

탄소섬유강화 복합재료 원통부재의 충격압괴특성에 관한 실험적 연구

-An Experimental Study on the Impact Collapse Characteristics of CFRP Composite Circular Structures-

김 영 남*

Kim, Young Nam

양 현 수**

Yang, Hyun Soo

ABSTRACT

Because of the inherent flexibility in their design for improved material properties, composites have wide applications in aerospace vehicles and automobiles. The purpose of this study is to investigate the energy absorption characteristics of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) tubes on static and impact tests. Static compression tests have been carried out using the static testing machine(Shin-gang buckling testing machine) and impact compression tests have been carried out using the vertical crushing testing machine. When such tubes were subjected to crushing loads, the response is complex and depends on the interaction between the different mechanisms that control the crushing process. The collapse characteristics and energy absorption were examined. Trigger and interlaminar number affect the energy absorption capability of CFRP tubes.

1. 서 론

현재 각종 구조물의 대한 재료성질의 요구는 그 사용조건이 가혹해지고, 복잡화되는 동시에 매우 다종다양하다. 예를 들면 강도, 강성, 내식성, 내마모성, 경량성, 내구성, 내열성, 차음성, 미관등에 부합되는 특성을 가진 것을 바라고 있다. 이 같은 요구를 가능한 많이 만족시키는 것은 단독의 재료로는 매우 곤란하다는 사실은 말할 필요도 없으며, 각각의 요구조건에 맞는 적합한 재료를 이용함으로써 구조물 및 기계기구의 안전성 향상 및 효율증대를 꾀할 수 있을 것이다.^{1~4)}

* 조선대학교 대학원 기계설계과 박사과정

** 군장대학 자동차기계학부 서비스전공

최근 첨단 복합재료의 발전으로 기존의 각종 구조물을 적합한 종류의 복합재료로 대체하는 경향이 크게 나타나고 있으며, 그에 대한 이점과 신뢰성이 충분히 제시되고 있다. 특히 유리섬유, 탄소, 보론(Boron), 케블라(Kevlar)등의 섬유강화 복합재료(FRP)는 항공기 및 우주비행체, 건축구조물, 선박, 자동차구조물, 스포츠용품에 이르기까지 다양하게 적용되고 있다. 일찍이 수많은 과학자들이 복합재튜브의 압괴에 관한 다양한 재료와 시험편 형상에 따른 에너지 흡수능력에 관하여 연구하였으며, 최근에는 정적 및 동적하중 하에서 FRP 튜브에 대해 폭넓은 연구가 진행중이다.^{9~11)} 그중 Farley와 Jones는 Fig. 1 과 같이 연속섬유강화 복합재튜브에 있어 세 가지의 압괴 모드를 제시하였다. 즉, 횡방향 전단(Transverse Shearing), 라미나 굽힘(Laminar Bending) 그리고 국부좌굴(Local Buckling)에 의해 연속섬유강화 복합재튜브는 파괴되며, 연성성질에 의한 좌굴과 접힘 현상의 반복으로 충돌에너지를 흡수하는 금속재료와는 달리 압축하중을 받을 때 취성파괴에 의하여 붕괴되고, 라미나 굽힘 압괴모드(Laminar Bending Crushing Mode)의 경우는 계면간의 크랙(Interlaminar Crack)에 의한 마찰 및 계면내 크랙(Intralaminar Crack)의 마찰에 의해 충돌에너지가 흡수된다.^{4~8)}

따라서 본 연구에서는 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics : 이하 CFRP라 한다) 부재가 실제 자동차의 구조부재에 사용될 것을 상정하여 자동차용 사이드부재의 가장 기본구조인 원통 부재에 관해 충격 에너지 흡수특성에 미치는 영향 및 최적의 압괴에너지 흡수능력을 수반하는 변수(Interlaminar number, Trigger)에 관하여 고찰함으로써 최적의 경량화용 CFRP 차체구조부재를 개발하는데 이용될 수 있는 기본적인 설계자료를 얻고자 한다.

