

자전거 프레임용 CFRP 파이프 설계제작

이범성*

Design and Manufacture of CFRP Pipe for Bicycle Frame

Bum Sung Lee[#]

ABSTRACT

The pipe of CFRP for bicycle frame is designed and made for light weight of bicycle and then its suitability to bicycle frame is verified by comparing the other material i.e. steel, Cr-Mo steel, Al alloy pipe for bicycle frame. The pipe of CFRP is laminated to $[0/\pm 45]_T$ and made by tape winding method and then its degree of light weight is evaluated by comparing the other pipes which is made by steel etc.

Key Words : CFRP(탄소섬유강화플라스틱), bicycle(자전거), Carbon fiber(탄소섬유), pipe(파이프), frame(차체)

기호설명

- E_f : longitudinal modulus of elasticity in longitudinal direction of fiber
 E_m : longitudinal modulus of elasticity of matrix
 V_f : volumetric content rate of fiber
 $E(\theta_1)$: longitudinal modulus elasticity in the case of the fiber direction to axial direction of pipe is θ_1
 $E(\theta_2)$: longitudinal modulus elasticity in the case of the fiber direction to axial direction of pipe is θ_2

1. 서론

최근 자전거가 레저, 스포츠용으로 각광받게 됨에 따라 자전거의 중량이 자전거의 가격과 품질을 좌우하는 중요한 인자가 되고 있다.

따라서 자전거의 중량을 줄이기 위한 방법으로 자전거 프레임의 소재를 최초의 탄소강에서 고장력강, Cr-Mo강, 알루미늄합금, 티타늄 등으로 변화하는 추세에 있다.

본 연구에서는 자전거의 경량화를 위한 하나의 방법으로 자전거 프레임용 CFRP 파이프를 설계, 제작하고 그 적용가능성을 검토하고자 한다.

자전거의 경우에는 주행 시에 답력(踏力)과 추력(推力)외에 노면상태에 따른 충격과 진동을 받게 된다.

따라서 이와 같은 외력에 의하여 프레임이 변형되지 않고, 주행 안전성을 유지하기 위해서는 부재의 강성(剛性)이 어느 정도 이상 크지 않으면 안 된다.

* 2002년 8월 2일 접수
교신저자, 경기공업대학 정밀제작과
Email : bslee@kinst.ac.kr, Tel : (031) 496-4709

자전거 차체는 몇 개의 부재와 절점으로 이루어진 라멘(Rahmen)구조로 볼 수 있다. 이러한 라멘구조는 트러스 구조물과는 달리 그 절점이 고정되어 있기 때문에 한 부재로부터 다른 부재로 축력은 물론이고 굽힘모멘트 및 전단력 등을 전달시킬 수 있다.

따라서 축력과 굽힘모멘트 및 전단력을 고려한 설계가 이루어져야 한다.

또한 CFRP는 철강재료에 비하여 강도는 우수하나 강성이 작은 것이 문제이다.

그러나 강성이 어느정도이상 커야 하는지에 대한 명백한 근거 자료가 없다. 따라서 본 연구에서는 CFRP 파이프의 인장강성을 현재 자전거 프레임용 소재로 많이 사용되고 있는 보통강재(STKM) 파이프와 같은 수준으로 설정하여 설계하였다.

2. 프레임용 파이프 설계

2.1 파이프의 두께

한 겹(ply)의 섬유에 있어서 섬유방향이 축선과 일치되어 있을 때, 즉 Fig. 1에서 $\theta=0^\circ$ 일 때 축선 방향의 인장탄성계수 $E(0^\circ)$ 은 영률에 관한 복합법칙1에 의하여 다음 식(1)으로 된다.

$$E(0^\circ) = E_f V_f + E_m(1 - V_f) \quad (1)$$

가 된다.

또한 필라멘트 와인딩 파이프에서 한 겹의 섬유방향이 축선에 대하여 각 $\theta=45^\circ$ 로 기울어져 있을 때 축 방향의 인장탄성계수 $E(45^\circ)$ 는 다음 식으로 된다.2

$$\frac{1}{E(45^\circ)} = \frac{1}{E_{x0}} - \chi_0^2 G_{x0} \quad (2)$$

식에서 x는 원통의 축선을 표시하며, 0는 각 층을 1매의 직교이방성 판으로 보았을 때 x축 방향의 탄성계수이고, E_{x0} , χ_0 , G_{x0} 는 각각 다음과 같다.

