

# Filament winding 공법 GFRP 원형튜브의 에너지 흡수특성에 관한 연구

## A Study on the energy absorption characteristics of GFRP circular tubes fabricated by the filament winding method

김거영\*  
Kim, Geo-Young

구정서\*\*  
Koo, Jeong-Seo

### ABSTRACT

In this paper, quasi-static crushing tests of composite circular tubes under axial compression load are conducted to investigate the energy absorption characteristics. Circular tubes used for this experiment are glass/epoxy (GFRP) composite tubes, which is fabricated by the filament winding method. One edge of the composite tube is chamfered to reduce the initial peak load and to prevent catastrophic failure during crushing process. Two suggested trigger mechanisms for the composite tubes are investigated. Crushing modes are mainly affected by thickness/diameter ratio, and average crushing loads are mainly affected by their cross-sections. Energy absorption characteristics vary significantly as a function of the tube geometry, trigger mechanism, t/D ratio and the cross-sectional shape.

### 1. 서 론

복합재료는 금속재료에 비해 높은 비강도와 비강성, 낮은 열팽창률 등의 여러 우수한 기계적 성질을 가지고 있다는 것은 이미 알려져 있다. 그 중 복합재료의 에너지 흡수특성에 관련된 연구는 아직까지도 끊임없이 진행 중인데 그 이유는 복합재료의 제조방법, 제조조건, 재료구성 등에 따라 수많은 다른 특성의 제품설계가 가능하기 때문이다. 본 연구에서 에너지 흡수특성을 분석할 복합재료는 필라멘트 와인딩 공법으로 제작한 GFRP (glass/epoxy) 원형튜브인데, 기존에는 박스형 튜브의 실험이 주로 다루어 졌으나 단면이 원형인 튜브가 사각튜브보다 에너지 흡수 능력 면에서 좋은 결과를 보여주고 있다.<sup>1,2)</sup> 금속재료는 일반적으로 연성성질에 의하여 좌굴과 접힘 현상의 반복으로 충돌에너지를 흡수한다. 그러나 복합재료는 낮은 파손변형률로 특성 지어지는 고유의 취성성질 때문에 압축하중을 받을 때 파괴에 의하여 압괴가 진행 된다.<sup>3,4)</sup> 안정적인 압괴가 발생하면 금속재료보다 단위 중량당 3배 이상의 충격에너지를 흡수할 수 있을 뿐만 아니라, 압괴하중의 변동이 적다.<sup>5)</sup> 그러나 복합재료의 압괴모드는 좌굴의 유무에 따라 여러 가지 모드로 분류할 수 있으므로 안정적인 압괴를 효율적으로 발생시키기 위해서는 단면의 형상, 제작방법, 두께, 크기, 하중작용 방법과 섬유 배향각, 섬유 및 기지의 종류, 트리거 형태 등의 영향인자들을 적절히 조절해야 한다.<sup>6)</sup>

지금까지 복합재료의 일반적인 에너지 흡수 특성을 금속재료보다 효과적인 것을 알아보기 위해 많은 준정적, 동적 압괴시험을 하여 왔다. 그 특성을 비교하는 중요한 잣대가 바로 비에너지 (SEA, specific energy absorption)이다. 지금까지 밝혀진 에너지 흡수특성에 중요한 영향인자를 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째로 섬유와 기지의 종류 그리고 이들 조합에 따라 에너지 흡수 특성이 다르고 또 충돌 모드에 따라 다른 결과를 보여준다.<sup>2,4)</sup> 둘째로 하중의 방향에 따라 그에 따른 섬유 배향각이 고려된다.<sup>2,7,8)</sup> 셋째로 튜브의 단면 형상, 즉 rectangular<square<circular 순으로 또한 t/D 값이 증가할수록 에너지 흡수 능력이 증가하며 국부좌굴의 가능성이 적어진다.<sup>2,4)</sup> 넷째는 트리거 메커니즘을 적용하여 초기압괴

\* 서울산업대학교 철도전문대학원, 석사과정, 학생회원

E-mail : koojs@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6878

\*\* 서울산업대학교 철도전문대학원, 교수, 정회원

하중의 감소로 안정적인 압괴를 유도하는데, 그 중 베벨트리거가 제작이 용이하면서 가장 많이 쓰이고 있다.<sup>8-11)</sup> 이 외에도 섬유와 기지의 비율,<sup>2,4,8,13-17)</sup> 온도 그리고 튜브에 가해지는 편심 하중<sup>11,18-20)</sup>에 따라 에너지 흡수 특성은 달라진다.<sup>1)</sup>

