

< 논문 >

차체구조부재용 알루미늄 CFRP 혼성사각부재의 축 압괴 특성

이길성* · 차천석** · 편석범*** · 양인영**** · 심재기†
(2005년 3월 29일 접수, 2005년 9월 8일 심사완료)

Axial Collapse Characteristics of Aluminum CFRP Compound Square Members for Vehicle Structural Members

Kilsung Lee, Cheonseok Cha, Seokbeom Pyeon, Inyoung Yang and Jaeki Sim

Key Words: Aluminum CFRP Compound Member(알루미늄 CFRP 혼성부재), Axial Collapse Test(축 압괴실험), Fiber Orientation Angle(섬유 적층 각도), Thickness of CFRP(CFRP 두께)

Abstract

An aluminum or CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) is representative one of light-weight materials but its axial collapse mechanism is different from each other. The aluminum member absorbs energy by stable plastic deformation, while the CFRP member absorbs energy by unstable brittle failure with higher specific strength and stiffness than those in the aluminum member. In an attempt to achieve a synergy effect by combining the two members, aluminum CFRP compound square members were manufactured, which are composed of aluminum members wrapped with CFRP outside aluminum square members with different fiber orientation angle and thickness of CFRP, and axial collapse tests were performed for the members. The axial collapse characteristics of the compound members were analyzed and compared with those of the respective aluminum members and CFRP members. Test results showed that the collapse of the aluminum CFRP compound member complemented unstable brittle failure of the CFRP member due to ductile characteristics of the inner aluminum member. The collapse modes were categorized into four modes under the influence of the fiber orientation angle and thickness of CFRP. The absorbed energy per unit mass, which is in the light-weight aspect, was higher in the aluminum CFRP compound member than that in the aluminum member and the CFRP member alone.

1. 서 론

자동차의 전면 충돌 사고 시 전면부 사이드부재는 충돌 에너지를 흡수하는데 가장 큰 역할을 하는 강도부재이다. 사이드부재는 일반적으로 사각박스 형태의 단면형상으로 이루어졌으며, 충돌 시에 소성 변형하여 충돌 에너지를 흡수하도록 설계하고 있다.

최근 차체설계의 동향은 연비의 향상과 배기가

스의 감소를 위하여 경량화를 지향하고 있다. 그러나 차체의 경량화는 충돌에 대한 안전성을 확보한 상태에서 이루어져야 한다. 사이드부재와 같이 축 하중을 받는 강도부재의 압괴 특성에 관한 연구는 경량화와 더불어 안전성능의 차원에서 많은 에너지를 흡수할 수 있는 구조부재를 개발하기 위하여 여러 가지 재료와 다양한 단면형상에 대한 연구들이 행해지고 있다.⁽¹⁻¹⁵⁾ 그러나 구조부재의 압괴(Collapse) 현상은 기하학적 변형이 크고, 소성변형을 포함하는 비선형 거동을 하기 때문에 이론적으로 해석하는 것이 어려워 많은 연구들이 실험적 해석에 의존하고 있다.

본 연구에서는 경량화용 강도부재를 개발하기 위하여 알루미늄 부재의 외면을 탄소섬유 강화복

† 책임저자, 회원, 조선대학교 기전공학과
E-mail : jgsim@chosun.ac.kr
TEL : (062)230-7012 FAX : (062)230-7012

* 회원, 조선대학교 대학원 기계설계공학과

** 회원, 순천대학교 기계자동차공학부

*** 동강대학 소방안전관리과

**** 회원, 조선대학교 기계설계공학과

합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics: 이하 CFRP 라고 한다.)로 강화시킨 혼성부재 형태의 강도부재를 제시하였다. 알루미늄 부재는 안정적인 접합(국부좌굴)을 이루며, CFRP 부재는 비강도, 비강성이 우수하면서 이방성을 갖고 있어서, 이 두 재료의 결합에 의해 서로의 장점에 대한 상승(시너지)효과를 기대할 수 있을 것으로 생각된다. 즉, 두 재료인 알루미늄과 CFRP는 대표적인 경량재료이지만, 축 하중을 받을 때 압케되는 메커니즘이 상이하다. 알루미늄 부재는 CFRP 부재에 비하여 압케하중은 낮으나 안정적인 소성변형에 의해 에너지를 흡수하고,⁽⁶⁻¹⁰⁾ CFRP 부재는 알루미늄 부재에 비하여 압케하중은 높으나 불안한 취성파괴에 의해서 에너지를 흡수한다.⁽¹¹⁻¹⁵⁾ 따라서 알루미늄과 CFRP 부재의 단점을 상호 보완하고, 각 부재의 장점이 결합하여 효과적인 구조부재의 특성을 발휘할 것이라 생각된다.

