

< 논문 >

직물 복합재료 계란판의 압축 특성과 에너지 흡수율

정지규* · 장승환†

(2006년 6월 12일 접수, 2006년 10월 11일 심사완료)

Compression Characteristics and Energy Absorption of Composite Egg-Box Panels

Jee-Gyu Chung and Seung-Hwan Chang

Key Words: Egg-Box Panel(계란판), Fabric Composites(직물 복합재료), Energy Absorption(에너지 흡수율)

Abstract

In this paper compressive characteristics of composite egg-box panels were investigated and energy absorption was calculated from the nominal stress-strain relations obtained by the compressive tests. Several different stacking sequences and number of plies were introduced for investigation of static compression characteristics and the energy absorption rates of composite egg-box panels. The compressive stress-strain relation and energy absorption of various composite egg-box panels were compared with those of aluminium egg-box panels. From the test results it was found that the fracture behavior of composite egg-box panel was affected by stacking angle causing different local deformation, during lay-up and draping processes and types of prepreg; that is, plain weave carbon/epoxy and 4-harness satin glass/epoxy. The energy absorption capacity of composite egg-box panels were proved to be higher than that of aluminium egg-box panels with low mass

1. 서론

섬유강화 복합재료는 금속재료에 비해서 뛰어난 비강성, 비강도에 기인하여 자동차, 선박 및 항공 산업에 널리 이용되고 있다. 특히, 직물 복합재료는 특유의 유연성으로 인해 복잡한 3D 형상의 구조물에 적용하기가 용이하다. 이러한 복잡한 형상의 구조물에 직물 복합재료를 적용할 경우 구조물의 기하학적 형상으로 인해 재료의 전단변형과 미세 토우의 변형을 수반하게 되며, 이러한 변형은 재료의 물성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 김성집 등⁽²⁾은 평직 탄소섬

유/에폭시 직물 복합재료를 이용하여 직물의 전단각과 편향각에 따른 압축실험을 실시하여, 직물 복합재료의 미세토우 구조의 변화가 강성과 강도에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

등방성 재료로 제작된 복잡한 형상의 성형물에 대한 압축특성은 몇몇 연구자에 의해서 수행되었다. Deshpande 등⁽³⁾은 알루미늄 계란판의 압축 붕괴 메커니즘을 규명하고 에너지 흡수율을 최대화할 수 있는 형상을 제안하였다. Zupan 등⁽⁴⁾은 형상 정보가 서로 다른 알루미늄 계란판을 이용하여 비밀도(Relative density)와 구속조건에 따른 에너지 흡수율을 비교하고 계란판의 붕괴 거동과 측면(Side wall) 좌굴과의 관계를 실험과 유한요소 해석을 통해서 규명하였다. El-Sobky 등⁽⁵⁾은 알루미늄 원뿔대(Frusta)가 축방향 압축하중을 받을 때 단면형상 구속조건에 따른 경사면에서의 응력 분포를 분석하여 작은 지름을 갖는 상부에서 좌굴

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부
E-mail : phigs4@cau.ac.kr
TEL : (02)820-5354 FAX : (02)814-9476

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

이 가장 먼저 발생하게 된다는 것을 밝혀내었다. 한편 직물 복합재료로 성형된 구조물에 대한 연구로는 직조 유리섬유와 편직(Knitted) 유리섬유 복합재료 반구 성형물이 압축평판에 의해 압축될 때 접촉부위에서 발생하는 좌굴의 형태를 직조형태, 적층수, 적층각도와 같은 변수와 관련시켜 분석한 연구들과^(6,7) 다수의 원뿔대 형상의 복합재료 성형물을 이용하여 섬유의 직조 형태에 따른 에너지 흡수율을 비교한 연구 등⁽⁸⁾ 비교적 단순한 형태의 구조물에 대해서 연구가 진행되었다. 본 논문에서는 Zupan⁽⁴⁾의 연구에서 사용된 알루미늄 계란판과 동일한 형상의 직물 복합재료 계란판을 이용하여 재료의 물성, 적층수, 적층순서 등을 조절하여 각각의 압축 특성과 에너지 흡수율을 비교하였다.

2. 시 편

2.1 실리콘 금형

Fig. 1은 본 연구에서 실험한 복합재료 계란판 구조의 3차원 형상이다. 금형의 원형이 되는 알루미늄 계란판 형상 위에 액상 실리콘(Shinetsu, KE-1300)을 부어 상·하부 금형을 성형하였으며, 실리콘 금형은 성형될 직물 복합재료 계란판의 최종 크기 (180×125mm)보다 약 10mm의 여유를 둔 상태로 성형한 후 천장(Truncated top)과 바닥(Truncated bottom)이 시편의 최종 크기 내에서 균일하게 분포할 수 있도록 절취하였다.

2.2 재료 및 시편 성형

복합재료 계란판 시편은 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그 (SK, WSN3k)와 4매 주자적 유리섬유/에폭시 프리프레그 (SK, GEP224)의 두 가지 서로 다른 직물 복합재료를 사용하여 성형하였다. 각 복합재료의 물성은 Table 1에 나열하였다.

