한국자동차공학회논문집 제 9 권 제 6 호, pp.195-200

차체구조용 복합재 박육부재의 축압괴 특성에 관한 연구

The Study on the Axial Collapse Characteristics of Composite Thin-Walled Members for Vehicles

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

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 fibres, in the matrix and in the fibre-matrix interface in tension, compression and shear. 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 and impact tests have been carried out using the vertical crushing testing machine. Interlaminar number affect the energy absorption capability of CFRP tubes. Also, theoretical and experimental have the same value.

주요기술용어 : Composite tube(복합재 튜브), The energy absorption characteristics(에너지흡수특성), Impact collapse test(충격압괴실험), The vertical crushing testing machine(수직식 충격장치), Interlaminar number(계면수)

1. 서 론

자동차 등의 수송기계는 충돌시 인체에 심각한 상해를 주지 않을 정도의 충격력 흡수성능이 요구되고 있으며, 이러한 개념이 차체 구조 설계에 점차 이용되어 승객의 안전에 중점을 두고 개발이 진행되고 있다. 이제까지 차체구조부재에는 금속재료가 사용되었으나, 최근에는 금속재료보다도 20~50% 정도의 구조경량화가 가능한 복합재료들이 점차 사용되고 있다.[1)]

수많은 복합재료 중 섬유강화복합재료(FRP)는 금속재료에 비해 비강도 및 비강성이 우수하고 특히 설계요건에 따라 적층 배향을 적절히 선정할 수 있는 유용성 때문에 경량화 및 고강도가 요구되는 자동차, 항공기 및 우주 비행체의 구조물에 널리 응용되고 있다. 자동차용 복합재료에 사용되는 보강섬유는 유리섬유가 대부분 사용되고 있으며, 최근에는 미국, 일본의 자동차 업

* 회원, 조선대학교 대학원
** 회원, 조선대학교 기계공학부

계에서 경량화 효과를 증대시키기 위하여 탄소섬유를 사용한 복합재료부품의 사용을 추진 중에 있다. 또한 이와 관련된 수많은 연구가 진행중에 있다.[1-3] 많은 과학자들에 의하여 복합재 튜브의 압괴에 관한 다양한 재료와 시험편 형상에 따른 에너지 흡수능력에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 정적뿐만 아니라 동적 하중하에서 FRP 튜브의 압괴특성 및 재료특성에 대한 폭넓은 연구가 진행중이다.[2-7, 9-13]

그러나 기존의 실험 연구들은 박육부재의 두께, 상사비, 적층 배향각 등에 관하여 연구하였으며, 축 압괴(종충격)하중이 가해졌을 경우 계면수의 변화에 따른 충격 압괴특성에 관하여 비교 · 고찰한 논문은 존재하지 않는다. 또한 복합재 원통부재의 축 압괴 실험에 대한 이론해석은 매우 복잡하며, 그 해석방법 또한 논의의 대상이다. 최근 N. K. Gupta[7]는 축 압괴실험에 대한 이론 식을 유도한바 있으며, 그 결과 이론 값이 실험과 일치함을 보인 바 있으나 계면수 변화 및 충격실험에서의 이론 식을 유도하지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 CFRP 복합재 부재가 실제 자동차의 구조부재에 사용될 것을 상정하여 자동차용 부재의 가장 기본구조인 원통 부재에 관해 정적 압괴실험과 충격 압괴실험을 행하고, N. K. Gupta의 이론수식에 계면수 변화라는 변수를 도입하여 수식을 전개함으로써 이론과 실험을 비교 고찰하고자 한다.

2. 시험편

본 연구에서 사용된 시험편은 한국화이버(주)에서 생산한 CFRP 프리프레그 시트를 이용하였으며, CFRP 시험편의 물성치는 Table 1과 같다. CFRP 원통 시험편은 일 방향 Carbon/Epoxy 프리프레그 시트(CU125NS) 8매를 축 방향을 0°로 하여 맨드릴에 0°와 90°시트를 각각 4매씩 사용하여 적층한 [0/90] 시험편에 계면수의 변화(2, 3, 6, 7개)를 주어 제작하였다. 또한 CFRP 원통 시험편의 성형은 경화점 온도 130°C, 경화시간을

Table 1 Material properties

Characteristics	Fiber	Resin	Prepreg
Density	1.75×104 [kg/m^3]	1.24×103 [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 [%]
Curing temp.			130°C

90분으로 하여 Autocalve로 성형 제작하였다. 또한 제작 후 Diamond Cutter를 이용하여 길이 100mm, 내경 30mm, 두께는 1.0mm를 갖는 시험편을 제작하였다.

