

# 알루미늄-복합재료 혼성 사각관 보의 굽힘 성능평가

이성혁\*·최낙삼\*\*

## Bending Performance Evaluation of Aluminum-Composite Hybrid Square Tube Beams

Sung-Hyuk Lee and Nak-Sam Choi

### Abstract

Bending deformation and energy absorption characteristics of aluminum-composite hybrid tube beams have been analyzed for improvement in the bending performance of aluminum space frame by using experimental tests combined with theoretical and finite element analyses. Hybrid tube beams composed of glass fabric/epoxy layer wrapped around on aluminum tube were made in autoclave with the recommended curing cycle. Basic properties of aluminum material used for initial input data of the finite element simulation and theoretical analysis were obtained from the true stress-true strain curve of specimen which had been extracted from the Al tube beam. A modified theoretical model was developed to predict the resistance to the collapse of hybrid tube beams subjected to a bending load. Theoretical moment-rotation angle curves of hybrid tube beams were in good agreement with experimental ones, which was comparable to the results obtained from finite element simulation. Hybrid tube beams strengthened by composite layer on the whole web and flange showed an excellent bending strength and energy absorption capability.

**Key Words:** Bending collapse behavior, Aluminum-composite hybrid tube beam, Local buckling deformation, True stress-true strain

### 1. 서론

경량화 구조물을 위한 알루미늄 사각 단면관은 산업전반에 걸쳐 구조용 경량화 부재와 충격에너지 흡수용 부재로서 사용되고 있다. 특히, 이러한 알루미늄 사각관이 자동차의 구조부재로 사용될 경우 사각관의 축방향 압축, 굽힘 및 비틀림 하중에 따른 좌굴변형거동과 에너지 흡수특성의 변화는 안전성 측면에서 매우 중요한 연구분야이다.

알루미늄 압출재의 에너지 흡수 특성 및 안전도 향상과 관련하여 연구되어지고 있는 분야 중 하나가 알루미늄과 복합재료가 접합된 혼성관이다.

다. 알루미늄-복합재료 혼성관에 대한 축방향 붕괴실험에서 단일 재료로 만들어진 사각관보다 우수한 에너지 흡수능력을 보여준다고 보고된 바 있다[1~4]. 또한, CFRP로 알루미늄 사각관의 일부를 보강할 경우 굽힘특성이 향상될 수 있다고 보고 되었다[5,6]. 알루미늄-복합재료 혼성관에 대한 연구는 주로 압축붕괴거동에 집중되어있으나 자동차의 측면 충돌에 있어서 굽힘붕괴거동은 매우 중요한 부분을 차지하고 있다. 따라서 혼성 사각관의 굽힘붕괴 특성에 대한 연구는 에너지 흡수 부재 및 경량화 부재의 개발이라는 관점에서 매우 중요하다.

본 연구에서는 알루미늄-복합재료 혼성사각관의 제작 및 이에 대한 굽힘붕괴 시험을 수행하여 혼성 사각관 보의 굽힘붕괴시 발생하는 국부적 좌굴거동을 검토하고 하중-변위 곡선과 에너지 흡수특성의 결과를 유한요소 수치해석과 이론해석 결과와 비교한다. 또한, 정확한 해석을 위해 시험대상 재료인 알루미늄과 복합재료의 진응력-

\* 건국대학교 인공근육연구센터

\*\* 한양대학교 기계공학과

진변형률 관계를 실험을 통해 구한다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편

본 연구에서 사용한 알루미늄 사각관 보 시험편은 6063T5 압출재로 단면은 20mm×20mm이고 벽두께는 1mm이다. 알루미늄-복합재료 혼성 사각관 보는 (주)한국화이바의 glass fabric/epoxy prepreg를 알루미늄 사각관 보의 외벽에 적층하고 제조사에서 추천하는 경화사이클을 사용하여 오토클레이브로 제작하였다. 알루미늄 사각관과 복합재료의 섬유층의 층간 접합력 향상을 위해 알루미늄 사각관 표면을 인산처리(phosphoric acid anodizing, PAA)하였고 복합재료 적층시 섬유층과 알루미늄 사각관 사이에 접착필름 Bondex 206을 배치하였다. 알루미늄-glass fabric/ epoxy 시험편의 종류를 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 진응력-진변형률 측정

혼성 사각관 보에 대한 굽힘붕괴 해석의 신뢰성을 증가시키기 위해 알루미늄 사각관 보에서 인장시험편을 절취하여 인장시험을 수행하였다. 네킹이 발생하는 국소 단면의 진응력은 비디오 광학현미경을 이용하여 측정하였고, 변형률은 레이저 다점간 변위 측정기를 이용하였다. Fig. 2에 알루미늄의 진응력-진변형률 곡선을 표시하였고 이 진응력-진변형률 관계는 수치해석과 이론해석 시 기초입력데이터로 사용하였다. Table 1에 실험을 통해 구한 glass fabric/epoxy 와 Al 6063T5의 물성치를 나타내었다.

