

## 적층각 및 형상 변화에 따른 CFRP 구조부재의 동적 특성

여인구<sup>a</sup>, 최주호<sup>a</sup>, 양인영<sup>b\*</sup>

## Dynamic Characteristics of CFRP Structure Member According to Change the Stacking Angle and Shape

In-Goo Yeo<sup>a</sup>, Ju-Ho Choi<sup>a</sup>, In-Young Yang<sup>b\*</sup><sup>a</sup> Department of Advanced Parts and Material Engineering, Graduate School, Chosun Univ., Republic of Korea<sup>b</sup> Department of Mechanical Design Engineering, Chosun Univ. 309 Pilmun-daero Dong-gu Gwangju 501-759, Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	7	March	2013
Revised	17	April	2013
Accepted	17	April	2013

## Keywords:

CFRP

Impact energy

Absorbed energy

Dynamic characteristics

## ABSTRACT

Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) has many desirable qualities, including being lightweight and very strong. These characteristics have led to its use in applications ranging from small consumer products to vehicles. Circular and square CFRP members were fabricated using 8ply unidirectional prepreg sheets stacked at different angles ( $[+15^\circ/-15^\circ]_4$ ,  $[+45^\circ/-45^\circ]_4$  and  $[90]_8$ , where  $0^\circ$  coincides with the axis of the member). Based on the collapse characteristics of a CFRP circular member, the collapse characteristics and energy absorption capability were analyzed. Impact collapse tests were carried out for each section member. In this study, the impact energies at crossheads speeds of 5.52 m/s, 5.14 m/s and 4.57 m/s were 611.52 J, 529.2 J and 419.44 J (circular member) 2.16 m/s, 1.85 m/s and 1.67 m/s are 372.4 J, 274.4 J and 223.44 J (square member). The purpose is to experimentally examine the absorption behavior and evaluation the strength in relation to changes in the stacking configuration when the CFRP circular members with different stacking configurations were exposed to various impact velocities. In addition, the dynamic characteristics were considered.

## 1. 서론

최근 차량에 적용되는 핵심기술의 개발은 고안전도 및 편의성 향상기술과 환경보호를 위한 차량기술로 집약될 수 있다. 이러한 발전과 더불어 많은 문제점이 대두 되었는데 이것은 차량의 무게증가와 배기가스 방출량의 증가로 인한 환경오염 문제이고 안전 및 편의성을 위한 차량의 개발은 차량의 무게 증가를 요구하고 있는 반면, 환경보호 차원에서 요구되는 차량의 기술적 요구사항은 차량

의 경량화를 요구하고 있다. 따라서 자동차의 설계는 안전성이 확보된 상태에서 차량의 중량을 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 한다<sup>[1]</sup>.

차량 충돌 시 발생하는 충돌에너지를 차량의 승객이 고스란히 받을 경우 승객의 안전은 매우 위험하게 된다. 이에 대한 대책으로써 충돌 시 발생하는 충돌에너지를 차체구조부재의 변형에 의한 에너지 흡수로 완화시킴과 동시에 승객의 생존공간을 확보할 수 있도록 차실부분은 견고하면서도 적절한 변형을 갖는 차체구조로 설계

\* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-7840

Fax: +82-62-222-7705

E-mail address: iyyang@chosun.ac.kr (In-Young Yang).

되어야 한다. 따라서 자동차가 충돌할 경우 차체구조부재의 압괴모드 및 에너지흡수특성을 고려한 설계기법이 아주 중요하며 최적의 안전성능을 갖는 부재의 개발이 대단히 중요하다. 특히, 경량화기술은 알루미늄합금의 개발에 의해 비약적인 발전을 이루었고, 이와 더불어 복합재료와 같은 고기능재료의 연구, 개발은 끊임없이 계속되고 있으며, 새로운 재료가 계속적으로 발명되고 활발히 진행되고 있다<sup>[2-7]</sup>.

