

탄소 섬유 프리프레그의 압축 물성을 고려한 복합재 고온 압축 성형 해석 평가

배대령*** · 이정완** · 이진우** · 엄문광**†

Evaluation of Compression Molding Simulation with Compression Properties of Carbon Fiber Prepreg

Daeryeong Bae***, Jung Wan Lee**, Jin-Woo Yi**, Moon-Kwang Um**†

ABSTRACT: In order to optimize the prepreg compression molding (PCM) process, the forming simulation is required to cope with any problems that may be raised during the process. For the improvement of simulation accuracy, the input data of material property should be measured accurately. However, most studies assume that the compressive properties of the prepreg are identical to the tensile properties without quantifying them separately. Therefore, in this study, the in - plane compressive properties of the prepreg are presented to improve the accuracy of the forming simulation. As a result, the compressive modulus of the fibers was measured to be about 10^{-2} times lower than the tensile modulus. Also we designed a square-cup mold with a tilting angle of 110° to simulate the prepreg formability during the high temperature compression mold process. Shear angles were measured at each corner, which were compared with the simulation results. It was observed that the simulation results using the accurate compressive properties of the prepreg showed a similar trend with the experimental results. It was confirmed that the measured data of the in-plane compression property improved the accuracy of the forming simulation results.

초 록: 프리프레그 압축 성형(PCM, Prepreg Compression Molding) 공정을 최적화 하기 위해서 성형 해석을 통해 공정 시 나타날 문제를 사전에 예측할 필요가 있다. 해석 정확도를 높이기 위해서는 성형 물성을 구할 때 정확한 물성 측정이 필요하다. 그러나 대부분의 연구는 프리프레그의 압축 물성을 따로 구하지 않고 인장 물성과 동일하다고 가정하여 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 성형 해석의 정확성을 높이기 위해 섬유의 면내 압축 물성 실험법을 제시했으며 측정 결과, 섬유의 압축 강성은 인장 강성에 비해 약 10^{-2} 배 낮게 측정되었다. 실제 프리프레그의 성형성을 모사하기 위해 경사면(110°)을 갖는 정사각형 컵 금형을 설계 및 제작하였고 이를 이용한 프리프레그 고온 압축 성형성 평가를 수행하였다. 압축 물성 영향성 확인을 위해 금형 내 취약 지점으로 예상되는 각 코너 부근에서의 전단각을 측정하였으며 동일한 위치에서의 해석 결과와 실험 데이터를 비교하였다. 비교 결과 섬유의 압축 물성이 반영된 해석 결과에서 실험값과 유사한 패턴이 관찰되었으며 면내 압축 물성 반영이 성형 해석 결과의 정확도를 향상시키는 것을 확인하였다.

Key Words: 프리프레그 압축 성형(Prepreg Compression Molding), 압축 물성(Compression Property), 열성형(Thermoforming), 프리프레그(Prepreg), 탄소 섬유(Carbon Fiber)

Received 12 November 2018, received in revised form 11 December 2018, accepted 18 December 2018

*Advanced Materials Engineering, University of Science and Technology (UST), Daejeon 34113

**Korea Institute of Materials Science (KIMS), Changwon 51508, Korea

**†Korea Institute of Materials Science (KIMS), Changwon 51508, Korea, Corresponding author (E-mail: umk1693@kims.re.kr)

1. 서 론

전 세계적으로 친환경 이동 수단의 필요성이 대두되면서[1] 자동차 산업에 적용할 수 있는 고강도 경량화 부품소재 및 공정에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근에는 탄소섬유강화복합재(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastics) 부품을 차체 구조물 및 외장 패널에 적용하는 사례가 점차 증가하고 있다. 그러나 탄소 섬유의 높은 생산 단가와 고속대량 생산 시설의 미흡으로 인해 CFRP 부품이 아직까지는 제한적으로 적용되고 있다. 복합재 제조 공정 개발 분야에서는 다양한 형태의 고속 성형 공정이 시도되어 왔으며 최근에는 고속 성형에 강점을 가진 PCM(Prepreg Compression Molding) 공정[2]을 이용한 자동차 외장 패널 제작에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. PCM 공정은 형상을 가진 상/하부 금형의 압축력에 의해 복합재가 제조되는 공정으로서 압축력의 크기에 따라 프리프레그 내 섬유 방향이 달라지며, 복합재 물성이 섬유 방향에 크게 의존하므로 성형 후 섬유방향을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다. 최근 연구에서는 최종 성형품의 섬유 방향 예측을 위해 반구돔 형태의 금형을 이용하여 섬유 적층방향과 금형 형상에 따른 성형성을 평가 하였다[3].

현재까지 대부분의 연구는 성형 후 섬유 변형을 예측하기 위해 방향 별 섬유의 인장, 굽힘, 면내전단 물성과 마찰계수를 측정하여 사용하였으나 섬유의 압축 물성은 측정치가 아닌 인장 물성과 동일한 물성치를 사용하였다[4]. 그러나 섬유의 인장 거동과 압축 거동이 다르므로, 동일한 물성치를 사용하면 변형 후 섬유 형상 예측의 정확도를 크게 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 본 연구에서는 섬유의 압축 성형 물성 측정법을 제시하고, 측정된 결과를 성형 해석에 반영함으로써 압축 물성에 따른 해석 결과를 분석하였다. 또한 압축 물성의 반영 유무에 따른 해석 결과와 실험치를 비교하였다.

