

축 압궤하중을 받는 Gr/E 복합재 튜브의 에너지 흡수특성

- The Absorbed Energy Characteristics of Gr/E Composite
Tubes under Axial Collapse Load -

양 현 수 *

Yang Hyun Soo

김 영 남 **

Kim Young Nam

최 흥 환***

Chon Heung Hwan

Abstract

Composites have wide applications in aerospace vehicles and automobiles because of the inherent flexibility in their design for improved material properties. Composite tubes in particular, are potential candidates for their use as energy absorbing elements in crashworthiness applications due to their high specific energy absorbing capacity and the stroke efficiency. Their failure mechanism however is highly complicated and rather difficult to analyze. This includes fracture in fibers, in the matrix and in the fiber-matrix interface in tension, compression and shear. The purpose of this study is to investigate the energy absorption characteristics of Gr/E(Graphite/Epoxy) tubes on static and impact tests. The collapse characteristics and energy absorption of a variety of tubes have been examined. Changes in the lay-up which increased the modulus increased the energy absorption of the tubes. Based on the test results, the following remarks can be made: Among CA15, CA00 and CA90 curves the CA90 tube exhibits the highest crush load throughout the whole crush process, and max load increases as interlaminar number increase. Among all the tubes type CC90 has the largest specific crushing stress of 52.60 kJ/kg which is much larger than other tubes.

* 군장대학 자동차·기계학부 조교수

** 군장대학 자동차·기계학부 겸임교수

*** 성진기업 대표이사

1. 서론

재료의 연구, 개발은 끊임없이 계속되고 있으며, 새로운 재료가 계속 발명되고 있다. 우리가 구조물과 기계기구 등의 제작에 이용하고 있는 재료는 다양하지만, 이들 중에서 복합재료라 불리는 재료분야가 급속히 진보하고 있으며, 또한 주목을 받고 있다.

현재 우리가 사는 사회에 있어 재료성질에 대한 요구는 그 사용조건이 가혹해지고, 복잡화되는 동시에 매우 다종 다양하다. 예를 들면 강도, 강성, 내식성, 내마모성, 경량성, 내구성, 내열성, 차음성 및 미관 등에 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 기대할 수 있을 것이다.^{1~3)}

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) 및 케블라(Kevlar) 등의 섬유강화 복합재료(FRP)는 항공기 및 우주비행체, 건축구조물, 선박, 자동차구조물, 스포츠용품에 이르기까지 다양하게 적용되고 있다. 일찍이 수많은 과학자들이 복합재튜브의 압축(Collapse)에 관한 다양한 재료와 시험편 형상에 따른 에너지 흡수능력에 관하여 연구하였으며, 최근에는 정적 및 동적하중 하에서 FRP 튜브에 대해 폭넓은 연구가 진행중이다.^{1~7)} 그중 Farley와 Jones는 연속섬유강화 복합재튜브에 있어 세 가지의 압축 모드를 제시하였다. 즉, 횡방향 전단(Transverse Shearing), 라미나 굽힘(Laminar Bending) 그리고 국부좌굴(Local Buckling)에 의해 연속섬유강화 복합재튜브는 파괴되며, 연성성질에 의한 좌굴과 접합현상의 반복으로 충돌에너지를 흡수하는 금속재료와는 달리 압축하중을 받을 때 취성과 파괴에 의하여 붕괴되고, 라미나 굽힘 압축모드(Laminar Bending Crushing Mode)의 경우는 계면간의 크랙(Interlaminar Crack)에 의한 마찰 및 층내 크랙(Intralaminar Crack)의 마찰에 의해 충돌에너지가 흡수된다고 정의하였다.^{4~5)}

따라서 본 연구에서는 Gr/E(Graphite/Epoxy : 이하 Gr/E 라 한다) 복합재 튜브가 축방향 하중을 받을 때의 압축특성을 고찰하고, 압축시 하중과 변위를 측정하여 Gr/E 튜브의 계면수 및 최외층각도에 따른 변화가 에너지 흡수특성에 미치는 영향에 관하여 고찰함으로써 Gr/E 복합재 튜브의 활용을 위한 기본적인 설계자료를 얻고자 하였다.

