

차체 경량화를 위한 CFRP 복합구조부재의 충격압괴모드에 관한 연구

황우채 · 최영민^{*} · 임광희^{**} · 차천석^{***} · 양용준^{***} · 양인영^{†****}

조선대학교 기계설계공학과 · ^{*}조선대학교 대학원 첨단부품소재공학과 · ^{**}우석대학교 기계자동차공학과
^{***}동강대학교 소방안전관리과 · ^{****}조선대학교 기계시스템공학과
(2014. 4. 24. 접수 / 2014. 8. 29. 수정 / 2014. 9. 16. 채택)

A Study on Impact Collapse Modes of Composite Structural Members using Carbon Fiber Reinforced Plastics for Car Body Lightweight

W. C. Hwang · Y. M. Choi^{*} · K. H. Im^{**} · C. S. Cha^{***} · Y. J. Yang^{***} · I. Y. Yang^{†****}

Department of Mechanical Design Engineering, Chosun University

^{*}Department of Advanced Parts & Materials Engineering, Graduate School, Chosun University

^{**}Department of Mechanical & Automotive Engineering, Woosuk University

^{***}Department of Fire Protections and Safety Engineering, Dongkang College

^{****}Department of Mechanical System Engineering, Chosun University

(Received April 24, 2014 / Revised August 29, 2014 / Accepted September 16, 2014)

Abstract : This study aimed to develop members with the optimum impact characteristics to ensure a protected space for passengers in the case of automobile collisions. Accordingly, these members were fabricated to provide sufficient rigidity and safety to the passenger room structure and to absorb large amounts of energy during collision. In particular, CFRP members were fabricated with different section shapes such as square and single- and double-hat shapes. Next, their impact collapse characteristics and collapse modes were quantitatively analyzed according to the changes in section shapes and stacking angles. This analysis was performed to obtain design data that can be applied in the development of optimum lightweight members for automobiles.

Key Words : carbon fiber reinforced plastics, collapse mode, lightweight, impact characteristics, section shape

1. 서론

최근 국제적으로 승용차의 구조경량화에 대한 요구가 급증하여 하이브리드자동차, 친환경 그린자동차, 전기자동차 등의 개발에 국가의 역량을 집중하고 있는 실정이다. 이를 위한 방법으로 소재의 경량화는 연료 효율을 높임과 동시에 자동차의 성능향상을 극대화시킬 수 있어서 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다^{1,2)}. 차체 구조의 경량화를 위한 연구는 최적 구조설계 기술과 재료 및 소재개발 기술이라는 두 가지 측면으로 추진되고 있다. 복잡한 형상을 가지고 있는 차체 구조의 최적설계를 위한 강성해석이나 충돌해석 등을 위해서 컴퓨터를 이용한 유한요소해석을 수행하고 있으며³⁻⁶⁾, 경량재료의 개발을 통한 차체중량 및 관성에너지의 저감은 가장 효과적인 연비

개선 방안으로 평가되고 있어 기존의 철강부품을 알루미늄 및 플라스틱 등으로 대체 개발 및 확대 적용하는 추세에 있다^{7,8)}.

그러나 자동차용 복합재료에 사용되는 보강섬유는 유리섬유가 대부분 사용되고 있으며, CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics: 이하 CFRP라 한다)를 사용한 복합재료 부품 특히, 1차구조부재의 실용은 연구개발 단계에 있다.

이제까지의 경량화 차체구조용 CFRP 부재의 연구동향을 살펴보면, 여⁹⁾ 등은 적층각 및 형상변화에 따른 CFRP 구조 부재의 동적 특성에 관해 실험적으로 고찰하였고, 이¹⁰⁾는 사각 및 원형 단면부재의 외면을 탄소 섬유 강화 복합재료 감싸 강화시킨 혼성부재 형태의 구조부재를 제작하여 충돌시의 에너지흡수의 크기 및 압괴모드를 고찰하였다. 또한, 양¹¹⁾ 등은 모자형 단면의

[†] Corresponding Author : In Young Yang, Tel : +82-62-230-7840, E-mail : iyyang@chosun.ac.kr

Department of Mechanical System Engineering, Chosun University, 309, Pilmun-daero, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea

형상을 갖는 구조부재를 제작하여 고온·고습의 가혹한 환경 하에서 수분으로 인해 발생하는 강도 및 흡수 에너지에 대하여 평가 하였다. 그러나 CFRP 구조부재의 형상변화가 흡수에너지, 압괴모드 등 충격특성에 미치는 영향에 관한 연구결과는 찾아보기 어렵다.

따라서 차량의 설계 단계에서는 차량전체의 전면 충돌을 예측하기 전에 사이드부재와 같이 충돌 시 에너지흡수가 크고, 간단한 구조부재에 대해서 압괴거동과 에너지흡수특성을 정확히 파악 하는 것이 중요한 문제이다^{12,13)}.