2. 실 험

2.1 소재

본 연구에는 비스페놀 A(Bisphenol A, BPA) 종류의 숙경화 에폭시 수지가 포함된 프리프레그 2종(Table 1)을 한국

Table 1. Physical properties of the different types of prepreg

Model	Type	Thickness (mm)	Resin Content (vol %)	Weight (g/m ²)
CF-3327	Plain woven (PW) carbon	0.269 ($\pm 5.7 \times 10^{-3}$)	42	200
Cu-190	Unidirectional (UD) carbon	0.202 ($\pm 3.8 \times 10^{-3}$)	38	190

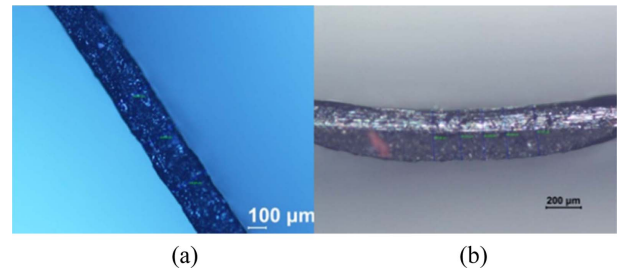


Fig. 1. Thickness measurements for (a) UD and (b) PW carbon

카본[5]에서 제공받아 물성 시험 및 성형성 평가를 하였다.

프리프레그의 두께는 광학 현미경(Nikon ECLIPSE LV150N)을 사용하여 10회 반복 측정하였고(Fig. 1) 그 평균값을 프리프레그의 성형 해석 시 입력 값으로 사용하였다. 프리프레그 별 측정 두께는 Table 1과 같다.

2.2 성형 온도 결정을 위한 점도 측정

프리프레그 내 수지의 최적 성형 온도를 결정하기 위해 점도계(Anton Paar Modular Compact Rheometer 302)를 사용하여 온도 별 점도 변화를 측정하였다. 에폭시 점도를 동적 스캔을 사용하여 측정한 결과 최저 점도 구역은 95°C에서 105°C 사이로 나타났다(Fig. 2). 따라서 2종의 프리프레그에 대한 최적의 열 성형 온도 조건은 점도가 낮아 수지의 흐름성이 좋은 100°C로 설정하였다.

2.3 섬유 고온 인장, 면내 전단, 굽힘 강성 및 마찰계수 측정

고온에서의 프리프레그의 기계적 거동을 정량화하기 위해 섬유 인장, 면내 전단, 굽힘 강성 및 마찰 계수를 측정하였다[6]. 각 실험 온도는 에폭시 수지가 최저 점도에 도달하는 100°C로 진행하였다.

2.3.1 고온 인장

프리프레그 고온 인장 실험을 위해 시편 크기는 Instron 5985 치구에 맞게 50 (W) mm × 240 (L) mm로 0° 방향으로 재단 하였으며 cross-head 속도는 분당 10 mm로 설정하였

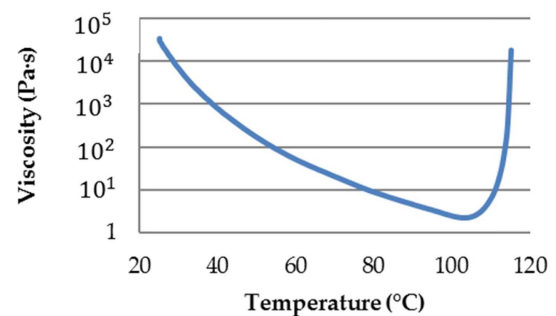


Fig. 2. Viscosity for the fast-cure epoxy resin using dynamic scan

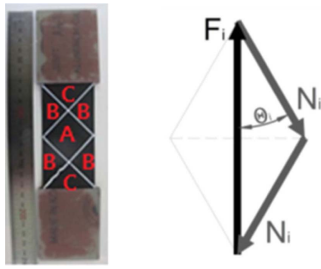


Fig. 3. Determination of the shear angle in Zone A from deformed angle (θ) during the tensile (F_t) and shear (N_t) load

다. 환경 챔버를 100°C로 설정한 후 시편의 온도가 100°C에 도달할 때까지 대기한 후 실험을 진행하였다. UD 프리프레그의 90°방향 인장시험은 미세 하중 및 변형률 측정이 가능한 DMA 장비를 사용하였다. 시편 크기는 10 (W) mm × 15 (L) mm였으며 preload 0.0002 N이 걸린 상태에서 인장 치구 속도는 분당 0.01 mm으로 실험을 진행하였다. 각 시편 당 3회씩 반복 실험하였으며 이 시험을 통해 비선형 물성을 측정하여 인장 강도/변형률 값을 시뮬레이션에서 각 소재의 물성치로 활용하였다.

