

유리섬유-강화 고분자 복합재료의 굴곡 강도, 층간전단응력, 에너지 감쇄에 대한 직물 구조와 고분자 매트릭스의 영향

Jignesh S Patel, Veera M Boddu, Matthew W Brenner, and Ashok Kumar

요약

우리는 유리섬유-강화 고분자 복합재료(GFRP)의 굴곡강도, 층간전단응력(ILSS), 에너지 흡수 물성에 대한 유리 섬유 구조와 에폭시 고분자 시스템의 영향을 보고한다. 4가지의 GFRP 복합재료는 다양한 직물 수와 가닥 밀도를 가진 두 가지 유리 섬유 직물과 지환족, 선형 지방족 시스템의 두 가지 수지로부터 제조되었다. 이 복합재료들은 진공-함침 수지이송성형을 통하여 제조되었다. 굴곡 응력과 ILSS 데이터는 ASTM 790-10과 ASTM D2344/D2344M 표준에 따라 3점 굽힘 시험을 사용하여 얻어졌다. 더 큰 직물 수가 사용되어 제조된 GFRP 복합재료 시트는 약한 굴곡강도뿐 아니라 취약한 ILSS 물성을 나타내었다. 그러나 압축변형의 측정 범위 이상의 다섯 압축 반복 후, SC780과 SC15 수지에서 에너지 감쇄가 각각 95%와 7%의 평균 증가를 보였다. SC15 수지와 비교하여, SC780 수지는 에너지 감쇄는 감소하지만 더 높은 굴곡과 ILSS 물성을 나타내었다. 이 연구의 결과는 굴곡강도, ILSS, 에너지 흡수가 중요한 직물-강화 복합재료 응용성의 설계를 도와준다.

키워드

유리섬유-강화 복합재료, 굴곡강도, 층간전단강도, 에너지 감쇄, 주사전자현미경 파손 분석

복합재료 물질은 높은 강도-중량 비와 강성-중량 비가 중요한 구조 응용에 이상적이다. 항공기와 우주선 제조 산업은 복합재료, 특히 유리섬유-강화 고분자 복합재료(GFRP)의 주 사용자이다. 패널이 가벼울수록 이송하기 쉽고, 구조 손상의 위험이 적으며 수송비가 적다. 우주항공 산업 외에 GFRP는 넓게 부대방호, 자동차 차체, 엔진 부분, 다리, 건물과 여러 사회기반시설 응용에 사용된다. 이러한 복합재료 패널의 기본 구성요소는 직조 유리 섬유 보강 직물 사이에 함침된 열경화성 고분자 수지를 포함한다.

GFRP 복합재료의 인장강도, 압축강도, 굴곡강도, 면내전단강도와 같은 우수한 기계적 물성에 상관없이 연구자들은 층간전단강도(ILSS)와 에너지 흡수 성능을 향상시킬 방법에 대한 연구를 계속하고 있다. ILSS 물성을 향상시키기 위하여, 보강제와 매트릭스 물질의 물성이 향상되는 동시에, 층간 접착과 결합이 복합재료 제조동안 최적화되어야 한다. 일반적인 복합재료 제조 기술 중의 하나는 진공-함침 수지이송성형 방법(VARTM)이다. 이 방법은 높은 섬유-매트릭스 체적비와 복합재료 두께를 통한 수지 주입을 향상시켜 층간 공극의 감소 결과로 GFRP 복합재료의 ILSS 물성을 향상시킨다.

짜임, 힘, 층진 밀도, 두께의 종류를 포함하는 보강 직물 구조는 복합재료의 기계적 물성에 상당한 영향을 준다. 직물의 세 가지 기본 직조 패턴이 복합재료의 기계적 물성에 미치는 영향은 연구 그룹에 의해 연구되었다. 평면 직물 구조는 우수한 축신장성과 압축, 피로, 면내전단 물성을 보여주며 GFRP에도 많이 사용되고 있다. 또한, 가닥 밀도가 높을수록 고분자 수지 함량이 높은 구역에서 균

질한 섬유 분배를 나타내어, 층간파괴인성이 향상된다.

