

볼트체결을 이용한 하이브리드 자전거 모노코크 프레임 개발 프로세스

이인철*, 장동환#

(*인하대학교, #인하공업전문대학)

Development Process of Monocoque Frame for Hybrid Bicycle using Bolt Fastening

In-Chul Lee*, Dong-Hwan Jang#

(Received 1 October 2013; received in revised form 4 November 2013; accepted 11 November 2013)

ABSTRACT

This paper presents the development process for a bicycle monocoque frame using bolt fastening. Traditionally, bicycle frames have been constructed with metal tubes joined at their ends by welding. These frames have been brazed or soldered onto metal lugs, forming the frame. Because stress loads become greatest at the joint of the bicycle tube frame, joint construction strongly influences frame design and construction. To avoid the inherent problems of material discontinuity at frame joints, numerous designers have attempted to reduce or eliminate the number of joints in tube frames. Nevertheless, the manufacture of high quality, reliable, one-piece and jointless frames has proven difficult and expensive. In this study, a new monocoque frame adapted to a hybrid bike is proposed. The advantage of the monocoque frame, is that it has a rechargeable battery system that is built into the frame; as a result, the emotional quality for the customer is improved. In order to estimate the design compatibility compared with that of tube frames, structural analysis is performed using finite element method. A prototype based on a modified design has also been made and stability testing has been carried out.

Key Words : Monocoque Frame(모노코크 프레임), Bicycle(자전거), FEM Anaysis(유한요소법), Stability Test(안전성 시험), Bolt Fastening(볼트체결)

1. 서 론

자전거는 대중적으로 가장 인기있는 레저, 스포츠용 장비임과 동시에 운송수단이며 대표적인 조립제품으로 약 200여개의 크고 작은 부품들로 구성되어 있다^[1-3]. 이러한 부품들 가운데 프레임은 주행시에 답력, 추력 이외에 노면상태에 따른 충격 등과 같은 외부 하중을 지지해주는 중요한 구조물로서 자전거의 안전성과 성능을 결정하면서 수명

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

Corresponding Author :

Dept. of Mechanical Design, Inha Technical College.

E-mail : dhjang@inhatc.ac.kr

과 직결되는 핵심부품이다^[2-4].

조립은 생산기계로부터 가공되어진 각각의 부품들을 여러 가지 체결방법에 의해 완성품을 만들어내는 생산의 마지막 단계로 상대적으로 노동력이 집중되어 있는 공정이다. 전통적으로 자전거 프레임은 금속소재의 튜브(tube)를 이용하여 끝단을 용접하거나 돌출부(lug)를 브레이징(brazing)하여 제작한다. 자전거 프레임에서 응력하중은 접합부에 집중되기 때문에 접합부의 구성은 프레임의 구조특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 자전거 설계자들은 이러한 접합부에서 소재의 불연속성에 의한 문제를 해결하기 위하여 프레임 접합부의 개수를 감소하거나 삭제하기 위하여 많은 노력을 하고 있다. 그러나 접합부가 없는 고품질, 고신뢰성의 일체형 프레임을 제작하기에는 설계기술과 비용측면에서 많은 어려움이 있다^[5]. 또한 자전거 프레임과 같은 구조물의 접합방식에서 용접공정과 비교하여 볼트에 의한 체결방식이 상대적으로 현장 작업성이 우수하고 작업시간이 작게 소요되는 장점이 있다.

하이브리드 자전거(hybrid bicycle)는 페달링에 의한 수동운행과 2차 전지 충전에 의한 모터의 구동으로 자동운행을 병용하는 차세대 자전거이다. 이러한 하이브리드 자전거는 최근에 로드 사이클과 산악자전거의 기능을 접목함으로써 도시의 일상생활에서 편리하게 사용하게 제작되어 대중적으로 많은 관심을 받고 있다. 그러나 하이브리드 자전거는 모터의 회생충전에 의해 전기에너지를 저장할 수 있는 2차 전지에 대한 수납공간이 반드시 필요하다. 따라서 현재 상용화되고 있는 대부분의 전동 하이브리드 자전거는 2차 전지를 튜브 프레임에 직접 체결하거나 별도의 구조물을 구성하여 보관하고 있다. 그러나 이러한 수납방식은 외부의 자연환경에 대해 노출되어 전지의 성능이 약화되거나 미관이 상대적으로 떨어지는 단점이 있다^[6].

