

경량화용 복합재 튜브의 적층구성이 흡수에너지 특성에 미치는 영향

김영남*, 김지훈**, 양인영***

Influence of Stacking Sequence Conditions on the Absorbed Energy Characteristics of Composite Tubes

Youngnam Kim*, Jihoon Kim** and Inyoung Yang***

ABSTRACT

This study is to investigate the energy absorption characteristics of CFRP(Carbon-Fiber Reinforced Plastics) tubes on static and dynamic tests. Axial static compression tests have been carried out using the static testing machine(Shin-gang buckling testing machine) and dynamic compression tests have been utilized using an vertical crushing testing machine. When such tubes are subjected to crushing loads, the response is complex and depends on the interaction between the different mechanisms that could control the crushing process. The collapse characteristics and energy absorption have been examined for various tubes. Energy absorption of the tubes are increased as changes in the lay-up which may increase the modulus of tubes. The results have been varied significantly as a function of ply orientation and interlaminar number.

Key Words : Energy Absorption Characteristics(에너지 흡수특성), CFRP(Carbon-Fiber Reinforced Plastics) Tube, The Collapse Characteristics(압괴특성), Vertical Crushing Testing Machine(수직식 충격시험장치), Ply Orientation(배향각), Interlaminar Number(계면수)

1. 서론

1990년대 초에 보론섬유 개발을 시작으로 탄소, 아라미드, 알루미늄, 실리콘 카바이드 등 각종 고강도 섬유가 미국과 일본에서 차례로 개발되었으며, 특히 일본은 각종섬유의 개발에 있어서 괄목할만한 연구성과를 이루었다. 1970년대에는 각종 제조기법의 개발과 함께 낚시대, 골프채 등 스포츠 용품과 전투기의 2차 구조재료로서 복합재료가 활용되기 시작하였고, 1980년대 이후 선진국에서는 상업용

여객기와 소형 여객기에도 복합재료가 폭넓게 활용되기 시작하여 현재에는 항공기용 재료로 매우 중요한 위치를 차지하고 있다.^{(1),(2)}

현재 국내기업의 항공기용 복합재료 구조물에 관련된 기술수준은 외국 항공기 제조회사가 제공한 도면과 규격에 의한 면허 생산단계를 벗어나 자체 설계에 의한 생산 및 품질 검사까지 수행하여 부가가치를 더욱 높이고 있는 단계이다. 그러나 실험적 및 이론적으로 확립된 금속재료와는 달리 복합재료는 그 실험 방법 및 이론적 배경 또한 미비한 실정

2000년 10월 18일 접수
* 조선대학교 대학원 기계설계과
** 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터
*** 조선대학교 기계공학부

이다.

일찍이 수많은 과학자들이 복합재 튜브의 압력에 관한 다양한 재료와 시험편 형상에 따른 에너지 흡수능력에 관하여 연구하였으며, 최근에는 정적 및 동적 하중 하에서 FRP 튜브에 대해 폭넓은 연구가 진행중이다.^{(3)~(11)} 그중 김⁽⁸⁾ 등은 FRP 부재가 안정적으로 붕괴될 경우 충격에너지의 흡수는 금속재료에 비해 단위중량 당 3배 이상이며, 안정적 붕괴를 효율적으로 발생시키기 위해서는 단면의 형상, 적층 각도, 두께 등의 영향인자들을 적절히 조절해야 함을 언급 한 바 있다. 그러나 기존의 연구들은 박육부재의 두께, 상사비, 적층 배향각등에 관하여 연구하였으며, 축 압재(중 충격)하중이 가해졌을 경우 계면수의 변화 및 최외층각도의 변화에 따른 충격 압력특성에 관하여 비교· 고찰한 논문은 존재하지 않는다.

또한 복합재 원통부재의 축 압재실험에 대한 이론해석은 매우 복잡하며, 그 해석방법 또한 논의의 대상이다. 최근 N. K. Gupta⁽⁹⁾는 "An Analysis of Axial Crushing of Composite Tubes"라는 논문에서 정적 압재실험에 대한 이론 식을 유도한바 있으며, 그 결과 이론 값이 실험과 일치함을 보인 바 있다.

