

論文

평직 탄소섬유 복합재료-고분자 폼 샌드위치 구조의 성형 중
미소변형에 관한 연구

김용수*, 장승환†

A Study on the Micro-deformation of Plain Weave Carbon/Epoxy Composite-Polymer
Foam Sandwich Structures during Curing

Yong-Soo Kim*, Seung-Hwan Chang†

ABSTRACT

Micro-tow deformation during forming of PVC foam-fabric composite sandwich structure is investigated to find out the correlation between forming condition and material deformation. The foams used in this research are PVC foams which have 4 different densities and the fabric composite is Carbon/epoxy prepreg which is plain weave (3k) as a skin material. Tow parameters such as crimp angle and tow amplitude are measured using microscope and a proper image tool and are compared with each other. In order to find out the effect of foam deformation during forming on tow deformation the compressive tests of foams are performed in three different environmental temperatures (25 °C, 80 °C and 125 °C). The microscopic observation results show that the micro tow deformations are quite different from each other with respect to the foam density and forming pressure.

초 록

복합재료의 성형조건과 재료의 변형간의 관계를 규명하기 위해 PVC 폼-직물 복합재료 샌드위치 구조의 성형과정 중 토우 구조의 미소 변형을 고찰하였다. 실험에 사용한 폼은 4가지 밀도를 가지는 PVC 폼이며, 면재료는 탄소섬유/에폭시 프리프레그(3k)를 사용하였다. 디지털 현미경과 이미지 분석 도구를 사용하여 직물 복합재료의 굴곡 각과 토우 진폭 등의 토우 파라미터를 측정하여 서로 비교하였다. 성형 중 폼의 변화가 직물 복합재료 구조의 변형에 미치는 영향을 파악하기 위해 세 가지 온도 조건(25 °C, 80 °C, 125 °C)에서 폼의 압축 실험을 수행하였다. 복합재료 토우 구조의 현미경 관찰 결과 토우의 미소 변형은 폼의 밀도와 성형 압력에 따라 서로 다른 경향을 나타내었으며, 특히 폼의 변형 거동에 큰 영향을 받는 것을 확인하였다.

Key Words: 샌드위치(sandwich) 구조, 드레이핑(draping), 평직(plain weave), 토우(tow), 폼(foam), 진폭(amplitude), 굴곡 각(crimp angle), 고밀화(densification).

1. 서 론

고분자 기지 섬유강화 복합재료와 고분자 폼으로 구

성된 샌드위치 구조는 경량 고강성 및 고감쇠 특성에 기인하여 자동차 혹은 항공기 제조 산업에 많이 사용되고 있다. 샌드위치 구조는 일반적으로 고강성 혹은 고강도 재료

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

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

를 면재(skin materials)로 사용하고 밀도가 낮은 폼이나 허니컴 등을 심재(core materials)로 사용하여 구조의 굽힘 비강성 및 비강도를 향상시킨다[1]. 현재 사용중인 많은 심재 중에 PVC 폼이나 폴리우레탄 폼 등과 같이 수지를 발포하여 제작하는 고분자 폼은 가공성과 성형성이 우수하여 샌드위치 구조의 심재로 많이 사용되고 있다. 샌드위치 구조의 초기 단계에서는 구조의 기하학적 형상이 평판 혹은 단순 원형단면 구조에 머물렀으나, 최근에는 구조설계 관련 분야에서 보다 복잡한 3차원 구조를 가진 샌드위치 구조의 필요성이 증대되고 있다. 따라서 3차원 곡면 구조를 가지는 폼 위로의 직물 복합재료 드레이핑(draping) 기술의 필요성이 점차 증가하고 있다. 직물 복합재료의 드레이핑 공정 중 금형의 곡면 형상에 따라 국부적인 전단 변형량이 변화하게 되며, 이런 과정 중에 복합재료를 구성하는 토우(tow) 구조의 미세 구조가 변화하게 된다. 이와 같이 변형된 토우 구조는 성형 후 완제품의 국부적인 기계적 물성을 변화시키게 되기 때문에 설계 단계에서 정확한 토우의 변형량을 예측하는 것은 최종 생산물의 물질 특성을 평가하는데 매우 중요하다.

복합재료 샌드위치 구조의 3차원 성형에 관한 연구는 형상의 복잡성과 성형의 어려움에 기인하여 많은 연구가 이루어지지 않는 상태였다. Rozant 등[2]은 열가소성 수지 폼과 프리프레그를 이용한 타원 및 복잡한 구조의 열성형에 관한 수치적 연구와 실험을 수행하였다. 면재와 심재의 선택적 가열 방법을 통해 복잡한 구조의 성형에 성공하였으며 실험 결과와 수치 결과가 잘 일치하는 것을 확인하였다. 여러 가지 직물 복합재료를 이용한 드레이핑 관련 연구는 인장 및 전단 실험을 통한 재료의 기초 변형 연구에서부터 실제 제품으로의 적용에까지 폭넓은 연구가 진행되었다. Sharma 등[3]은 일방향 편향 인장실험, 이축 인장 실험 등을 통해 드레이핑 거동 중 탄소섬유 건직물(dry fabrics)의 전단 변형 거동과 재료에 작용한 하중간의 관계를 규명하였으며, 인장 실험 결과 건직물의 변형 거동은 핀 조인트(pin-joint) 해석에 의해 제안된 방식과 거의 유사하다는 것을 밝혀내었다. 장승환[4,5]은 주자직직물 복합재료의 일방향 인장실험과 이축인장실험을 통해 직물 구조의 전단변형에 따른 미소 토우구조의 변형에 관한 관계를 규명하였으며, 복잡한 3차원 구조인 헬멧 위로의 드레이핑 성형 후 헬멧 구조 각 부분의 서로 다른 전단변형 및 하중 조건에 따른 토우 구조의 미소 변형을 관찰하였다. Hofstee 등[6-8]은 드레이핑 된 평직 복합재료의 3차원 기하를 묘사하는 관계식을 제안하였으며, 토우의 국부적 변형을 평가하는 섬유 다발(bundle) 구조를 제시하였다. 또한 평직 복합재료의 열성형 공정 중 안 구조를 전단 변형과 직물 인장 변형의 함수로 표현하였으며, 안(yarn)의 파장과 진폭을 측정하고 해석 해와 비교하였다. McBride 등[9]은 직물 구조를 표현하기 위한 안의 폭, 안 간격, 직물 두께

