Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 5, pp.50-56 (2005)

Copyright © 2005 KSAE
1225-6382/2005/077-07

경량화용 Al/CFRP 원형 부재의 축 압궤거동에 관한 연구

이 길 성[1] · 차 천 석[2] · 양 인 영[*3]

조선대학교 대학원 기계설계공학과[1] · 순천대학교 기계자동차공학부[2] · 조선대학교 기계정보공학과[3]

A Study on the Axial Crushing Behavior of Aluminum CFRP Circular Members for Light-weight

Kilsung Lee[1] · Cheonseok Cha[2] · Inyoung Yang[*3]

[1]*Department of Mechanical Design Engineering Graduate school, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea*
[2]*Division of Mechanical and Automotive Engineering, Sunchon National University, Jeonnam 540-742, Korea*
[3]*Department of Mechanical Information Engineering, Chosun University, Dong-gu, Gwangju 501-759, Korea*
(Received 25 February 2005 / Accepted 8 June 2005)

Abstract : Aluminum member absorbs energy by stable plastic deformation under axial loading. While CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) member absorbs energy by unstable brittle failure but its specific strength and stiffness is higher than those of aluminum member. In this study, for complement of detects and synergy effect by combination with the advantages of each member, the axial collapse tests were performed for aluminum CFRP members which are composed of aluminum members wrapped with CFRP outside aluminum circular members. Based on the respective collapse characteristics of aluminum and CFRP members, crushing behavior and energy absorption characteristics were analyzed for aluminum CRRP members which have different CFRP fiber orientation angle and thickness Test results showed that aluminum CFRP members supplemented the unstable brittle failure of CFRP members due to ductile nature of inner aluminum members. It turned out that the CFRP fiber orientation angle and thickness influence energy absorption capability together with the collapse mode of the members.

Key words : Axial collapse test(축압궤실험), Aluminum CFRP member(알루미늄 CFRP 부재), Crushing behavior (압궤거동), Energy absorption characteristic(에너지흡수특성), Fiber orientation angle(섬유 적층각도)

1. 서 론

자동차의 충돌에 있어서 안전에 대한 연구는 전면 충돌의 경우가 측면이나 후면으로 부터의 충돌에 비해 가장 많이 발생하는 사고형태이기 때문에 전면 충돌의 안전성능은 차량개발에서 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 차량의 초기 설계 단계에서 차량 전체의 전면 충돌 안전성능을 예측하기 전에, 전면부 사이드부재와 같이 충돌 시 에너지 흡수량이 크고, 간단한 구조부재의 압궤특성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 충돌 시 많은 에너지를 흡수하기 위해서는 강도와 강성이 크면서, 좌굴시 강도와 강성에 상반하는 안정적인 접힘(좌굴)이 이루어져야 한다. 이와 같은 기계적 특성과 더불어 배기가스 및 연비개선을 위해서 경량화용 구조부재의 개발이 절실히 요구된다.

이와 같은 요구에 부응하기 위하여 수송기계의 강도부재로 사용되고 있는 구조부재의 압궤특성에 대한 연구가 여러 가지 재질과 다양한 형상에 대해

*To whom correspondence should be addressed.
iyyang@chosun.ac.kr

서 행해지고 있다.[1-12] 특히, 20세기 초 경량화 기술은 알루미늄합금의 개발에 의한 비약한 발전을 이루었고, 이와 더불어 복합재료와 같은 고기능재료에 대한 요구가 점차 증가되어, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 안전성능과 경량화 대한 방안으로 Al 부재의 외면을 비강도, 비강성이 우수하면서 이방성을 갖는 탄소섬유강화 복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastics: 이하 CFRP라고 한다.)로 감싸 강화시킨 구조부재를 제시하였다. 이는 경량재료이면서 안정적인 접힘(좌굴)을 이루는 Al 부재에[4-8], CFRP 부재가[9-12] 결합하여 두 재료의 단점을 상호 보완하고, 장점에 대한 상승효과를 기대할 수 있기 때문이다. 특히, CFRP는 하중을 고려한 이방성의 설계에서는 합리적인 설계가 가능하고 또 적은 재료로 최적설계가 가능하리라 생각된다.

