

CFRP 박육부재의 적층조건이 충격압괴특성에 미치는 영향

김영남* · 최효석* · 차천석* · 임광희** · 정종안*** · 양인영****
(1999년 12월 31일 접수)

Influence of Stacking Sequence Conditions on the Characteristics of Impact Collapse using CFRP Thin-Wall Structures

Youngnam Kim, Hyosuk Choi, Chunsuk Cha, Kwanghee Im,
Jongan Jung and Inyoung Yang

Key Words: Energy Absorption Characteristics(에너지 흡수특성), CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics(탄소섬유강화플라스틱), Impact Test(충격시험), Trigger(트리거), Interlaminar Number(계면수)

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. 서론

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 우주비행체의 구조물에 널리 응용되고 있으며, 이와 관련된 수많은 연구가 진행 중에 있다.⁽¹⁻³⁾ FRP 부재가 안정적으로 붕괴될 경우 충격에너지의 흡수는 금속재료

에 비해 단위중량 당 3배 이상이며, 안정적 붕괴를 효율적으로 발생시키기 위해서는 단면의 형상, 적층각도, 두께 등의 영향인자들을 적절히 조절해야 한다.^(2,3) 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.⁽⁴⁻¹²⁾ 그중 Farley와 Jones⁽¹⁰⁻¹²⁾는 연속섬유강화 복합재튜브에 있어 세 가지의 압괴 모드를 제시하였다. 즉, Fig. 1과 같은 횡방향 전단(Transverse Shearing), 라미나 굽힘(Laminar Bending)과 국부좌굴(Local Buckling)에 의해 연속 섬유강화 복합재 튜브는 파괴되며, 연성성질에 의한 좌굴과 접힘 현상의

* 조선대학교 대학원 기계설계과

** 우석대학교 자동차공학과

*** 송원대학 자동차과

**** 회원, 조선대학교 기계공학부

E-mail : iyyang@mail.chosun.ac.kr

TEL : (062)230-7169 FAX : (062)230-7170

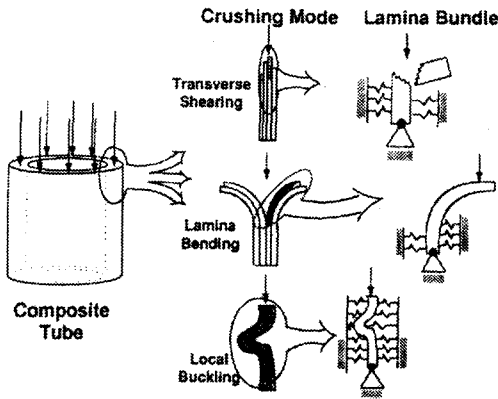


Fig. 1 Crushing process of composite tubes⁽¹¹⁾

반복으로 충돌에너지를 흡수하는 금속재료와는 달리 압축하중을 받을 때 취성파괴에 의하여 붕괴된다. 또한 라미나굽힘압괴모드(Laminar Bending Crushing Mode)의 경우는 층간균열(Interlaminar Crack)진전에 의한 마찰 및 층내균열(Intralaminar Crack)진전의 마찰에 의해 충돌에너지가 흡수된다.

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.

2. 시험편

시험편은 한국화이버(주)에서 생산한 CFRP 프리프레그 시트(Prepreg Sheet)를 이용하였고 CFRP 시험편의 물성치는 Table 1과 같다. CFRP 원통 시험편은 일방향 Carbon/Epoxy 프리프레그 시트(CU125NS) 8매를 축방향을 0°로 하여 맨드릴에 0°와 90°시트를 각각 4매씩 사용하여 적층한 [0/90] 시험편에 계면수의 변화(2, 3, 6, 7개)를

Table 1 Material properties

Characteristics	Fiber	Resin	Prepreg
Density	1.75×10^4 [kg/m ³]	1.24×10^3 [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 °C