본 연구에서는 이러한 복합재료 중에서도 대표적인 경량화 재료인 CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic, 이하 CFRP라 한다)를 사용하여 시험편을 제작하여 CFRP 경량화 구조부재가 충격하중을 받을 경우를 상정하여 충격특성을 정량적으로 평가하고자 한다. CFRP는 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변하는 이방성 재료이기 때문에 적층각의 변화에 따른 CFRP 원형부재와 사각부재의 압괴모드와 에너지 흡수 특성을 비교분석하여 가장 효율적인 에너지 흡수특성을 갖는 차체구조부재를 설계하는데 유용한 자료를 얻고자 한다.

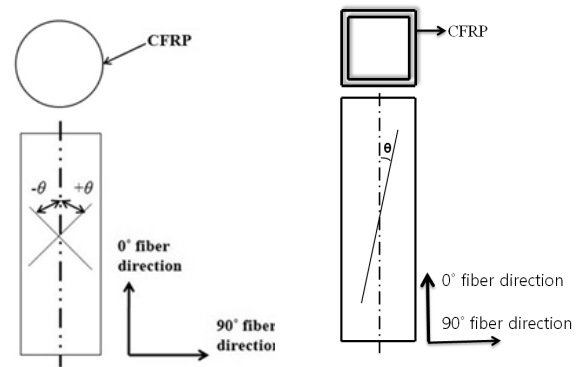
에너지 흡수 특성을 고찰하고자 적층각을 변화시켜 적층하였는데, 이는 외부 충격 시 적층각의 변화에 따른 충격특성을 관찰하기 위함이다. 또한 충격특성은 기온이 높을수록 충격에 민감함을 관찰하기 위함이다.

## 2. 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 CFRP 프리프레그시트를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. CFRP 프리프레그 시트는 한국화이바(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트를 사용하였으며 실험에 사용된 시험편의 형상은 Fig. 1에 나타내었으며 프리프레그 시트의 물성치는 Table 1에 나타내었다. CFRP 원형부재 및 사각부재는 적층조건에 따라 영향을

Table 1 Material properties of CFRP prepreg sheet

	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg sheet
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.83 × 10 <sup>3</sup>	1.24 × 10 <sup>3</sup>	-
Poisson's ratio	-	-	0.3
Young's modulus [Gpa]	240	3.60	132.7
Tensile strength [Gpa]	4.89	0.08	0.3
Resin content [%Wt]	-	-	33



(a) Circular member (b) Square member

Fig. 1 Configuration of CFRP specimens

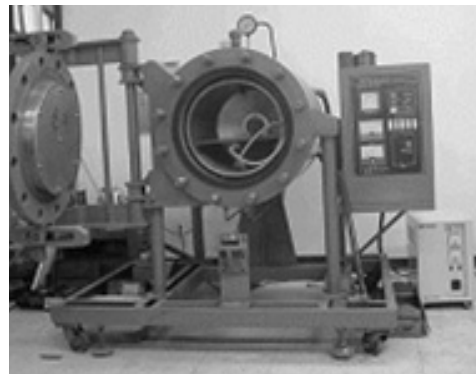


Fig. 2 Autoclave

받기 때문에 적층각 구성에 따른 에너지흡수특성을 비교 고찰하고자 적층각을 변화([+15° / -15°]<sub>4</sub>, [+45° / -45°]<sub>4</sub> and [90°]<sub>8</sub>)시켜가며 성형하였다.

적층각의 변화는 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 축방향 0°를 기준으로 각 적층각도에 따라 8 ply를 교차되게 적층하였다. 90°의 경우는 교차되지 않기 때문에 8 ply모두 같은 방향으로 적층하였다.