2.3.2 고온 면내 전단

UD, PW carbon 프리프레그에 대한 intra-ply 전단 특성은 편향인장실험을 통해 측정하였다. 프리프레그를 +45/-45° 교차 적층하여 좌우 대칭을 유지할 수 있도록 Fig. 3와 같이 준비하였다. 시편에 표시된 2개의 X자 표시(Fig. 3)를 통해 식 (1)을 이용하여 전단각(γ)이 계산되며 식 (2), (3)에 의해 정량화된 전단 하중과 전단각의 관계를 (4) 같이 표현하였다. 단위 면적당 토크 $C_s(\gamma)$ 는 직조된 섬유가 θ 각도만큼 전단 변형이 필요한 힘 F_{sh} 와 비례한다. H와 W는 변형되기 전 시편의 길이와 폭을 각각 나타내며 F은 clamping 힘 F_{sh} 은 전단힘을 나타낸다[7].

$$\gamma = 90 - 2\theta \quad (1)$$

$$C_s(\gamma) = F_{sh}(\gamma) \cdot \cos \gamma \quad (2)$$

$$C_s(\gamma) = \frac{1}{(2H-3W)} + \left(\left(\frac{H}{W} - 1 \right) F \left(\cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \right) - W C_s \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right) \quad (3)$$

$$F_{sh}(\gamma) = \frac{1}{(2H-3W)\cos \gamma} + \left(\left(\frac{H}{W} - 1 \right) F \left(\cos \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\gamma}{2} \right) - W F_{sh} \left(\frac{\gamma}{2} \right) \cos \frac{\gamma}{2} \right) \quad (4)$$

2.3.3 고온 굽힘 강성

프리프레그의 굽힘 강성 측정은 ASTM D1388[8]의 외팔보 실험 방법으로 진행하였다. 금속 프레임을 100°C로 가열한 후 프리프레그를 프레임 가장자리로 이동시켜 Fig. 4

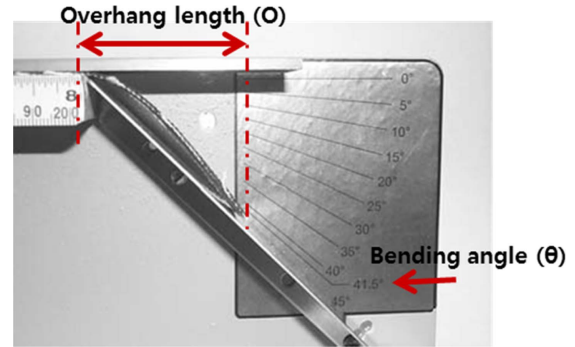


Fig. 4. Measurement of bending properties of fabric proposed by ASTM D1388

와 같이 41.5°까지 꺾이는 시점을 overhang 길이 (O)로 측정하였다. UD 프리프레그는 0°와 90° 방향을 구분하여 측정하였으며 PW carbon은 두방향의 물성이 유사하므로 0°에 대해서만 측정하였다. 프리프레그의 overhang 길이(O)는 한 시편 당 총 4회를 측정한 후 평균값으로 사용하였으며 식 (5)에 의해 굽힘 강성(E_b)을 계산 하였다. 굽힘 강성을 계산하기 위해서는 프리프레그의 면중량(W), 두께(t), 평균 overhang 길이(O), 굽힘 각도($\theta = 41.5^\circ$)가 사용되었다.

$$E_b = \frac{12WO^3}{t^3} \times \left(\frac{\cos(\theta/2)}{8\tan \theta} \right) \quad (5)$$

2.3.4 고온 마찰

마찰에 의한 전단 거동을 모사하기 위해 프리프레그-금형과 프리프레그-프리프레그간의 마찰계수를 측정하였다 (Fig. 5). 마찰 계수는 고온 시 저점도 수치(유체)로 이루어진 얇은 층에 의해 분리된 플라이 사이의 마찰력을 측정하는 것이 필요하였으며 로드셀, 열전대, 공압 실린더, 스텝 모터를 사용하여 측정하였다. 인장 실험과 동일하게 열전대 온도를 100°C로 설정하여 수지의 최저 점도를 유지시켰고 실험 전 예열을 통해 시편이 100°C에 도달한 후 실험을 진행하였다. 섬유 배향 각도를 정의하기 위해서는 시편 수평 이동 방향을(Fig. 5 화살표 방향) 기준점(0°)으로 지정하였다.

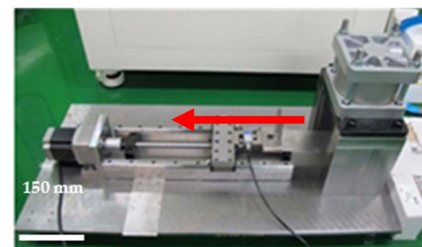


Fig. 5. Experimental apparatus for coefficient of friction (COF)

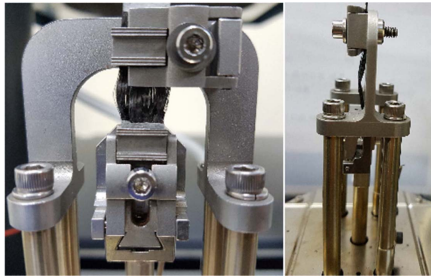


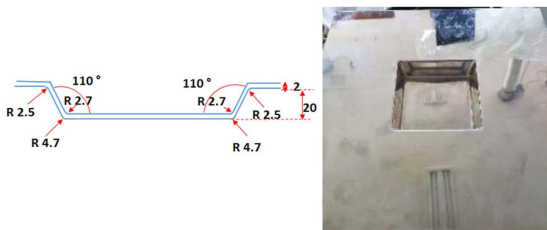
Fig. 6. Measurement of in-plane compression properties of prepreg by DMA

