진폭은 주로 재료의 전단변형량에 의해서 결정된다는 것을 확인하였다.

3.4 토우의 주름각과 진폭의 상관도(Correlation)

토우의 주름각과 진폭은 주로 재료의 전단변형량에 영향을 받게 되므로 각 금형에서의 토우의 주름각과 진폭은 유사한 거동 경향을 보이게 된다(Fig. 10). 그러나 토우의 주름각은 재료의 전단변형량만이 아닌 토우의 파고들 현상에 영향을 주는 금형의 강성에도 부분적으로 영향을 받게 된다. 강체인 알루미늄 금형은 토우의 퍼짐거동으로 인해 두 파라미터의 편차가 상대적으로 작으며(Fig. 8, Fig. 9 참조) 재료의 전단변형량에 의한 토우의 주름각과 진폭의 상관도 편차가 작음을 확인할 수 있다. 반면에 최저밀도 포움인 HT70 금형 위에 드레이핑 된 직물 복합재료는 성형 중 발생하는 평면 내 압축력과 상대적으로 큰 셀 크기로 인한 토우의 파고들 현상으로 파라미터 자체의 편차가 상대적으로 크며 가장 큰 토우의 주름각과 진폭을 가질 수 있는 환경을 가지게 된다. 이러한 환경은 재료의 전단변형량에 의한 토우의 주름각과 진폭간의 상관도에 영향을 미치게 되어 토우의 주름각과 진폭이 강한 상관도를 가지는 알루미늄 금형과는 달리 두 파라미터의 상관도가 넓게 분포해 있는 것을 확인하였다.

복합재료-포움 샌드위치 구조성형 시 저밀도의 포움일수록 압력에 따른 토우의 주름각의 변화가 뚜렷하게 일어나는 현상⁽¹⁴⁾을 감안할 때 직물 복합재료가 드레이핑 된 금형의 밀도가 낮을수록 금형의 강성이 토우의 주름각과 진폭에 미치는 영향이 커짐을 확인할 수 있었다.

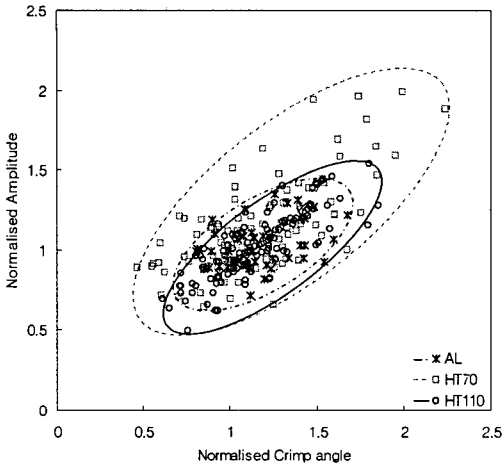


Fig. 10 Correlation of Crimp angle – Amplitude

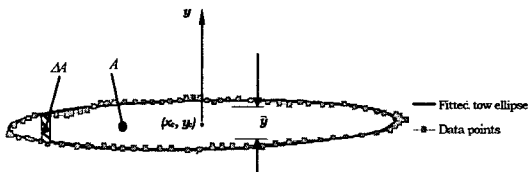


Fig. 11 Definition and calculation procedure of the equivalent tow thickness (\bar{t})

3.5 등가 토우 두께

등가 토우두께(\bar{t})는 Fig. 11 에서와 같이 정의하였으며 다음의 식 (3)을 사용하여 계산하였다.

$$\bar{t} = \frac{2}{A} \sum_i |y'_i - y_c| \cdot \Delta A \quad (3)$$

미소면적 ΔA 는 횡방향 토우의 주변 길이에서 인접한 4 점을 연결한 면적이며 A 는 토우형상 폐곡선 내의 전체 면적을 의미한다. y_c 는 토우면적의 y 방향의 중심점을 나타낸다.

금형의 물성과 전단변형량이 같은 경우에도 복합재료가 금형과 접촉하고 있는 면과 실리콘 금형과 접촉하고 있는 면이 서로 다른 접촉조건을 가지게 된다.

Fig. 12는 반구 금형과 직접 접촉하는 횡방향 토우의 등가두께가 전단변형량이 증가 할수록 최대 전단각에서 전단변형을 겪지 않은 시편에 비해 약 1.2배 증가함을 보여준다. 실리콘 고무와 접촉하고 있는 토우의 등가두께 중 알루미늄과 포움 HT70 금형의 경우 최대 전단각에서 급격한 증가를 보이는 반면, HT110 금형은 전단변형에 의한 영향이 거의 나타나지 않으며, 토우의 등가두께가 10% 감소 하는 것을 확인하였다. 이러한 토우 등가두께의 변형거동의 불일치는

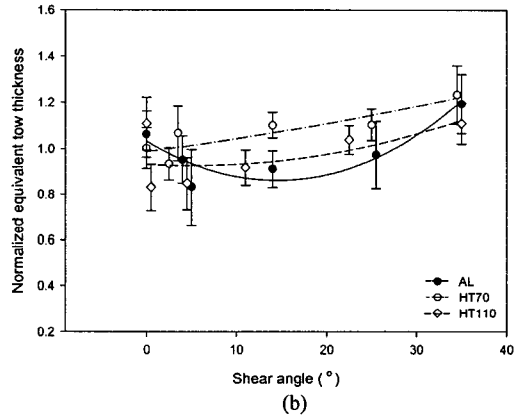
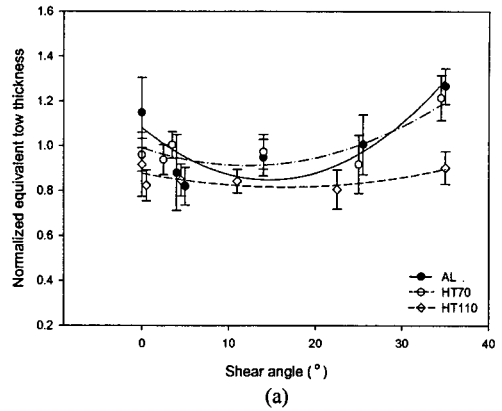