2. 시험편

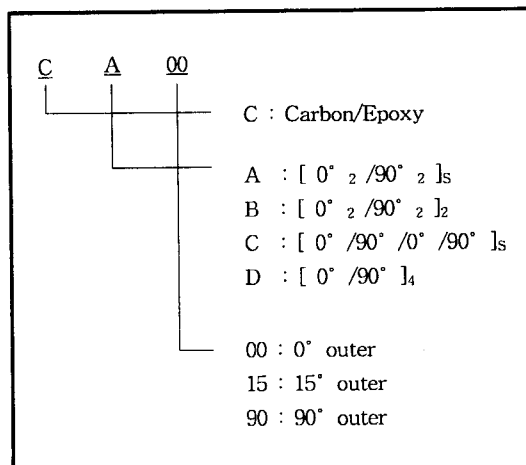
본 실험에서 사용된 Gr/E 복합재 튜브 시험편은 한국화이버(주)에서 생산한 CU125NS 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0° 로 하여 맨드릴에 15° 와 -15° 시트를 각각 4매씩 사용하여 적층한 [15/-15] 시험편과 0° 와 90° 로 구성된 [0/90] 시험편에 계면

수를 각각 2, 3, 6 및 7개로 주어 제작하였다. 또한, Gr/E 복합재 튜브의 최외층각도가 에너지 흡수특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 최외층각도를 15° 와 0°, 90° 로 변화를 주어 성형하였으며, 소요의 시험편 모양(100mm, Ø30)으로 절단하여 제작하였다. CU125NS의 물성치는 Table 1과 같으며, 제작된 시험편의 기호는 Table 2와 같다.

Table 1 Material properties

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

Table 2 Definition of specimen number



3. 압케실험

3.1 준정적압케실험

준정적 압케실험은 Fig. 1과 같은 Shingang 좌굴시험기를 사용하였으며, 로드셀과 액츄에이터 사이에 두 개의 압축지그를 평행하게 설치하였다. 또한 변형율속도의 영향이 나타나지 않도록 10mm/min.으로 변위제어를 하고 균일한 압축하중을 가하여 준정적 압케실험을 행하였다. 압케길이는 시험편 전체의 축방향 길이의 60% (60mm)까지 변위를 제어하면서 연속적으로 압케실험을 행하였다. 평균압케하중(P_a)은 하중과 변위 곡선의 안정적인 압케하중의 평균으로 계산하였으며, 평균 압케응력(σ_a)은 평균압케 하중을 단위면적(A)으로 나누어 계산하였다. 또한 비압케응력(단위질량당 흡수에너지)은 준정적 실험에 의해 시험편에 흡수된 에너지를 단위 질량으로 나누어 계산하였다.

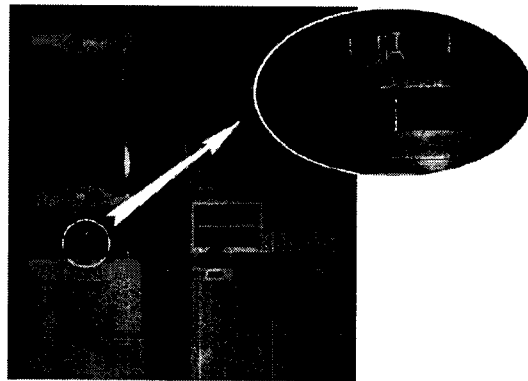


Fig. 1 Shin-gang buckling testing machine

3.2 충격압케실험

충격압케실험은 수직형 공기압식 충격장치를 사용하였으며, 충격실험기의 개략도와 모습은 Fig. 2와 같다. 시험편에 작용하는 충격하중은 로드셀의 검출부인 원주의 중앙에 반도체 스트레인게이지(KYOWA, KSP-2-120-E4) 2매를 중심축에 대칭으로 부착하고 직렬로 접속하여 인장·압축 굽힘영향을 제거함으로써 로드셀에 부착된 반도체 스트레인게이지의 저항 변화를 하중으로 환산하여 결정하였으며, 변위의 측정은 크로스 헤드에 부착한 표적(Target)의 이동을 광학식 변위계(ZIMMER OHG사, 100F)에 의해 볼트값을 얻고 변위량을 환산함으로써, 하중-변위 선도를 구하였다. 또한 최대하중, 흡수에너지 및 비압케응력으로 환산하여 고찰하였다.