따라서 본 연구에서는 경량화용 CFRP 복합재 튜브의 적층 구성이 충격하중 시 흡수에너지 특성에 미치는 영향에 관해 정적 및 충격 압재실험에 대하여 고찰함으로써 최적의 경량화용 복합재 구조 부재를 개발하고자 하며, 더 나아가서 N. K. Gupta의 이론수식에 본 연구에서 사용된 시험편의 물성치를 대입함으로써 CFRP 복합재 튜브의 축 압재 실험에도 Gupta의 이론수식이 이용 될 수 있음을 보이고자 한다.

2. 시험편

본 실험에서 사용된 FRP 복합재 튜브는 에폭시 수지를 37% 포함하고 있는 탄소섬유로 강화된 CFRP 프리프레그 시트(Prepreg Sheet)를 이용하여 수송기계용 구조부재의 가장 기본구조인 원통부재의 형상으로 제작하였다. CFRP 원통 시험편은 한국화이버(주)에서 생산한 0.135mm의 두께를 갖는 Carbon/Epoxy 프리프레그 시트(CU125NS) 8매를 축 방향을 0° 로 하여 맨드릴에 0° 와 90° 시트를 각각 4매씩 사용하여 적층 하였다. 적층 시 계면수에 따른 실험결과를 고찰하기 위하여 [0/90] 시험편에

계면수를 각각 2, 3, 6, 7개로 주어 제작하였다. 또한, [0/90] 시험편에 있어 CFRP 박육부재의 최외층 각도가 에너지 흡수특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 최외층각도를 0° , 90° 로 변화를 주었다. 또한 인장실험을 통하여 얻어진 프리프레그 시트 CU125NS의 물성치는 Table 1과 같다.

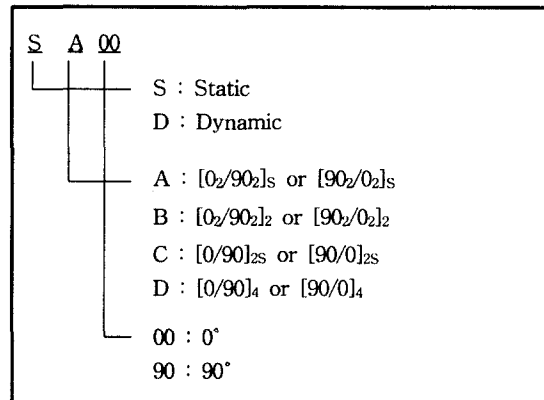
시험편제작시 경화온도는 130℃, 경화시간은 90분으로 하여 Autoclave로 성형하였다. 성형 시 진공 펌프에 의해서 진공 백 속을 10⁻¹ Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레서에 의해서 진공백의 외측으로부터 3 × 10⁵ Pa 정도 가압 시켰으며, 성형이 끝난 CFRP 원형 박육부재는 다이아몬드 커터를 사용하여 소요의 시험편 모양(길이100mm, 내경∅30, 두께 1.08mm)으로 제작하였다.

제작된 시험편의 기호는 Table 2와 같다. S는 정

Table 1 Material properties

Characteristics	Fiber	Resin	Prepreg
Density	1.75 × 10 ⁴ [Kg/m ³]	1.24 × 10 ³ [Kg/m ³]	CU125NS
Tensile Strength	3.53 [MPa]	0.078 [MPa]	
Elastic Modules	230 [GPa]	3.96 [GPa]	
Elongation	1.5 [%]	2.0 [%]	
Resin Content			37 [%]
Curing Temp.			130℃

Table 2 Definition of specimen number



적실험을 의미하며, A는 8 플라이로 적층 한 시험편의 계면수가 2개, B는 3개, C는 6개, D는 7개임을 의미한다. 또한 θ 은 최외층각도 0° 을 90° 을 의미한다.