등의 항으로 구성된 4개의 조화함수의 단위 셀(unit cell)을 정의하였다. 이러한 단위 셀은 전단을 받는 평직에 적용이 가능하며, 기하학적 매개변수는 전단각의 함수로 표현될 수 있다.

장승환 등[10]은 고분자 폼과 평직 탄소섬유/에폭시 복합재료로 구성된 샌드위치 구조의 진공백 성형공정 중 발생하는 직물 토우구조의 변화에 따른 샌드위치 구조의 압축 및 인장 물성을 예측하여 이러한 샌드위치 구조가 굽힘 하중을 받을 경우 국부적으로 발생하는 기계적 특성에 대한 연구를 수행하였다. 전성식 등[11]은 서로 다른 적층 조건을 가지는 직물 복합재료의 압축 시편을 이용한 압축 특성을 연구하여 직조 구조와 적층 각도에 따른 기계적 물질 특성을 비교하였다.

지금까지의 드레이핑 관련 연구는 재료의 전단 변형과 미세 토우 구조의 변형과의 상관관계와 단순한 3차원 강체 금형으로의 적용에 한정되어 있으며, 폼과 같은 탄성 금형으로의 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 복잡한 3차원 탄성 금형으로의 드레이핑 연구의 기초 단계로서 폼-복합재료 샌드위치 구조의 성형 조건에 따른 토우 구조의 미소 변형에 관한 연구를 수행하였다. 폼의 밀도와 성형 압력에 따른 미세 토우 구조의 변형 거동을 현미경을 통해 관찰하여 서로 비교하였으며, 고온 및 고압 상태에서의 폼의 변형 거동에 따른 토우 구조의 변형에 관한 연구를 수행하였다.

2. 시 편

2.1 샌드위치 구조 시편

본 연구에 사용된 샌드위치 구조는 심재로서 PVC 폼(Divinycell, closed cell foams)이 사용되었으며, 양쪽 면에 면재로서 각각 1장의 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그(WSN-3k, SK Chemical, Korea)로 구성되어있다. 시편 제조에 사용된 PVC 폼의 밀도에 따른 기계적 물성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material properties of various foams at room temperature

Foam	Density [kg/m ³]	Relative Density (ρ^*/ρ_s)	Compressive Modulus [MPa]
PVC	HT50	54	0.036
	HT70	70	0.050
	HT90	95	0.064
	HT110	115	0.079

주-폼의 압축 강성은 평면에 수직방향으로 측정되었음[12]

주- ρ^* 는 폼의 밀도이며 ρ_s 는 해당 재료의 고체 밀도임

성형 압력에 따른 직물 복합재료의 토우 구조 변화를 관찰하기 위해 진공백 성형공정을 이용하여 샌드위치 구조를 성형하였으며, Fig. 1에서 보이는 바와 같이 알루미늄 평판(caul plate)을 이용하여 평편한 표면을 얻을 수 있도록 하였다. 빔 형상을 가진 시편의 형태와 치수는 Fig. 1(b)에 나타내었다. 제작된 복합재료-포움 샌드위치 시편의 두께는 성형 압력과 포움의 항복강도의 차이에 따라 Fig. 2와 같이 변화함을 알 수 있었다. 최저 밀도를 가지는 포움의 경우 (HT50) 비교적 낮은 성형압력에서 셀벽(cell wall)의 붕괴에 따른 항복 거동에 의해 매우 큰 영구 변형이 발생하였다.

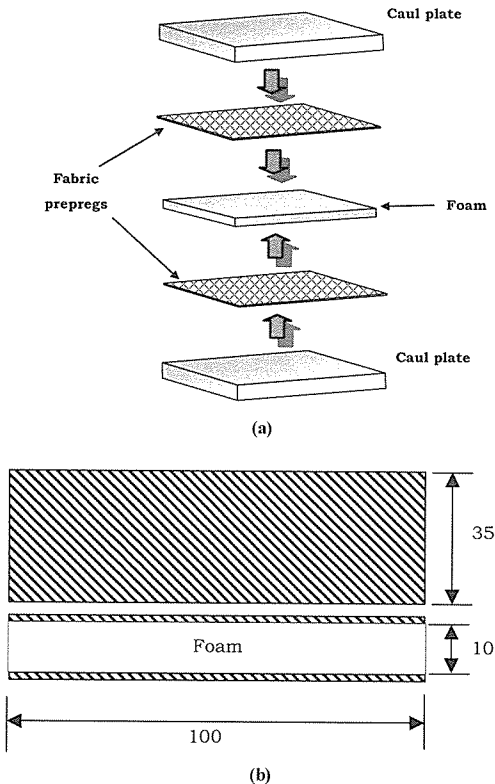


Fig. 1 Local and global coordinate system of unit cell: (a) fabrication procedure; (b) specimen size in millimetres.

그 이상의 밀도를 가지는 포움들은 해당 성형압력에서 비슷한 영구 변형량을 가졌으나 실험에 사용된 최대 성형 압력(0.7 MPa)에서는 40% 정도의 영구변형을 가짐을 확인하였다. 이와 같은 포움의 거동은 샌드위치 구조를 구성하는 면재와 심재 사이의 응력 조건에 영향을 미칠 수 있으며, 직물 복합재료의 토우 구조의 특정한 변형을 유발할 수 있다.

