

알루미늄/GFRP 혼성튜브의 굽힘붕괴 특성

송민철* · 이정주*

The characteristics of bending collapse of aluminum/GFRP hybrid tube

M. C. Song and J. J. Lee

KEY WORDS : hybrid tube, bending collapse, energy absorption

ABSTRACT

Square tubes used for vehicle structure components have an important role on keeping its stiffness and preserving occupant safety in vehicle collision and rollover in which it experience axial collapse, bending collapse or both. Bending collapse, which absorbs kinetic energy of the impact and retains a survival space for the occupant, is a dominant failure mode in oblique collision and rollover. Thus, in this paper, the bending collapse characteristics such as the maximum bending moment and energy absorption capacity of the square tube replaced by light-weight material were evaluated and presented. The bending test of cantilever tubes which were fabricated with aluminum, GFRP and aluminum/ GFRP hybrid by co-curing process was performed. Then the maximum bending moment and the energy absorption capacity from the moment-angle curve were evaluated. Based on the test results, it was found that aluminum/ GFRP hybrid tube can show better specific energy absorption capacity compared to the pure aluminum or GFRP tube and can convert unstable collapse mode which may occur in pure GFRP tube to stable collapse mode like a aluminum tube in which plastic hinge is developed.

1. 서 론

환경 문제의 대두와 함께 최근에 차량의 무게를 감소시키기 위해서 기존의 강 재료를 알루미늄 [1]이나 복합재료[2] 같은 경량재료로 대체하려는 노력들이 계속되고 있다. 이러한 관점에서 알루미늄[3-5]이나 복합재료[6]의 에너지 흡수에 대한 연구가 수행되고 있다. 이전의 연구에서는 원형 혹은 사각 튜브의 축 방향 붕괴나 굽힘 붕괴시의 에너지 흡수 능력에 대한 평가가 이루어졌다. 굽힘 붕괴와 축 방향 붕괴는 차량 충돌시에 외부의 에너지를 흡수하는 중요한 메커니즘이다. 그러나, 특히 복합재료 튜브형 부재는 굽힘붕괴에 대한 연구가 축 방향 붕괴의 연구에 비해 많이 부족한 현실

이다. 경량재료의 굽힘붕괴에 대해 Meadows[3]는 알루미늄 튜브가 압축영역에서의 소성힌지(plastic hinge) 발생에 의한 안정적인 붕괴와 인장영역에서의 파단(fracture)에 의한 불안정한 붕괴의 두 가지 붕괴 모드를 보일 수 있고, 그것은 탄성계수와 기하학적 특성(너비와 두께)에 의존한다는 것을 보였다. 너비 대 두께 비율(두께/너비)이 크면 인장영역에서 파단이 발생하며, 비율이 작으면 압축영역에서 소성힌지가 발생하게 된다. Mamalis[6]는 GFRP(glass fiber reinforced plastic)의 에너지 흡수 특성과 붕괴 메커니즘에 대해 미시적 거시적으로 설명했다. 그에 따르면 사각튜브의 경우가 원형튜브에 비해 에너지 흡수능력이 우수하고, 삽입된 플러그(plug)의 형상에 따라 에너지 흡수량이 변할 수 있다. 일반적으로 금속재료의 에너지 흡수는 소성변형에 의해서 이루어지고, 복합재료의 경우는 미소적인 기지균열(matrix cracking), 층간분리(delamination), 섬유파단(fiber breakage)에 의해서

* 한국과학기술원 기계공학과

이루어진다. 복합재료는 취성(brittle)재료의 특성상 불안정한 붕괴가 일어날 수 있고, 이것을 막기 위해 혼성 튜브가 사용될 수 있다. Broughton[7]에 따르면 CFRP(carbon fiber reinforced plastic)로 보강된 알루미늄 튜브는 향상된 강성과 강도 특성을 보인다. Kim[8]은 알루미늄/GFRP 혼성튜브가 축방향 붕괴에 있어 복합재료 튜브의 안정적 붕괴를 유도하기 위해 필요한 트리거(trigger)가공의 필요성을 제거하고, 에너지 흡수능력을 향상시킬 수 있음을 보였다. 본 논문에서는 동시경화(cocured)법으로 제작된 알루미늄/GFRP 혼성튜브의 굽힘붕괴시험이 외팔보(cantilever)시험장치를 이용하여 수행되었고, 혼성튜브의 붕괴특성과 에너지 흡수능력에 대한 평가가 이루어졌다.

