

< 논문 >

편향각과 전단각이 탄소섬유/에폭시 평직 복합재료의 압축특성에 미치는 영향

김 성 집* · 장 승 환†

(2006년 2월 28일 접수, 2006년 4월 10일 심사완료)

The Effect of Bias and Shear Angles on Compressive Characteristics of Carbon/Epoxy Plain Weave Fabrics

Sung Jip Kim and Seung Hwan Chang

Key Words: Compressive Test(압축실험), Fabric Composites(직물 복합재료), Bias Angle(편향각), Sheared Angle(전단각)

Abstract

Various compressive specimens were fabricated using autoclave de-gassing moulding to find out the compressive characteristics of the carbon/epoxy plain weave fabric composites with respect to the bias and shear angles. The stacking angles of the bias specimens are $[0]_{10T}$, $[3]_{10T}$, $[6]_{10T}$, $[9]_{10T}$, $[12]_{10T}$, $[15]_{10T}$, $[30]_{10T}$, $[45]_{10T}$ and those of the sheared specimens are $[\pm 37]_{10T}$, $[\pm 32]_{10T}$, $[\pm 28]_{10T}$, $[\pm 22]_{10T}$ respectively. In order to verify the effect of micro-tow structures on compressive strength and modulus of the composites, compressive test specimens of uni-directional carbon/epoxy composites with the same materials and the same stacking conditions were fabricated. The modulus and strength of both types of composite specimens were compared with the prediction results based on the CLPT and a proposed strength formula. The tow deformation and fracture modes were investigated by microscopic observation.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 높은 비강성과 비강도 특성에 기인하여 자동차, 선박 및 항공 산업에 폭넓게 사용되고 있다. 특히 직물 복합재료(Fabric composites)는 취급이 용이하고 유연성이 높기 때문에 복잡한 형상을 가지는 금형에 적용하기가 수월하여 열성형(Thermoforming)이나 RTM(Resin Transfer Moulding) 및 여러 가지 드레이핑(Draping) 재료로 많이 사용되고 있다. 직물 복합

재료를 이용한 드레이핑 공정을 통해 생산된 제품의 국부적 물성을 예측하기 위해서는 드레이핑 공정 중 발생하는 재료의 전단 변형 및 기타 미소 토우(Tow) 구조의 변형에 따른 물성에 대한 기초 데이터가 필요하다. 따라서 이종 곡률을 가지는 복잡한 구조물의 성공적인 성형 및 성형 후 최종 제품의 정확한 물성 예측을 위해서는 재료의 드레이핑 거동을 이해하고 직물 복합재료의 미소 구조인 토우의 변형과 성형 후 물성간의 관계를 규명하는 것이 필요하다.⁽¹⁾ 드레이핑 기술과 토우의 변형 패턴에 관한 연구는 드레이핑 재료의 적절한 재료거동 실험과 해석으로부터 토우 변형의 현미경 관찰 혹은 특정한 제조방법을 이용한 제품으로의 응용에 이르기까지 다양한 분야에서 많은 연구들이 이루어졌다. 장승환⁽²⁾은 건직

