

카본 자전거 프레임 소재의 적층 패턴에 따른 프레임 강성 연구

최웅재^{*,**}, 김홍건^{**,***}, 곽이구^{**,***,#}

^{*}(주)윈엔윈, ^{**}전주대학교 탄소융합공학과, ^{***}전주대학교 기계자동차공학과

Study on Frame Stiffness based on Lamination Pattern of Carbon Bicycle Frame Materials

Ung-Jae Choi^{*,**}, Hong-Gun Kim^{**,***}, Lee-Ku Kwac^{**,***,#}

^{*}Win&Win Co.,Ltd.

^{**}Department of Carbon Convergence Engineering, Jeonju University

^{***}Department of Automotive and Mechanical Engineering, Jeonju University

(Received 11 April 2021; received in revised form 14 April 2021; accepted 15 April 2021)

ABSTRACT

The notion of leisure has changed with industrial development and improvement in life quality. Bicycling is a healthy sport; it is an exercise performed while enjoying nature. There have been many changes in the materials that are used to manufacture the bicycle frame. Iron and aluminum have been mainly used in bicycle frames. However, carbon-based materials are lighter and stronger than metal frames. The bicycles made of carbon composite changes frame rigidity depending on the direction of the carbon sheet sacking angle. We study the direction of composite material and how they affect the stiffness of frames based on the stacking angle.

Key Words : Carbon Bicycle(카본자전거), BB Stiffness(프레임 BB강성), Torsional Stiffness(비틀림 강성), Lug assembly Frame(러그형 프레임)

1. 서 론

첨단소재 기술의 발전으로 인하여 자전거 프레임의 재료가 철과 알루미늄 등의 금속 재질에서 점차적으로 카본섬유 등의 경량화 소재로 바뀌어 가면서 다양한 형태의 혁신제품 등이 개발되어지

고 있다^[1].

일반적으로 자전거의 디자인은 공기역학적 형태를 기반으로 진화를 거듭해 나갔으며 항공기나 F1 레이싱카 설계와 마찬가지로 풍동실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 설계된 자전거들이 조금씩 등장하기 시작했다. 실력이 비슷한 싸이클 선수의 경우 공기저항이 적은 자전거를 탔을 때 상대적으로 우수한 기록이 나오기 때문에 자전거 제작자들은 심혈을 기울여 Aero 형상이 적용된 자전거를

Corresponding Author : kwac29@jj.ac.kr

Tel: +82-63-220-3063, Fax: +82-63-220-3161

개발하고 있다.

그러나 UCI(국제사이클링연맹)은 이러한 지나친 Aero Dynamics 디자인이 선수들의 실력 보다는 자전거의 성능 개선에 초점을 맞추고 있다는 문제를 제기하게 된다. 따라서, 자전거 프레임의 각각의 튜브는 80mm 사각 박스 내에서 설계가 이루어져야 하며 BB(Bottom Bracket)의 축은 체인스테이와 시트튜브 그리고 다운튜브의 80mm 박스 내부에 있어야 한다는 설계 규정을 정해놓았다.

현재 싸이클 관련 종목은 스포츠 종목 중 중요한 위치를 차지하고 있으며 하계 올림픽 정식 종목으로서 총 18개의 메달을 확보할 수 있으며 이는 육상과 수영 다음으로 메달수가 많은 수치이다. 다른 경기 종목과는 다르게 사이클 경기는 장비의 의존성이 상대적으로 큰 종목으로서 선수의 경기력과 함께 장비 성능이 경기 결과에 중요한 요인으로 작용하고 있다.

현재 우수한 성능의 프레임과 부품을 개발하기 위하여 스포츠 강국에서는 매년 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 특히 자전거 성능에 가장 큰 영향을 주는 프레임은 힘 전달성, 직진성, 코너링, 가속성 등의 자전거 성능을 결정하는 핵심부품이다.

선수는 기록향상을 위해 자신의 신체에 적합한 프레임 규격을 선택하고 완성차에 구성되어 있는 컴퍼넌트(스텝, 핸들바, 시트 포스트, 안장, 크랭크 암)의 크기를 선택하여 자신의 신체에 최적화 될 수 있도록 피팅 과정을 거친다.