직물 복합재료의 종류, 적층수, 적층순서를 조절하여 다양한 직물 복합재료 계란판 압축시편을 성형하였다. 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그만으로 성형된 직물 복합재료 계란판의 적층순서는 $[0]_{nT}$ 와 $[45]_{nT}$ ($n=1, 2, 3, 4$)이며, 4매 주자적 유리섬유/에폭시 프리프레그만으로 성형된 직물 복합재료 계란판의 적층순서는 $[0]_{nT}$, $[45]_{nT}$ ($n=1, 2, 3, 4$), $[0/90]_s$, $[\pm 45]_s$ 로 다양하게 준비하여 중방향과

횡방향의 서로 다른 물성에 대한 변형 거동상의 차이를 확인하고자 하였다. 제작된 시편의 종류를 Table 2에 정리하였다.

복합재료 시편은 실리콘 고무 하부 금형에 직물 복합재료를 드레이핑 한 후 상부 금형을 체결하여 진공백으로 감싼 후 오토클레이브 진공백 성형 방법으로 성형하였으며, 성형 중 절대압력 0.1MPa (진공성형)과 125℃ 성형온도를 부가하였다. 성형결과 $[0]_{nT}$ 시편은 주름이 발생하지 않았으나 $[45]_{nT}$ 시편은 골과 언덕부분에 주름이 발생하였다(Fig. 2).

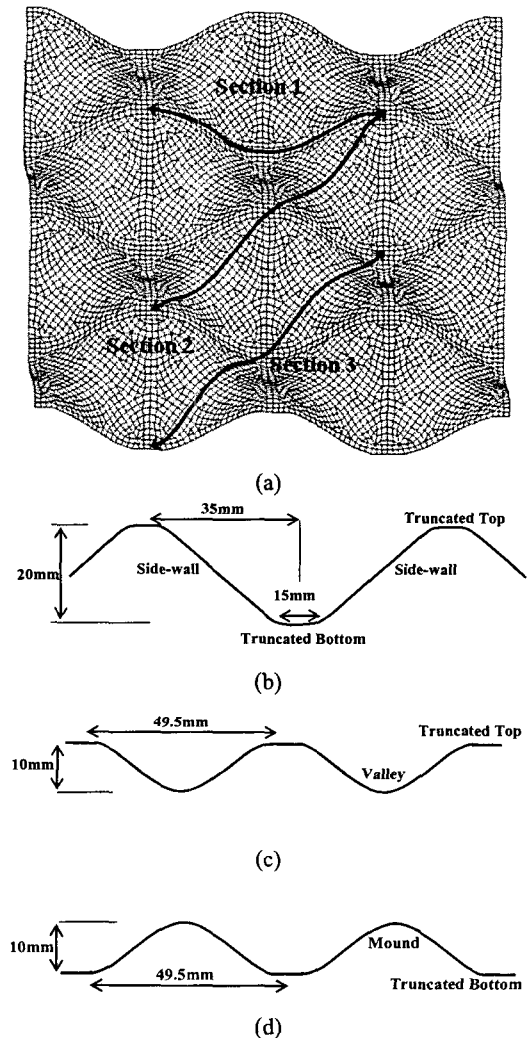


Fig. 1 The geometry of egg-box panel; (a) The whole view (b) Section 1 (c) Section 2 (d) Section 3

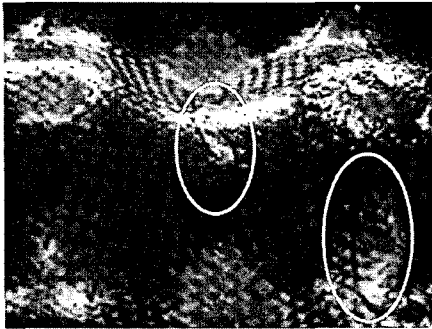


Fig. 2 Wrinkle generation in [45]_{nT} specimen

Table 1 Material properties

	E_{tL} [GPa]	E_{tT} [GPa]	E_{cL} [GPa]	E_{cT} [GPa]	σ_c [MPa]	ρ [kg/m ³]	Ply Thickness [mm]	Cost [W/m ²]
WSN3k (plain weave)	70	70	55	55	591	1480	0.22	32,800
GEP224 (4-harness satin)	40	16	38	16	692	1830	0.26	3,100

※ E_c : Compressive modulus, E_t : Tensile modulus
 σ_c : Compressive strength

Table 2 Stacking sequences of specimens

	[0] _{nT} (n=1,2,3,4)	[45] _{nT} (n=1,2,3,4)	-	-
WSN3k (Plain weave)				
GEP224 (4-harness satin)			[0/90] _s	[±45] _s

3. 압축 실험

다양한 적층패턴을 가지는 복합재료 계란판 시편에 대해서 평면 수직방향(Out-of-plane)으로의 압축실험을 실시하였다. 계란판의 균일한 압축을 위해 두 개의 두꺼운 강철 평판(200×150mm) 사이에 시편을 장착한 후 만능시험기(MTS810, USA)를 이용하여 2mm/min의 속도로 압축하였다. 시편과 강철 평판의 경계조건은 단순 접촉조건이므로 시편이 압축되는 동안 평면방향으로 상대운동이 발생할 수 있다. 압축실험의 결과는 시편의 수직방향 변형률을 압축 전 시편의 높이로 나눈 공칭 변형률(Nominal strain)과 하중을 압축방향으로 사상된 시편의 면적(180×125mm²)으로 나눈 공칭응력(Nominal stress)을 사용하여 표시하였다.