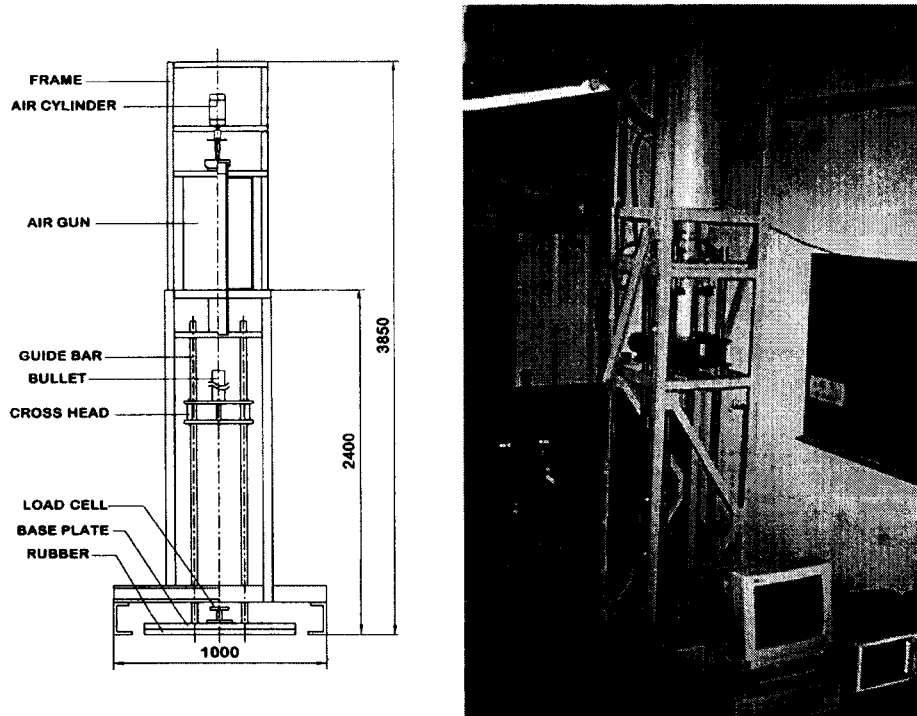


Fig. 2 Impact testing setup for crushing

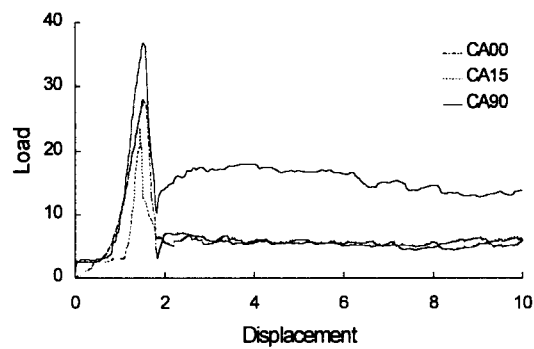


Fig. 3 Typical crush load-displacement curves

4. 실험결과 및 고찰

본 연구는 Gr/E 복합재 튜브의 적층조건이 에너지 흡수특성에 미치는 영향에 관하여 규명하고자 수행되어졌다. 따라서 Gr/E 복합재 튜브에 계면수를 증가시켜가며 준정

적 및 충격실험을 행하였으며, 최외층각도를 0° , 15° 및 90° 로 적층하여 준정적 및 충격실험을 행하였다. 최외층각도의 변화에 의한 준정적 및 충격실험의 하중-변위선도는 Fig. 3과 같이 최외층각도가 90° 인 CA90 시험편이 압쇄진행중 가장 높은 압쇄하중을 나타냈으며, CA00, CA15 순으로 압쇄하중이 감소함을 알수있었다.

