

축 하중을 받는 Al/CFRP 혼성튜브의 에너지흡수 특성

이길성*, 차천석⁺, 문지현⁺⁺, 양인영⁺⁺⁺

Energy Absorption Characteristics of Al/CFRP Compound Tubes Under Axial Compression

Kilsung Lee*, Cheonseok Cha⁺, Jihyun Moon and Inyoung Yang⁺⁺⁺

Abstract

The compressive axial collapse tests were performed to investigate energy absorption characteristics of Al/CFRP compound tubes which are aluminum tubes wrapped with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) outside the aluminum circular and square tubes. Based on collapse characteristics of aluminum tubes and CFRP tubes respectively, the axial collapse tests were performed for Al/CFRP compound tubes which have different fiber orientation angles. Test results showed that Al/CFRP compound tubes supplemented the unstable brittle failure of CFRP tubes due to ductile nature of inner aluminum tubes. In the light-weight aspect, specific energy absorption were the highest for Al/CFRP, CFRP in the middle, and aluminum the lowest. Also, specific energy absorption of circular tubes was higher than square tubes'. It turned out that fiber orientation angle of Al/CFRP compound tubes influence specific energy absorption together with the collapse modes of the tubes.

Key Words : Compound Tubes(혼성튜브), Compressive Axial Collapse(축압궤), Specific Energy Absorption(비 흡수에너지), Collapse Modes(압궤모드)

1. 서론

자동차 전면부 사이드부재는 주로 축 하중을 받아 에너지를 흡수하는 강도부재이다.^{1)~5)} 축 하중을 받는 강도부재는 충돌 시 많은 에너지를 흡수하기 위해서 강도와 강성이 크면서, 좌굴시 안정적인 접힘(국부좌굴)이 이루어져야 하

는 구조를 가져야 한다. 이와 같은 특성과 더불어 연비를 향상시키기 위해서 경량화가 요구된다.

이에 대한 방안으로 Al/CFRP 혼성튜브의 강도부재를 제시하였다. 이는 경량재료이면서 안정적인 접힘을 이루는 알루미늄 튜브에^{6)~10)} CFRP 튜브가 결합하여 두 재료의 장점에 대한 상승효과를 기대할 수 있기 때문이다.

* 주저자, 조선대학교 기계설계공학과 (ks2994@daum.net)
주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

+ 순천대학교 기계자동차공학부

++ 조선대학교 기계공학부

+++ 조선대학교 기계정보공학과

즉, 두 재료인 알루미늄과 CFRP 튜브의 강도부재가 축하중을 받을 때, 알루미늄 튜브는 안정적인 소성변형에 의해서 에너지를 흡수하는 반면, CFRP 튜브는 불안정한 취성 파괴에 의해서 대부분의 에너지를 흡수한다.¹¹⁾⁻¹⁵⁾ 따라서, 알루미늄과 CFRP 튜브의 단점을 상호 보완하고, 알루미늄 튜브의 안정적인 소성 변형에 의한 에너지흡수와 CFRP 튜브의 높은 비강도, 비강성에 의한 에너지흡수라는 장점이 결합하여 효과적인 강도부재의 특성을 발휘할 것이라 생각된다. 특히, CFRP는 적층각에 의해 강도와 탄성을 등의 기계적 특성이 변화하는 이방성 재료이기 때문에, 하중을 고려한 이방성의 설계에서는 합리적인 설계가 가능하고 또 적은 재료로 최적설계가 가능하리라 생각된다.

본 연구에서는 알루미늄과 CFRP 튜브의 각각의 압괴특성을 기초로 하여, Al/CFRP 혼성튜브를 가공하였으며, CFRP의 적층각의 변화에 따른 준정적 축 방향 압괴실험을 행하였다.

