

경량화용 혼성 알루미늄 CFRP 사각튜브의 축 압괴 특성

이길성*(조선대 대학원 기계설계공학과), 차천석, 정진오(순천대 기계자동차공학부)
양인영(조선대 기계정보공학과)

Axial Collapse Characteristics of Combined Aluminum CFRP Square Tubes for Light-Weight

K. S. Lee(Department of Mechanical Design Engineering Graduate School, Chosun University)
C.S. Cha, J.O. Chung(Division of Mechanical and Automotive Engineering, Sunchon National University)
I. Y. Yang(Department of Mechanical Information Engineering Graduate School, Chosun University)

ABSTRACT

Aluminum and CFRP tube is light-weight material representatively but collapse mechanism is different under axial loading. Aluminum tube absorbs energy by stable plastic deformation under axial loading. While CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics) tube absorbs energy by unstable brittle failure but its specific strength and stiffness is higher than that of aluminum tube. In this study, for complement of detect and synergy effect by combination with the advantages of each member, the axial collapse tests were re-performed for combined aluminum CFRP tubes which are composed of aluminum tubes wrapped with CFRP outside aluminum square tubes. Collapse characteristics were analyzed for combined square tubes which have different CFRP orientation angle and thickness. Test results were compared with that of aluminum tubes and CFRP tubes.

Key Words : Light-weight(경량화), Combined aluminum CFRP tube(혼성 알루미늄 CFRP 튜브), Axial collapse test(축 압괴 실험), Collapse characteristic(압괴 특성)

1. 서 론

자동차의 전면충돌 사고 시 전면부사이드부재는 충돌에너지를 흡수하는데 가장 큰 역할을 하는 강도부재이다. 사이드부재는 사각박스 형태의 단면형상으로 주로 이루어졌으며, 충돌 시에 소성 변형하여 충돌에너지를 흡수하도록 설계하고 있다.

사이드부재와 같이 축 하중을 받는 강도부재의 압괴특성에 대한 연구는 경량화와 더불어 많은 에너지를 흡수할 수 있는 구조부재를 개발하기 위하여 여러 가지 재질과 다양한 단면형상에 대한 연구들이 행해지고 있다¹⁻¹⁰⁾. 그러나 구조부재의 압괴현상은 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 튜브의 외면을 탄소섬유 강화복합재

(Carbon Fiber Reinforced Plastics: 이하 CFRP라고 한다.)로 강화시킨 혼성튜브 형태의 강도부재를 제시하였다. 이는 경량재료이면서 안정적인 접합과 굽을 이루는 알루미늄 튜브에 CFRP 튜브가 결합하여 두 재료의 단점을 상호보완하고 장점에 대한 상승효과를 기대할 수 있기 때문이다. 즉, 두 재료인 알루미늄과 CFRP 튜브는 대표적인 경량재료이다. 그러나 축 하중을 받을 때 압괴되는 메커니즘이 상이하다. 알루미늄 튜브는 소성변형에 의해 에너지를 흡수하고³⁻⁶⁾, CFRP 튜브는 알루미늄 튜브에 비하여 비강도, 비강성은 높으나 불안한 취성파괴에 의해서 에너지를 흡수한다⁷⁻⁹⁾.

연구방법으로는 알루미늄 사각튜브의 외면을 CFRP로 감싸 적층하여 강화시킨 혼성튜브를 직접 가공하여 준정적 축 압괴실험을 행하였다. 그리고 알루미늄 사각튜브와 CFRP 사각튜브의 압괴실험을 행하여 혼성튜브와 비교 평가하였다. 특히, 이방성

재료인 CFRP의 설계변수로 두께와 적층각의 변화에 따른 축 압특성을 고찰하였다.

2. 시험편

혼성튜브는 알루미늄 사각튜브의 외측을 축 방향을 0°로 하여 CFRP로 감싸 적층하여 오토클레이브를 이용하여 성형하였다. 내부 알루미늄 튜브는 두께 1.0mm, 외측의 한 변의 길이가 30mm인 정사각형 단면의 6063-T5계열의 압출재를 사용하였으며, CFRP는 CF/Epoxy로 조합된 T300섬유로 구성된 일방향 탄소섬유 프리프레그 시트(한국화이버, CUI25NS-Carbon fiber Uni-direction 125g/m², No Scrim)를 이용하였다.