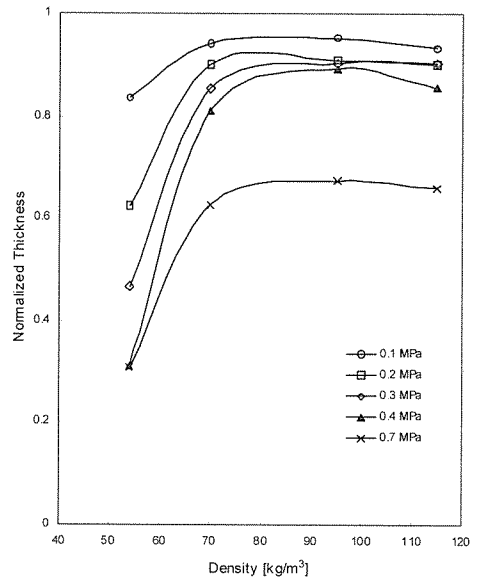


Fig. 2 Normalised thickness of sandwich structures w.r.t. foam density and forming pressure.

2.2 포움의 압축특성 및 측정 시편

실험에 사용된 샌드위치 구조는 오토클레이브를 이용하여 고온 고압 환경에서 진공백 성형을 하기 때문에 경화 공정 중 포움의 거동을 파악하는 것은 매우 중요하다. 주변 온도에 따른 포움의 비선형 응력-변형률 거동을 확인하기 위해 ASTM[12]에서 추천한 방법을 이용하여 압축 실험을 수행하였다. 포움 시편의 치수는 폭과 길이, 두께가 각각 $50(W) \times 50(L) \times 30(t)$ 이며, 가열 챔버(heating chamber)가 장착된 만능 시험기(STATIC 4206, INSTRON, USA)를 사용하여 압축실험을 수행하였다. 실험에 사용한 온도는 직물 복합재료의 경화 사이클(Fig. 3)을 고려하여 상온(약 25 °C), 80 °C 그리고 125 °C로 설정하였으며, 압축 속도는 2 mm/min이다. Fig. 4-6은 각각의 실험 온도 하에서의 여러 가지 밀도를 가지는 포움의 응력-변형률 선도를 보여준다.

그림에서 보는 바와 같이 변형률이 증가함에 따라 초기에는 선형적인 거동을 보이다가 항복과 고밀화(Densification)를 거치는 것을 확인하였으며, 이러한 거동은 재료의 밀도와 함께 특히 실험 온도에 크게 영향을 받는 것을 확인하였다. 네 가지 서로 다른 밀도를 가지는 PVC 포움에 대한 실험 온도 125 °C 실험결과와 대표 응력-변형률 관계를 Fig. 7에 나타내었으며, 각 변형 구간에서의 경계 변형률, 기울기 및 해당 구간의 응력 최대값에 관한 정보를 Table 2에 나타내었다. 이러한 데이터는 샌드위치의 경화과정 중 발생하는 직물 복합재료의 거동을 설명하는데 사용된다.

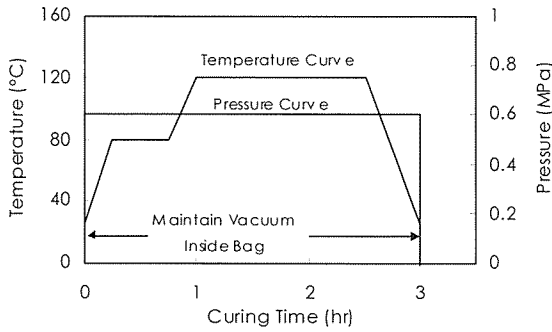


Fig. 3 Curing cycle for the composites.

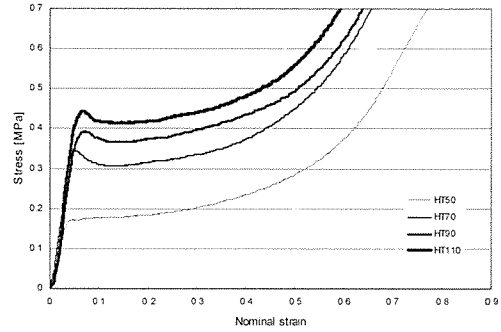


Fig. 6 Stress-strain relation of various PVC foams at 125 °C.

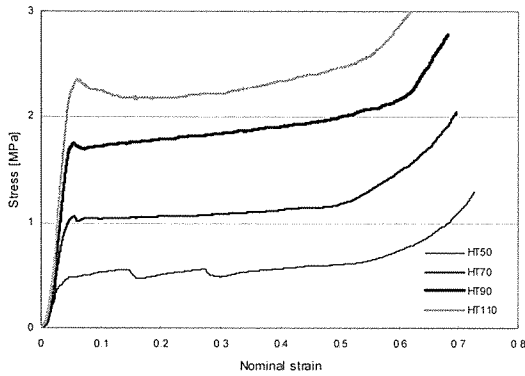


Fig. 4 Stress-strain relation of various PVC foams at 25 °C.

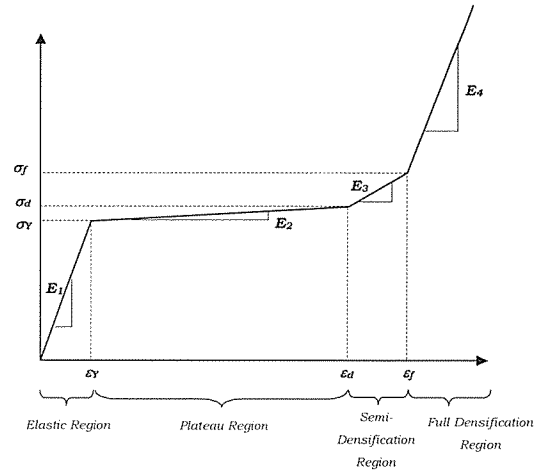


Fig. 7 Representative stress-strain relation of foams.