2. 시험편

알루미늄 원형 및 사각튜브는 (주)서울메탈에서 가공한 6063-T5계열로서 두께는 1.0mm이며, 원형튜브는 외경 38mm, 사각튜브는 한 변의 길이가 30mm인 정사각형 단면이다. 알루미늄 원형 및 사각튜브는 기계적 성질이 일치한다. CFRP 튜브는 Carbon/Epoxy로 조합된 T700 섬유로 구성된 일방향 탄소섬유 프리프레그 시트 (한국화이버, CU125NS -Carbon fiber Unidirection 125g/m²)로 적층수 8ply(약 1.0mm), 적층각을 90°로 선택하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. 또한, Al/CFRP 혼성튜브는 알루미늄 원형 및 사각튜브의 외측을 CFRP 튜브의 제작에 사용된 것과 동일한 프리프레그 시트로 감싸 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형하였다. 적층시 축방향을 0°로 하여, CFRP의 적층각의 영향을 고찰하기 위하여 혼성 원형 및 사각튜브 모두 적층각을 ±15°, ±45°, 90°로 하여, 모두 8ply로 적층하였다. 오토클레이브로 성형시 경화온도는 130℃, 경화시간은 90분으로 하였으며 진공펌프에 의해서 진공백 속을 10⁻¹Pa 까지 진공시킨 후 컴프레셔에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10⁵Pa 정도 가압시켰다. 모든 시험편의 길이는 다이아몬드 커터를 이용하여 120mm로 절단하였다. CFRP 프리프레그 시트의 물성치는 Table 1에 나타냈다.

Table 1 Material properties of the CFRP prepreg sheet

Types Properties	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg sheet
Density	1.83×103 [kg/m3]	1.24×103 [kg/m3]	-
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]

3. 압괴시험

만능재료시험기 (Instron 4206-001, 15Ton)를 사용하였으며, 로드셀과 액추에이터 사이에 두개의 압축 지그를 평행하게 설치하고, 10mm/min의 변형률 속도로 제어하여 균일한 압축하중이 가해지도록 준정적 압괴실험을 행하였다. 또한, 시험편 압괴길이는 전체길이 (120mm)의 58.3% (70mm)까지 축 방향으로 변위를 제어하면서 연속적으로 압괴실험을 행하였다.

압괴실험은 각 시험편당 5~7회 수행하여 데이터의 평균값을 취하였다. 압괴실험 후 얻어진 5~7회의 데이터의 오차는 4% 이내였으며, Figs. 1, 2에 그 결과 얻어진 데이터 중 임의로 선택하여 하중-변위선도를 나타냈다. Fig. 1은 알루미늄 원형튜브 및 90°로 적층된 CFRP 원형튜브와 90°로 적층된 Al/CFRP 혼성 원형튜브의 하중-변위선도를 나타내며, Fig. 2는 알루미늄 사각튜브 및 90°로 적층된 CFRP 사각튜브와 90°로 적층된 Al/CFRP 혼성 사각튜브의 하중-변위선도를 나타낸다. 여기서, 굵은 실선은 Al/CFRP 혼성튜브를, 가는 실선은 CFRP 튜브를, 점선은 알루미늄 튜브를 나타낸다.

시험편에 흡수된 에너지량의 계산은 Figs. 1, 2와 같이 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 압

꺾인 길이를 나타낸다. 그리고 비 흡수에너지는 흡수에너지를 압꺾된 부분의 질량으로 나눈 값으로 식 (2)과 같이 구할 수 있다.

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

여기서, E_s 는 비 흡수에너지, ρ_{Al} 는 알루미늄 튜브의 밀도, ρ_{CFRP} 는 CFRP 튜브의 밀도, A_{Al} 는 알루미늄 튜브의 단면적 그리고 A_{CFRP} 는 CFRP 튜브의 단면적을 나타낸다.