3. 이론수식 및 압괴실험

3.1 Gupta의 이론수식

Gupta는 복합재 원형튜브의 축 압괴실험 시 시험편이 흡수하는 평균 압괴응력(σ_{av})을 계산하는 이론 식을 유도하였으며, Gupta는 복합재료 원형튜브가 압괴 될 때 일어날 수 있는 에너지 흡수 변수를 다음과 같이 4가지로 요약하였다.

즉, 기지(matrix)에 의해 흡수되는 에너지(E_m), 스플라인 형상으로 압괴 되면서 흡수되는 굽힘 에너지(E_b)와 압괴 되는 축 방향에 직각으로 발생하는 원주방향 에너지(E_c) 및 충격 판과 시험편에서 발생하는 마찰에너지(E_f)에 의해 복합재 튜브의 총 흡수에너지(E_t)는 결정된다. 또한 총 흡수에너지를 변형하여 평균 압괴하중(P_{av})을 계산하고, 이를 단면적으로 나누어 평균 압괴응력(σ_{av})을 결정하였다. 아래 수식 (1) ~ (5)⁹⁾에 Gupta가 제시한 평균 압괴응력 식을 나타냈다.

먼저 총 흡수에너지는 기지에 의한 에너지와 굽힘 에너지, 원주방향 에너지 및 마찰에너지의 합으로 표현 가능하다.

$$E_t = E_m + E_b + E_c + E_f$$

$$= 2\pi R t (\tau_{my} \delta_r + \frac{1}{8} f_y t \theta + \frac{f^2}{2R} \sigma_\theta \cdot \text{Sin}\theta) + \mu P \delta_r \quad (1)$$

여기에서 R 은 원형 튜브의 반지름을, f_y 는 인장강도를, θ 는 라미나의 굽힘 시 축 방향과 이루는 각도를 의미하며, σ_θ 는 원주방향 인장강도를, δ_r 은 축을 중심으로 라미나의 끝단이 수평방향으로 이동한 변위를 의미한다.

또한 총 흡수에너지는 평균 압괴하중과 압괴 된 길이(δ_x)의 곱으로 나타낼 수 있으며,

$$E_t = P_{av} \delta_x \quad (2)$$

위에서 나타낸 수식 (1)과 (2)를 같다고 놓고 이항하여 정리하면 수식 (3)을 얻을 수 있다.

$$P_{av} \delta_x - \mu P \delta_r = 2\pi R t (\tau_{my} \delta_r + \frac{1}{8} f_y t \theta + \frac{f^2}{2R} \sigma_\theta \cdot \text{Sin}\theta) \quad (3)$$

본 연구에서 구하고자하는 평균 압괴응력은 수식 (3)을 정리하여 구한 평균 압괴하중을 시험편의 단면적으로 나누어줌으로써 얻을 수 있다.

$$\sigma_{av} = \frac{P_{av}}{A} = \frac{P_{av}}{2\pi R t} \quad (4)$$

$$= \frac{1}{1-\mu} (\tau_{my} \text{Sin}\theta + f(\frac{\pi t}{16l} + \frac{d\epsilon}{2})) \quad (5)$$

여기에서 μ 는 마찰계수, τ_{my} 는 기지의 전단 응력, f 는 라미네이트의 인장강도, t 는 두께, l 은 시험편의 압괴 길이, $d\epsilon = \frac{l}{R} \text{sin}\theta$ 을 의미한다.

