

# CFRP/Al 혼성 사각부재의 충격에너지 흡수 메커니즘의 실험적 고찰

황우채 · 차천석\* · 양용준\* · 정종안\*\* · 양인영\*\*\*\*

(주)서울금속 · \*동강대학교 소방안전관리과 · \*\*송원대학교 기계자동차공학과 · \*\*\*조선대학교 기계시스템공학과  
(2015. 7. 8. 접수 / 2015. 10. 15. 수정 / 2015. 11. 12. 채택)

## An Experimental Study on the Impact Energy Absorption Mechanism of CFRP/Al Compound Square Tube

Woo Chae Hwang · Cheon Seok Cha\* · Yong Jun Yang\* · Jong An Jung\*\* · In Young Yang\*\*\*\*

Technology Research Center, SEOUL METAL CO., Ltd

\*Department of Fire Protections and Safety Engineering, Dongkang College

\*\*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Songwon University

\*\*\*Department of Mechanical System Engineering, Chosun University

(Received July 8, 2015 / Revised October 15, 2015 / Accepted November 12, 2015)

**Abstract :** In this study, the collapse characteristic of CFRP/Al compound square tube was investigated experimentally. The conclusions are as follows; The impact collapse characteristic of CFRP/Al compound square tube was found to be the most superior stacking conditions  $[90^\circ]_8$ . It showed that a very stable collapse mode was crushing. In the member with  $[0_2^\circ/90_2^\circ]_8$  and  $[90_2^\circ/0_2^\circ]_8$ , stacking conditions,  $0^\circ$  fibers were splayed to the external by laminar bending, while the  $90^\circ$  fibers were held between the folds of the aluminum member by laminar bending, local buckling and transverse crack. In the member with  $[45_2^\circ/45_2^\circ]_8$ , stacking conditions, fibers were held between the folds of the aluminum member by local buckling and transverse crack.

**Key Words :** CFRP, collapse mode, compound square tube, energy absorption mechanism, stacking condition

### 1. 서론

자동차 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성능을 향상시키고 연비향상을 도모할 수 있어서 환경 오염 방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이며<sup>1)</sup>, 차량의 설계는 안전성이 확보된 상태에서 차량의 무게를 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 한다. 자동차의 충돌 안전성능이란 충돌 시에 승객을 보호하는 능력을 말 하는데 충돌조건, 차량구조, 승객 구속 장치 등의 요인으로 결정되며 자동차의 충돌 시 전면충돌의 안전성능은 차량개발에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다<sup>3,6)</sup>.

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 위

해서 컴퓨터를 이용한 유한요소해석을 수행하고 있으며<sup>7,8)</sup>, 경량재료의 개발을 통한 차체 중량 및 관성에너지의 저감은 가장 효과적인 연비개선 방안으로 평가되고 있어 기존의 철강부품을 알루미늄 및 플라스틱 등으로 대체 개발 및 확대 적용하는 추세에 있다<sup>9)</sup>. 특히, 차체는 전면 충돌 시 에너지를 흡수할 수 있는 구조로 되어야 하며 차체 내의 구조부재는 에너지흡수라고 하는 관점과 차체 앞부분으로 부터 전달된 하중을 흡수·분산을 통하여 차체의 변형이 적게 되도록 설계되어야 한다.

차량의 초기설계 단계에서는 차량전체의 전면충돌 안전성능을 예측하기 전에 전면부 사이드부재와 같이 충돌 시 에너지흡수량이 큰 기본형상의 구조부재에 대한 압괴거동과 에너지흡수 특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 문제이다.

실제 이<sup>10)</sup>는 원형 및 사각 알루미늄 부재에 CFRP를

\* 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 61452, Korea

적용하여 적층조건([+15°/-15°]<sub>4</sub>, [+45°/-45°]<sub>4</sub>, [90°]<sub>8</sub>, [0°/90°]<sub>4</sub>, [90°/0°]<sub>4</sub>)과 계면수 변화에 따른 혼성부재의 압괴모드와 에너지흡수 특성을 파악하였다.

따라서 본 연구에서는 자동차 충돌 시 외부로부터 가해지는 충돌에너지가 차체구조부재의 변형에너지로 최대한 변환할 수 있도록 하며, 안전한 승객보호 공간을 확보함과 동시에 승객의 상해 정도와 직결되는 최대 가속도 크기를 최소화시킬 수 있는 안정된 축방향 접합좌굴 모드를 유도하려는 설계 개념을 충족시킬 수 있는 CFRP/AI 혼성 사각부재의 충격압괴 특성을 고찰하였다.