2. 실험

표 1과 같이 한 개의 알루미늄 시편과 각각 8개의 복합재료와 혼성튜브에 대한 실험이 수행되었다. 각 튜브의 단면은 그림 1에 나와있다. 실험장치는 그림 2와 같이 소성현지의 위치와 굽힘모멘트 및 회전각의 정확한 측정을 위해서 외팔보 굽힘시험장치를 이용하였다. 실험장치는 그림 2와 같다.

표 1. 외팔보 굽힘 붕괴 시편

Specimen	Cross sectional dimensions	
	h×b×t(mm)	
Aluminum	30×30×1	
GFRP [0] ₈	32×32×1	
GFRP [90] ₈	32×32×1	
GFRP [0 ₂ /90 ₂] ₁₆	32×32×1	
GFRP [45 ₂ /-45 ₂] ₁₆	32×32×1	
Hybrid [0] ₈	32×32×2	
Hybrid [90] ₈	32×32×2	
Hybrid [0 ₂ /90 ₂] ₁₆	32×32×2	
Hybrid [45 ₂ /-45 ₂] ₁₆	32×32×2	
GFRP [0] ₁₆	34×34×2	
GFRP [90] ₁₆	34×34×2	
GFRP [0 ₂ /90 ₂] ₃₂	34×34×2	
GFRP [45 ₂ /-45 ₂] ₃₂	34×34×2	
Hybrid [0] ₁₆	34×34×3	
Hybrid [90] ₁₆	34×34×3	
Hybrid [0 ₂ /90 ₂] ₃₂	34×34×3	
Hybrid [45 ₂ /-45 ₂] ₃₂	34×34×3	

시편의 길이는 400mm이며, 고정단의 길이는 50mm이다. 시편 단면의 형상을 보호하기 위하여 30mm의 플러그가 실험과정동안 삽입되었다. 액튜에이터로부터 변위를 측정하고, 로드셀로부터 하중을 측정하여 굽힘모멘트-회전각 선도를 얻고 그것으로부터 튜브의 흡수에너지를 계산하였다.

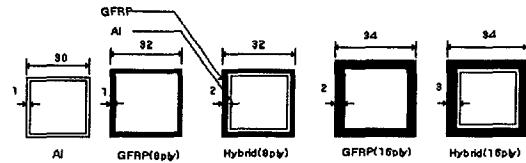


그림 1. 시편의 단면

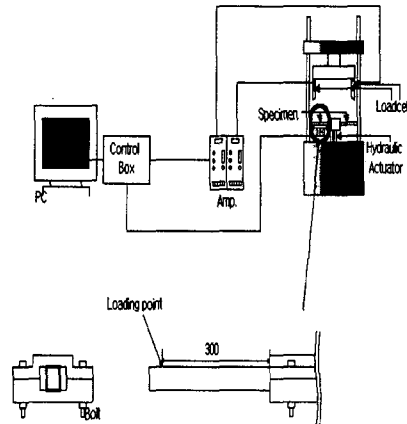


그림 2. 실험장치

회전각은 0°~27°이다.

3. 결과

실험으로부터 얻은 모멘트-회전각 선도가 그림 34에 나와있다. 우선, 튜브는 탄성적으로 변형된 후에 소성변형을 한다. 소성 변형 구간에서 비선형성이 나타나고 최대굽힘모멘트에서 붕괴가 시작된다. 그런 다음 굽힘모멘트가 감소하는 붕괴 후 영역이 나타나게 된다. 모멘트-회전각 선도로 부터 최대굽힘모멘트와 흡수에너지를 얻었고 그 결과가 표 2에 나와있다. 알루미늄 압출재와 유리 섬유-에폭시 프리프레그(prepreg)를 이용하여 제작된 혼성튜브는 최대굽힘 모멘트와 에너지 흡수능력에서 향상된 결과를 보였다.