본 논문에서는 하이브리드 자전거의 2차 전지에 대한 수납공간을 확보하고 조립시간 단축을 목적으로 모노코크 프레임(monocoque frame)을 제안하였다. 제품개발을 위해서 요구성능을 고려하여 프레임 기본구조에 대한 개념설계를 수행하였으며 유한요소법을 이용한 모의실험을 결과를 바탕으로 설계변경을 통해 시제품을 제작하였다. 또한 제작

된 부품에 대한 성능을 검토하기 위해 안전성 평가를 수행하고 완성자전거에 조립하였다.

2. 자전거 프레임 개요

2.1 튜브 프레임

Fig. 1은 자전거에 적용되는 튜브 프레임에 대한 형상과 각부의 명칭을 나타낸 것이다. 그림에서 전통적으로 튜브 프레임은 두 개의 전삼각(front triangle)과 후삼각(rear triangle)의 삼각형 구조로 구성된 다이아몬드 형태로 되어있다. 전삼각과 후삼각에는 각각 5개와 4개의 튜브들로 구성되어 있으며 각각의 튜브들을 주로 용접이나 브레이징 등을 이용하여 접합한다^[7]. 이러한 튜브들은 알루미늄 합금, 티타늄 합금 등의 소재를 적용하여 압출(extrusion) 또는 인발(drawing) 공정에 의해 제작되며 최근에는 경량화의 목적으로 탄소복합재를 사용하기도 한다^[8-9]. 이러한 튜브 프레임은 튜브 제작과정에서 소재의 특성에 따라 충분한 강성을 갖기 위하여 직경에 대해 적합한 살 두께를 확보하여야 하며 직경에 비하여 상대적으로 살 두께를 작게 설계할 경우 튜브의 벽에서 분기 좌굴(bifurcation buckling)의 문제가 발생할 수 있다^[5]. 또한 프레임 조립과정에서 기포에 의한 용접결함이나 튜브간의 틈새에 응력집중으로 균열의 문제가 발생하기도 한다^[7]. 전체적으로 튜브 프레임은 제작과정에서 다수의 공정을 포함하고 있으며 숙련자의 경험에 의존하는 과정이 많기 때문에 생산

