

자전거 프레임의 소재 및 종류에 따른 피로특성

권경배 · 정성균*

서울과학기술대학교 에너지시스템공학과 · *서울과학기술대학교 기계자동차공학과
(2017. 8. 24. 접수 / 2017. 10. 10. 수정 / 2017. 10. 20. 채택)

Fatigue Characteristics of Bicycle Frames Depending on Types and Materials

Kyoung-Bae Kwon · Seong Kyun Cheong**

Department of Energy System Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology

*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology

(Received August 24, 2017 / Revised October 10, 2017 / Accepted October 20, 2017)

Abstract : Bicycles are very popular sporting goods in these days. Thus, the durability of bicycles is very important for the safety of bicyclists. It is well known that a bicycle frame is a major component which is essential to the safety and performance of a complete bicycle. In this study, the durability of bicycle frames were experimentally investigated under the fatigue load. Eighty bicycle frames with different types and materials were prepared and tested according to EN standards. Three kinds of fatigue loads, that is, pedalling, vertical and horizontal fatigue load, which occur constantly during riding a bicycle, were applied to the bicycle frames. The experimental results show that the horizontal fatigue load was the severest mode to pass EN standard. The pass ratio of horizontal fatigue load test was 45.2%, while the pass ratio of vertical fatigue load test was 100%. Most of cracks were found at the right side of bottom bracket shell and at the intersection area between head tube and down tube. It seems that the experimental results can be applied to improve the safety and performance of a bicycle frame.

Key Words : bicycle, durability, frame, horizontal fatigue load, pedaling fatigue load, safety, vertical fatigue load

1. 서론

골프와 함께 스포츠 용품시장에서 큰 비중을 차지하는 자전거 산업은 부품소재, 용품, 의류 및 신발 산업, 관광업 등 여러 산업과 관련이 깊으며 파급효과 또한 크다. 스포츠 용품 산업은 그 특성상 제품 수명주기가 비교적 짧으며, 첨단소재를 이용한 끊임없는 제품개발이 요구되고 있는 기술집약적 산업이다.¹⁾ 특히 높은 수준의 성능이 요구되는 레저용 자전거 제품의 경우에는 브랜드 인지도보다는 제품이 가지는 성능과 가격이 구매를 결정하는 가장 중요한 요소로 작용하고 있다. 연구결과에 의하면 자전거를 구입할 때 고려하는 사항 가운데 품질이 58.7%, 가격이 33.3%로 전체의 92.0%를 차지하고 있으며, 브랜드가 가장 중요하다는 응답은 6.7%에 불과했다²⁾.

자전거 성능을 결정하는 중요한 요소 중의 하나는

프레임 내구성이다³⁾. 자전거 프레임은 포크와 함께 자전거 구조의 70~80%를 차지하고 있으며⁴⁾, 페달링 하중, 수직 하중, 그리고 수평 하중이 저사이클 피로 (low-cycle fatigue)로 작용한다⁵⁾. 이와 같은 하중은 주행할 때마다 끊임없이 작용하는 외력으로, 이러한 외력에 저항하기 위하여 프레임은 적절한 강도를 유지하여야 한다⁶⁾. 특히 프레임의 내구성은 제품 및 사용자의 안전과 직결되는 요소로 제품 개발단계에서 우선적으로 고려되어야만 한다⁷⁾.

본 연구에서는 수직하중, 수평하중, 페달링 하중에 대한 자전거 프레임에 대하여 내구 시험을 수행하고, 프레임의 재질별, 종류별 특성을 분석하고자 한다. 본 연구의 결과를 토대로 피로하중에 취약한 부위를 파악하여 프레임의 구조해석과 설계에 활용한다면 자전거의 내구성을 높이고 파손을 방지하여 안전이 확보된 자전거 개발에 기여할 수 있을 것으로 본다.