3-1 GFRP 튜브에서 섬유 방향의 영향

그림 3-4에서 보여지는 것과 같이 튜브의 축방향으로 0°방향의 섬유는 혼성튜브의 강성과 최대 굽힘모멘트를 증가시킨다. 반면 90°방향의 섬유는 붕괴 후 영역에서 소성현지의 발생과 성장을 방해하는 역할을 함으로써 에너지 흡수능력을 증가시킨다. Hybrid[0]₈과 Hybrid[0]₁₆의 경우 붕괴가 시작되면 다른 적층각의 시편에 비해 굽힘 모멘트의 감소가 두드러지게 된다. 반면에 Hybrid[90]₈과 Hybrid[90]₁₆은 붕괴후 영역에서 적은 굽힘모멘트의 감소율을 갖는다. 이것으로부터, 0°방향의 섬유

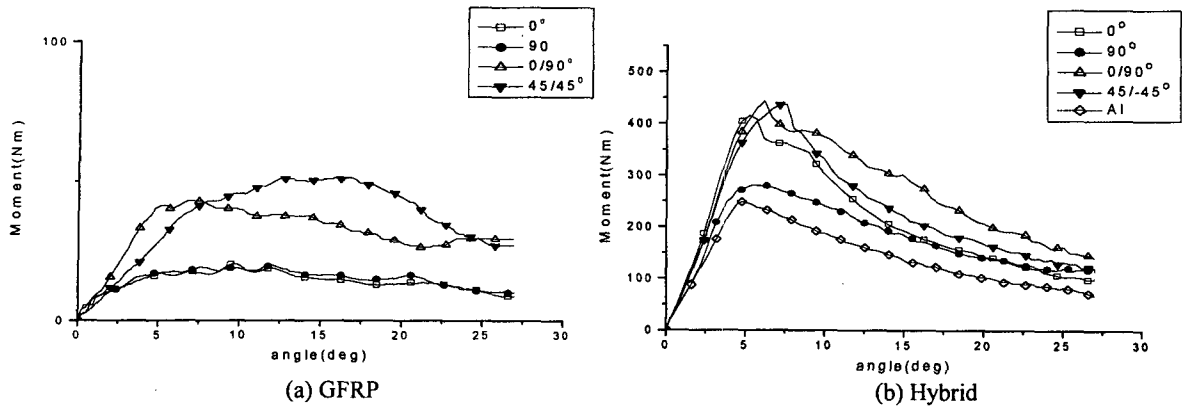


그림 3. 8ply 의 모멘트-회전각 선도

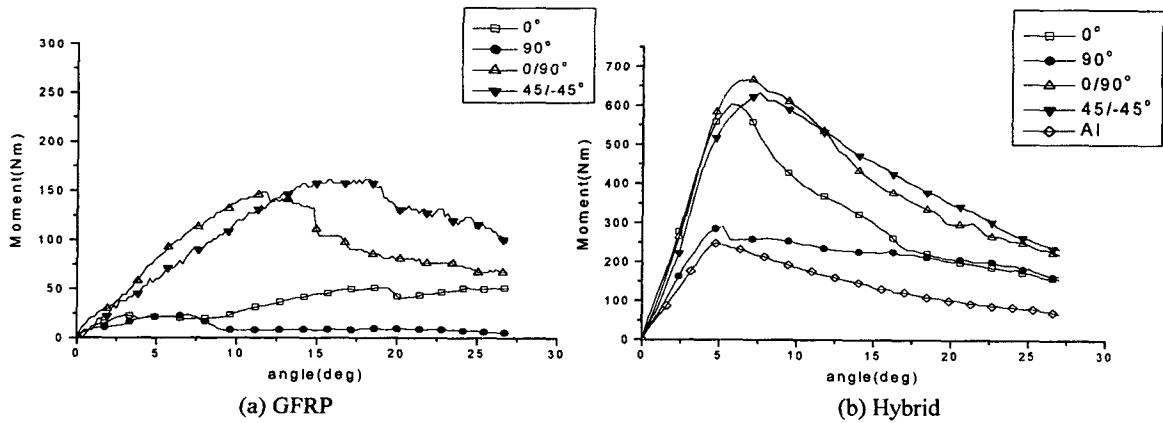


그림 4. 16ply 의 모멘트-회전각 선도

표 2. 튜브의 최대굽힘 모멘트 및 흡수에너지

Ply	Specimen	Max. Bending moment(N·m)	Absorbed energy(J)
	Al	250.87	55.16
8	GFRP[0] ₈	22.65	6.41
8	GFRP[90] ₈	23.76	6.89
8	GFRP[0 ₂ /90 ₂] ₈	54.75	14.13
8	GFRP[45 ₂ /-45 ₂] ₈	56.15	17.33
8	Hybrid[0] ₈	419.39	98.83
8	Hybrid[90] ₈	281.82	79.38
8	Hybrid[0 ₂ /90 ₂] ₈	445.69	122.08
8	Hybrid[45 ₂ /-45 ₂] ₈	441.15	108.04