본 연구에서는 자동차 충돌 시 승객의 안전 보호 공간 확보를 위한 승객실 구조물의 충분한 강성 및 안전성을 확보하고, 충돌 시 많은 에너지를 흡수할 수 있는 최적의 충격특성을 갖는 구조부재를 개발하고자 한다. 특히, 단면의 형상이 다른 단일 모자형 단면 및 이중 모자형 단면 CFRP 부재를 제작 한 후 단면 형상의 변화, 적층각의 변화 따른 충격압괴특성 및 압괴 모드에 관해 정량적으로 고찰함으로써 최적의 경량화용 자동차 구조부재를 개발하는데 적용 가능한 설계데이터를 얻고자 한다.

2. 시험편

최근에 국제적으로 주요 이슈가 되는 첨단소재인 CFRP구조부재가 자동차의 축 압축부재로 사용될 것을 상정하여 자동차의 구조부재의 기본 형상인 사각부재, 단일 모자형 부재와 이중 모자형 부재를 오토클레이브(Autoclave)에서 성형 제작하여 시험편으로 사용하였다.

단일 모자형 단면 및 이중 모자형 단면 CFRP 부재는 사각형 알루미늄 부재에 CFRP 프리프레그 시트를 적층하여 오토클레이브를 이용하여 성형 제작한 후 사각형알루미늄 파이프를 제거하여 제작하였다. 또한, 적층각 및 단면형상의 차에 따른 에너지 흡수 능력과 압괴모드를 고찰하기 위하여 적층각도를 [-15°/+15°]₄, [-45°/+45°]₄, [90°/0°]₄로 적층하여 시험편을 제작하였다. 시험편은 CFRP 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 하여 [+θ_n/-θ_n]의 적층구성으로 적층각도 변화에 따라 적층한 후 성형하여 제작하였다. 시험편은 [+θ_n/-θ_n]₄ 로서 7계면으로 적층하였다.

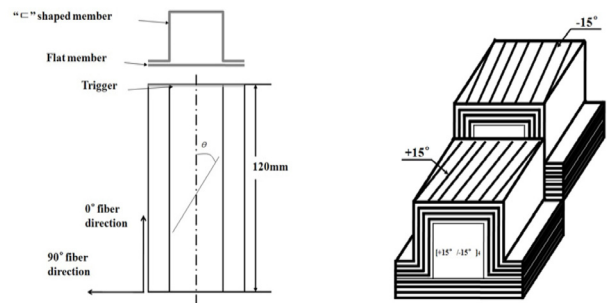
Fig. 1(a)에 단일 모자형 단면 CFRP 부재의 형상을, Fig. 1(b)에 이중 모자형 단면 CFRP 부재의 형상을 나타냈다. 단일 모자형 단면 CFRP 단면부재는 탭핑(tapping)된 맨드릴에 CFRP 프리프레그 시트를 적층하여 성형했고 실제 전면부 사이드부재의 1/4 크기인 폭(가로×세로)=30×30 mm, 플랜지 길이=12 mm로 “C”자

단면부재와 평판부재를 결합하여 제작하였다. CFRP 부재는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그시트(CU125NS)를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. Table 1은 시험편에 사용된 CFRP 프리프레그시트의 물성치를 나타내고 있다.

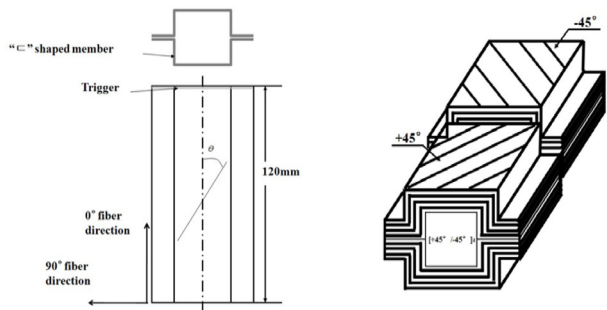
시험편의 성형은 오토클레이브성형법을 이용하여 챔버 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130℃, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며, 성형시에 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10⁻¹ Pa 까지 진공 시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10⁵ Pa 정도 가압시켜 제작하였다. 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않는 충분한 길이인 120 mm로 하였다.

Table 1. Material properties of the CFRP prepreg sheet

	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy#2500)	Prepreg sheet
Density[kg/m ³]	1830	1240	-
Poisson's Ratio	-	-	0.3
Young's Modulus[GPa]	240	3.6	132.7
Tensile Stress[MPa]	4890	80	1850
Resin Content[%Wt]	-	-	33



(a) Single hat shaped member



(b) Double hat shaped member

Fig. 1. Stacking conditions and configuration of CFRP specimen.

3. 충격실험

충격압괴실험은 실험실에서 설계 제작한 공기압 수직식 충격장치를 사용하였다. 이 장치는 공기압 가속 장치를 부착한 실험 장치로서 크로스헤드를 수직 하향으로 자유낙하 및 공기압을 이용하여 가속낙하 시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다.

충격하중의 크기는 로드셀에 접촉된 스트레인게이지의 저항 변화에 따른 변형률에 게이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하여 얻을 수 있었다. 충돌시에 나타나는 스트레인게이지의 저항변화는 리드선을 통하여 브리지박스(bridge circuits)와 동적변형증폭기(dynamic strain amplifier)를 거쳐 전압변화로 증폭된 후 파형 기억장치인 DSO(digital storage oscilloscope)를 지나 컴퓨터에 하중-시간 데이터로 기록된다. 충격실험기의 개략도를 Fig. 2에 나타냈으며, Fig. 3은 실험장치의 계측시스템의 구성도를 나타냈다.