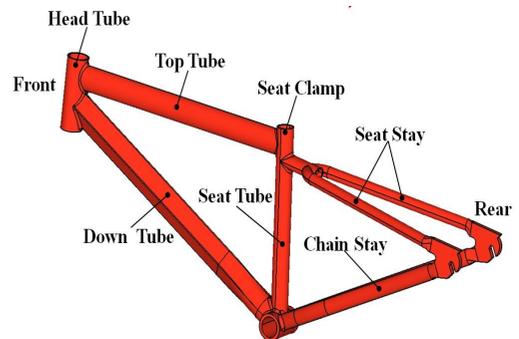


Fig. 1 Shape of tube frame

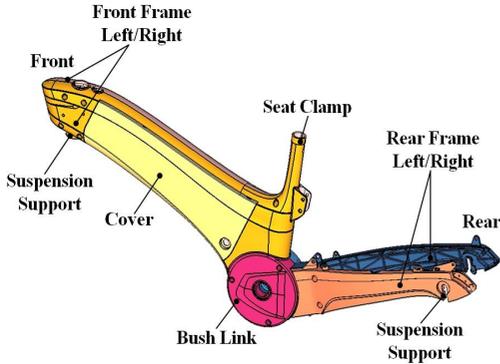


Fig. 2 Shape of monocoque frame

성 측면에서 분리하고 균일한 품질을 유지 할 수 없는 단점이 있다

2.2 모노코크 프레임

Fig. 2는 본 논문에서 제안한 모노코크 프레임에 대한 형상과 각부의 명칭을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 제안된 모노코크 프레임은 크게 전면부(front frame)와 후면부(rear frame)의 두 부분으로 구성되어 있으며 각각은 부쉬 링크(bush link)로 연결되어 있는 구조이다. 좌/우 한쌍의 대칭형상인 전면부와 후면부는 12개의 볼트 체결을 통해 조립되며 전면부의 좌측에는 상하로 개폐되는 커버를 부착하여 2차 전지를 장착할 수 있도록 구성하였다. 또한 전면부의 양끝단에 현가장치(suspension)가 결합되게 구성하여 노면으로부터의 충격을 흡수함으로써 내구성과 승차감을 동시에 향상시킬 수 있도록 설계하였다. 이러한 모노코크 프레임은 기존의 일률적인 형태의 튜브 프레임에서 벗어나서 디자인 측면에서 상대적으로 소비자의 요구 특성에 따라 다양한 외관형상을 구현할 수 있는 장점이 있다. 또한 프레임 내부의 중앙공동부는 일반 자전거에서 제동장치 케이블을 매립하거나 소비자의 취향에 따라서 별도의 수납공간으로 활용할 수 있는 편리성이 있다.

3. 유한요소해석

3.1 해석조건

Table 1 Material properties for Al 6061

Tensile strength	310MPa
Yield strength	276MPa
Elongation	17%
Poisson's ratio	0.33

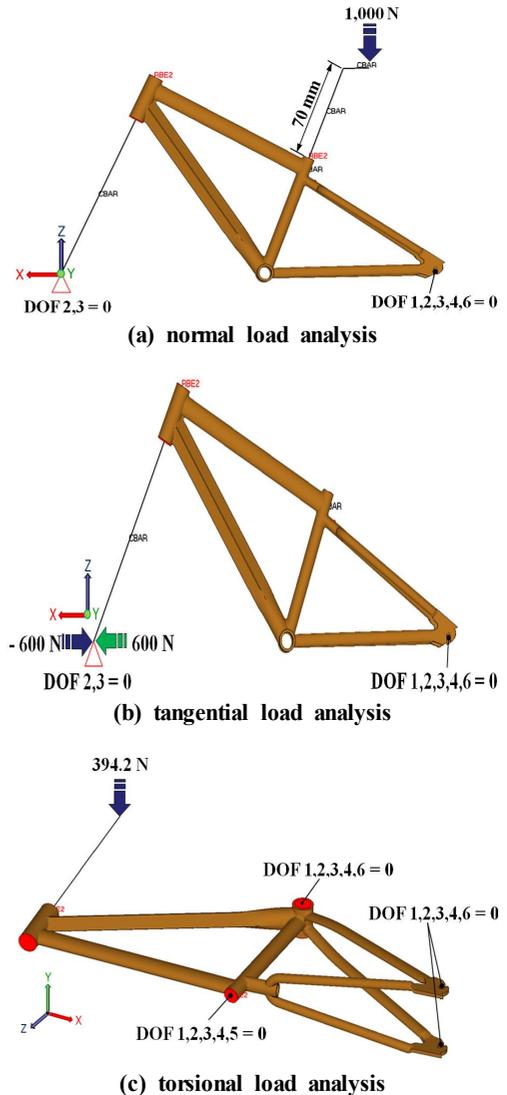


Fig. 3 Boundary conditions in each analysis

자전거의 설계단계에서 프레임이나 기타부품들에 대한 구조해석은 매우 중요한 단계이다. 이론적 또는 수치해석적인 방법에 의해 자전거 구조물에 대한 강도나 강성에 대한 해석은 시제품 제작이나 상용화를 위해 최적화된 형상으로 수정하고 예측할 수 있도록 도움을 준다. 그러한 수치해석적 방법 중에서 유한요소법은 다양한 물리적인 문제에 대해 적용하는 일반적인 방법중에 하나이며 구조물에 대해 응력과 변형을 평가하는데 중요한 역할을 한다^[1].

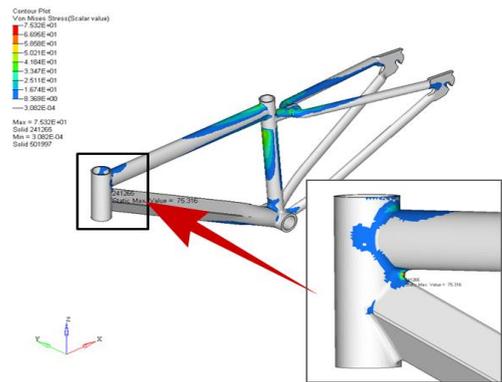
본 논문에서는 튜브 프레임과 비교하여 제안된 모노코크 프레임의 상대적으로 취약한 부분을 분석하고 보완하기 위하여 유한요소법을 이용하여 구조해석하였다. 해석을 위하여 상용적으로 적용되는 튜브프레임과 제안된 모노코크 프레임에 대해 문헌 2를 참조하여 생활용 자전거에 적용되는 수직, 수평, 비틀림 하중조건에 의한 정적 강도해석을 수행하고 비교하였다. 해석에 적용된 소재는 내식성과 용접성이 우수한 것으로 알려진 열처리 AI 6061-T6 T651합금을 튜브 프레임과 모노코크 프레임에 대해 동일하게 적용하였으며 물성조건은 Table 1과 같다. 유한요소모델링에서 사면체로 구성된 솔리드 요소를 사용하였으며 프레임의 접합부분은 강체요소(RBE2)로 결합하는 일반적인 방법을 사용하였다. 유한요소모델에 대한 전/후처리와 해석을 위하여 상용프로그램인 HyperMesh^[10]와 Nastran^[11]을 각각 사용하였다.

