

축압축을 받는 CFRP 적층부재의 에너지흡수특성과 파괴모드에 관한 연구

김정호[†] · 정희범* · 전형주*

순천대학교 기계자동차공학부 BK21 · *순천대학교 기계자동차공학부
(2002. 2. 21.접수 / 2002. 7. 11. 채택)

A Study on the Energy Absorption Characteristics and Fracture Mode of CFRP Laminate Members under Axial Compression

Jeong-Ho Kim[†] · Hoi-Bum Chung* · Hyung-Ju Jeon*

BK21, School of Mechanical and Automotive Engineering, Suncheon National University

*School of Mechanical and Automotive Engineering, Suncheon National University

(Received February 21, 2002 / Accepted July 11, 2002)

Abstract : The object of this paper is to investigate collapse characteristics of CF/Epoxy(Carbon Fiber/Epoxy resin) composite tubes on the change of interlaminar number and fiber orientation angle of outer and to evaluate reappearance of collapse characteristics on the change of tension strength of fibers under static and impact axial compression loads. When a CF/Epoxy composite tube is crushed, static/impact energy is consumed by friction between the loading plate and the splayed fronds of the tube, by fracture of the fibers, matrix and their interface. In general, CF/Epoxy tube with 6 interlaminar number(C-type) absorbed more energy than other tubes(A, B, D-types). The maximum collapse load seemed to increase as the interlaminar number of such tubes increases. The collapse mode depended upon orientation angle of outer of CF/Epoxy tubes and loading status(static/impact). Typical collapse modes of CF/Epoxy tubes are wedge collapse mode, splaying collapse mode and fragmentation collapse mode. The wedge collapse mode was shown in case of CF/Epoxy tubes with 0° orientation angle of outer under static and impact loadings. The splaying collapse mode was shown in only case of CF/Epoxy tubes with 90° orientation angle of outer under static loadings, however in impact tests those were collapsed in fragmentation mode. So that, CF/Epoxy tube with 6 interlaminar number and 90° outer orientation angle presented to the optimal collapse characteristics.

Key Words : CF/Epoxy, composite tube, collapse characteristics, interlaminar number, fiber orientation angle of outer, wedge collapse mode, splaying collapse mode, fragmentation collapse mode

1. 서 론

섬유강화복합재료(FRP)는 금속재료에 비해 비강도 및 비강성이 우수하고, 설계요건에 따라 적층배향을 적절히 선정할 수 있는 유용성 때문에 경량화 및 고강도가 요구되는 자동차, 항공기 및 우주비행체의 구조물에 널리 응용되고 있다. 잠수함, 항공기, 자동차 등의 구조물에 높은 비강성과 비강도 및 낮은 열팽창률 등의 우수한 성질을 갖는 섬유강화

복합재료의 사용이 급격히 확산되고 있으며, 금속재료에 비해서 상당한 중량감소를 얻을 수 있는 Graphite, Carbon, Glass, Boron 등과 같은 복합재료는 금속재료를 대체해 나가는 추세이다^{1~3)}.

자동차용 복합재료에 사용되는 보강섬유는 유리섬유가 대부분 사용되고 있으며, 최근에는 미국, 일본의 자동차 업계에서 경량화 효과를 증대시키기 위하여 탄소섬유를 사용한 복합재료부품의 사용을 추진 중에 있다. 특히, 섬유강화 복합재료의 뛰어난 무게비 충격에너지 흡수특성으로 인해서 충돌 시에 발생하는 충돌에너지를 흡수해야 하는 부재에 섬유

[†]To whom correspondence should be addressed.
kimstme@sunchon.ac.kr

강화 복합재료를 적용하고자 하는 노력이 진행중이며, 이와 관련된 실험 논문⁴⁻¹⁷⁾들이 발표되고 있다. 그러나, 이미 충분한 실험과 검증이 확보되어 있는 금속재료와는 달리, 섬유강화 복합재료는 그 파괴거동에 관련된 충분한 실험과 이를 뒷받침하는 해석적인 연구결과가 충분치 않은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 CF/Epoxy 복합재 튜브가 충격하중을 받는 산업용 구조부재로 사용될 것을 상정하여 설계시 고려해야 할 고강성, 고강도 측면을 중점으로 CF/Epoxy 복합재 튜브의 특성을 평가하고, 계면수의 변화, 최외층 각도의 변화에 따른 압축특성을 고찰함으로써 에너지 흡수특성을 고려한 최적의 산업용 구조부재를 개발하는데 이용될 수 있는 기본적인 설계자료를 얻고자 한다.