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : phigs4@cau.ac.kr

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

* 중앙대학교 대학원 기계공학부

물(Dry fabrics)의 토우 진폭과 같은 토우 구조의 변화에 관한 연구를 수행하여 부가 하중과 이에 상응하는 토우 변형의 관계를 규명하였으며 여러 가지 인장실험을 통해 재료의 전단각에 따른 토우 변형 패턴을 검증하였다. Tan⁽³⁾은 전형적인 압축실험 지그인 셀레니스(Celanese) 지그와 IITRI (Illinois Institute of Technology Research Institute) 지그를 이용한 압축실험을 실시하여 응력 해석결과와 비교하였다. Haberle 등⁽⁴⁾은 CRAG, IITRI, ASTM(D695), BI, BAe, ICSTM 압축실험을 여러 가지 재료에 대해 실시하여 시편의 크기와 압축강도를 비교하였다. Fleck⁽⁵⁾은 여러 가지 복합재료의 압축 특성에 대한 실험과 이론적 수식을 정립하였으며, 하중 조건 및 재료에 따른 파괴 모드(Fracture mode)를 규명하고, 이러한 거동을 예측할 수 있는 수식을 제안하였다. Naik 등⁽⁶⁾은 축방향 하중을 받는 평직 복합재료의 압축 거동에 대한 해석적 모델을 제시하였으며, 실험을 통해 모델에 의한 계산결과와 실험결과를 비교하였다. 정일섭⁽⁷⁾은 미시적 좌굴 모델을 이용하여 일방향 강화섬유 복합재료의 압축거동에 대한 수치해석을 수행하였고 섬유와 매트릭스의 불완전 정렬이 증가할수록 압축강도가 감소함을 수치적으로 규명하였다. 변준형⁽⁸⁾은 평직 및 주자직 복합재료의 기하학적 특성에 따라 탄성계수를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. Fleck 등⁽⁹⁾은 직물 복합재료와 포용으로 구성된 샌드위치 구조의 축방향 압축실험을 수행하여 직물 복합재료 및 포움의 파괴 메커니즘을 분류하고, 여러 가지 적층 각도 및 실험 조건에 따른 압축 해석 및 실험을 수행하였다. 전홍재⁽¹⁰⁾ 등은 보강섬유의 굴곡의 변화에 따른 복합재료의 기계적 특성 값의 변화와 복합재료의 인장/압축 거동을 예측하였으며, 여러 가지 보강섬유 굴곡비의 시편을 제작하여 실험결과와 예측결과를 비교하였다. 본 논문에서는 평직 탄소섬유/에폭시 복합재료의 압축실험을 수행하여, 다양한 편향각과 전단각에 따른 압축강성과 강도를 측정하고 그 관계를 규명하였다. 또한 직물 복합재료와 동일한 섬유와 수지로 구성된 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료의 압축실험 결과와 비교하여 미세 토우 구조의 변화에 따른 압축특성도 비교하였다.

2. 시 편

2.1 편향각을 갖는 시편

본 실험에 사용된 재료는 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그(WSN, 3k, SK Chemicals, Korea)와 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(USN 125, SK Chemicals, Korea)이며 재료의 물성은 Table 1과 같다.

압축실험을 위한 시편을 만들기 위해 300×400 mm² 크기의 프리프레그를 0° 방향으로 10장 적층하였다. 플라이의 적층수는 복합재료 압축실험에 대해 규정한 ASTM D3410⁽¹¹⁾에서 직물 프리프레그의 강도와 강성을 고려하여 결정하였다. 프리프레그를 적층한 후 경화 중 잉여 수지를 흡수하기 위해 나일론 재질의 펄 플라이를 양쪽 표면에 댄 뒤, 양면을 두께 3mm의 스테인레스 평판으로 덮어 오토클레이브 진공백 성형법을 이용하여 125°C에서 4시간동안 성형하였다. 압축시편은 경화된 복합재료판에서 워터젯으로 절단하여 제작하였으며, 탭과 시편의 접착은 에폭시 접착제(DP-460, 3M)를 사용하였다. 편향각을 갖는 시편은 [0]_{10T}, [3]_{10T}, [6]_{10T}, [9]_{10T}, [12]_{10T}, [15]_{10T}, [30]_{10T}, [45]_{10T}이며 Fig. 1(b),(c)에서 보이는 바와 같이 제작하였다.

Fig. 1는 본 연구에 사용된 모든 압축시편의 구체적인 모양과 치수이며, 게이지 길이(Gauge length)와 폭은 모두 14mm이다. 워터젯 가공시 발생하는 절단 표면의 미세한 균열은 낮은 강도에서의 파괴를 유발할 수 있기 때문에 모든 시편은 최종 크기를 얻기 위해 #400의 사포를 사용하여 갈아내었다.