$$\frac{1}{E_{x0}} = \frac{\cos^4 \theta}{E_L} + \frac{\sin^4 \theta}{E_T} + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_L}{E_L} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (3)$$

$$\chi_0 = \left[\frac{\sin^2 \theta}{E_T} - \frac{\cos^2 \theta}{E_L} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_L}{E_L} \right) \cos 2\theta \right] \sin 2\theta \quad (4)$$

$$\frac{1}{G_{x0}} = \left(\frac{1+\nu_L}{E_L} + \frac{1+\nu_T}{E_T} \right) \sin^2 2\theta + \frac{1}{G_{LT}} \cos^2 2\theta \quad (5)$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{1.36(K_f - K_m)}{(K_f - K_m)^2 - (\nu_f K_f - \nu_m K_m)^2} + \frac{1 - 1.05\sqrt{V_f}}{E_m} \quad (6)$$

$$\nu_L = \frac{1.05\sqrt{V_f}(\nu_f - \nu_m)K_f}{K_f - K_m} + \nu_m \quad (7)$$

$$\nu_T = \nu_L \frac{E_T}{E_L} \quad (8)$$

$$K_f = \frac{E_f}{1 - \nu_f^2} \quad (9)$$

$$K_m = \frac{E_m}{1 - \nu_m^2} \quad (10)$$

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1.36}{G_f - G_m} + \frac{1 - 1.05\sqrt{V_f}}{G_m} \quad (11)$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} \quad (12)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (13)$$

식(1)~(13)에 각 재료상수를 대입하면

$$E(0^\circ) = 15,231 \text{ kgf/mm}^2$$

$$E(45^\circ) = 2,415 \text{ kgf/mm}^2$$

를 얻을 수 있다.

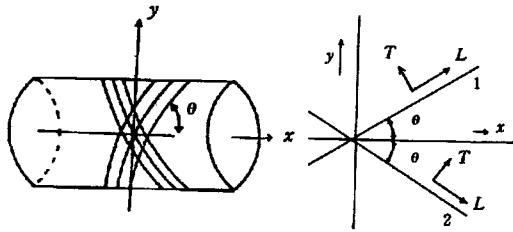


Fig. 1 winding direction of fiber

또한 외층, 내층의 각도를 각각 $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = \pm 45^\circ$ 로 한 적층 파이프의 인장강성 $E_C A_C$ 은 다음 식과 같이 된다.³

$$E_C A_C = E(\theta_1) \times A_1 + E(\theta_2) \times A_2$$

$$= E(0^\circ) \times A_1 + E(45^\circ) \times A_2$$

$$= 15,231 \times \frac{\pi}{4} (d^2 - d_1^2) +$$

$$2,415 \times \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)$$

$$= 11,956(d^2 - d_1^2) + 1,895(d_1^2 - d_2^2) \quad (14)$$

한편 외경 $d_o = 28.6 \text{ mm}$, 내경 $d_i = 27 \text{ mm}$ 인 강재 자전거 차체용 파이프에 있어서의 인장강성 $E_S A_S$ 는 다음과 같이 된다.

$$E_S A_S = E_S \times \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2)$$

$$= 21,000 \times \frac{\pi}{4} (28.6^2 - 27^2) \quad (15)$$

$$= 1,467,165 \text{ kgf}$$

따라서 CFRP 파이프의 인장강성을 강재 파이프와 같은 수준으로 하기 위하여 CFRP재 파이프와 강재 파이프의 인장강성을 같도록 하면(즉 식

(14)=식(15)) 다음 식을 얻는다.

$$11,956(d^4 - d_1^4) + 1,895(d_1^4 - d_2^4)$$

$$= 1,467,165 \quad (16)$$

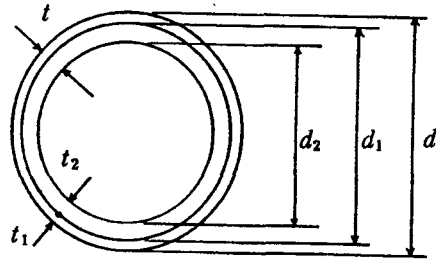


Fig. 2 section of pipe

또한 축선에 대하여 섬유방향이 0° 인 층과 45° 방향인 층의 두께를 같도록(Fig. 2에서 $t_1 = t_2 = \frac{t}{2}$) 하고, CFRP 재 파이프의 외경을 강재 프레임용 파이프의 외경과 같이 $d = 28.6 \text{ mm}$ 로 하면 식(16)은 다음과 같이 간단하게 된다.

$$t^2 - 50.3t + 93.2 = 0 \quad (17)$$

이식으로부터 $t = 1.95 \approx 2 \text{ mm}$ 를 얻을 수 있다.