Fig. 4 및 5는 x축에 계면수 변화를 주어 각 시험편의 최대하중 및 비압쇄응력을 나타냈다. 계면수 변화에 따른 Gr/E 복합재 튜브의 압쇄특성에 관한 실험결과를 살펴보면 Fig. 4-(a)에서 알 수 있듯이 계면수가 2개인 A-Type의 Gr/E 복합재 튜브보다 계면수가 3개인 B-Type이 더 높은 최대하중을 나타냈다. 즉 계면수가 많을수록 최대하중은 더 높게 나타났으며, 계면수에 비례하여 최대하중은 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 그 이유는 계면수가 많으면 계면간 크랙(Interlaminar Crack)의수가 더 많아지게 되고 계면간 크랙이 진전하기 위해서는 더 높은 하중을 수반하여야 하기 때문으로 사려된다. 또한 Fig. 4 와 5의 (b)에서 비압쇄응력은 계면수가 6개인 C-Type이 가장 높게 나타났다. 그 이유는 계면수가 어느 범위 이상 많아졌을 경우 각 Ply의 간섭저항이 떨어지게 되고 각 시험편의 계면 두께가 작아지게 된다. 이러한 계면 두께 감소가 계면내 크랙(Interlaminar Crack)의 성장에 영향을 미치기 때문에 흡수에너지 및 비압쇄응력이 낮아진다고 사려된다.

최외층각도 변화에 따른 Gr/E 복합재 튜브의 준정적 압쇄특성에 관한 실험결과를 살펴보면 Fig. 4와 5에서 알 수 있듯이 최외층각도가 15° 인 Gr/E 복합재 튜브보다 0° 인 Gr/E 복합재 튜브가, 0° 보다는 최외층각도가 90° 인 튜브가 더 높은 압쇄효율(최대하중, 흡수에너지, 비압쇄응력)을 나타냈다. 그 이유는 최외층각도가 90° 인 Gr/E 복합재 튜브는 최외층에서 외부로 발산하려하는 에너지를 최외층각도의 저항간섭에 의해 막아주기 때문에 더 높은 압쇄효율을 나타낸다. 즉, Gr/E 복합재 튜브는 압쇄 시 가해진 충격 에너지를 모두 흡수하지는 못하며, 어느 정도의 에너지를 해방하게 되는데, 최외층각도가 90° 인 Gr/E 복합재 튜브는 충격에너지에 대한 해방에너지의 정도가 최외층각도가 0° 인 Gr/E 복합재 튜브 보다 더 낮기 때문으로 사려된다.

준정적 및 충격압쇄실험결과를 비교 고찰해 보면 일반적으로 준정적 압쇄실험에 비해 충격압쇄실험시 최대하중, 흡수에너지, 비압쇄응력 모두 약 50% 정도 낮게 나타남을 알 수 있었다. 그 이유는 Gr/E 복합재 튜브는 취성재료이며 충격하중에 의해 계면내 크랙(Intralaminar Crack) 및 계면간 크랙(Interlaminar Crack)의 성장이 빠르게 진행되어 성장시 발생하는 저항간섭에 의한 하중 및 에너지를 충분히 흡수하지 못하기 때문으로 사려된다.

5. 결 론

항공기 및 우주 비행체, 선박등의 수송기계부품에 적용 가능한 Gr/E 복합재 튜브에 대하여 계면수 및 최외층각도에 대한 영향을 규명하기 위해 다양한 방법으로 시험편을 제작한 후 준정적 및 충격 압괴실험을 행하였으며, 그 결과 얻어진 박육부재의 압괴 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최대압괴하중은 준정적인 경우, 계면수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다.
2. 최외층각도 변화에 따른 Gr/E 복합재 튜브의 준정적 압괴특성에 관한 실험결과, 최외층각도 0° 인 Gr/E 복합재 튜브보다 최외층각도 90° 인 튜브가 더 높은 압괴 특성을 나타냈다.
3. 비압괴응력은 최외층각도 90° 인 Gr/E 복합재 튜브의 비압괴응력이 최외층각도 0° 인 튜브에 비해, 준정적인 경우에는 약 38.5%, 충격인 경우에는 약 21.9% 향상되었다.
4. 계면수의 변화에 따른 압괴특성을 고찰해 보면 비압괴응력은 6계면일 때가 가장 높게 나타났으며, 그 이상 계면이 많아지면 오히려 감소함을 알 수 있었다.