Fig. 4부터 Fig. 9는 충격 압괴실험 후 측정된 시간-하중 및 시간-변위 데이터를 나타냈다. 또한, 시간 성분을 소거하여 얻어진 하중-변위선도를 나타냈고 선도의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식(1)과 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구하였다.

$$E_a = \int_0^{\delta} Pds \quad (1)$$

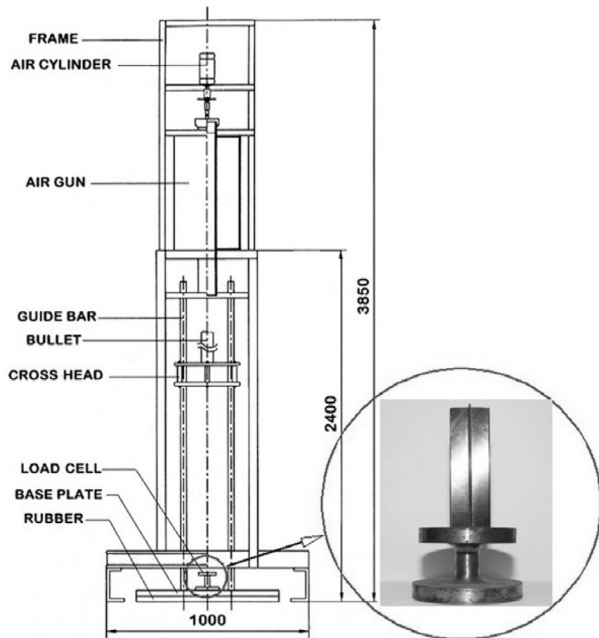


Fig. 2. Impact testing setup for crushing.

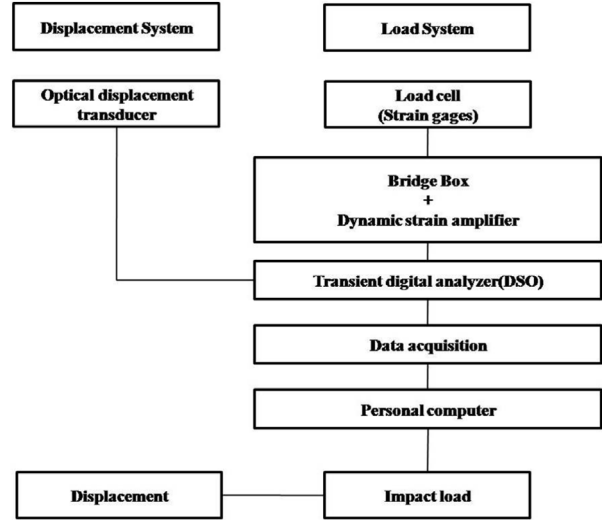


Fig. 3. Diagram of measurement system.

여기서 E_a 는 흡수에너지, P 는 압괴하중, S 는 압괴과정 중의 시험편의 변형량을 각각 나타낸다. 충격실험으로부터 얻은 하중-변위선도에서 흡수에너지 E_a , 전체 흡수에너지 E_T , 및 시험편의 변형된 길이 δ 를 구하여 각 부재의 에너지흡수특성에 고찰하였다. 그러나 동일한 충격에너지를 가했을 때 모든 시험편의 압괴길이가 동일하지 않기 때문에 흡수에너지를 정량적으로 고찰하기 위하여 모든 시험편이 시험편의 전체길이인 120mm가 압괴되었다고 가정하여 식 (2)와 같이 Magee와 Thornton이 언급한 압괴효율의 역수¹⁴⁾를 사용하여 식 (3)을 이용한 총 흡수에너지를 구하였다.

$$\frac{1}{\rho_0} = \frac{L}{\delta_f} \quad (2)$$

여기서, ρ_0 은 압괴효율, L 은 시험편의 길이, δ_f 는 충격압괴 실험 후 변형된 시험편의 길이이다.

$$E_T = E_a \times \frac{1}{\rho_0} \quad (3)$$

여기서, E_T 는 전체흡수에너지, E_a 는 흡수에너지이다. 충격에너지 E_i 는 $1/2(mv^2)$ 을 이용하여 구하였으며 m 은 크로스헤드의 질량(40 kg)이며, v 는 충격압괴속도이다.

또한, 단위질량당 총흡수에너지(E_m)은 다음과 같이 계산하였다.

$$E_m = E_a / kg \quad (4)$$

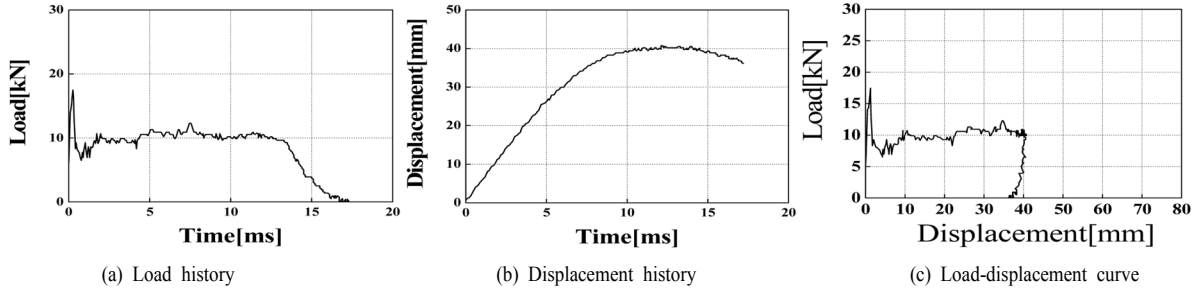


Fig. 4. Impact crushing characteristics of CFRP hat shaped member $[-15^{\circ}/+15^{\circ}]_4$.

