

인발성형 GFRP 부재의 특성 변화와 앵글 및 튜브 부재의 좌굴 거동 분석

이 성 우* · 신 경 재** · 김 현 정***

Characteristics of Pultruded GFRP and Buckling Behavior of Angle and Tubular Member

Lee, Sung Woo* · Shin, Kyung Jae** · Kim, Hyun Jung***

Key Words: GFRP, pultrusion, angle, tube, strength, buckling

Abstract

Recently Western countries are now beginning to use ACM (Advanced Composites Material), in the construction industry. Compared with existing construction materials, ACM possesses many advantages such as light-weight, high-strength, corrosion resistant property. 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 GFRP strip and structural members of angle and tube type were studied. For the strip, parametric studies of pultrusion process has been carried out. Considered parameters were volume fraction, temperature, pulling speed and fiber orientations. For the pultruded angle and tube, compression test and buckling analysis has been carried out. The results were compared with calculated values using coded formulae

1. 서 론

최근 해외 선진국에서는 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 인발성형은 건설분야에 적용시 높은 잠재력을 가질 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 인발성형 장비를 이용하여 구조부재를 제작하였다. 제작된 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics) 스트립판에 대해 인발성형의 공정을 분석하고, 섬유 함유율과 성형온도, 인발속도와 같은 여러 가지 제조공정상의 변수와 섬유의 배향각도의

변화에 따라 인발성형된 GFRP의 인장강도 특성을 재료시험을 통해 분석하였다. 압축 거동 분석을 위하여 인발성형으로 GFRP 앵글 및 튜브 구조부재를 제작하여 압축시험 및 좌굴 해석을 실시하여 구조적 특성을 분석하였다.

2. GFRP 스트립의 인발 성형조건에 따른 구조적 특성 변화

인발성형 방법은 섬유의 함유율과 성형온도, 인발속도에 의해 GFRP의 구조적 특성이 변화할 수 있으므로 이러한 공정변수에 대해 인장시험을 실시하였다. 부피에 대한 섬유의 함유율을 30%, 40%, 50%로 변화시켜 제작한 스트립판에 대해 실험을 실시하여 섬유 함유율의 변화에 따른 탄성계수와 프아송의 비를 측정하였다. 또한 성형온도에 따른 물성치의 변화를 분석하기 위해 섬유함유율을 50%로 고정하고 성형온도를 140℃, 160℃, 180℃, 200℃로 변화시켰고, 각 성형온도에서 인

* 국민대학교 토목환경공학부 교수
** 국민대학교 토목환경공학부 공학석사
*** 국민대학교 토목환경공학부 공학석사

발속도를 30cm/min, 60cm/min, 90cm/min, 120cm/min, 150cm/min로 변화시켜가며 스트립판을 제작하여 시편시험을 실시한 후 성형온도와 인발속도가 탄성계수와 극한 인장 강도에 미치는 영향을 분석하였다.

2.1 섬유 함유율의 변화에 따른 인장강도 변화

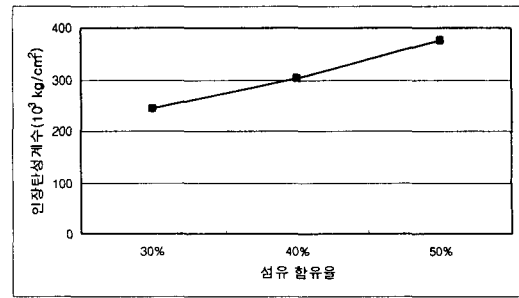
[그림 1]에는 성형온도 160℃, 인발속도 60cm/min 일때의 섬유함유율에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화를 보여주고 있다. [그림 1]에서 알 수 있듯이 섬유 강화 복합재료는 대부분의 하중을 섬유가 받기 때문에 섬유의 함유량이 증가할수록 인장탄성계수와 극한인장강도가 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있었다.