또한, 최적의 경량화 자동차 차체 사이드부재를 개발하는데 이용될 수 있는 기본적인 설계데이터를 얻고자 한다.

연구방법으로는 먼저, 자동차 사이드 부재의 형상을 모방한 CFRP와 사각형 단면을 갖는 AI이 결합된 CFRP/AI 혼성 사각부재를 성형 제작한 후 수직식 충격 시험장치를 이용하여 충격압괴실험 후 적층각의 변화에 따른 충격에너지흡수 능력 및 충격에너지 흡수 메커니즘에 관해 고찰하였다.

## 2. 시험편

본 장에서는 자동차 경량화를 위한 차체 사이드부재의 설계자료를 얻고자 자동차 사이드 부재의 형상을 모방한 CFRP와 사각형 단면을 갖는 AI이 결합된 CFRP/AI 혼성 사각부재에 대하여 적층각도의 변화에 따른 충격에너지 흡수능력 및 충격에너지 흡수 메커니즘을 고찰하고자 적층각도가 서로 다른 CFRP/AI 사각 혼성 부재를 제작하였다.

CFRP/AI 사각 혼성 부재는 Fig. 1과 같이 AI 사각 부재의 외측을 CFRP 프리프레그 시트로 적층하여 제작하였다. 이방성 재료인 CFRP의 적층각의 변화에 따른

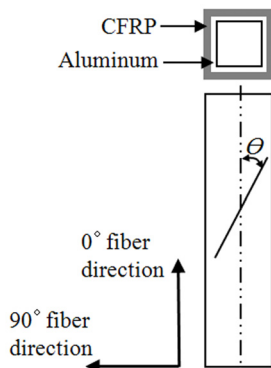


Fig. 1. Configuration of square compound member.

충격 압괴특성을 평가하고자 프리프레그 시트 8매를 축방향을 0°로 하여 [+0<sub>n</sub>/-0<sub>n</sub>]의 적층구성으로 적층각도의 변화에 따라 시험편을 제작하였다.

본 연구에서 제작한 CFRP/AI 혼성 사각부재 시험편은 [+45<sub>2</sub>/-45<sub>2</sub>]<sub>s</sub>, [90°]<sub>8</sub>, [0<sub>2</sub>/90<sub>2</sub>]<sub>s</sub>, [90<sub>2</sub>/0<sub>2</sub>]<sub>s</sub>로 적층하였다. 여기서 s는 symmetry의 약자로 대칭을 의미한다.

AI 부재는 서울메탈(주)에서 가공한 6063-T5계열로서 두께는 1.0 mm이며, 사각부재는 한 변의 길이가 30 mm인 정사각형 단면이다. CFRP 부재는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트(CU125NS)를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다.

CFRP와 AI을 결합한 혼성 사각부재는 사각부재의 외측을 CFRP 프리프레그 시트로 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. 시험편의 길이는 실험 시에 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였으며 시험편의 길이는 120 mm로 하였다.

## 3. 충격압괴실험

본 연구에서 이용한 충격압괴 실험장치는 공기압 가속장치를 부착한 수직식 충격실험 장치로서 크로스헤드(40 kg)를 수직 하향으로 공기압을 이용하여 가속 낙하시켜 시험편에 충격하중을 가하는 방식이다.

충격하중의 크기는 로드셀에 접촉된 스트레인지이지의 저항 변화에 따른 변형률에 게이지가 부착된 검출부의 단면적과 영률을 곱하여 얻었다. 충돌 시에 나타나는 스트레인지이지의 저항변화는 리드선을 통하여 브리지박스과 동적 변형증폭기를 거쳐 전압변화로 증폭된 후 파형 기억장치를 지나 컴퓨터에 하중-시간

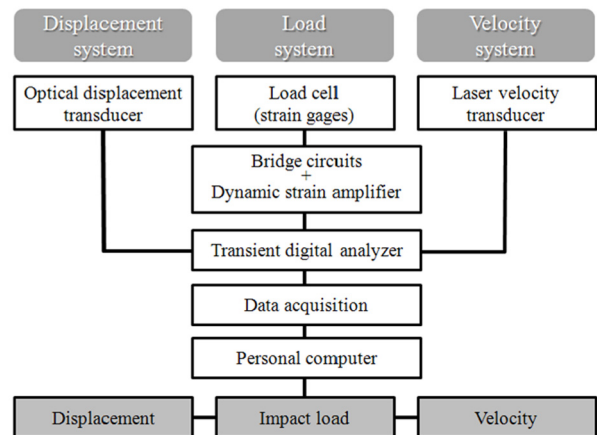


Fig. 2. Diagram of measurement system.