연구방법으로는 알루미늄 부재의 외면을 CFRP로 감싸 적층하여 강화시킨 혼성부재를 직접 가공하여 준정적 축 압케실험을 행하였다. 그리고 알루미늄 부재와 CFRP 부재의 압케실험을 행하여 혼성부재와 비교 평가하였다. 특히, 이방성 재료인 CFRP의 설계변수로 두께와 적층각의 변화에 따른 축 압케 특성을 고찰하였다.

2. 시험편

대표적인 경량화 재료인 알루미늄과 CFRP가 실제 차량의 구조부재의 재료로 사용될 것을 상정하여, 알루미늄 부재, CFRP 부재 그리고 혼성부재를 시험편으로 사용하였다. 알루미늄 부재는 두께 1.0mm, 외측의 한 변의 길이가 30mm인 정사각형 단면의 6063-T5 계열의 압출재를 사용하였으며, 알루미늄의 기계적 성질을 Table 1에 나타냈다.

CFRP 부재는 CF/Epoxy로 조합된 T300 섬유로 구성된 일방향 탄소섬유 프리프레그 시트(한국화이버, CU125NS-Carbon fiber Uni-direction 125g/m2, No Scrim)를 축 방향을 0°로 하여 적층수 8ply(약 1.0mm), 적층각을 90°로 하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였으며, 외측 한번의 길이가 32mm인 정사각 단면이다. CFRP 프리프레그 시트의 기계적 성질을 Table 2에 나타냈다.

혼성부재는 알루미늄 사각부재의 외측을 Fig. 1

과 같이 CFRP 부재의 제작에 사용된 것과 동일한 프리프레그 시트로 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. 또한, CFRP 적층각과 두께가 압케 특성에 미치는 영향을 고찰하기 CFRP 적층각을 $[+\theta_n/-\theta_n]_s$ 로 하였다. 여기서 적층각 θ 는 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 0°/90°, 90°/0°로 하였으며, 두께는 4ply(n=1, 약 0.5mm), 8ply(n=2), 12ply(n=3), 16ply(n=4)로 변화를 주었다. 시험편 길이는 오일러 좌굴을 일으키지 않고 실험 시 압케가 수 주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하여 잔류응력이 발생하지 않도록 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다.

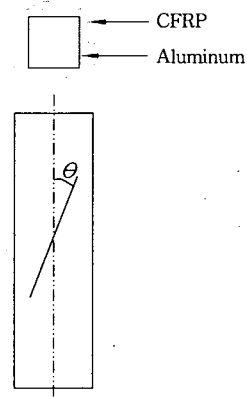


Fig. 1 Configuration of the test specimens

Table 1 Material properties of the aluminum

Density	Poisson's ratio	Young's modulus	Yield stress	Tensile stress
2.68×10^3 [kg/m ³]	0.31	67.2 [GPa]	165 [MPa]	192 [MPa]

Table 2 Material properties of the CFRP prepreg sheet

Types Properties	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg sheet (Fiber direction)
Density	1.83×10^3 [kg/m ³]	1.24×10^3 [kg/m ³]	-
Poisson's ratio	-	-	0.3
Young's modulus	240 [GPa]	3.60 [GPa]	132.7 [GPa]
Tensile Strength	4.89 [GPa]	0.08 [GPa]	1.85 [GPa]
Breaking elongation	2.1 [%]	3.0 [%]	1.3 [%]
Resin content	-	-	33 [% Wt]

3. 압괴실험

만능재료시험기(Instron 4206-001, 15Ton)를 사용하여 10mm/min의 변형률 속도로 제어하여 균일한 압축하중이 가해지도록 준정적 압괴실험을 행하였다. 또한, 시험편 압괴길이는 전체길이(120mm)의 50% (60mm)까지 축 방향으로 변위를 제어하면서 연속적으로 압괴실험을 행하였다.