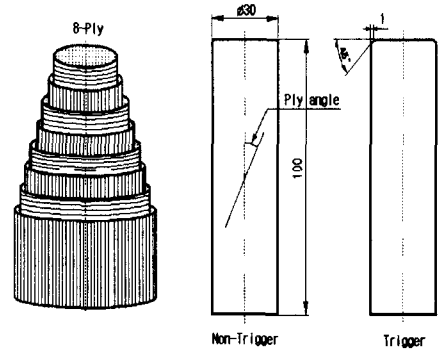


Fig. 2 The shape of specimen

Table 2 Definition of the specimen number

A	T	S	
			A : [0° / 90°] ₂ (I.N. = 2)
			B : [90° / 0°] ₂ (I.N. = 3)
			C : [0° / 90° / 0° / 90°] ₄ (I.N. = 6)
			D : [90° / 0°] ₄ (I.N. = 7)
			T : Trigger
			N : Non-Trigger
			S : Static
			D : Dynamic

※ Note that I.N. is Interlaminar Number

주어 제작하였다. 또한 CFRP 원형 시험편의 성형은 Autocalve를 이용하여 챔버(chamber) 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130℃, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10⁻¹ Pa 까지 진공시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10⁵ Pa 정도 가압시켜 제작하였다. 또한 제작후 Diamond Cutter를 이용하여 길이 100mm, 내경 30mm, 두께는 1.0mm를 갖는 시험편을 제작하였으며, Trigger 유·무에 따른 압계특성을 고찰하기 위해 시험편 일부를 45° Bevel Trigger로 기계 가공하였다. 제작된 시험편의 형상은 Fig. 2와 같으며, Table 2에 제작된 시험편의 기호에 대하여 나타냈다. ATS중 A는 계면수 2개를, B는 3개, C는 6개, D는 7개를 나타내고 있으며, T는 Trigger가 있는 경우, N은 Trigger가 없는 경우를 나타낸다. 또한, S는 준정적인 시험을, D는 충격시험을 행한 시험편 기호를 나타내고 있다.

3. 압계실험

3.1 준정적압계실험

준정적 압계실험은 Fig. 3과 같은 Shingang 좌굴시험기를 사용하였으며, 로드셀과 액추에이터 사이에 두 개의 압축지그를 평행하게 설치하고, 10mm/min의 변형률속도로 제어하여 균일한 압축하중이 가해지도록 준정적 압계실험을 행하였다. 또한 시험편 전체의 축방향 길이(L)의 60% (스트로크 S=60mm)까지 변위를 제어하면서 연속적으로 압계실험을 행하였다. 흡수에너지는 압계실험에서 얻은 하중-변위선도를 적분하여 구하고, 그 값을 압계길이 60mm로 나눔으로써 평균압계하중(\bar{P})을 구하였으며, 평균 압계응력($\bar{\sigma}$)은 평균 압계 하중을 단위면적(A)으로 나누어 계산하였다.

또한 단위질량당 흡수에너지(E_s)는 준정적 압계실험에 의해 시험편에 흡수된 평균압계응력을 비중으로 나누어 식 (1)과 같이 계산하였다.⁽⁵⁾

여기에서 E_s 는 단위 질량 당 흡수에너지(spe-

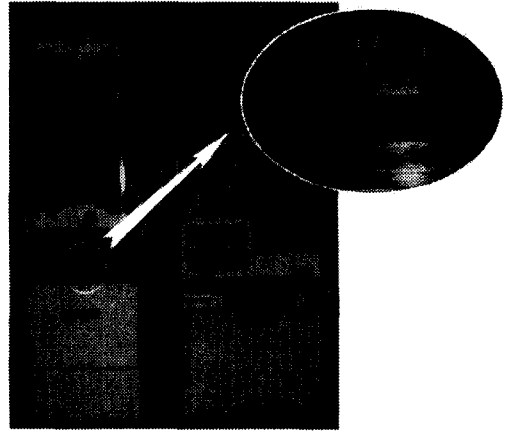


Fig. 3 Shingang buckling test machine

cific energy absorption), ρ 는 시험편의 밀도, $J(=S/L)$ 는 스트로크효율(stroke efficiency factor)이다. 본 연구에서의 스트로크효율은 준정적인 경우 $J=0.6$ 으로 일정하였으며, 충격인 경우에는 $J=0.45\sim 0.55$ 로 나타났다.