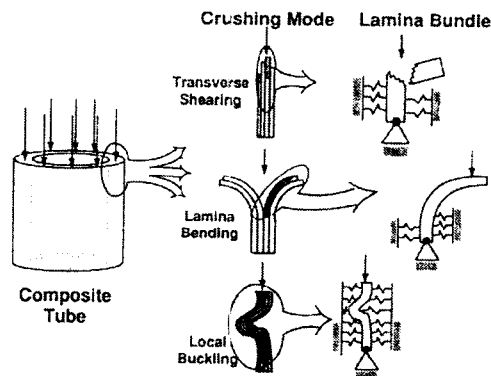


Fig. 1 Crushing process of composite tubes⁽⁵⁾

2. 시험장치 및 시험편

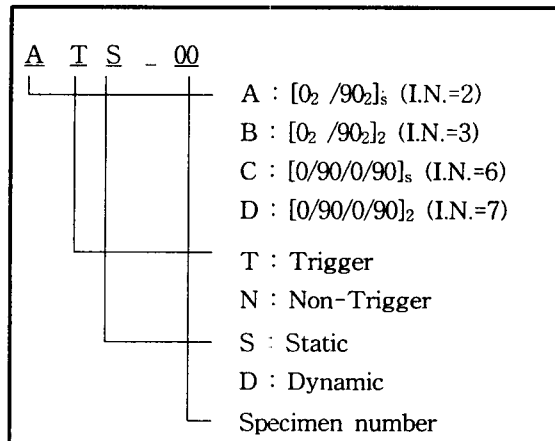
본 연구에서 사용한 시험편은 한국화이버(주)에서 생산한 CFRP 프리프레그 시트(Prepreg Sheet)를 이용하였고 CFRP 시험편의 물성치는 Table 1과 같다. 또한 시험편의 기호는 Table 2에 나타났다. CFRP 원형 시험편은 일방향 한국화이버(주)에서 생산한 Carbon/Epoxy 프리프레그 시트(CU125NS) 8매를 축방향을 0° 로하여 맨드럴에 0°와 90° 시트를 각각 4매씩 사용하여 적층한 [0/90] 시험편에 계면수의 변화를 주어 적층하였다.

CFRP 원형 시험편의 성형은 Autoclave를 이용하여 챔버 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130℃, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형 시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10⁻¹ Pa 까지 진공시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10⁵ Pa 정도 가압시켜 제작하였다. 제작 후 Diamond Cutter를 이용하여 길이 100mm, 내경 30mm, 두께는 1.0mm를 갖는 시험편을 제작하였으며 기계가공을 통하여 시험편 끝단을 45° 로 Chamfering하여 초기결함이 있는 시험편을 제작하였다. 제작된 시험편의 형상은 Fig. 2에 나타났다.

Table 1 Material properties

Types \ Characteristics	Fiber	Resin	Prepreg
Density	1.75×10 ³ [kg/m ³]	1.24×10 ³ [kg/m ³]	CU125NS
Tensile Strenth	3.53 [MPa]	0.078 [MPa]	
Elastic Modulus	230 [GPa]	3.96 [GPa]	
Elongation	1.5 [%]	2.0 [%]	
Resin Content			37 [% Wt]
Curing Temperautre			130℃ × 1hr

Table 2 Definition of the specimen number



※ Note that I.N. is Interlaminar Number

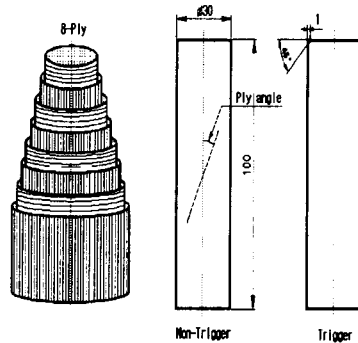


Fig. 2 The shape and configuration of specimen

3. 압축실험

3-1. 정적 압축실험

정적 압축실험은 Shin-gang 좌굴시험기를 사용하였으며, 로드셀과 액츄에이터 사이에 두 개의 압축지그를 평행하게 설치하고, 변형율속도의 영향이 나타나지 않도록 10mm/min.으로 변위제어를 하고 균일한 압축하중을 가하여 준정적 압축실험을 행하였다. 또한 시험편 전체의 축방향 길이의 60%(60mm)까지 변위를 제어하면서 연속적