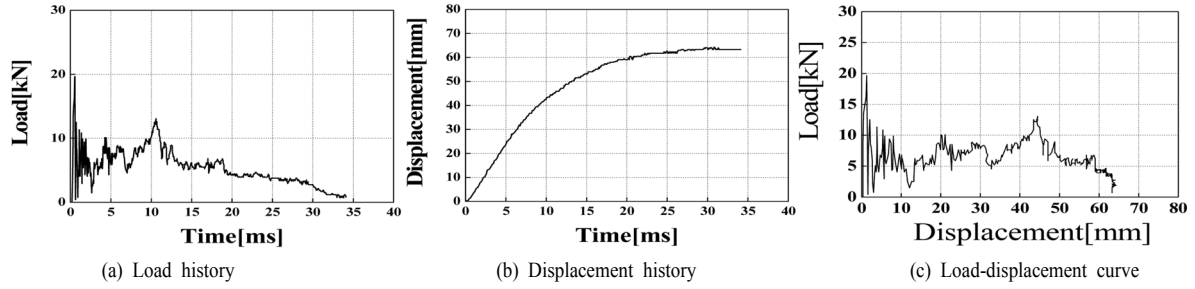


Fig. 5. Impact crushing characteristics of CFRP hat shaped member $[-45^{\circ}/+45^{\circ}]_4$.

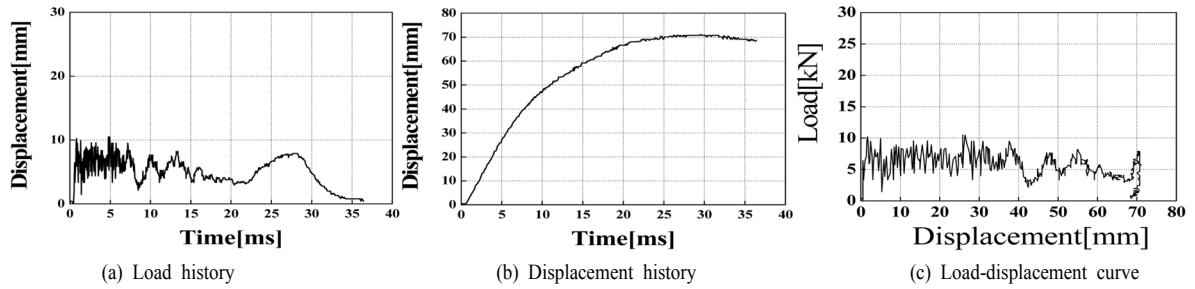


Fig. 6. Impact crushing characteristics of CFRP hat shaped member $[90^{\circ}/0^{\circ}]_4$.

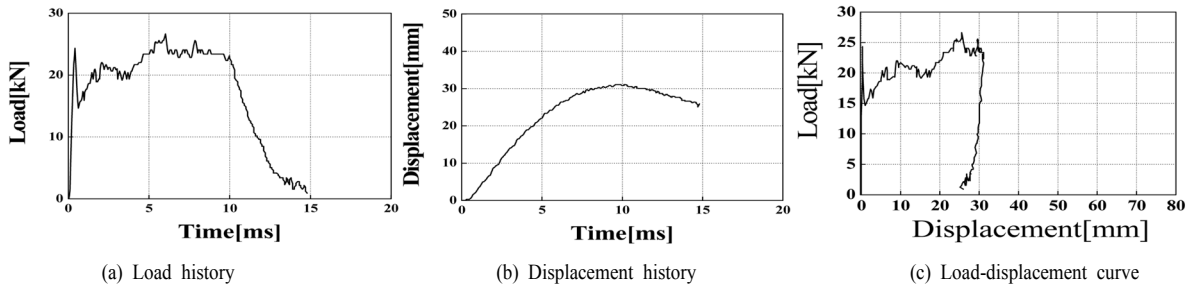


Fig. 7. Impact crushing characteristics of CFRP double hat shaped member $[-15^{\circ}/+15^{\circ}]_4$.

