

다양한 형상비를 갖는 사각 CFRP 튜브의 굽힘 및 비틀림 특성

이용성* · 정성균**†

Bending and Torsional Characteristics of Rectangular CFRP Tubes with Various Aspect Ratios

Yongsung Lee*, Seong-Kyun Cheong**†

ABSTRACT: Fiber reinforced composite materials have outstanding specific strength and specific stiffness. So the use of composite materials increases in various kinds of industrial fields including sports goods such as bicycles. Composite materials are used to make structural parts with various kinds of shapes. Specially, rectangular composite tubes are used to make a few of composite bicycle frames, but there has been a few of research on this issue. Rectangular composite tubes are designed to have appropriate radius of curvature and endure bending and torsional loads. In this research, nine kinds of rectangular composite tubes having aspect ratios 1:1, 1:1.5, 1:2 and radius of curvatures R5, R10, R15 were fabricated. The carbon fiber reinforced composite material was used to make tubes having same cross sectional areas. The stacking sequence of tubes is $[0/90/\pm 45]_s$. Experimental evaluation was accomplished to apply bending and torsional load to the tubes. Experimental results show that bending and torsional characteristics depend on radius of curvature and aspect ratio of rectangular composite tubes.

초 록: 섬유강화복합재료는 비강도와 비강성이 뛰어나 여러 분야에 걸쳐 사용량이 증가하고 있으며 자전거와 같은 스포츠 용품에도 사용량이 점점 증가하고 있다. 복합재료는 다양한 형상의 구조부품으로 만들어져 사용되고 있다. 특히 자전거 프레임의 일부에는 사각형 복합재 튜브 형태로 제작되어 사용되고 있으나 이에 관한 연구는 많지 않다. 사각 복합재 튜브의 경우에 모서리에 적절한 라운드 값을 주어 굽힘과 비틀림에 견디도록 설계된다. 본 연구에서는 모서리의 곡률반경이 R5, R10, R15인 세 개의 그룹에 가로-세로 1:1, 1:1.5, 1:2의 형상비를 갖는 아홉 종류의 사각 복합재 튜브를 제작하였다. 탄소섬유강화복합재료가 튜브제작에 사용되었으며 단면적은 모두 같도록 설계되었다. $[0/90/\pm 45]_s$ 으로 적층하여 제작한 사각 복합재 튜브에 굽힘과 비틀림 하중을 가하여 실험평가를 수행하였다. 실험결과 사각 복합재 튜브의 R 값과 형상비에 따라서 굽힘 및 비틀림 특성이 크게 다를 수 있었다.

Key Words: 탄소섬유강화복합재료(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic), 사각 튜브(rectangular tube), 형상비(aspect-ratio), 라운드(round), 굽힘(bending), 비틀림(torsion)

1. 서 론

탄소섬유강화복합재료는 비강도와 비강성이 우수한 재료로서 기존의 금속재료를 대체하면서 경량화의 이득까지 볼 수 있어 여러 구조물이나 산업 현장에 사용되고 있다. 특

히 최근들어 복합재료는 자전거와 같은 스포츠 용품 제작에 많이 활용되고 있다. 과거에 마그네슘이나 알루미늄으로 제작되던 자전거 프레임은 복합재료를 사용하여 제작되는 추세로 바뀌고 있으며, 복합재료의 섬유방향과 적층 순서를 달리하여 구조적 안전성을 확보한다[1-5]. EN 시험

Received 17 March 2014, received in revised form 21 April 2014, accepted 23 April 2014