제조사별 프레임의 규격은 XXS size, XS size, S size, M size 그리고 L size로 크게 구분하고 사이즈별 신장에 따른 권장 규격을 제시하고 있으며, 더욱 세분화된 프레임의 지오메트리 즉 탑 튜브길이, 시트 튜브길이, 체인 스테이길이, 헤드각도와 길이, 시트 튜브의 각도, BB Drop, Reach, Stack 그리고 휠베이스와 같이 구체적인 수치를 제공하여 선택할 수 있도록 도움을 주고 있다.

그러나 자전거 프레임은 외형적인 규격에 대해서 매우 세분화하여 정보를 제공하고 있지만 프레임의 강성에 대해서는 정보를 제공하고 있는 제조사는 전무한 상태이다. 이와 다르게 골프의 경우 드라이버 샤프트의 강성에 따른 비거리 및 방향성에 대한 분석을 통하여 사용자의 남성과 여성 그

리고 사용자의 신체적인 힘에 따라 세분화하여 사용자의 힘과 기술에 따라 샤프트를 선택할 수 있도록 많은 연구가 진행되고 있다^{3,4)}.

현재 카본 자전거 프레임은 일방향 탄소섬유 및 유리섬유 등을 150 ~ 250장 정도를 제단하고 이를 적층하여 하나의 프레임을 완성하고 있는 형태이며 섬유의 적층패턴을 달리하여 자전거 프레임의 부위별 강성과 강도를 보완하고 있지만 이에 대한 정확한 데이터를 제공하고 있지 못하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 프레임을 구성하는 탄소소재의 적층 방향에 따른 복합체 시험편의 강도 측정을 진행하고 이를 바탕으로 탄소 프레임의 제작하여 자전거 프레임의 가장 중요 인자인 Bicycle Torsional Stiffness와 B.B(Bottom Brake) Stiffness의 측정을 진행하여 적층 형태에 따른 강도 및 강성을 수치화하고자 한다.

2. 시험편 제조 및 시험방법

2.1 탄소소재 및 프레임 구성

자전거 프레임에 사용된 탄소섬유 프리프레그는 Toray社의 T800SC-2400 Carbon Fiber를 사용하여 제조된 UD(Uni-Direction) Prepreg(WMCP100NS)를 사용하였으며, UD Carbon Prepreg에 대한 물성은 ASTM D3529 규격을 바탕으로 하여 측정된 단위면적당 섬유중량 FAW(Fiber Content/Areal Weight), 수지함량 R/C(Resin Content) 그리고 섬유부피분율 VF(Volume of Fiber)으로서 데이터는 Table 1과 같다.

또한, 본 연구에서 적용하고자 하는 자전거 프레임은 용접이 되지 않는 탄소섬유 특성상 연결부품에 끼워 고정시키는 Lug 형태이며 프레임 중 Top tube, Seat Tube, Down Tube에 대하여 소재 적용을 하고자 한다. 관련 프레임의 구성은 Fig. 1과 같고 설계 규격은 Table 2와 같다.

Table 1 Properties of UD carbon prepreg

Manufacturing Method Prepreg	ASTM D3529		
	FAW(M2)	R/C(%)	VF
Hot-Melt	101	32.5	0.3812

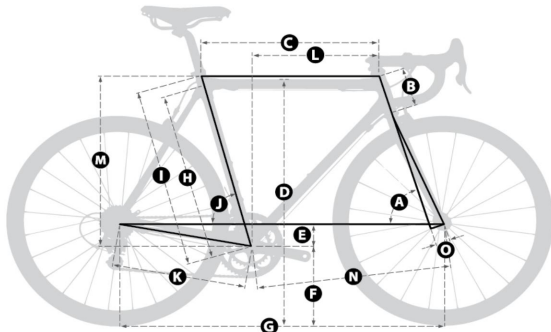


Fig. 1 Bicycle geometry position

Table 2 Geometry of bicycle frame

Part	Item	Unit (mm)
A	Head Tube Angle	72
B	Head Tube Length	114
C	Top Tube Length, Horizontal	534
D	Stand over height	754
E	Bottom Bracket Drop	-75
F	Bottom Bracket Hight	259
G	Wheel Base	977
H	Seat Tube Length, B-B Center to Top Tube Center	500
I	Seat Tube Length, B-B Center to Top	543
J	Seat Tube Angle	74.1
K	Chain Stay Length	405
L	Reach	394
M	Stack	485
N	Front Center	579
O	Fork Offset	45