3.1 평직 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료

적층순서가 [0]_{nT}, [45]_{nT} (n=1, 2, 3, 4)인 평직

탄소섬유/에폭시 복합재료 시편에 대해 각각 2회씩 압축실험을 실시하였다. 실험결과 Fig. 3에서 보는 바와 같이 [0]_{nT}로 적층된 시편과 [45]_{nT}로 적층된 시편은 유사한 최대압축응력을 나타냈으나 1플라이로 적층된 시편을 제외하면 [45]_{nT} (n=2, 3, 4) 시편의 경우 최대압축응력이 [0]_{nT} 시편에 비해 낮은 변형률(0.3< ϵ <0.4)에서 발생한 후 응력이 감소하였으며, 적층수가 증가함에 따라 최대응력이후 하중은 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 반면, [0]_{nT}(n=2, 3, 4)로 적층된 시편의 경우 낮은 변형률($\epsilon \approx 0.3$)에서 1차 응력 피크를 보인 후 하중의 증가율이 감소하였으며, 공칭 변형률 0.6 부근에서 최대 응력을 가진 후 점차 감소하였다. 이러한 거동상의 차이는 서로 다른 적층 각도를 가진 시편의 드레이핑 공정 중 발생하는 프리프레그의 상이한 국부적 적층각도와 전단변형의 영향으로 판단된다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 초기 압축 거동 ($\epsilon < 0.3$)에 큰 영향을 미치는 경사부 (Side-wall, Fig. 1 (b))의 적층각도를 비교하면 [0]_{nT}로 적층된 시편은 45°이며 드레이핑 거동으로 인해 18°의 전단각이 발생하여 결과적으로 [±36]_{nT}의 적층각도를 가진다. 반면 [45]_{nT}로 적층된 시편의 경우 경사부의 적층각도는 0°이며 약간의 편향각 ($\approx 2^\circ$)이 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 적층각도의 차이로 인해 저 변형률 구간 ($\epsilon < 0.3$)에서 [0]_{nT}로 적층된 시편의 구조 강성이 [45]_{nT}로 적층된 시편의 구조 강성보다 다소 낮은 것을 알 수 있으며, 이는 해당 변형구간에서 가장 큰 영향을 미치는 경사부의 적층각도 (Fig. 4)와 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다. 한편, 높은 변형률 구간 ($\epsilon > 0.5$)에서 상대적으로 큰 영향을 미치는 골(Valley)과 언덕(Mound)부분(Section 2, 3)은 경사부와 45°차이를 가지게 되며, 드레이핑 공정 중 경사부에서와 마찬가지로 재료 내부에서 전단각과 편향각이 발생한다. [0]_{nT}로 적층된 시편의 경우 골과 언덕부분(Section 2, 3) 적층각도는 0°이다. 반면, [45]_{nT}로 적층된 시편의 골과 언덕부분 적층각도는 45°이며, 드레이핑 거동에 의해 14°의 전단각이 발생하여 최종적으로 [±38]_{nT}의 적층각도를 가지게 된다. [0]_{nT} 시편의 경우 0.5 변형률부터 골과 언덕 부분이 강철 압축판과 접촉하면서 재료 내부에 평면 응력을 증가시키게 되어 곡선 방향을 따라 (Section 2, 3) 0°의 적층각을 갖는 [0]_{nT} 시편이

$[\pm 38]_{nT}$ 의 적층각을 가지는 $[45]_{nT}$ 시편에 비해 큰 하중을 지지할 수 있게 된다. 따라서 $[0]_{nT}$ 시편은 0.5의 변형을 이후에 2차 응력피크를 가지게 되는 것으로 판단된다(Fig. 4 참조).

반면, $[45]_{nT}$ 시편은 골과 언덕부분의 낮은 강성에 기인하여 시편의 강성에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다. 이와 같이 국부적으로 상이한 적층각과 전단변형량은 시편의 압축 거동 시 재료 내부에 서로 다른 응력을 발생시키는 것으로 판단되며, 그 결과 응력-변형률 선도가 Fig. 3와 같은 차이를 야기한 것으로 판단된다.