으로 압괴실험을 행하였다. 평균압괴하중(\bar{P})은 하중과 변위 곡선의 안정적인 압괴하중의 평균으로 계산하였으며, 평균 압괴응력($\bar{\sigma}$)은 평균압괴 하중을 단위면적(A)으로 나누어 계산하였다. 또한 비압괴응력(단위질량당 흡수에너지 : E_s)은 정적 실험에 의해 시험편에 흡수된 에너지를 단위 질량으로 나누어 계산하였다.

$$E_s = \frac{\bar{P}}{A\rho} = \frac{\bar{\sigma}}{\rho}$$

여기에서 ρ 는 시험편의 밀도이다.

3-2. 충격압괴실험

본 연구에서는 CFRP 박육부재의 충격압괴 실험을 위하여 수직형 공기압식 충격장치를 사용하였으며, 충격실험기의 개략도는 Fig. 3과 같다. 시험편에 작용하는 충격하중은 로드셀의 검출부인 원주의 중앙에 반도체 스트레인게이지(KYOWA, KSP-2-120-E4) 2매를 중심축에 대칭으로 부착하고 직렬로 접속 하여 인장·압축 굽힘영향을 제거함으로써 로드셀

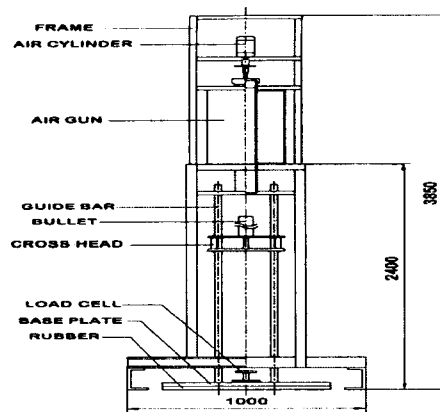


Fig. 3 Schematic diagram of impact testing machine

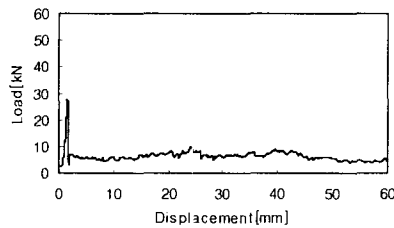
에 부착된 반도체 스트레인게이지의 저항 변화를 하중으로 환산하여 결정하였으며, 시험편의 압괴 시간변화 즉, 변위의 측정에는 크로스 헤드에 부착한 표적의 이동을 광학식 변위계(ZIMMER OHG사, 100F)를 이용하여 측정하였다. 로드셀의 출력전압과 광학식 변위계의 변위량은 브리지박스 와 증폭기를 거쳐 컴퓨터를 이용하여 하중-변형선도 즉, 압괴선도를 구하였으며, 충돌 시 시험편의 흡수에너지를 구하였다. 그 결과 시험편의 초

기결함 및 계면수에 따른 최대압쇄하중, 단위질량당의 흡수에너지를 구하여 각 부재의 에너지 흡수특성에 관하여 고찰하였다.

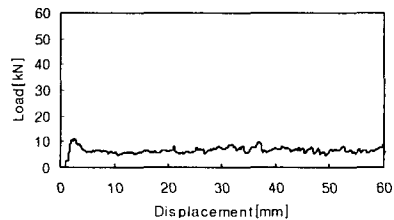
4. 실험결과 및 고찰

초기 결함의 유·무에 따른 CFRP 박육부재의 정적 압쇄특성에 관한 실험결과를 살펴보면 Fig. 4의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 초기결함이 없는 CFRP 박육부재는 압쇄 초기에 최대하중이 발생한 후 급격한 파괴가 발생하여 압쇄되는 반면에 초기 결함이 있는 CFRP 박육부재의 경우에는 초기 최대하중이 평균하중에 거의 일치하는 경향을 나타냈다. 그 이유는 CFRP 박육부재는 취성재료이기 때문에 초기 최대하중이 작용한 후에 하중이 급격히 떨어지게 되고, 이에 따라 계면간 크랙(Interlaminar Crack) 및 계면내 크랙(Intralaminar Crack)등이 급격히 성장하게 되어 결국 최대하중 작용후의 하중은 매우 낮게 나타나며 초기결함이 있는 박육부재는 초기 최대하중이 평균하중값에 근사하게 되며 순차 압쇄하게 되기 때문으로 사려된다.