2.2 시험편 제조 및 시험방법

탄소복합재 판넬의 경우 Auto-Clave 방법을 통해 120℃에서 90min의 경화시간과 Auto-Clave 압력 5bar(진공압 0.2MPa)의 조건으로 성형을 진행하였으며 성형 사이클은 Fig. 2와 같고 적층 패턴의 경우 Table 3에 나타냈다^[5-9].

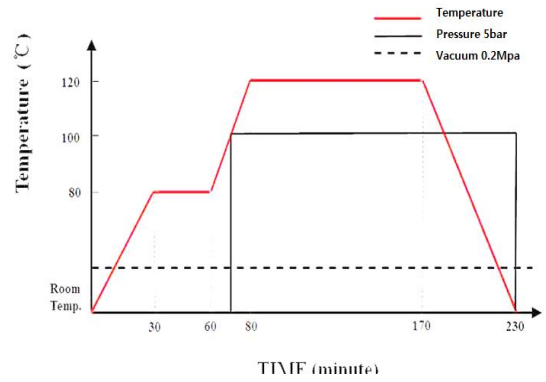


Fig. 2 Curing cycle and specimen

Table 3 Laminated pattern of specimen

Test Type/Direction		Stacking	theoretical thickness (mm)	thickness (mm)
Tensile	0	10	0.97	1
	90	21	2.037	2
Compression	0	21	2.037	2
	90	31	3.007	3
Flexural	0	31	3.007	3



Fig. 3 Test item and specification of specimen

기계적 강도 시험항목에 따라 인장시험편, 압축 시험편, 굴곡시험편은 각각 ASTM D 3039, ASTM D 6641, ASTM D 790 규격에 의거하여 Diamond Saw를 사용하여 가공하였으며 시험에 사용된 재료 만능시험기는 Shimadzu社의 AG-X Plus 모델을 사용하였고 120Ω, Gage Length 5mm의 스트레인 게이지를 부착하여 진행하였다.

2.3 프레임 제조 및 시험방법

본 연구에서 주안점으로 보고 있는 자전거 프레임의 Top Tube, Seat Tube, Down Tube의 경우 탄소 복합재 시험편에 사용된 탄소 프리프레그를 동일하게 사용하였으며 프리프레그를 맨드릴 몰드 위에 롤링하는 방식인 맨드릴 롤링 공법으로 제작하였으며 각 부위의 위치와 파이프 내경, 외경 그리고 파이프 벽 두께는 Fig. 4와 Table 4에 나타났다.

맨드릴 공법을 적용한 파이프제작 순서는 재단-롤링-탭핑-경화-맨드릴 탈심-샌딩 공정으로 진행되었으며 파이프 경화 조건은 오븐에서 130°C, 50min 경화조건으로 진행되었다.

Fig. 5의 경우 파이프의 제작과정을 나타내며 Table 5, Table 6의 경우 각 파이프의 적층패턴에 대한 정보를 나타냈다. 제작된 파이프는 Geometry에 맞게 길이를 컷팅 하였으며 각각의 파이프에 대한 중량을 측정하여 이를 Table 7에 나타냈다.

사용된 탄소섬유 프리프레그 소재의 편차, 성형 과정에서 수지 빠짐, 샌딩 과정 등에 따라 중량이 다소 차이가 발생되었지만 이는 최대 9g으로 결과 반영에 미미한 수준으로 판단하였다.