데이터로 기록된다<sup>10)</sup>. Fig. 2는 본 연구에서 이용한 충격압계 실험장치의 계측시스템의 구성도를 나타냈다. 충격 압계실험 후 측정된 하중-시간선도 $[f(t)-t]$  및 변위-시간선도 $[w(t)-t]$ 에서 시간 성분을 소거하여 얻어진 하중-변위선도 $[P-W]$ 의 면적을 시험편이 흡수한 에너지로 보고 하중-변위선도를 식(1)과 같이 적분하여 시험편에 흡수된 에너지량을 구하였다.

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

여기서  $E_a$ 는 흡수에너지,  $P$ 는 압계하중,  $s$ 는 압계와 정 중의 시험편의 변형량을 각각 나타낸다.

충격실험으로부터 얻은 하중-변위선도에서 흡수에너지  $E_a$ , 및 시험편의 변형된 길이  $\delta$ 를 구하여 각 부재의 에너지흡수특성에 고찰하였다.

충격에너지  $E_v$ 는  $1/2(mv^2)$ 을 이용하여 구하였으며  $m$ 은 크로스헤드의 질량이며,  $v$ 는 충격압계속도이다.

단위질량당 총흡수에너지( $E_m$ )은 다음과 같이 계산하였다.

$$E_m = E_a/kg \quad (2)$$

여기서  $kg$ 은 각 시험편의 질량이다.

또한, 단위체적당 흡수에너지( $E_v$ )는 단위체적( $m^3$ )당의 흡수에너지의 크기  $[MJ/m^3]$ 이다.

본 연구에서는 CFRP 부재의 특성을 고려하여 수차례의 예비실험을 통하여 최적의 에너지의 크기를 결정하였으며 충격압계실험시 CFRP/Al 혼성 사각부재 시험편의 충격저항 능력을 고려하여 충격에너지의 크기를 결정하였고 833.1 J의 충격에너지 범위에서 실험하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 충격압계 특성

Fig. 3에 CFRP/Al 혼성 사각부재에 대하여 적층각도의 변화에 따른 압계특성을 살펴보고자 충격압계하에서 하중-변위관계를 나타내었다.

Fig. 3(a)-(d)에  $[+45_2^\circ/-45_2^\circ]_s$ ,  $[90^\circ]_s$ ,  $[0_2^\circ/90_2^\circ]_s$ ,  $[90_2^\circ/0_2^\circ]_s$ 로 적층된 CFRP/Al 혼성 사각부재에 대하여 적층각도의 변화에 따른 충격압계실험 결과 얻어진 각각의 하중-변위선도를 나타내었다. 충격실험은 공기압 0.3 Mpa에서 충격속도 6.45 m/sec로 약 833.07 J의 충격에너지를 가하여 실험을 하였다.

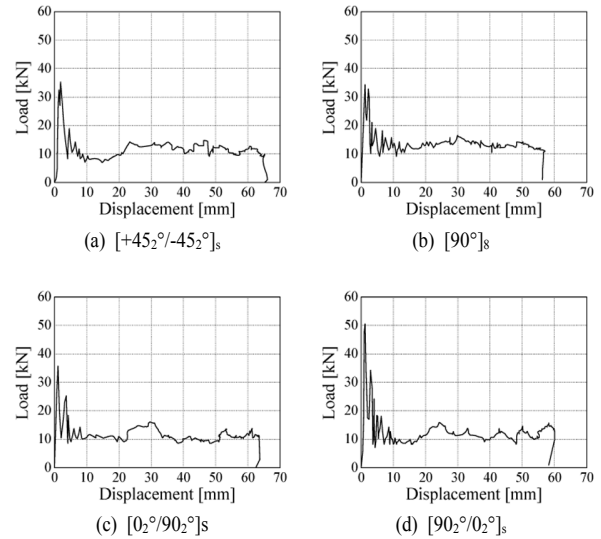


Fig. 3. Load–displacement curve of square compound member (Impact energy: 833.07 J).