2.4 면내 압축 거동

압축 성형 해석의 정확도를 향상시키기 위해 프리프레그의 압축 성형 물성을 측정하였다. 압축 성형 시 프리프레그의 좌굴 거동에 의해 수평 방향으로 발생하는 주름을 파악하기 위해 프리프레그의 면내 압축 응력 및 변형율을 측정하였다. 실험 장비로는 동적기계분석기(DMA)를 사용하였으며(Fig. 6) 한 종류의 프리프레그에 대하여 3번의 반복 실험을 하였다. 시편은 UD 경우 0° 및 90° 방향을 사용하였고 PW carbon은 0° 방향으로 10 (W) mm × 10 (L) mm 크기로 각각 측정하였다. 시편이 -0.5%의 변형률에 도달 할 때까지 측정하였으며 치구 속도는 -0.5%/min으로 설정하였다.

2.5 Drawing test

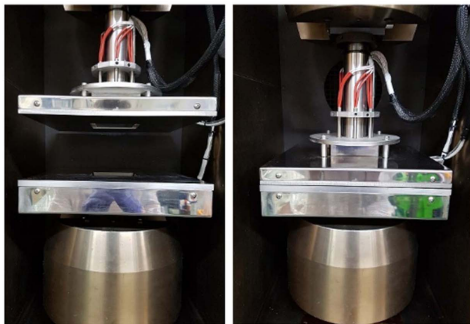
압축 성형 물성에 대한 성형 해석 결과의 영향을 확인하기 위해 경사면을 포함한 사각형 square cup 금형을 제작하



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7. (a) Cross-sectional view and (b) top view images of lower mold and (c) open and (d) closed stage of thermoforming experimental apparatus

였다. Fig. 7(a), (b)와 같이 깊이 20 mm, tilting 각도 110°의 정사각형 형상의 상/하부 금형과 무게를 조절할 수 있는 홀더를 설계하였고 시제품의 두께를 고려하여 상/하부 금형 간격은 2 mm로 설계하였다. 금형은 Instron 5985에 장착되어 환경을 제어하며 상부(punch) 금형이 일정한 속도로 구동할 수 있도록 하였다(Fig. 7(c), (d)).

금형 온도 제어기 및 외부 환경 챔버를 통해 성형 시 요구되는 최적의 온도 조건인 100°C를 안정적으로 제어하였다. 성형 후 탈형을 위해 금형 및 홀더 표면을 이형제로 처리한 후 60°C 조건에서 30분간 열 처리하였다. 열성형을 위해 프리프레그는 가로 세로 각각 300 mm로 재단하였으며 적층 각도는 프리프레그 롤 방향을 0°로 설정하였다. 프리프레그 적층 패턴은 [0(PW carbon) / (0/90/0/90/0)(UD) / 0(PW carbon)]으로 총 7장을 사용하였다. 성형 속도는 분당 10 mm로 설정하였고 홀더의 무게는 10 kg를 사용하여 프리프레그 표면에 주름을 줄이도록 역할을 하였다.

3. Drawing 성형 해석

기존의 프리프레그의 성형 물성 데이터에서 압축 물성 데이터를 추가하여 drawing 성형 해석을 하였다. 해석 프로그램은 상용화 프로그램인 PAM-FORM을 사용하였으며 압축 물성은 2.4절의 실험 방법을 통해 얻어진 압축 응력 및 변형율 값을 음수로 변환하여 입력하였다. 기존의 섬유 성형 물성에서 압축 물성이 반영 또는 미 반영에 따라 성형 후 발생하는 전단 변형(전단각)이 위치 별로 어떻게 영향을 미치는지에 대해 해석 결과를 통하여 확인하였고 성형품과 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 프리프레그의 기계적 특성 결과

4.1.1 인장 물성

Fig. 8에서와 같이 프리프레그의 비선형은 직조 패턴과 고온에서의 수지 흐름으로 인한 것이다. 응력-변형률 곡선(Fig. 8(a))에서 strain 0.003에서 0.004 구간의 기울기를 선택하여 각 프리프레그의 강성값을 계산하였다. Fig. 8(b)와 같이 수지 특성이 주로 나타나는 UD 90° 프리프레그의 인장 강도는 2가지 프리프레그 중 가장 낮게 측정되었다.

4.1.2 면내 전단

편향인장실험을 사용하여 두 가지 다른 프리프레그에 대한 면내 전단 거동을 균일한 성형 속도 조건 하에서 평가하였다. PW carbon에서는 전단 잠금 각도 영역과 2개의 변곡점(Fig. 9(a) 지점 ②, ③)을 가진 독특한 곡선을 가진 전단 응력-변형율 곡선을 나타내고 있다. Fig. 9(a) 지점 ③ 이후 잠금 각도를 벗어난 변형은 섬유 방향이 하중 방향과 일치되