Table 4 Numerical information each pipe

Name	Internal Diameter (mm)	External Diameter (mm)	Wall Thickness (mm)
Top Tube	27.2	30	1.4
Seat Tube	27.2	30	1.4
Down Tube	26.6	31	2.2

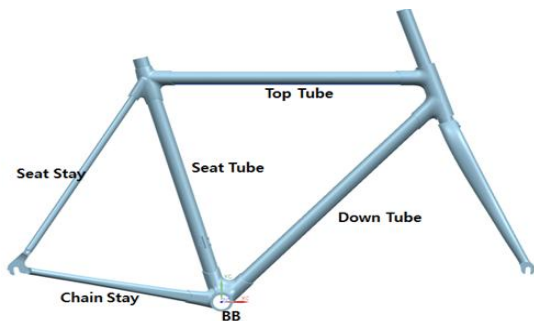


Fig. 4 Location information of each pipe

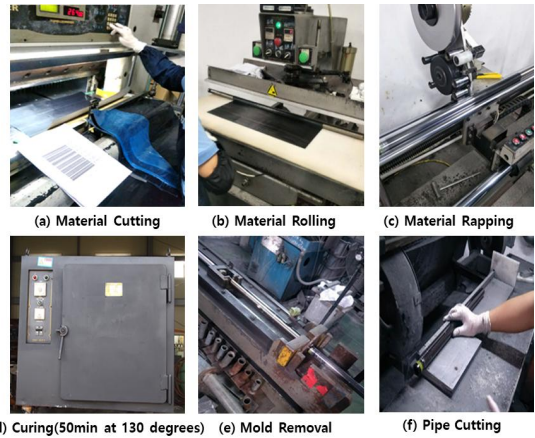


Fig. 5 Frame pipe manufacturing process

Table 5 Stacking sequence of top tube, seat tube

Pipe Name		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Top & Seat Tube Pipe (0°)	Fiber Direction Angle	0°	0°	0°	0°	0°
	Stacking Number	4 plies	4 plies	4 plies	4 plies	4 plies
Top & Seat Tube Pipe (30°)	Fiber Direction Angle	±30°	0°	±30°	0°	±30°
	Stacking Number	2 plies	4 plies	2 plies	4 plies	2 plies
Top & Seat Tube Pipe (45°)	Fiber Direction Angle	±45°	0°	±45°	0°	±45°
	Stacking Number	2 plies	4 plies	2 plies	4 plies	2 plies
Top & Seat Tube Pipe (90°)	Fiber Direction Angle	90°	0°	90°	0°	90°
	Stacking Number	4 plies	4 plies	4 plies	4 plies	4 plies

Table 6 Stacking sequence of down tube

Pipe Name		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
Down Tube Pipe (0°)	Fiber Direction Angle	0°	0°	0°	0°	0°
	Stacking Number	6 plies	6 plies	6 plies	6 plies	4 plies
Down Tube Pipe (30°)	Fiber Direction Angle	±30°	0°	±30°	0°	±30°
	Stacking Number	3 plies	6 plies	3 plies	6 plies	2 plies
Down Tube Pipe (45°)	Fiber Direction Angle	±45°	0°	±45°	0°	±45°
	Stacking Number	3 plies	6 plies	3 plies	6 plies	2 plies
Down Tube Pipe (90°)	Fiber Direction Angle	90°	0°	90°	0°	90°
	Stacking Number	6 plies	6 plies	6 plies	6 plies	4 plies

Table 7 Pipe length and weight

Division	Pipe Length (mm)	Pipe Weigh(g)			
		0°	30°	45°	90°
Down Tube	549	147	143	145	142
Seat Tube	514	98	95	97	96
Top Tube	493	95	93	94	92
Total Weight(g)		340	331	336	338

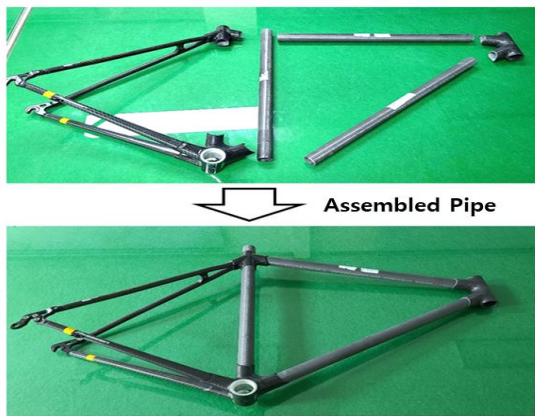


Fig. 6 Assembled frame

BB Stiffness와 Torsional Stiffness를 측정하기 위하여 Fig. 6와 같이 후삼각 부분이 결합된 부품에 Top Tube, Seat Tube, Down Tube를 Lug 형태로 조립하였다.