Fig. 3은 튜브 프레임에 대한 각각의 수직, 수평, 비틀림 하중조건에서 강도해석을 위한 하중과 경계조건을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)의 수직하중조건에서 체인스테이(chain stay)의 끝단과 헤드튜브(head tube)를 바닥면과 연결하여 회전이 가능하도록 고정하였다. 하중조건은 시트클램프(seat clamp)의 중심선에서 70 mm 떨어진 지점에서 1,000N의 수직하중을 적용하였다. Fig. 3(b)의 수평하중조건에서 경계조건은 수직하중조건과 동일하며 헤드튜브의 고정축에 대해 프레임의 전면부와 후면부 방향으로 인장하는 600N의 수평하중을 각각 적용하였다. Fig. 3(c)의 비틀림 하중조건에서는 시트튜브(seat tube)의 양끝단과 체인스테이의 끝단을 각각 회전이 가능하도록 고정하고 프레임의 측면방향으

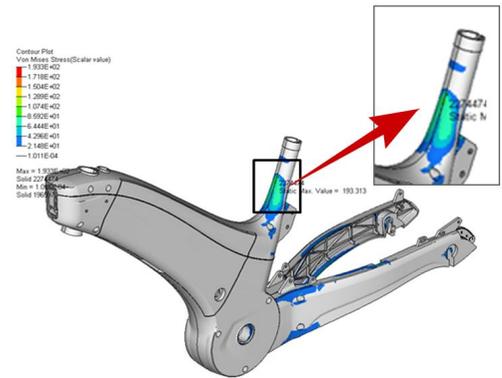
로 392.4N의 하중을 적용하였다. 제안된 모노코크 프레임에 대한 모든 하중과 경계조건은 튜브 프레임과 동일하게 하여 유한요소해석을 수행하였다.

3.2 해석결과

Fig. 4는 튜브 프레임과 모노코크 프레임에 대해 수직하중조건의 해석결과에 의해 von Mises 응력분포를 나타낸 것이다. 그림에서 튜브 프레임인 경우에는 탑튜브(top tube)와 다운튜브(down tube)의 접합부분인 헤드튜브에서, 모노코크 프레임 경우에는 시트클램프에서 각각 최대응력이 발생하였다. 튜브 프레임과 모노코크 프레임의 최대응력은 각각 75 MPa와 193 MPa이며 두 개의 프레임 모두 AI 6061 합금의 항복강도인 276 MPa를 초과하지 않았다.