압괴실험은 각 시험편당 5~7회 수행하여 데이터의 평균값을 취하였으며, 5~7회의 데이터의 오차는 3% 이내였다. Fig. 2에 압괴실험 후 얻어진 데이터 중 임의로 선택하여 하중-변위선도를 나타냈으며, 여기서 굵은 실선은 8ply, 90°로 적층된 혼성부재를, 가는 실선은 8ply, 90°로 적층된 CFRP 부재를, 점선은 알루미늄 부재를 나타낸다.

시험편에 흡수된 에너지의 계산은 압괴실험에서 얻은 하중-변위선도의 면적을 흡수에너지로 하여, 하중-변위선도를 식 (1)과 같이 적분하여 구하였다.

$$E_a = \int_0^S P dS \quad (1)$$

여기서, E_a 는 흡수에너지, P 는 압괴하중, S 는 시험편의 압괴된 길이를 나타낸다. 그리고 단위체적당흡수에너지는 흡수에너지를 압괴된 부분의 체적으로 나눈 값으로 식 (2)와 같이 구하였으며, 단위질량당 흡수에너지는 흡수에너지를 압괴된 부분의 질량으로 나눈 값으로 식 (3)과 같이 구하였다.

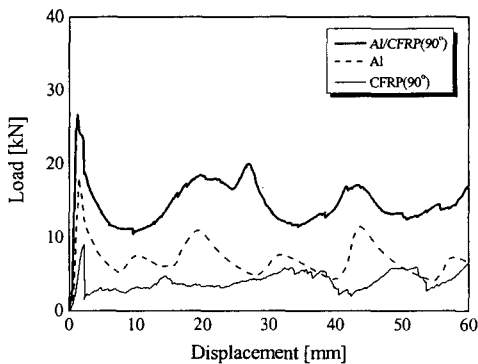


Fig. 2 Load-displacement curves of specimens

$$E_v = \frac{E_a}{(A_{Al} + A_{CFRP})S} \quad (2)$$

$$E_m = \frac{E_a}{(\rho_{Al}A_{Al} + \rho_{CFRP}A_{CFRP})S} \quad (3)$$

여기서, E_v 와 E_m 는 각각 단위체적당 흡수에너지와 단위질량당 흡수에너지, A_{Al} 는 알루미늄 부재의 단면적, A_{CFRP} 는 CFRP 부재의 단면적, ρ_{Al} 는 알루미늄 부재의 밀도, 그리고 ρ_{CFRP} 는 CFRP 부재의 밀도를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4.1 압괴모드

본 논문에서의 기하학적 치수를 갖는 알루미늄 부재는 축대칭모드를 이루면서 안정적인 소성변형에 의해서 에너지를 흡수하였으며, CFRP 부재는 접힘 압괴모드를 이루면서 취성파괴에 의해서 에너지를 흡수하였다.

혼성부재의 압괴모드는 알루미늄 부재와 CFRP 부재의 압괴모드가 결합된 4가지 대표적인 압괴모드로 나눌 수 있는데 이는 CFRP 적층각과 두께에 의해서 결정되어진다. Fig. 3은 혼성 부재의 대표적인 압괴모드와 단면을 나타낸 그림이다.

혼성부재는 크게 혼합분열모드, 혼합파쇄모드, 혼합접힘모드 및 파쇄분열모드로 압괴된다. Fig. 3(a)는 내부 알루미늄 부재는 축대칭모드로 압괴되지만, 외부 CFRP 부재의 모서리 부분의 섬유 파단과 분열을 계기로 알루미늄 부재와 분리되면서 압괴되는 모드로 혼합분열모드(compound split mode)라 정의하였다. 혼합분열모드는 CFRP 적층각이 작은 경우로서 15°, 30° 및 0°/90°에서 주로 발생하였다. 0°/90°에서는 0°의 섬유는 축 방향으로 찢어지면서 확장되지만 90°의 섬유는 알루미늄 부재 사이에 일부 끼어들어가는 경향을 보였다.