실험 측정은 파이프의 적층 패턴별 강성을 측정하고 기록하였으며 독일 EFB社의 BB Stiffness Measurement, Torsional Stiffness Measurement를 적용하였다. BB Stiffness 측정기준은 Fig. 7(a)와 같이 Rear hanger부분과 Head Tube부분을 고정된 상태에서 Fig. 7(b)와 같이 BB 중심에서 150mm 떨어진 위치에 80kg의 추를 올렸을 때의 프레임 변위량을 측정하는 방식으로 프레임의 기울기는 67도이다.

Torsional Stiffness 측정방식의 경우 Fig. 8(a)와 같이 BB와 Seat Tube 부분을 고정된 상태에서 Fig. 8(b)와 같이 Head Tube 중심에 지지대를 고정하고 지지대 중심에서 250mm 떨어진 지점에 30kg의 추를 올려놓은 상태에서 변위량을 측정하는 방식으로 진행하였으며 각각의 측정은 프레임별 5회 실시하였다.

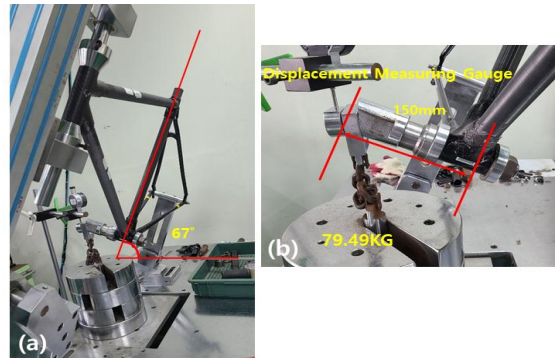


Fig. 7 Method of BB stiffness measurement

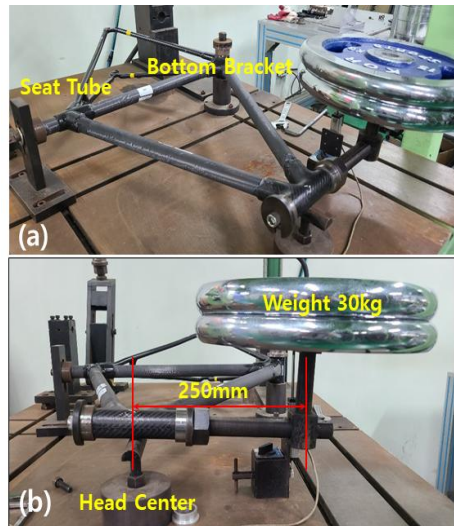


Fig. 8 Method of torsional stiffness measurement

3. 시험결과 및 고찰

3.1 탄소복합재 시험편 결과

탄소복합재의 기계 물성 시험결과 강도와 Modulus 값이 0도로 제조된 시험편에서 현저히 높은 값을 나타냈으며 인장의 경우 Fig. 9, 10, 압축의 경우 Fig. 11, 굴곡의 경우 Fig. 12에 나타냈다. 이러한 결과는 향후 유한요소해석을 위한 사전거 프레임의 ISO 4210규격에 의한 BB Pedaling loading Fatigue Test(내구성특성평가)를 위한 Law 데이터로 활용 가능할 것으로 판단하였다.