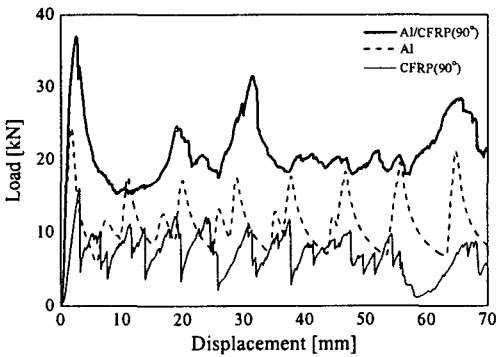


Fig. 1 Load-displacement curve of circular tubes

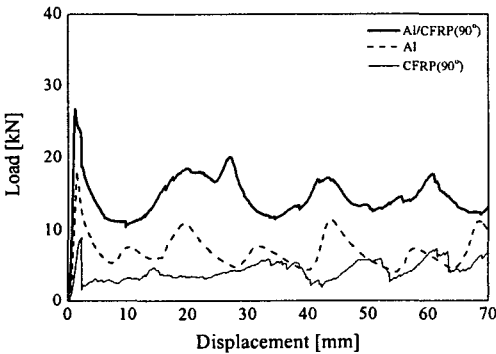


Fig. 2 Load-displacement curve of square tubes

4. 결과 및 고찰

4.1 압꺾모드

알루미늄 원형튜브의 압꺾모드는 크게 축대칭모드, 비축대칭모드 그리고 축대칭모드와 비축대칭모드가 혼합된 혼

합모드를 이루면서 안정적으로 압꺾된다. 알루미늄 사각튜브 또한 알루미늄 원형튜브와 비슷하게 축대칭모드와 비축대칭모드를 이루면서 순차적이고 안정적으로 압꺾된다.⁹⁻¹⁰⁾ 그러나 CFRP 튜브의 경우는 적층각의 변화에 의해 주로 압꺾모드가 결정되는데, 크게 썩기형 압꺾모드(wedge collapse mode)와 확장형 압꺾모드(splaying collapse mode)로 불안정하게 취성파괴에 의해서 압꺾된다.¹¹⁾⁻¹⁵⁾

Al/CFRP 혼성튜브의 압꺾모드는 알루미늄 튜브의 압꺾모드와 CFRP 튜브의 압꺾모드가 결합된 원형과 사각 각각 크게 3가지 압꺾모드로 나눌 수 있다. 이는 CFRP의 적층각에 의해서 주로 결정되어진다. Fig. 3은 혼성 원형튜브의 대표적인 압꺾모드를 나타낸 그림이며, Fig. 4는 혼성 사각튜브의 대표적인 압꺾모드를 나타낸 그림이다.

혼성 원형튜브의 압꺾모드는 혼합파쇄모드(Fig. 3a), 접힘모드(Fig. 3b), 혼합확장모드(Fig. 3c)로 압꺾된다. 혼성 원형튜브의 혼합파쇄모드는 내부의 알루미늄 튜브가 접히면서 CFRP 튜브의 원주방향 섬유 대부분이 절단되고 일부의 섬유는 알루미늄 튜브의 접힘 사이에 끼어 들어가는 압꺾모드로 정의하였다. 이는 CFRP의 적층각이 90°인 혼성 원형튜브에 주로 나타나는 압꺾모드로, CFRP 튜브의 적층각이 클수록 CFRP 튜브의 원주방향으로 작용하는 응력이 크기 때문에 내부 알루미늄 튜브의 규칙적인 압꺾를 방해하여 불규칙적인 압꺾모드를 이루게 하면서 외부 CFRP 튜브의 원주방향 섬유는 절단된다고 생각된다.

혼성 원형튜브의 접힘모드는 내부 알루미늄 튜브의 접힘 사이로 CFRP 튜브가 주로 끼어 들어가는 압꺾모드로 정의하였다. 이는 CFRP의 적층각이 ±45°에서 주로 발생하였으며, 혼합파쇄모드에 비하여 CFRP의 절단된 섬유의 대부분이 내부 알루미늄 튜브의 접힘 사이로 끼어들어간다.

혼성 원형튜브의 혼합확장모드는 CFRP 튜브의 축 방향 섬유가 원통 벽의 외측으로 확장되어 벌어지는 압꺾모드로 정의하였다. 이는 CFRP 적층각이 적은 경우에 즉, ±15°에서 CFRP 튜브의 축 방향 섬유가 알루미늄 튜브와 분리되면서 확장되어 벌어지는 형상으로 압꺾되어진다.

