

배터리 교환형 전기 이륜차 활성화를 위한 프레임 강건 설계

김상현*[#], 김가은*, 나다을*, 박정우*, 유다혜*, 노광현**, 이재상***, 주승돈***

*한성대학교 기계시스템공학과, *한성대학교 IT응용공학부, *** (주)재상전자

Robust Frame Design for Battery Exchange-Type Electric Motorcycle

Sang-Hyun Kim^{*,#}, Gaun Kim^{*}, Dayul Na^{*}, Jungwoo Park^{*}, Dahae Yu^{*},
Kwanghyun Rho^{**}, Jaesang Lee^{***}, Seoungdon Zu^{***}

^{*}Mechanical Systems Engineering, Hansung UNIV., ^{**}Applied IT Engineering, Hansung UNIV.,
^{***}JAESANG Electronic Co. Ltd.

(Received 18 August 2020; received in revised form 10 September 2020; accepted 11 September 2020)

ABSTRACT

Recently, eco-friendly electric motorcycles have been considered to replace aging gasoline motorcycles to reduce the amount of suspended fine dust in air. However, existing rechargeable battery-powered electric motorcycles have been found unacceptable by users because of their many limitations, such as long charging time, short travel distance per charge, and low driving speed. To overcome the drawbacks of conventional electric motorcycles, this paper proposes an exchangeable battery-powered electric motorcycle and a new frame shape for housing the exchangeable battery. The proposed frame is similar to that of current electric motorcycles; however, the shape and position of the saddle support, battery, and controller mount section are redesigned. The safety of the presented frame is verified through static and dynamic analyses using ABAQUS. In particular, the dynamic analysis is conducted under the most extreme condition among the various operating situations, thus confirming the robustness of the proposed frame design.

Key Words : Battery Exchangeable(배터리 교환형), Electric Motorcycle(전기이륜차), Fine Dust(미세먼지), Motorcycle Frame(이륜차 프레임)

1. 서 론

현대사회에서 미세먼지에 의한 대기 오염 문제는 전 세계적으로 큰 화두가 되고 있으며 세계 여러 나라에서는 대기 오염과 관련하여 배기가스 규제를 실시하고 있다. 국립환경과학원에 따르면 국내 가솔린 이륜차는 4륜과 2륜을 포함한 전체 차량의 10% 미만이나, 가솔린 이륜차 1대는 자동

차 대비 12배의 일산화탄소(CO)와 124배의 수산화탄소(HC) 오염물질을 배출하는 등 가솔린 이륜차에 의한 대기오염은 전체 도로 이동 오염원의 34%를 차지한다. 최근 정부에서 대기 중 미세먼지를 저감하기 위해 노후화된 가솔린 이륜차를 전기 이륜차로 전환할 수 있도록 각종 정책을 펼치고 있다^[1].

그러나 Fig. 1과 같이 가솔린 이륜차를 대체하기 위해 사용되고 있는 전기 이륜차는 많은 한계를 가지고 있어서 사용자의 외면을 받고 있다. 기존의 전기 이륜차는 가솔린 대신 충전형 배터리를

Corresponding Author : shkim@hansung.ac.kr

Tel: +82-2-760-8012, Fax: +82-2-760-4356

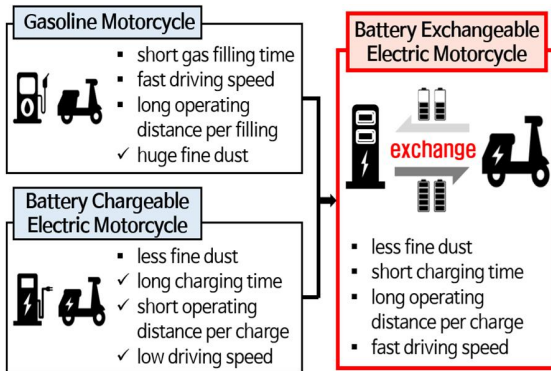


Fig. 1 Concept of battery exchangeable electric motorcycle for fine dust reduction

사용하므로 1회 충전 후 짧은 거리만 주행이 가능하다. 또한 충전 시간이 상당히 오래 걸리며 충전 중에는 전기 이륜차 사용이 불가능하다는 단점이 있다. 특히 주행거리가 짧은 단점을 극복하기 위해 배터리 용량을 증가시키면 충전시간이 더욱 과다해지고, 충전시간 감소를 위해 전력 소모량이 작은 48V의 저사양의 모터를 탑재하면 동적 성능이 낮아지는 문제가 발생한다. 따라서 이러한 전기 이륜차의 문제점을 해결하기 위한 새로운 형태의 전기 이륜차 제작이 필수적이다^[2,3].