$$E_s = \frac{\bar{P}S}{LA\rho} = \frac{\bar{\sigma}}{\rho} J \quad (1)$$

3.2 충격압계실험

CFRP 박육부재의 충격압계 실험을 위하여 수직형 공기압식 충격장치를 사용하였으며, 충격실험기의 개략도와 모습은 Fig. 4와 같다. 공기압에 의해 가속된 크로스헤드는 가이드 바를 따라 수직 이동하게 되고, 로드셀 위에 위치한 시험편에 충격하중을 가하게 된다. 시험편에 작용하는 충격하중은 Fig. 5와 같이 로드셀의 검출부인 원주의 중앙에 반도체 스트레인게이지(KYOWA, KSP-2-120-E4) 2매를 증심축에 대칭으로 부착하고 직렬로 접속하여 인장·압축 및 굽힘에 대한 영향을 제거함으로써 로드셀에 부착된 반도체 스트레인게이지의 저항 변화를 하중으로 환산하여 결정하였으며, 시험편의 압계 시간변화 즉, 변위의 측정은 크로스 헤드에 부착한 표적(Target)의 이동을 Fig. 6에 나타낸 광학식 변위계(ZIMMER

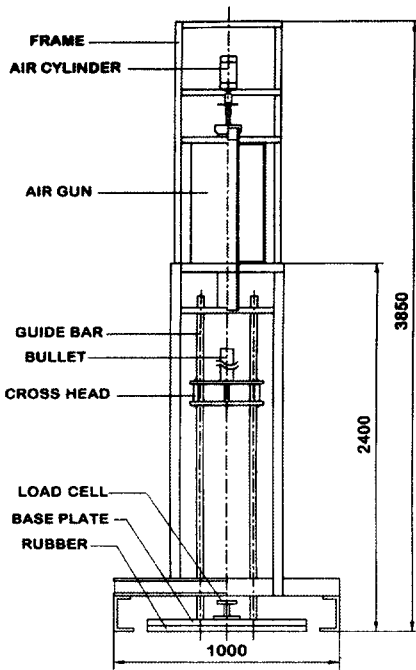


Fig. 4 The vertical crushing testing machine

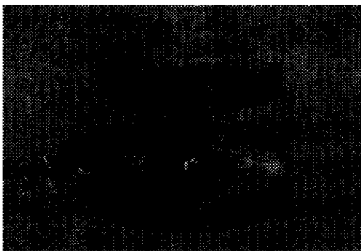


Fig. 5 Load cell

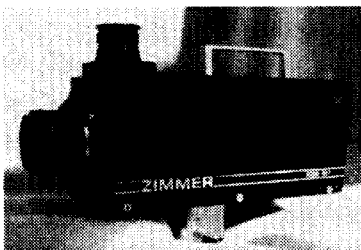


Fig. 6 Optical displacement transducer (Zimmer, 100F)

OHG사, 100F)를 이용하여 측정하였다.

로드셀의 출력전압과 광학식변위계의 변위량은 브리지박스 와 증폭기(Amplifier)를 거쳐 파형기억 장치(DSO : Digital Storage Oscilloscope)에 저장되고 컴퓨터를 이용하여 하중-변위선도 즉, 압력선도를 구하였으며, 충돌 시 시험편의 흡수에너지를 구하였다. 그 결과 Trigger의 유·무 및 계면수에 따른 최대압력하중, 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지를 구하여 각 부재의 압력특성에 관하여 고찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Trigger의 유·무에 따른 CFRP 박육부재의 압력특성에 대해 실험·고찰하고자 시험편 끝부분에 45° Bevel Trigger를 주었으며, 준정적 및 충격압력실험결과 Trigger 유· 무에 따라 초기 Peak 하중의 급격한 차이를 나타냈다. 즉, Fig. 7과 같이 Trigger가 없는 경우에는 초기 Peak 하중이 평균압력하중의 3배 이상 이었으나 Trigger가 있는 경우에는 Trigger에 의한 순차적인 압력 형상을 나타냈다. 이로 인하여 초기 Peak 하중이 평균압력하중에 가깝게 되어 하중-변위선도의 면적인 흡수에너지가 커짐을 알 수 있었다. 결과적으로 Trigger가 있는 CFRP 박육부재가 더 높은 압력특성(평균하중, 흡수에너지)을 나타냈다. 즉 CFRP 복합재료와 같은 재료의 경우 가장 취약한 특성은 취성문제이며, 초기 압력하중(Peak 하중)이 높게 되면 구조물 전체에 하중이 가해지게 되고 그로 인하여 층내 및 층간등에 크랙이 발생되어 초기 압력하중 후의 하중-변위선도 면적은 급격히 떨어지게 된다고 생각한다. 반면 초기 압력하중이 평균하중에 근사했을 경우 Trigger가 있는 부분부터 순차적이고 국부적인 압력을 행함으로 더 높은 에너지 흡수특성을 갖게된다고 생각한다.