혼성 사각튜브의 압꺾모드는 혼합파쇄모드(Fig. 4a), 접힘모드(Fig. 4b), 혼합분열모드(Fig. 4c)로 압꺾된다. 혼성 사각튜브의 혼합파쇄모드는 혼성 원형튜브와는 조금 다르게 적층각이 ±45° 근방에서 내부 알루미늄 튜브의 접힘 사이로 CFRP 튜브의 일부가 끼어 들어가지만 알루미늄 튜브의 접힘 사이로 섬유가 끼어 들어가지 못하고 섬유가 파단되는 모드로 압꺾된다.

혼성 사각튜브의 접힘모드는 CFRP 적층각이 90°인 경우

일 때 알루미늄 튜브의 접힘 사이에 CFRP 튜브가 끼어 들어가는 모드로, 혼성 원형튜브와는 다르게 알루미늄 사각튜브가 알루미늄 원형튜브에 비해 접힘 길이가 길어 접힘 수가 적으면서 규칙적으로 접히므로 CFRP 튜브가 알루미늄 튜브의 접힘 사이에 쉽게 끼어 들어가면서 압괴된다.

혼성 사각튜브의 혼합분열모드는 내부 알루미늄 튜브는 축대칭모드로 압괴되지만 CFRP 튜브의 모서리 부분의 섬유 파단과 분열을 계기로 알루미늄 튜브와 분리되면서 압괴되는 모드로 정의하였다. 이는 CFRP 적층각이 적은 경우에 즉, $\pm 15^\circ$ 에서 CFRP 튜브가 알루미늄 튜브의 접힘 사이로 끼어 들어가지 못하고 분리되면서 압괴된다.

혼성 원형 및 사각튜브는 알루미늄 튜브의 안정적인 소성 변형에 의한 압괴의 영향으로 CFRP 튜브의 불안한 취성 파괴의 단점을 보완하여 비교적 안정적인 압괴모드를 보였다. 특히, 접힘모드와 혼합파쇄모드일 때 안정적이었다.

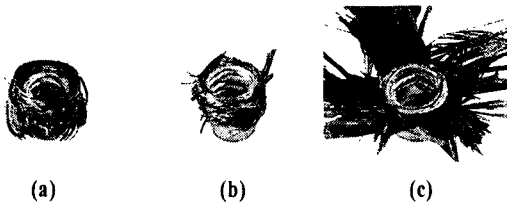


Fig. 3 Typical collapse modes in aluminum/CFRP circular tubes: (a) compound fragmentation mode (b) folding mode (c) compound splaying mode

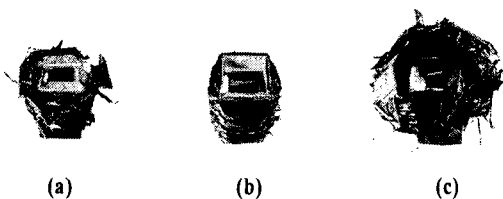


Fig. 4 Typical collapse modes in aluminum/CFRP square tubes: (a) compound fragmentation mode (b) folding mode (c) compound splitting mode

4.2 비 흡수에너지

Fig. 5는 경량화 차원에서 원형 및 사각튜브의 이종재료의 비 흡수에너지의 관계를 고찰하기 위하여, 알루미늄 튜브 및 90° 로 적층된 CFRP 튜브와 90° 로 적층된 Al/CFRP 혼성 튜브의 비 흡수에너지를 나타낸다. 또한 Fig. 6은 Al/CFRP 혼성 원형 및 사각튜브의 CFRP 적층각의 변화에