따라서 본 논문에서는 전기 이륜차의 낮은 동적 성능과 이용시간 및 주행거리 등의 문제를 총체적으로 해결하기 위해 배터리 교환형 전기 이륜차를 제안하였으며 교환형 배터리 팩을 거치할 수 있게 설계된 새로운 프레임 형상의 안전성을 검증하려고 한다. 기존 충전형 이륜차의 프레임을 교환형에 맞게 설계 변경하였으며 실제 제작에 앞서 극한적인 상황을 고려한 구조해석 및 동해석을 통해 안전성을 확인하였다.

2. 형상 설계

2.1 배터리 교환형 프레임 형상 정의

현재 사용되고 있는 충전형 전기이륜차는 급속 충전은 1시간, 완속 충전을 위해서는 약 4시간이 소요된다. 또한 1회 충전 후 40km 이내 주행이 가능하고 최고속도는 보통 60km/h를 넘지 못한다. 하지만 125cc 가솔린

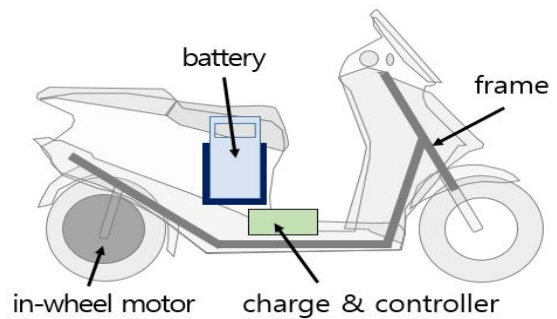


Fig. 2 Basic components of electric motorcycle

이륜차는 1회 주유 후 약 60km 정도 주행할 수 있고 90km/h의 최고속도가 가능하다^[4]. 이러한 전기 이륜차의 사용상 불편함과 낮은 성능으로 인해 정부의 구매 보조금 지원에도 불구하고 사용자의 외면을 받아왔다. 따라서 본 논문에서는 전기 이륜차의 이러한 문제점을 해결할 수 있도록 새로운 전기 이륜차인 배터리 교환형 방식을 제안한다.

Fig. 2는 일반적인 전기이륜차의 형상 및 기본 구성요소를 나타낸다. 전기이륜차는 구동력을 발생시키는 모터와 배터리, 충전 조절 장치 (charge & controller) 및 프레임으로 구성되어 있다. 먼저 가솔린 이륜차의 최소한의 동적 성능(1회 충전 주행거리 60km, 최고 속도 80km/h, 오르막 등판력 30km/h @ 20°)을 구현하기 위한 최대 출력 용량을 계산한 후 이를 충족할 수 있도록 3.7V, 3Ah 사양의 리튬이온 셀을 직렬/병렬로 적절히 연결한 새로운 교환형 배터리 팩을 구현하였으며 이를 장착할 수 있는 프레임 형상을 설계하였다. 가능한 기존 충전형 전기 이륜차의 프레임 형상을 유지하였으며 교환형 배터리 팩을 장착할 수 있는 거치부의 형상과 위치 및 충전 조절 장치의 구조를 수정하였다.

Fig. 3(a)는 기존 배터리 충전형 이륜차의 프레임 형상이며 (b)는 수정된 교환형 전기 이륜차의 프레임 형상을 나타낸다. 프레임의 전체 크기는 길이 1600mm, 폭 345mm, 높이 886mm이며 프레임의 기본이 되는 파이프의 두께는 3mm로 제작되었다. 교환형 이륜차 프레임은 사람의 하중을 지지하는 안장지지대와 교환형 배터리와 컨트롤러를 거치할 수 있는 거치부 형상이 기존 충전형과