Table 1에 Fig. 3(a)-(d)의 충격실험 결과로부터 얻은 적층각이  $[+45_2^\circ/-45_2^\circ]_s$ ,  $[90^\circ]_s$ ,  $[0_2^\circ/90_2^\circ]_s$ ,  $[90_2^\circ/0_2^\circ]_s$ 인 CFRP/Al 혼성 사각부재의 압계길이  $\ell$  [mm], 흡수에너지  $E_a$  [J], 단위질량당 흡수에너지  $E_m$  [kJ/kg] 및 단위 체적당 흡수에너지  $E_v$  [MJ/m<sup>3</sup>]의 값을 나타냈다.

차체 구조부재는 차체 앞부분이 소성변형하면서 에너지를 흡수하는 동안에 그 자체는 변형되지 않고 차실내의 공간을 유지하여 승객의 안전을 도모할 수 있게 해야 한다. 이러한 설계 개념을 파악하기 위하여 에너지흡수가 많으며 동시에 압계길이가 짧은 CFRP/Al 혼성 사각 부재의 적층구성을 파악해야 한다.

Table 1로부터 알 수 있는 바와 같이 CFRP/Al 혼성 사각부재의 압계길이는 적층 조건이  $[90^\circ]_s$ 인 경우가 56.9 mm로 가장 짧았으며, 그 다음으로  $[90_2^\circ/0_2^\circ]_s$ ,  $[0_2^\circ/90_2^\circ]_s$ ,  $[+45_2^\circ/-45_2^\circ]_s$  순으로 크게 압계되었다. 또한, 흡수에너지는 적층 조건이  $[+45_2^\circ/-45_2^\circ]_s$ ,  $[90^\circ]_s$ ,  $[0_2^\circ/90_2^\circ]_s$ 인 경우가 비슷하게 높게 나타났으며,  $[90_2^\circ/0_2^\circ]_s$ 인 경우가 낮게 나타났다. 또한, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지 모두 적층조건이  $[90^\circ]_s$ 인 경우가 가장 높게 나타났다. 이상의 결과로부터 CFRP/Al 혼성 사각부재의 충격압계특성은 적층조건이  $[90^\circ]_s$ 인 경우가 가장 우수함을 알 수 있다. 이는 CFRP의 적층각이  $90^\circ$ 에 가까워질수록 CFRP 부재의 섬유가 후프 응력(hoop stress) 형태로 하중을 지지하기 때문에 탄소섬유가 알루미늄 부재의 접합을 방해하면서 접합이 이루어지고 접혀지는 알루미늄 부재 사이로 끼어들어 가면서 CFRP 와 Al 부재간 결합에 의한 상호 작용에 의해 안정적인 압계를 보이면서 많은 에너지를 흡수하기 때문이라 생각된다.

**Table 1.** Impact collapse test results for square compound member according to fiber orientation angle of CFRP

Fiber orientation angle of CFRP	Collapse length $\ell$ [mm]	Absorbed energy $E_a$ [J]	Absorbed energy per unit mass $E_m$ [kJ/kg]	Absorbed energy per unit volume $E_v$ [MJ/m <sup>3</sup> ]
[+45 <sub>2</sub> °/-45 <sub>2</sub> °] <sub>s</sub>	66.5	813.8	24.86	51.94
[90°] <sub>s</sub>	56.9	810.9	28.74	60.04
[0 <sub>2</sub> °/90 <sub>2</sub> °] <sub>s</sub>	62.3	807.2	25.77	53.84
[90 <sub>2</sub> °/0 <sub>2</sub> °] <sub>s</sub>	59.0	792.1	27.14	56.70

적층각도가 45°로 적층된 시험편의 경우는 내부 AI 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재의 일부 섬유가 끼어 들어가지만 나머지 섬유는 끼어 들어가지 못하고 섬유의 파단과 섬유가 국부좌굴 되면서 에너지를 흡수하기 때문에 다른 적층구성에 비해 압괴가 많이 된 것으로 생각된다.

적층각도가 45°로 적층된 시험편의 경우는 내부 AI 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재의 일부 섬유가 끼어 들어가지만 나머지 섬유는 끼어 들어가지 못하고 섬유의 파단과 섬유가 국부좌굴 되면서 에너지를 흡수하기 때문에 다른 적층구성에 비해 압괴가 많이 된 것으로 생각된다.