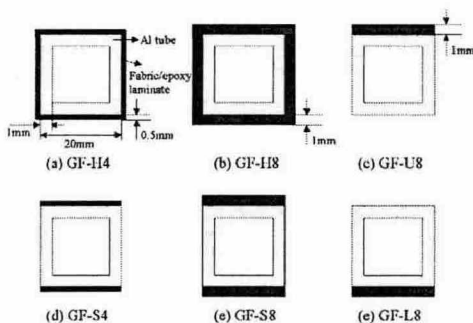


Fig. 1 Schematic cross-sections of various aluminum-glass fabric/epoxy hybrid tube beam specimens

Table 1 Mechanical property of Al 6063T5 and glass fabric/epoxy obtained from tensile test

Material	E-modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation at fracture (%)
Al 6063T5	62.9	193.2	255.2	59.8
Glass fabric/epoxy	23.5	-	412.0	1.8

### 2.3 굽힘붕괴 시험

Zwick사의 만능재료 시험기를 이용하여 알루미늄 사각관 및 혼성 사각관 시험편에 대해 삼점 굽힘시험을 수행하였다. 하중축과 지지대 사이의 거리는 200mm, 하중속도는 10mm/min으로 하였다.

## 3. 혼성 사각관 보의 수치해석

### 3.1 유한요소 수치해석

혼성 사각관 보의 굽힘붕괴시험 모델에 대해 ABAQUS 6.4를 이용하여 유한요소 수치계산(FEM)을 수행하였다. 알루미늄 재료(6063T5)의 물성치는 인장시험으로 구한 진응력-진변형률 곡선(Fig. 2 참조)을 부분 선형화하여 입력하였고 glass fabric/epoxy 복합재료는 직교성 재료이지만 등방성이면서 탄성 및 완전소성 재료라고 가정하여 해석하였다.

### 3.2 이론 해석

혼성 사각관 보의 최대 굽힘 모멘트와 붕괴 후 거동을 해석하기 위해서 다음과 같은 가정을 하였다. 첫째, 혼성 사각관 보의 붕괴가 시작되기 전까지 혼성 사각관을 구성하는 알루미늄 사각관 보는 소성변형을 수반하지만, 혼성 사각관 내의 복합재료는 탄성변형만을 한다. 둘째, 혼성 사각

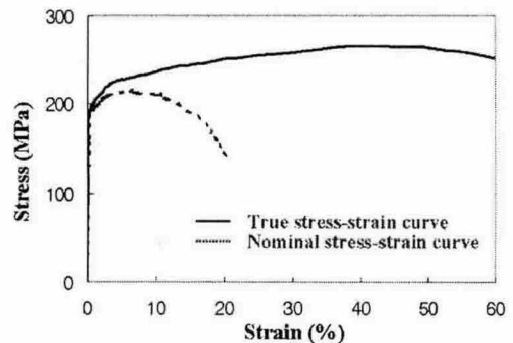


Fig. 2 True stress-true strain curve of Al 6063T5

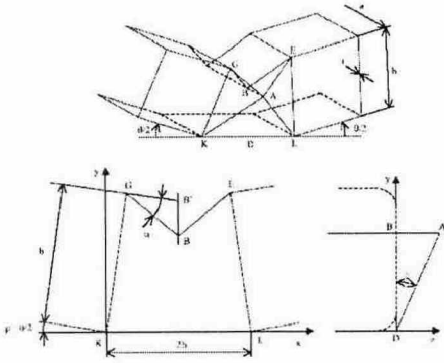


Fig. 3 Kecman's hinge mechanism

관의 붕괴과정은 혼성 사각관을 구성하는 알루미늄 사각관 보의 붕괴과정에 전적으로 따르며 혼성 사각관 보의 최대모멘트까지 복합재료층이 파괴되지 않아야 한다. 따라서 혼성 사각관 보의 알루미늄 사각관 보가 임계응력에 도달하면 붕괴가 시작되고 이때의 모멘트 값을 최대모멘트라 할 수 있다. 혼성 사각관 보의 붕괴 후 거동해석은 금속에 대한 Kecman의 붕괴기구(Fig. 3)를 기본으로 하여 이중재료로 이루어진 구조물에 대한 굽힘붕괴에 적용하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 굽힘시험 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 알루미늄 사각관 시험편과 혼성 사각관 시험편의 굽힘붕괴시험 결과이다. GF-L8형을 제외한 모든 혼성 사각관의 경우, 벽 두께 1mm인 알루미늄 사각관과 비교하여 복합재

