

알루미늄/GFRP 혼성 사각튜브의 정적 압축 붕괴 및 에너지 흡수 특성

김구현*, 이정주*
(한국과학기술원 기계공학과)

Axial crush and energy absorption characteristics of Aluminum/GFRP hybrid square tube

K.H. Kim and J.J. LEE

Key Words : axial crush, energy absorption, square tube, aluminum, composite

Abstract

For the axial crushing tests of various shape of tubes, it was reported that composite tubes need trigger mechanism to avoid brittle failure. In this study, static axial crush tests were performed with the new aluminum/GFRP hybrid tubes. Glass/Epoxy prepregs were wrapped around aluminum tube and co-cured. The failure of hybrid tube was stable and progressive without trigger mechanism, and specific energy absorption was increased to maximum 34% in comparison with aluminum tube. Effective energy absorption is possible for inner aluminum tube because wrapped composite tube constrain the deflection of aluminum tube and reduce the folding length. The failure of hybrid composite tube was stable without trigger mechanism because inner aluminum tube could play the role of crack initiator and controller. Aluminum/Glass-Epoxy hybrid tube is suitable for the vehicle front structure due to effective energy absorption capability, easy production, and simple application for RTM process.

1. 서 론

내연기관을 주로 사용하는 현재의 자동차들에 있어서 배기가스 배출을 줄이고 연비를 향상시키기 위해서 경량화는 필수적인 요소이며 이에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 이 중 알루미늄은 경량화를 위한 재료로 자동차의 피스톤, 블록 등의 엔진부품, 새시(chassis) 및 후드(hood), 웬더(fender), 루프(loof), 도어(door) 등의 바디 패널(body panel)에 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 알루미늄은 연신율이 낮아 변형을 집중이 생기기 쉬워 프레스 성형이 어렵다. 또한 스폿(spot) 용접성이 나빠서 강철에 비교하여 훨씬 큰 용접 전류가 필요하여 설비가 대형화되고 가격도 비싸진다.

경량화에 이용되는 또 하나의 주요 재료는 복합재료이다. 복합재료는 일반적으로 비강성 및 비강도가 높고 피로특성과 감쇠(damping)특성이 우

수한 특징이 있다. 또한 디자인의 자유도가 크고 다품종 소량생산에 적합한 재료이다. 그러나 재료가 이방성이므로 설계가 어렵고 재료와 가공 비용이 높으며 어려운 리사이클링(recycling)이 문제점이 되고 있다.

차량의 충돌시 차량 전방 구조물(front structure)의 에너지 흡수는 각각 2개의 Upper side rail과 Lower side rail에 의해 주로 이루어진다. Upper side rail과 Lower side rail은 apron이라 불리는 판재로 연결되어 있고, 엔진이 설치되는 엔진 마운트(engine mount)의 역할과 현가장치(suspension)의 지지역할을 담당하고 있다. 현재 자동차에 이용되는 side rail은 사각형 혹은 모래시계(hourglass)형태의 박스형 튜브 형태로 이루어져 있다. 전방충돌시 4개의 side rail은 연속적인 소성 변형을 통해 충돌 에너지의 약 70%를 흡수한다. 그리고 대부분의 경우 apron은 에너지 흡수에 크게 기여하지 못한

다. [1] 이러한 차량의 Side rail 을 복합재료로 대체 하려는 연구가 많이 진행되어 왔다. Thornton[2]은 탄소, 케블라(Kevlar), 유리 섬유 복합재료의 원형 튜브를 제작하여 축방향 붕괴(axial collapse) 실험을 하였으며, 취성(brittle)재료인 복합재료의 급격한 파괴를 막고 안정적이고 점진적인 붕괴를 유도하기 위해 트리거 기구(trigger mechanism)을 제안하였다. Fig. 1 에 나타낸 트리거 기구는 베벨(bevel)형식과 튜울립(tulip)형식의 2 가지가 있으며 안정적 붕괴를 유도하지만 가공이 어렵고 제작에 비효율적인 단점이 있다.

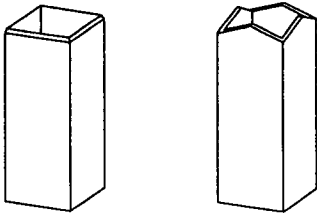


Fig. 1 Trigger mechanism

따라서 본 연구에서는 알루미늄과 복합재료의 단점을 상호 보완하고 트리거 기구의 가공이 불필요한 알루미늄/GFRP 혼성 사각튜브를 제안하여 에너지 흡수특성을 관찰하고자 한다.