2.2 성형온도와 인발속도에 따른 인장강도 변화

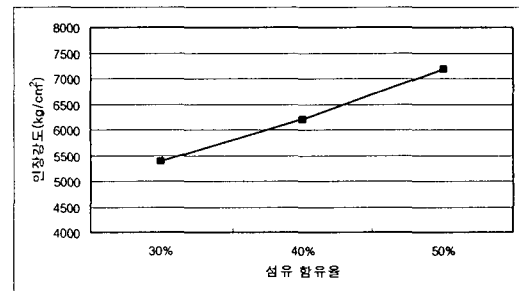
[그림 2]에는 인발속도의 변화에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화와 [그림 3]에는 성형온도의 변화에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도를 보여주고 있다. [그림 2]에서 인발속도가 증가할수록 GFRP의 인장탄성계수와 극한인장강도는 감소하였으며, 인발속도 30cm/min때의 인장강도를 기준으로 인발속도가 150cm/min일 경우 인장탄성계수는 5%, 극한인장강도는 3%정도 감소하였다. 실험 결과 GFRP의 인장강도와 공정속도를 고려하여 90cm/min가 적절한것으로 판단되었다. 또한 [그림 3]에서 보는바와 같이 성형온도가 증가할수록 인장강도가 증가하다가 160℃에서 최고값을 나타낸 후 160℃부터는 성형온도가 증가하면 인장강도가 감소한다. 160℃에서 200℃로 온도를 상승시켰을 경우 인장탄성계수는 약 10%, 극한인장강도는 약 1.5%정도 감소하였다.

2.3 섬유의 배향각도에 따른 인장강도 변화

본 연구에서는 인발성형으로 제작된 GFRP 스트립판에 대해 섬유의 배향각도의 변화에 따른 극한인장강도의 변화를 분석하기 위해 비깃축 시편시험을 실시하였다. [표 1]에는 비깃축 시편 시험에 의한 극한인장강도와 섬유방향 응력, 섬유 직각방향 응력 및 전단강도를 보여주고 있다. 실험결과에서 알 수 있듯이 섬유방향이 0°에서 5°만 증가하여도 극한인장강도 값이 35%가량 감소하는 것을 알 수 있으며, 섬유방향이 10°이상이 되면 0°방향 극한인장강도 값의 50%이하로 감소하는 것을 알 수 있다. 섬유의 각도가 0°일 때는 섬유방향으로 인장파괴를 일으키지만 섬유의 각도가 5°, 10°, 15°, 20°에서는 전단응력에 의해 전단파괴를 일으킨다. 이것은 섬유의 각도가 증가할수록 전단응력과 섬유의

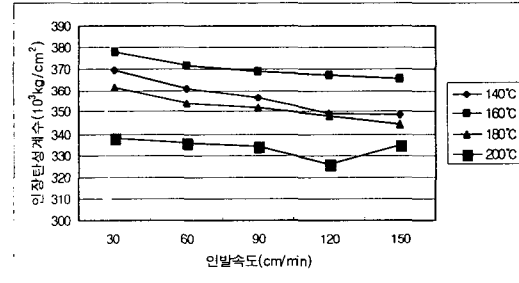


(a) 인장탄성계수

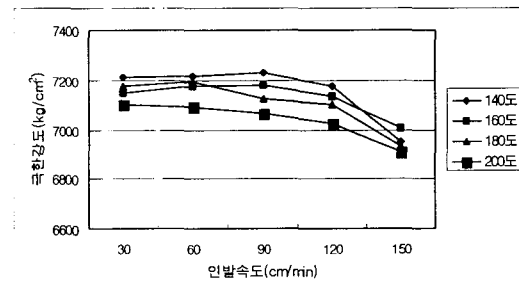


(b) 극한인장강도

[그림 1] 섬유함유율에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화



(a) 인장탄성계수



(b) 극한인장강도

[그림 2] 인발속도의 변화에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화

직각방향응력에 의해 섬유와 수지가 접착되어 있는 계면에서 파괴가 발생하여 섬유의 방향을 따라 찢겨졌기 때문이다. 실험을 통해 알 수 있는바와 같이 일방향 복합재료의 경우 섬유가 끊김이 없이 연속적으로 배열이 되어 있고 하중의 방향과 섬유의 방향이 같으면 섬유 전체가 외부의 하중에 저항하여 높은 강도를 나타낸다. 그러나 섬유의 일부가 손상이 되거나 섬유의 방향과 일정한 각도를 가지고 하중이 재하될 경우 쉽게 파괴에 이를 수 있음을 보여주어 있다. 보다 상세한 시험 결과는 참고문헌 1을 참고하기 바란다.