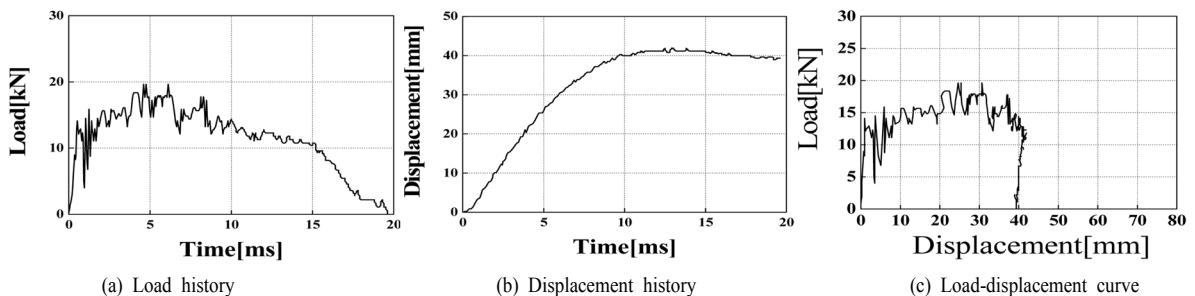


Fig. 8. Impact crushing characteristics of CFRP double hat shaped member $[-45^{\circ}/+45^{\circ}]_4$.

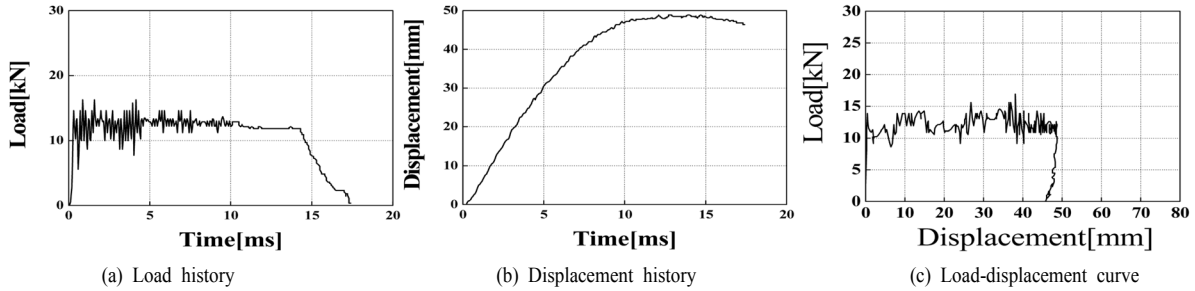


Fig. 9. Impact crushing characteristics of CFRP double hat shaped member[90°/0°]₄.

여기서 kg은 각 시험편의 질량이다.

충격압괴실험 시 각각 형상이 다른 시험편의 충격저항 능력에 따라 충격에너지의 크기를 결정하였고 각각의 시험편의 압괴형상을 관찰하기 가장 적절한 충격에너지를 결정하여 충격 실험을 행했다. 단일 모자형 단면 CFRP 부재 시험편에서는 419J, 이중 모자형 단면 CFRP 부재 시험편에서는 611J의 충격에너지 범위에서 실험 하였다. 본 연구에서는 CFRP 부재의 특성을 고려하여 수차례의 예비실험을 통하여 최적의 에너지의 크기를 결정 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 충격압괴특성

탄소섬유 강화 복합재가 차량 전면부 사이드 부재로 사용될 것을 상정하여 단일 모자형 단면 CFRP 부재와 이와 유사한 이중 모자형 단면 CFRP 부재에 충격압괴 실험을 행하여 CFRP 부재의 충격특성과 압괴모드를 고찰하여 안전성능을 평가하였다.

Table 2에 압괴특성이 우수한 이중 모자형 단면 CFRP 부재의 적층각도의 변화에 의한 충격압괴실험을 행한 결과의 평균값으로 최대압괴하중(P_{max} [kN]), 평균 압괴하중(P_m [kN]), 평균압괴응력(σ_m [Mpa]), 흡수에너지(E_a [J]), 총흡수에너지(E_L [J]) 및 단위질량당 흡수에너지(E_m [kJ/kg])의 데이터 값을 나타내었다. Table 2에 사각 단면 CFRP 부재의 충격특성을 적층각도의 변화에 따라 최대치를 1로 하였을 때의 적층각도의 변화에 따른 사각 단면 CFRP부재의 충격 특성 값을 나타냈다.

Table 3에 단일 모자형 단면 CFRP 부재의 적층각도의 변화에 의한 충격압괴실험을 행한 결과 적층각도의 변화에 따라 최대치를 1로 하였을 때의 적층각도의 변화에 따른 단일 모자형 단면 CFRP 부재의 충격특성 값을 나타냈다. Table 3으로 부터 쉽게 알 수 있듯이 모든 충격특성이 [-15°/+15°]₄로 적층한 경우가 가장 우수 했으며 그 다음으로 [-45°/+45°]₄, [90°/0°]₄ 순으로 낮게 나타났다.

또한, Table 4에 이중 모자형 단면 CFRP 부재의 적층각도의 변화에 의한 충격압괴실험을 행한 결과 적층각도의 변화에 따라 최대치를 1로 하였을 때의 이중 모자형 단면 CFRP 부재의 충격 특성 값을 나타냈다.

Table 4로 부터 이중 모자형 단면 CFRP 부재의 최대 압괴하중, 압괴응력 및 단위 질량당 흡수에너지는 [-15°/+15°]₄로 적층한 경우가 [-45°/+45°]₄, [90°/0°]₄로 적층한 경우보다 각각 67.7%, 80%, 70% 정도 높았다.