본 연구에서는 Al 원형부재와 CFRP 원형부재의 각각의 압궤특성을 기초로 하여, Al/ CFRP 원형부재의 CFRP 적층각과 두께의 변화에 따른 준정적 축방향 압궤실험을 행하여 압궤모드와 에너지흡수 특성을 고찰하였다.

2. 시험편

대표적인 경량화 재료인 Al과 CFRP가 실제 차량의 구조부재의 재료로 사용될 것을 상정하여, Al 부재, CFRP 부재 그리고 Al/CFRP 부재를 시험편으로 사용하였다. Al 부재는 서울메탈(주)에서 가공한 6063-T5계열로서 두께는 1.0mm이며, 외경은 38mm이다. 알루미늄의 기계적 성질을 Table 1에 나타냈다.

CFRP 부재는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트(CU125NS-Carbon fiber Uni-direction 125g/m^2, No Scrim)를 축 방향을 0°로 하여 적층 수 8ply(약 1.0mm), 적층각을 90°로 하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. CFRP 부재의 외경은 40mm이며, CFRP 프리프레그 시트의 기계적 성질을 Table 2에 나타냈다.

Al/CFRP 부재는 Al 부재의 외측을 Fig. 1과 같이 CFRP 부재의 제작에 사용된 것과 동일한 프리프레그 시트로 적층하여 오토클레이브를 이용하여 성형하였다. 또한, CFRP 적층각과 두께가 에너지흡수 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 CFRP 적층구성을 $[+\theta_n/-\theta_n]_S$로 하였다. 여기서 적층각 θ는 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. 모든 시험편의 길이는 오일러좌굴을 일으키지 않고 실험시 압궤가 수주기 반복하여 나타나는데 충분한 길이인 120mm로 하였

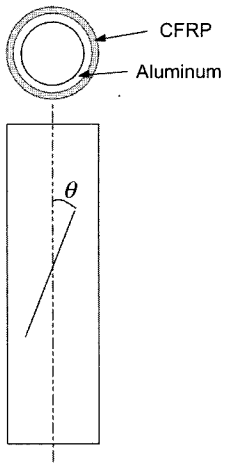

Fig. 1 Configuration of the test specimens

Table 1 Material properties of the aluminum

Density	Poisson's ratio	Young's modulus	Yield stress	Tensile stress
2.68 [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
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 stress	4.89 [GPa]	0.08 [GPa]	1.85 [GPa]
Breaking elongation	2.1 [%]	3.0 [%]	1.3 [%]
Resin content	-	-	33 [% Wt]

다. 오토클레이브로 성형시 경화온도는 130°C, 경화시간은 90분으로 하였으며 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10^{-1}Pa까지 진공시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10^{5}Pa 정도 가압시켜 제작하였다. 제작 후 잔류응력이 발생하지 않도록 하기 위하여 다이아몬드 커터를 이용하여 절단하였다.

3. 압궤실험

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

압궤실험은 각 시험편당 5~7회 수행하여 데이터의 평균값을 취하였다. 압궤실험 후 얻어진 5~7회의 데이터의 오차는 3% 이내였으며, Fig. 1에 그 결과 얻어진 데이터 중 임의로 선택하여 하중-변위선도를 나타냈다. Fig. 1은 Al 부재 및 8ply, 90°로 적층된 CFRP 부재와 8ply, 90°로 적층된 Al/CFRP 부재의 하중-변위선도를 나타낸다. 여기서, 굵은 실선은 Al/CFRP 부재를, 가는 실선은 CFRP 부재를, 점선은 Al 부재를 나타낸다.

시험편에 흡수된 에너지량의 계산은 Fig. 2와 같이 압궤실험에서 얻은 하중-변위선도의 면적을 흡수에너지로 하여, 하중-변위선도를 식 (1)과 같이 적분하여 구하였다.