유리섬유의 직경과 표면 미세구조, 화학적 기능성은 층간파괴인성에 직접적인 영향을 준다. 섬유 직경이 작을수록 선형 크랙 길이가 짧으며, 크랙 성장과 침투에 대한 저항성이 크며 결국은 파손에 대한 저항성이 증가한다. 직조 직물에서 휨과 충전 밀도는 꼬임으로 인해 크립프(굴곡)를 발생시킨다. 직물에서 굴곡은 단축 인장 하중 하에서 국부 응력 혼란을 일으키고, 이것은 큰 변형률 집중의 원인이 되며 섬유와 매트릭스 탈착이나 매트릭스 균열을 일으킬지 모른다. 또한, 굴곡은 압축 하에서 국부 섬유 좌굴을 일으킬 수 있다. 섬유 두께와 날실, 충전 변화를 통하여 굴곡을 변경함으로써 GFRP 복합재료의 기계적 물성이 조절될 수 있다.

본 연구에서 GFRP 복합재료의 굴곡, ILSS, 반복 압축 물성에 대한 유리 직물 구조(섬유 수, 직물 밀도, 섬유 직경)와 고분자 매트릭스의 영향이 조사되었다. 또한, 단위 부피 당 흡수되거나 감쇄된 에너지는 반복 압축 측정을 통하여 얻어졌다. VARTM으로 제조된 모든 4가지 GFRP 복합재료 조합이 연구되었다. 이러한 물성은 건물, 장치, 그 외 구조에서 에너지 흡수에 대한 고성능 GFRP 복합재료를 위한 유리 직물과 수지 시스템 선택에 유용하다.

실험 세부 사항

물질

2가지 다양한 두께와 경사위사밀도를 가지는 상용 유리 직물(Fiber Glast Developmetn Corp., Brookville, OH, USA)은 GFRP 복합재료를 제조하기 위하여 사용되었다. 두꺼운 두께와 낮은 경사위사밀도(197×157 threads/m)를 가지는 직물은 “GF1”이라 하며, 얇은 두께와 직경, 높은 경사위사밀도(629×551 threads/m)를 가지는 직물은 “GF2”라 명명한다. 표 1은 두 유리 직물(GF1과 GF2)의 사양을 작성한 것이다. SC15와 SC780 에폭시 수지는 Applied Poleramic, Inc.(Benecia, CA, USA)에서 구하였다. 두 수지는 저점도 2상 강화된 비스페놀 A 디글리시딜에테르(DGEBA) 시스템이다. SC15는 지방족 수지 시스템이고, SC780은 선형 지방족 수지 시스템이다.

표 1. 유리 직물 사양

Fiberglass fabric	GF1	GF2
Weave	Plain	Plain
Fabric count (threads/m)	197 × 157	629 × 551
Thickness (mm)	0.72	0.36
Weight (g/m ²)	832	339

복합재료 시트 제조

복합재료 시트는 수지의 흐름을 용이하게 하고 수지에서 기포를 감소시키는 진공 백과 펌프를 사용하는 VARTM을 이용하여 제조되었다. 공극 감소의 결과로 복합재료의 강도는 감소한다. GFRP 샘플의 4가지 조합 모두 두 가지 유리 직물인 GF1과 GF2, 두 가지 수지 시스템인 SC15와 SC780의 각 조합으로부터 제조되었다(그림 1). 유리 직물은 38 cm×46 cm 크기로 잘라졌다. 잘라진 직물은 모든 층에 대해 같은 방향에서 날실 가닥이 배향되도록 서로 위에 배치되었다; 그러나 임의의 중첩이 사용되었고, 이는 섬유 방향에 수직인 날실 가닥의 상대적 위치가 무작위였다는 것을 의미한다. GF1 7겹이 약 5 mm 두께의 GFRP 복합재료를 만드는 데 사용되었다. 비슷하게, GF2 12겹이 약 5 mm 두께 GFRP 복합재료를 만드는 데 필요하였다.

