한국철도학회논문집
제9권 제1호 2006년 ▌pp. 57-62

T형 복합재료 기둥의 좌굴

Buckling of T-Shaped Composite Columns

이승식† · 백성용*
Seungsik Lee · Sung-Yong Back

Abstract

Composite thin-walled members for civil engineering application are mainly produced by pultrusion technique, and they are generally made of a polymeric resin system reinforced by E-glass fibers due to economical reason. This material combination results in low elastic moduli of the composite materials and makes the design of composite members to be governed by stability limit state. Therefore the buckling behavior of composite thin-walled members was experimentally investigated in the present study. Axial compression was applied on each specimens by a hydraulic ram and knife edge fixtures were placed at both ends to simulate simple boundary condition. Axial compression, lateral displacements and twisting at the mid-height of each specimen were measured by a set of transducers during buckling test. The experimental buckling loads were compared with analytical results obtained through isotropic formulas. In the calculation of analytical results, elastic properties such as Young's modulus(E) and shear modulus(G) were replaced with E_L and G_{LT} obtained from coupon tests, respectively.

Keywords : Buckling(좌굴), Composites(복합재료), Experiment(실험), Thin-walled Members(박판부재), Coupon Test (쿠폰 시험)

1. 서 론

복합재(composite materials)는 기존의 건설재료인 강재와 콘크리트에 비해서 우수한 역학적 및 물리적 성질을 가지고 있기 때문에 복합재를 건설분야에서 사용할 경우 많은 이점을 얻을 수 있다. 한 예로써 복합재의 자중이 강재의 약 1/4 정도에 불과하므로 노후한 도로 및 철도교량을 복합재 교량으로 대체할 경우 공장에서 미리 제작하여 현장까지 운반한 뒤 크레인을 이용하여 비교적 손쉽게 거치할 수 있을 뿐만 아니라 시공시간도 획기적으로 줄일 수 있다. 이러한 장점으로 인하여 현재 미국과 일본을 비롯한 유럽의 여러 국가에서 복합재료 부재를 시험적이기는 하지만 교량의 상부구조, 건물, 냉각탑, 격자형 송전탑 등에 사용하고 있다[1].

건설분야에서 사용되는 복합재료 부재는 주로 펄트루젼(pultrusion)공정에 의해서 제작되며 탄소섬유보다는 비교적 가격이 저렴한 E-glass 섬유와 폴리머 수지로 만들어진다. E-glass 섬유와 폴리머 수지로 만들어진 복합재료 부재는 높은 강도를 발휘하는 반면에 낮은 탄성계수를 갖게 되며, 낮은 탄성계수로 인하여 펄트루젼 부재의 공칭강도가 재료의 파괴를 기초로 계산한 강도보다 좌굴강도에 의해서 결정되는 경우가 매우 빈번히 발생한다.

하중의 편심 없이 다른 부재들과의 연결이 쉬운 T형 부재는 bracing 부재 및 truss의 현재로 많이 쓰이며, 이 경우 T형 부재에는 축력이 주된 하중으로 작용한다. 따라서 부재의 설계과정에서 좌굴에 대한 검토가 매우 중요한 부분을 차지하게 된다.

본 연구에서는 펄트루젼공정에 의해서 생산된 E-glass/vinylester T형 부재의 좌굴거동을 실험적으로 연구하였다. 먼저 역학적 성질, 물리적 성질, fiber architecture 등과 같은 재료의 특성을 알아보기 위해서 T형 실험체로부터 채취한 시료를 사용하였다. 총 9개의 단순지지된 T형 실험체에 대해서 좌굴실험을 수행하였으며, 각 실험체마다 압축력에 따른 실험체의 중간 높이에 위치한 단면의 횡변위(lateral displace-

† 책임저자 : 정회원, 건국대학교 연구교수
E-mail : drslee@naver.com
TEL : (02)452-7091 FAX : (02)444-7091
* 인제대학교 토목공학과 교수

ment)와 비틀림각(angle of twist)의 변화를 측정하였다. 실험적 좌굴하중과 등방성(isotropic) 재료의 좌굴해석에 사용되고 있는 식에 실험체의 치수와 실험적으로 얻은 재료의 성질을 대입하여 계산된 이론적 좌굴하중(P_{cr}^{pred})을 비교하였다.

