

CFRP 복합재 튜브의 압괴메카니즘에 관한 실험적 연구

The Experimental Study on the Collapse Mechanism of CFRP Composite Tubes

김 영 남*, 차 천 석**, 양 인 영***
Youngnam Kim, Cheonseok Cha, Inyoung Yang

ABSTRACT

This paper is to investigate collapse mechanisms of CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)composite tubes and to evaluate collapse characteristics on the change of interlaminar number and ply orientation angle of outer under static and impact axial compression loads. When a CFRP composite tube is crushed, static/impact energy is consumed by friction between the loading plate and the splayed fronds of the tube, by fracture of the fibers, matrix and their interface. These are associated with the energy absorption capability. In general, CFRP tube with 6 interlaminar number(C-type), absorbed more energy than other tubes(A, B, D-types). The maximum collapse load seemed to increase as the interlaminar number of such tubes increases. The collapse mode depended upon orientation angle of outer of CFRP tubes and loading status(static/impact). Typical collapse modes of CFRP tubes are wedge collapse mode, splaying collapse mode and fragmentation collapse mode. The wedge collapse mode was shown in case of CFRP tubes with 0° orientation angle of outer under static and impact loadings. The splaying collapse mode was shown in only case of CFRP tubes with 90° orientation angle of outer under static loadings, however in impact tests those were collapsed in fragmentation mode.

주요기술용어 : CFRP(탄소섬유강화 플라스틱), Composite tube(복합재 튜브), Collapse characteristics(압괴특성), Interlaminar number(계면수), Ply orientation angle of outer(최외층각도), Wedge collapse mode(쐐기형 압괴모드), Splaying collapse mode(스플레이잉 압괴모드), Fragmentation collapse mode(분열형 압괴모드)

1. 서 론

운송체의 충돌해석에 관한 연구는 안전에 대한 관심이 높아짐에 따라 대두되기 시작하여 열

차, 항공기 및 자동차 등 모든 분야에서 활발하게 진행되었다.¹⁻³⁾ 특히, 자동차의 안전에 대한 연구는 객실의 변형제한과 승객의 감속도 축소를 위한 여러 가지 구조부재의 에너지 흡수능력 및 흡수메카니즘을 연구하는데 초점이 맞추어져 왔다. 그 이유는 충돌사고 시에 인명을 보호하기 위해서는 차체변형에 의한 물리적 접촉의 회피 뿐

* 회원, 조선대학교 인턴연구원
** 회원, 조선대학교 항공조선공학부 BK21
*** 회원, 조선대학교 기계공학부

아니라 충돌에너지를 적절히 흡수 조절하여 충돌력을 감소시키도록 구조부재를 설계함으로써 충돌안전성을 확보할 수 있기 때문이다.⁴⁾

자동차 구조부재로 사용 가능한 여러 재료 중 섬유강화 복합재료(FRP)의 뛰어난 무게 비 충격에너지 흡수특성 때문에 충돌 시에 발생하는 충돌에너지를 흡수해야 하는 부재로 섬유강화 복합재료를 적용하고자 하는 노력이 진행중이며, 이와 관련된 실험 논문들⁷⁻¹⁸⁾이 발표되고 있다. 그러나 이미 충분한 실험과 검증이 확보되어 있는 금속재료와는 달리, 섬유강화 복합재료는 그 붕괴거동에 관련된 충분한 실험과 이를 뒷받침하는 해석적인 연구결과가 충분치 않은 실정이다. 또한 복합재료의 파괴 메카니즘은 매우 복잡할 뿐만 아니라 그 해석 또한 어려우며 인장, 압축 및 전단하중 작용 시 섬유와 기지의 파단 및 섬유-기지의 상호간의 파단을 포함하고 있기 때문이다.⁹⁻¹¹⁾

일찍이 수많은 과학자들이 복합재 튜브의 압괴에 관한 다양한 재료와 시험편 형상에 따른 에너지 흡수능력에 관하여 연구하였으며, 최근에는 정적 및 동적 하중 하에서 FRP 튜브에 대해 폭넓은 연구가 진행중이다. 그중 김⁶⁾은 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 언급한 바 있다.^{5,6)} 또한, Thorton⁷⁾, Farley⁹⁻¹¹⁾ 그리고 Hull^{12,13)} 등은 복합재 튜브의 압괴특성에 대한 다양한 파라메타의 영향에 관하여 연구한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 수송기계용 구조부재 설계 시 고려해야 할 고강성, 고강도 및 경량화 측면을 중점으로 CFRP 원통 박육구조부재의 특성을 평가하고, 계면수의 변화, 최외층각도의 변화에 따른 압괴특성 및 압괴모드를 고찰함으로써 에너지 흡수특성을 고려한 최적의 수송기계용 구조부재를 개발하는데 이용될 수 있는 기본적인 설계자료를 얻고자 한다.