유리 섬유 층 스택은 수지의 연속적인 공급이 가능하도록 일련의 공급 튜브와 함께 별도의 진공 백에 삽입되었다. 또한, 수지 흐름을 용이하게 하고 더욱 단일한 흐름 분포를 위하여 분포 수단이 백에 삽입되었다. 진공 백은 약 125 Torr의 압력으로 펌프 다운되었고 진공 시스템에서 1시간 유지되었다. 동시에, 수지 용액은 다음에 따라 제조자의 지침에 따라 합성되었다. 4가지 GFRP 복합재료 조합 모두는 2가지 유리 섬유와 2가지 수지 시스템으로 제조되었다. 각 수지 시스템에는 수지(파트 A)와 경화제(파트 B), 두 구성요소가 있다. 수지와 경화제의 비율은 제조자의 가이드라인에 따라, SC15 시스템은 무게 100:30으로 SC780 시스템은 무게 100:22로 설정되었다. 파트 B는 파트 A에 혼합되고, RW20 전자 교반기(IKA, Wilmington, NC)를 사용하여 300 rpm에서 5분 동안 교반되었다.

수지 용액은 별도의 진공 시스템 하에서 10분 동안 진공으로 만들어졌다. 그 후 수지 용액은 직물 층이 적셔질 때 까지 25~35분 동안 각각의 VARTM 시스템에 주입되었다. 압력 하에 잔여 수지와 증기를 제거하고 복합재료를 조기-경화시키기 위하여 진공 백의 압력은 24시간 동안 125 Torr로 일정하게 유지되었다. 그 후 진공 백에서 샘플을 제거하고 샘플은 오븐(Model CE3G, Sheldon manufacturing, INC, Cornelius, OR, USA)에서 90℃의 온도로 4시간동안 후-경화되었다.

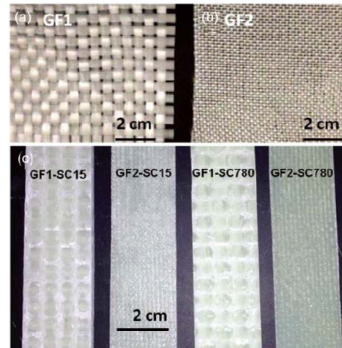


그림 1. 유리 직물 샘플 (a) GF1과 (b) GF2의 광학 이미지. (c) 명명된 유리 직물과 수지의 4가지 조합을 나타내는 유리섬유-강화 고분자 샘플.

굴곡 강성

굴곡 강성 측정은 ASTM 790-10에 따라 진행되었다. 시험은 13.3 N의 소음 레벨을 가지는 222.4 kN 로드 셀을 사용하여 MTS 서보 유압 장치 모델 311-11904.98 (Eden Prairie, MN, USA)로 실행되었다. 시험 샘플은 다이아몬드 쏘 블레이드를 사용하여 잘라졌다. ASTM 표준에 따라 시험 동안 경간거리-두께 비는 16:1로 유지되었다. 크로스-헤드 동작 속도(R)는 ASTM 표준에 따라 설정되었고, 이는 식(1)을 사용하여 각 샘플에 대해 계산되었다 :

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad \dots(1)$$

여기서 Z는 0.01 (mm/mm/min)의 변형 속도 상수이고, L은 경간거리, d는 샘플 두께이다. 이 실험에서 크로스-헤드 속도의 범위는 1.47~2.44 mm/min이었다.

변위는 ASTM 790-10에 따라 기계 컴플라이언스 식(2)에 따라 측정되고 보정되었다 :

$$D = D' - \frac{P}{m'} \quad \dots(2)$$

여기서 D는 보정된 변위, D'는 측정된 변위, P는 변위 D'에서 하중, m'는 봉강에 대한 하중-변위 곡선의 기울기이다. D와 측정된 하중 P의 값은 식(3)과 식(4)를 사용하여 굴곡 응력과 변형률을 계산하는데 사용되었다 :

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \dots(3) \quad \varepsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad \dots(4)$$

여기서 σ 와 ε 는 각각 굴곡 응력과 변형률이고 b는 샘플의 폭이다. 각 GFRP 구성에 5개의 시편이 측정되었다. 극한강도는 측정 동안 도달하는 최대 응력에 유의하여 결정되었고, 항복강도는 항복점에서 응력에 유의하여 결정되었다. 표 2는 굴곡 시험 결과로부터 도출된 기계적 물성 개요를 나타내며, 그림 2는 4가지 GFRP 조합에 대한 굴곡 응력 대 굴곡 변형률 그래프를 보여준다.