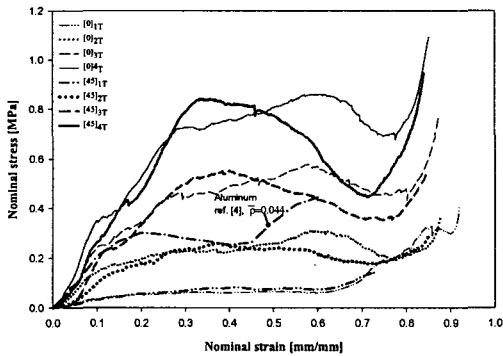
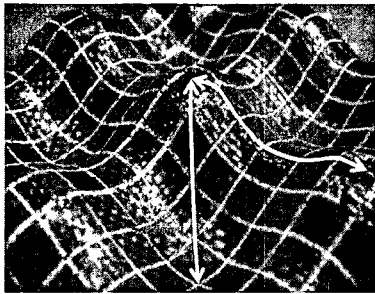
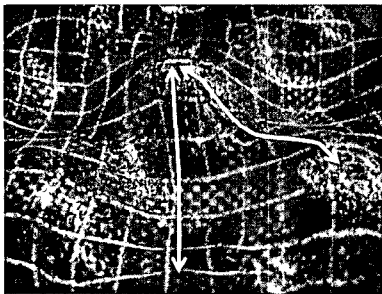


Fig. 3 Nominal stress-strain curve (Carbon / Epoxy)



(a)

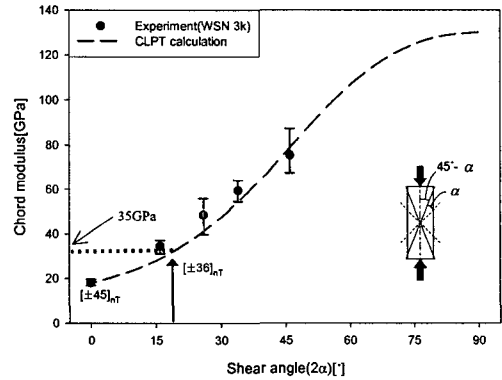


(b)

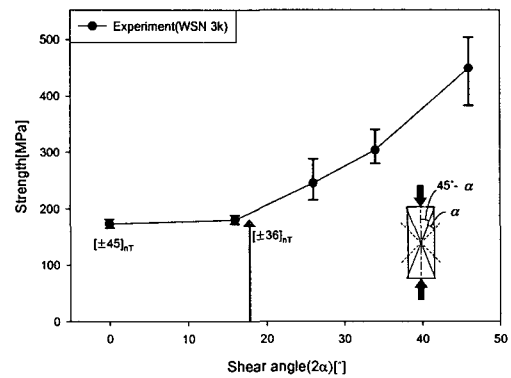
Fig. 4 Shear deformation of prepreg during draping process ; (a) $[0]_{nT}$ (b) $[45]_{nT}$

Fig. 5에 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료의 전단각에 따른 압축강성과 강도의 변화를 실험적으로 구하여 제시하였다.⁽²⁾ 전단각이 0° 일 때 시편의 적층순서는 하중 방향을 기준으로 $[\pm 45]_{nT}$ 이며, 전단각이 45° 일 때 시편의 적층순서는 $[\pm 22.5]_{nT}$ 이다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료는 전단각에 따라 재료의 강성과 강도가 변화함을 알 수 있었으며, 전단각에 따른 재료의 적층각도와 하중 방향과의 관계가 재료의 파괴거동에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

이상에서 설명한 바와 같이 계란판과 같은 복잡한 형상 위로 드레이핑 된 구조는 국부적 위치에 따라 서로 다른 편향각 및 전단각을 가지게 되므로 서로 다른 방향($[0]_{nT}$, $[45]_{nT}$)으로 적층된 복합재료 계란판의 압축거동에 차이를 유발하게 된다.

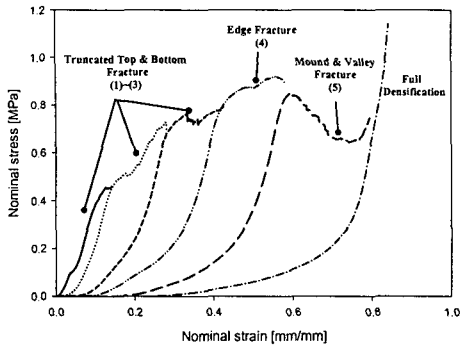


(a) Compressive modulus

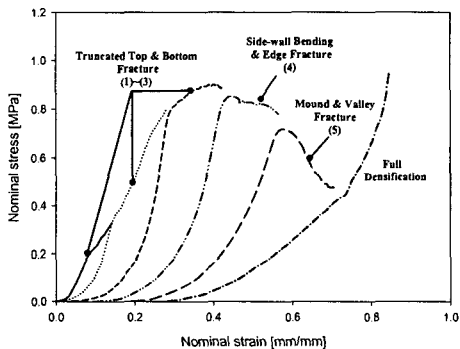


(b) Compressive strength

Fig. 5 Compressive characteristics of sheared carbon/epoxy fabrics



(a)



(b)

Fig. 6 Multiply interrupted compressive tests; (a) Carbon/Epoxy [0]_{4T} (b) Carbon/Epoxy [45]_{4T}

시편이 평면 수직방향으로의 압축력을 받을 때 변위 증가에 따른 국부적인 파괴위치와 형상을 확인하기 위해 탄소섬유/에폭시 복합재료 [0]_{4T}와 [45]_{4T}시편에 대해 3mm의 변위 간격마다 파괴 형상과 균열의 진전 및 파괴 부위를 확인하였다 (Fig. 6, 7).