Fig. 3(b)는 내부 알루미늄 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재의 일부가 끼어 들어가지만 알루미늄 부재의 접힘 사이로 섬유가 끼어 들어가지 못하고 파단되는 압괴모드로 혼합파쇄모드(compound fragmentation mode)라 정의하였다. 혼합파쇄모드는 CFRP의 적층각이 45°와 CFRP 두께가 비교적 두꺼운 12ply, 16ply의 90°, 12ply의 90°/0°인 경우

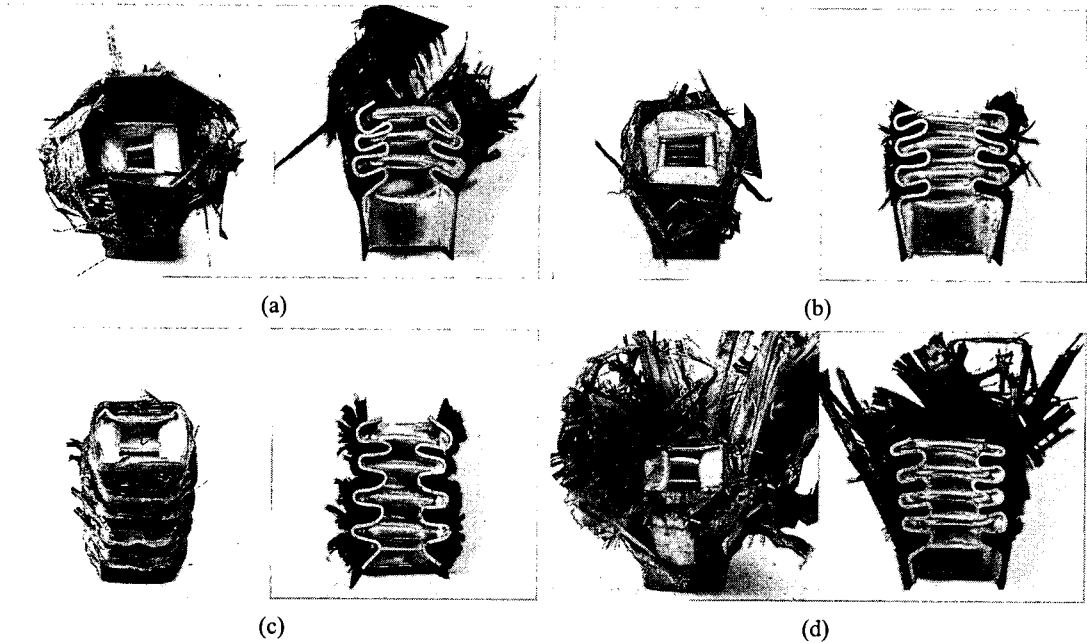


Fig. 3 Typical collapse modes and section of compound members: (a) compound split mode (b) compound fragmentation mode (c) compound folding mode (d) fragmentation and split mode

에 주로 나타났다.

Fig. 3(c)는 내부 알루미늄 부재의 접힘 사이로 대부분의 CFRP 부재가 끼어 들어가는 압괴모드로 혼합접힘모드(compound folding mode)라 정의하였다. 혼합접힘모드는 CFRP의 적층각이 크고, 두께가 얇은 경우에 주로 발생하였다. 즉, CFRP 적층각이 60°와 75° 및 CFRP 두께가 비교적 얇은 4ply, 8ply로 적층된 90°와 90°/0°에서 주로 발생하였다.

Fig. 3(d)는 외부 CFRP 부재의 모서리 부분의 섬유가 파단되면서 밖으로 분열되어 벌어지는 압괴모드로 파쇄분열모드(fragmentation and split mode)라 정의하였다. 파쇄분열모드는 혼합파쇄모드와 혼합분열모드가 혼합된 압괴모드로, CFRP 두께가 두꺼운 16ply로 적층된 90°/0°인 경우에 나타났다. 즉, 최외층각의 90° 섬유가 모서리 부분에서 응력집중으로 인하여 파단되면서 안쪽에 있는 90° 섬유는 알루미늄 부재 사이로 끼어들어 가지만 0° 섬유는 알루미늄 부재 사이로 끼어들어가지 못하고 외측으로 분열되면서 압괴된다.