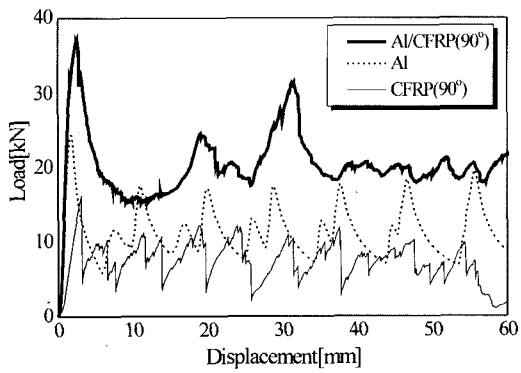

Fig. 2 Load-displacement curve of specimens

$$E_a = \int_0^S P\,dS \tag{1}$$

여기서, E_a는 흡수에너지, P는 압궤하중, S는 시험편의 압궤된 길이를 나타낸다. 그리고 단위체적당 흡수에너지는 흡수에너지를 압궤된 부분의 체적으로 나눈 값으로 식 (2)와 같이 구하였으며, 단위질량당 흡수에너지는 흡수에너지를 압궤된 부분의 질량으로 나눈 값으로 식 (3)과 같이 구하였다.

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

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

여기서, E_v와 E_m는 각각 단위체적당 흡수에너지와 단위질량당 흡수에너지, A_{Al}는 Al 부재의 단면적, A_{CFRP}는 CFRP 부재의 단면적, ρ_{Al}는 Al 부재의 밀도, 그리고 ρ_{CFRP}는 CFRP 부재의 밀도를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

4.1 압궤모드

Al 부재의 압궤모드는 크게 축대칭모 드, 비축대칭모드 그리고 축대칭모드와 비축대칭모드가 혼합된 압궤모드를 이루면서 안정적으로 압궤된다.[4-8] 그러나 CFRP 부재의 경우는 적층각의 변화에 의해 주로 압궤모드가 결정되는데, 크게 쐐기형 압궤모드(Wedge collapse mode), 확장형 압궤모드(Splaying collapse mode) 그리고 파쇄형 압궤모드(Fragmentation collapse mode)로 불안한 취성파괴에 의해서 압궤된다.[9-12]

본 논문에서의 기하학적 치수를 갖는 Al 부재는 축대칭 압궤모드를 이루면서 안정적인 소성변형에 의해서 에너지를 흡수하였으며, CFRP 원형부재는 파쇄형 압궤모드를 이루면서 취성파괴에 의해서 에너지를 흡수하였다.

Al/CFRP 부재의 압궤모드는 Al 부재와 CFRP 부재의 압궤모드가 결합된 4가지 대표적인 압궤모드로 나눌 수 있다. 이는 CFRP 적층각과 두께에 의해서 주로 결정되어졌다. Fig. 3은 Al/CFRP 부재의 대표적인 압궤모드와 단면을 나타낸 그림이다.

Al/CFRP 부재는 크게 혼합확장모드, 혼합접힘모드, 혼합파쇄모드 및 파쇄확장모드로 압궤된다. Fig. 3(a)는 외부 CFRP 부재의 축 방향 섬유가 원통벽의