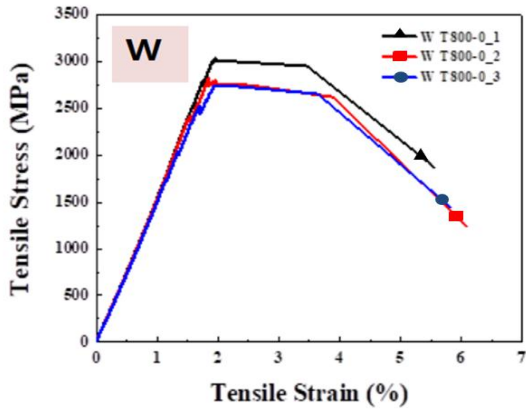


Fig. 9 Tensile strength curve of 0° specimen

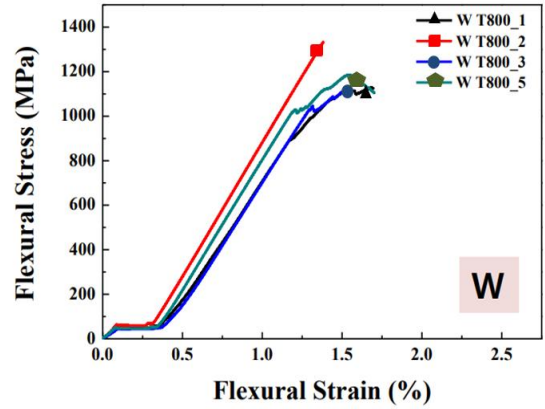


Fig. 12 Flexural strength curve of 0°

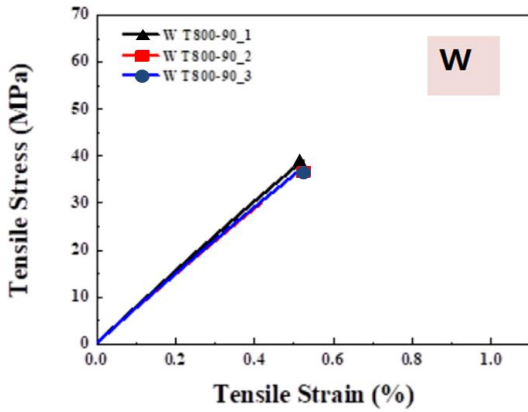


Fig. 10 Tensile strength curve of 90° specimen

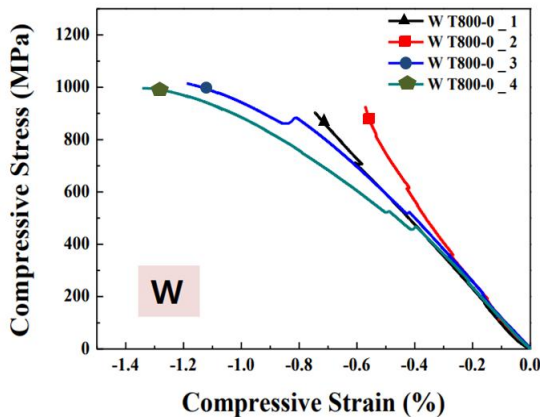


Fig. 11 Compressive strength curve of 0°

Table 8 Results of mechanical strength test

Division	Unit (MPa)	Measurement Value
Tensile(0°)	Tensile Strength	3007.58
	Tensile Modulus	150.60
Tensile(90°)	Tensile Strength	36.52
	Tensile Modulus	7.32
Compress(0°)	Compression Strength	1052.00
	Compression Modulus	136.97
Compress(90°)	CompressionStrength	150.46
	Compression Modulus	7.78
Flexural(0°)	Flexural Stress	1209.93
	Flexural Modulus	114.30

3.2 파이프 패턴별 프레임 강성측정 결과

프레임을 구성하는 주요 부위 Top Tube, Seat Tube 그리고 Down Tube의 소재적층 각도에 따른 프레임 BB Stiffness와 Torsional Stiffness의 결과는 각각 아래의 식(1), (2)를 적용하여 도출하였다.

$$K_B = \frac{79.49 \times 9.81}{\delta_B} \quad (1)$$

δ_B Measured load displacement

K_B Stiffness coefficient

$$K_T = \frac{4.88 \times 9.81}{\delta_T} \quad (2)$$

δ_T Measured load displacement

K_T Torsion rigidity coefficient

위 식(1)은 BB 페달링 강성 계산식이며, 식(2)는 비틀림 강성을 측정하는 식이다^[10]. Table 9 ~ Table 12는 각각 앞서 측정한 적응 패턴별 변위 데이터 결과값이며 Table 13, Table 14는 식 (1), (2)를 적용한 각각의 강성값을 나타내고 있다.