4.2 Al, CFRP, 혼성부재의 에너지흡수

Figs. 4, 5는 각각 알루미늄 부재 및 8ply, 90°로 적층된 CFRP부재와 8ply, 90°로 적층된 혼성부재

의 압괴과정에서의 단위체적 당 흡수에너지와 단위질량당 흡수에너지를 나타낸다. 여기서, 굵은 실선은 혼성부재를, 가는 실선은 CFRP 부재를, 점선은 알루미늄 부재를 나타낸다.

Fig. 4로부터 단위체적당 흡수에너지는 알루미늄 부재가 초기에 높은 값을 갖지만 압괴가 진행되면서 혼성 부재와 비슷한 값을 갖으며, CFRP 부재는 안정적이지만 낮은 값을 갖는다. 이것은 동일한 체적을 갖는 부재에서 혼성부재와 CFRP 부재가 안정적으로 에너지를 흡수하고 알루미늄 부재와 혼성부재가 CFRP 부재에 비하여 많은 에너지를 흡수한다는 것을 의미한다. 그러나 알루미늄 부재가 CFRP 부재에 비하여 밀도가 크기 때문에 경량화 차원에서 본다면, Fig. 5와 같이 단위질량당 흡수에너지는 알루미늄 부재가 초기에 CFRP 부재에 비하여 높은 값을 갖지만 압괴가 진행되면서 비슷한 값을 갖는다. 특히, 혼성부재의 단위질량당 흡수에너지가 알루미늄 및 CFRP 부재에 비하여 안정적으로 높게 나타났다. 이는 사이드부재와 같은 축 하중을 받는 부재에 혼성부재를 사용할 경우 안정적이며 경량화 효과가 크다는 것을 의미한다.

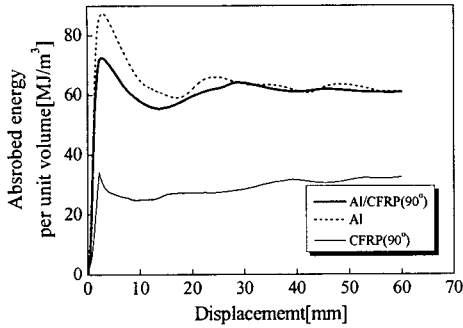


Fig. 4 Relationship between absorbed energy per unit volume and displacement

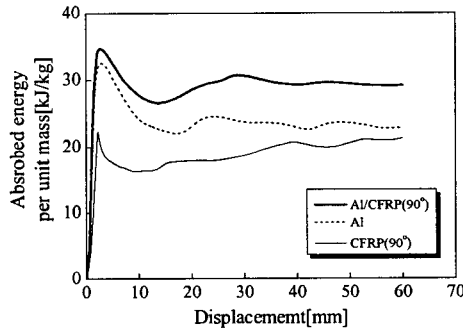


Fig. 5 Relationship between absorbed energy per unit mass and displacement

4.3 CFRP 적층각의 영향

Fig. 6은 8ply로 적층된 혼성부재의 CFRP 적층각의 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 나타낸다. Fig. 6으로부터 혼성부재의 CFRP 적층각이 증가함에 따라 단위질량당 흡수에너지가 증가함을 알 수 있다. 즉, 혼성부재의 CFRP 적층각이 클수록 CFRP 부재가 hoop stress 형태로 하중을 지지하므로, 알루미늄 부재의 접합을 방해하면서 하중이 더 높아진 후에 접합이 시작되고, 내부 알루미늄 부재와 외부 CFRP 부재가 분리되지 않고 알루미늄 부재의 접합 사이로 CFRP 부재가 접혀 들어가는 안정적인 접합모드를 이루면서 많은 에너지를 흡수한다.