Table 1 Material properties of carbon/epoxy prepregs

Plain weave		
Modulus[GPa]	Longitudinal(0°)	70
	Transverse(90°)	70
Ply thickness[mm]		0.23
Fiber volume fraction		0.6
Uni-direction		
Modulus[GPa]	Longitudinal(0°)	130
	Transverse(90°)	10
Ply thickness[mm]		0.12
Fiber volume fraction		0.6

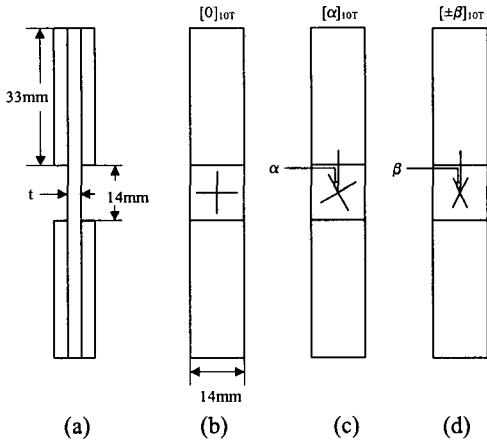


Fig. 1 Specimens for the compressive test of the fabric composites; (a) Composite specimen (lateral view), (b) Non-bias specimen, (c) Bias specimen, (d) Sheared specimen (symmetric)

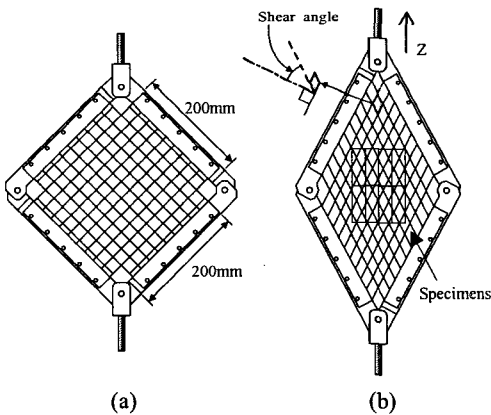


Fig. 2 Picture frame test rig and composite deformation; (a) Before shear deformation, (b) After shear deformation

2.2 전단각을 갖는 시편

전단각을 갖는 시편의 압축특성을 파악하기 위해 290×290 mm²의 크기로 재단된 10장의 프리프레그를 45°의 각도로 적층한 뒤 네 꼭지점을 90×90 mm²의 크기로 잘라내어 Fig. 2와 같이 사진틀(Picture frame) 지그에 고정시켜 장착하였다. 이 사진틀 지그를 UTM(MTS810, USA)에 체결하여 1mm/s의 속도로 Z-방향으로의 인장을 통해 필요한 전단각을 얻었다.

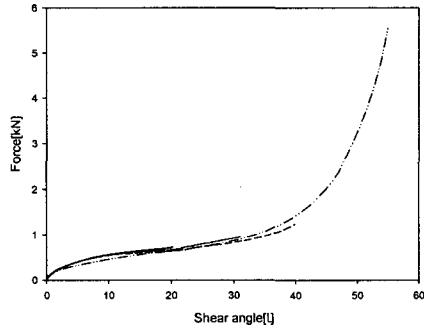


Fig. 3 Force-shear angle graphs of the fabric during the picture frame test

전단변형 중에 적층된 프리프레그의 미끄러짐을 방지하기 위해 클램핑되는 4면에 4개의 프레임틀을 5개의 볼트로 고정하여 사진틀 지그가 인장되는 동안 재료가 지그로부터 미끄러지지 않게 하였으며, 프리프레그 플라이 사이의 상대운동을 억제하기 위해 적층된 프리프레그의 네 모서리 부분을 에폭시 접착제로 접착하였다. 프리프레그의 전단변형 중 발생하는 하중과 전단각의 관계는 Fig. 3과 같으며 프리프레그와 사진틀 지그사이의 미끄러짐 현상은 발생하지 않았다. 전단변형된 프리프레그 적층판을 사진틀 지그에서 제거한 뒤, 양면에 필 플라이와 스테인레스 평판을 덧댄 후 오토클레이브 진공백 성형법으로 경화시켰다. 전단변형이 균일한 시편을 만들기 위해 경화시킨 복합재료 적층판의 가운데 부분에서 압축 실험을 위한 시편을 Fig. 2(b)와 같이 절취하였으며, 압축시편의 형태는 Fig. 1(d)와 같다. 최종적으로 전단각이 16°, 26°, 34°, 46°인 복합재료 적층판([±37]_{10T}, [±32]_{10T}, [±28]_{10T}, [±22]_{10T})로부터 시편을 절취하였으며, 전단각은 1차적으로 각도기로 토우 사이 각도를 측정하고 시편 사진 촬영 후 AutoCAD로 불러들여서 측정하였다.