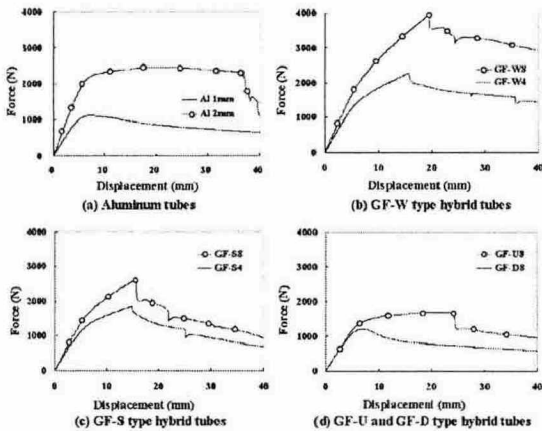


Fig. 4 Experimental load-displacement curves of aluminum and hybrid tube beams

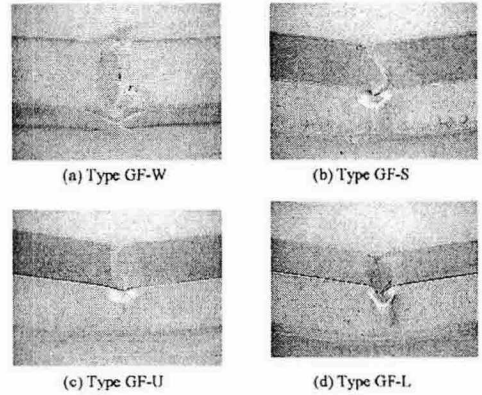


Fig. 5 Bending collapse photos of hybrid tube beams experimentally obtained at a displacement of 50mm

료층의 보강효과로 인해 굽힘강성 및 최대하중이 커졌다. 최대하중이 발생하는 변위는 윗플랜지만을 보강한 GF-U8형 시험편에서 가장 크게 나타났다. 따라서 윗플랜지만을 보강할 경우(GF-U8형) 굽힘붕괴가 발생하는 처짐값을 보다 크게 하여 붕괴를 지연시키는 효과를 얻을 수 있는 것으로 사료된다. 최대하중점을 지난 직후 혼성사각관보의 굽힘붕괴가 진행되는데 GF-L8형을 제외한 모든 혼성 사각관 보 시험편의 위 플랜지 복합재료 층에서 파단이 발생하여 측벽의 복합재료 층으로 전파되었다. 최대모멘트 및 에너지 측면에서 GF-W형 시험편이 가장 우수한 성능을 보였다.

##### 4.2 수치해석 및 이론해석 결과

Fig. 6은 알루미늄-glass fabric/epoxy 혼성 사각관 보의 하중-변위 곡선을 삼점굽힘시험과 유한요소 수치해석 결과를 통하여 비교한 것이다. 이들 수치해석 결과를 보면, 하중-변위 곡선의 변화 거동은 초기 부하부터 최대 하중점까지의 영역에서 실험 결과와 상당히 유사한 거동을 보여주고 있다. 그러나 알루미늄 사각관의 아래플랜지를

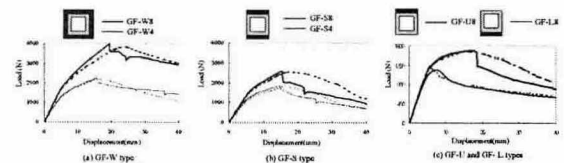


Fig. 6 FEM(dotted line) and experimental(solid line) load-displacement curves of various hybrid tube beams