혼성튜브의 CFRP 적층구성은 $[+?_n/-?_n]_s$ 로 하였다. 여기서 적층각 $?는 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 0°/90°, 90°/0°로 하였으며, 두께는 4ply(n=1, 약 0.5mm), 8ply(n=2), 12ply(n=3), 16ply(n=4)로 변화를 주었다. 그리고 시험편의 길이는 120mm로 하였다.$

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 수행하여데이터의 평균값을 취하였으며, 5~7회의 데이터의 오차는 3% 이내였다. 시험편에 흡수된 에너지의 계산은 압괴실험에서 얻은 하중변위선도의 면적을 흡수에너지로 하여, 하중변위선도를 적분하여 구하였으며, 경량화 차원에서 본 단위질량당 흡수에너지는 흡수 에너지를 압괴된 부분의 질량으로 나눈 값으로 하여 구하였다¹⁰⁾. 그리고 단위체적당 흡수에너지는 흡수 에너지를 압괴된 부분의 체적으로 나눈 값으로 하여 구하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 압괴 모드

본 논문에서의 알루미늄 사각튜브는 축대칭압괴 모드를 이루면서 소성변형에 의해서 에너지를 흡수하였으며, CFRP 사각튜브는 접힘 압괴모드를 이루면서 취성파괴에 의해서 에너지를 흡수하였다. 혼성 사각튜브의 압괴모드는 알루미늄 튜브와 CFRP 튜브의 압괴모드가 결합된 4가지 대표적인 압괴모드로 나눌 수 있다. 이는 CFRP 적층각과 두께에 의해서

결정되어졌다. Fig. 1은 혼성튜브의 대표적인 압괴모드를 나타낸 그림이다.

Fig. 1(a)는 내부 알루미늄 튜브는 축대칭모드로 압괴되지만, 외부 CFRP 튜브의 모서리 부분의 섬유 파단과 분열을 계기로 알루미늄 튜브와 분리되면서 압괴되는 모드로 혼합분열모드라 정의하였다. 혼합분열모드는 CFRP 적층각이 적은 경우로서 15°, 30° 및 0°/90°에서 주로 발생하였다. 0°/90°에서는 0°의 섬유는 축방향으로 찢어지면서 확장되지만 90°의 섬유는 알루미늄 튜브사이에 일부 끼어들어가는 경향을 보였다.

Fig. 1(b)는 내부 알루미늄 튜브의 접힘 사이로 CFRP 튜브의 일부가 끼어 들어가지만 알루미늄 튜브의 접힘 사이로 섬유가 끼어 들어가지 못하고 파단되는 압괴모드로 혼합파쇄모드라 정의하였다. 혼합파쇄모드는 CFRP의 적층각이 45°와 60° 및 CFRP 두께가 비교적 두꺼운 12ply, 16ply의 90°, 12ply의 90°/0°인 경우에 주로 나타났다.

Fig. 1(c)는 내부 알루미늄 튜브의 접힘 사이로 CFRP 튜브가 끼어 들어가는 압괴모드로 접힘모드라 정의하였다. 접힘모드는 CFRP의 적층각이 크고, 두께가 적은 경우에 주로 발생하였다. 즉 CFRP 적층각이 75°인 경우와 CFRP 두께가 비교적 적은 4ply, 8ply로 적층된 90°와 90°/0°에서 주로 발생하였다.

Fig. 1(d)는 외부 CFRP 튜브의 모서리 부분의 섬유가 파단되면서 밖으로 분열되어 벌어지는 압괴모드로 파쇄분열모드라 정의하였다. 파쇄분열모드는 혼합파쇄모드와 혼합분열모드가 혼합된 압괴모드로, CFRP 두께가 큰 16ply로 적층된 90°/0°인 경우에 나타났다. 즉, 최외층각의 90° 섬유가 모서리 부분에서 응력집중으로 인하여 파단되면서 그 안쪽에 있는 0° 섬유가 알루미늄 튜브사이에 끼어들어가지 못하고 외측으로 분열되면서 압괴된다.

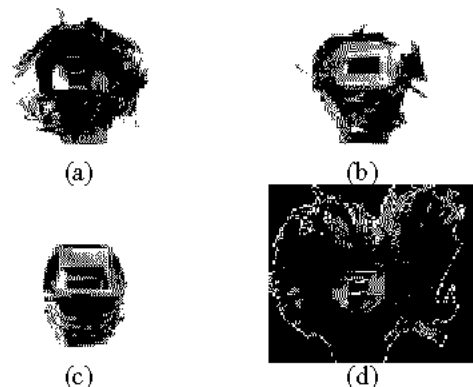


Fig. 1 Typical collapse modes of combined aluminum CFRP tubes: (a) compound split mode (b) compound fragmentation mode (c) compound folding mode (d) fragmentation and split mode