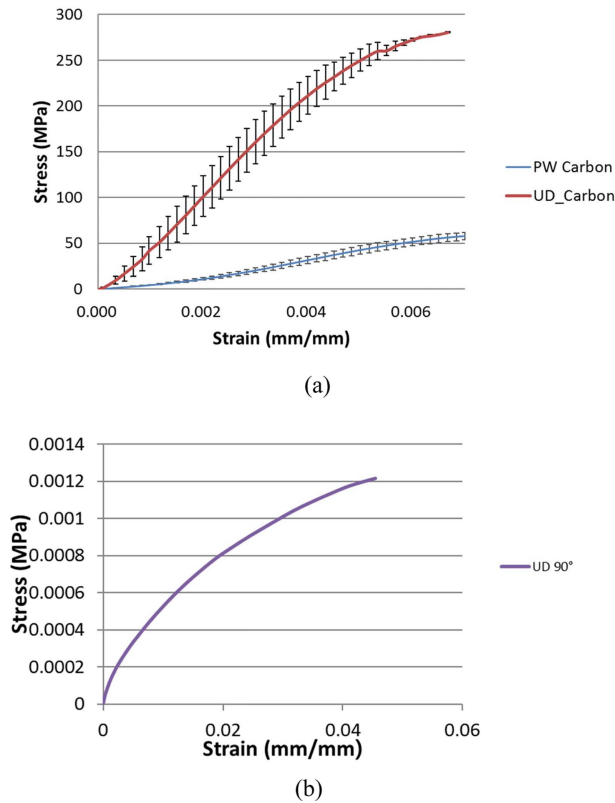


Fig. 8. Non-linear stress-strain curves for (a) UD 0°, PW carbon and (b) UD 90° at 100°C

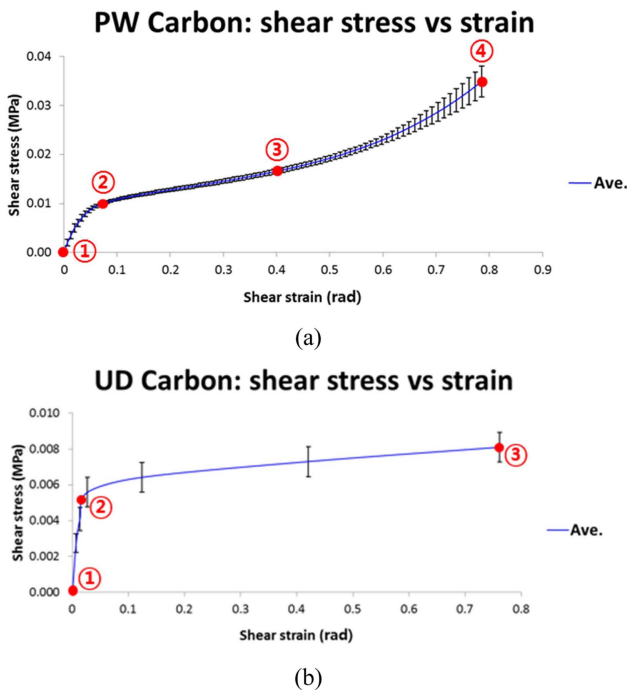


Fig. 9. Shear stress-shear strain curve for (a) PW carbon and (b) UD carbon

Table 2. Calculation of bending stiffness using measured overhang length (O), thickness (t) and areal weight (W) for each prepreg

	UD carbon 0°	UD carbon 90°	PW carbon
Ave. O (mm)	0.933	0.01	0.81
t (mm)	0.202	0.202	0.269
W (N/m ²)	1.862	1.862	1.96
E_b (GPa)	0.291	3.95E-07	0.085

는 현상으로 인해 시편에 주름이 발생하였다. UD carbon의 경우(Fig. 9(b)), 전단 강성이 급격히 증가한 이후의 편평한 영역은 섬유 다발 사이의 간섭없이 직물이 곧게 펴지는 현상을 나타낸다[9].

4.1.3 굽힘 강성

UD 0° 섬유의 굽힘 강성은 수직 방향(UD 90°)보다 약 10^6 배 높게 나왔다. 그 이유는 중력에 의해 섬유가 버틸 수 있는 힘이 UD 90°보다 UD 0°가 상대적으로 높기 때문으로 보인다(Table 2). PW carbon의 굽힘 강성은 UD 0°보다 약 3분의 1정도로 낮게 나왔다.

4.1.4 고온 마찰

마찰계수는 2개의 프리프레그를 대상으로 평가 하였으며 금형 면과 UD 프리프레그의 마찰계수가 평직 프리프레그보다 낮게 측정되어 성형 공정 시 발생하는 UD 프리프레그의 움직임이 내부 응력을 최소화 해 줄 것으로 예상된다. 프리프레그-프리프레그 사이의 마찰계수는 프리프레그-금형 결과와 유사하게 직조 패턴 프리프레그의 마찰 계수가 UD 프리프레그 보다 높게 관찰되었다(Table 3).

따라서, 성형 단계에서 라미네이트의 마찰 거동은 주로 직조 패턴에 의존하며 특히 PW carbon의 경우 높은 마찰 계수가 전단 변형(전단각)에 영향을 줄 것으로 예상된다[10].