시험편의 성형은 Fig. 2와 같이 오토클레이브를 이용하여 챔버 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130°C, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였고, 성형 시 열 수축 테이프에 의한 압력으로 수지흐름(resin flow)을 유도 하였으며 진공펌프에 의하여 진공백 속을 10<sup>-1</sup> Pa까지 진공시킨 후 압축기에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10<sup>5</sup> Pa까지 가압시켜 제작하였다. 또한 모든 시험편은 단부효과가 나타나지 않고 좌굴이 생기지 않으면서 주기적으로 반복적인 압제가 일어나도록 하기 위하여 다이아몬드 커터기를 사용하여 120 mm의 길이로 절단 하였다. CFRP의 취약한 문제점은 취성문제에 의해 층간 및 층내 크랙이 성장하게 되어 초기압괴하중 이후 흡수에너지가 낮아지는 것을 방지하기 위하여 한쪽 끝단에 45°의 트리거를 주어 순차적으로 압제를 유도하여 높은 에너지 흡수 특성을 갖게 하였다<sup>[8-10]</sup>.

### 3. 압괴실험

충격압괴실험은 공기압 수직식 충격장치를 사용하였다. 이 장치는 공기압 가속장치를 부착한 실험장치로서 크로스헤드를 수직방향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하 시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다. 충격실험기의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 일반 강관으로 제작된 크로스헤드 위치 콘트롤러는 충격시험기의 사이트에 고정되어 공기압을 통해 크로스헤드의 높이를 제어함으로써 자동으로 일정한 위치에너지를 가지게 하는 장치이다. 작동은 스위치를 통하여 공기압을 주입하거나 뺄 때 자동으로 제어되기 때문에 최소한의 오차손실을 줄이기 위함이다.

충격에너지의 크기는 크로스헤드(40 kg)의 낙하속도를 측정하여 산출 하였다. 충돌 시에 나타나는 스트레인 게이지의 저항변화는 리드선을 통하여 브리지박스와 동적변형증폭기를 거쳐 전압변화로 증폭된 후 파형 기억장치인 DSO (Dynamic strain oscilloscope)를 지나 컴퓨터에 하중-시간 데이터로 기록된다.

충격압괴실험은 측정된 하중 및 변위에서 시간을 소거하여 충격압괴가 진행되고 있는 동안의 하중-변위선도를 구하였으며 흡수 에너지  $E_a$ , 전체흡수에너지  $E_T$  및 시험편의 변형된 길이  $\delta$ 를 구하여 각 부재의 에너지 흡수특성에 대하여 고찰하였다. 충격압괴 후 측정된 하중-변위선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식 (1)과 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구하였다.

$$E_a = \int_0^{\delta} PdS \tag{1}$$

여기서  $E_a$ 는 총 흡수에너지, P는 압괴하중, S는 압괴과정 중의 시험편의 변형량을 각각 나타낸다.

충격에너지는 식 (2)를 이용하여 구하였다.

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2 \tag{2}$$

여기서, m은 크로스헤드의 질량(40 kg)이며, v는 충격압괴 속도이다.

충격흡수시설은 구성부재가 파손 또는 변형됨으로 인해 차량의 충돌에너지를 소산시키는 Sacrificial Structure (차체의 파손을 전제로 하는 구조물)이므로 적절한 변형거리를 확보하여야 한다. 또한 충격흡수시설의 구조적 강성과 구성부재의 재료에 따라 다양한 충돌거동을 보이며 충돌시험 결과에도 많은 영향을 준다. 충돌 모델은 매우 다양한 충돌 모델을 사용하는데, 본 논문에서는 식 (2)와 같이 단순하게 충격에너지를 계산하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 압괴모드