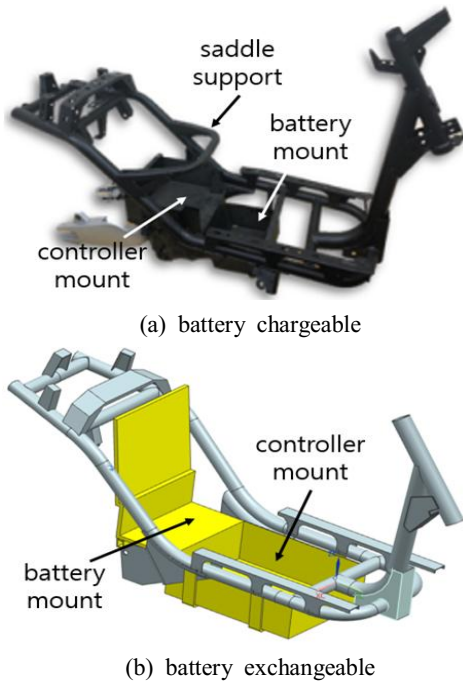


Fig. 3 Frame configurations of electric motorcycle

차이가 있다. 가솔린 이륜차의 동적 특성에 부합하기 위해서는 교환형 배터리의 크기가 증가(200×140×136, mm)되기 때문에 안장지지대가 제거되었으며 배터리와 컨트롤러를 지지하는 거치부의 위치와 형상 및 강판의 두께가 변화되었다. 전기 이륜차의 프레임은 운전자의 하중을 지탱하면서 지면에서의 충격 흡수나 진동을 완화해주는 가장 중요한 요소이다. 따라서 이륜차의 성능과 운전자 안전을 위해 수정된 프레임에 대한 안정성 검증은 필수적이다^[5,6].

2.2 해석 조건

프레임과 배터리 및 컨트롤러 거치부의 재료는 기존의 충전형 배터리 전기 이륜차 모델에 사용된 스테인레스 스틸 (A286)을 사용하였으며, 휠의 소재는 알루미늄 (AL6061-651)을 사용하였다. 각 재료의 물성 값은 Table 1에 나타내었다. 특히 프레임에 사용된 A286은 고온내식성 고강도 오스테나이트 합금강으로 다른 일반 합금강에 비해 높은 항복강도를 가지고 있다^[7].

Table 1 Material properties

| Properties | Stainless Steel | Aluminum |
|------------------------------|-----------------|----------|
| Elastic Modulus [GPa] | 200 | 68.9 |
| Poisson's ratio | 0.289 | 0.33 |
| Density [g/cm ³] | 7.92 | 2.7 |
| Yield stress [MPa] | 1,034 | 276 |

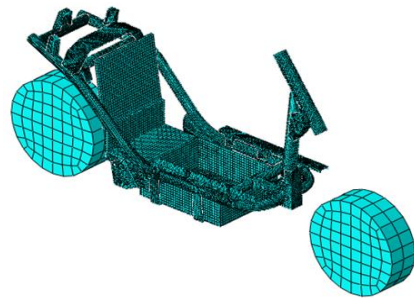


Fig. 4 FEA modeling of electric motorcycle

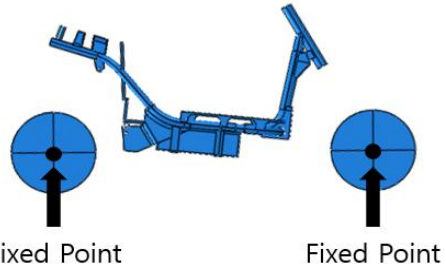


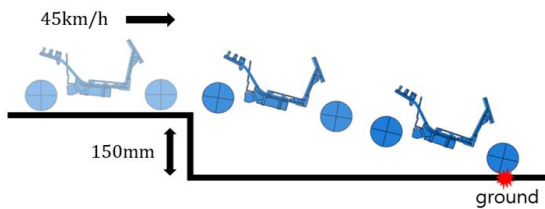
Fig. 5 Boundary conditions of static analysis

Fig. 4는 해석을 위한 FEA 형상을 나타낸다. 해석 수행 시간을 감소하기 위해 사면체 요소 대신 육면체 요소를 사용하였으며, 해의 정확도를 높이고 artificial 에너지에 의한 결과값 왜곡을 막기 위하여 정해석에서는 요소 내에 20개의 적분점을 가지는 2차원 요소인 C3D20를, 동해석에서는 2차원 요소를 사용할 수 없기 때문에 요소 내에 적분점을 8개 가지는 1차원 요소인 C3D8I를 사용하였다. 대변형을 잘 표현할 수 있도록 요소의 수는 충분한 크기로 분할하였다^[8].