3. 압축실험 및 결과

3.1 실험방법

쿠편 형태의 압축시편은 실험 중 좌굴이 발생할 가능성이 크기 때문에 특별한 압축 지그가 필요하다. 본 연구에서는 모든 압축실험을 ASTM D695⁽¹²⁾에 따라 실시하였으며 Fig. 4에서 보이는

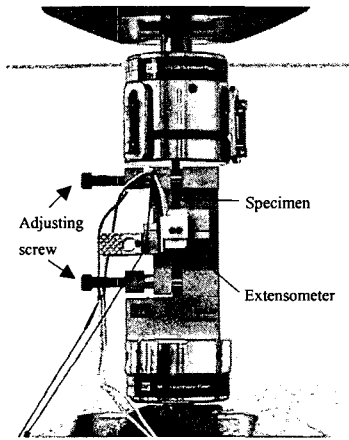


Fig. 4 Anti-buckling compression fixture and averaging axial extensometer

항좌굴(Anti-buckling) 지그를 사용하였다. 이 장치는 상, 하의 평판이 시편을 직접 압축하며, 실험 중에 두께 방향으로의 조임쇠가 시편을 지지하도록 설계되었다. 시편이 지지되지 않는 측정 부분에 변형률 측정기(Extensometer)를 장착하여 압축 변형률을 측정하였다. 사용된 변형률 측정기는 폭 방향으로 4개의 탐침이 있어서 2쌍의 탐침으로 측정된 하중 방향으로의 변형률을 각각 측정하여 산술평균한다. 실험에 사용된 변형률 속도는 1.3mm/min이다.

3.2 편향각을 갖는 시편

서로 다른 편향각을 갖는 시편의 압축실험 결과로부터 압축 특성을 확인하였다. $[0]_{10T}$ 시편의 응력-변형률 관계는 선형성을 나타내나 그 외의 다른 시편은 비선형성을 나타내고 있으며, 모든 압축실험 중 시편의 좌굴은 발생하지 않았다.

압축강도와 코드 계수(Chord modulus : 변형률 0.1~0.3% 구간에서의 Young's modulus)는 각 시편 종류별로 10개씩 실험한 뒤 평균하여 얻었다. 편향각에 따른 시편의 강성은 CLPT (Classical Laminate Plate Theory)⁽¹³⁾로 계산할 수 있으며, 실험값과 계산값을 비교하면 Fig. 5과 같다. CLPT를 이용한 강성 계산의 기준이 되는 0°의 강성은 $[0]_{10T}$ 시편의 압축실험으로 얻은 평균값을 사용하였다. 계산값과 실험값의 최대 오차는 $[15]_{10T}$ 시편에서 7.7%로 대체적으로 계산값과 큰 차이를 보이지 않았다.

편향각을 갖는 직물 복합재료 시편의 압축강도

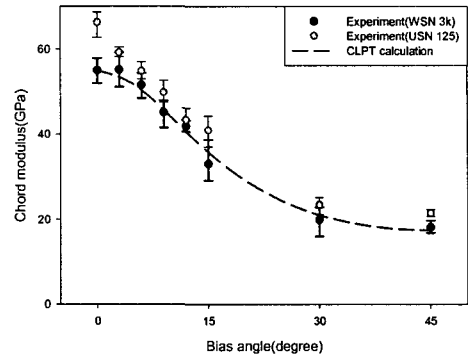


Fig. 5 Chord modulus of bias specimens

를 예측하기 위해 아래 식 (1)에서 보이는 바와 같이 2개의 변수를 선택하였다. 하나는 강성비 (Modulus ratio)로 $\frac{E_\theta}{E_0}$ 는 편향각이 0°에 가까운 시편의 강도가 섬유방향 물성의 영향을 받는 것을 반영하는 것이며, $\frac{E_\theta}{E_{45}}$ 는 편향각이 45°에 가까운 시편의 강도가 재료의 전단 물성의 영향을 받는 것을 반영하는 것이다. 다른 하나는 조화함수(n)로 편향각(θ)의 변화를 강도에 반영하기 위해서이다. 평면 응력 상태에서 Mohr's circle 공식은 각도에 따른 응력의 변환을 의미하는데, 수직응력 (Normal stress)만을 받는 재료의 전단응력은 $\sin 2\theta$ 의 함수이다.⁽¹⁴⁾ 이와 같은 조건들을 고려하여 본 연구에서 제안한 편향각을 갖는 시편의 강도 예측식은 다음과 같다.