Fig. 7에서 보는 바와 같이 (1)~(3)단계 (0~9 mm) 압축 과정에서 강철 압축판과 접촉하는 천장과 바닥의 원형 경계부에서 단계적으로 균열이 발생하여 하중이 증가함에 따라 파괴가 진전하였다. 이러한 원형 파괴 현상은 압축과정 중 시편과 강철 압축판과의 직접 접촉에 기인한 응력 집중의 영향으로 판단된다. 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료를 [0]_{4T}로 적층한 시편의 경우 추가적인 변위는 시편을 더욱 압축하게 되지만 1차 파괴가 발생한 시편의 강성은 감소함을 알 수 있다 (0.3 < ϵ < 0.5). 즉, Fig. 6에서 보는 바와 같이 (3)~(4) 단계사이의 응력 기울기가 (1)~(3)단계 사이의 응력 기울기보다 작아짐을 알 수 있다[Fig. 6 (a)].

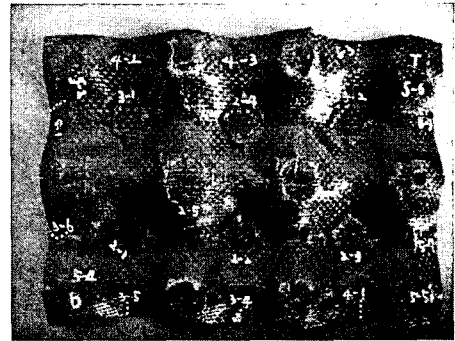


Fig. 7 Fractured specimen

이 변형구간에서 경사부는 굽힘에 의한 좌굴이 발생하는 것으로 판단된다. [45]_{4T}로 적층된 시편 [Fig. 6 (b)]은 (1)~(3)단계까지는 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료를 [0]_{4T}로 적층한 시편과 유사한 파괴 거동을 보이지만 0.3 < ϵ < 0.4에서 최대압축응력을 보이고 급격하게 감소하는 거동을 보였다.

탄소섬유/에폭시 직물 복합재료를 [0]_{4T}로 적층한 시편은 수직 방향 변위가 증가함에 따라 시편의 경사면 부분은 좌굴에 의해 굽힘 거동을 하게 되고 공칭 변형을 0.5부근에서 골과 언덕 부분과 강철 압축판이 접촉한 후 추가적인 변위에 따라 최대 압축하중에 이르게 되며 [(4)단계], 시편 가장자리 (Edge)가 파괴된 후 하중이 감소한다 [(5)단계]. 그러나 언덕·골 부분의 전체적인 파괴는 발생하지 않았고 가장자리 근처의 언덕·골 부분만 파괴되었다. 반면, [45]_{4T}로 적층한 직물 복합재료 계란판은 초기 변형에 큰 영향을 미치는 경사면의 평면방향 강성이 [0]_{4T} 시편에 비해 약 1.6 배 높기 때문에[Fig. 5 (a), Table 1] (3)단계까지 응력이 증가한 후 (4)단계 변형구간에서 경사부의 급격한 좌굴과 낮은 언덕·골 강성에 의한 하중 지지능력 부족 및 시편 가장자리와 언덕·골 부분의 주름부분(Fig. 2)에서 파괴가 일어나 응력이 감소한 후 (5)단계에서 전반적인 골과 언덕 부분의 파괴가 발생하여 급격한 응력 감소를 나타내었다.

3.2 4매 주자직 유리섬유/에폭시 직물 복합재료 복합재료 계란판의 특정 부위의 적층각도에 따른 재료 내 응력 분포와 파괴거동을 확인하기 위해 직교하는 두 방향의 기계적 물성이 서로 다른 유리섬유/에폭시 직물 복합재료 (4매 주자직)를 사용하여 계란판 시편을 제작하고 압축실험을 실

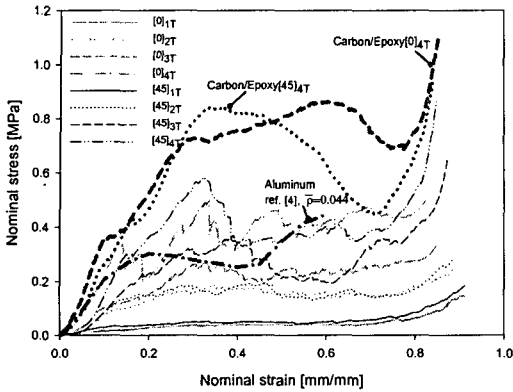


Fig. 8 Nominal stress-strain curve (Glass/Epoxy)

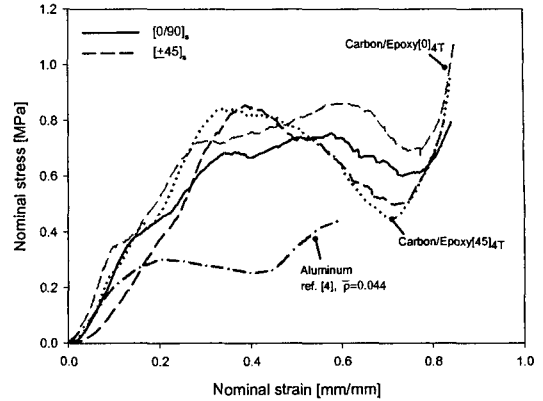


Fig. 9 Nominal stress-strain curve (Symmetrically stacked Glass/Epoxy)