* 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원

**† 서울과학기술대학교 기계자동차공학부, Corresponding author (E-mail: skjung@seoultech.ac.kr)

규격에 의해 자전거 프레임 튜브는 시트 로드와 프론트 로드에서 의한 굽힘과 페달 로드에서 의한 비틀림이 발생하며 자전거 프레임의 튜브에 대한 기초연구로서 원형 또는 매우 단순한 형태의 사각형 단면을 갖는 복합재 튜브에 대한 3점 굽힘 시험을 통한 굽힘 강도나 비틀림 시험을 통한 비틀림 강도 평가를 수행한 연구가 몇 편 보고된 바 있다[6-9]. 본 연구에서는 사각 튜브가 같은 단면적과 적층 순서를 갖도록 설계 제작하였으며 자전거 프레임에 사용되는 수많은 형상과 크기를 비교할 수는 없기에 기본적으로 사각 튜브 모서리의 곡률반경 R 값 R5, R10, R15의 세 그룹에 가로-세로 형상비가 각각 1:1, 1:1.5, 1:2의 비를 갖는 사각 튜브 아홉 종류에 대해 형상비와 모서리 값에 따라 굽힘과 비틀림 특성을 비교 분석하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

형상비를 1:1, 1:1.5, 1:2으로 만들기 위해 Table 2와 같이 각 모서리 R 값에 따라 가로-세로비를 계산하여 최종 크기를 설정하였다. 튜브 제작을 위하여 재료는 UD-CFRP 프리프레그(SK-Chemicals, USN125B series)를 사용하였으며, Table 1에 물성치를 나타내었다. 프리프레그는 튜브 형태의 형틀에 감을 때 10% 겹쳐지도록 크기를 정하였으며, 0도, 90도, ± 45 도의 각도로 각각 절단하여 $[0/90/\pm 45]_s$ 의 적층 순서로 형틀에 8층(ply) 적층하였다. 겹쳐지는 부분은 가로 쪽으로만 생기도록 서로 반대편으로 번갈아 적층하였으며 이형 필름으로 감싼 후 진공팩으로 다시 감싸 진공을 유지하며 오토클레이브를 사용하여 Fig. 2의 큐어링 사이클로 100°C가

Table 1. Material property of USN 125

| | | | | | |
|-----|-----------|-----|------------|-----|----------|
| E1 | 123.5 GPa | Xt | 2063.5 MPa | eXt | 1.67 % |
| E2 | 7.4 GPa | Yt | 53.7 MPa | eYt | 0.722 % |
| v12 | 0.35 | G12 | 1910 MPa | Sxy | 78.7 MPa |

Table 2. Dimensions for the test specimens

| Specimen No. | Radius of curvature | Aspect-ratio | Unit : mm | | |
|--------------|---------------------|--------------|-----------|--------|------------|
| | | | Width | Height | Weight (g) |
| 1 | 5 | 1.0 | 42.2 | 42.2 | 80 |
| 2 | 5 | 1.5 | 33.8 | 50.7 | 80 |
| 3 | 5 | 2.0 | 28.1 | 56.3 | 79 |
| 4 | 10 | 1.0 | 44.4 | 44.4 | 79 |
| 5 | 10 | 1.5 | 35.5 | 53.2 | 79 |
| 6 | 10 | 2.0 | 29.6 | 59.1 | 79 |
| 7 | 15 | 1.0 | 46.5 | 46.5 | 79 |
| 8 | 15 | 1.5 | 37.2 | 55.8 | 79 |
| 9 | 15 | 2.0 | 31.0 | 62.0 | 79 |

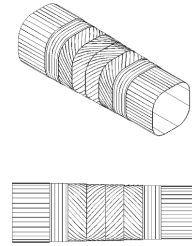


Fig. 1. Stacking sequence for rectangular CFRP tubes

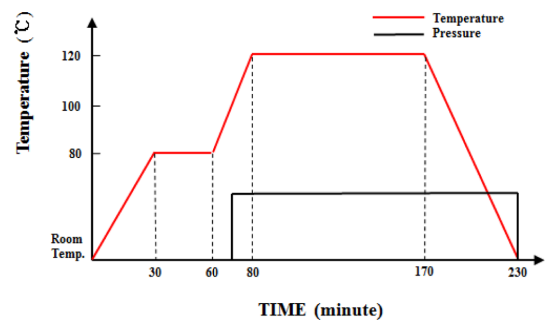


Fig. 2. Curing cycle for the fabrication of CFRP tube



(a) Tubes with R5

(b) Tubes with R10



(c) Tubes with R15

Fig. 3. Photos of CFRP tube specimens

되었을 때 5 kg/cm²의 압력을 가하여 경화시켰다. 성형 후 형틀에서 빼내어 각 시험편의 무게를 측정한 결과 평균 79 g으로 측정되었다.