4.2 프리프레그의 면내 압축 측정 결과

UD 0° 프리프레그 경우 압축 단계, 좌굴 초기 단계, 좌굴 연속 단계[11]로 나누어지는 것이 관찰되었고 좌굴 단계 이

Table 3. Coefficient of friction (COF) of eight different patterns against our process parameters

No.	Interface	COF	Standard Deviation
1	PW carbon/Tool	0.202	0.011
2	UD 0°/Tool	0.050	0.007
3	UD 90°/Tool	0.063	0.010
4	PW carbon/UD 0°	0.180	0.002
5	UD 0°/UD 90°	0.078	0.002

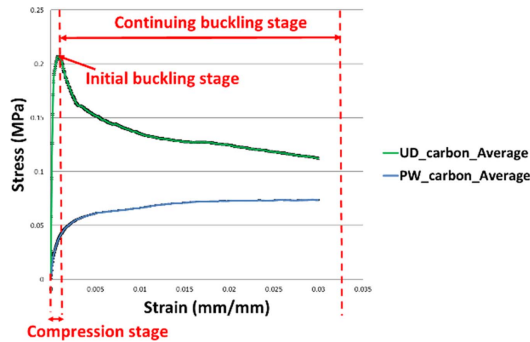


Fig. 10. In-plane compression test results for UD and PW carbon

Table 4. Comparison of tensile stiffness with compression stiffness of prepreg.

	Tensile Stiffness (GPa)	Compressive Stiffness (GPa)
UD 0°	53.058	0.190
PW carbon	44.607	0.175

전에 하중이 급격하게 상승하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 10). 이는 하중 방향으로 배열된 UD 0° 프리프레그의 섬유가 좌굴 전 압축 하중을 지탱하기 때문이다. 그 이후, 최대 하중이 기록된 지점에서 좌굴이 시작되고 섬유의 좌굴 정도가 증가함에 따라 하중이 감소한다. PW carbon 프리프레그에서는 좌굴의 시작 지점을 판단할 수 있는 특정한 피크가 관찰되지 않았다. 압축 단계 초기에는 변형률이 증가함에 따라 하중이 급격하게 상승하였으나 특정 지점 이후부터는 하중이 작은 범위 내에서 거의 일정하게 유지되었다. 앞서 측정한 프리프레그의 인장 물성과 비교한 결과(Table 4) PW carbon과 UD의 압축 강성은 약 10^{-3} 낮게 측정되었다. 따라서, 압축 하중이 작용하는 영역에서 전단 응력을 함께 받을 경우 주름 발생 정도가 좀더 심하게 예측될 것으로 판단된다.

4.3 Drawing test 실험과 해석 결과와 비교

프리프레그 적층판의 성형성을 하부 금형, 펀치 및 홀더를 사용하여 분석하였다. 최외각층을 PW carbon으로 한 프리프레그를 열 성형하여 3차원 정사각형 컵 형상으로 이루어진 시제품을 Fig. 11 같이 얻을 수 있었다. Fig. 11(a), (b)는 열 성형 시 전단 변형에 의해 정사각형 컵의 코너부가 성형된 것을 보인 것이다. 컵의 코너부 주변으로 전단 변형이 가장 많이 일어나는 것을 알 수 있다. 변형된 직물을 Fig. 11(c)와 같이 관찰한 결과 각 셀(cell) 내의 상부(TA6~9)와 하부(TA1~4)에서 발생된 변형 각도가 차이가 있음을 알 수 있다. 인근 섬유의 움직임에 의해 위치에 따라 전단 변형이 달라진 것으로 보인다. 따라서 각 마름모꼴 형상에서 상부 및 하부 변형각(θ)을 평균하여 전단각(γ)을 계산 하였다. 복합

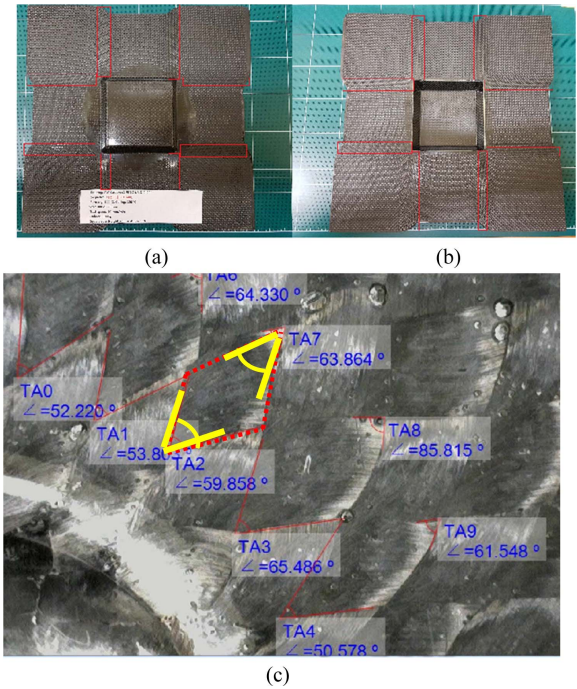


Fig. 11. (a) Outside and (b) inside images and (c) enlarged corner images at outside of thermoformed product

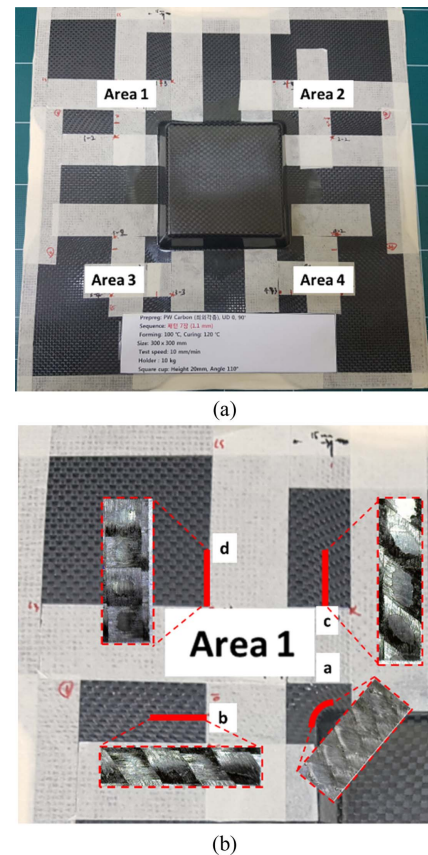


Fig. 12. (a) Shear-dominated regions of the PW carbon prepreg at four different area in each corner of square-cup; (b) Enlarged images of each position in Area 1