3. GFRP 앵글 및 튜브 부재의 좌굴 거동 분석

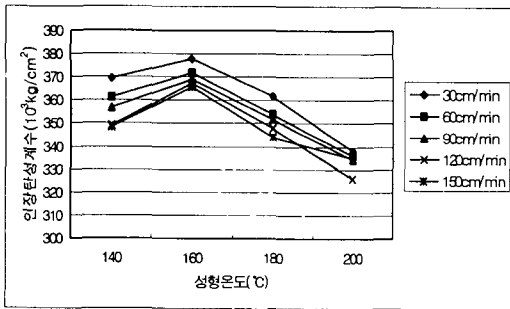
인발성형으로 제작된 GFRP 앵글 및 튜브 부재의 거동 특성을 연구하기 위해 인발성형으로 앵글 및 튜브 단면을 제작하였다. 제작된 GFRP 앵글 및 튜브 부재의 압축 및 인장시험결과는 [표 2], [그림 4] 및 [그림 5]와 같다. [표 3]에는 압축시험결과를 이용하여 적층판 설계 프로그램인 CADEC으로 적층판에 대한 물성치를 구한 값이다.

[표 1] 비빔축 시편시험 결과 (단위: kg/cm²)

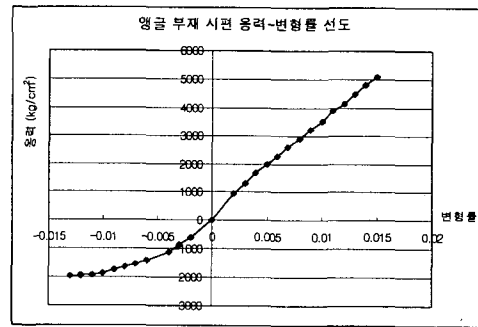
섬유의 각도	극한 인장강도 (σ_x)	섬유방향 응력 (σ_1)	섬유의 직각방향 응력 (σ_2)	전단응력 (τ_{12})
0°	7177	7177	0	0
5°	4709	4673	35	409
10°	3130	3035	94	535
15°	2241	2090	150	560
20°	1717	1516	200	551

[표 2] 앵글 및 튜브 부재 시편시험 결과

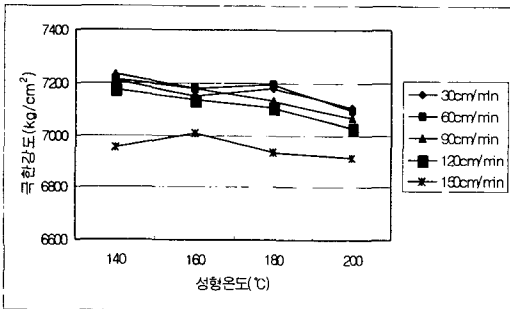
		탄성 계수 kg/cm ²	극한 응력 kg/cm ²
앵 글	인장	377780	5103
	압축	235656	1960
튜 브	인장	366666	4128
	압축	247158	2354



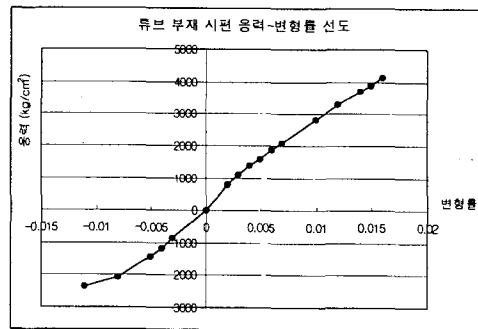
(a) 인장탄성계수



[그림 4] 앵글 부재 시편시험결과



(b) 극한인장강도



[그림 5] 튜브 부재 시편시험결과

[그림 3] 성형온도의 변화에 따른 인장탄성계수와 극한인장강도의 변화

GFRP 앵글 및 튜브 부재의 압축 거동 특성을 분석하기 위해 세장비 10, 30, 50에 대한 압축 시험을 실시하였다. [그림 6]과 [그림 7]에는 세장비가 50인 앵글