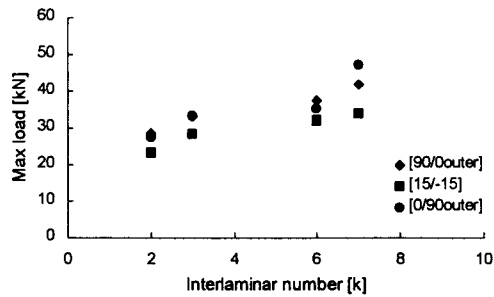
후 기

본 연구는 2001년도 군장대학 자동차 특성화 사업을 추진하고 있는 자동차기술정보센터 연구비지원에 의하여 이루어 졌음을 밝히며, 관계자에게 감사 드립니다.

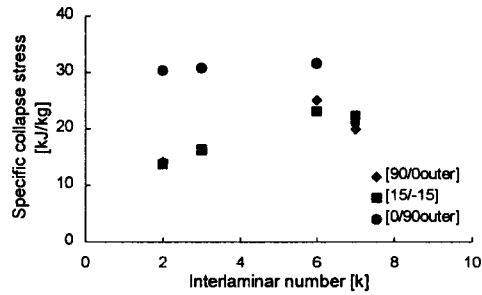
6. 참고문헌

1. A. G. Mamalis and 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, R. M. Jones "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes", J. Composite Materials, Vol. 26, No. 1, pp. 37-50, 1992

5. G. L. Farley, R. M. Jones "Analogy of the Effect of Materials and Geometrical Variables on Energy-Absorption Capability of Composite Tubes", J. Composite Materials, Vol. 26, No. 1, pp. 78-89, 1992
6. Magee, C. L., Thornton, P. H., "Design considerations in energy absorption by structural collapse", SAE Paper, No. 780434
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

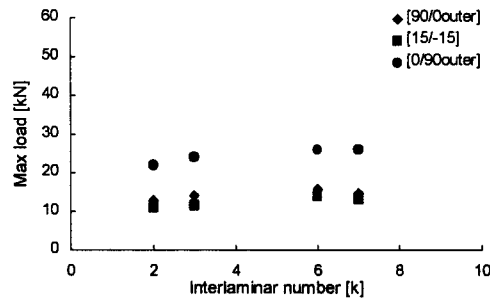


(a) Max load

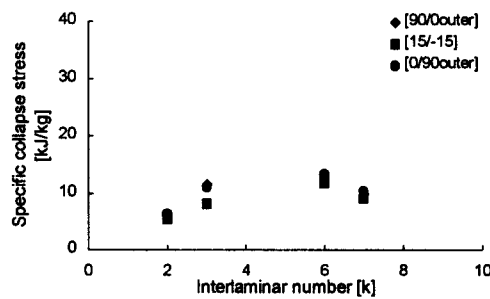


(b) Specific collapse stress

Fig. 4 Static collapse characteristics of the Gr/E specimen



(a) Max load



(b) Specific collapse stress

Fig. 5 Impact collapse characteristics of the Gr/E specimen

저 자 소개

양 현 수 : 조선대학교 정밀기계과을 졸업하고, 시립인천대학교 대학원에서 석사 및 박사학위를 취득하였다. 현재는 군장대학 자동차·기계학부 조교수로 근무중이다. 주요관심분야 자성재료, 자동차 재료 개선 및 복합재료 분야 등.

김 영 남 : 조선대학교 기계설계과을 졸업하고, 동 대학원에서 석사 및 박사학위를 취득하였고 또한 군장대학 자동차·기계학부 겸임교수로 근무하였다. 주요관심분야 자동차 재료 개선 및 복합 재료 분야 등.

최 흥 환 : 성진기업 대표이사, 주요관심분야 정류자, 자동차 재질 개선(배기다기관 및 흡기다기관) 및 복합재료 분야 등.