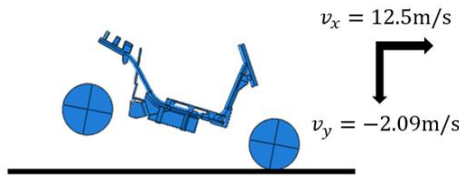
Fig. 5는 정해석을 위한 해석 조건을 나타낸다. 앞바퀴와 뒷바퀴가 연결되는 중심에 fixed 경계조건을 부여하여 변위를 고정시켰으며, 사람과 배터리의 하중은 각각의 무게중심점에 point mass 형태

Table 2 Loads condition of static analysis

| Type | Value (kg) |
|------------|------------|
| Person | 80 |
| Battery | 18 (2EA) |
| Controller | 14.5 |
| Motor | 16 |
| etc. | 35.5 |
| Total | 164 |



(a) real impact condition for dynamic analysis



(b) simplified impact condition for dynamic analysis

Fig. 6 Boundary conditions of dynamic analysis

로, 모터와 연료 등의 하중은 non-structure mass로 부여하여 정해석을 진행하였다. 두 바퀴는 해석을 위한 경계조건을 부여하기 위해서만 사용되고 프레임과는 coupling 조건으로 연결하였다. 프레임에 가해지는 하중 조건은 Table 2에 나타내었다.

Fig. 6(a)는 전기 이륜차가 주행 시 발생하는 충격에 대한 프레임의 안전성을 검증하기 위한 동해석 조건을 나타낸다. 본 논문에서 제시된 배터리 교환형 전기 이륜차의 최대 속도는 80km/h이지만 이륜차가 지면과 충돌하는 대부분의 상황은 차도와 인도의 경계턱을 넘어 차도로 진입하거나 도로 주행 중 과속방지턱을 넘을 때 발생한다. 일반적으로 ‘도로안전시설 설치 및 관리지침’에 의거하여 과속방지턱의 높이는 150mm를 넘지 않으며 도로교통법에서 과속방지턱에서의 주행은 규정 속도 30km/h로 제한되어 있다. 따라서 50% 정도의

과속을 고려한 주행속도 45km/h의 초기속도를 부여하여 150mm의 높이에서 지면과 충돌하는 상황을 가정하였다. 정해석과 마찬가지로 충돌해석에 영향을 미칠 수 있는 사람, 배터리, 모터, 연료 등의 하중과 중력을 부여하였다. 추가적으로 프레임 이외의 실제와 유사한 지면과의 충돌 현상을 재현하기 위해 지름 360mm, 두께 110mm의 이륜차 바퀴를 모델링하였다. 프레임 자체만의 거동을 보기 위한 해석이므로 휠에 강체 조건을 부여하여, 휠과 프레임을 rigid beam으로 연결을 하였으며 휠과 지면사이의 마찰계수는 고려하지 않았다. 또한 충돌을 재현할 수 있도록 2차원 평면으로 구성된 주행로를 구성하여 해석을 진행하였다.

일반적으로 동해석은 외연적(explicit) 해석이기 때문에 해석시간이 길어지면 해석 정확도도 떨어지게 된다. 따라서 해석시간을 최대한 줄이기 위해 해석 시점은 충돌 직전으로 가정하였으며, Fig. 6(b)와 같이 에너지 보존 법칙을 통해 충돌 시점의 수평방향 및 수직방향 속도를 구할 수 있다^[9]. 또한 대부분의 전기 이륜차는 내부에 현가장치인 쇼크업소버(shock absorber)를 장착하고 있으며 현가장치와 타이어로 인하여 충격량이 40~60% 흡수된다고 알려져 있다^[10]. 따라서 50%의 충격량만 프레임에 전달된다고 가정한 후 에너지 보존 법칙을 통해 구한 22.5m/s의 수평방향 속도와 -2.09m/s의 수직방향속도를 초기 조건으로 부여하여 해석을 진행하였다. 해석 시간은 앞바퀴 충돌 후 뒷바퀴 충돌 상황까지 보기 위하여 0.03s로 설정하였다.