2. 재료의 특성

펄트루젼 부재는 전형적인 적층방식으로 생산되지 않지만 서로 다른 역학적 성질을 갖는 보강층들이 두께방향으로 배치되므로 부재를 구성하는 각각의 판요소들을 적층판으로 모델링할 수 있다[2]. 좌굴실험에 사용된 펄트루젼 T형 실험체는 단일방향 E-glass roving층과 방향성이 없는 E-glass Continuous Strand Mat(CSM)층으로 보강된 vinylester 수지로 만들어졌다. 실험적으로 밝혀진 플랜지와 복부의 보강층 배치는 Fig. 1과 같이 서로 동일하며 플랜지와 복부 모두 2개의 veil층, 8개의 CSM층, 7개의 roving층으로 구성되어 있다.

실험체를 구성하는 E-glass 섬유의 전체 구성물질에 대한 부피비를 측정하기 위하여 44.45 × 44.45 × 9.525mm(실험체 두께)의 공칭치수를 갖는 총 12개(플랜지에서 6개, 복부에서 6개)의 시료를 채취하였다. 시료의 평균 밀도는 1.82 g/cm^{3}이며 ASTM D792-00[3]의 규정에 따라 측정되었다. 밀도 측정에 사용된 동일한 시료들에 대해서 구성물질의 부피비와 질량비를 측정하였으며, 시험방법과 계산에 사용된 식은 기존에 발표된 논문[4]을 참조하였다. Table 1에 나타나 있듯이 전체단면에 사용된 섬유의 부피비는 36.4 %임을 알 수 있었다.

실험체를 구성하고 있는 보강층 중에서 섬유가 단일방향으로 배치되어 있는 roving층만이 재료의 방향성에 영향을 미치므로 재료의 성질을 직교이방성(orthotropic)으로 간주할 수 있다. 직교이방성을 정의하기 위해서는 재료의 성질에 대한 2개의 축이 필요하기 때문에 roving층의 섬유 방향과 일치하는 실험체의 길이방향을 L축으로, 그리고 L축과 직각을 이루는 방향을 T축으로 정의하였다(Fig. 2 참조). 재료의 L축 및 T축방향 탄성계수, 전단탄성계수, 포아송비, 극한강도를 측정하기 위해서 실험체로부터 채취한 쿠폰(coupon)에 대해서 압축 및 전단시험을 수행하였다.

압축시험에 사용된 압축쿠폰의 공칭치수는 Fig. 3(a)와 같다. L축 방향의 성질을 측정하기 위해서 실험체의 플랜지와 복부에서 각각 18개의 쿠폰을 채취하였다. T축 방향에 대해서는 플랜지의 폭이 제한되어 있기 때문에 복부에서만 15개의 쿠폰을 채취하였다. 총 51개의 쿠폰에 대해서 ASTM D 3410/D 3410M-93[5]의 규정에 따라 압축시험을 수행하였으며, 탄성계수(E_L, E_T), 포아송비(ν_{LT}), 압축강도(σ_{uL}, σ_{uT})를 측정하였다. 압축쿠폰들의 응력-변형률 관계는 Fig. 4와 같으며, 시험결과는 Table 2에 수록되어 있다.

전단탄성계수(G_{LT})와 전단강도(τ_{uLT})를 측정하기 위해서 Fig. 3(b)와 같은 공칭치수를 갖는 전단쿠폰을 플랜지와 복부에서 각각 15개씩 채취하였다. 총 30개의 쿠폰에 대해서 ASTM D 5379/D 5379M-93[6]의 규정에 따라 전단시험을 수행하였으며, Iosipescu 전단시험장치 대신에 펄트루젼 복합재의 전단특성을 측정하기에 적합한 Georgia Tech 전단시험장치[7]를 사용하였다. 전단쿠폰들의 응력-변형률 관계는 Fig. 5와 같으며, 시험결과는 Table 2에 수록되어 있다.