2. 시험편

본 연구에서는 CFRP 부재가 실제 자동차의 구조부재에 이용될 것을 상정하여 자동차용 사이드 부재의 가장 기본구조인 원통 부재를 시험편으로 사용하였다. CFRP 원통 시험편은 섬유강도 3.53GPa를 갖는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon/Epoxy 프리프레그 시트(CU125 NS) 8매를 축방향을 0°로 하여 적층하였으며, 탭핑(tapping)된 맨드릴에 0°와 90°시트를 각각 4매씩 사용하여 적층한 [0/90] 시험편의 적층구성을 변화시켜 제작하였다. 맨드릴에 탭핑을 한 이유는 성형 후 시험편의 원만한 획득을 위함이다. 또한 최외층각도가 에너지 흡수능력에 미치는 영향에 관하여 고찰하기 위하여 동일한 계면수와 적층배향을 갖는 시험편에 최외층 각도만 변화를 주어 제작하였다.

시험편의 성형은 오토클레이브(autoclave)를 이용하여 챔버(chamber) 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형시에 열 수축 테이프에 의한 압력으로 수지흐름(resin flow)을 유도하여 제작하였다. 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드커터(Powermet 2000 abrasive cutter)를 이용하여 길이 100mm, 내경 30mm, 두께 1.0mm를 갖는 시험편을 제작하였으며 시험편의 기호규약을 Table 1에 나타냈다. A는 2개의 계면수를 갖는 시험편을, B는 3개, C는 6개, D는 7개의 계면수를 갖는 시험편을 나타낸다. 밑줄이 그어진 것과 같이 적층하였을 경우 최외층각도가 90°인 복합재 튜브를 얻게되며, 최외층각도가 0°인 경우에는 00으로 90°인 경우에는 90으로 표기하였다 이때 2개 및 6개의 계면수를 갖는 A와 C의 경우 시험편의 중심을 기준으로 하여 대칭이 됨을 알 수 있다.

3. 압괴실험

3.1 정적 압괴실험

정적 압괴실험은 만능재료시험기(SGA-B-P

Table 1 Definition of the specimen number

A	00	-	S		
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; width: 100px; height: 100px; margin-right: 10px;"></div> <div style="margin-left: 10px;"> <p>A : [0₂ /90₂]_S or [90₂ /0₂]_S</p> <p>B : [90₂ /0₂]_L or [0₂ /90₂]_L</p> <p>C : [0/90]_{2S} or [90/0]_{2S}</p> <p>D : [90/0]_L or [0/90]_L</p> </div> </div>					
					00 : Orientation angle of outer is 0°
					90 : Orientation angle of outer is 90°
					S : Static D : Dynamic

C)를 사용하였으며, 로드셀과 액추에이터 사이에 두 개의 압축지그를 평행하게 설치하고, 변형 속도의 영향이 나타나지 않도록 10mm/min.으로 변위제어를 통하여 균일한 압축하중이 가해지도록 정적 압괴실험을 행하였다. 실험 시 편심하중이 작용하지 않도록 시험편 제작 시 연마가공을 통하여 수평을 맞추었으며, 여러 번의 예비실험을 거쳐 실험결과 재현성이 좋도록 하였다. 또한 시험편 전체의 축방향 길이의 60% (60mm)까지 변위를 제어하면서 연속적으로 압괴실험을 행하였다. CFRP 복합재 튜브의 변위량 (δ)에 따른 정적 압괴실험 과정을 Photo. 1에 나타냈다. 즉 변위량 δ가 0, 20, 40, 60mm일 때의 압괴과정 사진이다. 일반적으로 정적압괴 실험은 각 시험편당 5~7회 수행하여, 오차 범위 5% 내 데이터의 평균값을 취했다. 압괴실험 후 얻어진 33하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 적분하여 부재 내에