따라서 본 연구에서는 기존에 잘 다루어지지 않은 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 GFRP 원형 튜브에 준정적인 축 압축 하중이 가해질 때 에너지의 흡수 특성을 평가하여 효율적인 트리거 메커니즘을 규명하고 안정적인 압괴를 위하여 t/D 값의 변화에 따른 압괴특성을 실험적 방법으로 비교 평가해보고자 한다.

## 2. 시험편

본 연구에서 사용한 준정적 압괴실험 대상 시험편은 (주)화성산업의 glass/epoxy 원형 튜브로써 섬유를 축 방향으로부터  $\pm 60^\circ$ 로 감아 필라멘트 와인딩 공법으로 제작하였다. 충격문제인 동적실험에 있어서 뿐만 아니라 준정적 실험에 있어서도 트리거는 초기 최대하중의 크기를 감소시킴으로써 순차적 파괴에 의한 부재의 안정적 압괴를 일으키게 하기 위하여 반드시 필요한데 가장 제작하기 용이하면서 널리 사용되고 있는 베벨트리거 방법을 사용하였다.<sup>12)</sup> 일반적으로 베벨트리거 방법이라 하면 튜브의 바깥쪽을 모따기한 경우인데 이번실험에서는 기존에 다루지 않았던 내측 모따기 까지 고려하여 2가지 경우로 분류해서 제작하였다. 모따기 각도는 튜브의 축 방향을 기준으로  $20^\circ$ 이다. 또한 에너지 흡수 능력과 좌굴특성을 관찰하기 위하여 튜브의 두께와 t/D값을 변화를 주어 제작하였다. Table 1은 시험편의 재원을 나타내며, Fig. 1은 시험편의 trigger mechanism을 보여준다.

Table 1. Configuration of specimens

No	Specimen ID <sup>*1</sup>	길이 [mm]	내경 [inch]	두께 [mm]	t/D	트리거
1	GE3i4	200	3	4	0.0526	내측 베벨
2	GE3i6	200	3	6	0.0789	내측 베벨
4	GE3e4	200	3	4	0.0526	외측 베벨
5	GE3e6	200	3	6	0.0789	외측 베벨

<sup>\*1</sup> Specimen ID 명시 법) GE3i4: Glass/Epoxy, 내경 3inch, 내측베벨(internal Bevel), 두께 4mm

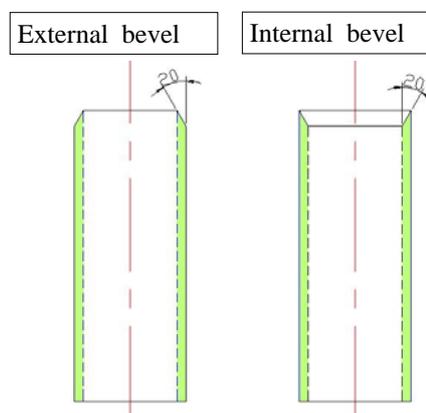


Fig.1 Trigger mechanism

## 3. 실험 방법

필라멘트 와인딩 공법의 GFRP의 에너지 흡수특성을 관찰하기 위한 준정적 압괴실험은 최대부과하중이 500kN인 유압식 서보재료시험기 MTS-810 material test system을 사용하였다. 실험은 12°C에서 0.2mm/sec로 변위제어를 통하여 균일한 압축하중이 가해지도록 준정적 압괴실험을 행하였다. 이 때 트리거 부분이 윗 로드셀 방향으로 향하고 실험 시 편심하중이 작용하지 않도록 로드셀과 시험편의 수평을 맞추었으며, 여러 번의 예비실험을 거쳐 실험결과와 재현성이 좋도록 하였다. 또한 시험편 전체 축방향 길이 (200mm)의 60% (120mm)까지 변위를 제어하면서 연속적으로 압괴실험을 실시하였다. 로드셀의 출력 데이터 갭은 0.2sec이며 한 시험편 당 600sec의 시험시간이 소요되었다. 그리하여 한 시험편 당 총 3000개의 데이터를 얻어 이를 종합/분석/비교 하였다.