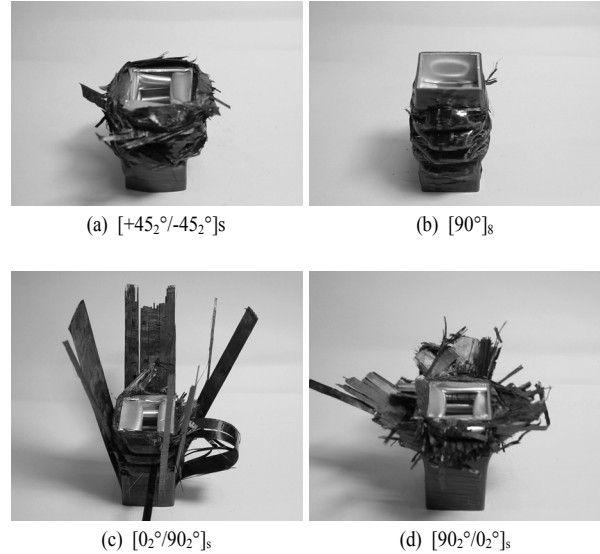
또한, 0°와 90°섬유로 조합된 시험편의 경우, 0°섬유는 높은 압괴하중에 잘 견디며, 90°섬유는 AI 부재의 접힘을 방해하면서 압괴가 되면서 에너지를 흡수하였으며, 최외층 각도가 90°인 경우, 0°섬유는 외부로 확장되는 라미나 굽힘이 발생하나 내외층의 90°섬유에 의해 외부확장이 방해되며 압괴되며 에너지를 흡수하므로 최외층각이 0°인 경우보다 흡수에너지가 낮게 나타난 것으로 사료된다.

#### 4.2 충격흡수에너지 메커니즘

Fig. 4(a)-(d)에 적층각이 [+45<sub>2</sub>°/-45<sub>2</sub>°]<sub>s</sub>, [90°]<sub>s</sub>, [0<sub>2</sub>°/90<sub>2</sub>°]<sub>s</sub> 및 [90<sub>2</sub>°/0<sub>2</sub>°]<sub>s</sub>로 적층된 CFRP/AI 혼성 사각부재에 약 833.07J의 충격에너지의 크기로 충격압괴실험 하여 얻은 압괴된 후의 시험편의 형상을 각각 나타내었다.

Fig. 4(a)-(d)로부터 알 수 있는 바와 같이 AI 사각부재는 크게 축대칭 접힘 모드(symmetric folding mode)와 비축대칭 접힘 모드(asymmetric mode)를 이루면서 순차적이고 안정적으로 압괴되었다. 그러나 CFRP 부재의 경우는 부재의 적층각에 따라 변화 하였으며 Farley and Jones<sup>11)</sup>가 정의한 대로 압괴모드는 계면사이의 크랙 진전, 횡방향 전단, 라미나 굽힘 그리고 국부 좌굴을 일으켜 취성파괴 되며 압괴되었다.

Fig. 4(a)는 CFRP 적층각도가 45°로 적층된 시험편

**Fig. 4.** Shapes of square collapsed compound members (Impact energy: 833.1J).

으로 내부 AI 부재는 비축대칭 접힘모드로 압괴되며 외부 CFRP 부재의 모서리 부분에서 기지와 섬유의 파단을 일으켰고 내부 AI 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재의 일부 섬유가 끼어 들어가지만 나머지 섬유는 끼어 들어가지 못하고 파단되는 조합모드(combination mode)의 형태로 압괴되었다.


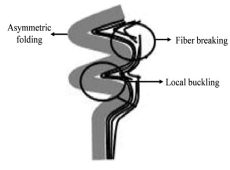
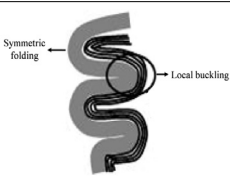
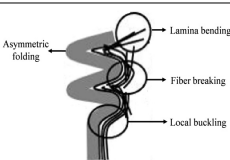
Fig. 4(b)는 CFRP 적층각도가 90°로 적층된 시험편으로 내부 AI 부재는 축대칭 접힘 모드로 압괴되며, CFRP 부재의 섬유가 AI 부재의 접힘 사이로 대부분 끼어 들어가면서 압괴되는 축대칭 접힘모드의 형태로 압괴되었다. 축대칭 접힘모드는 주로 CFRP 적층각도가 축방향에 대하여 직교하는 방향으로 적층된 경우, 즉 적층각도가 큰 경우에 나타났으며, AI 부재와 결합하여 매우 안정적인 압괴모드를 보이며 압괴되었다.