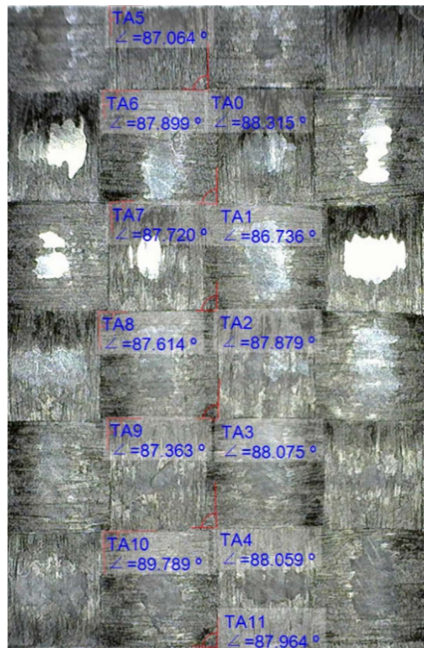


Fig. 13. Magnified image (22.5 x) of deformed angle of the outer layer of prepreg laminate (PW carbon) at 2-d

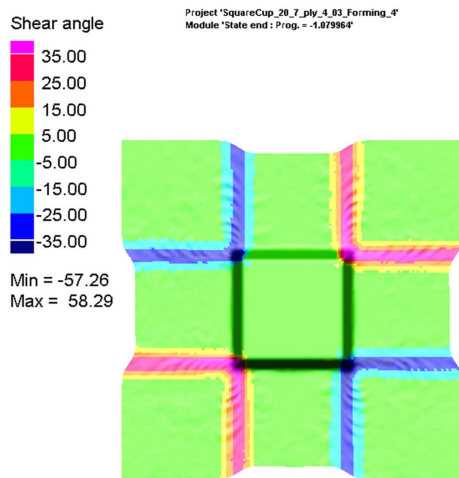


Fig. 14. Predicted shear angles without compression properties of prepreg using the PAM-FORM simulation (From top view)

재의 전단 변형 각도를 측정하기 위해 근접 촬영이 가능한 디지털 현미경(AD4113T, Dino-Lite)을 사용하였으며, 4개의 측정 영역에서(Fig. 12(a)) 4개의 위치 (Fig. 12(b) 빨간선)를 설정하여 경사(warp) 또는 위사(weft) 방향으로 변형된 10개의 단위 셀 내부 각도를 측정하였다(Fig. 13). 각 영역 별에서 측정된 값은 변형 위치(a, b, c, d)별로 나누어 평균하였다. 또한 정사각형 컵 열성형 해석에서 실험과 동일한 위치의 전단각을 측정하여 평균을 한 후 실험 데이터와 비교하는 작업을 진행하였다.

소재의 압축 물성이 반영되지 않은 해석 결과에서는 프

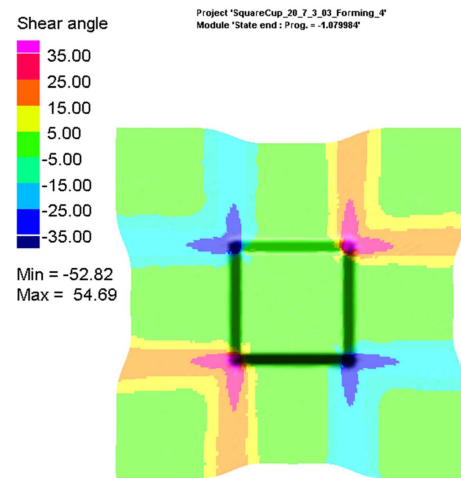


Fig. 15. Predicted shear angles with compression properties of prepreg using the PAM-FORM simulation (From top view)

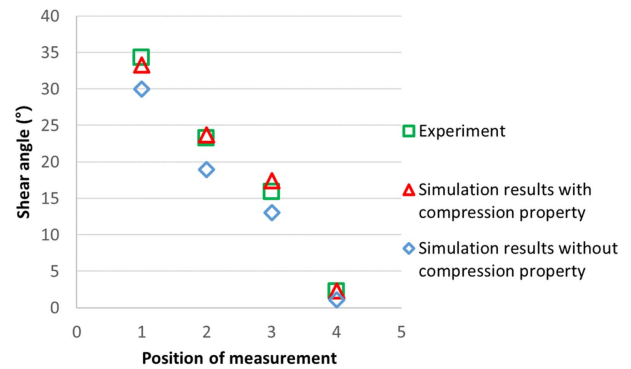


Fig. 16. Comparison of measurement of shear angle at each position near the square-cup corner with simulation results

Table 5. Average shear angle at 4 different points of each corner of the square-cup