2. 시험편

본 연구에서는 산업용 구조부재의 가장 기본형상인 원통 부재를 시험편으로 사용하였다. CF/Epoxy 원통 시험편은 한국화이버(주)에서 생산한 고강도계 일방향 Carbon/Epoxy 프리프레그 시트로 섬유인장강도가 3.53GPa과 4.89GPa인 2종류를 사용하여, 각각 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 하여 적층하였으며, 원만한 이형작업을 위하여 탭핑(tapping)된 맨드릴에 0°와 90° 시트를 각각 4매씩 사용하여 적층구성을 Table 1과 같이 변화시켜 제작하였다. 최외층 각도가 에너지 흡수능력에 미치는 영향에 관하여 고찰하기 위하여 동일한 계면수와 적층배향을 갖는 시험편에 최외층각도에 변화를 주어 제작하였다.

시험편의 성형은 Photo. 1과 같은 오토클레이브(autoclave)를 이용하였으며, 챔버 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화 온도 130℃, 유지시간을 90분으로 하여 제작하였다. 성형시에 컴프레셔에 의해서 오토클레이브 압력을 3×10^5 Pa 정도 가압시켜 제작하였다. 제작 후 잔류응력을 제거하기 위하여 다이아몬드 커터기를 이용하여 길이 100mm, 내경 30mm, 두께 1.0mm를 갖는 시험편을 제작하였으며, 시험편의 형상은 Fig. 1에 나타났다. 시험편의 기호를 Table 1에 나타냈다. C1은 섬유의 인장강도가 3.53GPa인 경우를, C2는 섬유의 인장강도가 4.89GPa인 경우의 프리프레그 시트를 이용하여 제작한 시험편을 나타낸다. A, B, C, D는 적층 형태에 따라 구분한 것이며, A는 계면수 2개를 갖도록 $[0_2 / 90_2]_S$ 또는 $[90_2 / 0_2]_S$

로 적층한 시험편으로써 A 타입의 전자의 최외층 각도는 0°이고 후자와 같이 적층하였을 경우 최외층 각도는 90°가 된다. 또한, B는 계면수 3개를 갖도록 $[90_2 / 0_2]_2$ 또는 $[0_2 / 90_2]_2$, C는 계면수 6개를 갖도록 $[0/90]_{2S}$ 또는 $[90/0]_{2S}$, D는 계면수 7개를 갖도록 $[90/0]_4$ 또는 $[0/90]_4$ 으로 적층한 경우를 나타내는 것이며, 최외층 각도가 0°인 경우에는 00으로 90°인 경우에는 90으로 표기하였다.