[표 3] 일축 시험결과로 계산된 앵글 및 튜브 부재의 물성치

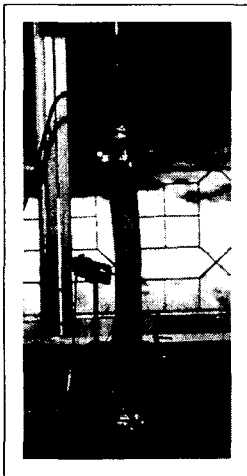
		섬유방향			섬유 90° 방향			G ₁₂	극한전단 응력	프와송 비
		E ₁₁	극한인장 응력	극한압축 응력	E ₂₂	극한인장 응력	극한압축 응력			
		kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²			
앵 글	로빙층	235656	5103	1960	81877.3	770	2326	26198	1852	0.3
	매트층	139544			139544			49926		0.398
튜 브	로빙층	247158	4128	2354	82967.8	770	2326	26198	1852	0.3
	매트층	144539			144539			51637		0.4

[표 4] GFRP 앵글 및 튜브 부재의 극한압축응력 산정 기준

		Extren 식	Pultex 식	EUROCOMP 식
앵 글	단주	$\sigma_u = \frac{E}{27(b/t)^{0.95}}$	$\sigma_u = \phi k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$	$\sigma_u = \sigma_{c,ult}$ $\sigma_{c,ult} = \text{극한 압축 응력}$
	장주	$\sigma_u = \frac{E}{56(Kl/r)^{0.55}}$	$\sigma_u = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$	$\sigma_u = \frac{K\pi^2 E I}{L^2}$
튜 브	단주	$\sigma_u = \frac{E}{16(b/t)^{0.85}}$	$\sigma_u = \sigma_{c,ult}$	$\sigma_u = \sigma_{c,ult}$
	장주	$\sigma_u = \frac{1.3E}{(Kl/r)^{1.3}}$	$\sigma_u = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$	$\sigma_u = \frac{K\pi^2 E I}{L^2}$

주 *

- φ = 0.8 : 복합소재 물성의 불완전성에 대한 계수
- k = 0.5 : 플랜지가 보강되지 않은 경우
- k = 4.0 : 플랜지가 보강된 경우



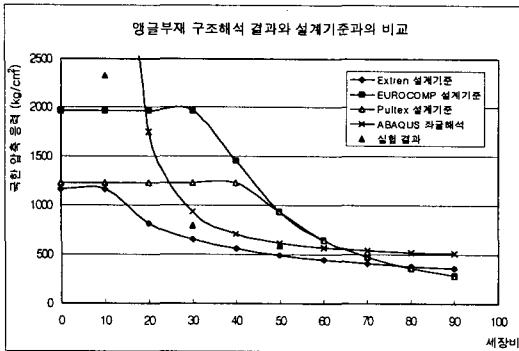
[그림 6] 세장비 50인 앵글 부재 압축 시험 모습



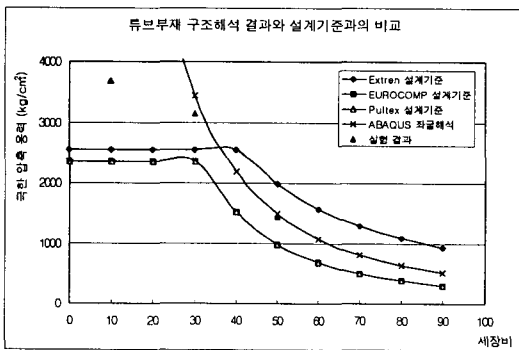
[그림 7] 세장비 50인 튜브 부재 압축 시험 모습

및 튜브 부재의 압축 시험모습을 보여주고 있다. 또한 이러한 세장비에 대해 ABAQUS 프로그램의 S8R 쉘요소로 적층 모델링한 유한 요소 모델을 [표 3] 물성치를 적용하여 선형좌굴 해석을 실시하였으며, [표 4]에는 시험결과 및 해석결과와 비교를 위해 Extren⁽³⁾, Pultex⁽⁴⁾