표 2. 굴곡 시험 결과의 개요

	GFRP thickness (mm)	Ultimate strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
GF1-SC15	5.86	182 ± 18.5	143 ± 10.2	12.9 ± 0.41
GF2-SC15	4.05	226 ± 23.9	169 ± 35.3	13.8 ± 1.24
GF1-SC780	5.28	220 ± 4.2	166 ± 12.0	13.1 ± 1.16
GF2-SC780	3.53	400 ± 12.0	348 ± 22.8	17.7 ± 0.85

GFRP: glass fiber-reinforced polymer.

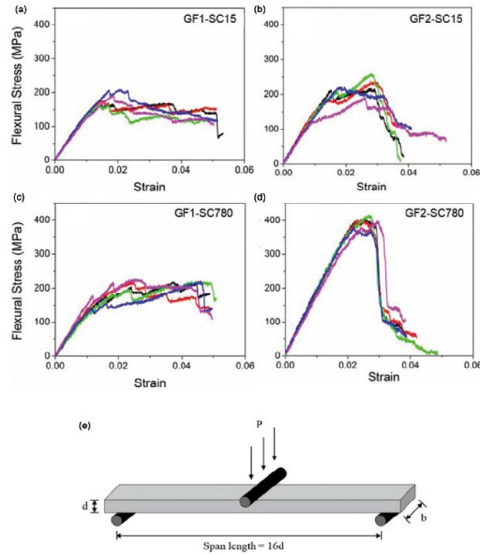


그림 2. (a)GF1-SC15, (b)GF2-SC15, (c)GF1-SC780, (d)GF2-SC780의 굴곡 응력 대 변형을 거동. (e)굴곡강성 측정 도식.

층간전단응력

ILSS는 ASTM D2344-00에 따라 3점 단보 굽힘 시험을 이용하여 측정되었다. 이 측정 또한 1.27 mm/min 크로스-헤드 속도를 사용한 MTS 서보 유압 기계로 실행되었다. 샘플 크기는 ASTM 2344-00에 따라 선택되었고, 샘플 길이는 샘플 두께의 6배이고 폭은 두께의 2배이다. 각 GFRP 구성에 5개의 샘플이 측정되었다. 항복파괴하중은 ILSS를 계산하는데 사용되었고, 식(5)에 의해 주어진다 :

$$ILSS = \frac{3P_b}{4bd} \quad \dots(5)$$

여기서 P_b 는 항복파괴하중, b 와 d 는 각각 샘플의 폭과 두께이다. 그림 3은 GFRP 복합재료의 4가지 구성에 대한 계산된 ILSS 값을 보여준다.

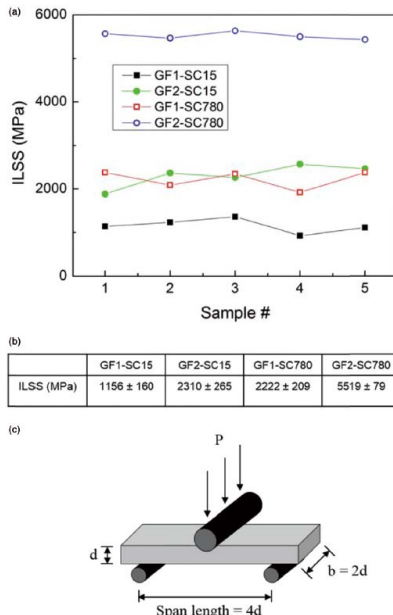


그림 3. (a) 각 4가지 유리섬유-강화 고분자 복합재료: GF1-SC15(■-), GF2-SC15(●-), GF1-SC780(□-), GF2-SC780(○-)의 5개 샘플에 대한 층간전단응력(ILSS) 측정. 사각형은 GF1으로 만들어진 복합재료, 원은 GF2, 채워진 도형은 SC15, 빈 도형은 SC780을 나타낸다. (b) ILSS 값 개요. (c) ILSS 측정 도식.

반복 압축

반복 압축 응력 대 변형률과 에너지 감쇄를 결정하기 위하여, 샘플은 MTS 서보 유압 장치를 사용하여 측정되었다. 하중 대 변위는 식(6)과 식(7)을 적용하여 측정되었고 응력-변형률로 변환되었다 :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \dots(6) \qquad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \dots(7)$$

여기서 σ 는 응력, A 는 샘플 면적, F 는 측정된 하중, ε 는 변형률, ΔL 은 크로스-헤드 변위, L_0 은 본래 샘플 두께이다. 힘은 178 N/s의 속도로 적용되었고 측정은 모든 샘플에 100 MPa의 최대 응력이 하중 제한되었다. 하중 제한에 도달하면, 크로스-헤드 방향이 반전되어 적용된 하중이 감소된다. 이 과정은 반복 하중을 적용하여 GFRP 샘플의 반응을 측정하기 위하여 5번 반복되었다.