16	GFRP[0] ₁₆	53.376	16.40
16	GFRP[90] ₁₆	48.63	8.45
16	GFRP[0 ₂ /90 ₂] ₁₆	156.41	47.05
16	GFRP[+45 ₂ /-45 ₂] ₁₆	170.80	48.00
16	Hybrid[0] ₁₆	606.38	145.58
16	Hybrid[90] ₁₆	293.57	99.52
16	Hybrid[0 ₂ /90 ₂] ₁₆	653.78	182.69
16	Hybrid[+45 ₂ /-45 ₂] ₁₆	626.27	181.20

는 탄성영역에서, 90°방향의 섬유는 붕괴 후 영역

에서 에너지 흡수 능력 향상에 기여함을 알 수 있다.

3-2 GFRP 튜브에서 적층수의 영향

적층수가 증가함에 따라서 혼성 튜브의 굽힘붕괴시의 에너지 흡수량은 증가하게 된다. 그러나 섬유방향의 영향은 적층수에 무관하며, 적층수가 증가하면서 섬유 방향의 영향들이 더 명확하게 나타나게 된다.

3-3 붕괴모드에서의 혼성튜브의 영향

복합재료의 구조의 붕괴는 취성재료의 특성상 불안정할 수 있으며, 알루미늄 튜브에 있어서도 불안정한 붕괴모드가 나타날 수 있다.[3] 실험결과로부터 복합재료나 알루미늄 튜브에서 발생할 수 있는 불안정한 붕괴모드가 혼성튜브에서는 안정한 붕괴모드로 전환될 수 있다. 이것은 혼성튜브내 알루미늄의 압축영역에서 소성현상이 발생하기 때문이다. 즉, 알루미늄 튜브는 혼성튜브에서 안정한

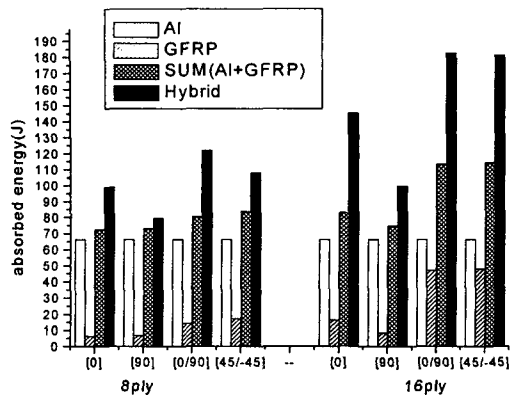


그림 5. 혼성튜브의 에너지 흡수

붕괴를 유도하는 역할을 하게 된다.