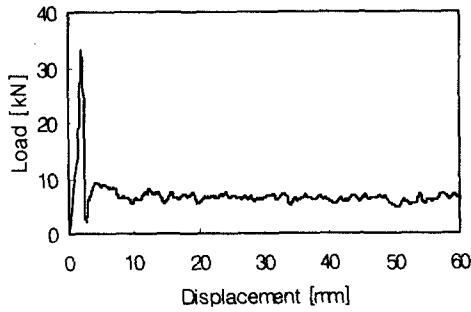
3.2 정적압괴실험

충격 압괴실험을 위한 기본적인 자료를 얻기 위해 본 연구에서는 Shingang 좌굴 시험기를 이용하여 각 시험편에 대해 3~4회의 정적 압괴실험을 행하였다. 정적 압괴실험은 일정한 속도(10mm/min)의 변위 제어를 통하여 균일한 압축하중을 가하였으며, 압괴 길이는 시험편 전체의 축 방향 길이의 60% (60mm)까지 연속적으로 압괴실험을 행하였다. 그 결과 얻어진 하중-변위 선도를 Fig. 1에 나타냈으며 하중-변위 선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 계산하였다. 또한 평균 압괴하중(P_{av})은 압괴하중의 평균으로 계산하였으며, 평균 압괴응력(σ_{av})은 평균 압괴하중을 단면적(A)으로 나누어 수식 (6)과 같이 계산하였다.

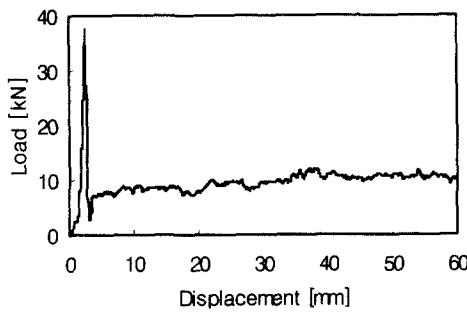
$$\sigma_{av} = \frac{P_{av}}{A} = \frac{E_a}{2\pi R t \delta} \quad (6)$$

여기에서 E_a 는 흡수에너지, δ 는 시험편의 압괴 된

변형량을 의미한다.



(a) SB00, $[90_2/0_2]_2$



(b) SB90, $[0_2/90_2]_2$

Fig. 1 Load-displacement curve on the static test

3.3 충격압력실험

충격 압력실험은 Fig. 2와 같은 수직형 공기압식 충격장치를 사용하였으며, 충격속도 5.42m/sec로 각 시험편당 5~7회에 걸쳐 실험을 행하였다. 공기압에 의해 가속된 크로스 헤드는 가이드 바를 따라 수직 이동하게 되고, 로드셀 위에 위치한 시험편에 충격하중을 가하게 된다. 로드셀의 검출부인 원주의 중앙에 반도체 스트레인게이지(KYOWA, KSP-2-120-E4) 2매를 중심 축에 대칭으로 부착하고 반도체 스트레인게이지의 저항 변화를 환산하여 하중을 결정하였으며, 크로스 헤드에 부착한 표적(Target)의 이동을 비접촉식 광학 변위계(ZIMMER OHG사, 100F)에 의해 얻어진 볼트 값을 측정하여

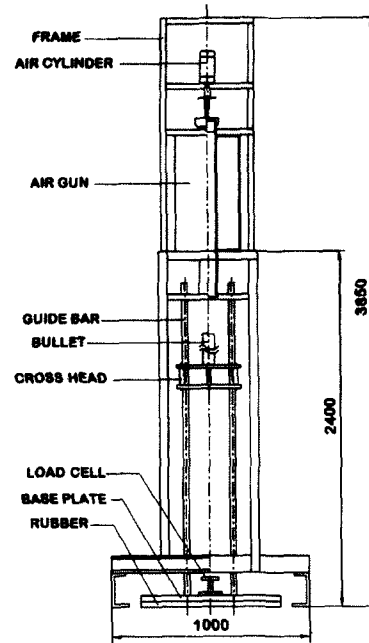


Fig. 2 The vertical crushing testing machine

변위로 환산하였다. 로드셀의 출력전압과 광학 식 변위계의 변위량은 브리지박스과 증폭기(Amplifier)를 통해 디지털 오실로스코프에 저장되며, 이를 컴퓨터에 장착된 스코프 제어 카드를 이용하여 실시간 하중-시간과 변위-시간 데이터를 받을 수 있도록 하였다. 또한 측정된 하중-시간 선도와 변위-시간 선도에서 시간을 소거하여 하중-변위 선도를 구하였고, 그 면적을 시험편의 흡수에너지로 하여 계산하였으며, 정적 압력실험과 같은 방식을 통하여 평균 압력하중, 평균 압력응력을 구하였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구는 CFRP 복합재 박육부재의 적층조건이 에너지 흡수특성에 미치는 영향에 관하여 규명하고자 수행되어졌다. 따라서 CFRP 박육부재에 계면수를 증가시켜가며 정적 및 충격실험을 행하였으며, 최의층각도를 0° , 90° 로 적층하여 정적 및 충격실험을 행하였다.