* Corresponding Author : Seong-Kyun Cheong Tel : +82-2-970-6330, E-mail : skjung@seoultech.ac.kr

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongreung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

2. 자전거 프레임 내구성시험

2.1 시편, 시험규격 및 시험장비

시험에 사용된 프레임은 Table 1과 같이 자전거 용도에 따라 생활용(CITY), 산악용(MTB) 그리고 도로용(ROAD)으로 구분하였고, 재질별로는 알루미늄합금, 카본복합재, 마그네슘합금, 스틸과 티타늄합금으로 구분하였다. 생활용 23개, 산악용 41개, 도로용 16개 모두 80개 자전거 프레임에 대하여 EN 규격^{8,9,10)} 기준으로 프레임 내구성을 시험하였다. 시편은 개발단계에서 제작된 시제품 30개, 시중에서 판매되는 대중적인 제품 가운데 자전거 전문판매점과 자전거 동호회 운영자 추천으로 선정된 국내 브랜드 제품 34개와 국외 브랜드 제품 16개를 선정하였다. 또한 재질별로 선호도가 높은 제품을 위주로 선정하였으나, 티타늄합금과 카본복합재와 같은 고급 레저용 프레임의 경우 판매가격이 높아 시편 수를 충분히 확보하기 어려운 단점이 있다. 이는 연구의 제한점으로 향후 지속적인 후속 연구를 통하여 발전시켜야 할 부분이다.

Table 1. Frame specimens

	CITY	MTB	ROAD	Sum
Al	9	11		20
Carbon	2	1	4	8
Mg		24	1	25
Steel	12	1	11	24
Ti		4		4
Sum	23	41	16	80

Table 2. Test standards

	CITY	MTB	ROAD
Standard	EN 14764	EN 14766	EN 14781
Pedaling	1000 N (100,000)	1200 N (100,000)	1100 N (100,000)
Vertical	1000 N (50,000)	1200 N (50,000)	N/A
Horizontal	N/A	+1200/-600 N (50,000)	+600/-600 N (100,000)

본 연구에 사용한 프레임 내구성 시험장비는 독일 자전거 시험연구소 EFB에서 제작한 프레임 내구성 시험장비인 DYNFG/DYNA/DYNS를 사용하였다. 현재 자전거 프레임 내구성을 시험하는 방법은 EN 규격에서 규정하고 있다. Table 2는 자전거 종류별로 적용되는 표준과 하중조건을 나타낸다^{8,9,10)}.

2.2 페달링하중 내구시험

페달링 하중은 주행중 페달링으로 인해 발생하는 하중으로 페달과 크랭크 암을 통해 프레임에 전달된다. 좌측과 우측에서 교대로 가해지며 최종적으로는 바텀 브라켓셀(bottom bracket shell)로 하중이 전달된다. 시험을 위한 프레임 구속조건은 실제 주행하는 조건에 부합되도록, 프레임 헤드튜브(head tube)와 리어엔드(rear end)를 Fig. 1과 같이 고정하였다. 또한 체인 장력에 의한 영향을 고려해서 오른쪽 크랭크 암을 리어엔드와 연결하여 페달링 하중이 리어엔드로 전달되도록 유도하였다. 페달링 하중을 전달하는 크랭크 암은 페달링 하중이 가장 크게 걸리는 각도인 45도를 유지하도록 조정하였다^{8,9,10)}. 프레임 종류에 따라 규정된 하중을 가하며 하중을 가하는 주기는 일반적인 크랭크 회전속도 범위인 1~2 Hz로 하였다.

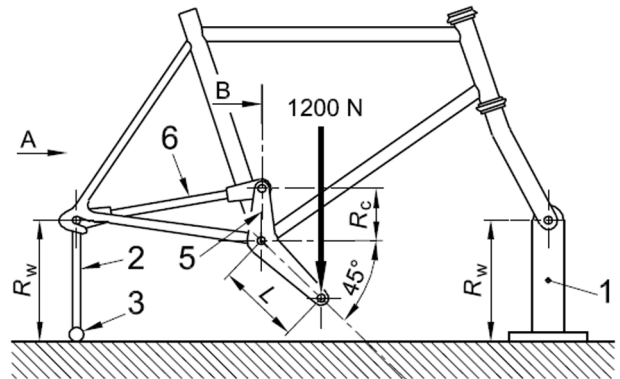


Fig. 1. pedaling fatigue test (Mountain Bicycle).

2.3 수평하중 내구시험

수평 하중은 자전거 주행 중 지면의 굴곡으로 인해 발생된 수평 방향의 속도변화가 원인이다. 특히 자전거가 턱에 부딪히거나 지면으로 떨어지는 경우 수평방향의 충격력이 바퀴와 포크를 통해 프레임 헤드튜브에

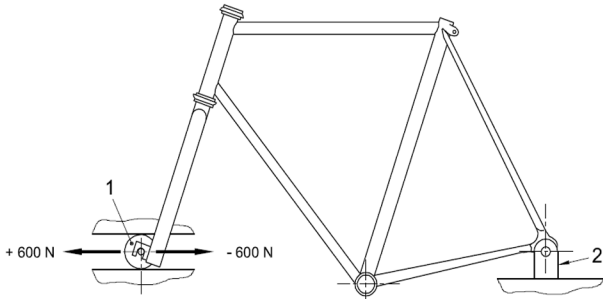


Fig. 2. Horizontal fatigue test (Road bicycle).