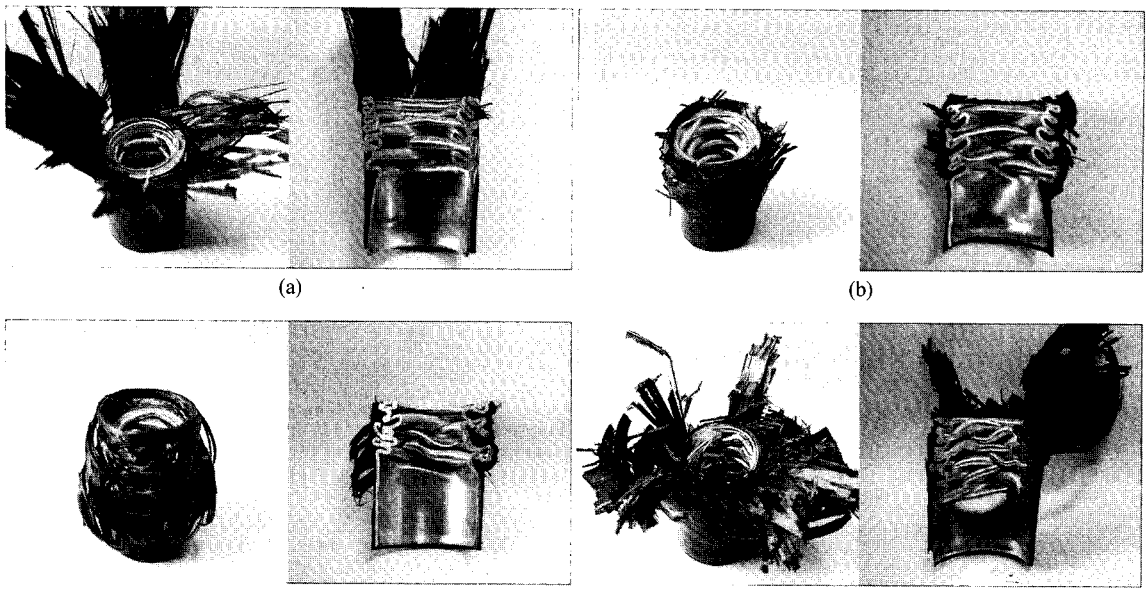

Fig. 3 Typical collapse modes and section of Al/ CFRP members: (a) compound splaying mode (b) compound folding mode (c) compound fragmentation mode (d) fragmentation and splaying mode

외측으로 확장되어 벌어지는 압궤모드로 혼합확장모드(compound splaying mode)라 정의하였다. 혼합확장모드는 CFRP 적층각이 작은 경우로서 15°, 30° 및 0°/90°에서 주로 발생하였다. 0°/90°에서는 0°의 섬유는 확장되지만 90°의 섬유는 Al 부재의 접힘 사이에 일부 끼어들어가는 경향을 보였다.

Fig. 3(b)는 내부 Al 부재의 접힘 사이로 CFRP 부재가 주로 끼어 들어가는 압궤모드로 혼합접힘모드(compound folding mode)라 정의하였다. 혼합접힘모드는 CFRP의 적층각이 45°에서 주로 발생하였다. 혼합접힘모드는 혼합파쇄모드에 비하여CFRP의 절단된 섬유의 대부분이 내부 Al 부재의 접힘 사이로 끼어들어가며, 적층각이 증가할수록 혼합파쇄모드로 압궤되는 경향을 보였다.

Fig. 3(c)는 내부의 Al 부재가 비축대칭 모드로 압궤되면서 CFRP 부재의 원주방향 섬유의 대부분이 절단되고 일부의 섬유는 Al 부재의 접힘 사이에 끼어 들어가는 압궤모드로 혼합파쇄모드(compound fragmentation mode)라 정의하였다. 혼합파쇄모드는 CFRP의 적층각이 75°를 포함하여 그 이상인 90°와 4ply, 8ply, 12ply로 적층된 90°/0°인 경우에 주로 나타난다. 즉, 외부 CFRP 부재의 적층각이 클수록 CFRP 부재의 원주방향으로 작용하는 응력이 크기 때문에 내부 Al 부재의 규칙적인 압궤를 방해하여 불규칙적인 압궤모드를 이루게 하면서 외부 CFRP 부재의 원주방향 섬유는 절단된다.

Fig. 3(d)는 외부 CFRP 부재의 원주 방향 섬유가 절단되면서 축 방향 섬유가 원통벽의 외부로 확장되어 벌어지는 압궤모드로 파쇄확장모드(fragmentation and splaying mode)라 정의하였다. 파쇄확장모드는 혼합파쇄모드와 혼합확장모드가 혼합된 압궤모드로, 16ply로 적층된 90°/0°인 경우에 나타난다. 즉, 최외층각의 90° 섬유가 절단되면서 그 안쪽에 있는 0° 섬유가 Al 부재의 접힘 사이로 끼어들어가지 못하고 외측으로 확장되면서 압궤된다.

