

인발성형 복합소재 구조부재의 좌굴특성 분석

Buckling Behavior of Pultruded Composite Structural Member

이성우* 김현정**

Lee, Sung-Woo Kim, Hyun-Jung

ABSTRACT

Recently western countries are now beginning to use ACM (Advanced Composite Material) in the construction industry. Compared with conventional construction materials, ACM possesses many advantages such as light-weight, high-strength, corrosion resistant properties, etc. Among other fabrication process of ACM, pultrusion is one of the promising one for civil infrastructure application. In this paper, the structural characteristics of pultruded glass fiber reinforced composite structural member of angle and tube type were studied. Experiments for compression were performed for those members along with finite element buckling analysis with ABAQUS. The experimental and analytical results were compared each other and they were also compared with predicted values using coded formulae.

1. 서 론

최근 해외 선진국에서는 현재까지 주로 항공기, 선박, 자동차 및 스포츠용품에서 널리 사용되어 왔던 첨단 복합소재를 건설용 재료로 활용하는 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 신소재는 경량이며 고강도일 뿐만 아니라 내부식으로 인해 내구성이 뛰어나 기존의 건설재료에 비해 탁월한 장점을 가지고 있다. 복합소재의 제조방법에는 여러 가지가 있으나 인발성형(Pultrusion)이 토목용 구조재의 제조에는 가장 적합한 공정중의 하나이다. 인발성형은 높은 섬유 함유율을 가지는 복합재료를 제조하기 위하여 사용되는 연속공정으로 다른 제조기술에 비해 상대적으로 비용이 적게 들며, 다양한 단면의 제작이 용이하므로 건설분야에 적용시 높은 잠재력을 가질 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 인발성형 제작방법으로 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics) 앵글 및 튜브 부재를 제작하여 압축시험 및 좌굴시험을 통해 압축거동 특성을 분석하였다. 또한 ABAQUS 프로그램으로 선형 좌굴 해석을 실시하여 실험결과와 비교 분석하였으며, 해외의 설계기준으로 계산된 값들과도 비교 분석하였다.

* 정회원 · 국민대학교 토목환경공학부 교수

**국민대학교 토목환경공학부 공학석사

2. 인발성형에 의한 GFRP 앵글 및 튜브부재 제작

섬유강화 복합소재의 제조공정에는 그 사용 목적에 따라 여러 가지 방법이 사용되어 지고 있지만 최근 건설분야 구조부재 제작에 많이 사용되고 있는 방법중의 하나가 인발성형 방법이다. 인발성형은 강화섬유가 주로 축 방향으로 배열되기 때문에 인발성형으로 제조된 부재는 축방향으로 주된 응력을 받는 부재에 사용하게 되며 축에 수직인 방향으로로는 매트나 다축직포를 사용하므로써 횡방향 응력에 견딜 수 있게 제조한다. 인발성형 제조공정은 강화섬유의 공급과 배열, 수지의 함침, 예비성형, 경화, 당김의 5가지 공정이 연속적으로 이루어지게 되는데, 본 연구에서는 GFRP 앵글 및 튜브 부재의 거동특성을 연구하기 위하여 표 1과 같은 단면의 부재를 참고문헌 1의 연구결과를 토대로 성형온도 140℃, 인발속도를 60cm/min로 하여 인발성형으로 제작하였다. 부재의 제작에 사용된 E-glass와 비닐에스터의 역학적 특성은 표 2와 같고, 인발성형 제조공정과 부재의 완성된 모습은 그림 1에서 보여주고 있다.