3. 이론해석 및 압괴실험

3.1 이론해석

Gupta[7]는 복합재료 원형튜브가 압괴될 때 일어날 수 있는 에너지 흡수 변수를 다음과 같이 4가지로 요약하였다. 즉, 기지(matrix)에 의해 흡수되는 에너지(E_m), 스플라인 형상으로 압괴되면서 흡수되는 굽힘 에너지(E_b)와 압괴되는 축방향에 직각으로 발생되는 원주방향 에너지0°C(E_c) 및 충격판과 시험편에서 발생되는 마찰에너지(E_f)에 의해 복합재 튜브의 총 흡수에너지(E_t)는 결정된다.

그러나 계면수 변화 및 충격하중 시 발생되는 평균 압괴응력 이론 식을 유도하기란 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 계면수 변화는 층간 크랙(interlaminar crack)의 진전에 영향을 미친다고 간주하여 아래와 같이 계면수(k)변화의 함수, $g(k)$를 도입하여 이론수식을 유도하였다. 또한 총 흡수에너지를 변형하여 평균 압괴하중(P_{av})을 계산하고, 이를 단면적으로 나누어 평균

압괴응력(σ_{av})을 결정하였다.

먼저 축 방향에 대한 기지의 크랙진전에 의해 흡수된 에너지는 중심크랙(central crack)의 길이와 계면수 변화의 함수인 수식(1)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_m &= \tau_{my}(\frac{\delta_r}{l})\, V \cdot g(k) \\ &= \tau_{my}(\frac{\delta_r}{l})(2\pi Rtl) \cdot g(k) \\ &= 2\pi Rt \cdot \tau_{my}\delta_r \cdot g(k) \end{aligned} \quad (1)$$

이때, τ_{my}는 기지의 전단응력(61MPa, 45% of matrix yield strength),[8] R과 t는 시험편의 반지름과 두께를, δ_r은 원주방향 변위를 나타낸다. 또한 $g(k)$는 계면수 변화에 따른 함수를 의미한다.

시험편이 스플라인 형상으로 압괴 되면서 수반되는 굽힘 모멘트에 의한 흡수에너지와 원주방향의 흡수에너지 및 충격 판과 시험편의 접촉면에 발생되는 마찰열에 의해 흡수되어지는 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_b &= 4\pi RM\theta \\ &= \pi R[\frac{f_y \cdot t^2 \cdot \theta}{4}] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E_c &= \int \sigma_\theta \cdot d\varepsilon \cdot dV \\ &= \int \sigma_\theta \cdot \frac{l\,Sin\theta}{R} 2\pi Rt \cdot dl \\ &= \pi l^2 t \cdot \sigma_\theta . Sin\theta \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_f = \mu P\delta_r \quad (4)$$

여기에서 f_y는 단일 축 방향 인장시험에 의해 결정되어지는 라미나 강도를 의미하며, σ_θ는 원주방향 응력, μ는 마찰계수를 나타낸다.

각각의 흡수에너지 합을 총 에너지로 보고 평균 압괴하중(P_{av})과 마찰에너지에 작용한 수직력(P)는 같으며, 수직 변위(δ_x)와 원주방향 변위(δ_r) 차이는 굉장히 미소하며 같다고 놓아도 무관하다. 따라서 수식(5)와 같은 평균 압괴하중을 구하였으며, 평균 압괴하중을 단면적으로 나누어 평균 압괴 응력 수식을 유도하였다. 일반적인 에너지 흡수는 계산결과 기지의 크랙진전에 의해 80%가 흡수되며, 그 외의 에너지 흡수는 미소하였다.

$$\begin{aligned} E_t &= E_m + E_b + E_c + E_f \\ &= 2\pi Rt(\tau_{my}\delta_r g(k) + \frac{1}{8} f_y t\theta \\ &\quad + \frac{l^2}{2R}\sigma_\theta \cdot Sin\theta) + \mu P\delta_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{av}\delta_x - \mu P\delta_r = 2\pi Rt(&\tau_{my}\delta_r \cdot g(k) \\ &+ \frac{1}{8} f_y t\theta + \frac{l^2}{2R}\sigma_\theta \cdot Sin\theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{av} = \frac{2\pi Rt}{\delta_x - \mu\delta_r}(&\tau_{my}\delta_r \cdot g(k) + \frac{1}{8} f_y t\theta \\ &+ \frac{l^2}{2R}\sigma_\theta \cdot Sin\theta) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{av} &= \frac{P_{av}}{A} = \frac{P_{av}}{2\pi Rt} \\ &= \frac{1}{1-\mu}(\tau_{my} Sin\theta \cdot g(k) + f(\frac{\pi t}{16l} + \frac{d\varepsilon}{2})) \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 f는 라미네이트의 인장강도를 의미하며, 계면수 변화 함수 $g(k)$는 수식(7)과 같은 α, β의 함수로 나타냈다. 단, k는 계면수(interlaminar number)을 의미한다.