2. 본론

2.1 시편설계 및 제작

시편의 형상은 Side rail 을 단순화한 정사각형 튜브로 길이는 200mm 로 정하였다. 알루미늄 튜브는 6063T5 압출재를 사용하였으며 튜브의 규격은 45×45×1.2 (mm) 이다. 알루미늄을 감싸는 복합재료는 SK chemical 사의 UGN150 유리섬유/에폭시를 사용하였다. 위의 두 재료와 강철재료의 기계적 성질을 Table 1 에 나타내었다.

Table 1. Properties of steel, aluminum and GFRP

	Density (kg/m ³)	E (GPa)	σ _u (MPa)
Steel (SAE1010)	7870	207	365
Aluminum (6063T5)	2700	68.9	264.6
Glass/Epoxy (0°)	1980	43.5	1000

실험의 파라미터는 다음과 같은 요소로 설정하였다.

- 적층각 : 축방향에 대하여 0°, 90°, 0°/90°, ±45°
- 두께 : 8ply, 16ply
- 트리거 : 복합재료 튜브는 트리거 가공, 혼성 튜브는 가공하지 않음

2.2 실험방법

시편의 하단부는 고정단(clamped boundary condition)으로 지지하고 상단부는 자유단(free boundary condition) 경계조건으로 설정하였다. 정적 하중을 가하기 위하여 최대 하중이 250kN 이고 최대 변위가 200mm 인 유압 서보식 재료시험기(MTS)를 사용하였고 하중과 변위 신호는 A/D 변환기와 LabVIEW 를 이용하여 컴퓨터로 처리하였다. MTS 는 변위 제어(displacement control) 상태로 하고 변위량은 튜브길이의 45%인 90mm 로 정하였다. 하중 속도(loading rate)는 5mm/min 로 설정하였고 1초당 20 개의 sampling rate 로 신호를 기록하였다. 변위 제어에 의한 시편 하중의 크기는 로드셀(load cell)에 의해 측정되어 A/D 변환기를 통해 PC 에 기록된다. 복합재료 튜브는 트리거 가공을 하여 안정적 붕괴를 유도하고 알루미늄-복합재료 혼성 튜브는 트리거 가공을 하지 않고 하중을 가하였다.

2.3 실험결과

2.3.1 알루미늄 튜브

90mm 까지의 변형결과 약 2.5 개의 접힘 요소(folding element)가 생겼다. 에너지 흡수는 변형이 일어난 지점까지 하중-변위 선도의 넓이를 나타내며 비에너지 흡수(Specific Energy Absorption : S.E.A) 는 다음과 같이 튜브가 흡수한 에너지를 붕괴된 부분의 질량으로 나눈 식으로 정의될 수 있다.

$$S.E.A = E_s = \frac{E_{absorbed}}{m_{crushed}} = \frac{\int P dx}{\rho A \delta}$$

P 는 하중, δ 는 붕괴가 일어난 지점까지의 변위, ρ 는 밀도, A 는 튜브의 단면적이다. 알루미늄 튜브의 초기 최대하중은 31.92kN, 흡수된 에너지는 832.28J, 비에너지 흡수는 16.94kJ/kg 이었다.

2.3.2 복합재료 튜브

복합재료 튜브는 적층각에 따라서 파괴모드와 에너지 흡수량에 큰 차이를 보였다. 적층각이 0°인 경우에 트리거 기구에 상관없이 불안정한 파괴가

어났다. 초기에 하중이 높아지다가 최대 하중에 도달하면서 균열이 모서리에서 발생하여 급격히 진전하였고 4개의 면이 모서리에서 분리(splitting)되어 굽힘 하중으로 에너지를 흡수하였으나 하중이 작기 때문에 에너지 흡수 효과가 미미하였다.

90° 방향인 경우에는 축방향 섬유배열이 없으므로 모서리에서 균열이 발생하지 않았고 분리도 일어나지 않았으나 테두리 방향으로 균열이 일어나면서 붕괴가 진행되었다. 붕괴는 안정적이고 점진적이지만 트리거의 영향이라기보다는 시편 자체의 섬유 방향 때문에 일어나는 파괴모드라고 할 수 있다.

0°/90°와 ±45°시편의 경우에는 트리거 기구의 영향을 크게 받았다. 파괴모드는 안정적이며 모서리에서 분리가 일어나 굽힘 하중을 받게 된다. 또한 층간 분리 현상이 확연하게 발생하고 분리된 층들이 무너져 내린다. 이 경우에 발생하는 에너지 흡수는 모서리 분리에 의한 hoop 방향 섬유의 파단, 층간 분리 및 층간 균열(interlaminar crack) 진전, 층간 마찰 및 복합재료와 압축판 사이의 마찰, 분리된 섬유층군(laminar bundle)의 굽힘 하중에 의한 것이다.