Fig. 5와 6은 x축에 계면수 변화를 주어 각각의 시험편의 최대하중, 비압쇄응력을 나타냈다. 계면수 변화에 따른 CFRP 박육부재의 준정적 및 충격 압쇄특성에 관한 실험결과를 살펴보면 Fig. 5와 6의 (a)에서 알 수 있듯이 계면수가 2개인 A-Type의 CFRP 박육부재



(a) AND_03

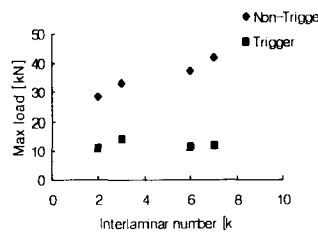


(b) ATD_01

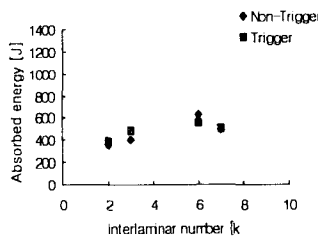
Fig. 4 Typical crushing modes and load-displacement curves

보다 B-Type (계면수 3개)이 더 높은 최대하중을 나타냈다. 즉 계면수가 많을수록 최대하중은 더 높게 나타났으며, 일반적으로 계면수에 비례하여 최대하중은 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 그 이유는 계면수가 많을수록 계면간 크랙의 수가 더 많아지게 되고 계면간 크랙이 진전하기 위해서는 더 높은 하중을 수반하여야 하기 때문으로 사려된다. 또한 흡수에너지와 비압괴응력은 계면수가 6개인 C-Type이 가장 높게 나타났다. 그 이유는 계면수가 어느 범위 이상 많아졌을 경우 각 Ply의 간섭저항이 떨어지게 되고 또한 각 시험편의 계면의 두께가 작아지므로 계면내 크랙의 성장에 영향을 미치기 때문에 흡수에너지 및 비압괴응력이 낮아졌다고 사려된다.

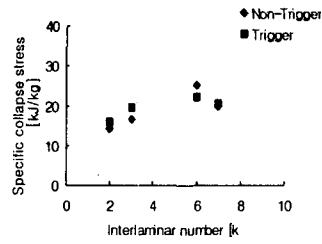
CFRP 박육부재의 정적 및 충격압괴실험에 따른 최대하중, 흡수에너지 및 비압괴에너지의 평균값을 Table 3, 4에 나타냈다.



(a) Relationship of between max load and interlaminar number

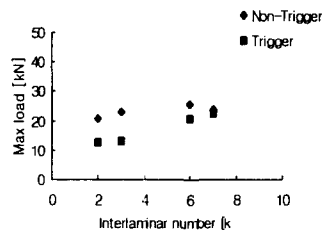


(b) Relationship of between absorbed energy and interlaminar number

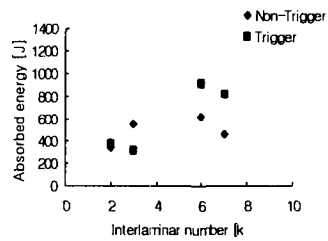


(c) Relationship of between specific collapse stress and interlaminar number

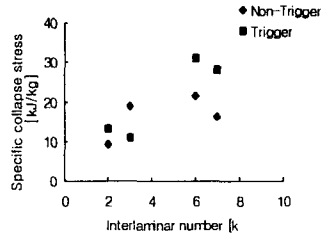
Fig. 5 Static collapse characteristics of the CFRP specimen (Non-Trigger / Trigger)