4.2. Al, CFRP, 혼성튜브의 에너지흡수

Fig. 2는 알루미늄 튜브 및 8ply, 90°로 적층된 CFRP 튜브와 8ply, 90°로 적층된 혼성튜브의 단위체적당 흡수에너지를 나타내며, Fig. 3은 경량화 차원에서 단위질량당 흡수에너지를 나타낸다. Fig. 2로부터 단위체적당 흡수에너지는 알루미늄 튜브와 혼성튜브가 비슷한 값을 가지나 CFRP 튜브는 낮게 나타남을 알 수 있다. 이것은 동일한 크기의 튜브에서는 알루미늄 튜브와 혼성튜브가 CFRP 튜브에 비하여 에너지흡수에 유리하다는 것을 의미한다. 그러나 알루미늄 튜브가 CFRP 튜브에 비하여 밀도가 크기 때문에 경량화 차원에서 본다면, Fig. 3과 같이 CFRP 튜브의 단위질량당 흡수에너지와 알루미늄 튜브의 단위질량당 흡수에너지가 비슷하다. 특히, 혼성튜브의 단위질량당 흡수에너지가 알루미늄 튜브 및 CFRP 튜브에 비하여 높게 나타났다. 이는 사이드부재와 같은 축 하중을 받는 부재에 혼성튜브를 사용할 경우 경량화 효과가 크다는 것을 의미한다.

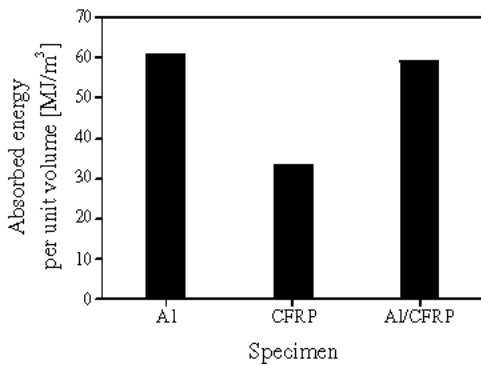


Fig. 2 Absorbed energy per unit volume of aluminum tube, CFRP tube with [+90°₂/-90°₂]_s, and combined aluminum CFRP tube with [+90°₂/-90°₂]_s

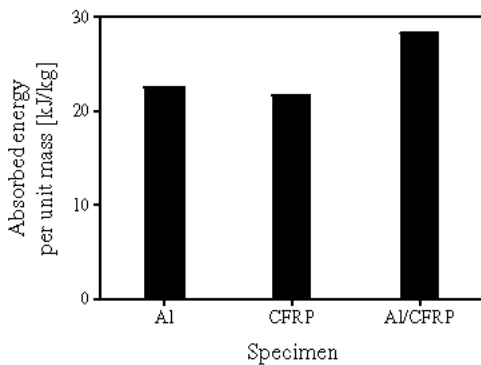


Fig. 3 Absorbed energy per unit mass of aluminum tube, CFRP tube with [+90°₂/-90°₂]_s, and combined aluminum CFRP tube with [+90°₂/-90°₂]_s

4.3. CFRP 적층각의 영향

Fig. 4는 8ply로 적층된 혼성튜브의 CFRP 적층각의 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 나타낸다. Fig. 4로부터 혼성튜브의 CFRP 적층각의 증가에 따라 단위질량당 흡수에너지가 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 혼성튜브의 CFRP 적층각이 클수록 CFRP 튜브가 hoop stress 형태로 하중을 지지하므로 알루미늄 튜브의 접힘을 방해하면서 하중이 더 높아진 후에 접힘이 시작되고, 내부 알루미늄 튜브와 외부 CFRP 튜브가 분리되지 않고 알루미늄 튜브의 접힘 사이로 CFRP 튜브가 접혀들어가는 안정적인 접힘모드를 이루면서 많은 에너지를 흡수한다. 그리고 90°인 경우가 우수한 압축특성을 보였기에 최외층각을 변화시킨 0°/90°와 90°/0°인 경우와 비교해 보면, 최외층각이 90°인 경우의 90°와 90°/0°인 경우는 비슷한 값을 가지나 최외층각이 0°인 0°/90°인 경우는 조금 낮게 나타남을 알 수 있다. 0°/90°인 경우는 최외층각의 0° 섬유가 밖으로 분열되면서 에너지를 흡수하기 때문에 최외층각이 90°인 경우보다 낮은 흡수 에너지를 가지며, 압축모드 또한 불안하다.