또한, 적층각이 90°일 때 우수한 압괴특성을 보였기에 최외층각을 변화시킨 0°/90°와 90°/0°인 경우와 비교해 보면, 최외층각이 90°인 +90°/90°와

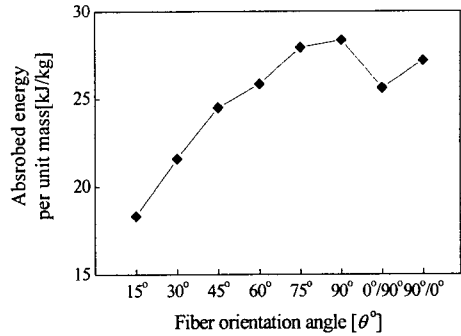


Fig. 6 Relationship between absorbed energy per unit mass and fiber orientation angle

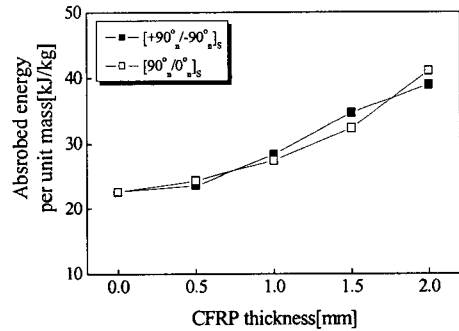


Fig. 7 Relationship between absorbed energy per unit mass and CFRP thickness

90°/0°의 적층각을 갖는 Al/CFRP 부재가 우수한 압괴 특성을 보임을 알 수 있다. 0°/90°의 혼성부재는 최외층각의 0°의 섬유가 밖으로 분열되면서 압괴되는 혼합분열모드를 이루며 90° 섬유의 일부가 알루미늄 부재 사이로 끼어들어가면서 에너지를 흡수하지만, +90°/-90°와 90°/0°의 혼성부재는 알루미늄 부재의 접합 사이로 CFRP 부재가 대부분 끼어 들어가는 혼합접합모드를 이루면서 압괴되기 때문에 많은 에너지를 흡수한다.

4.4 CFRP 두께의 영향

Fig. 7은 앞 절에서 고찰한 바와 같이 에너지흡수특성에 유리한 90°와 90°/0°로 적층된 혼성부재를 대상으로 CFRP 적층두께의 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 나타낸다. Fig. 7에서와 같이 단위질량당 흡수에너지는 90° 부재와 90°/0° 부재 모두 CFRP 적층두께가 증가함에 따라 증가

하였다. 이는 CFRP 적층두께가 증가할수록 혼성 부재의 압력은 두께의 증가효과로 인하여 압력 시 접힘 길이가 커지면서 하중이 더 높아진 후에 알루미늄 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재가 끼어 들어가면서 압력이 이루어지기 때문에 두 재료의 단점을 보완하면서 장점에 대한 상승효과가 효과적으로 나타난 것이라 생각된다. CFRP의 적층두께가 증가함에 따라 경량화효과를 이룰 수 있는 이유는 CFRP 적층두께의 증가로 인해 높은 비강도, 비강성을 갖는 CFRP 부재가 내부 알루미늄 부재의 순차적인 축대칭모드로 압력하려는 것을 방해하면서 더 높은 하중 하에서 압력이 이루어지기 때문이라 생각된다.

5. 결론

알루미늄 부재와 CFRP 부재의 압력 특성을 기초로 하여 알루미늄 부재의 외측을 CFRP로 강화시킨 혼성부재를 제작하여, CFRP의 적층각과 적층두께의 변화에 따른 축 방향 압력실험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 혼성부재는 내부 알루미늄 부재의 압력의 영향으로 CFRP 부재의 취성파괴의 단점을 보완하여 비교적 안정적인 압력모드를 보였다. 혼성부재는 4가지 대표적인 압력모드를 보였는데, 압력모드가 에너지흡수 특성을 나타내는 효과적인 척도가 되었다.

(2) 단위체적당 흡수에너지는 알루미늄 부재와 혼성부재가 비슷하게 CFRP 부재에 비하여 높았다. 그러나 경량화 차원에서 본, 단위질량당 흡수 에너지는 혼성 부재가 알루미늄 부재와 CFRP 부재에 비하여 높았다. 이와 같은 결과는 축 하중을 받는 부재에 혼성부재를 사용할 경우 경량화 효과가 크다는 것을 의미한다.