Table 1. Volume and mass fractions(%)

		Mass fraction	Volume fraction
Resin(Vinylester)		39.0	56.2
Fiber (E-glass)	Veil	1.3	0.9
	CSM	21.9	15.7
	Roving	27.7	19.8
Filler(Kaolin)		10.1	7.1
Void		-	0.3

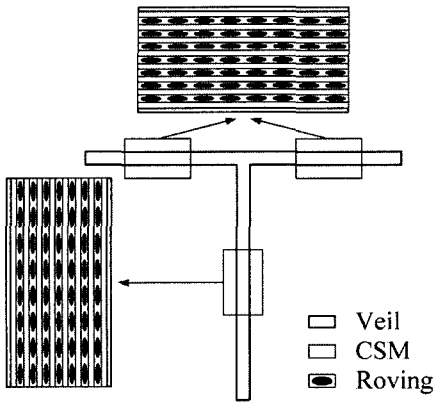


Fig. 1. Fiber architecture of specimen

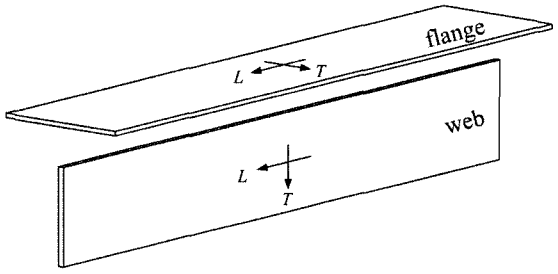
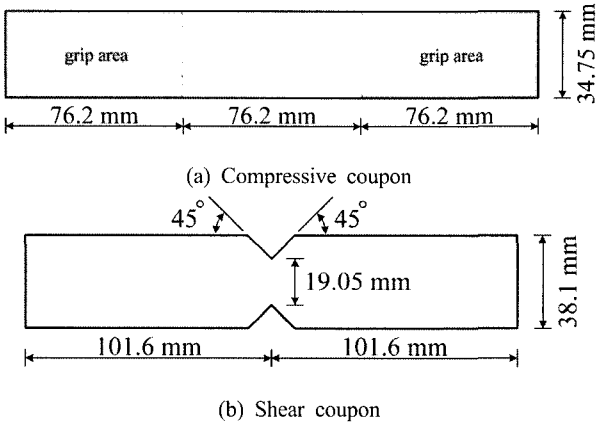