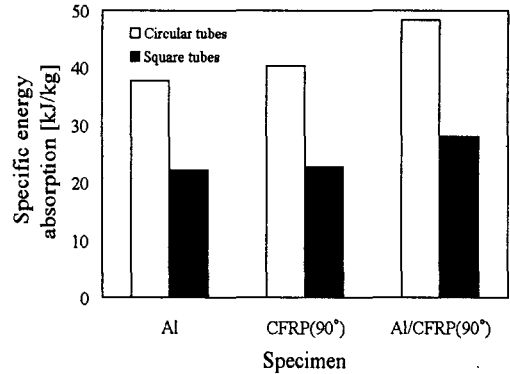


Fig. 5 Specific energy absorption of square and circular tubes

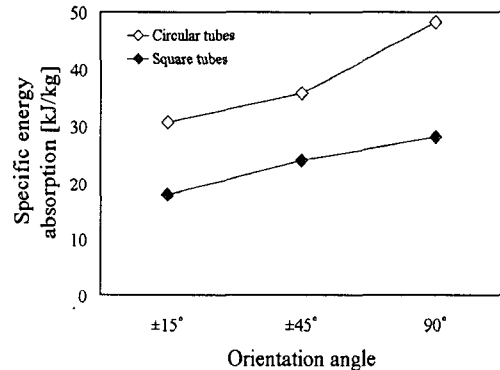


Fig. 6 Specific energy absorption of Al/CFRP compound tubes with the different fiber orientation angle

다른 비 흡수에너지를 나타낸다.

알루미늄 튜브가 CFRP 튜브에 비하여 밀도가 크기 때문에 경량화 차원에서 본다면, Fig. 5와 같이 CFRP 튜브의 비 흡수에너지가 알루미늄 튜브의 비 흡수에너지보다 약간 큼을 알 수 있다. 특히, Al/CFRP 혼성튜브의 비 흡수에너지가 알루미늄 튜브 및 CFRP 튜브에 비하여 높게 나타났다. 이는 사이드부재와 같은 축 하중을 받는 부재에 혼성 튜브를 사용할 경우 경량화 효과가 더 크다는 것을 의미한다. 그리고 Fig. 6으로부터 혼성 원형 및 사각튜브의 CFRP 적층각이 클수록 비 흡수에너지가 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 혼성튜브의 CFRP의 적층각이 커질수록 CFRP 튜브가 Hoop stress 형태로 하중을 지지하므로 알루미늄 튜브의 접힘을 방해하면서 하중이 더 높아진 후에 접힘이 시작되고, 이때 CFRP 튜브의 벽 방향 섬유는 파단되면서 알루미늄

높은 튜브의 접합 사이로 CFRP 튜브가 끼어 들어가면서 안정적인 압괴를 보이며 많은 에너지를 흡수한다. 또한, 혼성 원형튜브가 혼성 사각튜브에 비하여 약 60% 정도 비 흡수 에너지가 높았다. 이것은 강도부재가 축 하중을 받을 때 응력분포는 모서리부에서 대부분 집중되면서 압괴되는데, 모서리가 4개인 혼성 사각튜브에 비해 이론적으로 무한한 모서리를 갖고 있는 혼성 원형튜브가 더 많은 에너지를 흡수하는 것으로 사료된다.⁸⁾

5. 결론

(1) Al/CFRP 혼성 원형 및 사각튜브의 압괴는 알루미늄 튜브의 압괴의 영향으로 CFRP 튜브의 불안한 취성파괴의 단점을 보완하여 비교적 안정적인 압괴모드를 보였다.

(2) Al/CFRP 혼성 원형 및 사각튜브 모드 CFRP 적층각의 증가에 따라 에너지흡수가 비례하여 증가하였다. 즉, 혼성 원형 및 사각튜브 모두 CFRP 적층각이 90°일 때 가장 효과적으로 압괴되었다.

(3) 경량화 차원에서, Al/CFRP 혼성튜브가 알루미늄 튜브와 CFRP 튜브에 비하여 비 흡수에너지가 높았다. 또한, 원형튜브가 사각튜브에 비해 에너지흡수에 유리하였다.

참고 문헌

(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 Sciences*, 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) Avalue, 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., Manolacos, 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.