준정적 압괴실험에서 복합재 튜브의 에너지 흡수 능력을 평가하는 척도로서 많은 논문에서 언급하고 있는 비에너지 (specific energy), 평균압괴하중 (mean crushing load)과 평균압괴응력 (mean crushing stress)을 고려하였다. 비에너지( $E_s$ )란 튜브가 흡수한 에너지( $E_{abs}$ )를 압괴된 부분의 질량( $m_{destroyed}$ )으로 나눈 값으로 튜브의 단위질량당 흡수할 수 있는 최대에너지이고 다음 식으로 정의된다.<sup>21)</sup>

$$E_s = \frac{E_{abs}}{m_{destroyed}} = \frac{\int_0^{\delta} P dx}{\rho A \delta} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 압괴발생 후의 하중,  $A$ 는 튜브의 단면적,  $\rho$ 는 밀도,  $\delta$ 는 압괴된 거리이다.

또한 평균압괴하중( $F_{avg}$ )은 압괴가 시작된 후 변동하는 하중의 평균하중을 나타내며 다음 식으로 정의된다.<sup>22)</sup>

$$F_{avg} = \frac{\int_0^{\delta} P dx}{\delta} = E_s \rho A \quad (2)$$

평균압괴응력( $\sigma_{cr}$ )은 평균압괴하중에 압괴 전 튜브의 단면적을 나눈 값으로 튜브의 단위 면적당 흡수할 수 있는 최대하중이고 다음 식으로 정의된다.

$$\sigma_{cr} = \frac{F_{avg}}{A} = E_s \rho \quad (3)$$

#### 4. 에너지 흡수 특성

본 연구는 GFRP 원형튜브의 트리거와  $t/D$ 값의 변화에 따른 에너지 흡수 능력 및 압괴모드를 고찰하고자 준정적 압괴실험을 행하였다. 실험을 수행한 결과, 모든 시험편은 트리거가 있는 쪽에서 초기압괴가 시작되었으며, 그 후 순차적으로 압괴가 일어남을 알 수 있었다.

정적 압괴 실험결과 얻어진 결과는 Table 2에 종합하였다. 단면적과  $t/D$  값이 증가한 만큼 평균 압괴하중과 흡수한 에너지가 거의 동일 하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 비에너지와 평균 압괴응력은 미소한 차이는 있지만 거의 모두 비슷한 것을 알 수 있었다. 그 이유는 튜브의 치수와 트리거 메카니즘에 차이가 있을 뿐 모두 동일한 재료와 구조를 가지고 있어 재료가 가지는 특성은 모두 동일하기 때문이다.

Fig. 2는 압괴 거리에 따라 로드셀에 측정된 하중곡선이다. Fig. 2를 살펴보면 동일한 두께를 가지면서 트리거 메카니즘이 다른 GE3i6과 GE3e6은 거의 유사한 하중곡선을 나타내는 반면, 이것보다 두께가 얇은 GE3i4와 GE3e4는 30mm까지 유사하게 압괴되다 내측베벨 트리거인 GE3i4가 30mm 부근부터 국부 좌굴이 생겨났고, 외측베벨 트리거인 GE3e4는 좌굴이 없는 안정적인 압괴가 일어났다. 이는  $t/D$  값이 작아질수록 국부좌굴의 발생 가능성이 높아짐을 알 수 있다. Table 2에서 외측 베벨트리거와 내측 베벨트리거의 결과 값을 비교해 보면 외측 베벨트리거의 에너지 흡수특성이 아주 작은 차이지만 국부좌굴이 발생한 내측 베벨트리거 보다 좋음을 알 수 있었다.

Fig. 3은 압괴 거리에 따른 튜브가 흡수한 에너지 곡선이다. 국부좌굴이 일어난 시험편은 좌굴이 일어난 시점에서

에너지 흡수곡선이 완만해 지며 에너지 흡수가 증가하는 폭이 떨어짐을 알 수 있다. Fig. 4와 5는 시험후 시편의 압괴형상을 나타낸 것이다.