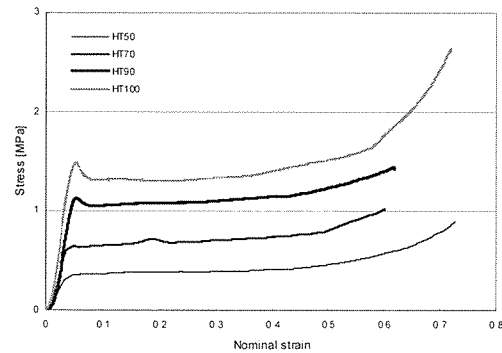


Fig. 5 Stress-strain relation of various PVC foams at 80 °C.

Table 2 Data from the compressive tests of foams at 125°C

	HT50	HT70	HT90	HT110
E_1 [MPa]	4.24	6.53	5.19	7.13
E_2 [MPa]	0.27	0.18	0.22	0.18
E_3 [MPa]	1.05	1.06	1.12	1.02
E_4 [MPa]	2.08	1.86	2.28	1.77
ϵ_Y	0.04	0.05	0.08	0.06
ϵ_d	0.52	0.47	0.49	0.44
ϵ_f	0.63	0.56	0.58	0.54
σ_Y [MPa]	0.17	0.34	0.39	0.44
σ_d [MPa]	0.30	0.42	0.48	0.50
σ_f [MPa]	0.42	0.52	0.59	0.60

2.3 현미경 관찰용 시편

성형 중 직물 복합재료의 토우구조의 변형 경향을 관찰하기 위해 성형된 샌드위치 구조로부터 30×20 mm² 크기로 시편을 절취한 후 마운팅 몰드와 에폭시 수지를 이용하여

관찰 시편을 제조하였다. 관찰 면을 얻기 위해 여러 가지 등급의 사포(#120, #240, #400)와 다이아몬드 입자(6 μm, 1 μm)를 이용하여 연마 작업을 수행하였다.

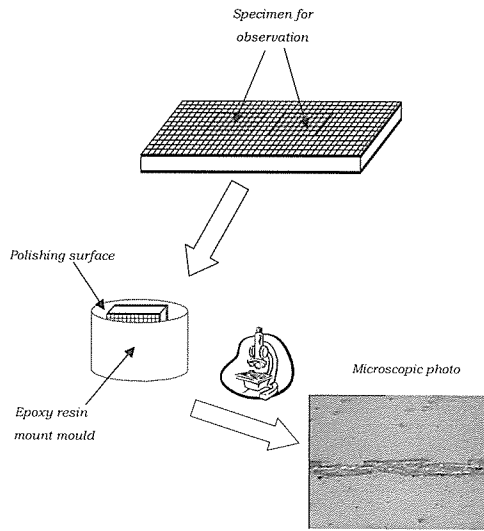


Fig. 8 Procedure of microscopic observation.

디지털 현미경을 이용하여 직물 복합재료의 토우구조의 영상을 획득 한 후 AutoCad를 이용하여 토우 구조의 굴곡 각(crimp angle), 종방향 토우의 진폭 등을 측정하였다. 측정된 데이터의 신뢰도를 향상시키기 위해 동일한 시편에서 얻은 서로 다른 5개의 측정값을 평균하였다. Fig. 8은 현미경 관찰 시편의 준비과정과 이미지 데이터의 획득 과정을 개념적으로 보여준다.

3. 현미경 관찰결과

디지털 현미경을 이용하여 여러 가지 포움 밀도에 따른 샌드위치 구조의 성형 압력에 대한 토우 구조의 변화를 Fig. 9와 같이 관찰하였다. 한 쌍의 렌즈 모양의 구조는 횡방향 토우(transverse tow)를 나타내며, 길이 방향으로의 물결 모양의 구조가 종방향 토우(longitudinal tow)이다. Fig. 9(a)는 경화 과정 중 압력을 가하지 않은 직물 복합재료 한 장에 대한 현미경 사진이며, 이 사진으로부터 얻은 굴곡 각(crimp angle), 토우 진폭 등의 토우 파라미터를 이용하여 여러 가지 성형 압력과 서로 다른 밀도를 가진 포움으로 성형된 샌드위치 구조를 이루는 직물 복합재료의 토우구조 변형량의 정규화(normalisation)을 수행하였다.

Fig. 9(b) ~ (f) 에서 보이는 바와 같이 모든 시편의 토우 구조는 성형 과정 중 알루미늄 평판을 적용함에 따른 평편한 면을 가지고있다. 낮은 성형 압력을 사용한 경우 포움이 탄성 변형만을 하게 되어 직물 복합재료가 포움의 표면에 효율적으로 압착 되며, 이러한 성형 조건은 종방향 토우의 펼침(stretching) 현상(Fig. 9(b))을 유발한다. 그러나