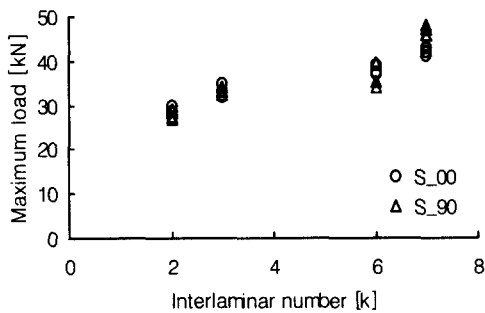
Fig. 3은 x축에 계면수 변화를 주어 각 시험편의

최대하중을 나타냈으며, Fig. 4는 실험을 통해 얻어진 평균 압괴응력과 Gupta가 제시한 정적하중에서의 이론수식에 따른 그래프 선도를 나타냈다.

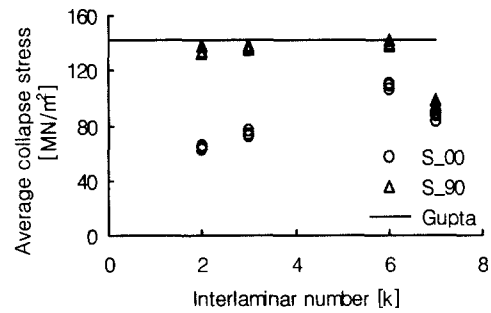
먼저, 계면수 변화에 따른 CFRP 박육부재의 압괴 특성에 관한 실험결과를 살펴보면 Fig. 3에서 알 수 있듯이 계면수가 2개인 A-Type의 CFRP 박육부재보다 계면수가 3개인 B-Type이 더 높은 최대하중을 나타냈다. 즉 최대 압괴하중은 정적 압괴실험의 경우, 계면수의 변화에 따라 증가하는 경향을 나타냈으며, 그 이유는 계면수가 많으면 계면간 크랙(Interlaminar Crack)의 수가 더 많아지게 되고 계면간 크랙이 진전하기 위해서는 더 높은 하중을 수반

하여야 하기 때문으로 사려된다. 그러나 충격 압괴 실험의 경우에는 최대 압괴하중이 증가하는 경향이 뚜렷이 나타나지 않았다. 그 이유는 CFRP 복합재료의 기본 성질인 취성 때문으로 사려된다. 또한, 정적 실험의 경우 최대하중은 최외층각도에 무관하며 계면수 변화에 민감함을 알 수 있으며, 또한 충격실험의 경우 최대하중은 계면수 변화에 따른 최대하중의 변화율은 그다지 크지 않으나 최외층각도에 대한 최대하중의 변화율은 매우 큼을 알 수 있다.

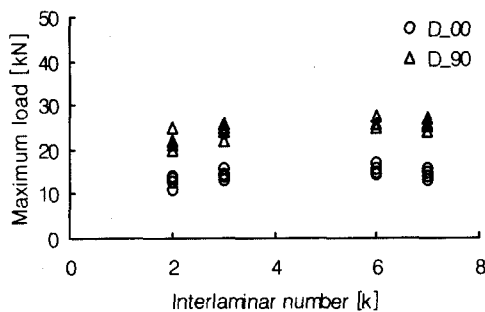
Fig. 4에서 평균 압괴응력은 정적 및 충격 모두 계면수가 6개인 SC00, DC00이 가장 높게 나타났으