$$\sigma_c = \frac{E_\theta}{E_0} S_0 (1-n) + \frac{E_\theta}{E_{45}} S_{45} n^2 \quad (1)$$

여기에서 S_0 와 S_{45} 는 각각 $[0]_{10T}$ 시편의 압축강도와 $[45]_{10T}$ 시편의 압축강도이며, E_0 와 E_{45} 는 각각 $[0]_{10T}$ 시편의 압축강성과 $[45]_{10T}$ 시편의 압축강성이다. E_θ 는 $[\theta]_{10T}$ 시편의 압축강성으로 CLPT로 계산된 값이며, n 은 $\sin 2\theta$ 이다. 식 (1)에서 $\sin 2\theta$ 함수를 사용한 이유는 편향각(θ)을 가지는 압축 시편의 경우 θ 가 0°인 경우를 제외하면 시편이 전단력에 의해 파손되는 것을 고려하기 위함이다.

Fig. 6은 편향각(θ)을 갖는 직물 복합재료의 압축실험으로 얻은 강도와 식 (1)로 계산된 강도를 편향각에 따라 나타낸 것이다. 시편의 편향각이 0°에 가까울수록 섬유 파괴(Fiber failure) 모드가 발생하기 때문에 재료의 강도가 편향각에 따라

급격하게 변화하고 편차도 상대적으로 큰 것을 알 수 있다. 그러나 시편의 편향각이 증가함에 따라 주로 전단 파괴(Shear failure) 모드가 발생하기 때문에 편향각에 따른 강도의 변화와 편차가 상대적으로 적은 것을 관찰할 수 있다.

직조형태(Weave style)가 편향각을 갖는 평직 복합재료 시편의 실험 결과에 미치는 효과를 확인하기 위해, 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그와 동일한 탄소섬유와 에폭시 수지로 구성된 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(USN 125)로 시편을 제작하고 동일한 압축실험을 실시하여 강성과 강도를 비교하였다. 시편은 동일한 적층각을 갖도록 $[\alpha/\alpha-90]_{8T}$ 로 Fig. 1(c)와 같이 제작하였다.

Fig. 7에서 보이는 바와 같이 평직 탄소섬유/에폭시 복합재료는 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료와는 달리 중방향 토우와 횡방향 토우가 같은 비율로 얹혀 있으며, 이러한 구조 때문에 주름각(Crimp angle)을 갖게 된다. Fig. 5, Fig. 6과 같이 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료의 강도와 강성은 모든 평직 탄소섬유/에폭시 복합재료의 실험값보다 크며 편향각이 없는 시편에서 가장 큰 차이를 나타내고 있다. 이것은 평직 복합재료가 일방향 복합재료와 다른 미세 토우 구조를 갖고 있으며, 그 중 주름각이 미소 좌굴 현상을 일으켜 위와 같은 결과를 유발한 것으로 판단된다. 편향각이 상대적으로 큰 시편의 경우 토우방향 압축하중의 감소로 미소 좌굴 현상이 상대적으로 감소하기 때문에 두 재료간 강도 차이가 작아진다.