$$g(k) = \frac{\beta^{k-2}}{\alpha} \quad (7)$$

3.2 정적 압괴실험

정적 압괴실험은 Shingang 좌굴시험기를 사용하였으며, 로드셀과 액추에이터 사이에 두 개의 압축 지그를 평행하게 설치하고, 10mm/min의 변형률속도로 제어하여 균일한 압축하중이 가해지도록 정적 압괴실험을 행하였다. 또한 시험편 전체의 축 방향 길이의 60%(60mm)까지 변위를 제어하면서 연속적으로 압괴실험을 행하였다. 평균 압괴하중(P_{av})은 압괴하중의 평균으로 계산하였으며, 평균 압괴응력(σ_{av})은 평균 압괴하중을 단위면적(A)으로 나누어 수식(8)과 같이 계산하였다.

$$\sigma_{av} = \frac{P_{av}}{A} = \frac{E_a}{2\pi Rt\,\delta} \quad (8)$$

여기에서 E_a는 흡수에너지, δ는 시험편의 압괴된 변형량을 의미한다.

3.3 충격 압괴실험

충격 압괴실험은 Fig. 1과 같은 수직형 공기압식 충격장치를 사용하였다. 공기압에 의해 가속된 크로스 헤드는 가이드 바를 따라 수직 이동하게 되고, 로드셀 위에 위치한 시험편에 충격하중을 가하게 된다. 로드셀의 검출부인 원주의 중앙에 반도체 스트레인게이지 2매를 중심 축에 대칭으로 부착하고 반도체 스트레인게이지의 저항 변화를 환산하여 하중을 결정하였으며, 크로스 헤드에 부착한 표적(Target)의 이동량을 비접촉식 광학 변위계(ZIMMER OHG사, 100F)가 인식하고, 얻어진 볼트 값을 환산하여 변위를 측정하였다. 또한 측정된 하중-시간 선도와 변위-시간 선도에서 시간을 소거하여 하중-변위 선도를 구하였고, 그 면적을 시험편의 흡수에너지로 하여 계산하였으며, 정적 압괴실험과 같은 방식을 통

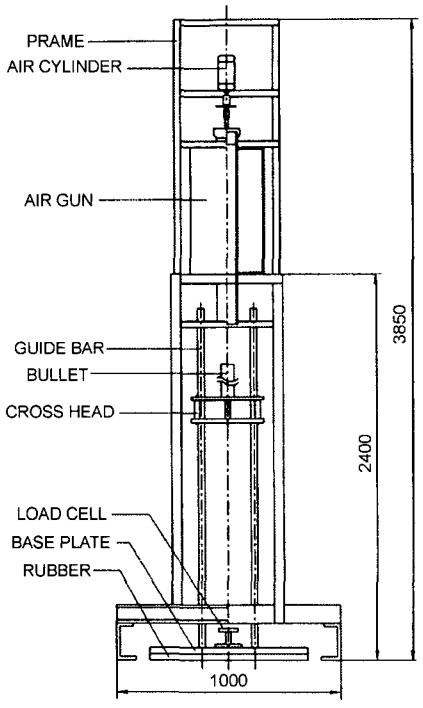


Fig. 1 The vertical crushing testing machine

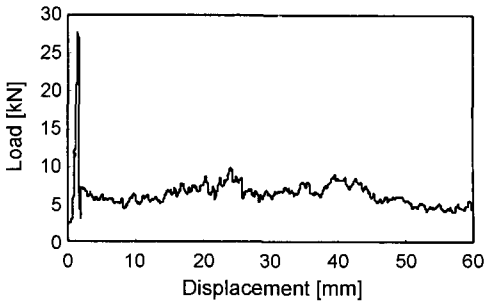


Fig. 2 Typical crushing modes and load-displacement curves

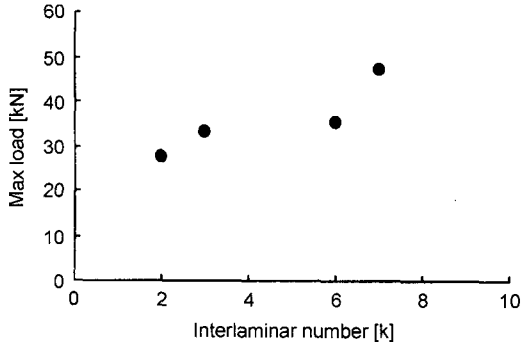
하여 평균 압괴하중, 평균 압괴응력을 구하였다.