표 1. GFRP 앵글 및 튜브 부재의 단면, 적층 설계 및 완성된 모습

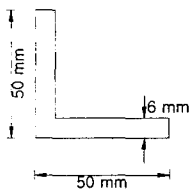
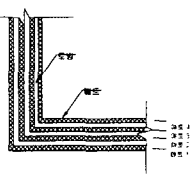
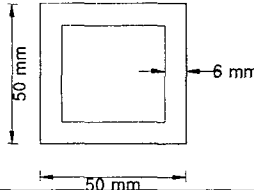
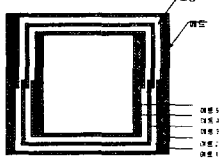
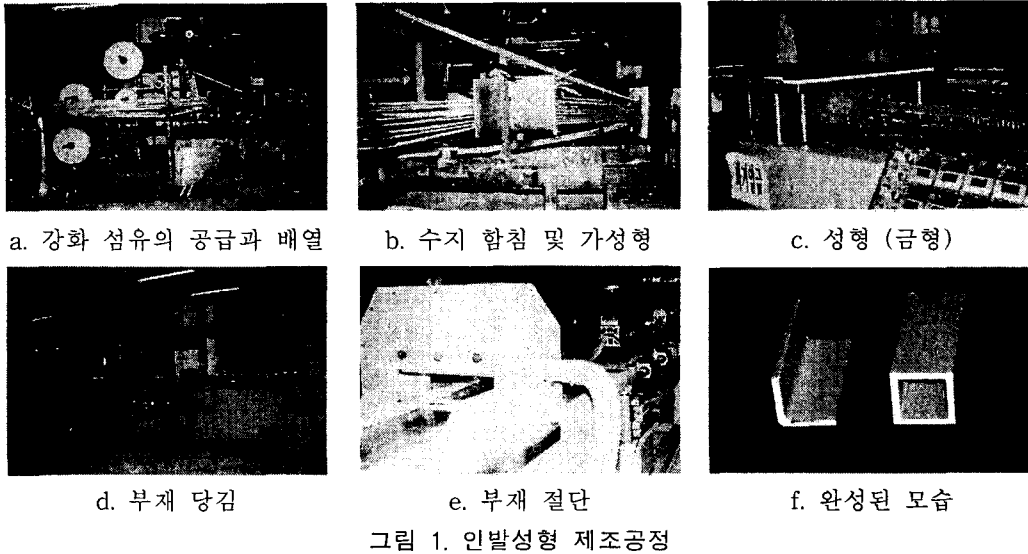
	부재단면	적층설계
앵글		
튜브		

표 2. 사용재료의 역학적 특성

재료의 종류	E-glass			비닐에스터					
	역학적 성질			역학적 성질					
	인장강도	탄성계수	신장률	Barcol 경도	신장률	수분흡수량	인장강도	탄성계수	열변형온도
단위	kg/cm ²	kg/cm ²	%		%	mg	kg/cm ²	kg/cm ²	℃
물성치	20000	738000	2~4	49	1.175	0.18	423.5	37790	113



3. 앵글 및 튜브부재의 압축 거동 특성

제작된 GFRP 앵글에 대해 인장의 경우 ASTM D3039⁽²⁾, 압축의 경우 ASTM D695⁽³⁾의 기준에 따라 각각 7개씩 시편을 제작하여 시험하였으며 편차가 큰 것을 뺀 5개에 대한 평균값을 사용하였다. 시험장비는 최대 250kN까지 재하 가능한 MTS를 이용하여 재하속도 0.02mm/sec로 시험하였다. 시험시험 결과는 표 3 및 그림 2와 같다.

표 3. 앵글 및 튜브부재 시편시험 결과 (단위 : kg/cm²)

구분	앵 글		튜 브	
	탄성계수	극한응력	탄성계수	극한응력
인장	377780	5103	3666666	4128
압축	235656	1960	247158	2354