(3) 혼성부재는 CFRP 적층각이 클수록 에너지 흡수에 유리한 특성을 보였다. 즉, 적층각이 75°, 90°에서 효과적인 에너지흡수 특성을 보였다. 또한, 90°인 경우가 우수한 압력 특성을 보였기에 최외층각을 변화시킨 0°/90°와 90°/0°인 경우와 비교해 보면, 최외층각이 90°인 경우가 우수한 압력 특성을 보였다.

(4) 혼성부재는 CFRP의 두께의 증가에 따라 접힘길이가 커지면서 안정적으로 압력되며 효과적인 압력 특성을 보였다.

후 기

이 논문은 2004년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

- (1) White, M. D. and Jones, N., 1999, "Experimental Quasi-Static Axial Crushing of Top-Hat and Double-Hat Thin-Walled Sections," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 41, pp. 179~208.
- (2) White, M. D., Jones, N. and Abramowicz, W., 1999, "A Theoretical Analysis for The Quasi-Static Axial Crushing of Top-Hat and Double-Hat Thin-Walled Sections," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 41, pp. 209~233.
- (3) Cha, C. S., Chung, J. O., Park, J. W., Kim, Y. N. and Yang, I. Y., 2003, "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.
- (4) Cha, C. S., Kang, J. Y. and Yang, I. Y., 2001, "Axial Impact Collapse Analysis of Spot Welded Hat Shaped Section Members," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 180~191.
- (5) Cha, C. S., Kim, Y. N., Kim, S. K., Im, K. H. and Yang, I. Y., 2002, "Axial Impact Collapse Analysis of Spot Welded Hat and Double-Hat Shaped Section Members Using an Explicit Finite Element Code," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 1, pp. 32~38.
- (6) Kim, S. K., Im, K. H., Kim, Y. N., Park, J. W., Yang, I. Y. and Adachi, T., 2003, "On the Characteristics of Energy Absorption Control in Thin-Walled Members for the Use of Vehicular Structures," *Key Engineering Materials*, Vols. 233~236, pp. 239~244.
- (7) Li, S. and Reid, S. R., 1990, "Relationship Between the Elastic Buckling of Square Tubes and Rectangular Plates," *International Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, pp. 969~973.
- (8) Minoru, Y., Manabu, G. and Yasuhiko S., 2003, "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.
- (9) Singace, A. A., 1999, "Axial Crushing Analysis of Tubes Deforming in the Multi-Mode," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 41, pp. 865~890.
- (10) Avalle, M. and Belingardi, G., 1997, "Experimental Evaluation of the Strain Field History During Plastic Progressive Folding of Aluminum Circular Tubes," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 39, No. 5, pp. 575~583.
- (11) Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B. and Papapostolou, D. P., 2004, "Crashworthy Characteristics of Axially Statically Compressed Thin-Walled Square CFRP Composite Tubes: Experimental," *Composite Structures*, Vol. 63, pp. 347~360.
- (12) Kim, Y. N., Cha, C. S. and Yang, I. Y., 2002, "The Experimental Study on the Collapse Mechanism of CFRP Composite Tubes," *Transactions of the KSAE*, Vol. 10, No. 4, pp. 149~157.
- (13) Farley, G. L., 1992, "Relationship Between Mechanical-Property And Energy-Absorption Trends for Composite Tubes," *NASA Technical paper*, OMB No. 0704-0188.
- (14) Kim, Y. N., Im, K. H., Kim, S. K. and Yang, I. Y., 2003, "Energy Absorption Characteristics of CFRP Composite Tubes Under Axial Compression Load," *Key Engineering Materials*, Vols. 233-236, pp. 245~250.
- (15) Kim, Y. N., Hwang, J. J., Baek, K. Y., Cha, C. S. and Yang, I. Y., 2003, "Impact Collapse Characteristics of CF/Epoxy Composite Tubes for Light-Weights," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 1, pp. 48~56.