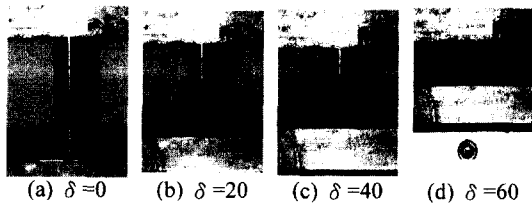


Photo. 1 Collapse processing of CFRP tubes (C90_S)

흡수된 에너지량을 구하였으며, 이것은 평균하중에 변위량을 곱한 것과 같다. 또한 평균 압괴응력은 식 (1)과 같이 평균압괴하중을 시험편의 단면적으로 나누어 취하였다.

$$\sigma_{av} = \frac{P_{mean}}{A} = \frac{E_a}{2\pi R t \delta} \quad (1)$$

여기서 σ_{av} 는 평균 압괴응력, P_{mean} 는 평균 압괴하중 (E_a/δ), E_a 는 흡수에너지이며, A 는 단면적을 나타낸다.

Photo. 2의 압괴모드를 살펴보면 최외층각도가 0°인 경우에는 썩기형 압괴모드(wedge collapse mode)로 90°인 경우에는 0°인 경우보다 더 높은 압괴효율을 갖는 스플레이잉 압괴모드(splaying collapse mode)로 압괴되었다.

3.3 충격 압괴실험

본 연구에서는 CFRP 복합재 튜브의 충격압괴실험을 위하여 수직형 공기압식 충격장치를 사용하였으며, 이는 공기압 가속장치를 부착한 실험장치로서 크로스헤드를 수직하향으로 자유낙하 및 공기압 가속낙하 시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. 충격실험기를 Fig. 1에 나타냈다.

측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간 성분을 소거하여 압괴가 진행되는 과정의 하중-변위 선도 즉, 압괴선도를 구하였으며, 준정적 압괴특성 해석과 동일하게 하중에 대한 변위의 적분을 통하여 CFRP 복합재 튜브의 흡수에너지 E_a 를 구하고, 평균압괴하중 P_{mean} 및 평균압괴응력 σ_{av} 을 구하여 각 복합재 튜브의 압괴특

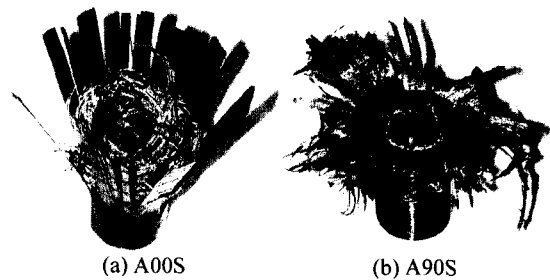


Photo. 2 The shape of CFRP specimen after static test

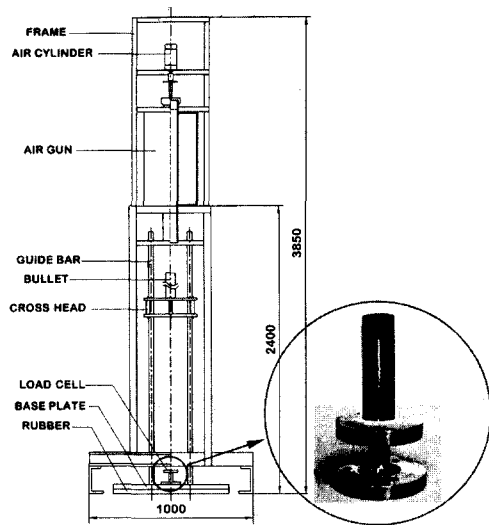


Fig. 1 The vertical crushing testing machine

성에 관하여 고찰하였다.

충격속도는 크로스헤드가 시험편에 충돌하기 직전의 속도를 측정하였으며, 속도 6.26m/sec의 경우 충격에너지 E_I 는 식 (2)와 같이 크로스헤드의 운동에너지와 동일하므로 약 783Joule을 나타냈다.

$$E_I = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2)$$

여기서 m 은 크로스헤드의 질량(40kg), v 는 충격 압괴속도이다.