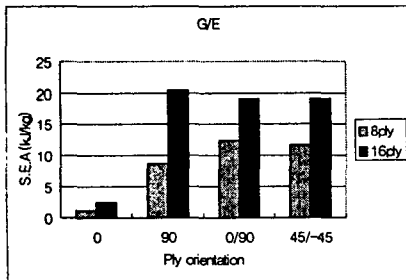


Fig. 2 Specific energy absorption of GFRP tube

2.3.3 알루미늄-복합재료 혼성튜브

알루미늄-복합재료 혼성 튜브의 실험 결과 알루미늄에 90° 적층된 튜브가 가장 우수한 에너지 흡수를 보였고 0° 적층 튜브가 가장 좋지 않은 결과가 나타났다. 0° 튜브의 경우 하중이 가해지기 시작하면 초기 최대 하중을 넘어서면서 튜브의 끝부분부터 알루미늄과 복합재료 사이의 박리(debonding)가 일어난다. 복합재료부분은 전술한 바와 같이 모서리에서 균열이 발생, 진전하여 분리가 일어나고 굽힘 하중만을 받게 된다. 복합재료가 분리된 튜브는 알루미늄만이 소성 변형으로 에너지를 흡수하게 되므로 전체적인 에너지 흡수 효율이 낮아지게 된다. 이 경우 에너지 흡수에 기여하는 요소는 알루미늄의 변형, 알루미늄과 복합재료간 박리, 복합재료의 모서리 분리와 굽힘이며 파괴모드도 안정적이지 못하게 된다.

반면 90° 적층 튜브의 경우에는 초기에 두 재료간 박리가 일어나는 것은 동일하나 복합재료 튜브가 분리되지는 않으므로 큰 하중을 지지한다. 재료간 박리 후 알루미늄의 접힘이 시작되는데, 복합재료는 Hoop stress의 형태로 하중을 지지하므로 알루미늄의 접힘을 방해하고 하중이 더 높아진 후에 접힘이 시작되게 된다. 접힘이 시작되어 알루미늄 튜브에 주름(lobe)이 생기기 시작하면 복합재료는 완전히 분리되지 않고 주름의 틈새에 끼어 들어간다. 부분적으로 모서리에서의 섬유 파단과 분리가 발생하지만 0° 튜브에서처럼 완전히 분리되는 현상은 일어나지 않았다.

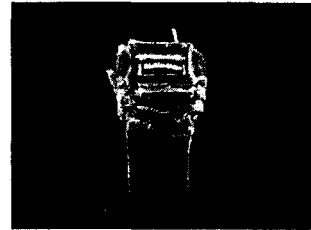


Fig. 3 Fracture mode of aluminum/GFRP tube(90°)

0°/90°와 ±45°튜브는 복합재료 튜브와 마찬가지로 비슷한 파괴모드와 에너지 흡수결과를 보였다. 하중 초기 박리 현상은 비슷하게 일어나며 모서리에서의 섬유 분리가 발생한다. 분리된 섬유군은 굽힘을 받으며 지지하게 된다. 층간 분리 후 알루미늄에 인접한 복합재료 섬유군은 알루미늄의 변형에 따라 주름 사이에 끼어 드는 모습을 보이고 외부의 섬유군은 굽힘을 받으며 벌어지게 된다. 안쪽의 알루미늄은 하중의 증가에 따라 접힘이 시작되는데 역시 외부의 복합재료에 의해 큰 구속력을 받으므로 하중이 높아진다.

0° 적층 튜브를 제외한 나머지 튜브에서는 트리거 가공이 되어있지 않음에도 안정적인 붕괴모습을 보였다. 트리거 가공이 없지만 금속 튜브가 복합재료의 균열 제어 및 안정된 붕괴를 유도한다. 0° 튜브처럼 두 재료간 박리가 심각하게 일어나지 않는다면 금속 튜브가 트리거 효과를 가지며 두 재료간의 상호 간섭이 에너지 흡수의 향상에도 기여를 하게 된다. Fig. 4에 혼성튜브의 비에너지 흡수 결과를 나타내었다.

알루미늄-복합재료 혼성 튜브와 알루미늄, 복합재료 각각의 튜브와의 비교를 위하여 Fig. 5에 90°튜브의 하중-변위 선도를 나타내었다. 8ply가 적층된 혼성 튜브의 경우 8ply의 복합재료만으로 이루어진 하중-변위 선도와 알루미늄만으로 이루어진 선도, 두 튜브의 수치적인 합을 나타낸 선도와 혼성 튜브의 선도를 하나의 그래프에 표현하였다.