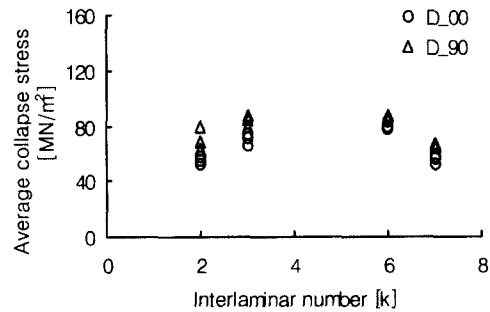
(a) The maximum load versus interlaminar number under static load



(a) The average collapse stress versus interlaminar number under static load



(b) The maximum load versus interlaminar number under impact load



(b) The average collapse stress versus interlaminar number under impact load

Fig. 3 Maximum load of CFRP specimens under static load and impact load

Fig. 4 Average collapse stress of CFRP specimens under static load and impact load

며, 7계면에서는 6계면수보다 낮아짐을 볼 수 있다.

그 이유는 계면수가 증가하면 할수록 라미나의 두께가 감소하고 계면간 크랙 발생빈도는 증가하는 반면 계면내 크랙 발생 빈도는 감소하게 된다. 이에 따라 압쇄특성의 가장 큰 인자중 하나인 계면내 크랙의 성장에 영향을 미치기 때문에 평균 압쇄응력이 낮아진다고 사려된다.

최외층각도 변화에 따른 CFRP 박육부재의 정적 압쇄특성에 관한 실험결과를 살펴보면 Fig. 3과 4에서 알 수 있듯이 최외층각도가 0° 인 박육부재보다 최외층각도가 90° 인 CFRP 박육부재가 더 높은 압쇄효율(최대하중, 평균 압쇄응력)을 나타냈다. 그 이유는 최외층각도가 90° 인 CFRP 박육부재의 경우 최외층에서 외부로 발산하려는 에너지를 최외층 라미나의 섬유가 파단되며 에너지를 흡수하기 때문에 더 높은 압쇄효율을 나타냈다.

Fig 5에는 최외층각도가 0° 인 정적 압쇄 시험편의 형상을, Fig 6에는 최외층각도가 90° 인 정적 압쇄 시험편의 형상을 나타냈다. 계면수가 많아짐에 따라 압쇄형상이 복잡해짐을 알 수 있다. 최외층각도에 따른 압쇄형상을 살펴보면 Fig 5와 Fig 6에서와 같이 최외층각도가 0° 인 경우에는 최외층 플라이의 섬유는 압축하중과 굽힘하중을 받게되며 섬유의 파단 없이 압쇄된다. 그러나 최외층각도가 90° 인 시험편의 경우에는 최외층 플라이의 섬유에 전단하중이 가해지고 섬유의 파단을 수반하며, Fig. 6과 같은 스플라인 형상으로 압쇄된다. 그 결과 섬유의 파단을 수반하는 최외층각도가 90° 인 CFRP 복합재 튜브가 더 높은 에너지 흡수특성을 갖게된다

정적 및 충격 압쇄실험 결과를 비교 고찰해 보면 일반적으로 정적 압쇄실험에 비해 충격 압쇄실험시 최대하중 및 평균 압쇄응력 모두 낮게 나타남을 알 수 있었다. 그 이유는 CFRP 박육부재는 취성 재료이며 충격하중에 의해 계면내 크랙(Intralaminar Crack) 및 계면간 크랙(Interlaminar Crack)의 성장이 빠르게 진행되어 성장 시 발생하는 저항간섭(섬유 배향각 차에 의한 간섭)에 의한 하중 및 에너지를 충분히 흡수하지 못하기 때문으로 사려된다.

Gupta가 제시한 평균 압쇄응력 식⁽⁵⁾에 본 연구에서 사용된 시험편의 물성치를 대입한 결과 평균 압쇄응력(σ_{av})은 약 142.7 MPa 이 나왔으며, 시험편의 물성치는 Table 3과 같다.