시하였다. 평직 탄소섬유/에폭시 프리프레그와 동일한 방법으로 $[0]_{nT}$ 와 $[45]_{nT}$ ($n=1, 2, 3, 4$)로 적층된 시편을 각각 2회씩 압축실험을 실시하였으며, 직교 대칭적층하여 양방향 물성을 동일하게 조정된 $[0/90]_s$ 와 $[\pm 45]_s$ 를 추가적으로 실험하여 Fig. 8과 9에서 보이는 바와 같이 압축실험 결과를 비교하였다. 유리섬유/에폭시 복합재료 계란판의 파괴 형상은 낮은 강성 및 강도를 가지는 횡방향 토우의 파괴에 의해 종방향으로 균열이 진전하여 일직선으로 찢어짐(Splitting)이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며(Fig. 10 참조), 적층각도에 상관없이 횡방향 토우의 파괴가 발생하였다. 유리섬유/에폭시 직물 복합재료 계란판의 경우 천장 및 바닥의 원형 경계부에서의 파괴가 관찰되지 않았으며, 이는 압축하중이 원형경계부에 유발하는 응력 집중현상에 의한 파괴 발생 전에 재료의 낮은 횡방향 강도에 의한 찢어짐 현상 때문으로 판단된다. 찢어짐이 발생한 부분 이외에는 주목할 만한 재료의 파손이 관찰되지 않았다.

서로 다른 적층 각도로 드레이핑 된 유리섬유/에폭시 직물 복합재료의 상이한 응력-변형률 관계 및 파괴거동은 압축 거동시 재료 내부에 발생하는 하중 방향과 토우 방향과의 관계에 밀접한 영향을 받는 것으로 판단된다. 이러한 이유로 인해 $[45]_{nT}$ ($n=3, 4$)로 적층된 시편이 $[0]_{nT}$ ($n=3, 4$)로 적층된 시편에 비해서 높은 최대압축응력을 가졌으며, 적층수가 증가할수록 취성 파괴경향이 더 크게 나타났다. 얇은 적층판 ($n=1, 2$)의 경우 구조의 강성이 매우 낮아 두 적층각도에 따른 차이가 거의 발생하지 않았다. 또한 유리섬유/에폭시 직물 복합재료를 $[0]_{4T}$ 와 $[45]_{4T}$ 로 적층한 계란

판의 최대압축응력은 재료의 낮은 압축강도로 인해 $[0]_{4T}$ 로 적층된 평직 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료 계란판 값의 각각 58.1%, 69.2%의 값을 가짐을 확인하였다. 그러나 상대적으로 두꺼운 (36g for $n=3$, 50g for $n=4$) 시편의 경우 Zupan⁽⁴⁾의 연구에서 사용된 동일 경계조건을 가진 알루미늄 계란판(59g)에 비해 유사하거나 높은 응력을 가짐을 알 수 있었다.

일방향 적층각 $[0]_{nT}$ 와 $[45]_{nT}$ 를 가진 유리섬유/에폭시 직물 복합재료의 압축 시 찢어짐에 의한 낮은 파괴 응력을 보완하기 위해 프리프레그를 직교 대칭 적층하여 압축실험을 위한 시편을 제작하였다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 $[0/90]_s$ 로 적층된 유리섬유/에폭시 직물 복합재료의 공칭응력-변형률 관계는 $[0]_{4T}$ 로 적층된 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료 시편의 공칭응력-변형률 관계와 비슷한 거동을 보였으며 $[\pm 45]_s$ 로 적층된 유리섬유/에폭시 직물 복합재료의 공칭응력-변형률 관계 또한 $[45]_{4T}$ 로 적층된 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료 시편의 관계와 유사한 거동을 보임을 알 수 있었다. 이러한 거동은 유리섬유/에폭시 직물 복합재료의 종방향과 횡방향의 서로 다른 강도의 차이를 상쇄시켜 재료의 특성이 평직구조와 유사해진 결과로 설명할 수 있다. 또한 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료 시편에서 나타난 $[0]_{nT}$ 와 $[45]_{nT}$ 의 응력-변형률 거동의 차이를 그대로 유지하는 변형거동은 계란판 형상 위로 드레이핑 된 성형물 내에 발생한 하중과 섬유 방향의 편향각 및 전단각을 포함한 적층 각도와와의 관계에 의한 것임을 설명해 준다.