Fig. 2. Coordinate for mechanical properties



(a) Compressive coupon

(b) Shear coupon

Fig. 3. Nominal dimension of coupons

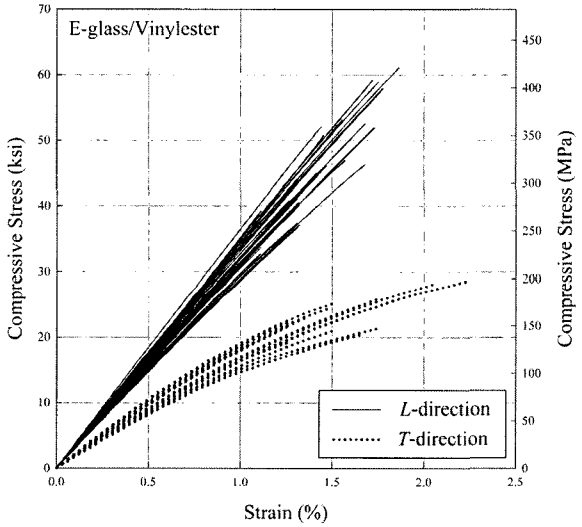


Fig. 4. Compressive stress-stain curves

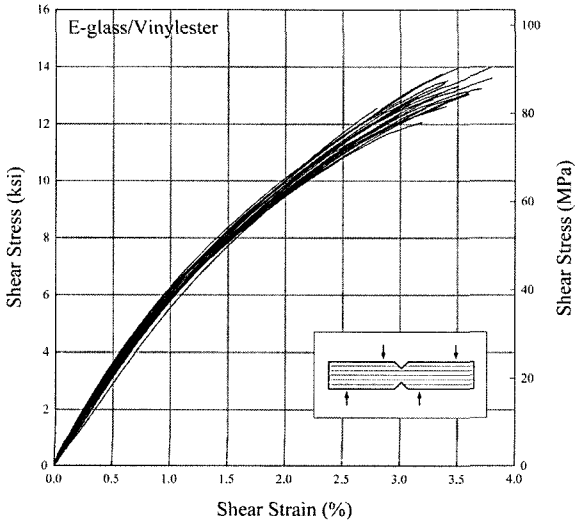


Fig. 5. Shear stress-stain curves

Table 2. Results of coupon tests

Loading	Properties	Average
Compression	E_L	22.7GPa
	σ_{uL}	358.2MPa
	ν_{LT}	0.31
	E_T	13.0GPa
	σ_{uT}	162.0MPa
Shear	G_{LT}	4.4GPa
	τ_{uLT}	95.1MPa

3. 좌굴실험

T형 부재는 1축 대칭단면 부재이기 때문에 전단중심과 도심이 일치하지 않으며, 이로 인하여 복부축(또는 전단중심과 도심을 연결하는 축)에 대한 휨변형이 전단중심에 대한 단면의 비틀림변형과 서로 연계(coupled)되어 발생한다. 일반적으로 T형 부재의 경우 복부축이 단면의 약축이 되며, 축방향 압축력에 의한 좌굴이 부재에 발생할 경우에 약축에 대한 휨좌굴과 전단중심에 대한 비틀림좌굴이 서로 연계되어 동시에 발생하는 휨-비틀림좌굴(flexural-torsional buckling)이 부재의 거동을 지배하는 모드가 된다.

본 논문에서는 단순지지된 펄트루젼 T형 부재의 축방향 압축력에 의한 휨-비틀림 좌굴거동을 실험적으로 알아보기 위해서 Fig. 6과 같은 실험 장치를 사용하였다. 휨과 비틀림에 대한 단순지지 조건을 실험적으로 구현하기 위해서 실험체의 양단에 2개의 knife edge를 사용하였다. 하중은 유압펌프로 가하였고 위쪽 knife edge와 유압펌프 사이에 위치한 로드셀을 통하여 하중의 크기를 측정하였다(Fig. 6과 Fig. 7 참조).

실험체의 좌굴로 인하여 발생하는 횡변위와 비틀림각은 부재축과 직각을 이루는 평면에 배치된 3개의 potentiometer를 이용하여 실험체의 중간 높이에서 측정하였다[8]. 각 계측장비를 통한 측정값은 자료수집 장치를 사용하여 1 sample/sec의 속도로 기록하였다. 또한 2개의 횡변위와 비틀림각은 각각 V, W, Φ로 정의하였으며 실험에서 사용된 횡변위와 비틀림각의 양(positive)의 방향은 Fig. 8과 같다.

좌굴실험에는 총 9개의 E-glass/vinylester T형 실험체가 사용되었다. 모든 실험체에 대해서 Fig. 9와 같이 휨-비틀림 좌굴이 발생하였으며, 각 실험체마다 Figs. 10, 11과 같은 하중-횡변위 및 하중-비틀림각 관계를 얻을 수 있었다. 모든 실험체에 걸쳐서 하중재하 초기단계부터 횡변위와 비틀림각이 발생하였으며, 결과적으로 이론에서와 같은 명확한 좌