4.2 에너지 흡수

Figs. 4, 5는 각각 Al 부재 및 8ply, 90°로 적층된 CFRP 부재와 8ply, 90°로 적층된 Al/CFRP 부재의 압궤 과정에서의 단위체적당 흡수에너지와 단위질량당 흡수에너지를 나타낸다. 여기서, 굵은 실선은 Al/CFRP 부재를, 가는 실선은 CFRP 부재를, 점선은 Al 부재를 나타낸다.

Fig. 4로부터 단위체적당 흡수에너지는 Al 부재

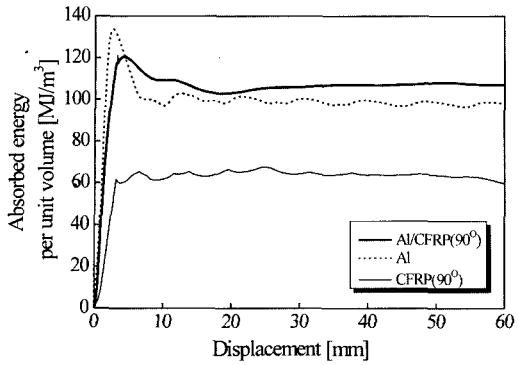

Fig. 4 Relationship between absorbed energy per unit volume and displacement

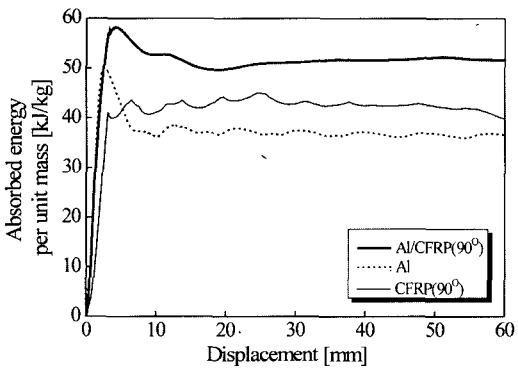

Fig. 5 Relationship between absorbed energy per unit mass and displacement

가 초기에 높게 나타내지만 압궤가 진행되면서 Al/CFRP 부재가 높게 나타나고, CFRP 부재는 안정적이지만 낮게 나타남을 알 수 있다. 압궤길이인 60mm가 모두 압궤된 이후 단위체적당 흡수에너지는 각각 Al/CFRP 부재가 107.09MJ/m^3, Al 부재가 98.06MJ/m^3 그리고 CFRP 부재가 59.73MJ/m^3 순으로 높았다. 이것은 동일한 체적을 갖는 부재에서 Al/CFRP 및 CFRP 부재가 안정적으로 에너지를 흡수하며 Al 부재와 Al/CFRP 부재가 CFRP 부재에 비하여 많은 에너지를 흡수한다는 것을 의미한다. 그러나 Al 부재가 CFRP 부재에 비하여 밀도가 크기 때문에 경량화 차원에서 본다면, Fig. 5와 같이 CFRP 부재가 Al 부재에 비해 안정적이고 많은 에너지를 흡수하며 압궤된다. 특히, Al/CFRP 부재가 Al 및 CFRP의 부재에 비하여 안정적으로 많은 에너지를 흡수하며 압궤되는 것을 알 수 있다. 압궤길이인 60mm가 모두 압궤된 이후 단위질량당 흡수에너지는 각각 Al/CFRP 부재가 51.67kJ/kg, CFRP 부재가 39.80kJ/kg 그리고 Al 부재가 36.65kJ/kg 순으로 높았다. 이는 사이드부재와 같은 축 하중을 받는 부재에 Al/CFRP 부재를 사용할 경우 안정적이며, 경량화 효과도 크다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 8ply로 적층된 Al/CFRP의 CFRP 적층각의 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 나타낸다. Fig. 6으로부터 Al/CFRP의 CFRP 적층각의 증가에 따라 단위질량당 흡수에너지가 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, Al/CFRP의 CFRP 적층각이 클수록 CFRP 부재가 hoop stress 형태로 하중을 지지하므로, Al 부재의 접힘을 방해하면서 하중이 더 높아진 후에 접힘이 시작되고, 이때 CFRP 부재의 원주 방향 섬유는 파단되면서 Al 부재의 접힘 사이로 끼어 들어가면서 안정적인 압궤를 보이며 많은 에너지를 흡수한다.