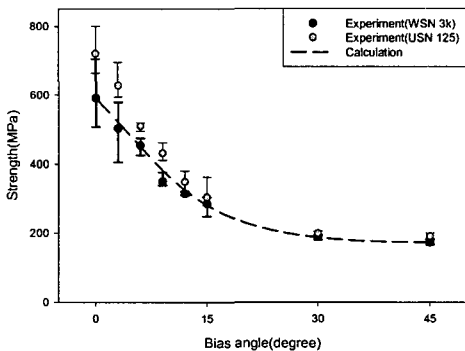


Fig. 6 Compressive strength of bias specimens

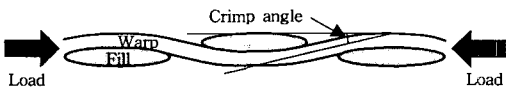


Fig. 7 Tow geometry of the plain weave fabric

3.3 전단각을 갖는 시편

전단각을 갖는 시편의 압축실험을 통해 압축특성을 파악하였다. 모든 시편은 적층각도 $[\pm\beta]_{10T}$ 로 인해 응력-변형을 관계가 비선형성을 나타내며, 전단각이 증가함에 따라 섬유방향성이 하중방향과 이루는 각도가 감소하기 때문에 강도와 강성이 증가하는 경향을 나타내었다. 파괴가 일어나는 변형률은 작은 전단각을 갖는 시편에서 매우 작은 값을 나타냈으며, 전단각이 커져감에 따라 점점 증가하였다.

전단각을 갖는 시편의 강성은 직물 복합재료의 각 방향 토우가 직조되지 않고 차례로 적층되어 있다는 가정하에 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(USN 125)의 섬유방향 강성을 기준으로 CLPT 계산을 수행하여 얻었다. Fig. 8과 같이 CLPT로 계산된 강성은 $[\pm 32]_{10T}$ (26° sheared) 시편에서 실험값과 최대 19%의 오차를 보이고 있다. 전단각에 따른 시편의 강도를 Fig. 9에 나타내었다. 시편의 강도는 하중방향과 섬유방향 사이의 각도가 감소함에 따라 증가하였으며, 전단각도 16° 이후에는 강도가 급격하게 증가하였다.

직조형태가 전단각을 갖는 평직 복합재료 시편의 실험 결과에 미치는 효과를 확인하기 위해서, 동일한 섬유와 수지로 구성된 일방향 탄소섬유/에폭시 프리프레그(USN 125)를 이용하여, 동일한 적층각 $[\pm\beta]_{8T}$ 을 갖는 시편[Fig. 2(d)]을 제작하고 압축실험을 실시하였다. Fig. 8, Fig. 9에서 보이는 바와 같이 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료로 제작된 시편의 강도와 강성은 모든 직물 탄소섬유/에폭시 복합재료의 실험값보다 크며, 이는 직물 복합재료의 미소 구조의 변화에 의해 발생한

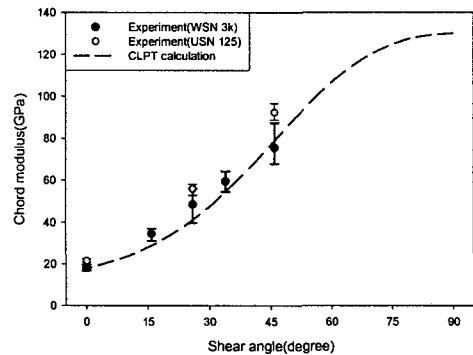


Fig. 8 Chord modulus of sheared specimens

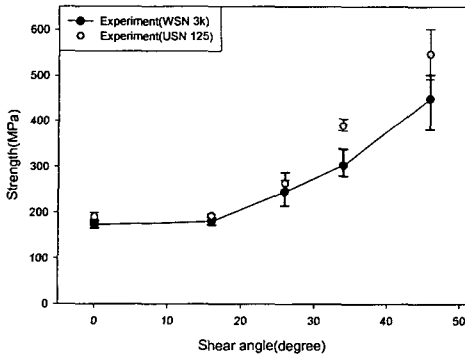


Fig. 9 Compressive strength of sheared specimens

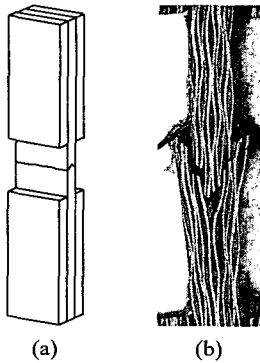


Fig. 10 Failure specimen(plain weave) [0]_{10T};
(a) failure mode, (b) micrograph

것으로 판단된다. 평직 복합재료는 구조상 일정 값 이상의 주름각을 가지게 되고 재료의 압축 거동시 이러한 주름각은 토우 구조의 미소 좌굴 현상을 유발할 수 있으며, 이러한 거동이 재료의 강도와 강성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 현미경 관찰