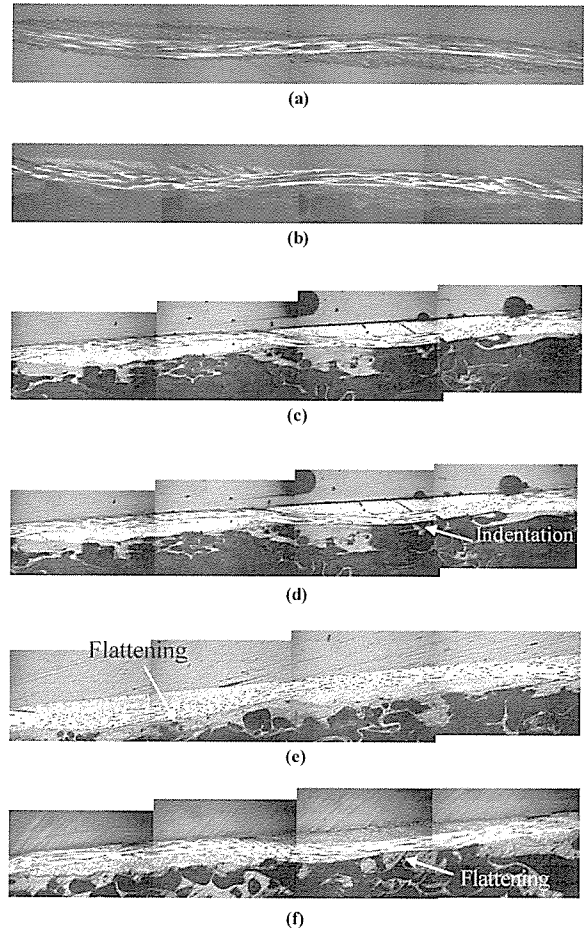


Fig. 9 Micro-structure of carbon fibre/epoxy fabric prepregs stacked on HT50 PVC foam: (a) without pressure; Prepreg only; (b) 0.1 MPa; (c) 0.2 MPa; (d) 0.3 MPa; (e) 0.4 MPa; (f) 0.7 MPa.

성형 압력이 증가함에 따라 포움 표면에서 국부적인 압입(indentation) 현상(Fig. 9(d))이 발생하고, 최대 성형 압력조건에서는 두께방향으로의 압밀에 의해 강화된 포움에 의한 저항에 기인하여 종방향 토우의 평탄화(flattening) 현상(Fig. 9(e))이 발생하는 것을 확인하였다. 이러한 변형 경향은 밀도가 높은 포움의 경우에도 유사한 것을 알 수 있었다.

Fig. 10은 본 논문에서 다루는 평직 복합재료의 단위 셀(unit cell)과 주요 토우 파라미터를 나타내며, 가압 조건에서의 성형과정 중 토우구조의 변형 거동을 보여주고 있다. 종방향 토우의 굴곡 각은 복합재료 경화 온도(125 °C)에서 성형 압력과 포움의 밀도에 따라 포움과 직물 복합재료 사이의 상호 작용에 기인하여 Fig. 11에서 보이는 바와 같이 변화하였다.

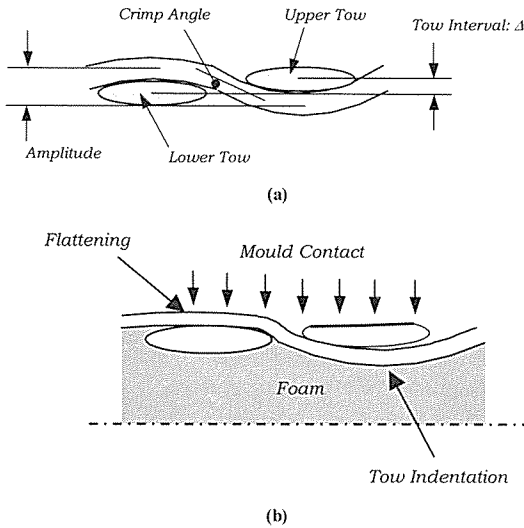


Fig. 10 The unit cell of plain weave fabrics: (a) schematic diagram of tow structure and its parameters (b) schematic diagram of tow deformation pattern of sandwich structure.

상대적으로 밀도가 낮은 폼(HT50, HT70)으로 제조된 시편의 경우 성형 압력이 폼의 항복을 유발할 때까지 (Fig. 9 참조; $\theta \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f$)는 종방향 토우의 굴곡 각이 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 그러나 이들 굴곡 각은 폼의 고밀화가 시작되는 영역(Fig. 9 참조; $\varepsilon_d \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f$)에서 급격하게 증가하였다. 폼의 탄성 영역에서의 작은 굴곡 각은 성형 공정 중 부가된 압력이 직물 복합재료가 폼의 표면에 밀착하는 과정에서 직물 복합재료의 토우가 폼 표면에서 미끄러짐(sliding) 현상에 의한 펼침 거동을 유발하기 때문으로 판단된다.

성형 압력이 증가하여 폼이 항복 거동을 하는 경우 탄성 영역에서의 평탄화 혹은 펼침 현상이 유지되거나 심화되는 것으로 판단된다. 그러나 성형 압력이 더욱 증가하여 폼의 고밀화가 시작되면(준 고밀화 구간; $\varepsilon_d \leq \varepsilon \leq \varepsilon_f$) 토우의 아래로 볼록한 부분은 폼의 표면으로 파고드는 거동을 함으로써 폼의 표면에 압입 현상을 유발하거나 폼의 두께 방향으로의 토우 거동이 부분적으로 제한을 받게 되며, 이러한 현상이 0.3 MPa(절대압력)의 성형 압력에서 HT50 폼을 사용한 샌드위치 구조의 토우 굴곡 각을 급격하게 증가시키는 것으로 판단된다(Fig. 9(d), Fig. 11 참조). 토우의 국부적 압입 현상에 대해서는 상대 밀도(ρ^*/ρ_s)가 0.3 이하인 저 밀도 폼의 경우 압입 압력이 항복 응력보다 같거나 약간 큰 것으로 알려져 있다[13]. HT70 폼의 경우 최대 굴곡 각 발생 압력이 다소 상승하였으며, 이 압력 역시 Fig. 6과 Fig. 7에 의해 해당 폼의 고밀화가 시작되는 곳으로 파악되었다(Fig. 11 참조).