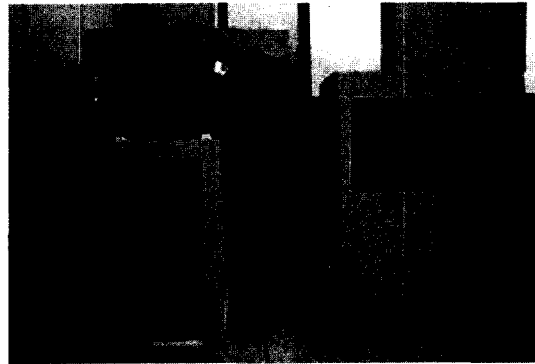


Photo. 1. Autoclave

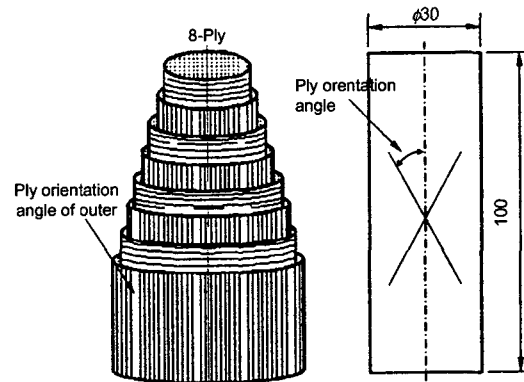


Fig. 1. The shape of specimen

Table 1. Definition of the specimen number

C1(C2)	A(B, C, D)
Tension strength of fiber	A : $[0_2 / 90_2]_S$ or $[90_2 / 0_2]_S$
C1 : $\sigma_f = 3.53\text{GPa}$	B : $[90_2 / 0_2]_2$ or $[0_2 / 90_2]_2$
C2 : $\sigma_f = 4.89\text{GPa}$	C : $[0/90]_{2S}$ or $[90/0]_{2S}$
	D : $[90/0]_4$ or $[0/90]_4$
00(90)	S(I)
	00 : Orientation angle of outer is 0° S : Static
	90 : Orientation angle of outer is 90° I : Impact

3. 압케실험

정적 압케실험은 만능재료시험기를 사용하였으며, 로드셀과 액츄에이터 사이에 두 개의 압축지그를 평행하게 설치하고, 변형률속도의 영향이 나타나지 않도록 10mm/min.으로 균일한 압축하중이 가해지도록 정적 압케실험을 행하였다. 시험시 시험편 전체의 축방향 길이의 60%(60mm)까지 변위제한 압케하였다.

일반적으로 정적 압케실험은 각 시험편당 5~7회 수행하여, 실험에서 얻은 평균값의 오차 범위 5%내 데이터의 평균값을 취했다. 압케실험 후 얻어진 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 적분하여 부재 내에 흡수된 에너지량을 구하였으며, 이것은 평균하중에 변위량을 곱한 것과 같다. 또한, 평균 압케응력은 식(1)과 같이 평균 압케하중을 시험편의 단면적으로 나누어 구하였다.

$$\sigma_{av} = \frac{P_{mean}}{A} = \frac{E_a}{2\pi R t \delta} \quad (1)$$

여기서, σ_{av} 는 평균 압케응력, P_{mean} 는 평균 압케하중(E_a/δ), E_a 는 흡수에너지이며, A 는 단면적을 나타낸다.

Photo. 2의 압케모드를 살펴보면 최외층 각도가 0°인 경우에는 썬기형 압케모드(wedge collapse mode)로 90°인 경우에는 스플레이형 압케모드(splaying collapse mode)로 압케되었다.

충격 압케실험은 제작한 충격장치를 사용하였으며, 이는 크로스헤드를 수직하향으로 자유낙하시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식으로 충격시험기를 Photo. 3에 나타냈다.

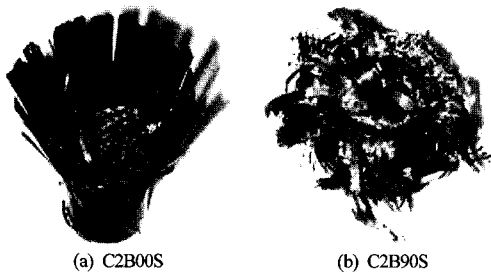


Photo. 2. The shape of CF/Epoxy specimen after static test

측정된 하중-시간 및 변위-시간 데이터에서 시간성분을 소거하여 압케가 진행되는 과정의 하중-변위 선도 즉, 압케선도를 구하였으며, 정적 압케특성 해석과 동일하게 하중에 대한 변위의 적분을 통하여 CF/Epoxy 복합재 튜브의 흡수에너지 E_a 를 구하고, 평균압케하중 P_{mean} 및 평균압케응력 σ_{av} 을 구하여 각 복합재 튜브의 압케특성에 관하여 고찰하였다.

충격속도는 크로스헤드가 시험편에 충돌하기 직전의 속도를 측정하기 위해 레이저 속도측정 장비를 이용하였으며, 이때 속도 6.26m/sec의 경우 충격에너지는 크로스헤드(질량 40 kg)의 운동에너지와 동일한 783Joule을 나타냈다.