시험평가를 위한 아홉 종류의 사각 복합재 튜브 시험편을 Fig. 3에 나타내었다.

2.2 실험방법

Fig. 4와 같은 3점 굽힘 시험을 위해 지지대 거리는 200 mm로 고정하였고, 중앙부에 앤빌로 튜브에 굽힘 하중을 2 mm/min의 속도로 가하며 하중-변위 데이터를 획득하였다. 굽힘 시험을 수행함에 있어서 세로가 굽힘을 받는 방향으로 시험하였다.

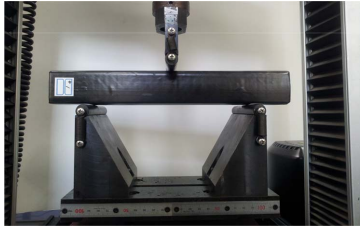
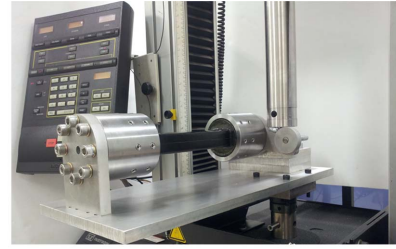
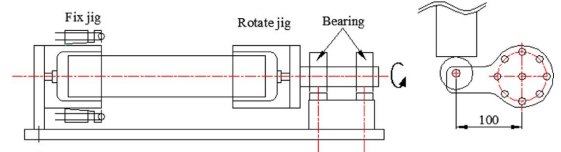


Fig. 4. Photo of 3-Point bending test

비틀림 시험은 Instron 4467 인장 시험기에 Fig. 5와 같이 제작된 비틀림 시험 지그를 설치하여 수행하였다. 사각 형상을 갖는 시험편 한쪽은 볼트로 고정하고 반대편에는 시험편 고정 지그에 베어링을 설치하여 자유로이 회전할 수 있도록 만든 축을 연결하고 시험편 중심에서 끝단 롤러까지 100 mm 거리의 외팔보를 설치하여 시험편의 한쪽을 회전시키며 토크-각도 데이터를 획득하였다.