본 실험에서는 CFRP 원형부재, 사각부재에 대하여 적층각도의 변화와 충격에너지의 변화에 따른 압괴특성을 살펴보고자 충격압

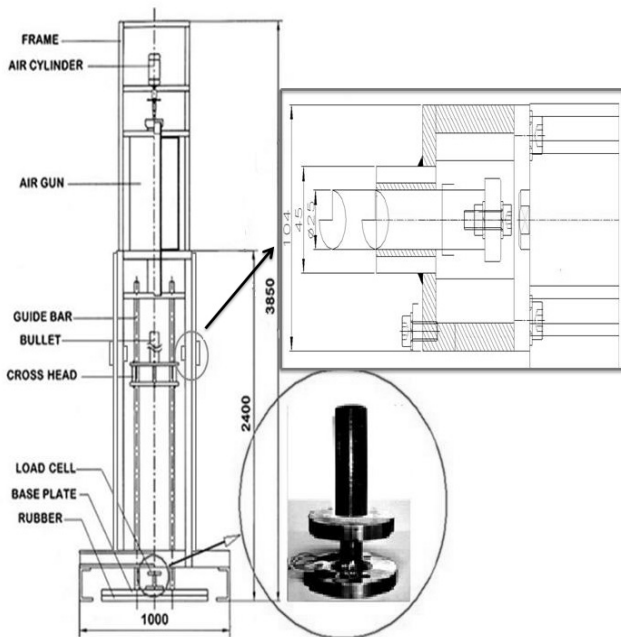


Fig. 3 Impact testing setup for crushing

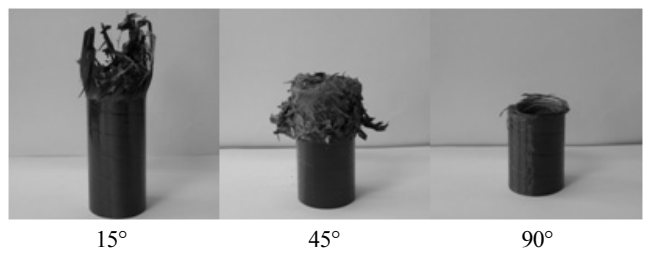


Fig. 4 Shapes of Collapsed CFRP Circular member (Impact energy 611 J)



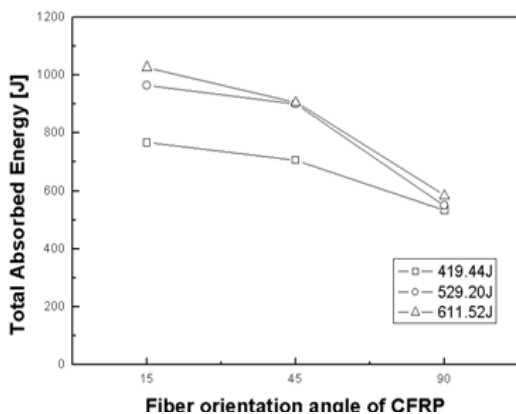
Fig. 5 Shapes of Collapsed CFRP Square member (Impact energy 372 J)

계 실험에서 얻은 압괴형상을 나타내었다. Fig. 4, 5에 적층수 8 ply를 갖는 원형부재와 사각부재에 대하여 15°, 45° 및 90°의 적층각의 변화에 따른 충격압괴실험 시험편의 형상을 나타내었다.

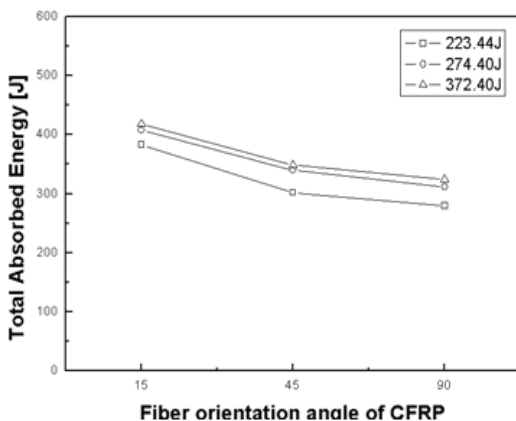
압괴 형상은 CFRP 부재의 형상과 섬유 및 기지의 기계적 성질에 의하여 횡방향 전단, 라미나 굽힘, 국부좌굴 또는 횡방향 전단과 라미나 굽힘이 조합된 취성 파괴에 의해서 압괴되었다. Fig. 4, 5에서 적층각 15°와 45°로 적층된 시험편의 경우 약간의 스플라인 모드와 혼합된 섬유 파단을 보여주었으며, 섬유방향으로 파괴가 된 것을 보여주고 있다. 적층각 90°로 적층된 시험편의 경우는 섬유의 국부좌굴에 의해서 안정적인 굽힘을 보이며 압괴되었다.