본 연구에서는 각 시험편당 12개를 제작하였으며, 일반적으로 준정적인 경우에는 3~4회를, 충격압력실험인 경우에는 7~8회 실험하여 그 평균을 Fig. 8과 9에 나타냈다. Fig. 8, 9는 x축에 계면수 변화를 나타냈으며, y축에 시험편의 최대하

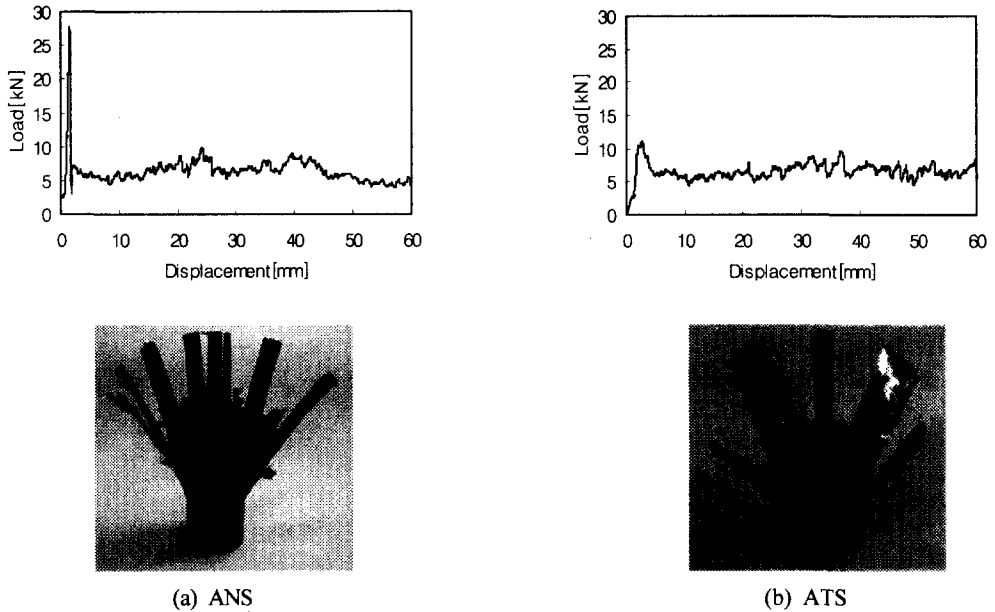


Fig. 7 Typical crushing modes and load-displacement curves

중(Max Load), 흡수에너지(Absorbed Energy), 단위 질량당흡수에너지(Specific Energy Absorption)을 나타냈다.

CFRP 박육부재는 계면수에 비례하여 초기 Peak하중, 즉 최대하중이 증가하리라 예상하여 시험편 제작시 계면수를 2, 3, 6, 7개로 적층하여 제작하였으며 실험결과를 살펴보면 Fig. 8과 9의 (a)에서 알 수 있듯이 다소 선형적인 면을 볼 수 있으나, 실험 초기 예상과는 달리 최대하중은 계면수 증가에 대해 일괄적인 경향을 나타내지 못했다.