전달된다. 산악용 자전거의 경우에는 턱에 걸려서 발생하는 충격력 보다는 지면과 충돌하면서 발생하는 충격력이 보다 크므로 전방 수평하중을 1200 N으로 하고 후방 수평하중을 600 N으로 가한다. 도로용 자전거는 지면과 충돌하는 경우가 제한적이므로 전후방 수평하중을 모두 600 N으로 가한다^{9,10}. 시험규격에서는 생활용 자전거의 경우에는 수평하중 내구성 시험을 생략하도록 규정하고 있는데, 이 부분은 추가적인 연구를 통해 규격 개정이 필요하다고 판단된다.

수평 내구성 시험을 위한 프레임 구속조건은 Fig. 2와 같이 리어엔드만을 고정한다. 헤드튜브에 더미포크(dummy fork)를 삽입하고 수평방향으로 실린더를 연결하여 하중을 가하도록 Fig. 2와 같이 고정하였다. 프레임 종류에 따라 규정된 하중을 가하며 하중을 가하는 주기는 25 Hz 이내로 하였다.

2.4 수직하중 내구성시험

수직 하중은 자전거 주행중 지면의 굴곡으로 인해 발생된 수직 방향의 속도변화가 원인이다. 속도변화로 발생하는 충격력은 대부분 승차자 체중이 실리는 안장을 통해 프레임에 전달된다. 자전거 주행중에 승차자의 체중은 핸들바와 페달 그리고 안장에 분산된다. 그러나 핸들바와 페달의 경우 주행중에는 접촉을 유지하

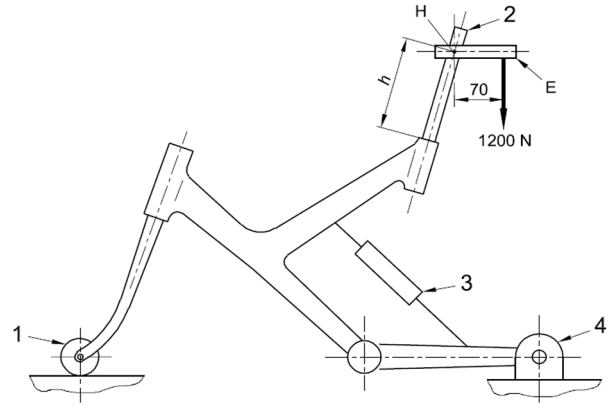


Fig. 3. Vertical fatigue test (Mountain bicycle).

며 떨어지지 않는 반면, 안장은 지면의 충격에 의해 이격이 발생하므로 대부분의 충격력은 안장을 통해 프레임에 전달되게 된다. 비포장 도로를 주행하는 산악용과 생활용 자전거는 수직하중에 의한 파손 가능성이 큰 반면에, 도로용 자전거의 경우에는 평탄하게 포장된 도로를 주행하도록 제작되므로 수직하중에 의한 내구성 시험은 해당되지 않는다^{8,9}.

수직 내구성 시험을 위한 프레임 구속조건은 페달링 하중 내구성 시험과 유사하다. 리어엔드와 헤드튜브를 구속하고 체인장력을 고려할 필요가 없으므로 체인로는 제거한다. 하중을 가하는 시트포스트(seat post)를 시트튜브(seat tube)에 삽입하고 수직 하방으로 하중을 가하도록 Fig. 3과 같이 고정하였다. 프레임 종류에 따라 규정된 하중을 가하며 하중을 가하는 주기는 25 Hz 이내로 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Table 3은 페달링 내구성 시험결과를 요약한 표이다. 마그네슘합금 재질의 프레임은 합격률이 16%에 불과한 반면 알루미늄합금, 카본복합재, 스틸합금과 티타늄

Table 3. Pedaling fatigue test results(% of success)

	CITY	MTB	ROAD	Sum
Al	88.9%	83.3%	N/A	86.7%
Carbon	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Mg	N/A	16.7%	0.0%	16.0%
Steel	100.0%	100.0%	87.5%	95.2%
Ti	N/A	100.0%	N/A	100.0%
Sum	95.7%	41.7%	84.6%	66.7%



Fig. 4. Crack by pedaling Load.