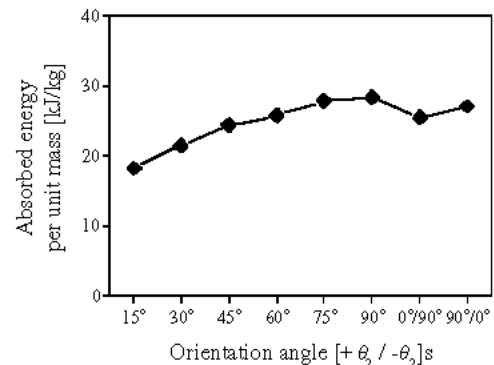


Fig. 4 Absorbed energy per unit mass of combined aluminum CFRP tubes with the orientation angles

4.4. CFRP 두께의 영향

Fig. 5는 앞 절에서 고찰한 바와 같이 에너지흡수 특성에 유리한 90°와 90°/0°로 적층된 혼성튜브를 대상으로, CFRP 두께(적층 수) 변화에 따른 단위질량당 흡수에너지를 나타낸다. Fig. 5에서와 같이 단위질량당 흡수에너지는 90° 튜브와 90°/0° 튜브 모두 CFRP 두께(적층 수)가 증가함에 따라 증가하였다. 이는 CFRP 두께가 증가할수록 혼성 사각튜브의 압력은 두께의 증가효과로 인하여 압축시 접힘길이가 커지면서 하중이 더 높아진 후에 압력이 이루어지기 때문에 두 재료의 단점을 보완하면서 장점에 대한 상승효과가 효과적으로 나타난 것이라 생각된다.

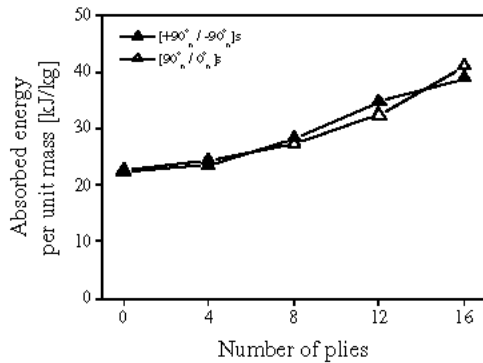


Fig. 5 Absorbed energy per unit mass of combined aluminum CFRP tubes with the CFRP wall thickness

5. 결론

1. 혼성 사각튜브의 압괴는 내부 알루미늄 튜브의 압괴의 영향으로 CFRP 튜브의 취성파괴의 단점을 보완하여 비교적 안정적인 압괴모드를 보였다. 혼성튜브는 4가지 대표적인 압괴모드를 보였는데, 압괴모드가 에너지흡수 특성을 나타내는 효과적인 척도가 되었다.

2. 단위체적당 흡수에너지는 알루미늄 튜브와 혼성튜브가 비슷하게 CFRP 튜브에 비하여 높았다. 그러나 경량화 차원에서 본, 단위질량당 흡수에너지는 혼성튜브가 알루미늄 튜브와 CFRP 튜브에 비하여 높았다. 이와 같은 결과는 축 하중을 받는 부재에 혼성튜브를 사용할 경우 경량화 효과가 크다는 것을 의미한다.

3. 혼성튜브는 CFRP 적층각이 클수록 에너지흡수에 유리한 특성을 보였다. 즉, 적층각이 75°, 90°에서 효과적인 에너지흡수 특성을 보였다. 또한, 90°인 경우가 우수한 압괴특성을 보였기에 최외층각을 변화시킨 0°/90°와 90°/0°인 경우와 비교해 보면, 최외층각이 90°인 경우가 우수한 압괴특성을 보였다.

4. 혼성튜브는 CFRP의 두께의 증가에 따라 접합 길이가 커지면서 안정적인 압괴모드를 이루며 효과적으로 경량화를 이룰 수 있다.

References

1. Cha, C. S., Chung, J. O., Park, J. W., Kim, Y. N., and Yang, I. Y., "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.

2. Cha, C. S., Kim, Y. N., Kim, S. K., Im, K. H. and Yang, I. Y., "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, 2002.
3. Li, S. and Reid, S. R., "Relationship Between the Elastic Buckling of Square Tubes and Rectangular Plates," *International Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, pp. 969-973, 1990.
4. Minoru, Y., Manabu, G. and Yasuhiko S., "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.
5. Singace, A. A., "Axial crushing analysis of tubes deforming in the multi-mode," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 41, pp. 865-890, 1999.
6. Avallé, M. and Belingardi, G., "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.
7. Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B. and Papapostolou, D. P., "Crashworthy characteristics of axially statically compressed thin-walled square CFRP composite tubes: experimental," *Composite Structures*, Vol. 63, pp. 347-360, 2004.
8. Warrior, N. A., Turner, T. A., Robitaille, F. and Rudd, C. D., "The effect of interlaminar toughening strategies on the energy absorption of composite tubes," *Composites Part A*, Vol. 35, pp. 431-437, 2004.
9. Kim, Y. N., Hwang, J. J., Baek, K. Y., Cha, C. S., and Yang, I. Y., "Impact collapse characteristics of CF/Epoxy composite tubes for light-weights," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 1, pp. 48-56, 2003.
10. 이길성, 차천석, 김정호, 정진오, 김선규, 양인영, "Al/CFRP 혼성튜브의 적층각에 따른 축방향 압괴 특성," *한국자동차공학회 춘계학술대회논문집*, pp. 853-858, 2004.