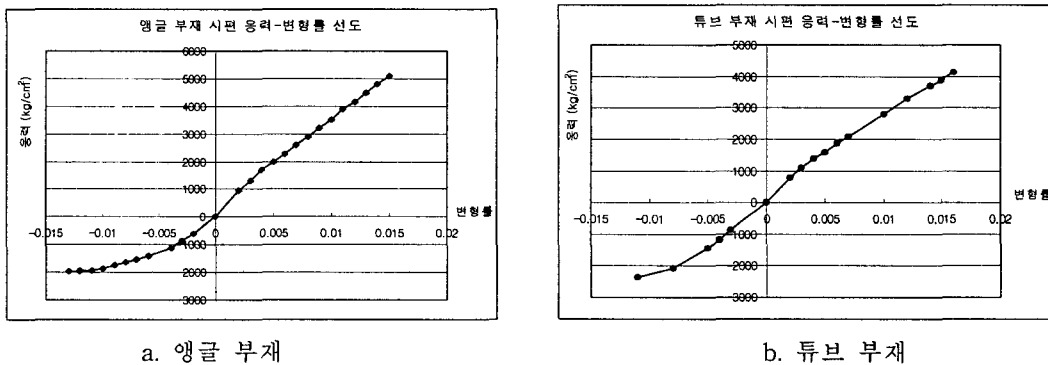


그림 2. 인장 및 압축 시편시험 결과

일반적으로 축방향으로 보강된 복합소재에 인장력이 작용할 경우 보강섬유가 인장력의 대부분을 담당하게 되며, 부재의 극한인장응력에 안전율을 고려하여 설계한다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 그러나 압축력은 대부분을 레진이 부담하며, 부재의 압축거동은 시편시험으로만은 그 거동을 정확히 파악할 수 없다. 따라서 이러한 앵글 부재의 압축 거동특성을 분석하기 위해 세장비 10, 30, 50에 대한 압축실험을 실시하였다. 압축시험시 그림 3과 같이 일축방향에 대해서만 좌굴이 발생할 수 있도록 힌지로 된 단부 지점장치를 제작하여 사용하였고, 스트레인 게이지와 LVDT를 부재 중심에 설치하여 축방향 변형률과 횡방향 변위를 측정하였다. 하중의 재하는 최대 50Ton까지 재하가 가능한 로드셀을 사용하여 0.02mm/sec의 재하속도로 실험하였다. 그림 4에는 압축실험장치의 보여 주고 있으며 그림 5와 그림 6은 앵글 및 튜브부재의 실제 압축 실험의 모습을 보여주고 있다. 앵글의 경우 실제 좌굴거동은 그림 5-b의 하단 지점부에서 보는 바와같이 전체좌굴에 앞서 지점부에서 국부좌굴이 먼저 발생하였다. 보다 자세한 실험결과는 참고문헌 7을 참고하기 바란다.

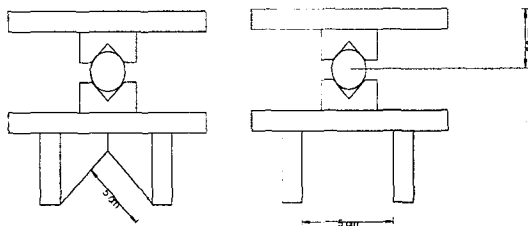


그림 3. 일축방향 힌지거동을 위한 지점장치

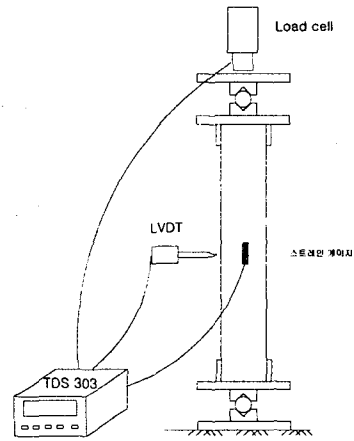
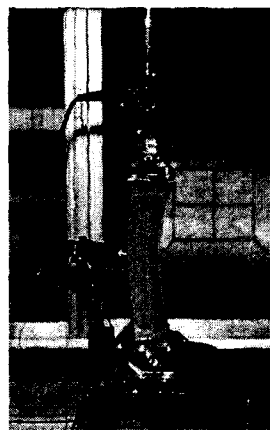