Fig. 2에 충격 압괴실험시 얻어진 하중-변위 선도와 압괴형상을 나타냈다.

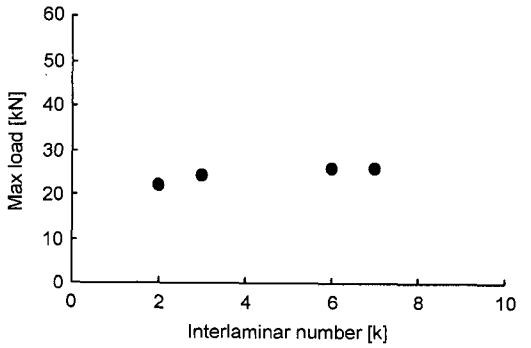
4. 결과 및 고찰

본 연구는 CFRP 복합재 박육부재의 적층조건이 에너지 흡수특성에 미치는 영향에 관하여 규명하고자 수행되어졌다. 정적인 경우에는 3~4회의 실험을, 충격인 경우에는 5~7회의 실험 후 얻어진 데이타의 평균을 Fig. 4와 5에 나타냈다. Fig. 3은 x축에 계면수 변화를 주어 각 시험편의 최대하중을 나타냈으며, Fig. 4는 실험을 통해 얻어진 평균 압괴응력과 이론수식에 따른 그래프 선도를 나타냈다.

계면수 변화에 따른 CFRP 박육부재의 압괴특성에 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 압

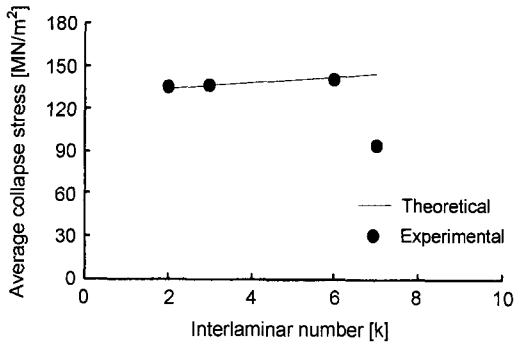


(a) The maximum load versus interlaminar number under static load

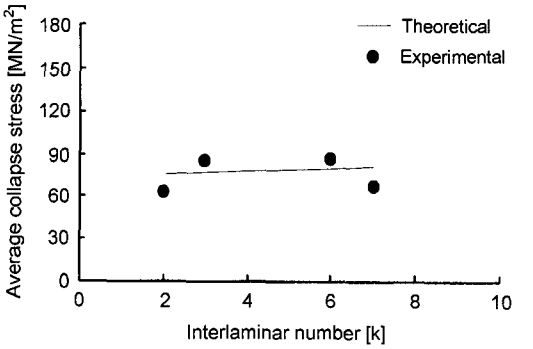


(b) The maximum load versus interlaminar number under impact load

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



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



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

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

괴실험의 경우, 계면수의 변화에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 그 이유는 분당 10mm의 저속 압괴시 계면수가 증가하면 할수록 층간 크랙(Interlaminar Crack)의 수가 증가하고 층간 크랙이 진전하기 위해서는 더 높은 하중을 수반하여야 하기 때문으로 사려된다. 그러나 충격 압괴실험인 경우에는 정적과 달리 그다지 큰 증가를 나타내지는 못했으며, 그 이유는 CFRP 박육부재는 취성재료이며, 충격하중에 의해 층내 크랙(Intralaminar Crack) 및 층간 크랙(Interlaminar Crack)의 성장이 빠르게 진행되어 성장시 발생하는 저항간섭에 의한 하중 및 에너지를 충분히 흡수하지 못하기 때문으로 사려된다.