4.1 편향각을 갖는 시편

Fig. 10과 Fig. 11에서 보이는 바와 같이 편향각을 갖는 시편의 파괴는 두 종류의 파괴 모드를 가짐을 확인하였다. [0]_{10T} 시편의 파괴는 하중방향과 수직으로 파괴가 일어났으며, 이는 종방향 토우의 파괴에 의해 발생하였다. [15]_{10T}, [30]_{10T}, [45]_{10T} 시편은 편향각에 수직인 횡방향 토우를 따라 파괴가 일어났으며, 이는 면내 전단응력 (Inplane shear stress)에 의해 발생한 현상으로 알려져 있다.⁽¹⁵⁾

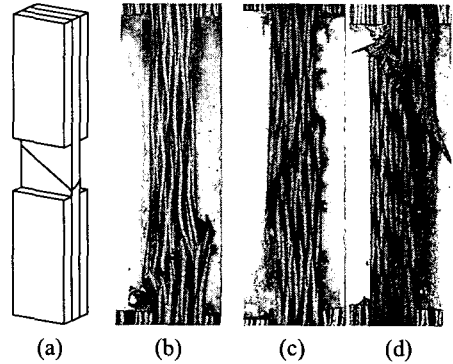


Fig. 11 Failure specimen(plain weave) [α]_{10T}; (a) failure mode, (b) [15]_{10T} micrograph, (c) [30]_{10T} micrograph, (d) [45]_{10T} micrograph

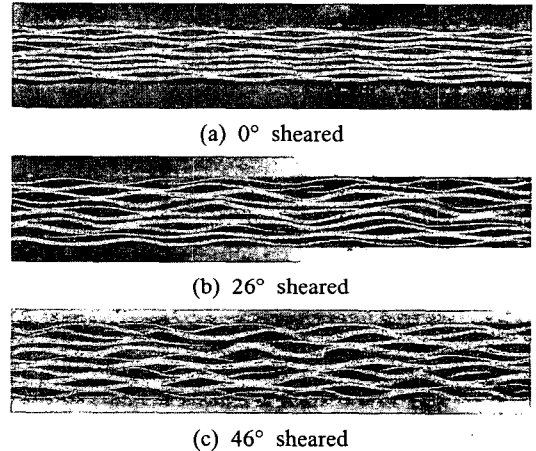


Fig. 12 Micrograph of tow geometry for sheared specimens

[0]_{10T} 시편의 파괴는 전형적인 브루밍 (Brooming) 파괴이며, 이것은 한쪽 파단부분이 다른 쪽 파단부분으로 파괴되는 현상으로 압축실험 중 좌굴이 발생하지 않았다는 증거가 될 수 있다. ASTM D3410에 제시되어 있는 기준으로 파괴 모드를 구분하면, [0]_{10T} 시편은 BGM (Brooming, Gage, Middle)이고 [15]_{10T}, [30]_{10T}, [45]_{10T} 시편은 TGV (Transverse shear, Gage, Various)이다.

4.2 전단각을 갖는 시편

전단각을 갖는 시편은 모두 같은 파괴 모드를 나타내었으며, 면내 전단응력에 의해 종방향 또는 횡방향 토우를 따라 파괴가 발생하였다.

Table 2 Crimp angle of fabric composite with respect to the shear angle

Shear angle[°]	Crimp angle[°]
0	5.7
26	14.0
46	18.8

Fig. 12에서 보이는 바와 같이 전단각을 갖는 시편의 경우 전단각이 증가할수록 주름각이 증가하는 것을 관찰할 수 있으며, 이러한 현상은 Chang⁽¹⁶⁾의 연구에도 잘 나타나있다. 주름각은 전단 변형된 복합재료 적층판을 종방향 또는 횡방향 토우를 따라 절단하여 관찰하였으며, 시편의 현미경 사진(Fig. 12)에서 상, 하의 평평한 면을 기준으로 AutoCAD를 이용하여 측정하였다. 최대 주름각은 무작위로 10개의 위치에서 각도를 측정하여 평균하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