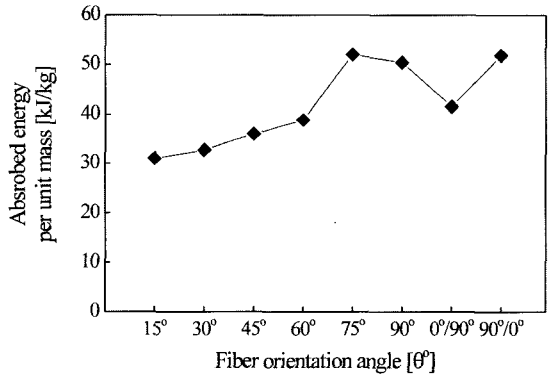

Fig. 6 Relationship between absorbed energy per unit mass and fiber orientation angles

90°인 경우가 우수한 압궤특성을 보였기에 최외층각을 변화시킨 0°/90°와 90°/0°인 경우와 비교해 보면, 90°/0°인 경우가 가장 우수한 압궤특성을 보임을 알 수 있다. 그 이유는 최외층각이 0°인 0°/90°의 경우는 최외층 플라이의 섬유는 압축하중과 굽힘하중을 받게되며 섬유의 파단없이 압궤된다. 그러나 최외층각이 90°인 90°/0°의 경우는 내부의 0° 섬유가 90°인 섬유에 비하여 높은 압축하중과 굽힘하중을 받고, 최외층에서 외부로 발산하려는 에너지를 최외층 90°인 섬유에 전단하중이 가해지면서 섬유가

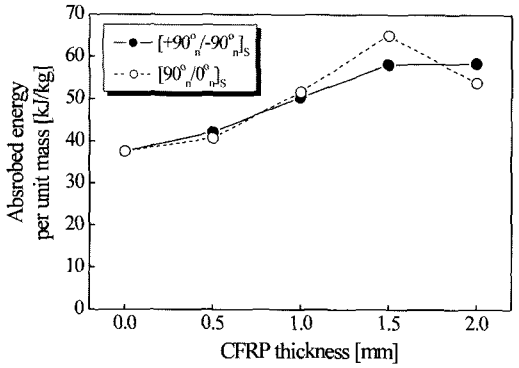

Fig. 7 Relationship between absorbed energy per unit volume and CFRP thickness

파단되며 에너지를 흡수하기 때문이다.

Fig. 7은 에너지흡수 특성에 유리한 90°와 90°/0°로 적층된 Al/CFRP 부재를 대상으로, CFRP 두께(적층 수) 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 나타낸다. Fig. 7에서와 같이 단위질량당 흡수에너지는 90° 부재와 90°/0° 부재 모두 CFRP 두께(적층 수)가 증가함에 따라 증가하다가, 16ply에서는 90° 부재는 증가율이 거의 없고, 90°/0° 부재에서는 오히려 감소하였다. 그리고 12ply에서 가장 좋은 압궤특성을 보였다. 16ply에서 90°/0° 부재의 단위질량당 흡수에너지가 급격히 감소한 이유는 내부의 0° 섬유가 초기의 높은 압궤하중을 받으나, 압궤가 되면서 최외층각의 90° 섬유가 파단되어 접힘을 이루는 것을 방해하고 어느 순간 밖으로 확장되어 파괴되면서 CFRP 부재와 Al 부재를 분리시켰기 때문이라 생각된다. CFRP 두께의 증가에 따라 경량화 효과를 이룰 수 있는 이유는 CFRP 두께가 증가함에 따라 CFRP의 높은 비강도, 비강성으로 인하여 내부 Al 부재의 순차적인 축대칭모드로 압궤하려는 것을 방해하면서 더 높은 하중 하에서 압궤가 이루어지기 때문이라 생각된다. 그러나 CFRP 부재의 두께가 어느 한계이상이 되면 내부 Al 부재와 CFRP 부재의 장점에 대한 상승효과가 감소하면서 CFRP 부재의 압궤특성에 의해 주로 에너지를 흡수하기 때문에 압궤특성이 나빠진다고 생각된다.