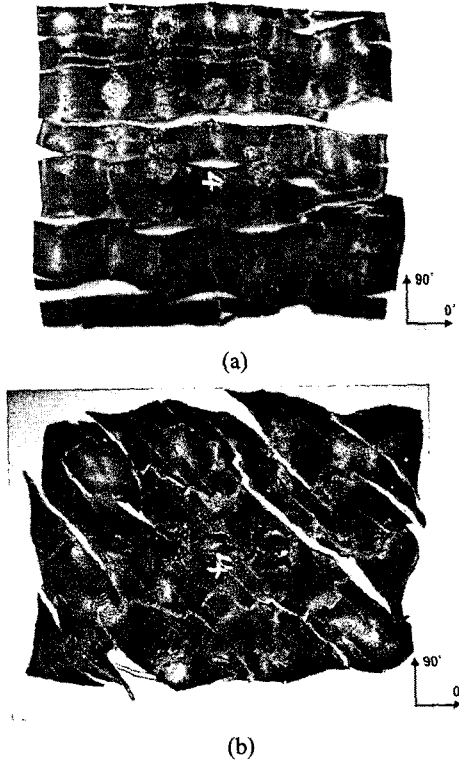


Fig. 10 Specimen splitting; (a) [0]_{4T} (b) [45]_{4T}

4. 에너지 흡수율

다양한 종류의 복합재료 계란판 시편에 대한 공칭응력-변형률 곡선을 적분하여 단위 부피당 에너지 흡수율 (\mathcal{E}_v ; J/m³)을 계산하였으며, 비밀도 (Relative density)를 이용한 다음의 식 (1)을 이용하여 단위 질량당 에너지 흡수율 (\mathcal{E}_m ; J/kg)을 계산하였다 (Table 3). Zupan⁽⁴⁾이 실험한 알루미늄 계란판 실험결과와 비교하기 위해서 0.6 공칭변형률까지의 에너지 흡수율을 계산하였다.

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_v / \bar{\rho} \quad (1)$$

\mathcal{E}_m = 단위 질량당 에너지 흡수율

\mathcal{E}_v = 단위 부피당 에너지 흡수율

ρ = 재료의 밀도

$\bar{\rho}$ = 시편의 비밀도 (Relative density)

Table 3 Energy absorption ($\epsilon \leq 0.6$)

	Stacking Sequences	$\bar{\rho}$	Mass [g]	\mathcal{E}_m [kJ/kg]
WSN 3k	[0] _{1T}	0.013	9	1.596
	[45] _{1T}			1.705
	[0] _{2T}	0.026	18	3.016
	[45] _{2T}			3.068
	[0] _{3T}	0.038	27	4.079
	[45] _{3T}			3.982
	[0] _{4T}	0.051	36	4.677
	[45] _{4T}			4.551
GEP 224	[0] _{1T}	0.015	13	0.656
	[45] _{1T}			0.813
	[0] _{2T}	0.031	27	1.372
	[45] _{2T}			1.403
	[0] _{3T}	0.042	36	1.382
	[45] _{3T}			1.597
	[0] _{4T}	0.054	50	1.961
	[45] _{4T}			1.969
	[0/90] _s			3.518
[±45] _s	3.379			
Al.	-	0.028	37	1.141
	-	0.035	48	1.212
Ref. [4]	-	0.044	59	1.443

시편의 비밀도 ($\bar{\rho}$)는 복합재료 계란판의 질량을 시편의 외곽선을 잇는 직육면체 형상을 갖는 동일 재료의 질량으로 나눈 값으로 정의하였다. 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료 계란판의 경우 [0]_{nT}로 적층된 시편이 [45]_{nT} (n=3, 4)로 적층된 시편의 에너지 흡수율보다 높았으나 유리섬유/에폭시 직물 복합재료 계란판의 경우 [0]_{nT}로 적층된 시편의 에너지 흡수율이 [45]_{nT} (n=1, 2, 3, 4)로 적층된 시편의 에너지 흡수율 보다 낮은 경향을 나타내었다. 탄소섬유/에폭시 계란판은 적층수가 증가함에 따라 에너지 흡수율이 거의 선형적으로 증가하였으나 단순 적층된 유리섬유/에폭시 계란판의 경우 압축시 찢어짐 거동으로 인해 적층수가 증가하여도 에너지 흡수율이 주목할 만한 수준으로 증가하지 않았다. 실험에 사용된 복합재료 계란판의 단위 질량당 에너지 흡수율을 Zupan⁽⁴⁾의 연구에서 사용된 알루미늄 계란판 중 동일한 경계조건(비구속조건)에서 가장 높은 비밀도를 갖는 시편(59g, $\bar{\rho}=0.044$)과 비교하였다. 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료를 [0]_{4T}로 적층한 계란판(36g, $\bar{\rho}=0.051$)의 경우 단위 질량당 에너지 흡수율이 최대 3.3배 높았으며, 유리섬유/에폭시 직물 복합재료를 [0]_{4T}와 [45]_{4T}로 적층한 계란판 (50g, $\bar{\rho}=0.054$)의 경우 약 1.4배, [0/90]_s과 [±45]_s로 적층 대칭 적층한 계란판은 약 2.6배 높은 값을 나타

내었다(Table 3). $[0]_{nr}$ 와 $[45]_{nr}$ 로 적층된 유리섬유/에폭시 계란판의 경우 찢어짐 거동으로 인해서 전반적으로 낮은 단위 질량당 에너지 흡수율을 보였으나, 찢어짐을 억제하기 위해 대칭으로 적층된 시편의 경우 에너지 흡수율이 단순 적층된 시편에 비해 약 80%정도 증가하는 것을 확인하였다. 단순 적층된 유리섬유/에폭시 복합재료 계란판의 경우 찢어짐이 발생한 부분 이외의 부분에서는 주목할 만한 파괴가 발생하지 않아 에너지 흡수율이 작은 것으로 판단된다.