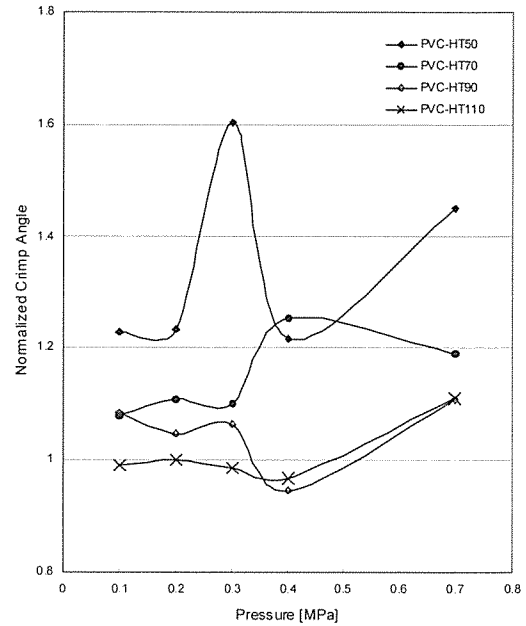


Fig. 11 Variation of crimp angle with respect to the forming pressure.

상대적으로 높은 압력에서는 폼을 구성하는 셀 벽이 대부분 붕괴되어 폼의 고밀화가 대규모로 발생하며, 이러한 현상은 토우 구조의 폼 두께 방향으로의 거동을 제한하고 토우의 평탄화 및 펼침 거동을 유발하여 결과적으로 탄성 영역에서의 거동과 유사하게 종방향 토우의 굴곡 각을 감소시키는 원인이 된다. HT90 와 HT110와 같은 고밀도의 폼을 이용하여 제조된 샌드위치 구조의 경우 Fig. 11에서 보는 바와 같이 성형 압력에 따른 종방향 토우의 굴곡 각의 변화는 상대적으로 작았다. 상기 폼의 탄성 변형구간에서는 굴곡 각이 저밀도 폼의 경우에 비해 더 낮은 값을 나타내었는데, 이는 샌드위치 구조의 성형 공정 중 고밀도 폼의 상대적으로 높은 압축 강성이 직물의 펼침 현상을 더욱 효과적으로 발생시키기 때문으로 판단된다.

폼이 항복을 시작하면(약 0.4 MPa; Fig. 6) 폼의 표면으로부터 내부로 점진적인 셀 벽의 굽힘과 붕괴에 의해 직물 복합재료의 펼침 효과가 촉진되어 굴곡 각이 감소하게 된다. HT90 와 HT110를 이용한 샌드위치 성형 실험에서는 저밀도 폼에서 보였던 굴곡 각의 급격한 증가 현상이 발생하지 않았는데 그 이유는 실험에 사용한 성형 압력이 해당 폼의 준 고밀화 구간(semi-densification region: 0.4 MPa ~ 0.6 MPa)을 벗어났기 때문이다. 이상의 실험으로부터 폼의 밀도와 성형 압력에 따른 굴곡 각의 변화를 관찰하였으며, 특히 폼의 변형에 따른 토우 구조의 변화를 조사하였다.

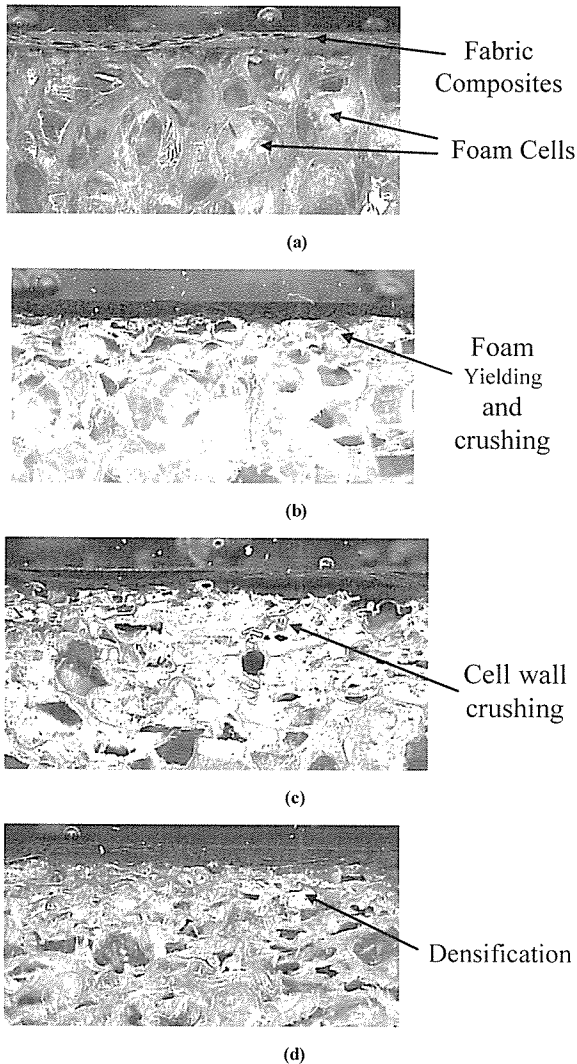


Fig. 12 Foam deformation after forming (HT50): (a) 0.1 MPa; (b) 0.2 MPa; (c) 0.3 MPa; (d) 0.7 MPa.