Fig. 12 Normalized equivalent tow thickness with respect to the mold materials; (a) Upper tows, (b) Lower tows

성형 시 토우의 접촉조건이 일정부분 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 HT70 금형에서 반구형 금형과 접촉하는 토우의 등가두께는 토우의 파고들 현상이 토우의 원래형상을 보존하기 때문에 HT110 금형의 경우에 비해 큰 값을 갖는 것으로 판단되며, 이러한 거동은 금형의 물성과 접촉조건이 토우의 변형에 영향을 끼치는 것을 설명해 준다.

4. 결론

평직 탄소섬유/에폭시 복합재료를 서로 다른 물성을 가진 반구형 금형 위로 트레이핑 할 경우 토우의 거동을 확인하기 위해 적절한 실험을 실시하였다. 트레이핑 후 오토클레이브 진공백 성형을 수행하였으며 현미경 관찰을 위해서 각기 다른 물성의 반구형 금형에 트레이핑 된 복합재료를 절취하였다. 또한 성형 중 온도와 압력을 고려하여 반구형 금형의 열팽창과 변형

방향의 변형량을 계산하여 각 금형으로 드레이핑된 직물 복합재료 내의 하중 특성을 규명하였다. 알루미늄 금형의 경우 열팽창에 의해 평면내 인장력이 발생하며, 포움 금형의 경우에는 열팽창과 압력에 의해 평면내 압축력이 발생한다는 것을 확인하였다.

토우변형에 영향을 주는 요소에 대한 연구는 현미경 관찰을 통해 토우 파라미터의 변형량을 측정함으로써 수행하였다. 알루미늄 금형이 포움 금형에 비해서 토우의 파장이 작은 것을 확인하였으며, 이는 포움 금형의 경우 성형압력이 복합재료 내에 평면내 압축력을 유발시켜 금형위에 드레이핑된 프리프레그에 영향을 준 것임을 알 수 있었다. 토우 진폭의 경우에는 전단각에 의한 영향이 포움의 물성보다는 더 큰 영향을 줌을 확인하였다. 주름각과 토우의 등가두께는 전단변형과 금형의 물성에 동시에 영향을 받는 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (D00009).

참고문헌

- (1) Kong, A. C., Wiggers, J. and Harrison, P., 2005, "Modeling the Effect of Blank-Holder Pressure and Material Variability on Forming of Textile Perform," *Proceedings on ESAFORM*, Vol. 2, pp.939~946.
- (2) Hancock, S. G. and Potter, K. D., 2005, "Toward Real Time Manipulation of Virtual Fabric Reinforcement-Extending and Enhancing Kinematic Drape Simulation Tools," *Proceedings on ESAFORM*, Vol. 2, pp.959~966.
- (3) Chang, S. H., Sutcliffe, M. P. F. and Sharma, S.B., 2004, "Microscopic Investigation of Tow Geometry Changes in a Woven Prepreg Material During Draping and Consolidation," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 1701~1707.
- (4) Chang, S. H., Sharma, S.B. and Sutcliffe, M. P. F., 2003, "Microscopic Investigation of Tow Deformation of a Dry Satin Weave Fabric During Draping," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 99~111.
- (5) Zhao, R., Zhou, X. and Dai, G., 2002, "Effect of the Microstructure of GMT on Its Mechanical Properties," *Polymer Composites*, Vol. 23, pp. 1026~1035.
- (6) Byun, J-H., 1997, "Prediction of Engineering constants for Plain and 8-Harness Satin Woven Composites," *Trans. of KSME, A*, Vol. 26, No. 11, pp. 1757~1764
- (7) Sharma, S. B. and Sutcliffe, M. P. F., 2003, "Characterisation of Material Properties for Draping of Dry Woven Composite Material," *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 34, pp. 1167~1175.
- (8) van West, B. P., Pipes, R. B. and Advani, S. G., 1991, "The Consolidation of Commingled Thermoplastic Fabrics," *Polymer Composites*, Vol. 12, pp. 417~427.
- (9) Robertson, R. E., Hsiue, E. S., Sickafus, E. N. and Yeh, G. S. Y., 1981, "Fiber Rearrangements During the Molding of Continuous Fiber Composites. I. Flat Cloth to a Hemisphere," *Polymer Composites*, Vol. 2, pp. 126~131.
- (10) Chang, S. H. and Cheon, S. S., 2005, "FE Modeling of Micro-Deformation of Carbon Fabric-Metallic Foam Sandwich Structures," *Proceedings on ESAFORM*, Vol. 2, pp. 983~986.
- (11) ASTM D 1621, "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics."
- (12) Gibson, L. J. and Ashby, M. F., 1997, *Cellular solids*, 2nd ed., Cambridge university press, Cambridge, p. 193.
- (13) Divinycell Technical manual (HT grade).
- (14) Chang, S. H., 2004, "Changes in Micro Tow Geometry of Plain Weave Carbon Fabrics Composing Foam-Composite Sandwich Beam During Forming," *Composites Science and Technology*, submitted.