Table 3. Impact characteristics for CFRP single hat shaped member according to fiber orientation angle of CFRP(E = 419J)

Impact characteristics	Fiber orientation angle		
	[-15°/+15°] ₄	[-45°/+45°] ₄	[90°/0°] ₄
Maximum collapse load P_{max} [kN]	1	0.590	0.368
Mean collapse load P_m [kN]	1	0.707	0.531
Mean collapse Stress σ_m [Mpa]	1	0.707	0.531
Absorbed energy E_a [J]	1	0.975	0.962
Total absorbed energy E_L [J]	1	0.628	0.569
Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]	1	0.652	0.566

Table 2. Impact collapse test results for CFRP double shaped member according to fiber orientation angle of CFRP(E = 611J)

Fiber orientation angle	Maximum collapse load P_{max} [kN]	Mean collapse load P_m [kN]	Mean collapse Stress σ_m [Mpa]	Absorbed energy E_a [J]	Total absorbed energy E_L [J]	Absorbed energy per unit mass E_m [kJ/kg]
[-15°/+15°] ₄	30.52	22.44	113.54	598.31	2485.23	92.04
[-45°/+45°] ₄	18.20	12.62	63.85	581.28	1451.39	54.53
[90°/0°] ₄	18.14	12.49	63.20	588.81	1480.89	52.51

Table 4. Impact characteristics for CFRP double hat shaped member according to fiber orientation angle of CFRP($E = 611\text{J}$)

Impact characteristics	Fiber orientation angle		
	$[-15^\circ/+15^\circ]_4$	$[-45^\circ/+45^\circ]_4$	$[90^\circ/0^\circ]_4$
Maximum collapse load $P_{max}[\text{kN}]$	1	0.596	0.594
Mean collapse load $P_m[\text{kN}]$	1	0.562	0.556
Mean collapse Stress $\sigma_m[\text{Mpa}]$	1	0.562	0.556
Absorbed energy $E_a[\text{J}]$	1	0.972	0.984
Total absorbed energy $E_t[\text{J}]$	1	0.577	0.566
Absorbed energy per unit mass $E_m[\text{kJ/kg}]$	1	0.592	0.571

따라서 이중 모자형 단면 CFRP 부재의 압괴특성 역시 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$ 로 적층한 경우가 가장 우수함을 알 수 있었다.

그러나 이중 모자형 단면 CFRP 부재의 최대압괴하중, 평균압괴하중, 평균응력, 흡수에너지 및 단위질량당 흡수 에너지 모두 $[-45^\circ/+45^\circ]_4$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 로 적층한 경우 거의 유사한 값을 얻었다. 이는 이중 모자형 단면 CFRP 부재는 단일 모자형 단면 CFRP 부재보다 45° , 0° , 90° 적층각의 영향이 더 작음을 알 수 있다. 즉, 이중 모자형 단면 CFRP 부재가 가장 안정적이며 우수한 충격특성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

4.1. 압괴모드

CFRP 부재는 충돌과 동시에 층간/층내크랙이 성장하여 라미나 굽힘(Lamina bending)이 생김과 동시에 섬유와 매트릭스 의 소성변형을 수반하여 국부 좌굴(Local buckling)이 생기고, Lamina 다발의 파괴에 의한 횡방향 전단(Transverse shearing)이 되면서 섬유의 파단에 의해 파편이 분산되는 파쇄모드(fragmentation)의 형태로 압괴되었다.

Fig. 10(a)에 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$, Fig. 10(b)에 $[-45^\circ/+45^\circ]_4$ 및 Fig. 10(c)에 $[90^\circ/0^\circ]_4$ 로 적층된 단일 모자형 단면 CFRP 부재의 충격압괴후의 압괴형상을 나타낸다.

15° 로 적층된 부재에서는 Fig. 10(a)와 같이 평판부재는 층간 크랙 및 층내 크랙의 점진적인 진전과 함께 부재의 외측으로 확장하는 스프라인 형상으로 압괴되었으며, “ㄷ”자형 부재는 섬유 방향을 따라 압괴가 진행되며, 모서리 부분에서는 섬유의 파단에 의해 대부분의 에너지를 흡수하였다. 특히, “ㄷ”자형 부재와 평판 단면사이에서는 섬유파단과 평판접합부의 확장 현상이 발생하였는데 이는 “ㄷ”자형 부재가 하중을 받을 때 순간적인 충격으로 인하여 단면의 형상이 급격히 변하는 모서리 부분에서 응력집중이 발생하기 때문인

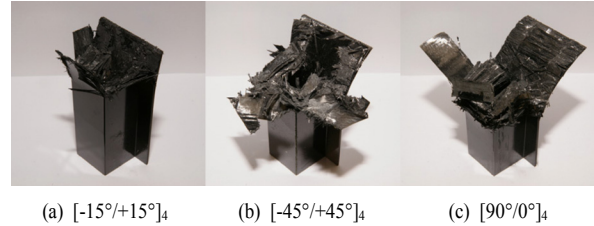


Fig. 10. Shape of Collapse CFRP single hat shaped member, (Impact Energy 419J).