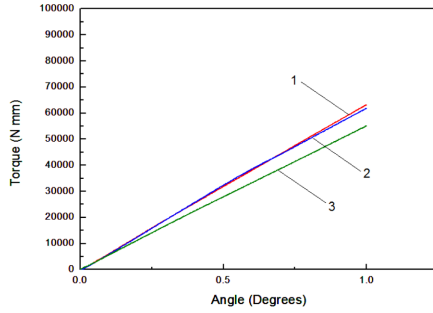


(a) Photo of torsion test

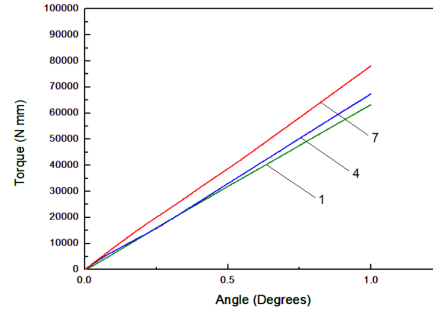


(b) Photo of test jig

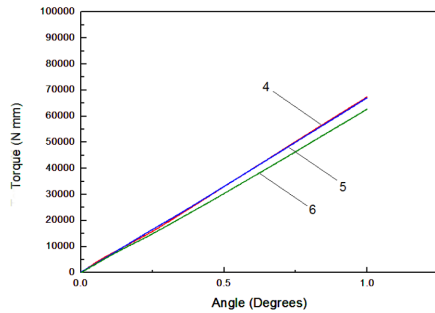
Fig. 5. Photos of torsion experiment



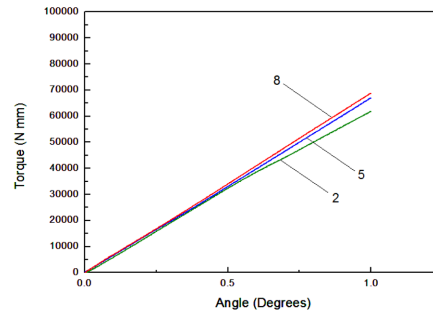
(a) Graphs of the R5 group



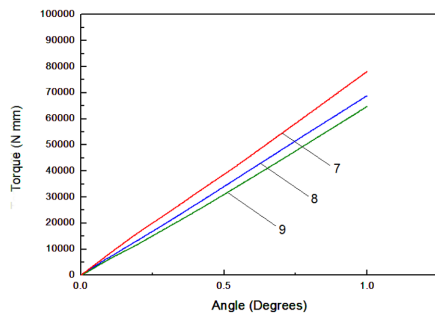
(d) Graphs of the aspect ratio 1 group



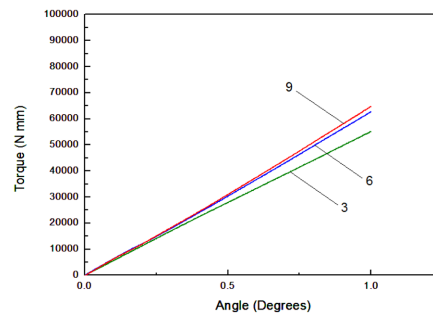
(b) Graphs of the R10 group



(e) Graphs of the aspect ratio 1.5 group

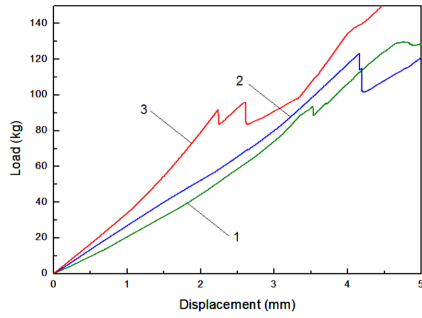


(c) Graphs of the R15 group

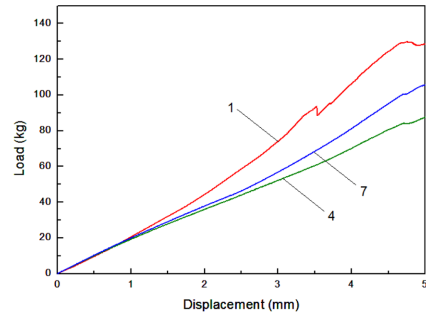


(f) Graphs of the aspect ratio 2 group

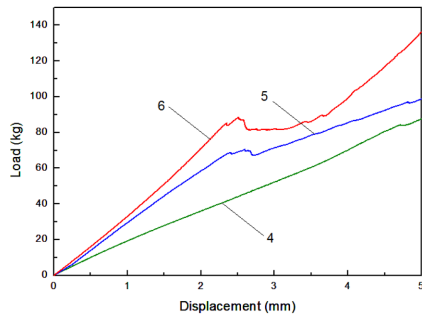
Fig. 6. Torque-angle curves for torsion test