Fig. 4(c)와 (d)는 CFRP의 최외 적층각이 0°와 90°로 조합된 시험편으로 내부 AI 부재는 비축대칭 접힘모드로 압괴되며, 섬유가 부재의 외측으로 확장되고 파단되면서 압괴되는 파쇄 확장 모드의 형태로 압괴되었다. 파쇄 확장 모드는 0°방향의 섬유가 부재의 외측으로 확장되는 라미나 굽힘이 발생하며 AI 부재와 분리되려 하지만 90°적층섬유는 후프 응력 형태로 하중을 지지하므로 AI 부재의 접힘을 방해 하고 확장되면서 90°의 섬유와 함께 파단되면서 압괴된다.

Table 2는 적층각이 서로 다른 CFRP/AI 혼성 사각부재의 압괴모드와 에너지 흡수 메커니즘과의 관계를 나타냈다.

Table 2로부터 알 수 있는 바와 같이 [+45<sub>2</sub>°/-45<sub>2</sub>°]<sub>s</sub>로 적층된 CFRP/AI 혼성 사각부재는 AI 부재의 비대칭

**Table 2.** Collapse modes and energy absorption mechanisms of square compound member

Orientation angle	Energy absorption mechanisms 	Fracture pattern
$[+45_2^\circ/-45_2^\circ]_8$		Al: Asymmetric Folding CFRP: Transverse crack Local buckling
$[90^\circ]_8$		Al: Symmetric Folding CFRP: Local buckling
$[0_2^\circ/90_2^\circ]_8$ $[90_2^\circ/0_2^\circ]_8$		Al: Asymmetric Folding CFRP: Laminar bending Transverse crack Local buckling

접힘모드와 CFRP 부재의 섬유파단, 섬유의 국부좌굴에 의해서 에너지를 흡수함을 알 수 있었고,  $[90^\circ]_8$ 로 적층된 CFRP/Al 혼성 사각부재는 Al 부재의 축대칭 접힘모드와 CFRP 부재 섬유의 국부좌굴에 의해서 에너지를 흡수함을 알 수 있었다. 또한,  $[0_2^\circ/90_2^\circ]_8$ 와  $[90_2^\circ/0_2^\circ]_8$ 로 적층된 CFRP/Al 혼성 사각부재는 Al 부재의 비대칭 접힘모드와 CFRP 부재의 라미나 굽힘, 섬유파단, 섬유의 국부좌굴에 의해서 주로 에너지를 흡수함을 알 수 있었다.

본 연구에서 적용한 혼성부재는 CFRP와 Al이 결합된 혼성 부재이므로 적층각의 변화에 따른 CFRP부재 계면사이의 크랙 진전, 횡전단 크랙, 라미나 굽힘, 섬유의 국부좌굴 및 섬유의 파단에 의한 에너지흡수와 Al 부재의 소성변형에 의한 접힘압괴에 의해 에너지가 흡수 된다고 생각된다. 이상의 에너지 흡수 메커니즘의 고찰로 부터 차량의 설계 시 차실내의 구조부재는 에너지흡수라고 하는 관점과 차체 앞부분으로 부터 전달된 하중을 흡수·분산을 통하여 차실의 변형이 적게 되도록 설계해야 한다는 관점에서 똑같은 충격하중을 받을 경우 압괴길이가 짧고 외부의 충격하중을 흡수·분산을 통해 흡수에너지가 많이 흡수되는  $[90^\circ]_8$ 로 적층된 CFRP/Al 혼성 사각부재가 가장 적절함을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 CFRP/Al 혼성 사각부재가 경량화 자