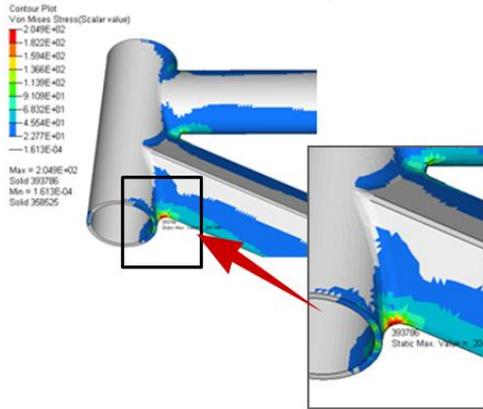


(a) tube frame

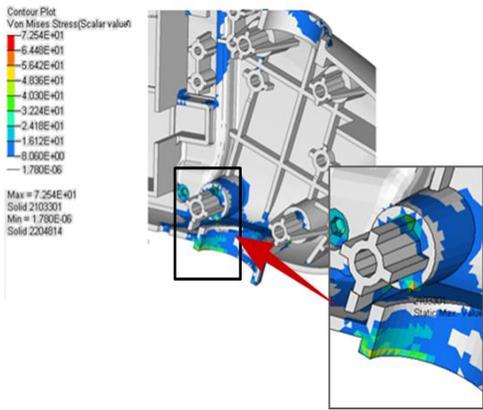


(b) monocoque frame

Fig. 4 Simulation result for normal load condition



(a) tube frame

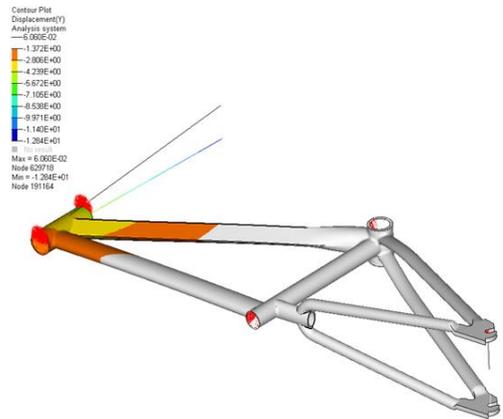


(b) monocoque frame

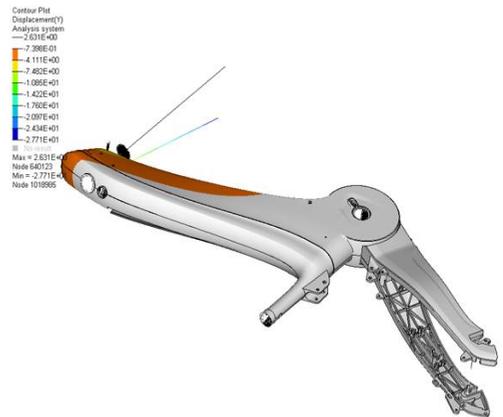
Fig. 5 Simulation result for tangential load condition

Fig. 5는 수평하중조건 최대응력이 발생한 지점을 확대하여 von Mises응력분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 튜브 프레임 경우에는 수직하중조건과 동일하게 헤드튜브에서 최대응력이 발생하였으며 모노코크 프레임 경우에는 커버가 조립되는 전면부 좌측 프레임의 볼트 체결부에서 나타났다. 튜브 프레임과 모노코크 프레임의 최대응력은 각각 205 MPa과 73 MPa이며 수직하중조건과 반대로 튜브 프레임이 상대적으로 크게 나타났다.

Fig. 6은 비틀림 하중조건에 대해 변위에 대한 분포를 나타낸 것으로 튜브 프레임과 모노코크 프



(a) tube frame



(b) monocoque frame

Fig. 6 Simulation result for torsional load condition

Table 2 Torsional analysis results

Classification	Tube frame	Monocoque frame
Displacement (mm)	12.8	27.7
Torsional angle (degree)	1.9	4.1
Torsional rigidity (N-m/degree)	79.1	36.6

레이프 두가지 모두 프레임의 전면부 끝단에서 최대 변위가 발생하였다. Table 2는 비틀림 강성해석에 대한 결과를 정리한 것으로 튜브 프레임이 모노코크 프레임 보다 상대적으로 약 2.2배 크게 나타났

다. 이와 같은 이유는 용접접합에 의해 일체형으로 구성된 튜브 프레임과 비교하여 볼트 체결에 의해 연결된 모노코크 프레임이 분할된 면에서 상대적으로 응력집중에 의한 변형이 많이 발생된 것으로 판단된다.

4. 설계변경 및 시제품 평가

4.1 설계변경

본 논문에서는 유한요소해석 결과를 바탕으로 튜브 프레임과 비교하여 제안된 모노코크 프레임의 상대적으로 취약한 부분에 대해 Fig. 7과 같이 음영처리된 부분들을 각각 설계변경하였다. Fig. 7(a)의 시트클램프 부분은 내부의 리브(rib)를 보강하고 살 두께를 기존 형상보다 1 mm 크게 변경하였다. 또한 시트클램프의 하단부에 볼트 체결 홈을 추가하여 강성을 보완하였다. Fig. 7(b)의 부쉬링크에 대해서는 그림과 같이 크랭크 암이 조립되는 중앙의 홈을 기준으로 반경방향으로 원형의 보강판을 추가하고 전체 부쉬링크 부분의 살 두께를 기존 형상보다 1 mm 크게 변경하였다. Fig. 7(c)의 커버와 조립되는 전면부는 2차 전지에 대한 케이블의 간섭이 없는 범위내에서 체결홈이 연결되는 부분과 상/하단부분에 각각 리브를 추가하여 보강하였다.