합금 재료의 프레임은 합격률이 양호한 수준을 보이고 있다. 크랙이 발생한 위치는 모두 오른쪽 바텀브라켓셀이다. 이는 자전거 크랭크(crank) 기어 위치가 오른쪽에 위치하므로, 페달링 하중에 의한 체인장력이 오른쪽 비비셀에 작용하기 때문이다. Fig 4에서 보듯이 시트튜브와 만나는 지점에서 발생한 크랙이 앞쪽 다운튜브 방향으로 진행되는 형태를 보이고 있다. 이는 프레임 구성하는 튜브의 연결구조와 연관성이 있다. 바텀브라켓셀에는 시트튜브와 다운튜브가 연결되는데 다운튜브가 먼저 연결되므로 후공정으로 연결되는 시트튜브 연결부에서 크랙이 시작되어 다운튜브 방향으로 진행된다.

Table 4는 수평 내구성 시험결과를 요약한 표이다. 합격률이 45.2%로 가장 많은 비율의 프레임이 수평 내구성 기준을 충족하지 못하고 있다. 특히 수평하중에 대한 내구성이 가장 중요한 산악자전거의 경우 합격률이 41.2%에 불과했다. 티타늄과 마그네슘합금의 경우 기준을 충족한 프레임이 없는 반면 카본복합재 프레임의 경우 모든 시편이 기준을 충족하고 있다. 수평하중에 의해 발생한 크랙은 모두 프레임 헤드튜브에서 발생했다.

Table 4. Horizontal fatigue test results(% of success).

	CITY	MTB	ROAD	Sum
Al	N/A	66.7%	N/A	66.7%
Carbon	N/A	100.0%	100.0%	100.0%
Mg	N/A	0.0%	N/A	0.0%
Steel	N/A	0.0%	30.0%	33.3%
Ti	N/A	0.0%	N/A	0.0%
Sum	N/A	41.2%	50.0%	45.2%



Fig. 5. Crack by horizontal load.

Fig. 5에서 보듯이 수평하중에 의한 크랙은 헤드튜브와 다운튜브(down tube)가 만나는 용접비드에서 발생했다. 헤드튜브 하단 용접부에서 발생한 크랙이 다운튜브 상단으로 진행되는 형태를 보였다. 헤드튜브 하단 용접비드는 수평하중을 직접 받는 부위인데 프레임 구조상 예각(sharp angle)으로 용접되는 부위이므로 피로 내구성에 가장 취약한 부위이다. 프레임 구조상 헤드튜브에는 탐튜브와 다운튜브가 연결된다. 수평하중을 받을 경우 탐튜브는 압축력을 주로 담당하며, 다운튜브가 인장력을 담당하므로 수평하중에 의한 크랙은 다운튜브 하단에서 시작하게 된다⁷⁾.

Table 5는 수직 내구성 시험결과를 요약한 표이다. 모든 프레임이 수직 내구성 기준을 충족하고 있다. 안장에 가해지는 충격력으로 인한 피로파괴는 시험 프레임에서 모두 만족하는 결과를 보이고 있다. 다만 시험규격에서는 하중을 가하는 시트포스트 길이를 250 mm로 권고하는 점은 고려할 필요가 있다. 최근 자전거 프레임의 경우 시트포스트 길이가 300 mm를 넘는 경우가 많다. 그러므로 수직 내구성 시험에서 시트포스트 길이를 증가시키는 방향으로 시험규격을 개정할 필요가 있다고 판단된다.

Table 5. Vertical fatigue test results (% of success)

	CITY	MTB	ROAD	Sum
Al	100.0%	100.0%	N/A	100.0%
Carbon	100.0%	100.0%	N/A	100.0%
Mg	N/A	100.0%	N/A	100.0%
Steel	100.0%	N/A	N/A	100.0%
Ti	N/A	100.0%	N/A	100.0%
Sum	100.0%	100.0%	N/A	100.0%

Table 6. Frame fatigue test results (% of success)

	CITY	MTB	ROAD	Sum
Al	88.9%	63.6%	N/A	75.0%
Carbon	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Mg	N/A	8.3%	0.0%	8.0%
Steel	100.0%	0.0%	27.3%	62.5%
Ti	N/A	0.0%	N/A	0.0%
Sum	95.7%	24.4%	43.8%	48.8%