Fig. 12는 복합재료의 성형온도인 125 °C에서 HT50 PVC 폼의 미세 구조의 변형을 부가 압력에 따라 나타낸 것이다. Fig. 12(a)에서 보는 바와 같이 폼의 탄성 변형구간에서는 폼의 모든 셀들이 완벽한 형태를 가지고 있으며, 직물 복합재료가 성형 압력에 의해 폼의 표면에 밀착되어 접착되어 있음을 알 수 있다. 성형 압력이 증가함에 따라 폼의 표면으로부터 셀 벽의 굽힘 현상이 시작되어 점진적으로 내부로 전파되면서 폼의 항복 현상이 발생하게 된다(Fig. 12(b)). 표면으로부터의 점진적인 셀 벽 굽힘은 토우의 펼침 효과를 유발하여 중방향 토우의 굴곡 각을 탄성 변형거동에서 관찰된 값과 같거나 더 작게 만든다.

폼의 항복 이후에 추가적인 압력은 셀 벽의 붕괴를 유발하며, 이는 폼의 표면에 국부적인 압입(indentation)을 발생시키는 준 고밀화(semi-densification)를 야기한다(Fig. 12(c)). 이 변형 구간에서는 셀 벽 붕괴가 접촉 조건에 의해 영향을 받게 된다. 즉, 토우 구조의 아래로 볼록한 부분은 폼의 표면에 심하게 접촉을 하게 되며, 접촉부에서는 폼의 국부적인 압입이 발생하므로 굴곡 각이 증가하게 된다. 그 이상의 성형 압력이 부가되면 폼의 고밀화는 표면으로부터 점진적으로 내부로 확대되며, 그 과정에서 직물 복합재료의 중방향 토우의 평면화가 발생하여 최종적으로 폼 내부의 공동(cavity)이 급격하게 사라지게 된다(Fig. 12(d)).

중방향 토우의 중심선을 기준으로 산-골 거리(peak-to-peak distance)로 정의되는 토우 진폭(Fig. 10)을 성형 압력과 폼의 밀도에 따라 측정하였다. 중방향 토우의 위로 볼록한 부분은 알루미늄 평판과 접촉을 하여 성형과정 중 평면화가 진행되며, 아래로 볼록한 부분은 폼의 변형에 의해 제어되기 때문에 토우 진폭의 변화는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 매우 복잡한 경향을 나타낸다. 현미경 관찰 결과 토우의 진폭은 전반적으로 성형 압력이 증가함에 따라 감소하였으며, 이는 성형 시 사용한 알루미늄 평판 굽힘에 의한 토우의 평면화와 변형이 진행됨에 따른 폼의 고밀화에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 폼의 밀도에 따라 큰 토우 진폭을 생성하는 특정한 성형 압력이 있을 것으로 기대된다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 폼의 밀도와 성형 압력에 따른 토우의 진폭은 탄성 영역과 고밀화 영역 사이에서 급격히 증가하였으며, 그 외의 구간에서는 폼의 고강성 특성(탄성 영역과 고밀화 영역)에 기인한 직물의 펼침 현상이 발생하여 작은 진폭을 나타내었다.

밀도가 보다 높은 HT70과 HT90 폼의 경우에는 진폭의 두드러진 증가가 관찰되었으나 최대 밀도를 가지는 HT110 폼의 경우에는 토우 진폭의 큰 증가 현상이 없었으며, 그 이유는 실험에 사용한 성형 압력이 HT110 폼의 탄성 변형(~0.4MPa)과 완전 고밀화(0.7MPa) 만을 유발했기 때문으로 판단된다. Fig. 14는 폼의 밀도와 성형 압력에 따른 Y-방향 토우 간격(ΔY)을 나타낸다. 저밀도 폼인 HT50과 HT70 폼의 경우 최소의 Y-방향 토우 간격이 발생하는 조건과 최대 굴곡 각이 발생하는 조건(Fig. 11)이 일치한다는 주목할 만한 관찰 결과를 얻었다. 이와 같은 결과는 토우의 굴곡 각의 변화가 Y-방향 토우 간격과 밀접한 관계가 있음을 의미하며, 특히 국부적인 압입 현상이 발생하는 준 고밀화 영역에서 명확한 상관관계를 얻을 수 있었다.

Fig. 10(b)에 나타낸 바와 같이 폼의 표면에서 압입 현상이 발생하면 아래로 볼록한 토우 부분이 폼의 표면으로 밀려들어가게 되어 윗 굽힘과 접촉하는 횡방향 토우를 두께 방향으로 이동하는 효과를 야기하기 때문에 두 개의 횡방향 토우의 Y-방향 상대 거리가 감소하게 된다. 폼의 탄성 영역과

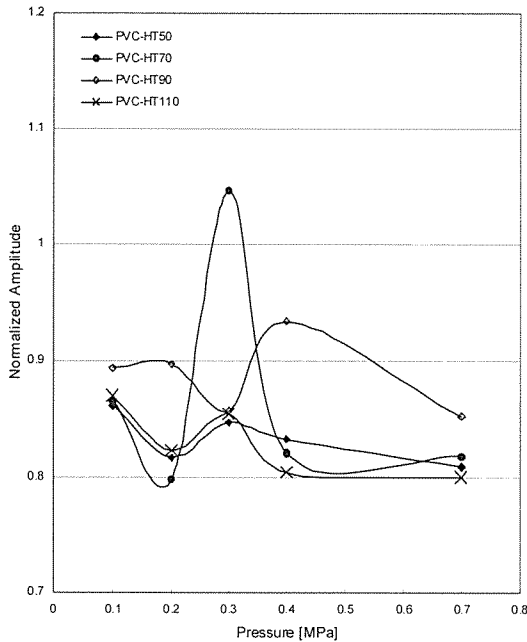


Fig. 13 Variation of amplitude of longitudinal tows with respect to the forming pressure.

고밀화 영역에서는 폼의 강성이 상대적으로 크기 때문에 토우의 펼침 효과에 기인하여, 종방향 토우의 위, 아래에 위치한 두 개의 횡방향 토우(Fig. 10)를 서로 멀리 분포시키게 되어 결과적으로 Y-방향 토우 간격이 상대적으로 큰 값을 가지게 된다.