전 절들의 결과에서 평직 복합재료의 직조형태에 의한 복합재료의 압축특성을 비교한 결과 주름각이 0°인 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료의 압축강도와 강성이 편향각 혹은 전단각을 갖는 동일한 조성의 직물 복합재료보다 큰 것을 확인하였으며, 전단각이 증가함에 따라 주름각이 증가하여 동일한 적층각도를 가지는 직물 복합재료와 일방향 복합재료의 압축강도 및 강성의 차이가 증가하는 것을 확인하였다(Fig. 8, Fig. 9 참조). 이러한 결과는 토우의 주름각과 같은 재료의 미세구조가 재료 물성에 어느 정도 영향을 미쳤음을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 직물 탄소섬유/에폭시(평직, 3k) 복합재료의 압축실험을 실시하여 다양한 편향각 및 전단각에 대한 재료의 압축특성에 대해 연구하였다. 다양한 편향각과 전단각을 갖는 시편은 오토클레이브 진공백 성형법으로 성형하였으며, 각도의 변화에 따라 강성과 강도를 평가하기 위해 조건에 맞는 시편을 제작하였다. CLPT와 논문에 제시한 강도 예측 방정식으로 계산한 압축강성과 강도값은 실험값과 작은 차이를 보이며 대체로 잘 일치하였다. 또한 미세 토우 구조 변화에 따른 복합재료의 특성을 비교하기 위해 동

일한 섬유와 수지로 구성된 일방향 탄소섬유/에폭시 복합재료로 시편을 제작하여 압축실험을 수행하였다. 압축실험과 현미경 관찰을 통해 직물 복합재료 시편과 일방향 직물 복합재료 시편의 기계적 특성 차이는 미소 토우 구조의 변화로 유발되는 것을 확인하였다. 현미경 사진 관찰과 해석을 통해 2가지의 파괴 모드를 구별하여 관찰하였으며, 미소 토우 구조의 변화를 측정하여 정량적으로 나타내었다.

후 기

이 논문은 2005년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것이다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Chang, S. H., 2004, "Microscopic Observation of Draped Composite Materials : Bias Extension and Biaxial Tests," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 17, No. 1, pp. 38~46.
- (3) Tan, S. C., 1992, "Stress Analysis and the Testing of Celanese and IITRI Compression Specimens," *Composite Science and Technology*, Vol. 44, No. 1, pp. 57~70.
- (4) Haberle, J. G. and Matthews, F. L., 1993, "The Influence of Test Method on the Compressive Strength of Several Fiber-reinforced Plastics," *Journal of Advanced Materials*, Vol. 25, No. 1, pp. 35~45.
- (5) Fleck, N. A., 1997, "Compressive Failure of Fiber Composites," *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 33, pp. 43~117.
- (6) Naik, N. K., Tiwari, S. I. and Kumar, R. S., 2003, "An Analytical Model for Compressive Strength of Plain Weave Fabric Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 609~625.

- (7) Chung, I. S., 1998, "A Micro-Buckling Analysis for Compressive Strength of Composite Materials," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 11, No. 3, pp. 15~23.
- (8) Byun, J. H., 1997, "Prediction of Engineering Constants for Plain and 8-Harness Satin Woven Composites," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 21, No. 11, pp. 1757~1764.
- (9) Fleck, N. A. and Sridhar, I., 2002, "End Compression of Sandwich Columns," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 33, pp. 353~359.
- (10) Chun, H. J., 1998, "Effects of Fiber Waviness on Tensile/Compressive Behaviors of Composite Materials," *Proceedings of the KSME 1998 Fall Annual Meeting A*, pp. 517~522.
- (11) ASTM D 3410/3410M - 03, "Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading."
- (12) ASTM D 695 - 02a, "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics."
- (13) Gibson, R. F., 1994, "Principles of composite material mechanics," McGraw-Hill, New York, pp. 190~269.
- (14) Gere, J. M. and Timoshenko, S. S., 1997, "Mechanics of Materials," PWS Publishing Company, Boston, Fourth edition, pp. 492~507.
- (15) Shuart, M. J., 1989, "Failure of Compression-loaded Multidirectional Composite Laminates," *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 9, pp. 1274~1279.
- (16) 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.