시험 결과, BB Stiffness는 $\pm 45/0/\pm 45/0/\pm 45 < 0/0/0/0/0 < \pm 30/0/\pm 30/0/\pm 30 < 90/0/90/0/90$ 의 순서로 BB 강성이 강하게 측정되었으며, 가장 낮은 수치를 나타내는 ± 45 도 패턴을 기준으로 각각 12.13%, 26.13%, 37.14%씩 증가되었다.

Torsional Stiffness의 시험결과는 $90/0/90/0/90 < \pm 30/0/\pm 30/0/\pm 30 < 0/0/0/0/0 < \pm 45/0/\pm 45/0/\pm 45$ 의 순서로 Head 비틀림 강성이 강하게 측정되었으며, 가장 낮은 수치를 나타내는 90도 패턴을 기준으로 각각 6.29%, 17.98%, 126.5%씩 각각 증가되었다.

Table 9 BB stiffness and torsional stiffness for 0° pipe

Stacking Sequence	Frame Weight (g)	No.	BB Measured Value (mm)	Head Measured Value (mm)
0/0/0/0/0	970	1	11.60	9.11
		2	11.68	9.22
		3	11.53	9.00
		4	11.78	9.02
		5	11.58	9.24
		AV	11.62	9.12

Table 10 BB stiffness and torsional stiffness for 30° pipe

Stacking Sequence	Frame Weight (g)	No.	BB Measured Value (mm)	Head Measured Value (mm)
$\pm 30/0/\pm 30/0/\pm 30$	962	1	10.00	10.36
		2	9.98	9.81
		3	10.09	9.90
		4	10.10	10.14
		5	10.43	10.49
		AV	10.33	10.13

Table 11 BB stiffness and torsional stiffness for 45° pipe

Stacking Sequence	Frame Weight (g)	No.	BB Measured Value (mm)	Head Measured Value (mm)
$\pm 45/0/\pm 45/0/\pm 45$	959	1	13.07	4.74
		2	13.02	4.75
		3	13.17	4.79
		4	13.00	4.75
		5	12.81	4.97
		AV	13.03	4.76

Table 12 BB stiffness and torsional stiffness for 90° pipe

Stacking Sequence	Frame Weight (g)	No.	BB Measured Value (mm)	Head Measured Value (mm)
90/0/90/0/90	954	1	9.56	10.70
		2	9.39	10.75
		3	9.74	10.71
		4	9.36	10.81
		5	9.55	11.00
		AV	9.50	10.75

Table 13 BB stiffness to pipe stacking sequence

Stacking Sequence	Frame Weight (g)	BB Measured Average Value (mm)	BB Stiffness (N/mm)
0/0/0/0/0	970	11.62	67.11
$\pm 30/0/\pm 30/0/\pm 30$	962	10.33	75.49
$\pm 45/0/\pm 45/0/\pm 45$	959	13.03	59.85
90/0/90/0/90	954	9.5	82.08

Table 14 Torsional stiffness to pipe stacking sequence

Stacking Sequence	Frame Weight (g)	Head Measured Average Value (mm)	Torsional Stiffness (N/mm)
0/0/0/0/0	970	9.12	5.25
$\pm 30/0/\pm 30/0/\pm 30$	962	10.13	4.73
$\pm 45/0/\pm 45/0/\pm 45$	959	4.76	10.06
90/0/90/0/90	954	10.75	4.45

4. 결론

본 연구는 일방향 탄소 프리프레그를 사용하여 제작되어지는 자전거 프레임의 적응순서와 적응각도에

다른 프레임의 BB stiffness와 Torsional Stiffness의 변화에 대한 연구를 진행하였다. 프레임 제작 시 효율적으로 강성을 높이기 위한 방향을 제시하기 위한 연구로서 자전거 프레임의 BB stiffness와 Torsional stiffness는 프레임의 안전성과 선수의 경기력에 영향을 중요한 물성값이다.