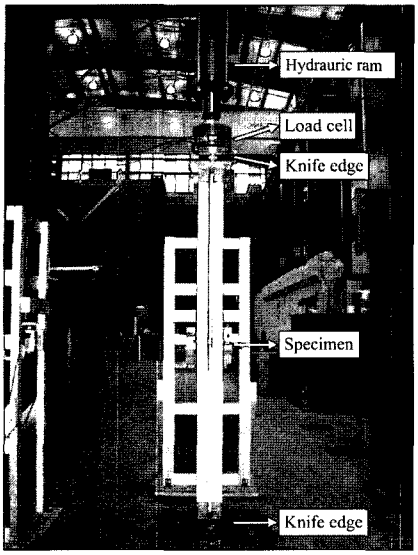


Fig. 6. Experimental set-up

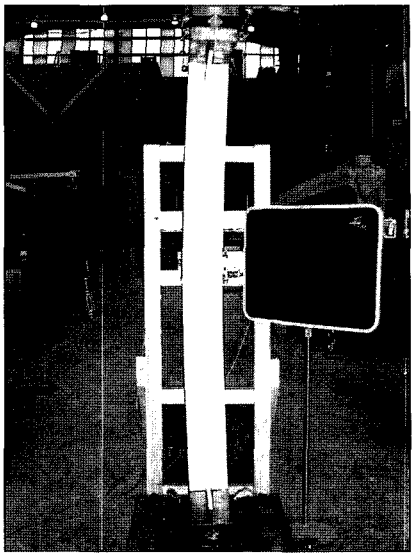


Fig. 9. Buckled specimen(front view)

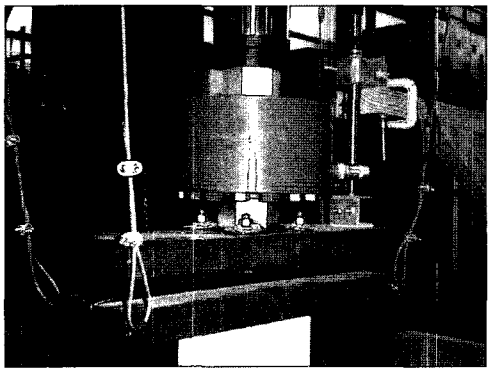


Fig. 7. Knife-edge and load cell

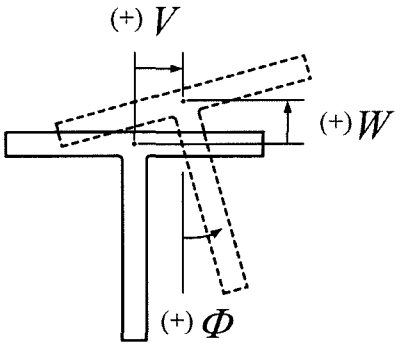


Fig. 8. Positive displacements and twisting

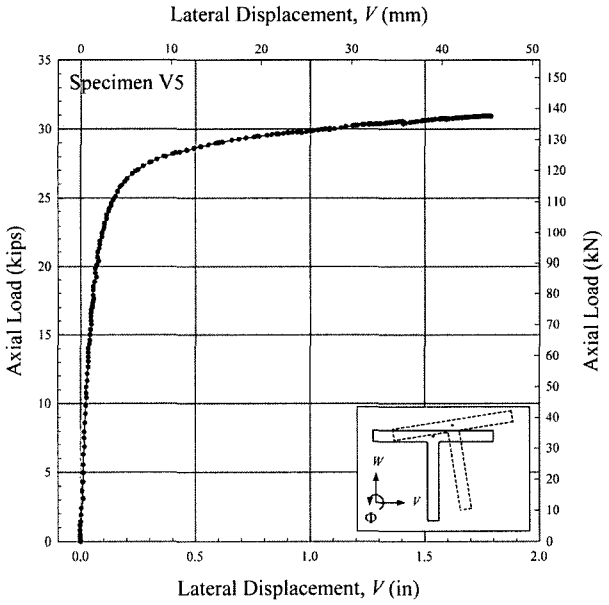


Fig. 10. Load(P) vs. lateral displacement(V)

굴점이 나타나지 않았다. 이러한 현상은 실험장치의 피할 수 없는 편심과 실험체의 초기변형 때문인 것으로 생각된다.

모든 실험체가 정도의 차이는 있으나 후좌굴 강도를 갖는 것으로 나타났다. 실험적 좌굴하중(P_{cr}^{exp})을 결정하기 위해서 후좌굴 강도를 갖는 실험체에 적합한 Hoff 등[9]이 제안한 방법을 사용하였으며, 하중-횡변위 및 하중-비틀림각 그래프의 좌굴 전후에 존재하는 선형구간을 연결한 두 직선의 교점을 실험적 좌굴하중으로 추정하였다. 하중-횡변위 및