및 EUROCOMP⁽⁵⁾에서 제시된 극한 압축 응력 계산식을 보여주고 있다. [표 4]의 식을 이용한 좌굴응력 계산에는 [표 2]에 수록된 압축탄성계수(실험치)를 사용하였고, 프와송비 ν는 [표 3]의 로빙층 값을 이용하였다. [그림 8]과 [그림 9]는 GFRP 앵글 및 튜브 부재의 좌굴 특성을 비교 분석한 그래프를 보여주고 있다. 그림으로 부터 알 수 있듯이 좌굴 해석 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 튜브의 경우 앵글과 달리 대칭 폐단면 특성으로 인해 공식으로 계산된 값과 모두 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 장주 부분에 대해서 실험치에 근거하여 만들어진 Extren 식과 비교하여 보면 본 연구결과와 유사한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 Pultex 식 및 EUROCOMP 식은 장주 거동을 Euler 식으로 예측하였기 때문에 상당히 차이가 남을 알 수 있다. 특히 EUROCOMP 식은 단면 형상을 고려하지 않은 식이므로 더 큰 차이가 나는 것으로 판단된다. EUROCOMP 식이나 Pultex 식은 본 연구결과 보다 좌굴 응력을 다소 적게 예측하고 있으며, Extren 식은 다소 크게 예측되고 있음을 알 수 있다. 단주 부분에서는 설계공식들은 시편 압축 시험의 최대 압축 응력을 상한치로 설정했기 때문에 본 실험 및 해석치와는 차이가 남을 알 수 있다. 그러나 실단면에 대한 단주의 압축 시험 결과가 시편시험 결과보다 크게 나온 것을 알 수 있어, 단주 부분에 대한 비교 분석은 앞으로 추가 연구되어야 할 것으로 판단된다. 보다 자세한 결과는 참고문헌 2를 참고하기 바란다.



[그림 8] GFRP 앵글 부재의 좌굴 특성 비교



[그림 9] GFRP 튜브 부재의 좌굴 특성 비교

4. 결 론

본 연구에서는 인발성형된 GFRP 스트립판에 대해 다양한 공정변수에 따른 구조적 특성을 실험적으로 분석하였다. 비깁축 시편시험을 통해 섬유 배향각도에 따른 변화를 분석하였다. 또한 인발성형으로 제작한 앵글 및 튜브 부재에 대해 압축시험과 좌굴해석을 통해 구조적 특성을 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 인발속도가 증가할수록 GFRP의 인장강도는 감소 하였다. 실험 결과 GFRP의 물성치와 인발성형의 공정속도를 고려하여 90cm/min가 적절한 것으로 판단 되었으며 적절한 성형온도는 160℃로 결정하여야 할 것으로 판단된다.

2. 앵글 부재의 압축 시험 결과와 좌굴 해석 결과는 잘 일치함을 알 수 있었다. 장주에 대해 GFRP 부재에 대한 해외 극한 압축 응력 계산식과 실험 결과를 비교해 보면, 실험에 기초한 Extren 식으로 구한 극한 압축 응력은 경향이 유사하게 나타난 반면, Euler 공식에 기초를 두고있는 Pultex 식과 EUROCOMP 식으로 구한 극한 압축 응력은 실험 결과와 상당히 차이가 남을 알 수 있었다.

3. 튜브 부재 또한 압축 실험 결과와 좌굴 해석 결과가 잘 일치하였다. 튜브의 경우 앵글과 달리 대칭 폐단면의 특성으로 인해 압축 시험, 좌굴 해석 결과 및 해외 극한 압축 응력 계산식으로 계산된 값과 모두 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 단주 부재에 대한 압축 시험 결과 시편 압축 시험으로 구한 극한 압축 응력보다 크게 나와 앞으로 추가 연구가 되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 산학협력과제 98-2-13-0101-2로 수행되었으며, 과학재단 및 풍림 파이버랩 건설(주)의 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 신경재, 인발성형된 GFRP 스트립판의 구조적 특성 분석, 국민대학교 석사학위논문, 1999
2. 김현정, 앵글 및 튜브형 GFRP 트러스 부재의 거동 특성 분석, 국민대학교 석사학위논문, 1999
3. Extren Fiberglass Structural Shapes Design Manual, Strongwell, 1989
4. The Pultex Pultrusion Design Manual, Creative Pultrusions Inc., 1999.
5. John L. Clarke, Structural Design of Polymer Composites, EUROCOMP Design Code and Handbook, E&FN Spon, 1996
6. L. Hollaway, Polymer Composites for Civil and Structural Engineering, Blackie Academic & Professional, 1993