평균 압괴응력은 Fig. 4와 같이 계면수가 6개인 C-Type이 가장 높게 나타났다. 서론에서도 밝혔듯이 Farley와 Jones는 라미나 굽힘 압괴모드에 있어 층간균열진전에 의한 마찰 및 층내균열 진전시 마찰에 의해 충돌에너지가 흡수된다고 정의한 바 있다. 층 두께는 층내균열 진전에 영향을 미치며, 그 두께가 감소하면 할수록 층내균열의 발생은 어려워진다. 그 결과 균열진전에 의한 충격에너지 흡수 또한 감소하리라 사려된다. 즉, 계면수 변화에 따른 충격 압괴특성은 계면수가 증가할수록 더 높은 평균 압괴응력을 보였으나, 7계면이 되면 층 두께 감소에 따른 층내균열진전의 어려움으로 인하여 6계면보다 더 낮은 압괴특성을 나타낸다고 사려된다.[10]

Gupta[7]는 평균 압괴응력수식을 실험과 비교고찰하기 위하여 로빙(roving)된 Glass/Epoxy 복합재 튜브를 시험편으로 하여 정적실험만을 수

Table 2 The value of αand β

	α	β	$g(k)=\frac{\beta^{k-2}}{\alpha}$
Static	0.57	1.017	
Impact	1.01		

행하였으며, 충격실험은 수행하지 않았다. 그러나 본 연구에서는 일 방향 프리프레그 시트를 이용하여 시험편을 제작하고, 정적 및 충격 압괴실험을 행하였으며, Fig. 4와 같이 실험 값과 이론 값이 일치하기 위해서는 본 논문에서 도입한 계면수 변화 함수($g(k)$)가 어떠한 상수로 나타내야 함을 알 수 있다. 그 결과 얻어진 계면수 변화 함수 $g(k)$의 변수를 Table 2에 나타냈다.

5. 결 론

경량화용 차체구조부재로 사용 가능한 CFRP 적층 박육부재에 대하여 계면수 변화에 따른 영향을 규명하기 위해 다양한 방법으로 시험편을 제작한 후 정적 및 충격 압괴실험을 행하고, 이론수식과 비교 고찰한 결과 최대 압괴하중은 정적 압괴실험의 경우 계면수에 변화에 급격한 변화율을 나타냈다. 그러나 충격 압괴실험인 경우에는 정적과 달리 취성재료의 특성으로 인하여 그다지 큰 증가를 나타내지는 못했다.

계면수의 변화에 따른 압괴특성을 고찰해 보면 평균 압괴응력은 6계면일 때가 가장 높게 나타났으며, 그 이상 계면이 많아지면 오히려 감소함을 알 수 있었다. 또한, 계면수 변화의 함수를 적용한 평균 압괴응력에 대한 이론수식은 정적 및 충격 압괴실험 값과 근사함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1) R. F. Gibson, "Principles of Composite Material Mechanics," McGraw-Hill, pp.13-21, 1994.
2) A. G. Mamalis, D. E. Manolaks, "Crashworthy Behavior of Thin-Walled Tubes of Fibre Glass Composite Materials Subjected to Axial Loading," Journal of Composite Materials, Vol.24, pp.72-91, 1990.
3) B. D. Agarwal, L. J. Broutman, "Analysis and Performance of Fiber Composites," Willey Interscience, pp.36-53, 1990.
4) C. H. Chiu, K. H. Tsai, W. J. Huang, "Effects of Braiding Parameters on Energy Absorption Capability of Triaxially Braided Composite Tubes," Journal of Composite Materials, Vol. 32, No.21, pp.1964-1983, 1998.
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," Journal of Composite Materials, Vol. 31, No.13, pp.1262-1286, 1997.
8) Edt. by G. Lubin, "Hand Book of Composites," Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
9) C. L. Magee, P. H. Thornton, "Design Considerations in Energy Absorption by Structural Collapse," SAE 780434, 1978.
10) 김정호, 양인영, "충돌시 최적 흡수에너지 특성을 갖는 경량화 차체구조용 CFRP 부재의 개발," 대한기계학회 논문집, Vol.22, No. 7, pp.1316-1325, 1998.
11) 김영남, 최효석, 차천석, 임광희, 정종안, 양인영, "CFRP 박육부재의 적층조건이 충격압궤특성에 미치는 영향," 대한기계학회 논문집, Vol.24, No.12, pp.2945-2951, 2000.
12) 이영신, 전병희, 오재문, "복합재료 원통쉘의 진동, 좌굴강도, 충격강도 특성 및 그의 설계최적화에 관한 연구," 한국자동차공학회 논문집, Vol.5, No.4, pp.48 -69, 1997.
13) 양인영, 심재기, 김선규, "충돌에 의한 차체 박육구조부재의 에너지 흡수특성에 관한 연구," 한국자동차공학회 논문집, Vol.3, No. 5, pp.74-81, 1995.