따라서 이와 같은 결과로부터 CFRP재 파이프의 총 두께 $t = 2 \text{ mm}$ 로 하고, 축선이 0° 방향인 층의 두께 $t_1 = 1 \text{ mm}$, 축선과 45° 방향인 층의 두께 $t_2 = 1 \text{ mm}$ 로 하였다.

이때 다음 식(18)로부터 평균 종탄성계수 E_{av} 를 구하면

$$E_{av} = 9,054 \text{ kgf/mm}^2$$

가 된다.

$$E_{av} A = E(0^\circ) A_1 + E(45^\circ) A_2 \quad (18)$$

2.2 횡탄성계수

섬유방향이 축선과 일치할 때 ($\theta=0^\circ$)의 횡탄성계수 $G(0^\circ) = G_{LT}$ 는 앞에서의 식(11)에서 다음과 같이 된다.

$$G(0^\circ) = G_{LT} = 601 \text{ kgf/mm}^2$$

또한 섬유방향이 축선에 대하여 각 θ 를 이룰 때 횡탄성계수 $G_{xy}(\theta)$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{1}{G_{xy}(\theta)} = \frac{1}{G_{xy0}} - \frac{x_0(x_0 + \psi_0 \nu_{x0})}{1 - \nu_{x0} \nu_{y0}} \times E_{x0} - \frac{\psi_0(\psi_0 + x_0 \nu_{x0})}{1 - \nu_{x0} \nu_{y0}} E_{y0} \quad (19)$$

여기서

$$\psi_0 = \left[\frac{\cos^2 \theta}{E_T} - \frac{\sin^2 \theta}{E_L} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_{x0}}{E_L} \right) \cos 2\theta \right] \sin 2\theta \quad (20)$$

$$\frac{\nu_{x0}}{E_{x0}} = \frac{\nu_{y0}}{E_{y0}} = \frac{\nu_{x0}}{E_L} (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} \right) \cdot \frac{\sin^2 2\theta}{4} \quad (21)$$

$$\frac{1}{E_{y0}} = \frac{\sin^4 \theta}{E_L} + \frac{\cos^4 \theta}{E_T} + \left(\frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_{x0}}{E_L} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (22)$$

식(19)~(22)에 $\theta=45^\circ$ 및 각 재료상수를 대입하면 다음과 같이 횡탄성계수 $G_{xy}(45^\circ)$ 를 얻을 수 있다.

$$G_{xy}(45^\circ) = 3,534 \text{ kgf/mm}^2$$

따라서 CFRP 파이프의 총두께 $t=2\text{mm}$ 로 하고, 섬유방향이 축선과 0° 방향인 층의 두께

$t_1=1\text{mm}$, 45° 방향인 층의 두께 $t_2=1\text{mm}$ 로 했을 때 식 (23)으로부터 다음과 같이 횡탄성계수 G 를 얻을 수 있다.⁴

$$G = 2,067 \text{ kgf/mm}^2$$

$$GI_P = \left[\frac{t_1}{t} G(0^\circ) + \frac{t_2}{t} G_{xy}(45^\circ) \right] I_P \quad (23)$$

본 연구에 사용된 탄소섬유 및 매트릭스로 사용한 Epoxy 수지의 재료상수는 표 1과 같다.

Table 1 Material constants of carbon fiber & Epoxy resin

	탄소섬유 (f)	Epoxy 수지 (m)
인장강도 (kgf/mm ²)	300	7
탄성계수 E (kgf/mm ²)	24,000	300
프와송비 ν	0.30	0.36
비 중	1.63	1.20
체적함유율 V_f	0.63	

3. CFRP 파이프 제작

본 연구에서는 Tape Winding 공법을 사용하여 자전거 프레임용 CFRP 파이프를 제조하였으며, Prepreg의 1 ply 두께는 0.24 mm 이므로, 설계에서 나온 파이프의 총 두께 2mm에 맞추기 위하여 외부로부터 1mm까지는 0° 로 4 ply 적층하고, 그로부터 내부까지 1 mm는 $\pm 45^\circ$ 방향으로 4 ply 적층하도록 하여 총 8 ply[0/±45]가 되도록 하였다.