흡수에너지와 단위질량 당 흡수에너지는 Fig. 8, 9의 (b), (c)와 같이 계면수가 6개인 C-Type이 가장 높게 나타났다. 서론에서도 밝혔듯이 Farley와 Jones^(10~12)는 라미나 굽힘 압괴모드에 있어 층간균열진전에 의한 마찰 및 층내균열 진전 시 마찰에 의해 충돌에너지가 흡수된다고 정의 한 바 있다. 층 두께는 층내균열진전에 영향을 미치며, 그 두께가 감소하면 할수록 층내균열의 발생은 어려워진다. 그 결과 균열진전에 의한 충격에너지 흡수 또한 감소하리라 사료된다. 즉, 계면수

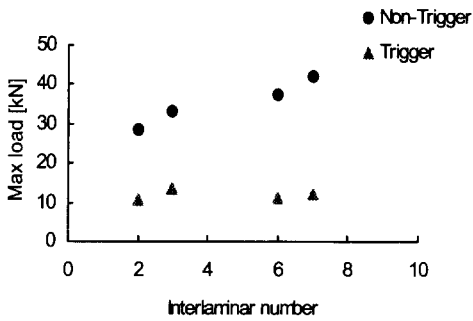
변화에 따른 충격압괴특성은 계면수가 증가할수록 더 높은 단위질량 당 흡수에너지를 보였으나, 7계면이 되면 층 두께 감소에 따른 층내 균열진전의 어려움으로 인하여 6계면보다 더 낮은 압괴특성을 나타낸다고 사료된다.

5. 결론

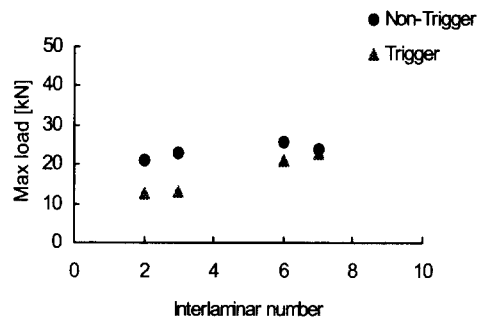
경량화용 차체구조부재로 사용 가능한 CFRP 적층 박육부재에 대하여 계면수 및 Trigger의 유·무 등 다양한 방법으로 시험편을 제작한 후 준정적 및 충격 압괴실험을 행하였으며, 그 결과 얻어진 박육부재의 압괴 특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 최대하중은 실험 초기 예상과는 달리 계면수 증가에 따라 일괄적인 경향을 나타내지 못했다.

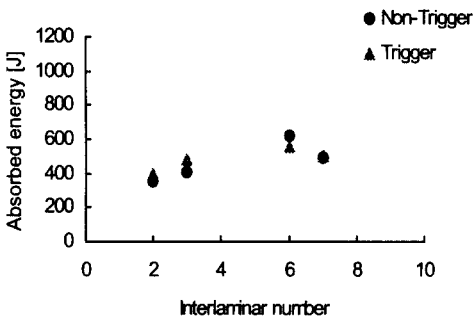
(2) Trigger의 유·무에 따른 CFRP 박육부재의 압괴특성에 대해 고찰해보면 준정적 및 충격압괴 실험결과 Trigger가 있는 CFRP 박육부재가 Trigger에 의한 순차적인 압괴형상을 나타냈으며,



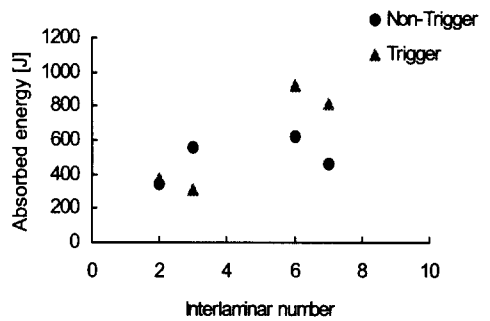
(a) The max load versus interlaminar number