(a) Relationship of between max load and interlaminar number



(b) Relationship of between absorbed energy and interlaminar number



(c) Relationship of between specific collapse stress and interlaminar number

Fig. 6 Impact collapse characteristics of the CFRP specimen (Non-Trigger / Trigger)

Table 3 Mean value of CFRP specimens after static test (Non-Trigger / Trigger)

Type	Max Load, F_{max} [kN]	Absorbed Energy, E_a [Joule]	Specific Collapse Stress, E_s [kJ/kg]
AN	28.518	352.033	14.081
BN	33.261	409.321	16.373
CN	37.602	626.074	25.043
DN	41.845	497.068	19.883
AT	10.967	393.696	15.748
BT	13.739	483.671	19.347
CT	11.279	556.705	22.268
DT	11.936	508.701	20.348

Table 4 Mean value of CFRP specimens after impact test (Non-Trigger / Trigger)

Type	Max Load, F_{max} [kN]	Absorbed Energy, E_a [Joule]	Specific Collapse Stress, E_s [kJ/kg]
AN	12.780	212.117	5.730
BN	14.056	339.817	11.467
CN	15.652	383.241	13.123
DN	14.663	281.302	9.847
AT	7.736	230.765	8.015
BT	7.984	193.020	6.638
CT	12.782	562.796	18.992
DT	13.946	501.709	17.205

5. 결 론

CFRP 적층 박육부재가 자동차의 Front Side Member에 응용가능하리라 상정하여 다양한 방법으로 시험편을 제작한 후 계면수 및 초기결함의 유·무 등에 관하여 정적 및 충격 압괴실험을 행하였으며, 그 결과 얻어진 박육부재의 압괴 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 계면수가 증가함에 따라 최대압괴하중은 정적 및 충격하중하에서 선형적으로 증가하였다.
2. 충격압괴실험 결과 최대압괴하중은 초기결함이 있는 CFRP 박육부재가 초기결함(Trigger)이 없는 CFRP 박육부재 보다 낮았으나, 흡수에너지는 초기결함이 있는 CFRP 박육부재가 더 높게 나타났다.
3. 계면수의 변화에 따른 압괴특성을 고찰해 보면 흡수에너지, 비압괴응력은 6계면일 때가 가장 높게 나타났으며, 그 이상 계면이 많아지면 오히려 감소함을 알 수 있었다.

6. 참고 문헌

1. 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
2. B. D. Agarwal, L. J. Broutman, Analysis and performance of fiber composites, Wiley interscience, pp. 36-53, 1990
3. 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
4. G. L. Farley, Energy Absorption of Composite Materials, J. Composite Materials, Vol. 17, pp. 267-279, 1983
5. 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
6. 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
7. 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
8. P. H. Thornton, P. J. Edwards, Energy Absorption in Composite Tubes, Composite Materials Vol. 16, pp. 521-545, 1982
9. R. F. Gibson, Principles of composite material mechanics, McGraw- Hill, pp. 13-21, 1994
10. S. W. Tsai, H. T. Hahn, Introduction to composite materials, Technomic Publishing Company, Inc., pp. 277-375, 1980
11. K. H. Im, J. H. Kim and I. Y. Yang, A study on residual fatigue bending strength and damage behavior of CFRP composites subjected to impact loadings, KSME, Vol. 12, No. 1, pp. 50-57, 1998

저 자 소 개

김영남 : 조선대학교 기계설계과를 졸업했으며, 동 대학원에서 석사학위를 취득하고 박사 과정에 있습니다. 현재 군장대학 자동차기계학부 겸임교수로 재직중이며, 주요 관심분야는 자동차용 복합재료 등이다.

양현수 : 조선대학교 정밀기계공학과를 졸업했으며, 석사학위와 박사학위는 시립인천대학교에서 취득하였다. 현재 군장대학 자동차 기계학부 자동차 서비스 전공에 재직 중이며, 주요 관심분야는 자성재료 및 자동차 부품재질 개발 등이다.