Fig. 6과 7은 시험편에 대한 단위질량당 흡수된 에너지와 단위면적당 흡수된 하중, 즉 비에너지와 평균 압괴응력을 비교하였다. 국부좌굴이 발생한 시험편을 제외하고 모두 비슷함을 알 수 있다. Fig. 8은 평균 압괴하중선도이다. 이 그림에서 알 수 있는바와 같이 단면적이나  $t/D$ 값이 큰 시험편이 평균 압괴하중이 더 높게 나타났다.

Table 2. Results of tests

	GE3i4	GE3i6	GE3e4	GE3e6
$A$ [mm <sup>2</sup> ]	1005	1545	1005	1545
$A^{*2}$ ratio	1	1.537	1	1.537
$t/D$	0.0526	0.0789	0.0526	0.0789
$t/D$ ratio	1	1.5	1	1.5
$F_{avg}$ [kN]	51.83	187.3	118.7	193.2
$F_{avg}$ ratio	local buckling	1.577	1	1.627
$\sigma_{cr}$ [MPa]	51.56	121.1	118.1	125.0
$E_{abs}$ [kJ]	5.651	19.38	12.94	20.00
$E_{abs}$ ratio	local buckling	1.498	1	1.545
$E_s$ [J/g]	26.58	62.46	60.88	64.45

Table 2에 표시된 튜브의 단면적( $A$ ) 도출 과정은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 A &= \pi(r_2^2 - r_1^2) = \pi\left[\left(\frac{D_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_1}{2}\right)^2\right] \\
 &= \frac{\pi}{4}[(D_1 + 2t)^2 - D_1^2] = \pi(tD_1 + t^2) \\
 &= \pi t(D_1 + t)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

여기서  $D_1$ =내경,  $D_2$ =외경,  $D_2 = D_1 + 2t$ 을 나타낸다.

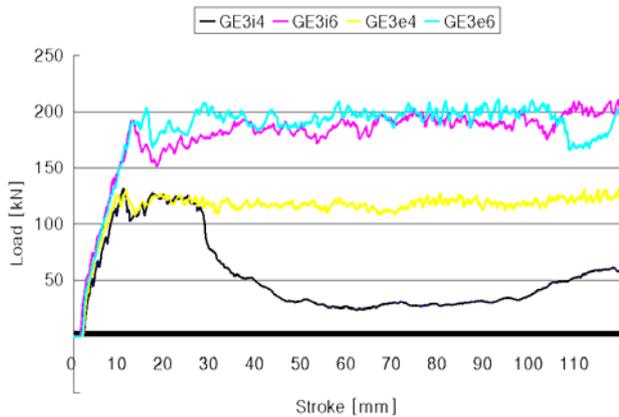


Fig.2 Load and stroke curves by quasi-static crushing tests (Load= $P$ , Stroke= $\delta$ )

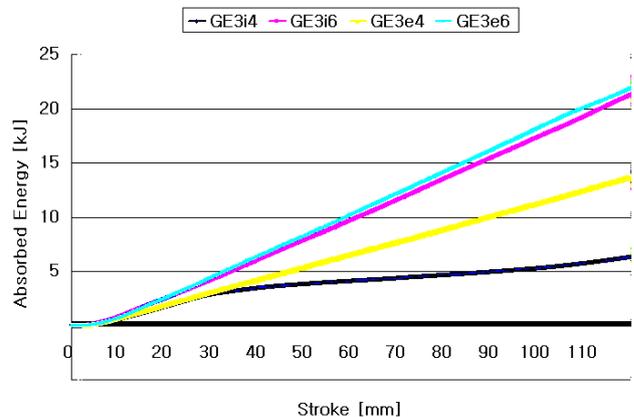


Fig.3 Energy and stroke curves by quasi-static crushing tests (Energy= $E_{abs}$ )



Fig.4 Stable crushing mode for GE3e6



Fig.5 Unstable crushing mode for GE3i4  
(Mean crushing stress= $\sigma_{cr}$ )