**4.2 에너지 흡수 특성**

앞서 기술한 것과 같이 CFRP 부재는 충격 압괴되면 부재의 형상과 섬유 및 기지의 기계적 성질에 의하여 횡 방향 전단, 라미나 굽힘, 또는 국부좌굴에 의해서 압괴됨을 알 수 있다.



**Fig. 6 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Circular member according to Impact velocity**



**Fig. 7 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Total absorbed energy for CFRP Square member according to Impact velocity**

**Table 2 Impact collapse test results for CFRP circular and square member according to impact energy about Total absorbed energy**

angle \ Shape	Circular	Square
15°	1026.7 (611 J)	417.94 (372 J)
	963.9 (529 J)	407.16 (274 J)
	766.3 (419 J)	382.95 (223 J)
45°	906.1 (611 J)	348.55 (372 J)
	900.6 (529 J)	339.6 (274 J)
	706.2 (419 J)	301.96 (223 J)
90°	583.8 (611 J)	324.23 (372 J)
	549.03 (529 J)	311.3 (274 J)
	553.6 (419 J)	279.89 (223 J)

본 연구에서는 적층각 및 형상의 변화에 따른 CFRP 구조부재의 충격특성을 정량적으로 고찰하기 위하여 충격압괴실험 시 얻은 하중-변위선도로부터 적층구성의 차에 따른 흡수에너지 특성을 고찰하였다.

Fig. 6, 7은 각각 8 ply로 적층된 CFRP 원형부재와 사각부재의 적층각의 변화에 의한 총 흡수에너지를 나타냈고, Table 2는 각각의 적층각 및 형상에 따른 총 흡수에너지를 표로 나타냈다.

CFRP 원형부재와 사각부재 모두 3단계의 충격속도변화를 주어 실험했다. 속도변화에 따른 에너지흡수 특성을 고찰하고자 CFRP 원형 구조부재의 경우는 419.44 J, 529.2 J 및 611.52 J의 충격에너지를 가하여 실험을 하였고, CFRP 사각형 시험편의 경우 흡수할 수 있는 에너지의 한계로 인하여 자유낙하 상태에서 223.44 J, 274.4 J 및 372.4 J의 충격에너지를 가하여 실험하였다.

Fig. 6, 7로부터 알 수 있는 바와 같이 원형 및 사각형 CFRP 구조부재 모두 적층각이 15°일 때가 흡수에너지가 가장 컸으며, 적층각이 45°, 90°의 순으로 낮게 나타났다. 다만, 적층각이 45°인 경우 원형 CFRP부재가 사각 부재보다 흡수에너지가 높게 나타난 것은 원형의 경우는 대칭압괴 형상을 나타내고, 사각의 경우는 사각 모서리 부분의 압괴 시 비대칭으로 압괴되기 때문이라 생각된다. 또한, 충격력이 클수록 총 흡수에너지도 증가한다는 것을 알 수 있었고, CFRP의 에너지 흡수 인자는 크랙의 진전이며, 충격압괴실험은 짧은 시간에 충격하중이 가해지기 때문에 순간적인 크랙 진전을 보여준다고 사료된다.

**4.3 충격 특성**

본 연구에서는 적층각 및 형상이 다른 CFRP 구조부재에 충격에너지가 변화 할 때의 충격특성을 정량적으로 평가하기 위하여 자체 제작한 수직식 공기압 충격 시험장치를 이용하여 충격 압괴실험을

행하였다.