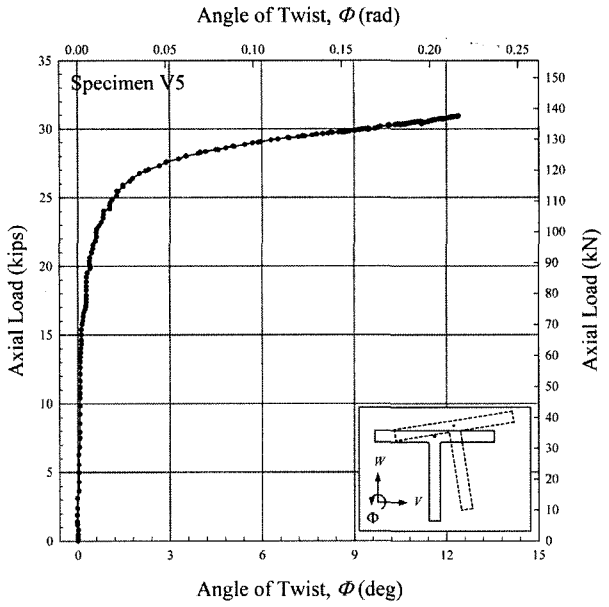


Fig. 11. Load(P) vs. angle of twist(Φ)

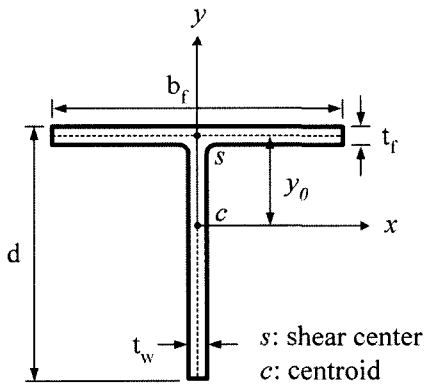


Fig. 12. Definition of dimension and coordinate

Table 3. Dimensions and buckling loads

Spec. No.	b_f (mm)	d (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	L (mm)	P_{cr}^{exp} (kN)
V1	76.5	176.5	12.7	13.0	914.4	82.3
V2	102.6	126.5	12.7	13.0	990.6	150.3
V3	101.6	127.3	12.7	12.7	1,216.2	104.5
V4	127.0	126.0	12.7	12.7	1,364.0	172.6
V5	127.3	126.7	12.7	12.7	1,600.2	125.9
V6	127.8	151.1	12.7	12.7	1,602.2	117.0
V7	127.5	177.0	12.7	12.7	1,366.5	115.7
V8	127.5	176.0	12.7	12.7	1,600.2	119.2
V9	101.6	151.4	12.7	12.7	1,116.1	129.0

하중-비틀림각 관계로부터 추정된 좌굴하중은 거의 차이가 없었으며, 하중-횡변위 그래프의 선형구간이 하중-비틀림각 그래프의 선형구간보다 좀 더 명확한 경향을 보였다. 따라서 좌굴하중의 결정과정에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하기 위해서 하중-횡변위 관계로부터 얻은 값을 실험적 좌굴하중으로 채택하였다. Fig 12와 같이 정의된 단면치수는 실험체의 길이방향으로 약 30cm 간격마다 측정하였으며, 측정된 치수의 평균값과 실험적 좌굴하중은 Table 3에 수록되어있다.

4. 결과비교 및 분석

본 연구에서 사용된 실험체의 경우 플랜지와 복부의 보강층이 중심면에 대해서 대칭적으로 배치돼있고 0 ° 이외의 섬유가 사용되지 않았기 때문에 일반적인 복합재료와 달리 탄성연개현상이 발생하지 않는다. 따라서 이론적 해석을 위해서 부재의 성질을 등방성으로 간주할 수 있다.