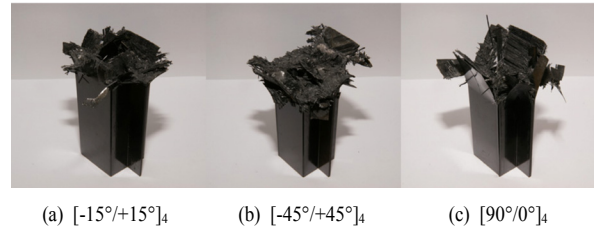


Fig. 11. Shape of Collapse CFRP double hat shaped member, (Impact Energy 611J).

것으로 사료된다. 45° 로 적층된 부재에서는 Fig. 10(b)에서와 같이 “ㄷ”자형 부재의 2개의 모서리 부분에서 섬유파단을 수반한 찢겨짐이 발생했고 “ㄷ”자 부분과 평판부재 사이에서 섬유파단과 평판접합부의 외부확장, 횡전단이 발생했으며, 섬유파단에 의한 파편(debris)이 분산되는 파쇄모드를 보였다.

이러한 압괴모드는 모서리부의 파단, 라미나굽힘/외부확장, 적층각 방향으로의 층간분리, 횡방향전단 크랙 및 파쇄모드에 의한 파괴로서 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$ 적층과 $[90^\circ/0^\circ]_4$ 로 적층부재의 압괴모드의 조합이 나타났다.

$90^\circ/0^\circ$ 로 적층된 부재에서는 Fig. 10(c)에서와 같이 최외층각이 0° 이므로 최외층각의 섬유가 외부로 확장하는 스프라인 모드와 90° 방향으로 횡방향 전단이 동시에 나타났으며 섬유파단에 의한 파편이 분산되는 파쇄모드 즉, 섬유가 외층으로 확장하고 파단면에서 압괴되는 파쇄확장모드의 형태로 파괴 되었다.

Fig. 11(a)에 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$, Fig. 11(b)에 $[-45^\circ/+45^\circ]_4$ 및 Fig. 11(c)에 $[90^\circ/0^\circ]_4$ 로 적층된 이중 모자형 단면 CFRP 부재의 충격압괴후의 압괴형상을 나타낸다.

Fig. 11(a)로 부터 알 수 있는 바와 같이 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$ 로 적층된 경우는 단일 모자형 CFRP 부재의 압괴모드와 유사하게 압괴 되었다. 하지만, 단일 모자형 단면 CFRP 부재에 나타났던 평판부재와 “ㄷ”자형 부재 접합부의 외부확장에 의한 갈라짐 현상은 발생하지 않았다. 이는 단일 모자형 단면 CFRP 부재가 하중을 받을 때 “ㄷ”자형 부재와 평판부재의 비대칭으로 인하여 플

Table 5. Impact characteristics for CFRP double hat shaped member according to fiber orientation angle of CFRP(E = 611J)

Section shape	Stacking angle	Primary fracture patterns
Single hat	$[-15^\circ/+15^\circ]_4$	Corner fracture, flange separation and expansion, longitudinal cracks, and splaying mode
	$[-45^\circ/+45^\circ]_4$	Corner fracture, flange separation and expansion, transverse cracks, and splaying/fragmentation combination mode
	$[90^\circ/0^\circ]_4$	Corner fracture, flange separation and expansion, transverse cracks, fiber breakage, and fragmentation and splaying mode
Double hat	$[-15^\circ/+15^\circ]_4$	Corner fracture, longitudinal cracks, and splaying mode
	$[-45^\circ/+45^\circ]_4$	Corner fracture, fiber breakage, transverse cracks, and splaying/fragmentation combination mode
	$[90^\circ/0^\circ]_4$	Corner fracture, transverse cracks, fiber breakage, and fragmentation and splaying mode

랜지 부분에서 갈라짐 현상이 발생하지만, 이중 모자형 단면 CFRP 부재의 경우에는 “ㄷ”자형 부재와 서로 대칭이므로 충격하중이 균일하게 작용하기 때문에 플랜지 부분에서 갈라짐 현상이 발생하지 않았다.

따라서 단일 모자형 단면 CFRP 부재보다 플랜지 부분의 두께의 영향과 모서리 수 증가로 에너지흡수특성이 더 좋은 것으로 사료된다. Fig. 11(b)로부터 알 수 있는 바와 같이 $[-45^\circ/+45^\circ]_4$ 로 적층된 경우도 단일 모자형 단면 CFRP 부재의 압괴모드와 유사하게 압괴되었다. Fig. 11(c)로부터 $[90^\circ/0^\circ]_4$ 로 적층된 부재의 경우도 단일 모자형 단면 CFRP 부재에서와 유사하게 나타났다. Table 5에 CFRP부재의 단면의 형상과 적층각의 변화에 따른 공통파괴 패턴을 제외한 주요 파괴패턴을 나타냈다.

5. 결론

본 연구에서는 단면의 형상이 각각 다른 단일 모자형 단면 CFRP 부재 및 이중 모자형 단면 CFRP 부재를 제작 한 후, 단면의 형상 및 적층각의 변화에 따른 충격압괴특성, 압괴 모드에 관해 정량적으로 고찰함으로써 최적의 경량화용 자동차 구조부재를 개발하는데 적용 가능한 설계데이터를 얻고자 하였다. 연구결과는 다음과 같다.