GFRP 복합재료의 에너지 밀도와 흡수 물성인 감쇄된 에너지 밀도 E_d 는 식(8)에 따라 곡선의 닫힌 영역을 찾기 위하여 응력-변형률 곡선을 적분하여 계산되었다. 주기 수의 함수로서 감쇄된 에너지 밀도는 그림 4에 나타내었다 :

$$E_d = \int \sigma d\varepsilon \quad \dots(8)$$

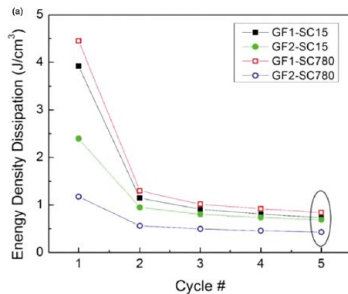
주사 전자 현미경을 이용한 파괴 분석

4가지 GFRP 복합재료 조합의 미측정 샘플과 단보 시험된 샘플 모두 충전 효과를 감소시키기 위하여 Denton Desk-II를 사용하여 45 mA의 전류에서 2분 동안 금으로 스퍼터 코팅 되었다. 샘플은 작동 거리 10 mm와 가속 전압 5 kV의 JEOL JSM 6390 SEM (JEOL USA Inc., Peabody, MA)를 사용하여 이미지화 되었다. 그림 5는 주사전자현미경(SEM) 사진을 나타낸다.

결과와 논의

복합재료 시트는 각각 다른 두께와 무게를 가지는 두 가지 유리 직물(GF1과 GF2)과 다른 화학 경화제를 가지는 두 가지 수지(SC15와 SC780)로부터 VARTM 시스템을 사용하여 제조되었다. 그림 1은 사용된 두 가지 유리 직물과 평가를 위해 제조된 복합재료 샘플을 나타낸다. 그림 2(a)~(d)는 각각 GF1-SC15, GF2-SC15, GF1-SC780, GF2-SC780으로 제조된 복합재료의 응력 대 변형률 거동을 설명하는 굴곡 시험 결과를 보여준다. 표 2는 각 GFRP 복합재료 조합의 극한 강도, 항복 강도, 탄성계수를 작성한 것이다. 4가지 조합 중 GF1-SC15 조합에서, 가장 낮은 182 MPa의 극한 강도를 나타내었다. 같은 SC15 수지지만 유리 직물 GF2로 제조된 GFRP 복합재료는

높은 밀집 비율과 촘촘한 가닥 밀도로 24% 정도 더 높은 극한 강도를 나타내었다. 수지 SC780을 사용한 경우에서도 극한 강도가 82% 증가하여 비슷한 경향을 볼 수 있었다. 이것은 직물이 두꺼워 하중 하에서 가닥을 약하게 만드는 가닥 굴곡 때문이다. 게다가, GF2 복합재료는 낮은 섬유 직경으로 인해



	GF1-SC15	GF2-SC15	GF1-SC780	GF2-SC780
Energy Dissipation (J/cm²)	0.733 ± 0.058	0.687 ± 0.051	0.838 ± 0.025	0.429 ± 0.081

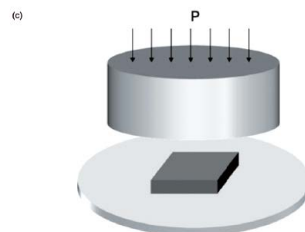


그림 4. (a) 유리 직물과 수지 물질의 4가지 조합에 대한 유리섬유-강화 고분자 복합재료 샘플에서 감쇄된 에너지 밀도. (b) 표는 5개 사이클에 대한 4가지 복합재료 조합의 부피 당 감쇄된 에너지를 나타낸다. (c) 압축 에너지 측정의 도식도, P는 하중.