Photo. 4의 압케모드를 살펴보면 최외층 각도가 0°인 경우에는 정적 압케실험과 같이 썬기형 압케모드(wedge collapse mode)를 나타냈으나, 90°인 경



Photo. 3. The vertical crushing testing machine

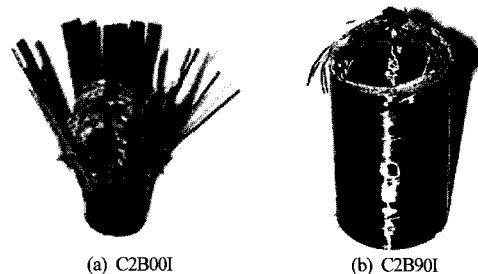


Photo. 4. The shape of CF/Epoxy specimen after impact test

우에는 내·외측으로 확장되어 압제되는 스플라이닝 압제모드와는 달리 굽힘의 영향을 견디지 못하고 파편(debris)의 형태로 주위로 비산되는 분열형 압제 모드(fragmentation collapse mode)를 보였다.

4. 결과 및 고찰

본 연구는 CF/Epoxy 복합재 튜브의 최외층 각도 변화에 따른 압제특성 및 그 재현성(섬유의 인장강도 변화에 따른)을 고찰하고자 정적 및 충격 압제실험을 행하였다. 정적인 경우에는 5~7회의 실험을, 충격인 경우에는 7~10회의 실험 후 얻어진 데이터의 평균을 Tables 2, 3에 나타냈다. Table 2는 정적 압제실험후 얻어진 최대 압제하중 및 평균 압제응력이며, Table 3은 충격 압제실험후 얻어진 결과이다. 또한, 그 얻어진 결과를 Figs. 2와 3에 나타냈다.

Fig. 3(a)를 살펴보면 정적 압제실험에서 CF/Epoxy 복합재 튜브의 최대 압제하중은 계면수가 2, 3, 6, 7개로 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, Fig. 3(b)를 살펴보면 평균 압제응력은 계면수가 증가함에 따라 6 계면수를 갖는 시험편 까진 증가하다가 7 계면수를 갖는 시험편에서 감소하는 경향을 나타냈다. 그 이유는 CF/Epoxy 복합재 튜브의 가장 큰 에너지 흡수 인자는 크랙(층간크랙, 층내크랙, 중심크랙) 진전이며, 계면수가 증가한다는 의미는 층간크랙을 유발시킬 수 있는 경

Table 2. Collapse test results of CF/Epoxy tubes after static test

Spec.	Maximum collapse load P_{max} [kN]	Average collapse stress σ_{av} [MPa]
C1A00S	20.40	54.92
C1B00S	24.00	67.25
C1C00S	28.92	69.96
C1D00S	30.44	60.81
C1A90S	24.23	93.00
C1B90S	25.75	90.47
C1C90S	30.63	94.27
C1D90S	33.26	84.36
C2A00S	28.51	62.08
C2B00S	33.26	79.76
C2C00S	37.60	94.34
C2D00S	41.84	74.90
C2A90S	29.50	114.29
C2B90S	34.39	116.10
C2C90S	39.38	121.60
C2D90S	47.04	94.13

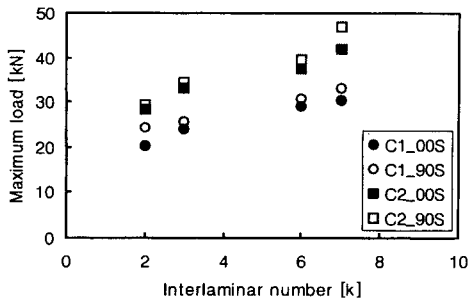
Table 3. Collapse test results of CF/Epoxy tubes after impact test

Spec.	Maximum collapse load P_{max} [kN]	Average collapse stress σ_{av} [MPa]
C1A00I	9.54	45.03
C1B00I	10.24	57.69
C1C00I	12.01	59.95
C1D00I	11.93	36.35
C1A90I	18.31	58.05
C1B90I	19.59	58.95
C1C90I	20.17	63.20
C1D90I	21.36	46.47
C2A00I	12.78	57.78
C2B00I	14.05	60.67
C2C00I	15.65	67.45
C2D00I	15.66	48.37
C2A90I	22.03	71.34
C2B90I	24.11	72.42
C2C90I	25.83	73.60
C2D90I	25.96	57.14