CFRP 구조부재의 적층각이 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$ 인 경우는 주로 길이방향 크랙, 라미나굽힘/외부확장에 의해 에너지를 흡수하는 스프라인 모드로 압괴되었으며, 적층각이 $[90^\circ/0^\circ]_4$ 인 경우는 횡전단크랙, 파쇄/확장모드로, 적층각이 $[-45^\circ/+45^\circ]_4$ 경우는 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$ 적층과 $[90^\circ/0^\circ]_4$ 적층부재의 압괴모드의 조합인 스프라인/파쇄모드로 압괴되었다. 적층각이 0°에 가까울수록 스프라인 모드로, 적층각이 90°에 가까울수록 파쇄모드로 압괴됨을 알 수 있었다.

단일 모자형 단면 CFRP 부재의 경우 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$ 로 적층한 경우가 충격특성이 가장 우수했으며, 그 다음으로 $[-45^\circ/+45^\circ]_4$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 순으로 낮게 나타났다. 특

히, 단위질량당 흡수에너지는 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$ 로 적층한 단일 모자형 단면 CFRP 부재가 $[-45^\circ/+45^\circ]_4$ 로 적층한 경우보다 53% 높았으며 $[90^\circ/0^\circ]_4$ 로 적층한 경우보다 약 76.7% 높았다.

이중 모자형 단면 CFRP 부재 역시 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$ 로 적층한 경우가 충격특성이 가장 우수 했다. 최대압괴하중, 압괴응력 및 단위 질량당 흡수에너지는 $[-15^\circ/+15^\circ]_4$ 로 적층한 경우가 $[-45^\circ/+45^\circ]_4$, $[90^\circ/0^\circ]_4$ 로 적층한 경우 보다 각각 67.7%, 80%, 70% 정도 높았다. 즉, 이중 모자형 단면 CFRP부재가 가장 안정적이며 우수한 충격특성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

감사의 글: “이 논문은 2014학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.”

References

- 1) M. S. Kown, “Trend of Korea Automotive Technology (VI).” AUTO JOURNAL, Vol. 26, No. 6, pp. 30-35, 2004.
- 2) S. I. Song, K. J. Bae, K. H. Lee and G. G. Park, “Light weight Design for Automotive Door Using Optimizations and Design of Experiments”, Transactions of KSAE, Vol.10, pp. 125-132, 2002.
- 3) H. Huh, K. P. Kim, S. H. Kim, J. H. Song and S. K. Hong, “Crashworthiness Assessment of Front Side Members in an Auto-body Considering the Fabrication Histories”, Int. J. Mech. Sci., Vol.45, pp. 1645-1660, 2003.
- 4) K. P. Kim, J. H. Song, H. Huh, H., S. Kim and S. K. Hong, “Crashworthiness of an Auto-body Member with the Forming Effect”, Transactions of KSAE, Vol, 12, No. 1, pp. 91-98, 2004.
- 5) B. J. Kim and S. J. Heo, “Collapse Characteristics of Aluminum Extrusions Filled with Structural Foam for Space Frame Vehicles”, Int. J. of Automotive Technology, Vol.4, pp.141-147, 2003.
- 6) A. G. Hanssen, M. Langseth and O. S. Hopperstad, “Experimental Evaluation of the Strain Field History

- during Plastic Progressive Folding of Aluminum Circular Tubes”, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.43, pp.153-176, 2001.
- 7) M. Avalle and G. Belingardi, “An Energy Absorption Characteristics of Thin-Walled Structure members by Crushing Load”, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.39, pp. 575-583, 1997.
 - 8) Y. Minoru, G. Manabu and S. Yasuhiko, “Axial Crush of Hollow Cylindrical Structures with Various Polygonal Cross-sections Numerical Simulation and Experiment”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.140, pp. 59-64, 2003.
 - 9) I. G. Yeo, J. H. Choi and I. Y. Yang, “Dynamic Characteristics of CFRP Structure Member According to Change the Stacking Angle and Shape.” *Journal of KSMTE*, Vol.22, pp. 388-393, 2013.
 - 10) K. S. Lee, “Evaluation of the Crashworthiness for Impact Energy Absorbing Lightweight Vehicle Members”, *Doctorate Thesis, Chosun University*, 2008.
 - 11) Y. J. Yang, C. S. Cha and I. Y. Yang, “Collapse Characteristics of CFRP Hat Shaped members According to Variation of Interface Numbers under the Hygrothermal Environment”, *Journal of KSMTE*, Vol.18, pp. 241-247, 2009.
 - 12) Q. Wang, Z. Fan and L. Gui, “Theoretical Analysis for Axial Crushing Behaviour of Aluminium Foam-filled Hat Sections”, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 49, pp. 515-521, 2007.
 - 13) S. K. Kim, K. H. Im, Y. N. Kim, J. W. Park, I. Y. Yang and T. Adachi, “On the Characteristics of Energy Absorption Control in Thin-walled Members for the use of Vehicular Structures”, *Key Engineering Materials*, 233-236:239-244, 2003.
 - 14) M. D. White and N. Jones, “Experimental Quasi-static Axial Crushing of Top-hat and Double-hat Thin-walled Sections”, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.41, pp. 179-208, 1999.