따라서 Prepreg를 0° 및 $\pm 45^\circ$ 로 절단하고 맨 드릴에 1 ply 씩 적층시키면서 감아 외경이 $\phi 28.6$ 인 파이프 형태로 만든 다음, 열처리 노에 넣고 Fig. 3과 같은 단계로 경화 시켰다.

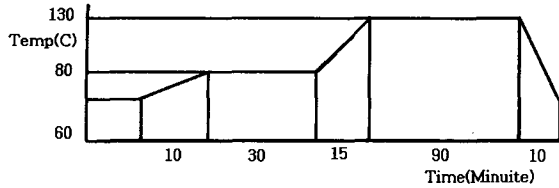


Fig. 3 hardening time and temperature

4. 시험결과 및 고찰

자전거의 주행안전성을 위하여 자전거 차체와 같은 구조물에서 요구되는 소재의 특성은 강도와 강성이다.

또한 개발된 소재가 타 소재에 비하여 얼마만큼의 경량화를 달성했는가를 평가하기 위한 지표로 비강도 및 비강성 등이 사용되고 있다.

따라서 본 연구에서 개발된 CFRP 파이프를 현재 자전거 차체용 소재로 많이 사용되고 있는 재료인 기계구조용 탄소강재(STKM11A) 파이프 및 Cr-Mo강 파이프(SCM430 TK), Al합금 파이프(A6061) 등과 강도 및 강성, 비강도와 비강성등을 비교분석 하기로 한다.

4.1 강도

인장시험은 Instron사의 용량25t 짜리 UTM을 사용하여 실시하였으며, 파이프 소재를 500mm로 절단한 것을 인장시험편으로 하고, 시험편의 중앙 표면에 축선에 대하여 0°/90°방향으로 스트레인 게이지를 부착하여 스트레인을 측정하고 이로부터 탄성계수를 구하였다.

또한 인장시험시 그립(grip)부에서의 압축에 의한 파손 및 변형을 방지하기 위하여 파이프의 양단 구멍에 길이 100mm 정도의 강봉을 끼워 시험하였으며 그 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 보는바와 같이 CFRP 파이프의 인장강도는 80 kgf/mm^2 로, 현재 자전거 차체용 소재로 가장 많이 사용되고 있는 재료인 보통강재 파이프(STKM11A)보다 2배 가까이 크며, Cr-Mo(SCM430 TK)강 파이프와 거의 대등한 수준이라는 것을 알 수 있다.

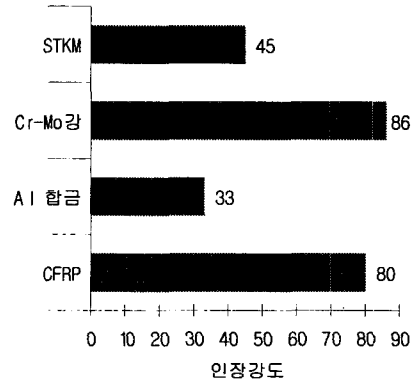


Fig. 4 Strength of various material being used bicycle frame

또한 비중량에 대한 강도의 비인 비강도(比強度)의 경우에는 Fig. 5와 같이 알루미늄합금의 4배 이상이 되었다.

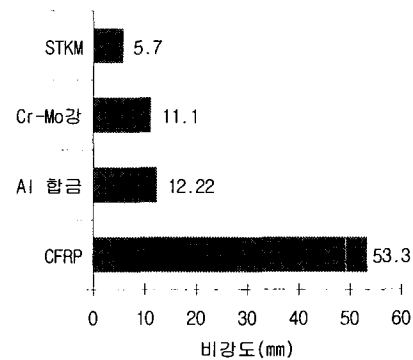


Fig. 5 Specific strength of various material ($\times 10^6 \text{ mm}$)

4.2 강성

4.2.1 인장 및 굽힘강성

인장 및 굽힘강성을 구하기 위한 탄성계수 E값은 4.1의 강도 측정시 구한 응력과 변형율의 관계로부터 구하였으며 그 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 보는바와 같이 CFRP 파이프의 종탄성 계수는 $7,200 \text{ kgf/mm}^2$ 로, 이론치인 $9,054 \text{ kgf/mm}^2$ 의 80% 정도이었다. 이는 현재 자전

거 차체의 경량화 소재로 많이 사용되고 있는 재료인 Al합금(A6061)과 거의 같은 수준의 것으로 보통강재나 Cr-Mo의 1/3정도에 지나지 않는 것으로 나타났다.