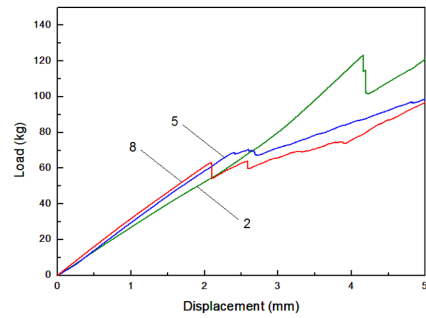
(a) Graphs of the R5 group



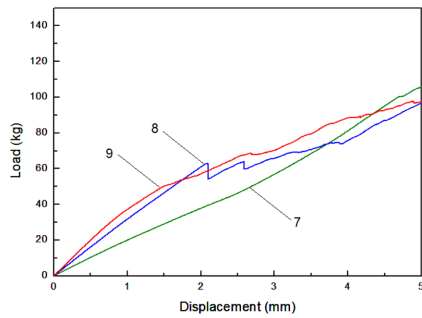
(d) Graphs of the aspect ratio 1 group



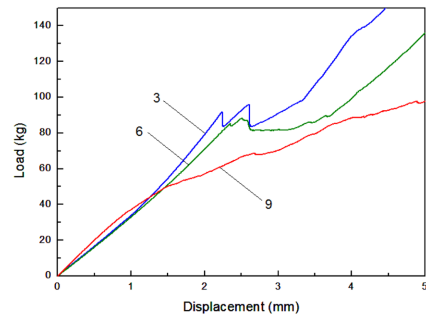
(b) Graphs of the R10 group



(e) Graphs of the aspect ratio 1.5 group



(c) Graphs of the R15 group



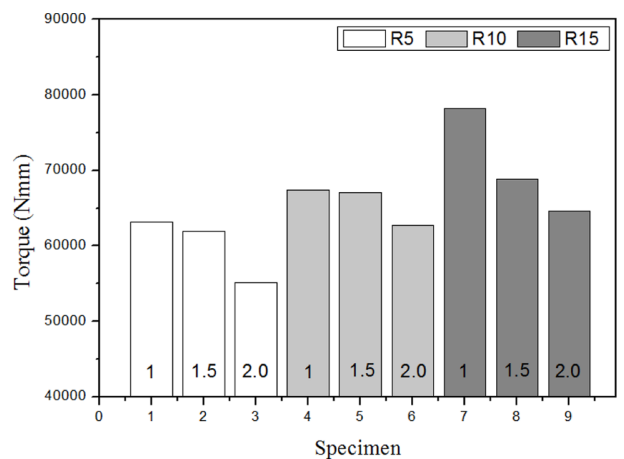
(f) Graphs of the aspect ratio 2 group

Fig. 7. Load-displacement curves for bending test

3. 결과 및 고찰

비틀림 시험의 토크-각도 선도와 굽힘 시험의 하중-변위 선도를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

비틀림 시험 결과에서 Fig. 8과 같이 같은 R 값을 가지는 시편 그룹으로 묶어보면 R5 그룹 대비 R10 그룹의 경우 8.6%, R15 그룹의 경우 14.9%로 토크 값이 증가하며, 같은 형상비의 그룹에서 형상비 1 대비 형상비 1.5 그룹은 4.8%로 토크가 감소하고 형상비 2 그룹은 10.4%로 토크가 감소하는 경향을 보였다. 굽힘의 경우 Fig. 9와 같이 같은 R 값의 그룹으로 묶어 보면 R5 그룹, R10 그룹, R15 그룹끼리의 변화가 적었으며 같은 형상비의 그룹에서 형상비 1 대비 형상비 1.5 그룹은 32%, 형상비 2 그룹은 40%의 증가를 보였다. 비틀림에 대해 형상비가 커질수록 토크가 작아지며, R 값이 증