4.2 시제품 제작

Fig. 8은 설계변경에 따라 제작된 모노코크 프레임과 최종적으로 완성 자전거에 조립된 사진이다. 모노코크 프레임의 제작을 위하여 해석에 사용된 소재와 동일한 Al 6061 합금을 적용하여 다이캐스팅 공법을 이용하였으며 전면부와 후면부에 사용된 성형기는 각각 1,250ton과 650ton이다. 제작된 프레임을 육안으로 확인결과 기포발생, 미성형 등과 같은 주조결함은 발생하지 않았다. 최종적으로 성형된 5개의 부품에 대해 16개의 볼트를 이용하여 체결하였으며 수작업을 통해 조립한 결과 평균적으로 5분 정도의 시간이 소요되었다. 조립된 프레임을 이용하여 완성 자전거를 제작하는 과정에서 조립성과 주변부품과의 연동성 및 간섭을 확인

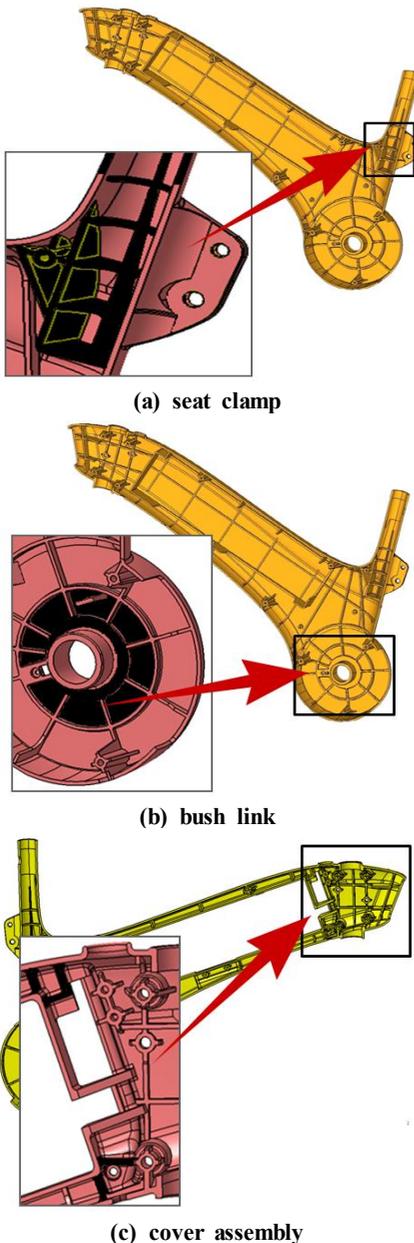
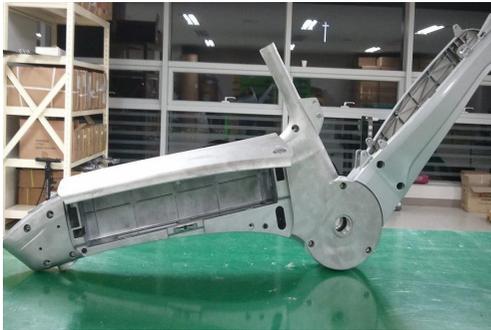


Fig. 7 Redesigned model of front frame



(a) monocoque frame assembly



(a) drop loading impact test



(b) hybrid bicycle assembly



(b) drop impact test

Fig. 8 Photograph of prototype

하였으며 검토한 결과 특별한 문제점은 나타나지 않았다.