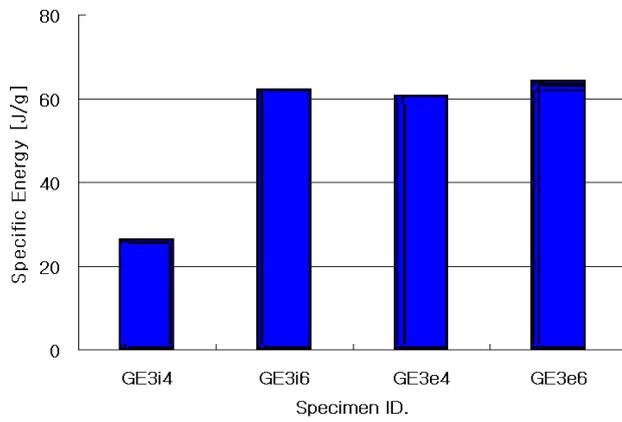


Fig.6 Specific energy for circular tubes  
(Specific energy= $E_s$ )

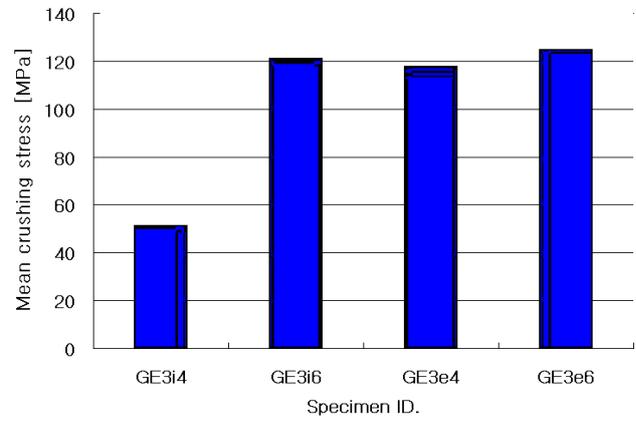


Fig.7 Mean crushing stresses for circular tubes  
(Mean crushing stress= $\sigma_{cr}$ )

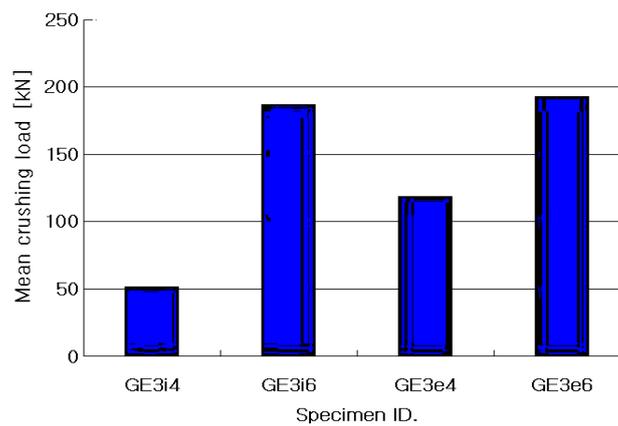


Fig.8 Mean crushing stresses for circular tubes  
(Mean crushing stress= $\sigma_{cr}$ )

## 5. 결론

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 공법 GFRP (glass/epoxy) 원형튜브의 에너지 흡수 특성을 고찰하기 위해 준정적 압괴실험을 행하였다. 시험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 두께가 증가하면 단면적과  $t/D$  값이 증가하고 이와 거의 비례적으로 평균압괴하중이 증가하며 안정적 압괴모드로 변한다. 국부좌굴 압괴 시에는 초기 최대하중을 지속시키지 못하는 불안정한 압괴모드가 발생한다.
- 2) 본 연구에서 사용된 원형튜브의 경우 아주 미소하지만 내측베벨트리거 메카니즘보다 외측베벨트리거 메카니즘이 에너지 흡수 특성 면에서 좋다.
- 3) 국부좌굴의 경계치를 명확하게 구하지는 못하였지만 본 연구에서 추측되는 원형 튜브의 안정적인 압괴의 조건에 해당하는  $t/D$  값은 약 0.06 으로 이 이상이면 금속재료 보다 효율적인 에너지 흡수 능력을 나타낼 수 있다.
- 4) 안정적인 압괴가 일어나면  $t/D$  값과 무관하게 압괴가 발생한 재료의 양에 비례하여 에너지가 흡수되었으며, 이로부터 원하는 평균압괴하중을 추정하여 설계할 수 있다