Photo. 3의 압괴모드를 살펴보면 최외층각도가 0°인 경우에는 정적 압괴실험과 같이 췌기형 압괴모드(wedge collapse mode)를 나타냈으나,

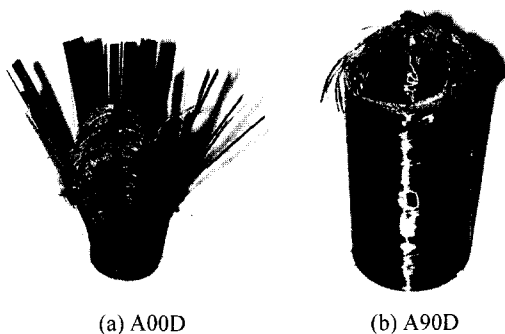


Photo. 3 The shape of CFRP specimen after impact test

90°인 경우에는 분열형 압괴모드(fragmentation collapse mode)를 보였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구는 CFRP 복합재 튜브의 최외층각도 변화에 따른 압괴특성 및 압괴모드를 고찰하고자 정적 및 충격압괴실험을 행하였다.

정적인 경우에는 5~7회의 실험을, 충격인 경우에는 6~10회의 실험 후 얻어진 데이터의 평균을 Tables 2, 3에 나타냈다. Table 2는 정적 압괴실험 결과의 평균값으로 최대압괴하중, 평균압괴하중 및 평균압괴응력에 대한 데이터 값을 나

Table 2 Collapse test results of CFRP thin-wall structure after static test

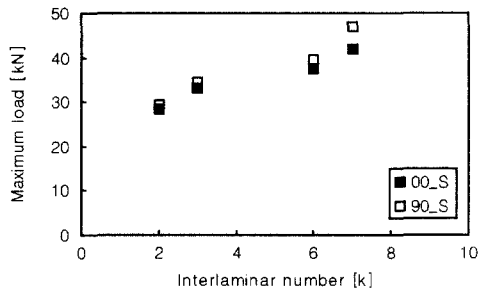
Spec.	Max. load P_{max} [kN]	Mean load P_{mean} [kN]	Average Stress σ_{av} [MPa]
A00_S	28.51	6.86	62.08
B00_S	33.26	8.82	79.76
C00_S	37.60	10.43	94.34
D00_S	41.84	8.28	74.90
A90_S	29.50	12.64	114.29
B90_S	34.39	12.84	116.10
C90_S	39.38	13.45	121.60
D90_S	47.04	10.41	94.13

Table 3 Collapse test results of CFRP thin-wall structure after impact test

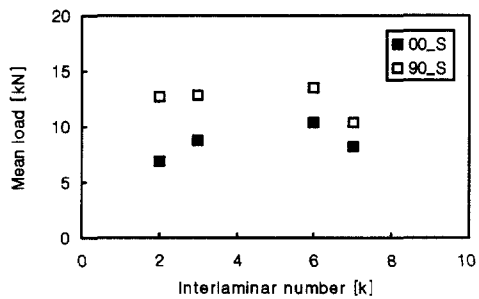
Spec.	Max. load P_{max} [kN]	Mean load P_{mean} [kN]	Average Stress σ_{av} [MPa]
A00_D	12.78	6.39	57.78
B00_D	14.05	6.71	60.67
C00_D	15.65	7.46	67.45
D00_D	15.66	5.35	48.37
A90_D	22.03	7.89	71.34
B90_D	24.11	8.01	72.42
C90_D	25.83	8.14	73.60
D90_D	25.96	6.32	57.14

타낸다. Fig. 2는 Table 2의 데이터 값에 대한 최대압괴하중, 평균압괴하중 및 평균압괴응력을 비교한 그림이다.

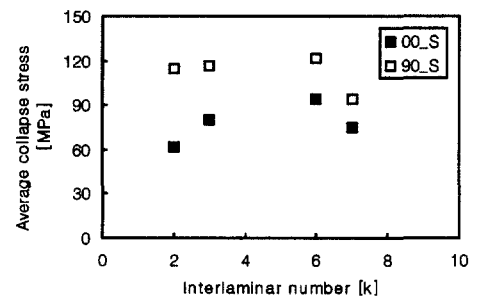
Table 2 및 Fig. 2(a)를 살펴보면 정적 압괴실험에서 CFRP 복합재 튜브의 최대압괴하중은 계면수가 2, 3, 6, 7개로 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한 Figs. 2(b), (c)를 살펴보면 평균압괴하중 및 평균압괴응력은 최외층