그림 4. 압축실험장치 모사도



a. 세장비 10

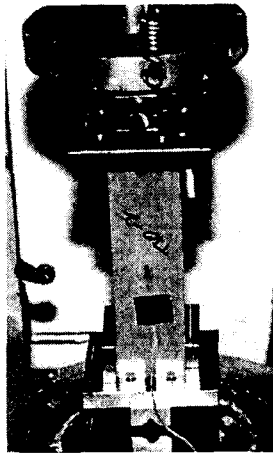


b. 세장비 30



c. 세장비 50

그림 5. 앵글 부재 압축시험 모습



a. 세장비 10



b. 세장비 30



c. 세장비 50

그림 6. 튜브 부재 압축시험 모습

4. 앵글 및 튜브부재의 선형좌굴 해석

해석에 사용된 요소는 양 방향으로 곡률을 가지는 3차원 8절점 쉘 요소로 감차 적분(Reduced Integration)을 수행하는 ABAQUS S8R 요소이며 앵글의 경우 2개, 튜브의 경우 4개의 쉘이 하나의 부재를 이루도록 모델링 하였다. 실제 부재는 길이에 비해 두께가 얇지만, 섬유 90°방향의 전단에 대한 강성이 아주 낮은 복합소재의 특성을 이상화하기 위해 두꺼운 쉘 요소인 S8R요소를 사용하였고, 재료적 성질은 직교 이방성으로 가정하였다. 복합소재 쉘 요소의 해석은 적층판 이론에 기초를 두고 해석하게 되는데, 시험에 사용된 인발 성형 부재의 경우 매트층과 로빙층으로 이루어진 적층판으로 해석 할 수 있다. 따라서 앵글 및 튜브 부재의 매층마다 역학적 성질을 달리하여 모델링 하였다. 각 적층판의 길이 방향 탄성계수는 시편 실험으로 구한 값이고, 90°방향 탄성계수 및 전단 탄성계수는 적층판의 물성을 구하는 프로그램인 CADEC을 이용하여 이론적으로 계산하여 표 4에 나타내었고, 해석을 위한 적층 모습과 각 적층판의 두께는 표 5에 나타내었다.

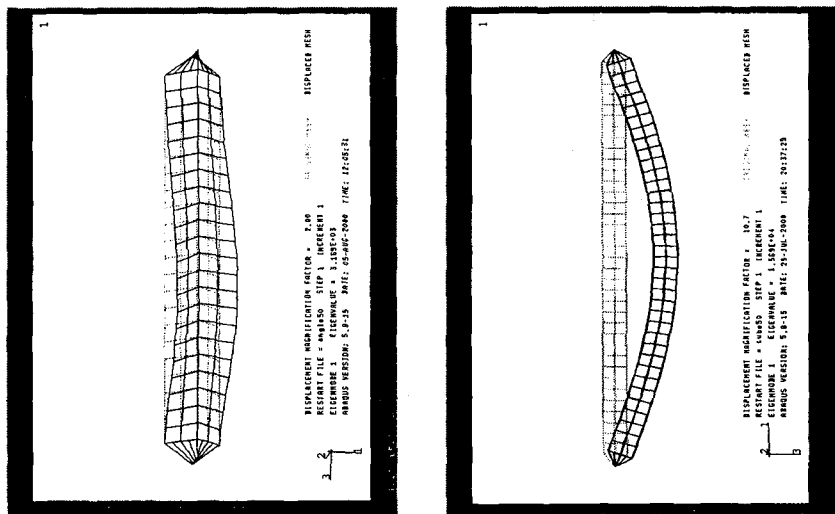
표 4. 해석에 사용된 앵글 및 튜브부재 재료상수

구분		E_{11} kg/cm ²	E_{22} kg/cm ²	G_{12} kg/cm ²	포아손비
앵글	로빙층	235656	81877.3	26198	0.3
	매트층	139544	139544	49926	0.398
튜브	로빙층	247158	82967.8	26198	0.3
	매트층	144539	144539	51637	0.4