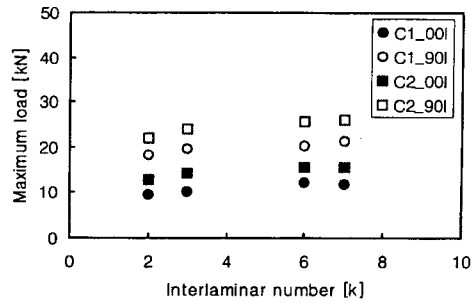
우의 수가 증가한다는 의미이며, 결국 평균 압제응력은 증가하게 된다. 그러나, 7계면이 되면 층간크랙 수가 증가함에 따라 층 두께의 감소로 인하여 층내크랙을 유발시킬 수 있는 경우의 수는 감소하게 되며(계면수는 층간크랙을 유발시킬 수 있는 인자이며 동일한 플라이 수에 있어 계면수의 증가는 동일 각도 플라이의 두께, 즉 층 두께를 감소시키는 결과를 가져오게 되고 그 결과 층 두께의 감소로 인하여 층내크랙의 발생빈도는 감소하게 된다.) 결국 층간크랙 수의 증가로 인하여 다소 평균 압제응력은 증가하나 이와 더불어 층내크랙 수의 감소로 인하여 층내크랙 진전이 충분히 일어나지 않아 결국 평균 압제응력은 감소하게 된다고 생각된다. Fig. 4는 충격 압제실험 후 얻어진 최대 압제하중 및 평균 압제응력을 비교한 것이다.

Fig. 4(a)를 살펴보면 충격 압제실험에서 CF/Epoxy 복합재 튜브의 최대 압제하중은 계면수가 2, 3, 6, 7개로 증가함에 따라 정적 실험과 달리 그다지 큰 경사각을 보이지 않았다. 이는 CF/Epoxy 복합재 튜브는 취성부재이며 짧은 시간에 가해지는 충격하중에 의해 압제되어지므로 순간적으로 부재 전체에 미소크랙이 발생하며, 그 결과 계면수 변화에 따른 최대 압제하중의 변화가 작다고 사려된다.

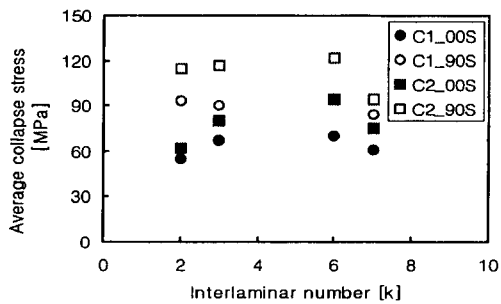
Fig. 4(b)를 살펴보면 평균 압제응력은 최외층 각도가 0°인 복합재 튜브의 경우 계면수가 증가함에 따라 6 계면수를 갖는 시험편 까진 그다지 큰 압제증가



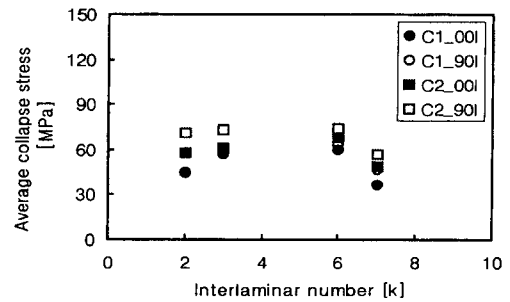
(a) The maximum load versus interlaminar number



(a) The maximum load versus interlaminar number



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



(b) The average collapse stress versus interlaminar number

Fig. 3. Collapse characteristics of CF/Epoxy specimens under static load

Fig. 4. Collapse characteristics of CF/Epoxy specimens under impact load

의 변화를 나타내지 않았으며, 7 계면수를 갖는 시험편에서 감소하는 경향을 나타냈다. 따라서, 충격 압력실험도 정적 압력실험과 유사한 경향을 보였다.

5. 결론

1) 계면수 변화에 따른 압력특성을 살펴보면, 정적 및 충격 압력시 평균 압력응력에 있어 최외층 각도가 0°인 복합재 튜브는 계면수가 증가함에 따라 6 계면수를 갖는 복합재 튜브까지는 증가하다가 7 계면수를 갖는 복합재 튜브에서 감소하는 경향을 나타냈으며, 최외층 각도가 90°인 경우에는 2, 3, 6 계면수 모두 큰 차이를 보이지 않았으나 7 계면수에서 감소하는 경향을 보였다.

2) 정적 및 충격 압력하에서 최외층 각도에 따른 평균 압력응력은 최외층 각도 90°를 갖는 복합재 튜브가 최외층각도 0°를 갖는 복합재 튜브보다 증가하는 경향을 보였다.