3-4 혼성튜브의 에너지 흡수 능력

복합재료 튜브에 알루미늄 튜브를 추가함에 의해서 에너지 흡수 능력을 증가시킬 수 있다. 그림 5에서와 같이 혼성튜브의 경우 $[0_2/90_2]_{ns}$ 의 적층각이 가장 높은 에너지 흡수 능력을 보인다. 일반적으로 같은 기하학적 조건에서 알루미늄, 혼성튜브, 복합재료의 순으로 굽힘 하중에 대한 에너지 흡수능력이 나타나게 된다. 그러나 그림 6에서와 같이 동일 질량으로 이루어진 튜브의 경우 혼성튜브가 알루미늄 튜브보다 더 높은 에너지 흡수능력을 보일 수 있다.

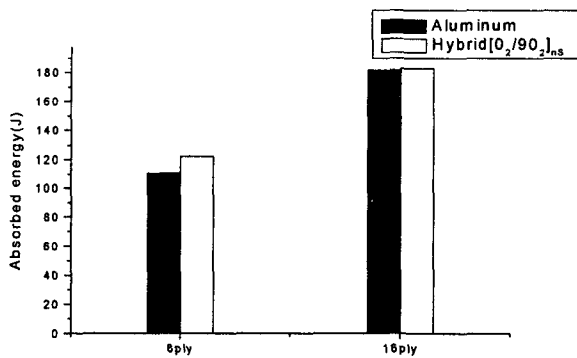


그림 6. 동일질량 튜브의 에너지 흡수

4. 결론

알루미늄 압출재와 GFRP 프리프레그를 이용하여 동시경화법으로 제작된 혼성튜브는 복합재료 및 알루미늄 튜브에서 발생할 수 있는 불안정한 붕괴모드를 알루미늄튜브 내에서의 소성현저 발생

으로 인한 안정한 붕괴모드로 전환시킬 수 있다. 튜브의 축방향으로 0° 방향의 섬유는 혼성튜브의 강성과 최대굽힘모멘트를 증가시키며, 90° 방향의 섬유는 붕괴 후 영역에서 소성현저의 전개를 방해하여 에너지 흡수능력을 향상시킨다. 혼성튜브의 경우 $[0_2/90_2]_{ns}$ 의 적층각이 우수한 에너지 흡수능력을 보였다. 동일질량으로 이루어진 혼성튜브는 굽힘하중에 대해서 알루미늄튜브나 복합재료 튜브보다 우수한 에너지 흡수능력을 보일 수 있다.

참고문헌

- (1) G. S. Cole. And A. M. Sherman. Light Materials for Automotive Applications. Materials Characterization, 1995, 35: 3-9
- (2) Botkin. M. and Fidan. S. Crashworthiness of a production vehicle incorporating a fiberglass-reinforced composite front structure. SAE paper 971522
- (3) Meadows, D. J. Aluminum crash members in axial and bending collapse. SAE paper 922113
- (4) D. Kecman. Bending Collapse of Rectangular and Square Section tube. Int. J. Mech. Sci, 1983. 25(9-10). 623-636
- (5) T. Wierzbicki, L. Recke, W. Abramovicz, T. Gholami and J. Huang. Stress Profile in Thin-walled Prismatic Columns Subjected to Crush Loading - II Bending. Computer and Structures.1994. 51(6) 625-641
- (6) A. G. Mamalis, D. E. Manolacos and G. A. Demosthenous. Crushing behaviour of thin-walled, non-circular, glass fibre-reinforced composite tubular components due to bending. Composites. 1992. 23(6). 425-433
- (7) J. G. Broughton, A. Beevers and A. R. Hutchinson. Carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP) strengthening of aluminium extrusions. Int. J. Adhesion and Adhesives. 1997. 17(3). 269-278
- (8) K. H. Kim, K. C. Shin and J. J. Lee Axial Crush and Energy Absorption Characteristics of Aluminum/GFRP Hybrid Tube. Key Engineering Materials 2000. (183-187) 1147-1152