이 설계목표치인 보통강재(STKM) 파이프의 강성과 18% 정도의 오차를 나타내고 있는 것을 볼 수 있는데, 이와 같이 이론적인 계산치와 제품간의 차이는 이론식의 부정확성 또는 제조상의 품질불균형에 의한 것으로 생각된다.

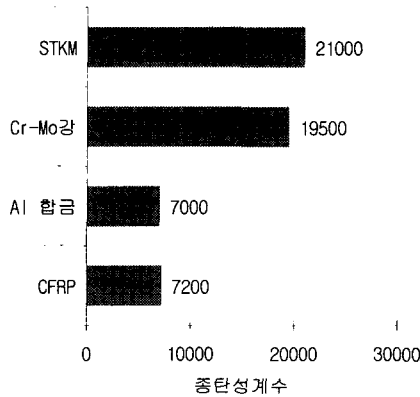


Fig. 6 Longitudinal elastic modulus(kgf/mm²)

그러나 중량대비 종탄성계수인 비종탄성계수는 Fig. 7과 같이 CFRP 파이프가 Al 합금소재의 두 배에 달하였다.

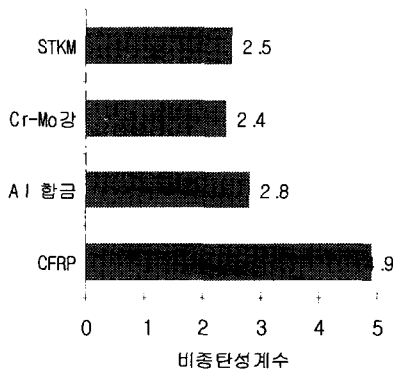


Fig. 7 Specific longitudinal elastic modulus (× 10⁹ mm)

이와 같은 탄성계수를 기초로 하여 여러 가지 소재파이프에 대하여 인장강성(AI)을 산출해본 결과는 Fig. 8과 같다.

그림에서 보는바와 같이 CFRP 파이프의 강성

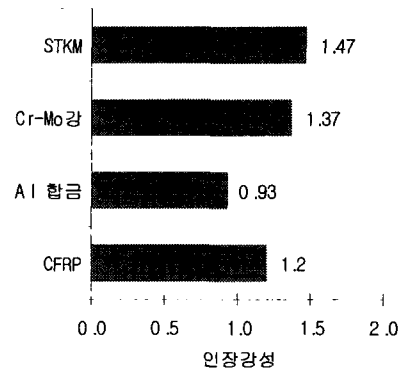


Fig. 8 longitudinal rigidity (kgf)

또한 인장시험으로부터 구한 종탄성계수 E를 이용하여 굽힘강성 EI를 구한 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9에서 보는바와 같이 CFRP 파이프의 강성이 보통강재(STKM) 파이프의 강성에 76% 정도 되었으나, Al 파이프나 Cr-Mo 소재 파이프 보다는 큰 것으로 나타났다.

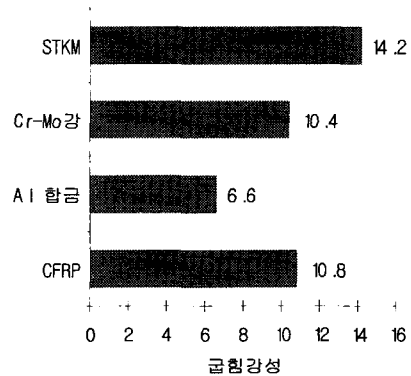


Fig. 9 Bending rigidity of various material (× 10⁹ kgf · mm²)

2.2 비틀림 강성

비틀림 시험을 하기 위한 시험편은 인장시험에

서와 같이 파이프 소재를 길이 500mm로 절단한 것으로 하였다.

Fig. 10과 같이 시험편에 스트레인 게이지를 부착하고 이로부터 300mm 떨어진 지점에서 인장시험시 사용했던 UTM의 비틀림 시험용 부속장치를 사용하여 Torque를 가하였으며, 그 시험결과는 Fig. 11과 같다.

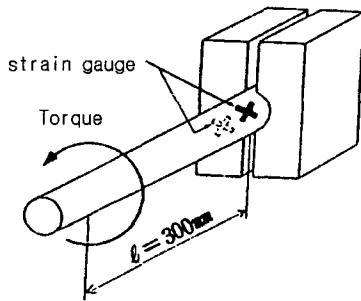


Fig. 10 Twisting test

Fig.11에서 보는바와 같이 제조된 CFRP 파이프의 전단탄성계수 $G=1,900 \text{ kgf/mm}^2$ 로 이론적인 계산치 인 $2,067 \text{ kgf/mm}^2$ 에 근접하나 자전거 프레임 소재 중 가장 작은 것으로 나타났다.