동차의 사이드부재에 사용될 것을 상정하여 모자형 사이드부재를 모방한 CFRP/Al 혼성 사각부재가 적층각도의 변화에 따라 충격압괴 특성에 어떠한 영향을 미치는가를 실험적으로 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CFRP/Al 혼성 사각부재의 압괴길이는 적층 조건이  $[90^\circ]_8$  인 경우가 56.9 mm로 가장 짧았으며, 그 다음으로  $[0_2^\circ/90_2^\circ]_8$ ,  $[90_2^\circ/0_2^\circ]_8$ ,  $[+45_2^\circ/-45_2^\circ]_8$  순으로 크게 압괴되었고, 흡수에너지, 단위질량당 흡수에너지, 단위체적당 흡수에너지, 모두 적층조건이  $[90^\circ]_8$  인 경우가 높게 나타났다. 이상의 결과로 부터 CFRP/Al 혼성 사각부재의 충격압괴특성은 적층조건이  $[90^\circ]_8$ 인 경우가 가장 우수함을 알 수 있다.

2. CFRP 적층각도가  $[90^\circ]_8$ 로 적층된 시험편은 내부 Al 부재는 축대칭 접힘 모드로 압괴되며, CFRP 부재의 섬유는 Al 부재의 접힘 사이로 국부좌굴을 일으키며 대부분 끼어 들어가면서 매우 안정적인 압괴모드를 보이며 압괴되었다.

3. CFRP 적층각도가  $[90_2^\circ/0_2^\circ]_8$ ,  $[0_2^\circ/90_2^\circ]_8$ ,  $[+45_2^\circ/-45_2^\circ]_8$ 로 적층된 시험편은 내부 Al 부재는 비축대칭 접힘 모드로 압괴되며 외부 CFRP 부재의 모서리 부분에서 기지와 섬유의 파단을 일으켰고 내부 Al 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재의 일부 섬유만 끼어 들어가며 파단되는 조합 모드로 나타났다.

4. CFRP 적층각도가  $0^\circ$ 와  $90^\circ$ 섬유로 조합된 시험편의 경우,  $0^\circ$ 섬유는 높은 압괴하중에 잘 견디며,  $90^\circ$ 섬유는 Al 부재의 접힘을 방해하면서 압괴가 되면서 에너지를 흡수하였다. 또한, 최외층 각도가  $90^\circ$ 일 때  $0^\circ$ 섬유는 외부로 확장되는 라미나 굽힘이 발생하나 내외층의  $90^\circ$ 섬유에 의해 외부확장이 방해되며 압괴되면서 에너지를 흡수하므로 최외층각이  $0^\circ$ 경우보다 흡수에너지가 낮게 나타난 것으로 사료된다.

### References

- 1) 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, No. 1, pp. 125-132, 2002.
- 2) M. Tani and A. Funahashi, "Energy Absorption by the Plastic Deformation of Body Structural Members", Paper 783068 Presented at S.A.E. Annual Meeting, Detroit, February, 1978.
- 3) C. S. Cha, J. O. Chung, J. W. Park, Y. N. Kim and I. Y. Yang, "Collapse Analysis of Spot Welded Thin Section Members

- in a Vehicle Body Structure at Various Impact Velocities”, *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 501-510, 2003.
- 4) 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, No. 4, pp. 515-521, 2007.
  - 5) H. Song, Z. Fan, G. Yu, Q. Wang and A. Tobota, “Partition Energy Absorption of Axially Crushed Aluminum Foam-filled hat sections”, *Int. J. Solids and Structures* Vol. 42, Is. 9-10, pp. 2575-2600, 2005.
  - 6) 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, Issue 10, pp. 1645-1660, 2003.
  - 7) B. J. Kim and S. J. Heo, “Collapse Characteristics of Aluminum Extrusions Filled with Structural Foam for Space Frame Vehicles”, *International Journal of Automotive Technology* Vol. 4, No. 3, pp. 141-147, 2003.
  - 8) 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*, Vol. 233-236, pp. 239-244, 2003.
  - 9) 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, Is. 2, pp.179-208, 1999.
  - 10) K.S. Lee, H, K. Seo, Y. Y. Yang, W. C. Hwang, K. H. Im and I. Y. Yang, “Collapse Behavior Evaluation of Hybrid Thin-walled Member by Stacking Condition”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* Vol. 21, Supplement 1, pp. s135-s140, 2011.
  - 11) J. H. Kim, “(A) Study on the Characteristics of the Impact Collapse Mode for the Light-oriented Vehicle Members”, *Doctorate Thesis, Chosun University*, 1997.
  - 12) 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, Issue 2, pp. 179-208, 1999.