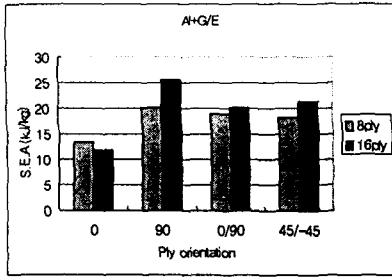


Fig. 4 Specific energy absorption of hybrid tube

이 경우 가장 아래에 나타난 것이 복합재료, 그 위가 알루미늄이다. 두 튜브의 하중의 합을 계산하여 점선으로 표시한 결과보다 혼성 튜브의 경우가 더 평균하중이 높은 것으로 나타난다. 이것은 언급한 바와 같이 두 재료의 상호 간섭에 의한 효과가 나타나는 것으로 볼 수 있다. 8ply 90°의 경우 혼성 튜브의 에너지 흡수는 알루미늄에 비해 86%, 복합재료에 비해 520% 향상되었으며 비에너지 흡수(E_s)는 각각 19%, 131% 향상되었다. 16ply 90°의 혼성 튜브의 경우 에너지 흡수는 알루미늄에 비해 180%, 복합재료에 비해 97% 이며, 비에너지 흡수(E_s)는 각각 34%, 10%이다. Fig. 6 에는 각 ply 수에 대하여 적층각에 따른 에너지 흡수의 변화와 알루미늄 튜브와 복합재료 튜브의 단순 에너지 합보다 향상된 혼성 튜브의 에너지량을 표시하였다.

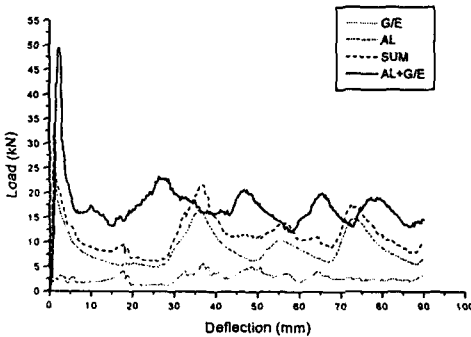


Fig 5. Load-Deflection curves of 8 ply 90° tube

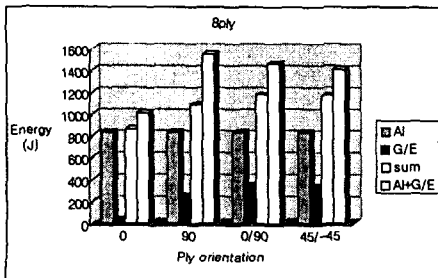


Fig. 6 Comparison of energy absorption

3. 결론

복합재료의 안정적 붕괴를 위한 트리거 가공의 단점을 없애고 안정적 붕괴를 유도하며 에너지 흡수능력을 향상시킬 수 있는 구조로 알루미늄-복합재료 동시경화 혼성 튜브를 제안하였다. 제작된 혼성 튜브는 트리거 가공 없이도 안정적 붕괴가 일어났다. 적층각에 따라 90° 적층 튜브가 에너지 흡수가 가장 좋은 우수한 결과를 보였고, 0° 적층 튜브는 복합재료의 박리로 인해 효율적인 에너지 흡수를 보이지는 못했다.

90° 적층 튜브는 알루미늄의 변형을 따라 주름 사이로 끼어들어서 유효 붕괴거리(effective crushing length)를 변화시키고 접힘 구간(folding length)은 단축시키며 모서리에서 섬유 파단이 크게 일어나지 않는다. 이러한 이유로 복합재료의 에너지 흡수와 두 재료간 상호 간섭의 영향으로 에너지 흡수량이 증가한다. 0°/90°와 ±45°인 경우에는 에너지 흡수 능력과 파괴 모드가 유사하였다. 0° 튜브를 제외한 90°, 0°/90°, ±45°의 튜브는 에너지 흡수나 파괴모드에서 우수한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Farley, G.L. "Crushing characteristics of continuous fiber-reinforced composite tubes", *J. Composite Materials*, Vol.26, No.1, pp37-50, 1992
- (2) Thornton, P.H., "Energy absorption in composite structures", *J. Composite Materials*, Vol.13, pp247-262, 1979
- (3) Thornton, P.H. and Jeryan, R.A., "Crash energy management in composite automotive structures", *Int. J. Impact Engineering*, Vol.7, No.2, pp167-180, 1988
- (4) Mamalis, A.G. and Manolagos, D.E., "Crashworthy capability of composite material structures", *Composite Structures*, Vol.37, pp.109-134, 1997
- (5) Hanefi, E.H., Wierzbicki, T., "Axial resistance and energy absorption of externally reinforced metal tubes", *Composite Part B*, Vol.27, pp.387-394, 1996
- (6) Wang, X.G., Bloch, J.A. and Cesary, D., "Influence of composite reinforcement on failure modes of steel tubes", *Proceedings-Society of Automotive Engineers Automotive Industry in Expanding Countries*, pp.185-189, 1991
- (7) Jones, N., *Structural Impact*, Cambridge University Press, 1989