높은 유리 밀도를 가져 더 강한 복합재료를 나타낸다. 유리 직물 종류와는 상관없이, SC780으로 제조된 복합재료는 두 유리 섬유와 강한 결합을 하여 더 높은 극한 강도를 가진다. SC15보다 SC780이 10.3%의 높은 강도를 나타내므로, 약간의 강도 차이는 각 수지의 강도 차이에 기인한 것일 수 있다. SC780 복합재료의 극한 강도는 SC15 복합재료에서 GF1을 사용한 경우보다 21%, GF2를 사용한 경우보다 77% 높았다. 또한, 이것의 일부는 그림 5의 첫 번째 열에서 보이는 것처럼, 주입 공정 동안 유리 직물 사이로 SC780의 수지 분산이 원활하여 적은 공극 발생으로 인한 것일 수 있다. 더 나아가 SC780은 선형 지방족 수지이고 유리 직물에서 커플링제와 강한 결합력을 가진다. 주어진 유리 섬유 종류에서, SC780 복합재료의 경우 GF1은 1.6%, GF2는 28.3%의 높은 탄성계수를 나타내었다. SC780의 계수는 SC15와 비교하여 7.7% 높았고, 수지 종류에 상관없이 GF1 복합재료의 계수에서 두드러진 증가는 없었다. 그러나 GF2와 같은 얇은 유리 직물의 경우에는 GF1과 비교하여 SC780에서 35.1%, SC15에서 7.0%의 높은 계수를 나타내었다. GF2 복합재료에서 계수 증가는 적은 가닥 운동에 의한 것일 수 있다.

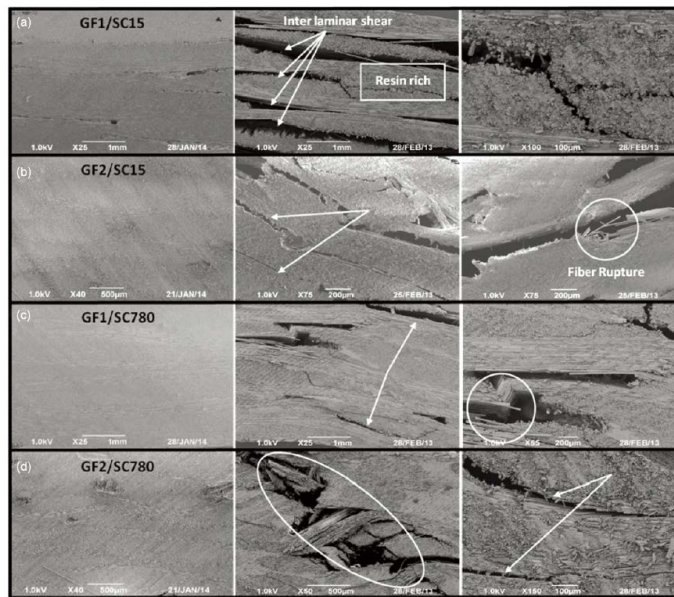


그림 5. 파손 분석과 층간전단응력(ILSS) 샘플의 사진. 각 (a)–(d) 줄은 유리섬유-강화 고분자(GFRP) 복합재료를 만들기 위해 사용된 유리 직물과 수지 조합 중 하나의 주사 전자 현미경 사진을 보여준다. 첫 번째 열은 약 5 mm 두께 GFRP 복합재료 샘플의 전형적인 단면을 보여준다. 두 번째와 세 번째 열은 3점 단보 굽힘 시험을 통해 얻은 ILSS 값 측정 후 단면의 대표 이미지를 보여준다. 화살표는 ILSS 파손을 가리키고, 타원은 섬유 파열 지역, 사각형은 수지가 풍부한 위치를 보여준다.

층간전단시험

3점 단보 측정은 ASTM D2344-00에 따라 GFRP의 ILSS 물성을 얻기 위하여 수행되었다. 그림 3은 4가지 다양한 유리 직물과 수지 조합의 ILSS 결과를 보여준다. 얇은 GF2 직물로 제조된 복합재료는 SC15를 사용하였을 때 2.0이고, SC780을 사용하였을 때 2.48로 두꺼운 GF1로 제조된 복합재료보다 상당히 높은 ILSS 값을 나타낸다. 얇은 유리 직물에서 큰 ILSS는 수지와 맞닿는 표면적이 더 많아 더 큰 전단 저항력을 제공하기 때문일 수 있다.