실험체의 이론적 좌굴하중(P_{cr}^{pred})은 휨과 비틀림에 대해서 단순지지된 등방성 부재의 좌굴해석을 위해 Chajes[10]가 제안한 식 (1)을 사용하여 계산하였다.

$$P_{cr}^{pred}=\frac{P_y+P_\phi-\sqrt{(P_y+P_\phi)^2-4kP_yP_\phi}}{2k} \tag{1}$$

식 (1)에서 P_y와 P_ϕ는 각각 부재의 y축에 대한 휨좌굴하중과 전단중심에 대한 비틀림좌굴하중이며 식 (2)와 식 (3)과 같이 정의된다. 또한 k는 매개변수로서 식 (4)와 같이 정의된다.

$$P_y=\frac{\pi^2EI_y}{L^2} \tag{2}$$

$$P_\phi=\frac{1}{r_0^2}\left(GJ+\frac{\pi^2EC_w}{L^2}\right) \tag{3}$$

$$k=1-\left(\frac{y_0}{r_0}\right)^2 \tag{4}$$

여기서 E, G, L, y_0, r_0, I_y, J, C_w는 각각 탄성계수, 전단탄성계수, 부재의 길이, 전단중심과 도심 사이의 거리, 전단중심에 대한 단면의 극회전반경, y축에 대한 단면의 2차모멘트, 단면의 비틀림상수, 단면의 뒴(warping)상수이다.

각 실험체의 이론적 좌굴하중을 계산하기 위해서 Table 3에 수록되어 있는 실측된 단면치수와 길이를 사용하였으며, E와 G 대신에 쿠폰시험을 통하여 얻은 E_L와 G_{LT}를 사용하였다. 각 실험체에 대한 이론적 좌굴하중은 실험적 좌굴하

Table 4. Comparison of results

Spec. No.	P_{cr}^{pred} (kN)	P_{cr}^{exp} (kN)	$P_{cr}^{pred}/P_{cr}^{exp}$
V1	64.2	82.3	0.78
V2	134.1	150.3	0.89
V3	103.3	104.5	0.98
V4	148.8	172.6	0.86
V5	124.3	125.9	0.99
V6	109.8	117.0	0.94
V7	105.8	115.7	0.91
V8	95.2	119.2	0.80
V9	99.4	129.0	0.77
Average ratio			0.88

중과 함께 Table 4에 수록되어 있으며, $P_{cr}^{pred}/P_{cr}^{exp}$의 평균값은 0.88로 계산되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 펄트루젼공정에 의해서 생산된 직교이방성 E-glass/vinylester T형 부재의 휨-비틀림좌굴거동에 대한 실험적 연구결과를 제시하였으며, 등방성 부재의 좌굴해석에 사용되는 식에 쿠폰 시험으로부터 얻은 재료의 역학적 성질을 대입하여 각 실험체의 이론적 좌굴하중을 계산하였다. 결과비교를 통하여 이론적 좌굴하중과 실험적 좌굴하중 사이에 평균 12% 정도의 차이가 존재하며, 모든 경우에 대해서 이론식이 안전측의 값을 예측함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., and Trianta-fillou, T. C. (2003). "Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State of the Art Review", *Journal of Composites for Construction*, Vol.6, No.2, May, pp.73-87.
2. Barbero, E. J. (1991). "Pultruded Structural Shapes - From the Constituents to the Structural Behavior", *SAMPE Journal*, Vol. 27, No.1, pp.25-30.
3. ASTM D 792-00. (2000). Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density), ASTM.
4. Ye, B. S., Svenson, A. L., and Bank, L. C. (1995). "Mass and Volume Fraction Properties of Pultruded Glass Fiber-Reinforced Composites", *Composites*, Vol.26, No.10, pp.725-731.
5. ASTM D3410/D3410M-93. (1995). Standard Test Methods for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Material with Unsupported Gage Section by Shear Loading, ASTM.
6. ASTM D5379/D5379M-93. (1993). Standard Test Methods for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Beam Method, ASTM.
7. Park, J. Y. (2001). *Pultruded Composite Materials under Shear Loading*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.
8. Stoddard, W. P. (1997). *Lateral-Torsional Buckling Behavior of Polymer Composite I-Shaped Member*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.
9. Hoff, N. J., Boley, B. A., and Coan, J. M. (1948). "The Development of a Technique for Testing Stiff Panel in Edgewise Compression", *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, Vol.5, No.2, pp.14-24.
10. Chajes, A. (1974). *Principles of Structural Stability Theory*, Prentice-Hall.