표 5. 각 적층판의 두께

구분	앵글	튜브
적층방법		
두께	$t_1=t_3=t_6=t_8=0.024\text{cm}$ (매트층) $t_2=t_7=0.168\text{cm}$ (로빙층) $t_4=t_5=0.084\text{cm}$ (로빙층)	$t_1=t_3=t_8=t_{10}=0.024\text{cm}$ (매트층) $t_2=t_4=t_7=t_9=0.120\text{cm}$ (로빙층) $t_5=t_6=0.002\text{cm}$ (매트층)

특히 지점부는 실제 압축실험 조건을 반영하여 부재의 도심으로부터 2.9cm 떨어진 지점을 회전 중심으로 두고, 부재와는 강철요소를 이용하여 연결하였다. 해석 모델은 일축방향만의 좌굴을 검토하기 위해 다른 축에 대해서는 단부를 구속하였다. 해석시 압축력은 단면 도심에 재하시켰으며, 해석결과 세장비 50인 앵글 및 튜브부재 해석모델의 제 1 좌굴모드는 그림 7과 같으며, 그림 5 및 그림 6과 비교하여 그 형상이 비슷함을 알 수 있다.



a. 앵글 부재

b. 튜브 부재

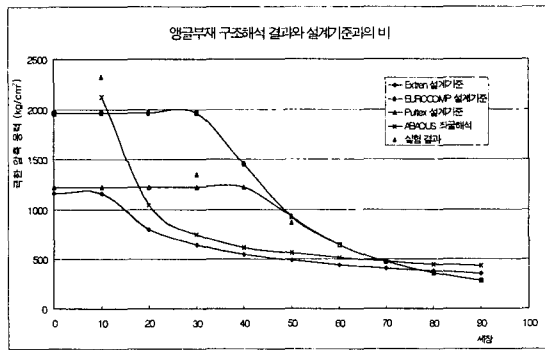
그림 7. 앵글 및 튜브 부재의 제 1 좌굴모드 형상

표 6에는 실험결과 및 해석결과와의 비교를 위해 Extren⁽⁴⁾, Pultex⁽⁵⁾ 및 EUROCOMP⁽⁶⁾에서 제시한 극한압축응력 계산식을 보여주고 있다. 이 식에서는 장주 및 단주식으로 구한 결과값 중 작은 값을 그 부재의 극한압축응력으로 채택하도록 제시하고 있다.

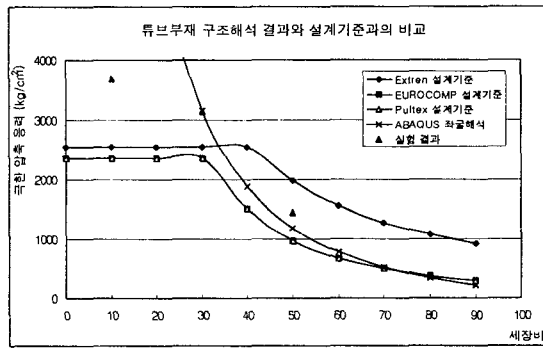
표 6. 앵글 및 튜브부재의 극한압축응력 산정 기준

구분	앵글		튜브	
	단주	장주	단주	장주
Extren식	$\frac{E}{27(b/t)^{0.95}}$	$\frac{E}{56(KL/r)^{0.55}}$	$\frac{E}{16(b/t)^{0.85}}$	$\frac{1.3E}{(KL/r)^{1.3}}$
Pultex식*	$\phi k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)$	$\frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$	극한압축응력	$\frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$
EUROCOMP 식	극한압축응력	$\frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$	극한압축응력	$\frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$