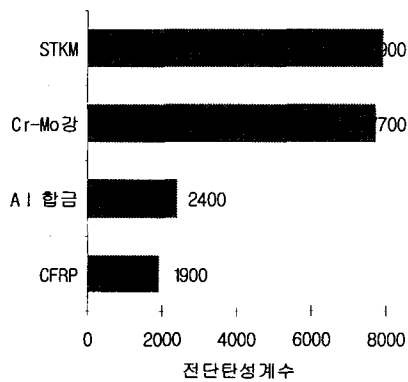


Fig. 11 lateral elastic modulus of various material

그러나 이와 같은 전단탄성계수를 기초로 하여 각종재료에 대한 비틀림강성(GIp)을 조사해본 결과 Fig. 12에서와 같이 CFRP 파이프의 비틀림강성은 알루미늄 합금 파이프 보다 큰 것으로 나타났다.

4.2.3 중량

CFRP 파이프가 여타 자전거 프레임용으로 사용되고 있는 각종 소재의 파이프에 대하여 얼마만큼의 경량화 효과를 주었는가를 보기 위하여 길이1m당의 파이프 중량을 조사한 결과, Table 2와 같은 결과가 나왔다.

Table 2에서 보는바와 같이 CFRP 소재 파이프의 중량이 251gr로 보통강재의 45 %, Al 합금소재의 70%에 지나지 않는다는 것을 알 수 있다.

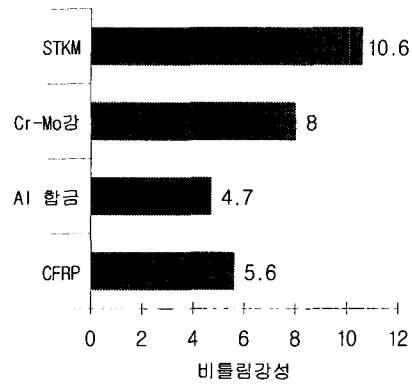


Fig. 12 Twisting rigidity of various material being used bicycle frame ($\times 10^8 \text{ kgf} \cdot \text{mm}^2$)

Table 2 Weight of various material being used bicycle frame

재 질	외 경 (mm)	내 경 (mm)	비 중	중 량 (g/m)
STKM	28.6	27.0	7.85	548
Cr-Mo강	25.4	23.6	7.77	538
Al합금	25.4	21.8	2.75	362
CFRP	28.6	24.6	1.49	251

5. 결론

자전거차체의 경량화를 위하여 인장강성을 기초로 자전거 프레임용 파이프를 설계, 제작해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제작한 자전거 프레임용 CFRP 파이프의 인장강성이 이론설계치 보다 18%정도 작게 나왔다. 이와같은 이론적인 계산치와 제품 간의 차이는 이론식의 부정확성과 제조상의 품질 불균형 등에 의한 것으로 사료된다.

(2) CFRP 파이프의 인장강도는 보통강재 파이프보다 2배 가까이 크므로 자전거 프레임으로 사용시 강도상 문제는 전혀 없는 것으로 나타났다.

(3) 굽힘강성의 경우 CFRP 파이프의 강성이 보통강재 파이프보다 24 % 정도 작았으나 AI 합금파이프나 Cr-Mo 소재보다는 크고, 비틀림 강성은 AI 합금 파이프 보다 20%정도 큰 것으로 나타났다. 따라서 CFRP 파이프의 굽힘강성과 비틀림강성이 최소한도 현재 자전거 프레임용으로 많이 사용되고 있는 AI 합금 파이프 보다는 크므로 자전거프레임용 파이프로 적당한 것으로 추정할 수 있다.

(4) 자전거 프레임용 파이프를 본 연구에서 개발된 CFRP 파이프로 대체하면 보통강재 파이프의 55%, AI 합금 파이프의 30% 정도 경량화를 이룰 수 있다.

참고문헌

1. 大蔵明光外 3人, 複合材料, 東京大學出版會, p. 44, 1984.
2. 社團法人 強化プラスチック 技術協會, FRP 技術便覽, p61,1979.
3. Mallick, P. K., Fiber-Reinforced composites, Marcel Dekker Inc. p. 187, 1988.
4. James M. Gere, Mechanics of Materials 5th edition, Brooks/Cole, p. 228, 2001.