3) CF/Epoxy 복합재 튜브의 압력모드를 살펴보

면, 정적압력 하에서 압력모드는 계면수 변화에 관계없이 최외층 각도가 0°인 복합재 튜브는 썩기형 압력모드로 90°인 복합재 튜브는 스프레이 압력모드로 압력되었다. 충격 압력하에서는 최외층 각도가 0°인 복합재 튜브는 정적 압력과 같이 썩기형 압력모드로 압력되었으나, 90°인 복합재 튜브의 경우에는 분열 압력모드로 압력되었다.

4) CF/Epoxy 복합재 튜브의 정적 및 충격 압력특성에 대한 재현성을 평가하고자 섬유인장강도를 변화를 주어 실험을 행하였으며, 그 결과 충분한 재현성이 있다고 사려된다.

감사의 글 : 이 논문은 2001년도 순천대학교 공과대학 학술재단 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1) Jack R. Vinson. "The Behavior of Shells Composed of Isotropic and Composite Materials," Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-2113-8, 1993.

- 2) 김선규, 심재기, 양인영, “충돌에 의한 차체 박육구조부재의 에너지 흡수특성에 관한 연구,” 한국자동차공학회 논문집, Vol. 3, No. 5, pp. 74-81, 1995.
- 3) 김정호, 양인영, “충돌시 최적 흡수에너지특성을 갖는 경량화 차체구조용 CFRP 부재의 개발,” 대한기계학회 논문집, Vol. 22, No. 7, pp. 1316-1325, 1998.
- 4) P. H. Thornton, “The Crush Behavior of Pultruded Tubes at High Strain Rates,” *J. Composite Materials*, Vol. 24, pp. 594-615, 1990.
- 5) W. H. Tao, R. E. Robertson and P. H. Thornton, “Effects of Material Properties and Crush Conditions on the Crush Energy Absorption of Fiber Composite Rods,” *Composites Science and Technology*, Vol. 47, pp. 405-418, 1993.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) G. L. Farley, R. M. Jones, “Crushing Characteristics of Composite Tubes with "Near-Elliptical" Cross Sections,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No. 12, pp. 1741-1751, 1992.
- 9) A. H. Fairfull and D. Hull, “Energy Absorption of Polymer Matrix Composite Structures: Frictional Effects,” *Introduction of Structural Failure*. Edtd. by T. Wierzbicki and N. Jones, New York: Wiley, pp. 255-279, 1989.
- 10) D. Hull, “A Unified Approach to Progressive Crushing of Fiber-Reinforced Composite Tubes,” *Composites Science and Technology*, Vol. 40, No. 3, pp. 377-421, 1991.
- 11) G. L. Farley, “Relationship Between Mechanical-Property and Energy-Absorption Trends for Composite Tubes,” NASA Technical Paper, OMB No. 0704-0188, 1992.
- 12) D. R. Ambur, J. H. Starnes, “Effect of Curvature on the Impact Damage Characteristics and Residual Strength of Composite Plates,” Presented at the 39th AIAA Structures, No. 98-1881, 1998.
- 13) G. Zhou, G. A. O. Davies, “Impact Response of Thick Glass Fibre Reinforced Polyester Laminates,” *Int. J. Impact Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 357-374, 1995.
- 14) 김영남, 김지훈, 양인영, “경량화용 복합재 튜브의 적층구성이 흡수에너지특성에 미치는 영향,” 한국정밀공학회 논문집, Vol. 18, No. 11, pp. 34-41, 2001.
- 15) 김영남, 차천석, 양인영, “차체구조용 복합재 박육부재의 축압괴특성에 관한 연구,” 자동차공학회 논문집, Vol. 9, No. 6, pp. 195-200, 2001.
- 16) Y. N. Kim, K. H. Im, J. W. Park and I. Y. Yang, “Experimental Approach on the Collapse Mechanism of CFRP Composite Tubes,” *Reviews of Progress in QNDE*, pp. 369-376, 2000.
- 17) K. H. Im, Y. N. Kim, J. W. Park, J. K. Sim and I. Y. Yang, “Energy Absorption Characteristics of CFRP Composite Tubes,” *Proceedings of the 4th International Symposium on Impact Engineering*, pp. 875-880, 2001.