상대적으로 높은 밀도를 가지는 HT90 과 HT110 폼의 경우 본 실험에서는 확인하지 못하였으나, 굴곡 각의 변형 경향을 근거로 성형 압력이 0.4 MPa 와 0.7 MPa 사이에서 준 고밀화가 발생될 것으로 예상되며, 이 변형 영역에서 최소의 Y-방향 토우 간격이 발생할 것으로 판단된다.

결론

본 논문에서는 PVC 폼과 직물 복합재료로 구성된 샌드위치 구조의 종방향 토우의 굴곡 각과 진폭과 같은 토우 파라미터의 변형 경향을 폼의 밀도와 성형 압력에 따라 관찰하였다. 제작된 샌드위치 시편으로부터 현미경 관찰용 시편을 얻었으며, 측정된 모든 데이터는 압력을 가하지 않고 성형한 직물 복합재료의 해당 파라미터 값을 이용하여 정규화를 수행하였다. 고온, 고압에서의 폼의 압축 거동이 직물 복합재료의 토우 구조에 미치는 영향을 파악하기 위해 25 °C, 80 °C 그리고 125 °C의 온도 환경에서의 각종 폼의 응력-변형률 관계를 실험적으로 얻었으며, 이러한 데이터를

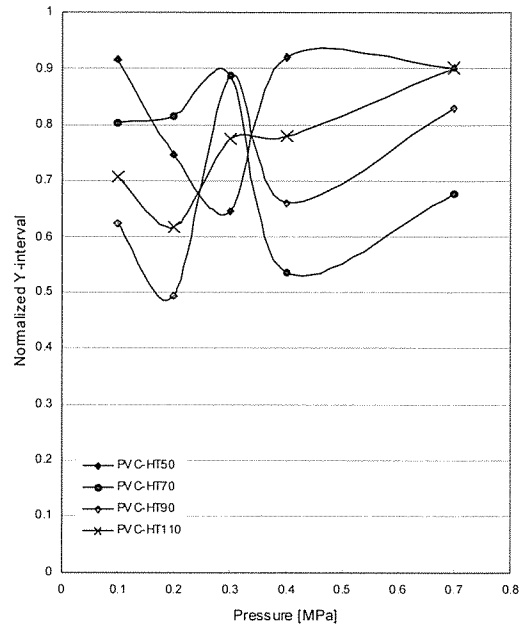


Fig. 14 Variation of Y-directional tow interval with respect to the forming pressure.

바탕으로 샌드위치 구조 성형 중 발생하는 토우 구조의 변형 경향을 설명하였다.

현미경 관찰 결과 토우 구조의 미세 변형은 폼의 밀도와 성형 압력에 따라 크게 변화하였으며, 특히 고온 환경에서의 폼의 거동과 밀접한 관계를 가지고 있음을 확인하였다. 직물 복합재료의 굴곡 각은 준 고밀화 구간에서 급격히 증가하였으며, 이는 폼의 국부적 압입 현상에 기인한 것으로 판단된다. 종방향 토우의 진폭과 Y-방향 토우 간격도 측정 하였으며, 이러한 토우 파라미터들은 서로 밀접한 상관관계가 있음을 실험적으로 확인하였다.

후기

이 논문은 2004년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

- 1) Gibson, L.J. and Ashby MF., *Cellular solids*. 2nd ed., Cambridge university press, 1997, Chapter 9.
- 2) O. Rozant, P. E. Bourban and J. A. E. Manson, "Manufacturing of three dimensional sandwich parts by

- direct thermoforming,” *Composites: Part A*, Vol. 32, 2001, pp. 1593-1601.
- 3) S. B. Sharma, M. P. F. Sutcliffe and S. H. Chang, “Characterisation of material properties for draping of dry woven composite material,” *Composites: Part A*, Vol. 34, 2003, pp. 1167-1175.
 - 4) 장승환, “직물 복합재료의 드레이핑 미소 거동 관찰: 일 방향 편향 인장실험과 이축 인장실험,” 한국복합재료학회지, 제17권, 제1호, 2004, pp. 38-46.
 - 5) 장승환, “직물 복합재료를 이용한 드레이핑 헬멧의 미소 변형 관찰,” 한국복합재료학회지, 제16권, 제4호, 2003, pp. 29-35.
 - 6) J. Hofstee, H. de Boer and F. van Keulen, “Elastic stiffness analysis of a thermo-formed plain-weave fabric composite Part I: geometry,” *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 1041-1053.
 - 7) J. Hofstee and F. van Keulen, “Elastic stiffness analysis of a thermo-formed plain-weave fabric composite Part II: analytical models,” *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 1249-1261.
 - 8) J. Hofstee, H. de Boer and F. van Keulen, “Elastic stiffness analysis of a thermo-formed plain-weave fabric composite Part III: experimental verification,” *Composites Science and Technology*, Vol. 62, 2002, pp. 401-418.
 - 9) T. M. McBride and J. Chen, “Unit-cell geometry in plain-weave fabrics during shear deformations,” *Composites Science and Technology*, Vol. 57, 1997 pp. 345-351.
 - 10) 장승환, 장태성, 최진호, 전성식, “직조 탄소섬유 발포 고분자 샌드위치 구조의 굽힘특성,” 한국복합재료학회 추계 학술대회, 2004, pp. 131-134.
 - 11) 전성식, 오제훈, 장승환, “여러 가지 조건을 가진 직물 복합재료 시편의 압축특성,” 한국복합재료학회 추계 학술대회, 2004, pp. 135-138.
 - 12) ASTM D 1621, *Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics*, 1994, American Society for Testing and Materials.
 - 13) L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular solids*. 2nd ed., Cambridge university press, 1997, Chapter 9.