주* $\phi=0.8$: 복합소재 물성의 불완전성에 대한 계수
 $k=0.5$: 플랜지가 보강되지 않은 경우
 $k=1.0$: 플랜지가 보강된 경우



a. 앵글 부재



b. 튜브부재

그림 8. 앵글 및 튜브 부재 좌굴특성 비교

그림 8은 GFRP 앵글 및 튜브부재의 좌굴특성을 비교 분석한 그래프를 보여주고 있다. 앵글 부재의 경우 오일러식을 기초로 한 Pultex식과 EUROCOMP식의 계산값은 세장비 50이상에서 실험값과 근접함을 보여주고 있다. 실험값과 해석값 및 해외 설계기준에 의한 값의 차이가 발생하는 부분에 대해서는 향후 추가 연구가 필요한 것으로 사료된다. 튜브 부재의 경우 그림으로부터 알 수 있듯이 좌굴해석결과와 실험결과가 서로 근접하게 일치함을 보여주고 있다. 튜브의 경우 앵글과 달리 대칭 폐단면 특성으로 인해 공식으로 계산된 값과 모두 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 세장비가 30이상에 대해서 Extren 부재에 대한 압축 실험을 기초로 만들어진 Extren식과 비교해 보면, 그 경향은 유사하지만 극한 압축 응력은 상당한 차이를 나타내었다. 이는 복합재료 부재를 생산하는 각 업체가 제시하는 설계기준 식은 해당 부재에 적용할 경우 타당하지만, 그 이외의 부재에 대해서는 검토가 필요할 것으로 사료된다. Pultex식 및 EUROCOMP 식은 장주의 거동의 경향은 유사하게 나타남을 알 수 있다. Pultex식이나 EUROCOMP식은 본 연구결과보다 좌굴응력을 다소 적게 예측하고 있으며, Extren식은 다소 크게 예측하고 있다. 단주부분에서 실험단면에 대한 압축시험결과는 시편시험 결과보다 압축응력이 크게 나타나서

서로 상이한 결과가 나타났다. 이는 시편을 부재의 모서리 및 중심부분에서 무작위로 절단하여 시편 압축시험을 실시한 결과와 비교한 것으로 단주부분에 대해서는 향후 추가적인 연구가 되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 인장, 압축 시험과 구조해석을 통해 인발성형으로 제작된 GFRP 앵글 및 튜브형 트러스 부재의 거동특성을 분석하였으며 연구 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 앵글부재의 압축시험결과와 좌굴해석결과 및 해외설계기준에 의한 계산값은 서로 차이가 발생함을 알 수 있었다. 오일러식을 기초로한 Pultex식과 EUROCOMP식의 계산값은 세장비 50이상에서 실험값과 근접함을 보여주고 있다. 그러나 좌굴해석값의 경우 Extren식과 경향이 유사함을 알 수 있었다. 앵글단면과 같이 열린 단면은 압축부재로 사용할 경우 구조해석 및 해외 설계기준 등으로 그 거동을 명확히 규정할 수 없어 세심한 고려가 필요한 것으로 사료된다. 실험값과 해석값의 차이가 발생하는 부분에 대해서는 향후 추가 연구가 필요한 것으로 사료된다.

2. 튜브부재 또한 압축실험결과와 좌굴해석 결과가 서로 근접하게 일치하였다. 튜브의 경우 앵글과 달리 대칭 폐단면의 특성으로 인해 압축실험, 좌굴해석결과 및 해외설계기준으로 계산된 값과 모두 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 단주부분에서 실험단면에 대한 압축시험결과는 시편시험 결과보다 압축응력이 크게 나타나는 결과가 나타나, 향후 추가적인 연구가 되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 산학협력과제 98-2-13-01-01-2로 수행되었으며, 과학재단 및 풍림 파이버랩 건설(주)의 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 신경재, 인발성형된 GFRP 스트립판의 구조적 특성 분석, 국민대학교 석사학위논문, 1999
2. "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material" ASTM D3039, 1993
3. "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics" ASTM D695, 1999
4. Extren Fiberglass Structural Shapes Design Manual, Strongwell, 1989
5. The Pultex Pultrusion Design Manual, Creative Pultrusion Inc., 1999
6. John L. Clarke, Structural Design of Polymer Composite, EUROCOMP Design Code and Handbook, E&FN Spon, 1996
7. 김현정, 앵글 및 튜브형 GFRP 트러스 부재의 거동 특성 분석, 국민대학교 석사학위논문, 1999