충격속도는 CFRP 적층재의 흡수능력을 고려하여 결정하였다. Fig. 8, 9는 충격속도의 변화에 따른 원형 CFRP구조부재 및 사각형 CFRP구조부재의 동적특성과 적층각과의 관계를 최소사승법으로 Plot하여 나타냈다. Fig. 7, 8에서 ○ : 15°, △ : 45°, □ : 90°의 적층각을 나타낸다.

Fig. 8, 9는 각각 정층각이 15°, 45°, 90°인 원형 및 사각형 CFRP 구조부재의 충격에너지 변화에 따른 충격응력의 변화관계를 나타냈다. 원형 및 사각형 CFRP 구조부재 모두 충격에너지가 증가함에 따라 충격응력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 원형 구조부재의 경우는 기울기가 적층각 15°일 때 0.000556, 45°일 때 0.000786 그리고 90°일 때 0.000835 이고, 사각형 부재의 경우는 기울기가 15°일 때 0.001639, 45°일 때 0.002177, 그리고 90°일 때 0.002312로써 사각형 CFRP 구조부재가 원형 CFRP 구조부재보다 충격에너지가 증가함에 따라 충격응력이 빠르게 증가함을 알 수 있었다. 이상의 결과를 Fig. 8, 9에서 동적특성을 나타

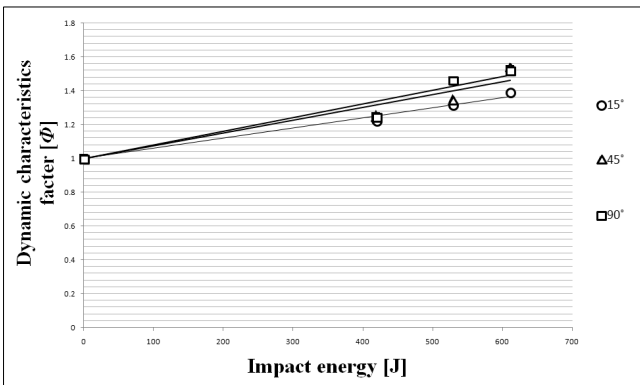


Fig. 8 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Circular member according to Impact velocity

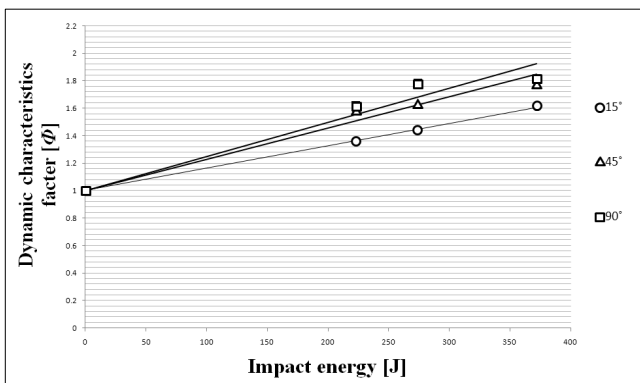


Fig. 9 Relationship between fiber orientation angle of CFRP and Dynamic Characteristics for CFRP Square member according to Impact velocity

내는 동적특성계수  $\phi$ 로 나타냈다.  $\phi = \frac{\sigma_I}{\sigma_s}$  (정적압계응력을  $\sigma_s$ , 충격압계응력을  $\sigma_I$ )를 나타낸다.  $\phi = 1$ 인 경우는  $\frac{\sigma_I}{\sigma_s}$ 로서 정적 압계 상태이며 충격에너지가 증가할수록 정적압계응력에 기울기를 더한 값만큼 충격응력이 증가함을 알 수 있었다.

향후 더 많은 충격 실험을 통하여 충격압계 시 시험편의 변형에 어느 정도의 에너지가 소요되는지, 시험장치의 반발에너지, 마찰에너지 등의 영향은 없는지를 검토하면 더욱더 정량적인 자료를 얻을 수 있으리라 생각된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 적층각 및 형상이 다른 CFRP 구조부재에 다양한 충격이 가해질 때의 CFRP 구조부재의 충격특성을 고찰하였다. 특히, 형상의 변화, 적층각의 변화에 따른 압계모드와 흡수에너지특성 및 동적특성을 정량적으로 고찰하여 수송기계 경량화 구조부재의 개발 및 설계 시 유용한 자료를 얻고자 하였다.