본 연구는 프레임 파이프에 사용되어지는 소재의 중량을 동일하게 사용하고 적층순서를 0/0/0/0, ±30/0/±30/0/±30, ±45/0/±45/0/±45, 90/0/90/0/90 4가지 종류로 구분하여 각각의 파이프를 제작하여 프레임을 구성하고 있는 부품인 Head Lug, BB Lug, Seat Lug에 Top Tube, Seat Tube 그리고 Down Tube를 결합하여 프레임을 제작하여 동일 조건으로 결과값을 측정하였다.

BB stiffness 측정 결과 ±45/0/±45/0/±45 구성된 파이프의 프레임 가장 약하게 측정되었으며, 강성이 가장 강하게 측정된 프레임은 90/0/90/0/90로 패턴의 파이프로 제작된 프레임이며, ±45도 대비 약 37.14% 향상된 강성을 나타내었다.

Torsional Stiffness 측정결과는 90/0/90/0/90 패턴으로 제작된 파이프의 프레임이 약하게 측정되었으며 ±45/0/±45/0/±45 패턴으로 제작된 파이프의 프레임에서 가장 강하게 측정되었으며, 90도 방향대비 약 126.5% 향상된 강성을 보여주었다.

이러한 패턴에 따른 자전거 프레임의 정확한 강도 및 강성의 수치화를 통해 향후 프레임 제작 및 실용화에 대한 데이터베이스로 활용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

“본 연구는 정부의 재원으로 2016년도 한국연구재단(No. 2016R1A6A1A03012069)의 지원을 받아 수행된 결과임.”

REFERENCES

- Han, S. G., Chun, S. Y., Kang, S. K., “Durability Design of the Thickness of Bicycle Frames”, The Korean Society of Manufacturing Process Engineering, Vol. 14, No. 6, pp. 84-89, 2015.
- Yun, S. H., “An Observation of the Application of a Magnetic Force to the Bicycle Cushion System and its Nonlinearity”, The Korean Society of Manufacturing Process Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 42-47, 2018.
- Cho, J. U., Han M. S., “Vibration Analysis at Bike Frame Fork”, The Korean Society of Manufacturing Process Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 8-15, 2014.
- Cho, J. U., Han M. S., “Structural Durability Analysis According to the Thickness of Bicycle Frame Tube”, The Korean Society of Manufacturing Process Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 122-129, 2012.
- Zhang, J., Chaisombat, K., He, S., Wang, C. H., “Hybrid Composite Laminates Reinforced with Glass/Carbon Woven Fabrics for Lightweight Load Bearing Structures”, Materials & Design, Vol. 36, pp. 75-80, 2012.
- Thwe, M. M., Liao, K., “Durability of Bamboo-Glass Fiber Reinforced Polymer Matrix Hybrid Composites”, Composites Science and Technology, Vol. 63, Issues. 3-4, pp. 375-387, 2003.
- Velmurugan, R., Manikandan, V., “Mechanical Properties of Palmyra/Glass Fiber Hybrid Composites”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, Issue 10, pp. 2216-2226, 2007.
- Mishra S., Mohanty, A. K., Drzal, L. T., Misra, M., Parija, S., Nayak, S. K., Tripathy, S. S., “Studies on Mechanical Performance of Biofibre/Glass Reinforced Polyester Hybrid Composites”, Composites Science and Technology, Vol. 63, Issue 10, pp. 1377-1385, 2003.
- Kim, J., “A Simple Method to Produce Fiber Metal Laminates with Enhanced Mechanical Properties Using An Ethylene Vinyl Acetate (EVA)-Based Adhesive Film”, Vol. 43, No. 2, pp. 295-301, 2019.
- Kwon, K. B., Cheong, S. K., “Measurement and Analysis of the Torsional and the Bottom Bracket Stiffness of a Bicycle Frame”, Journal of the Korea Society Mechanical Technology, Vol. 19, No. 3. pp. 433-436, 2017.