Position	Mean Shear Angle (°)			
	a	b	c	d
Experiment	34.30	23.27	15.86	2.25
Simulation Results with Compression Property (Error)	33.24 (1.06)	23.71 (0.44)	17.40 (1.55)	2.29 (0.04)
Simulation Results without Compression Property (Error)	29.96 (3.29)	18.91 (4.80)	13.04 (4.36)	1.11 (1.18)

리프레그의 경사와 위사의 변형 각도(θ)가 적게 일어나 전단각이 높게 분포된 것을 Fig. 14에서 확인 할 수 있었다. 반면, 해석에서 압축 물성이 반영된 프리프레그에서는 변형이 많이 일어나 낮은 전단각 전단각 분포를 Fig. 15와 같이

관찰 되는 것으로 보아 프리프레그의 전단 변형에 압축 물성이 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

Fig. 16은 위치별 전단각 측정 실험 결과, 압축 물성 반영된 해석 결과, 압축 물성 미반영된 결과를 나타낸 것이며 Table 5는 결과 데이터를 정리한 것이다. 정사각형 컵의 각 모서리 부근(위치 a)에서 직조 패턴의 변형이 가장 크게 일어났다. 각 위치에서의 전단각을 측정한 실험 결과와 압축을 반영한 해석 결과 간의 오차 범위는 위치 별로 최소 0.04°에서 최대 1.55° 보였으며 압축 물성을 미반영한 값과의 오차 범위는 최소 1.18°에서 최대 4.80°로 압축 물성을 반영한 해석보다 정확성이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 프리프레그의 압축 강성 물성이 인장 물성보다 약 10^3 배 정도 낮게 측정되었는데, 섬유 변형 과정 중 압축 하중을 받을 때 압축 물성을 인장 물성과 같다고 가정하여 해석할 경우 높아진 압축 강성으로 인해 변형이 덜 일어나게 해석되기 때문이다. 따라서 성형 변형 해석의 정확도를 높이기 위해서는 압축 물성을 직접 측정한 후 입력 값으로 사용하여야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 성형 해석의 정확도를 높이기 위하여 압축 물성 측정법을 제안하였고 측정된 압축 물성을 해석에 반영하여 압축 물성 반영 유무에 따른 해석의 정확도를 비교하였다. 기계적 특성 시험 결과 압축 물성은 인장 물성에 비해 매우 낮은 강성 값을 보였다. 성형 해석 결과와 실험에서 구한 전단각을 동일한 위치에서 비교한 결과 섬유의 압축 물성이 반영된 해석 결과는 실험과 유사한 경향을 보인 반면 압축 물성이 미 반영된 해석 결과는 평균적으로 낮은 전단각을 예측하였다. 이는 압축 강성을 인장 강성과 같은 값으로 가정하고 해석할 경우 변형이 덜 발생하기 때문이다. 따라서 성형 해석의 정확도를 높이기 위해서는 압축 물성을 측정하여 사용하여야 한다.

후 기

이 연구는 2018년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(10083584).

REFERENCES

1. International Council on Clean Transportation. Global Passenger Vehicle Standards. 2014. Available online: <http://theicct.org/info-tools/global-passenger-vehicle-standards> (accessed on 15 December 2016).
2. Sherwood, J.A., Fetfatsidis, K.A., Gorczyca, J.L., and Berger, L. "Fabric Thermostamping in Polymer Matrix Composite. In Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)", (Advani, S.G., Hsiao, K.-T., Eds.), Elsevier: New York, NY, USA, 2012, pp. 139-179.
3. Knibbs, R.H., and Morris, J.B., "The Effects of Fibre Orientation on the Physical Properties of Composites", *Composites*, Vol. 5, 1974, pp. 209-218.
4. Roger, W., Jin, X., and Zhu, J., Draping Simulation of Woven Fabrics, Conference: Automotive Composites Conference & Exhibition (ACCE) 2016, 2016.
5. Data Sheet Provided by Hankuk Carbon Co., Ltd, Miryang, Korea.
6. Bae, D., Kim, S., Lee, W., Yi, J.W., Um, M.K., and Seong, D.G., "Experimental and Numerical Studies on Fiber Deformation and Formability in Thermoforming Process Using a Fast-Cure Carbon Prepreg: Effect of Stacking Sequence and Mold Geometry", *Materials*, Vol. 11, 2018, p. 857.
7. J. Cao *et al.*, "Characterization of Mechanical Behavior of Woven Fabrics: Experimental Methods and Benchmark Results", *Composites: Part A*, Vol. 39, 2008, pp. 1037-1053.
8. ASTM Standard Test Method for Stiffness of Fabrics-ch. D1388-96. American S. for Testing. 2002.
9. Gorczyca, J., "A Study of the Frictional Behavior of a Plain-Weave Fabric during the Thermostamping Process", Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Massachusetts Lowell, Lowell, MA, USA, January 2004.
10. Lightfoot, J., Wisnom, M., and Potter, K., "Defects in Woven Preforms: Formation Mechanisms and the Effects of Laminate Design and Layup Protocol", *Compos. Part A*, Vol. 51, 2013, pp. 99-107.
11. Clapp, T.G., and Peng, H., "Buckling of Woven Fabrics Part III: Experimental Validation of Theoretical Models", *Textile Research Journal*, 1990, p. 641.