Table 2 Theoretical and experimental bending performances of hybrid tube beams

Specimen type	Flexural stiffness(N/mm <sup>2</sup> )			Maximum moment(Nm)			Absorbed energy(J)		
	Exp.	Theory	Diff.(%)	Exp.	Theory	Diff.(%)	Exp.	Theory	Diff.(%)
Al 1mm	281.0 ±8.8	288.4	2.6	117.7 ±7.2	119.5	7.0	45.4 ±1.1	47.9	5.5
GF-W8	430.2 ±3.4	433.8	0.8	397.5 ±21.1	371.3	-6.5	175.3 ±9.9	182.4	4.0
GF-W4	355.9 ±2.9	355.9	0.1	225.6 ±8.7	245.0	8.5	95.6 ±3.4	105.4	10.3
GF-S8	376.3 ±4.3	392.1	4.2	259.2 ±4.6	299.1	15.4	76.6 ±3.0	85.6	11.8
GF-S4	314.9 ±3.6	337.8	7.2	184.6 ±3.9	209.1	13.2	59.0 ±2.8	67.7	14.6
GF-U8	329.8 ±4.7	335.6	1.8	168.2 ±2.4	183.5	9.0	69.8 ±3.0	73.6	5.5
GF-L8	310.9 ±2.6	335.6	7.8	121.0 ±4.3	133.4	10.2	43.4 ±1.2	56.1	29.0

복합재료로 보강한 GF-L8형 시험편을 제외하고 실험으로 구한 하중-변위 곡선에서는 혼성 사각관 위플랜지에서의 복합재료층의 파단으로 최대 하중점 근처 혹은 직후에 급격한 하중감소가 나타났으나 수치해석 결과에서는 복합재료층의 파단 및 그 이후의 시험편의 층간분리 및 변형과정을 정확히 표현할 수가 없기 때문에 복합재료층의 파단 후 거동에서는 큰 차이를 보였다. Table 2는 실험과 이론해석 결과를 굽힘강성, 최대하중 및 에너지 흡수 측면에서 정량적으로 비교한 것이다. 이론해석 결과가 실험결과보다 약간 크게 나왔으나 알루미늄 사각관 전체를 복합재료로 보강한 GF-W형 시험편에서는 잘 일치하였다. GF-L8형 시험편을 제외한 모든 보강시험편에서 보강효과로 굽힘강성과 최대하중 및 에너지 흡수 능력이 증가함을 알 수 있다. 특히, 알루미늄 사각관 외벽 전체를 보강한 GF-W형 시험편이 가장 우수한 성능을 보였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 알루미늄-복합재료 혼성 사각관 보의 굽힘붕괴거동 및 에너지 흡수특성을 실험과 해석을 조합한 방법으로 평가하여 경량화 부재로서의 적용가능성을 확인하였다.

1) 알루미늄 사각관의 전체를 복합재료로 보강한 혼성 사각관의 실험 및 수치해석 결과, 다른 보강 시험편과 비교하여 굽힘성능이 크게 향상되었다.

2) 혼성 사각관 보에 대한 실험 결과와 유한요소 수치해석 결과를 비교하여 볼 때 굽힘강성 및 최대하중이 전반적으로 잘 일치하였다.

3) 혼성 사각관의 굽힘붕괴거동을 예측할 수 있는 이론해석식을 개발하였으며 이를 적용한 결과, 전체적인 굽힘성능 및 에너지 흡수능력이 실험과 잘 일치하였다.

결과 잘 일치하였다.

### 참고문헌

- (1) J. M. Babbage and P. K. Mallick, "Static axial crush performance of unfilled and foam-filled aluminum-composite hybrid tubes", Composite Structures, 2004.
- (2) H. W. Song, Z. M. Wan, Z. M. Xia and X. W. Du, "Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes", Int. J. Impact Engineering, Vol. 24, 2000, pp.385-401.
- (3) J. Bouchet, E. Jacquelin and P. Hamelin, "Dynamic axial crushing of combined composite aluminum tube : the role of both reinforcement and surface treatments", Composite Structure, Vol. 56, 2002, pp. 87-96.
- (4) K. H. Kim, K. C. Shin and J. J. Lee, "Axial crush and energy absorption characteristics of aluminum/GFRP hybrid square tube". Key Engineering Materials, Vol. 183-187, 2000.
- (5) J. C. Brouhgton, A. Beevers and A. R. Hutchinson, "Carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP) strengthening of aluminum extrusions", Int. J. Adhesion and Adhesive, Vol. 17, No. 3, 1997, pp. 269-278.
- (6) K. C. Shin, J. J. Lee, K. H. Kim, M. C. Song and J. S. Huh, "Axial crush and bending collapse of an aluminum/CFRP hybrid square tube and its energy absorption capability", Composite Structures, Vol. 57, 2002, pp. 279-287.