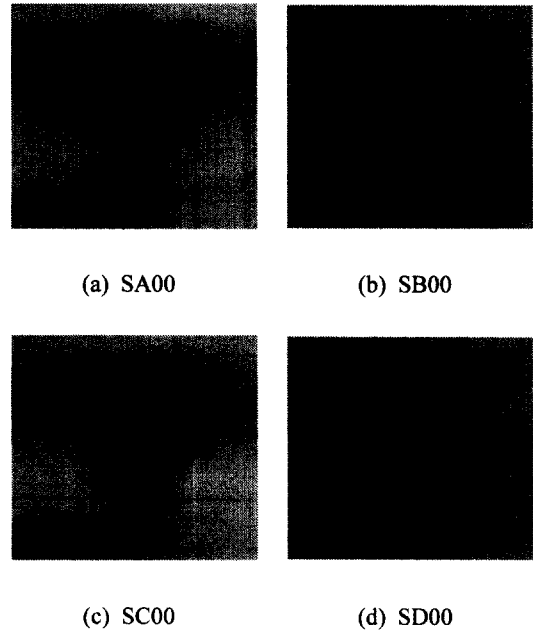


Fig. 5 Typical crushing modes, S_00

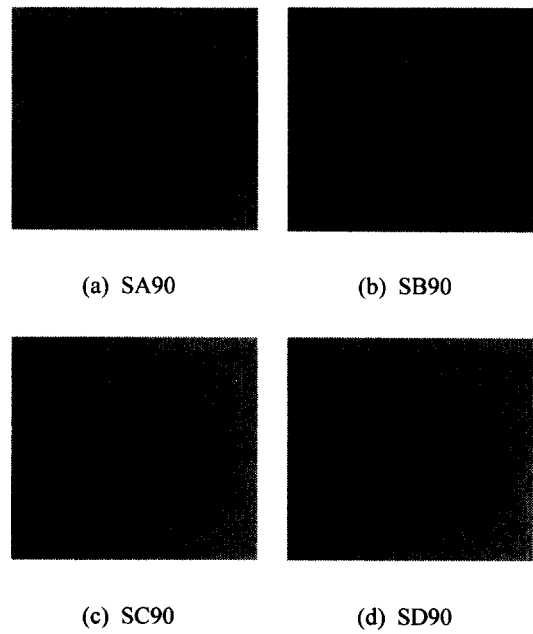


Fig. 6 Typical crushing modes, S_90

Table 3 Properties of CFRP composite tubes in case of static test

Characteristics	Value
Friction coefficient	0.35
Shear strength of the matrix	61 MPa
Strength of the laminate	1933 MPa
Thickness	1.08 mm
Collapsed length of specimen	60 mm

Table 4 Mean value of CFRP specimens after static test

Orientation Angle of Outer	Type	Max Load, P_{max} [kN]	Average collapse stress, σ_{av} [MPa]	Gupta's theoretical method, σ_{av} [MPa]
0°	A	28.5	62.2	142.7
	B	33.2	72.4	
	C	37.6	110.7	
	D	41.8	87.9	
90°	A	27.5	134.1	
	B	33.3	136.3	
	C	35.3	139.5	
	D	47.0	92.8	

Table 5 Mean value of CFRP specimens after impact test

Orientation Angle of Outer	Type	Max Load, P_{max} [kN]	Average collapse stress, σ_{av} [MPa]
0°	A	12.7	55.6
	B	14.0	71.2
	C	15.6	79.2
	D	14.6	56.8
90°	A	22.0	62.5
	B	24.1	85.1
	C	25.8	86.5
	D	25.9	67.1

Gupta는 평균 압축응력 수식을 실험과 비교 고찰하기 위하여 로빙(roving)된 Glass/Epoxy 복합재 튜브를 시험편으로 하여 정적실험만을 수행하였으며, 충격실험은 수행하지 않았다. 그러나 본 연구에서는 일 방향 프리프레그 시트를 이용하여 시험편을 제작하였으며, 최외층각도가 90° 인 시험편의 압축형상이 로빙된 Glass/Epoxy 복합재 튜브와 유사하다. 따라서 Fig. 4(a)에서와 같이 최외층각도가 90° 인 S_90의 평균 압축응력 값과 Gupta의 이론값이 거의 일치함을 알 수 있다.