더 촘촘한 GF2의 확장된 표면적 때문에 더 큰 층간 섬유 가교를 가질 수 있도록 하여 얇은 GF2 직물에서 인접 층 중첩 효과는 무시해도 될 정도이다. 게다가, 매트릭스로 사용된 수지의 종류가 ILSS 물성을 변화시킨다. 연구된 모든 유리 직물과 수지 조합 중 GF2와 SC780으로 제조된 고분자 복합재료가 5519 MPa의 가장 높은 ILSS를 나타내었다. GF1과 SC15로 제조된 GFRP는 1156 MPa의 가장 낮은 ILSS 값을 나타내었다. 이는 그림 5의 첫 번째 열에서 보이는 것처럼, 이 조합에서 유리 직물과 매트릭스 물질 사이에 큰 공극 구조의 결과와 유리 직물과 수지 사이에 작은 접촉 면적과 약한 결합으로 설명 될 수 있다. 이 결과들은 얇은 직물이 파손 전에 더 높은 응력에 도달하였던 굴곡 시험과 비슷하다.

반복 압축과 에너지 감소

GFRP의 에너지 흡수 성능에 대한 유리 직물 두께의 영향을 평가하기 위하여 반복 압축 측정이 수행되었다. 178 N/s의 힘 속도로 샘플에 반복 하중이 적용되었고, 하중 대 변위가 측정되었다. 이것은 응력 대 변형률로 전환되었다(그림 6). 모든 측정은 반복 하중에 응력 대 변형률 곡선의 닫힌 영역에서 이력을 나타내었다. 이 영역은 단위 부피당 감소 에너지로 계산되고 확인되었다. 에너지 감소 양은 유리 직물과 수지 종류에 따라 변한다. 4가지의 복합재료 조합 각각은 첫 번째 주기에서 가장 큰 에너지 감소를 나타내었고, 다음 주기에서는 감소하였다. 에너지 감소는 GFRP 복합재료에서 발생하는 경화로 인해 각 주기 후 감소하였다.

그림 4는 모든 유리 섬유와 수지의 조합에 대한 감소 에너지 대 주기를 보여준다. 각 측정 점은 4개 샘플에 걸쳐 그 주기에서 감소된 에너지 밀도를 평균하여 얻어진다. GF1로 제조된 GFRP 복합재료는 GF2를 사용하여 만든 복합재료보다 더 높은 에너지 감소 결과를 나타내었다. 이 거동은 압축 하중 하 직물 내에 섬유 운동에 기인한 것일 수 있다. 섬유 묶음 내의 섬유의 상대 운동은 마찰력으로 인해 에너지의 감소에 도움을 준다. GF1로 만들어진 GFRP 복합재료는 두 수지를 사용한 경우에서 비슷한 수준의 감소된 에너지를 보이지만, 다섯 주기 후 SC780 기반 복합재료는 14%의 더 높은 수준을 나타낸다. GF2로 만들어진 GFRP 복합재료에서, 다섯 번의 주기 후 SC780 복합재료보다 SC15 기반 복합재료가 60%의 더 높은 에너지 감소를 가졌다. 이것은 보강 요소와 높은 가교를 제공하는 지환족 화학 구조로 설명될 수 있다. GF2 복합재료에 비하여, GF1은 다섯 주기 이후 SC15 기반 복합재료에서는 6.7% 더 큰 에너지를 SC780 기반 복합재료에서는 95%를 소모했다. GF2-SC780 복합재료에서 최소 에너지 밀도가 소모된 반면에, 최대 에너지가 감소된 조합은 GF1-SC780이었다.

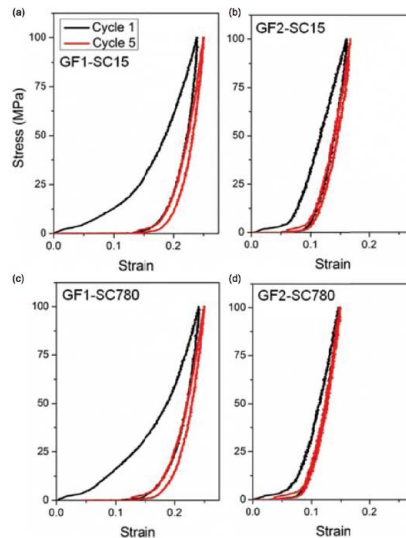


그림 6. 두 가지 다른 유리 직물과 매트릭스 수지로 제조된 유리섬유-강화 고분자 복합재료 샘플의 이력(에너지 흡수)을 나타내는 전형적인 반복 압축 측정