Table 6은 프레임 내구성 시험 최종결과이다. 최종 합격률은 48.8%로 절반 이하의 수준이다. 티타늄합금과 마그네슘합금 재질의 프레임 합격률이 각각 0.0%와 8.0%인 반면, 카본복합재 프레임의 경우에는 합격률이 100%에 달해 큰 대조를 보이고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 완성자전거 성능과 안전을 결정하는 가장 중요한 부품인 프레임에 대한 내구성을 시험하였다. 도로용, 산악용, 생활용 프레임 80개에 대하여 페달링하중, 수평하중, 수직하중에 대한 내구성을 각각 시험하고 결과를 분석하였다. 분석결과는 자전거 프레임 설계와 제작을 위한 재질선정, 구조해석, 취약부위 보강을 위한 자료로 활용할 수 있을 것이다. 자전거 프레임 내구성 시험결과는 다음과 같다.

1. 수평하중 내구성시험에 대한 합격률이 가장 낮으며, 특히 수평하중 내구성이 가장 중요한 산악용 프레임의 합격률이 41.2%에 불과했다. 또한 티타늄합금과 마그네슘합금 재질의 프레임은 합격한 시편이 없을 정도로 수평 내구성에 취약한 특성을 보이고 있다. 모든 크랙이 헤드튜브 하단에서 발생했다. 수평하중으로 인한 인장력을 받는 다운튜브의 경우 헤드튜브와 접하는 각도 변경, 다운튜브 두께 변경 또는 보강재를 추가로 설치하여 수평 하중을 견딜 수 있는 헤드튜브 형상 설계가 요구된다.

2. 모든 형태의 프레임에 적용되는 페달링하중 내구성시험은 비교적 높은 합격률을 보이고 있으나, 바텀브라켓셀 오른쪽에 집중적으로 크랙이 발생하는 형태를 보였다. 페달링 하중에 의한 응력이 좌우 비대칭적으로 가해져 발생하는 현상이므로, 프레임 연결구조 변경, 용접 비드를 최소화하는 용접설계 또는 비대칭형 바텀브라켓셀 적용을 고려한 설계 및 제작을 고려할 필요가 있다.

3. 프레임 재질별 합격률의 경우 카본복합재 프레임과 알루미늄 합금 프레임의 합격률이 각각 100%, 75%로 가장 높았다. 반면 티타늄합금과 마그네슘합금 재질의 경우에는 합격률이 각각 10% 미만으로 큰 대조를 보이고 있다. 내구성 기준으로만 판단할 경우 복합소재와 알루미늄합금이 자전거 프레임에 가장 우수한 소재로 분석된다.

References

- 1) K. B. Kwon, B. W. Ahn, G. W. Kang and S. K. Cheong, "The Establishment of Bicycle Frame Standard," Korea Institute of Sport Science, pp. 2-3, 2006.
- 2) B. W. Ahn, G. W. Kang, and K. B. Kwon, "The Research of Bicycle Industry," Korea Institute of Sport Science, pp. 22, 2006.
- 3) T. Y. Kim, M. S. Lee, W. Lim and H. K. Kim, "Evaluation of Fatigue Endurance for an MTB Frame", J. Korean Soc. Saf., Vol. 28, No. 3, pp. 1-7, 2013.
- 4) S. Y. Lee and N. J. Lee, "A Study on Detection of a Critical Spot and the Securing Safety Method of CFRP Bicycle Forks by Finite Element Method", J. Korean Soc. Saf., Vol. 31, No. 6, pp. 1-5, 2016.
- 5) D. G. Wilson, "Bicycling Science," The MIT Press, pp. 357, 2004.
- 6) J. I. Lee, "A Study on the Design of Bicycle Safety System Equipment," J. of Korean Soc. of Mechanical Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 97-98, 2012.
- 7) K. B. Kwon and H. Y. Kim, "The Structural Analysis of a Bicycle Frame for Optimum Design," Korea Institute of Sport Science, pp. 15-16, 49, 2008.
- 8) EN 14764, City and Trekking Bicycles - Safety Requirements and Test Methods, CEN, pp. 49-50, 2005.
- 9) EN 14766, Mountain-Bicycles - Safety Requirements and Test Methods, CEN, pp. 48-51, 2005.
- 10) EN 14781, Racing Bicycles - Safety Requirements and Test Methods, CEN, pp. 47-48, 2005.