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부에서 연구비를 지원하여 한국철도기술연구원에서 진행 중인 철도종합안전기술 개발사업 (No. SR06008 )의 연구결과로서 관계자들에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) M. R. Schultz, "Energy absorption capacity of graphite-epoxy composite tubes," M. D. Thesis, Faculty of the Virginia polytechnic Institute and State University, 1998.
- 2) G. L. Farley, "Energy absorption capability of composite tubes and beams," ph. D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1989.
- 3) P. H. Thornton, "Metal and FRP Composite Energy Absorbing Structures," Proc. Advd Composites ConF. ASM/ESD, Dearborn, Michigan, pp. 17-25, 1985.
- 4) P. H. Thornton, J. J. Harwood, and P. Beardmore, "Fiber-reinforced Plastic Composites for Energy Absorption Purpose," Comp. Sci. Tech., Vol 24, pp. 275-98, 1985.
- 5) J. M. Margolis, "Advanced thermoset Composites," Van Nostrand Reinhold Co., 1986.
- 6) C. M. Kindervater, and H. Georgi, "Composite strength and Energy absorption as an aspect of structural crash resistance," Vol 6, pp.189-235, 1993.
- 7) D. Hull, "A unified approach to progressive crushing of fibre-reinforced composite tubes," Compos. Sci. Technol., 40, 377-421, 1991
- 8) C. M. Kindervater, "Energy absorbing qualities of fiber-reinforced plastic tubes," In Proceedings of AHS National Specialist Meeting on Composite Structures, Philadelphia, American Helicopter Society, Paper JV-5, 23-25 March 1983.
- 9) I. Sigalas, M. Kumosa and D. Hull, "Trigger mechanisms in energy absorbing of glass cloth/epoxy tubes," Compos. Sci. Technol., 40, 265-87, 1991.
- 10) D. Hull and J. C. Coppola, "Effect of trigger geometry on crushing of composite tubes," In Materials and Processing-Move into the 90's, ed. S. Benson, T. cook, E. Trewin and R. M. Tuner, Elsevier, Amsterdam, pp. 29-38, 1987.
- 11) M. J. Czaplicki, R. E. Robertson and P. H. Thornton, "Comparison of bevel and tulip triggered pultruded tubes," J. Compos. Mater., 24, 1077-100, 1990.
- 12) P. H. Thornton, "Effect of Trigger Geometry on Energy Absorption in Composite Tubes, Proc. 5th Int. Conf. Comp. Mat. ICCM, San Diego California, pp. 1183-1199, 1985.
- 13) G. L. Farley, "the effects of crushing speed on the energy-absorption capability of composite tubes," J. Compos. Mater., 25, 1314-29, 1991.
- 14) P. H. Thornton, "The crush behaviour of pultruded tubes at high strain rates," J. Compos. Mater., 24, 594-615, 1990.

- 15) D. W. Schmuesser and L. E. Wickliffe, "Impact energy of continuous fiber composite tubes," *J. Engng Mater. Technol.*, 109, 72-7, 1987.
- 16) C. M. Kindervater and K. F. M. G. J. Scholle, "Energy absorption behaviour of filament-wound Dyneema SK60/epoxy tubes. In *New Generation Materials and Processes*," Proceedings of 9th International SAMPE Conference, Milano, ed. F. Saporiti, W. Metari and L. Peroni, pp. 277-92, 1988.
- 17) C. M. Kinervater, "Energy absorption of composites as an aspect of aircraft structural crash resistance. In *developments in the Science and Technology of Composite Materials*," ECCM4, Stuttgart, ed. J. Fuller, G. Gruninger, K. Schulte, A. R. Bunsell and a. Massiah, pp. 643-651, 25-28 September 1990.
- 18) J. N. Price and D. Hull, "axial crushing of glass fibre-polyester composite cones," *Compos. Sci. Technol.*, 28, 211-30, 1987.
- 19) D. G. Pafitis and D. Hull, "Design of fiber composite conical components for energy absorbing structures," *Sampe J.* 27, 29-34, 1991.
- 20) D. C. Fleming and A. J. Vizzini, "The effects of side loads on the energy absorption of composite structures," *J. Compos. Mater.*, 26, 486-99, 1992.
- 21) P. H. Thornton and P. J. Edwards, "Energy Absorption in Composite Tubes," *J. Comp. Mat.*, Vol. 16, pp. 521-544, 1982.
- 22) G. L. Farley, "Effect of Specimen Geometry on the Energy Absorption Capability of Composite Materials," *J. Comp. Mat.*, Vol. 20, pp. 390-400, 1986.