4.3 안전성 평가

국내의 경우 자전거는 품질경영 및 공산품 안전관리법에 의거하여 안전검사 대상품목으로 지정되어 있으며 검사기준은 KS규격에 규정되어 있다. 자전거 프레임에 대해 국내에서 요구되는 시험은 낙하하중 충격시험, 낙하 충격시험 및 진동시험이다. 이 중에서 진동시험은 자전거 프레임이 실제로 받는 하중조건과 다르고 내구성을 평가하기가 어렵기 때문에 대부분의 국가에서 사용하지 않고 있다^[7]. 본 논문에서는 제작된 모노코크 프레임에 대해 최종적으로 안전성을 평가하기 위하여 KS R 8011 규격^[12]을 적용하여 낙하하중 충격시험과 낙

Fig. 9 Photograph of stability test

하 충격시험을 공인인증 시험기관에서 실시하였다. Fig. 9는 각각 낙하하중 충격시험과 낙하 충격시험을 위해 고정구(fixture)에 장착된 모노코크 프레임과 시험장비에 대한 사진이다. 낙하하중 충격시험과 낙하 충격시험을 순차적으로 수행한 후에 프레임에 발생하는 영구 변형량을 측정된 결과 두 가지 시험결과 모두 전면부와 후면부의 변위차가 5 mm로 나타나서 기준값인 40 mm 이하를 만족하였다. 또한 시험이 종료된 후에 프레임의 상태를 육안으로 관찰한 결과 파손과 현저한 균열이 발견되지 않아 시험규격을 모두 만족하였다.

5. 결 론

본 논문은 기존에 범용적으로 적용하고 있는 튜

브 프레임에 대해 조립성과 디자인을 개선한 모노코크 프레임의 개발 프로세스에 관한 것이다. 이를 위하여 전면부와 후면부가 부쉬링크로 연결되어 있고 별도의 수납공간이 있는 볼트 체결방식의 모노코크 프레임을 제안하였으며 수치해석적 성능평가를 통해 검증하고 시제품을 제작하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 제안된 모노코크 프레임은 내부의 중앙공동부를 이용하여 전동 하이브리드 자전거의 2차전지, 제동장치의 케이블 등을 매립하여 디자인 측면에서 편리성과 고감성의 외관이 구현될 수 있도록 설계하였다.
2. 설계된 모델에 대한 기계적 성능 검증을 위해서 3가지 하중조건에 따라 유한요소해석을 수행하고 튜브 프레임과 비교하여 상대적으로 취약한 부분에 대해 설계변경하였다.
3. 다이캐스팅 공법에 의해 제작된 시제품에 대해 KS표준규격에 의한 안전성 시험을 수행한 결과 제안된 설계모델에 의한 제품이 실제 완성자전거에 적용 가능한 것으로 판단되었다.

후 기

본 논문은 2011년도 지식경제부 자전거·해양레저장비산업육성사업에 의해 수행된 결과임.

REFERENCES

1. Liu, T. J-C. and Wu, H-C., "Fiber Direction and Stacking Sequence Design for Bicycle Frame made of Carbon/Epoxy Composite Laminate," *Materials & Design*, Vol. 31, pp. 1971-1980, 2010.
2. Kwon, K. B. and Jeong, S. K., "A Study on the Test and Evaluation for Bicycle Frame," Korea Institute of Sport Science, 2007.
3. Cho, J. U. and Han, M. S., "Structrural Durability Analysis According to the Thickness of Bicycle Frame Tube", *J. of KSMPE*, Vol. 11, No. 3, pp. 122-129, 2012.
4. Lee, B. S., "Design and Manufacture of CFRP Pipe for Bicycle Frame," *J. of KSPE*, Vol. 20, No. 6, pp. 130-137, 2003.
5. Reinforced Plastics, "Bike Frame Races Carbon Consumer Goods Forward," July/August, 2003.
6. Lee, I. C., "A Study on the Development Process of Bike Monocoque for Assembly Improvement," Incheon University Master Thesis, 2011.
7. Kwon, K. B., Ahn, B. H., Kang, K. W. and Jeong, S. K., "The Specification Establishment of Bike Frame," Korea Institute of Sport Science, 2006.
8. Larry, B. L., James, A. N. and Patrick, L. L., "Utilization of FEA in the Design of Composite Bicycle Frames," *Composites*, Vol. 26, No. 1, pp. 72-74, 1995.
9. Kang, D. M. and Ahn, S. M., "Collison Cahrateristics of an Adult Bicycle to a Car", *J. of KSMPE*, Vol. 11, No. 2, pp. 92-97, 2012.
10. Altair Eng., HyperMeshTM, V9.0.
11. NASTRAN, NASTRANTM, Release 2010.
12. Korea Agency for Technology and Standards, <http://www.standard.go.kr>, 2008.