5. 결론

서로 다른 직조 구조와 기계적 물성을 갖는 직물 복합재료로 계란판을 성형하여 구조의 압축거동을 관찰하였다. 탄소섬유/에폭시 복합재료를 $[0]_{nr}$ 와 $[45]_{nr}$ 로 적층한 시편은 서로 유사한 최대 압축응력을 보였으나, 국부적인 적층각도의 차이로 인해 서로 다른 변형을 구간에서 최대압축응력을 보였다. 이러한 서로 다른 압축거동은 단축적 등변위 압축실험을 통해 점진적인 변형에 따른 압축력 지지 부위를 관찰하여 확인하였다. $[0]_{nr}$ 와 $[45]_{nr}$ 로 적층한 유리섬유/에폭시 복합재료의 시편은 낮은 횡방향 토우 강도로 인한 찢어짐 현상으로 낮은 파괴응력을 보였으나 이러한 찢어짐 현상을 보완하기 위해 $[0/90]_s$ 과 $[\pm 45]_s$ 으로 적층된 시편은 탄소섬유/에폭시 복합재료 $[0]_{4r}$ 와 $[45]_{4r}$ 시편과 유사한 응력-변형을 관계를 가짐을 확인하였다.

직물 복합재료 계란판의 에너지 흡수율을 가장 큰 질량을 가지는 알루미늄 계란판(59g, $\bar{\rho}=0.044$)과 비교하였을 때 탄소섬유/에폭시 계란판의 경우 모든 시편($[0]_{nr}$, $[45]_{nr}$)이 알루미늄 계란판에 비해서 높은 값을 나타냈으며, 유리섬유/에폭시 계란판은 단순 적층된 시편은 찢어짐 거동으로 인해 3장 이상 적층된 시편부터 높은 에너지 흡수율을 보였다. 또한 유리섬유/에폭시 직물 복합재료를 대칭으로 적층한 계란판은 찢어짐 거동을 효과적으로 억제하여 단순 적층된 시편대비 180%의 에너지 흡수율을 보이고, 탄소섬유/에폭시 직물 복합재료 계란판의 75%정도의 단위 질량당 에너지 흡수율을 보였다. 탄소섬유 복합재료가 유리섬유 복합재료에 비해 재료 가격이 약 10배 비싼 것을 고려하면 항공기 동체와 같이 경량이면서 높은 에너지 흡수율을 필요로 하는 고효율 분야에서는 탄소섬유/에폭시 계란판 구조물이 효과적인 것이며, 선박과 같이 구조의 중량이

시스템 성능에 민감한 영향을 미치지 않는 대상 중 높은 에너지 흡수율을 필요로 하는 분야에서는 비교적 저가의 유리섬유/에폭시 프리프레그를 대칭으로 적층한 계란판 구조물이 적절하다고 판단된다. 직물 유리섬유로 여러장을 대칭으로 적층하여 사용할수록 에너지 흡수율 또한 높아지는 것을 확인할 수 있었기 때문에 위와 같은 실용화 측면에서도 충분한 적용 가능성이 있다고 판단된다.

후기

이 논문은 2006년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

- (1) Chang, S. H., 2003, "Microscopic Investigation on the Micro-Deformation of Draped Helmet Structure Made of fabric Composite," *Journal of KSCM*, Vol. 16, No.4, pp. 29~35.
- (2) Kim, S. J., Chang, S. H., 2006, "The Effect of Bias and Shear angles on Compressive Characteristics of Carbon/Epoxy Plain Weave Fabrics," *Trans. of KSME A*, Vol. 30, No.7 accepted for publication.
- (3) Deshpande, V. S., Fleck, N. A., 2003, "Energy Absorption of Egg-Box Material," *Journal of the Mechanics and physics of solids*, Vol. 51, pp. 187~208.
- (4) Zupan, M., Chen, C., Fleck, N.A., 2003, "The Plastic Collapse and Energy Absorption Capacity of Egg-Box Panels," *Mechanical Science*, Vol. 45, pp. 851~871.
- (5) El-Sobky, H., Singace, A. A., 1999, "An Experiment on Elastically Compressed Frusta," *Thin-Walled Structures*, Vol. 33, pp. 231~244
- (6) Cui, Z., Moltchanivskyj, G., Bhattacharyya, D., 2004, "Buckling and Large Deformation Behaviour of Composite Domes Compressed Between Rigid Platens," *Composites Structures*, Vol. 66, pp. 591~599.
- (7) Yu, T. X., Tao, X. M., Xue, P., 2000, "The Energy-Absorbing Capacity of Grid-Domed Textile Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 785~850.
- (8) Lam, S. W., Tao, X. M., Yu, T. X., 2004, "Comparison of Different Thermoplastic Cellular Textile Composites on Their Energy Absorption Capacity," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 2177~2184.