(a) The maximum load versus interlaminar number



(b) The mean load versus interlaminar number



(c) The average collapse stress versus interlaminar number

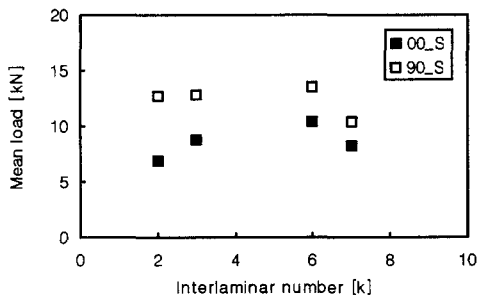
Fig. 2 Collapse characteristics of CFRP specimens under static load

각도가 0° 인 복합재 튜브의 경우 계면수가 증가함에 따라 6 계면수를 갖는 시험편 까진 증가하다가 7 계면수를 갖는 시험편에서 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 최외층각도가 90° 인 복합재 튜브는 계면수가 증가함에 따라 6계면수를 갖는 시험편 까진 그다지 큰 변화를 나타내지 않았으나 7 계면수를 갖는 시험편에서 감소하는 경향을 나타냈다. 그 이유는 CFRP 복합재 튜브의 가장 큰 에너지 흡수 인자는 크랙 진전이며, 크랙은 크게 층간크랙(interlaminar crack)과 층내크랙(intralaminar crack) 및 중심크랙(central crack)으로 나눌 수 있다. 따라서 계면수가 증가한다는 의미는 층간크랙을 유발시킬 수 있는 경우의 수가 증가한다는 의미이며, 결국 평균압괴응력은 증가하게 된다. 그러나 7계면이 되면, 즉 어느 한계를 넘어서게 되면 층간크랙 수가 증가함에 따라 층 두께의 감소로 인하여 층내크랙을 유발시킬 수 있는 경우의 수는 감소하게 되며, 결국 층간크랙 수의 증가로 인하여 다소 평균압괴응력은 증가하나 이와 더불어 층내크랙 수의 감소로 인하여 층내크랙 진전이 충분히 일어나지 않아 결국 평균압괴하중 및 평균압괴응력은 감소하게 된다고 사려된다. 또한 계면수 6개를 갖도록 적층하였을 경우 복합재 튜브 두께의 중앙(1/2)을 기준으로 대칭구조로 적층되며, 이렇게 적층될 경우 7 계면수로 적층된 복합재 튜브에서는 볼 수 없는 중앙부에 중심크랙(central crack)이 존재하게 되며 이 크랙진전에 의해 더 많은 에너지를 흡수하리라 사려된다. 따라서 층간크랙과 층내크랙 진전이 충분히 일어날 수 있는 계면수 및 층 두께를 고려한다면 정적 압괴하중 하에서 최적의 압괴특성을 갖는 CFRP 복합재 튜브를 제작가능 할 것이다.

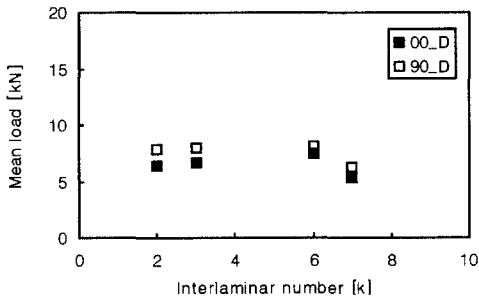
Table 3은 CFRP 복합재 튜브의 충격압괴실험 결과의 평균값으로 최대압괴하중, 평균압괴하중 및 평균압괴응력에 대한 데이터 값을 나타냈다. Fig. 3은 Table 3의 데이터 값에 대한 최대압괴하중, 평균압괴하중 및 평균압괴응력을 비교한 그림이다.

Table 3 및 Fig. 3(a)을 살펴보면 충격압실험에서 CFRP 복합재 튜브의 최대압괴하중은 계면수가 2, 3, 6, 7개로 증가함에 따라 정적 실험과 달리 그다지 큰 경사각을 보이지 않았다. 이는 CFRP 복합재 튜브는 취성부재이며 짧은 시간에 가해지는 충격하중에 의해 압괴되어지므로 순간적으로 부재 전체에 미소크랙이 발생하며, 그 결과 계면수 변화에 따른 최대압괴하중의 변화가 작다고 사려된다.