5. 결 론

Al 부재의 외측을 CFRP로 강화시킨 Al/CFRP 부재를 가공하여, CFRP의 적층각과 적층두께의 변화에 따른 축 방향 압궤실험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Al/CFRP 부재의 압궤는 내부 Al 부재의 연성특성의 영향으로 CFRP 부재의 취성파괴의 단점을 보완하여 비교적 안정적인 압궤모드를 보였다.
2) 경량화 차원에서 본, 단위질량당 흡수에너지는 Al/CFRP 부재가 Al 부재와 CFRP 부재에 비하여 높았다. 이와 같은 결과는 축 하중을 받는 부재에 Al/CFRP 부재를 사용할 경우 경량화 효과가 크다는 것을 의미한다.
3) Al/CFRP 부재는 CFRP 적층각이 클수록 에너지 흡수에 유리한 특성을 보였다. 즉, 적층각이 75°, 90°에서 효과적인 에너지흡수 특성을 보였다. 또한, 90°인 경우가 우수한 압궤특성을 보였기에 최외층각을 변화시킨 0°/90°와 90°/0°인 경우와 비교해 보면, 90°/0°인 경우가 가장 우수한 압궤특성을 보였다.
4) Al/CFRP 부재는 CFRP의 두께의 증가에 따라 경량화효과를 이룰 수 있으나, CFRP 두께가 어느 한계이상이 되면 내부 Al 부재와 CFRP 부재의 장점에 대한 상승효과가 감소하면서 CFRP 부재의 압궤특성에 의해 주로 에너지를 흡수하기 때문에 압궤특성이 저하될 수 있다.

References

1) M. D. White and N. Jones, "Experimental Quasi-static Axial Crushing of Top-hat and Double-hat Thin-walled Sections," International Journal of Mechanical Science 41, pp.179-208, 1999.
2) M. D. White, N. Jones and W. Abramowicz, "A Theoretical Analysis for the Quasi-static Axial Crushing of Top-hat and Double-hat Thin-walled sections," International Journal of Mechanical Sciences 41, pp.209-233, 1999.
3) B. J. Kim and S. J. Heo, "Crashworthness Design Concepts for the Improved Energy Absorbing Performance of an Aluminum Lightweight Vehicle Body," Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.155-160, 2003.
4) 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, Vols.233-236, pp.239-244, 2003.
5) S. Li and S. R. Reid, "Relationship Between the Elastic Bucking of Square Tubes and Rectangular Plates," International Journal of Applied Mechanics, Vol.57, pp.969-973, 1990.
6) 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.
7) A. A. Singace, "Axial Crushing Analysis of Tubes Deforming in the Multi-mode," International Journal of Mechanical Science, Vol.41, pp.865-890, 1999.
8) M. Avalle and G. Belingardi, "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, 1997.
9) A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, M. B. Ioannidis and D. P. Papapostolou, "Crashworthy Characteristics of Axially Statically Compressed Thin-walled Square CFRP Composite Tubes: Experimental, Composite Structures, Vol.63, pp.347-360, 2004.
10) Y. N. Kim, C. S. Cha and I. Y. Yang, "The Experimental Study on the Collapse Mechanism of CFRP Composite Tubes," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.149-157, 2002.
11) G. L. Farley, "Relationship between Mechanical-property and Energy-absorption Trends for Composite Tubes," NASA Technical Paper, OMB No.0704-0188, 1992.
12) Y. N. Kim, K. H. Im, S. K. Kim and I. Y. Yang, "Energy Absorption Characteristics of CFRP Composite Tubes under Axial Compression Load," Key Engineering Materials, Vols.233-236, pp.245-250, 2003.