**Fig. 8.** Results for torsion test

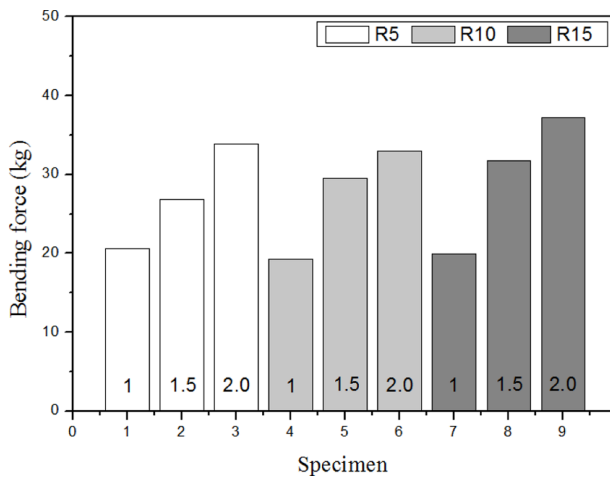


Fig. 9. Results for bending test

가함에 따라 토크가 증가하였으며 굽힘에 대해 형상비가 커질수록 반력이 증가하였다.

4. 결 론

탄소섬유강화복합재료(CFRP)를 사용한 사각 튜브 구조물에서 형상비와 R 값에 따른 굽힘과 비틀림 특성을 실험적으로 평가 분석한 결과를 간단히 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 비틀림 시험에서 곡률반경이 증가할수록 비틀림 특성이 우수하게 평가되었다.

(2) 비틀림 시험에서 같은 R 값을 가질 경우 형상비가 커질수록 비틀림 특성은 감소하였다.

(3) 굽힘 시험에서 R 값에 따른 굽힘 특성에는 큰 차이가 없었으며, 형상비가 커짐에 따라서 굽힘 특성이 우수하게 나타났다.

(4) 실험결과로부터 비틀림 특성이 크게 요구되는 경우에는 형상비 1과 큰 R 값을 갖는 튜브 설계가 필요하고, 굽힘 특성이 크게 요구되는 경우에는 큰 형상비를 갖도록 튜브를 설계할 필요가 있다. 비틀림과 굽힘 특성이 동시에 요구되는 경우에는 실험결과를 참고하여 적절하게 선택 기준을 마련할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(2014-0447).

참고문헌

- Deetz, J., "The Use of Wrought Magnesium in Bicycles," *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 57, No. 5, 2005, pp. 50-53.
- Cicero, S., Lacalle, R., Cicero, R., Fernandez, D. and Mendez, D., "Analysis of the Cracking Causes in An Aluminium Alloy Bike Frame," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 18, 2011, pp. 36-46.
- Castejon, L., Miravete, A., Ullod, J. and Larrode, E., "Composite Monocoque Frame for a Mountain Bicycle: Testing and Calculation," *Applied Composite Materials*, Vol. 1, 1994, pp. 247-258.
- Lizotte, P.L., "Stress Analysis and Fabrication of Composite Monocoque Bicycle Frames," M.S. Thesis, McGill University, 1996.
- Lee, Y.S., Shin, K.H., Cheong, S.K., Choi, U.J., Kim, Y.K., Park, K.R., and Kim, H.S., "Utilization of Finite Element Analysis in Design and Performance Evaluation of CFRP Bicycle Frames," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 37, No. 1, 2013, pp. 121-127.
- Lee, S.H., Kim, H.J., Chang, Y.W., and Choi, N.S., "Bending Performances and Collapse Mechanisms of Light-weight Aluminum-GFRP Hybrid Square Tube Beams," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 3, 2007, pp. 8-16.
- Yang, I.Y., Kim, J.H., and Kim, J.H., "The Characteristics of Flexure Strength and Rigidity in Light-weight CFRP Members," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 11, 2008, pp. 95-99.
- Abu Talib A.R., Ali Aidy, Mohamed A. Badie, Nur Azida Che Lah and Golestaneh A.F., "Developing a Hybrid, Carbon/glass Fiber-reinforced, Epoxy Composite Automotive Drive Shaft," *Materials and Design*, Vol. 31, 2007, pp. 514-521.
- Jelf, P.M. and Fleck, N.A., "The Failure of Composite Tubes Due to Combined Compression and Torsion," *Journal of Materials Science*, Vol. 29, 1994, pp. 3080-3084.