- (1) 원형 및 사각형 CFRP 구조부재 모두 적층각이 15°일 때 흡수 에너지가 가장 크게 나타났으며 적층각이 45°, 90°순으로 낮게 나타났다.
- (2) 적층각 15°인 부재는 거의가 스플라인 모드로 압계 되었으며, 적층각 45°인 부재의 경우는 스플라인 모드와 섬유 파단이 혼합된 혼합모드로 압계 되었다. 또한, 적층각 90°인 부재의 경우는 섬유의 국부좌굴에 의한 안정적인 굽힘을 보이며 압계되었다.
- (3) 충격 하중을 받을 시 섬유방향이 90°일 경우 damping역할을 하지 못하고 파괴되어 에너지 흡수가 낮았고, 반면에 15° 및 45°로 적층된 시험편의 경우 층내크랙과 층간크랙이 동시에 발생하여 에너지 흡수가 높게 나타났다.
- (4) 충격에너지가 증가할수록 충격응력은 크게 나타났고, 정적압계응력에 충격에너지의 변화에 따른 기울기를 더한 값만큼 선형적으로 증가하였다. 특히, 원형 CFRP구조부재보다 사각형 CFRP구조부재의 동적특성을 나타내는 기울기가 더 크게 나타났고, 적층각이 클수록 크게 나타났다. 이로부터 원형 CFRP 부재보다 사각형 CFRP부재가 충격에 더 민감함을 알 수 있다.

## 후기

이 논문은 2013년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## References

- [1] Lee, K. S., 2008, Evaluation of Safety Performance on Lightweight Vehicle Structural Members for the use of Impact Absorption, A Thesis for a Doctorate, Chosun University, Republic of Korea.
- [2] Kim, Y. N., 2002, Axial Collapse Characteristics of CFRP Composite Thin-wall Structures for Lightweight of Vehicles, A Thesis for a Doctorate, Chosun University, Republic of Korea.
- [3] Farley, G. L., Jones, R. M., 1992, "Crushing Characteristics of Continuous Fiber-Reinforced Composite Tubes," *Journal of composite Materials*, 26 37-50.
- [4] Kim, Y. N., Hwang, J. J., Baek, K. Y., Cha, C.S., Yang, I. Y., 2003, Impact Collapse Characteristics of CF/Epoxy Composite Tubes for Light-Weights, *KSME International Journal*, 17 48-56.
- [5] A Valle, M., Belingardi, G., 1997, Experimental Evaluation of the Strain Field History During Plastic Progressive Folding of Aluminum Circular Tubes, *Int. J. Mech. Sci.*, 39 575-583.
- [6] Cha, C. S., Kang, J. Y., Yang, I. Y., 2001, Axial Impact Collapse Analysis of Spot Welded Hat shaped Section member, *KSME International Journal*, 15 180-191.
- [7] Cha, C. S., Kang, J. Y., Yang, I. Y., 1999, A Theoretical Analysis for the Quasi-Static Axial Crushing of Top-Hat and Double-Hat Thin-Walled Sections, *Int. J. Mech. Sci.*, 41 209-233.
- [8] Singace, A. A., 1999, Axial Crushing Analysis of Tubes Deforming in the Multi-Mode, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 41, pp. 865-890 *Int. J. Mech. Sci.*, 41 209-233.
- [9] Farley, G. L., Jones, R. M., 1991, Prediction of Energy-Absorption Capability of Composite tubes, *Journal of Composite Materials* 26 388-404.
- [10] Mahmood, H. F., paluzny, A., 1981, Design of Thin Walled Columns for Crash Energy Management-Their Strength and Model of Collapse, *Proc, 4rd International Conference on Vehicle Structural Mechanics*, Nov. 18-20, Detroit, 7-18.