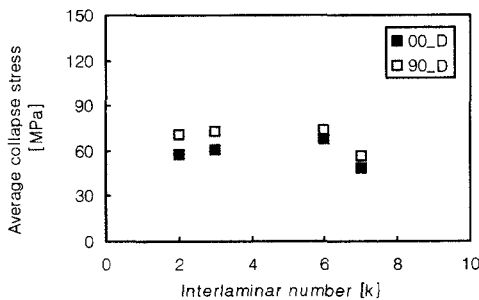
Fig. 3(b), (c)을 살펴보면 평균압괴하중 및 평



(a) The maximum load versus interlaminar number



(b) The mean load versus interlaminar number



(c) The average collapse stress versus interlaminar number

Fig. 3 Collapse characteristics of CFRP specimens under impact load

균압괴응력은 최외층각도가 0°인 복합재 튜브의 경우 계면수가 증가함에 따라 6 계면수를 갖는 시험편까진 증가하다가 7 계면수를 갖는 시험편에서 감소하는 경향을 나타냈다. 또한 최외층각도가 90°인 복합재 튜브는 계면수가 증가함에 따라 7 계면수를 갖는 시험편까진 그다지 큰 변화를 나타내지 않았으나 7 계면수를 갖는 시험편에서 감소하는 경향을 나타냈으며, 정적압괴실험과 유사한 경향을 보였다.

복합재 튜브의 압괴모드는 횡방향전단 모드, 라미나 굽힘모드 및 국부좌굴 모드의 조합으로 설명이 가능하다.¹⁰⁾ 정적실험에 있어서는 계면수의 변화에 관계없이 최외층각도가 0°인 시험편의 경우 썩기형 압괴모드(wedge collapse mode)로 압괴되었으며, 최외층각도가 90°인 경우에는 스플레이잉 압괴모드(splaying collapse mode)로 압괴되었다. 또한 충격실험에 있어서는 최외층각도가 0°인 시험편의 경우, 정적압괴실험과 같이 썩기형 압괴모드로 압괴되었으나, 최외층각도가 90°인 경우에는 정적압괴실험과는 달리 분열 압괴모드(fragmentation collapse mode)로 압괴되었다.

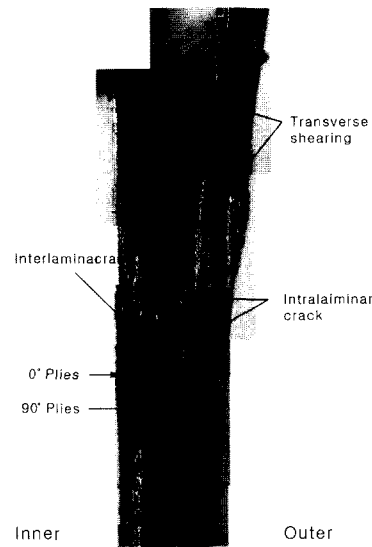


Photo. 4 Photomicrograph of a section through the crush zone of CFRP composite tube with half circle cross-section, A00 D

Photo. 4는 썬기형 압괴모드의 단면을 60X 확대한 사진이다. Photo. 4를 살펴보면 취성섬유강화 복합재 튜브의 가장 기본적인 압괴모드인 취성과파괴 압괴모드를 보이고 있으며, 횡방향 전단모드와 라미나 굽힘 압괴모드의 조합으로 복합재 튜브는 압괴되어진다.¹⁰⁾ Photo. 4에서 사진의 좌측이 복합재 튜브의 내측(inner), 우측이 외측(outer)이며, 0°로 적층된 플라이(백색부)와 90°로 적층된 플라이(흑색부)의 구분이 가능하다. 또한 내측의 0°로 적층된 플라이와 중앙의 90°로 적층된 플라이는 라미나 밴딩에 의한 굽힘 모멘트에 의해 섬유 및 기지가 파단되어 결국 횡방향 전단모드로 압괴되며, 외측의 0°로 적층된 플라이는 압괴판(collapse plate or cross head plate)의 수평방향으로 병진이동하는 경향을 보이고 플라이의 전단 없이 라미나 굽힘에 의해 에너지를 흡수한다.