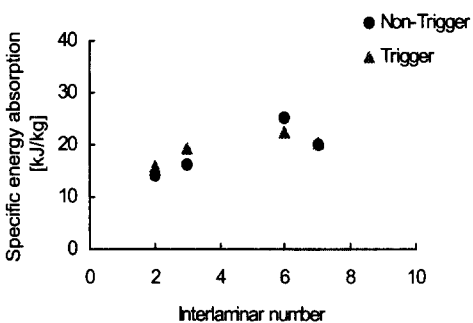
(a) The max load versus interlaminar number



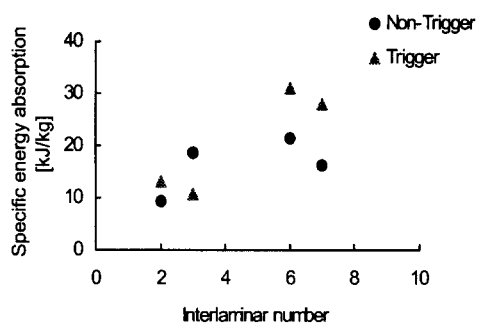
(b) The absorbed energy versus interlaminar number



(b) The absorbed energy versus interlaminar number



(c) The specific energy absorption versus interlaminar number



(c) The specific energy absorption versus interlaminar number

Fig. 8 Static collapse characteristics of the CFRP specimen (Non-Trigger / Trigger)

Fig. 9 Impact collapse characteristics of the CFRP specimen (Non-Trigger / Trigger)

그 결과 더 효율적인 압축특성을 나타냈다.

(3) 계면수 변화에 따른 충격압축특성은 계면수가 증가 할수록 더 높은 단위질량 당 흡수에너지를 보였으나, 7계면이 되면 층간균열에 의한 에너지 흡수보다 층내균열에 의한 에너지 흡수를 수반하기 어려우며 결국 6계면보다 낮은 압축특성을 나타냈다.

후 기

이 논문은 1999년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

- (1) Stephen W. TSAI, 1988, "Composites Design, 4th edition," *Think Composites*, pp. 1-1~1-6.
- (2) 김정호, 양인영, 1998, "충돌시 최적 흡수에너지 특성을 갖는 경량화 차체구조용 CFRP 부재의 개발," 대한기계학회논문집, Vol. 22, No. 7, pp. 1316~1325.
- (3) Thornton P.H., 1979, "Energy Absorption in Composite Structures," *J. Composite Materials*, Vol. 13 pp. 247~262.
- (4) Mamalis A.G. and Manolaks D.E., 1990, "Crashworthy Behavior of Thin-Walled Tubes of Fibreglass Composite Materials Subjected to Axial Loading," *J. Composite Materials*, Vol. 24, pp. 72~91.
- (5) Chiu C.H., Tsai K.H. and Huang W.J., 1998, "Effects of Braiding Parameters on Energy Absorption Capability of Triaxially Braided Composite Tubes," *J. Composite Materials*, Vol. 32, No. 21, pp. 1964~1983.
- (6) Gupta N.K., Velmurugan R. and Gupta S.K., 1997, "An Analysis of Axial Crushing of Composite Tubes," *J. Composite Materials*, Vol. 31, No. 13, pp. 1262~1286.
- (7) Thornton P.H. and Edwards P.J., 1982, "Energy Absorption in Composite Tubes," *Composite Materials*, Vol. 16, pp. 521~545.
- (8) Hamada H., Ramakrishna S., Nakamura M. and Maekawa Z., 1994, "Energy Absorption Behavior of Hybrid Composite Tubes," *Proceeding of the 10th Annual ASM/ESD Advanced Composite Conference*, pp. 511~522.
- (9) Tashiro S., Yokoyama A. and Hamada H., 1998, "Numerical Method of Impact Deformation and Failure in Composite Tubes," *JCOM*, pp. 297~298.
- (10) Farley Gary L., 1983, "Energy Absorption of Composite Materials," *J. Composite Materials*, Vol. 17, pp. 267~279.
- (11) Farley G.L. and Jones R.M., 1992, "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.
- (12) Farley G.L. and Jones R.M., 1992, "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 1, pp. 37~50.