파손 분석

GFRP 복합재료의 ILSS는 3점 단보 이론을 사용하여 결정되었다. 복합재료의 ILSS가 굴곡 항복 강도보다 상당히 크다는 결과를 나타내었다. 이것은 SEM을 사용하여 측정된 샘플의 파손 모드를 분석하여 설명될 수 있다. 파손 모드는 층간 전단, 굴곡 항복이나 이 두 가지의 조합에 의해 야기되었다. 층간 전단 파손은 평면 사이 공극의 틈으로 특징 지워진다. 굴곡 항복 강도는 평면 굽힘으로 발생할지 모르는 섬유 붕괴에 의해 특징 지워진다. 그림 5(a)-(d)는 층간 전단 뿐 아니라 굴곡 항복과 층간 전단 파손의 복합 혼합 모드의 결과로 인해 발생된 ILSS에서 파손을 보여준다. 그림 5(a)는 파손이 층간 전단과 수지 균열의 복합 모드임을 나타낸다. 이는 두 층 사이의 접촉면에서 발생하고, 수지가 풍부한 지역에 침투된다. GF2와 SC780으로 만들어진 GFRP는 사실상 꽤 다르다(그림 5(d)). 층간 전단과 굽힘(섬유 균열)의 혼합된 모드를 보였다. 비슷한 거동이 GF1-SC780 기반 복합재료에서도 관찰되었으

며(그림 5(c)), 섬유 균열과 층간 전단이 모두 나타났다. GF2-SC15의 경우(그림 5(b)), 경계 층 접점에서 수지 표면의 GF2 박리로 인하여 ILSS 파손이 발생하였고, 이는 층간 전단 파손의 특성이다. 또한, 약간의 섬유 파열도 있었다. 각 경우에서, 크랙 성장은 적용된 힘에 수직하였다. 이것은 파손이 대부분 굽힘보다는 전단에 의해 발생했다는 것을 가리킨다.

결론

본 연구에서 GFRP 복합재료는 유리 직물과 수지 4가지 조합을 사용하여 제조되었다. 이 GFRP 복합재료의 굴곡, ILSS, 에너지 감쇄 물성이 측정되었다. 여기에 연구된 다양한 유리 직물과 수지 중, 굽힘과 ILSS가 약한 유리 직물과 수지는 에너지 감쇄에 우수하였고, 굽힘과 ILSS가 강한 유리 직물과 수지는 에너지 흡수에 열등하였다. 굴곡과 ILSS 시험 데이터는 얇은 GF2 직물(선형 지방족 수지 매트릭스 재료와 함께)이 우수한 굴곡과 ILSS 물성을 가지는 반면에, 반복 압축 측정은 취약한 에너지 감쇄를 나타내었다. 반복 압축과 에너지 감쇄 측정은 두꺼운 GF1 직물이 수지 매트릭스와는 관계없이 더 좋은 에너지 감쇄 물성을 가진다고 제시한다. SC15 수지 기반 복합재료에서 ILSS 파손은 단순 모드에서 관찰되었지만, SC780 복합재료는 복합 모드에서 관찰되었고, 이는 층간 전단과 굽힘 파손을 모두 포함한다. 게다가, 굴곡 강도와 ILSS 모두 SC780을 사용하여 제조된 복합재료에서 상당히 높았다. 이는 SC780 수지가 SC15 수지보다 유리 섬유 직물과 강한 결합 물성을 가진다는 것을 나타낸다. 응용성의 요구를 충족시키기 위해 유리 직물과 매트릭스 수지 재료의 적절한 조합을 선택하는 것이 중요하다. 본 연구는 넓은 범위의 부하 조건에서 적용 될 수 있는 다양한 구조 설계에서 어떻게 유리 섬유 보강 물질과 수지 매트릭스가 중요한 요소인지에 대한 몇 가지 실마리를 제공한다. 이 분야에서 향후 연구는 유리 섬유와 매트릭스 시스템 사이 상호작용과 이것이 GFRP 복합재료의 전반적인 기계적 물성과 에너지 감쇄 성능에 어떠한 영향을 끼치는지에 관한 더욱 혁신적인 연구를 포함할 것이다.