Photo. 5는 스플레이형 압괴모드의 단면을 60X 확대한 사진이다. Photos. 5를 살펴보면, 원통벽의 단면 중앙에 생긴 센트럴 크랙(central crack)의 점진적인 진전과 함께 원통벽의 내측과 외측으로 확장하는 스플레이 형상으로 압괴되었으

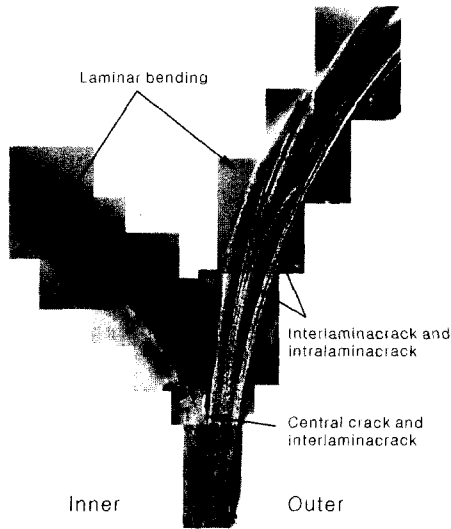


Photo. 5 Photomicrograph of a section through the crush zone of CFRP composite tube with half circle cross-section, D90_S

며, 이러한 압괴모드는 센트럴 크랙 및 층간/층내 크랙 진전과 라미나 굽힘에 의해 대부분의 에너지를 흡수한다. 따라서 정적 압괴실험 시 최외층각도가 90°인 복합재 튜브의 경우 최외층 파이버의 확장 및 파단(fiber extend and brake)에 의해 더 많은 에너지를 흡수하므로 0°인 복합재 튜브보다 더 우수한 압괴특성을 나타냈다.

Photo. 6은 분열 압괴모드의 단면을 60X 확대한 사진이다 Photos. 6을 살펴보면, 내측 및 외측, 중앙에 위치한 모든 플라이의 섬유 및 기지가 파단/전단 되었으며, 파편(debris)이 내·외측으로 발산하는 분열 압괴모드로 압괴되었다. 따라서 충격압괴실험에서는 정적 압괴실험과 같이 최외층각도가 90°인 복합재 튜브의 경우 파이버의 확장 및 파단에 의한 에너지 흡수로 인하여 0°인 복합재 튜브보다 더 우수한 압괴특성을 나타냈다.

5. 결론

CFRP 복합재 튜브의 압괴메카니즘을 실험적으로 규명하고 정적 및 충격압괴 하에서 계면수 변화 및 최외층각도 변화에 따른 압괴특성을 정량적으로 평가하기 위하여 압괴실험을 통하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

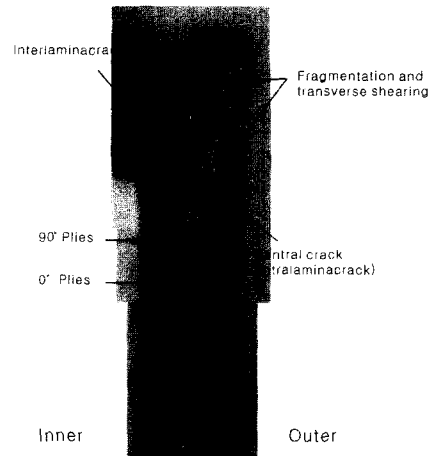


Photo. 6 Photomicrograph of a section through the crush zone of CFRP composite tube with half circle cross-section, A90_D

1) 계면수 변화에 따른 압괴특성을 살펴보면, 정적 및 충격압괴 시 평균압괴응력에 있어 최외층 각도가 0°인 복합재 튜브는 계면수가 증가함에 따라 6 계면수를 갖는 C-type의 시험편까지는 증가하다가 7 계면수를 갖는 복합재 튜브에서 감소하는 경향을 나타냈으며, 최외층각도가 90°인 경우에는 2, 3, 6 계면수 모두 큰 차이를 보이지 않았으나 7 계면수에서 감소하는 경향을 보였다.

2) 충격압괴 하에서 최외층각도에 따른 평균 압괴응력은 최외층각도 90°를 갖는 복합재 튜브가 최외층각도 0°를 갖는 복합재 튜브보다 약 16.8% 증가하였다.

3) 위의 결론 1~2를 정리하면, 8 플라이로 적층된 복합재 튜브의 경우 계면수가 6개인 C-type이 최적설계의 임계점이라 할 수 있으며, 계면수가 6개이고 최외층각도 90°를 갖는 복합재 튜브가 충격압괴 하에서 가장 우수한 압괴특성(평균 압괴응력)을 나타냈다.