Gupta의 이론수식은 정적 압축실험에 대한 평균 압축응력 식이므로 충격 압축실험에 수식을 대입 시 그 차이는 매우 큼을 알 수 있다. 또한 계면수에 대한 변수를 제외하고 해석하였으므로 물론 계면수 변화에 대해서도 어떠한 설명도 할 수 없다. 그러나 Gupta의 이론수식에 본 연구에서 사용한 시험편의 물성치를 대입함으로써 CFRP 복합재 튜브의 축 압축실험에 있어 Gupta의 이론수식이 이용 가능하리라 사려된다.

Table 4에 CFRP 박육부재의 정적 압축실험에 따른 최대하중, 평균 압축응력에 대한 평균값 및 Gupta의 이론값을 나타냈으며, Table 5에 충격 압축실험에 따른 최대하중, 평균 압축응력에 대한 평균값을 나타냈다.

5. 결론

경량화용 차체구조부재로 사용 가능한 CFRP 적층 박육부재에 대하여 계면수 및 최외층각도에 대한 영향을 규명하기 위해 다양한 방법으로 시험편을 제작한 후 정적 및 충격 압축실험을 행하였으며, Gupta의 이론수식과 비교 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최대 압축하중은 정적 압축실험의 경우 계면수 변화에 민감하였으며, 충격 압축실험의 경우에는 최외층각도에 따라 최대하중의 큰 변화율을 나타냈다.
2. 계면수의 변화에 따른 압축특성을 고찰해 본 결과 평균 압축응력은 6계면일 때가 가장 높게 나타났다으며, 그 이상 계면이 많아지면 오히려 감소하였다.
3. 최외층각도가 0° 인 CFRP 박육부재보다 최

외측각도 90° 인 CFRP 박육부재가 더 높은 평균 압케응력을 나타냈다.

4. Gupta가 제시한 평균 압케응력 식은 최외측 각도가 90° 인 CFRP 박육부재의 정적실험에 의해 얻어진 평균 압케응력 값과 근사하였으며, Gupta의 이론수식을 이용하여 CFRP 복합재 튜브의 압케이론 수식에도 적용 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Ronald F. Gibson, "Principles of composite material mechanics," McGraw- Hill, pp. 13-21, 1994.
2. 전의진, 이우일, 윤광준, 김태욱, "최신복합재료," pp. 125-135, 1995
3. A. G. Mamalis, D. E. Manolaks, "Crashworthy Behavior of Thin-Walled Tubes of Fibreglass Composite Materials Subjected to Axial Loading," J. Composite Materials, Vol. 24, pp. 72-91, 1990.
4. Bhanwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman, "Analysis and performance of fiber composites," Wiley interscience, pp. 36-53, 1990.
5. C. H. Chiu, K. H. Tsai, W. J. Huang, "Effects of Braiding Parameters on Energy Absorption Capability of Triaxially Braided Composite Tubes," J. Composite Materials, Vol. 32, No. 21, pp. 1964-1983, 1998.
6. G. L. Farley, R. M. Jones "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes," Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 1, pp. 37-50, 1992.
7. G. L. Farley, R. M. Jones "Analogy of the Effect of Materials and Geometrical Variables on Energy-Absorption Capability of Composite Tubes", Journal of Composite Materials, Vol. 26, No. 1, pp. 78-89, 1992.
8. 김정호, 양인영, "충돌시 최적 흡수에너지 특성을 갖는 경량화 차체구조용 CFRP 부재의 개발," 대한기계학회 논문집, Vol. 22, No. 7, pp. 1316-1325, 1998.
9. N. K. Gupta, R. Velmurugan, S. K. Gupta, "An Analysis of Axial Crushing of Composite Tubes, J. Composite Materials, Vol. 31, No. 13, pp.

1262-1286, 1997.

10. Magee, C. L., Thornton, P. H., "Design considerations in energy absorption by structural collapse," SAE Paper, No. 780434.
11. 김영남, 최효석, 차천석, 임광희, 정중안, 양인영, "CFRP 박육부재의 적층조건이 충격압케특성에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집, Vol. 24, No. 12, pp. 2945-2951, 2000.