4) 정적압괴 하에서 압괴모드는 계면수 변화에 관계없이 최외층각도가 0°인 복합재 튜브는 썸기형 압괴모드(wedge collapse mode)로 90°인 복합재 튜브는 스플레이잉 압괴모드(splaying collapse mode)로 압괴되었다. 충격압괴 하에서는 최외층각도가 0°인 복합재 튜브는 정적압괴와 같이 썸기형 압괴모드로 압괴되었으나, 90°인 복합재 튜브의 경우에는 분열 압괴모드(fragmentation collapse mode)로 압괴되었다. 따라서 압괴모드는 계면수 변화와는 무관하며, 최외층각도 및 하중작용상태(정적, 충격)에 지배적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) G. L. Farley, "Relationship Between Mechanical-Property and Energy-Absorption Trends for Composite Tubes," NASA Technical Paper, OMB No. 0704-0188, 1992.
- 2) D. R. Ambur, J. H. Starnes, "Effect of Crvature on the Impact Damage Characteristics and Residual Strength of Composite Plates," Presented at the 39th AIAA Structures, No.98-1881, 1998.
- 3) G. Zhou, G. A. O. Davies, "Impact Response of Thick Glass Fibre Reinforced Polyester Laminates," *Int. J. Impact Engineering*, Vol.16, No.3, pp.357-374, 1995.
- 4) 김천욱, 한병기, 원종진, 임패홍, "자동차 충돌특성 연구동향," *자동차공학회지*, 제18권 제4호, pp.1-17, 1996.
- 5) 김선규, 심재기, 양인영, "충돌에 의한 차체 박육구조부재의 에너지 흡수특성에 관한 연구," *한국자동차공학회 논문집*, 제3권 제5호, pp.74-81, 1995.
- 6) 김정호, 양인영, "충돌시 최적 흡수에너지 특성을 갖는 경량화 차체구조용 CFRP 부재의 개발," *대한기계학회 논문집*, 제22권 제7호, pp.1316-1325, 1998.
- 7) P. H. Thornton, "The Crush Behavior of Pultruded Tubes at High Strain Rates," *J. Composite Materials*, Vol.24, pp.594-615, 1990.
- 8) W. H. Tao, R. E. Robertson, P. H. Thornton, "Effect of Material Properties and Crush Conditions on the Crush Energy Absorption of Fiber Composite Rods," *Composites Science and Technology*, Vol.47, pp.405-418, 1993.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) G. L. Farley, R. M. Jones, "Crushing Characteristics of Composite Tubes with "Near-Elliptical Cross Sections," *Journal of Composite Materials*, Vol.26, No.12, pp.1741-1751, 1992.
- 12) A. H. Fairfull, D. Hull, "Energy Absorption of Polymer Matrix Composite Structures: Frictional Effects," *Introduction of Structural Failure*. Edtd. by T. Wierzbicki and N. Jones, New York : Wiley, pp.255-279, 1989.
- 13) D. Hull, "A Unified Approach to Progressive Crushing of Fiber-Reinforced Composite

- Tubes," *Composite Science and Technology*, Vol.40, No.3, pp.377-421, 1991.
- 14) 김영남, 김지훈, 양인영, "경량화용 복합재 튜브의 적층구성이 흡수에너지특성에 미치는 영향," 한국정밀공학회 논문집, 제18권 제11호 pp.34-41, 2001.
 - 15) 김영남, 차천석, 양인영, "차체구조용 복합재 박육부재의 축압괴특성에 관한 연구," 한국자동차공학회 논문집, 제9권 제6호, pp. 195-200, 2001.
 - 16) D. W. Sleight, N. F. Knight, J. T. Wang, "Evaluation of a Progressive Failure Analysis Methodology for Laminated Composite Structures," *AIAA Paper*, No.97-1187, 1997.
 - 17) Y. N. Kim, K. H. Im, J. W. Park, I. Y. Yang, "Experimental Approach on the Collapse Mechanism of CFRP Composite Tubes," *Reviews of Progress in QNDE*, pp.369-376, 2000.
 - 18) K. H. Im, Y. M. Kim, J. W. Park, J. K. Sim, I. Y. Yang, "Energy Absorption Characteristics of CFRP Composite Tubes," *Proceedings of the 4th International Symposium on impact Engineering*, pp.875-880, 2001.