3. 해석결과

3.1 정해석

Fig. 7은 배터리 교환형 전기 이륜차의 정해석 결과를 나타낸다. 예상대로 하중이 많이 가해지면서 불연속적인 형상을 가지는 배터리 거치부와 스윙 암 연결 부위에서 27.54MPa의 최대응력이 발생하였고, -0.0009287mm 만큼의 최대변위를 가지고 있다. 하지만 발생하는 최대 응력값이 부재의 항복응력에 비해 현저하게 낮기 때문에 정적 하중에 대해서는 매우 안전할 것으로 판단된다.

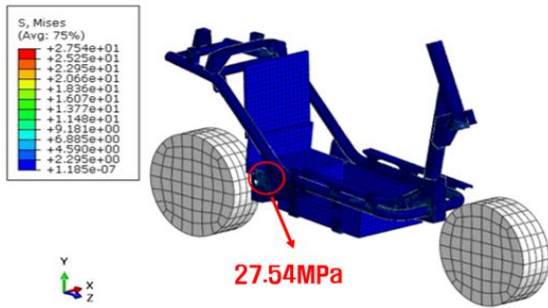


Fig. 7 Stress distribution of static analysis

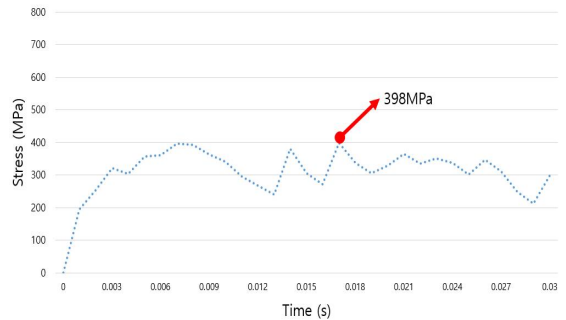


Fig. 9 Maximum stress as a function of time

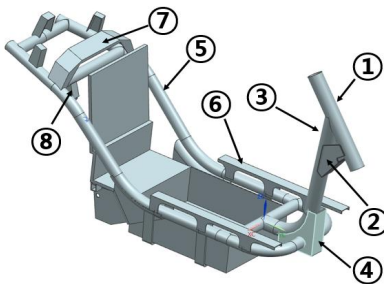
3.2 동해석

Fig. 8은 배터리 교환형 전기 이륜차의 동해석 결과를 나타낸다. 충돌해석에서는 프레임의 최대 응력 발생 위치가 시간에 따라 지속적으로 변하기 때문에 시간에 따른 최대응력 변화를 나타냈다. 최대응력 발생 위치는 바퀴를 프레임과 연결시켜 주는 스윙 암 부분과 파이프가 연결된 부분(파트 6)으로 충돌 시간 0.017s에서 가장 큰 응력값인 398MPa이 발생하였다. Fig. 9은 충돌 시간별 프레임 최대 응력 변화를 나타낸다. 파트 6번과 동일한 위치, 시간에 최대응력이 발생하였다.



Fig. 10 Prototype of electric motorcycle installed exchangeable battery pack

Fig. 10은 위에서 설계한 프레임을 바탕으로 제작된 시제품 형상이다. 교환형 배터리 팩이 내부 거치부에 장착되며 안장을 열어 쉽게 교체할 수 있음을 확인하였다.



| | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| ① | ② | ③ | ④ |
| | | | |
| 348.6MPa | 376.7MPa | 354.6MPa | 275.9MPa |
| 0.0235s | 0.005s | 0.017s | 0.008s |
| ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ |
| | | | |
| 382.9MPa | 398MPa | 350.3MPa | 379.9MPa |
| 0.007s | 0.017s | 0.008s | 0.014s |

Fig. 8 Maximum stress of each part

4. 결론

가솔린 이륜차로 인해 발생하는 미세먼지를 저감하기 위해 다양한 충전형 전기 이륜차가 개발되었지만 짧은 주행거리와 긴 충전 시간이라는 단점으로 인해 사용자의 외면을 받고 있다. 따라서 본 논문에서는 이를 개선하기 위해 배터리 교환형 전기 이륜차 모델을 제안하였다. 기존 충전형 전기 이륜차 프레임 형상을 유지하면서 교환형 배터리 팩을 장착할 수 있도록 거치부 형상과 위치 및 충전 조절 장치 구조를 수정하였으며 정적 및 동적 해석을 통해 프레임의 안전성을 검증하였다.

정지 상태에서 프레임에 발생하는 최대응력은 재료의 항복강도보다 현저히 낮았으며 이륜차 내부에 장착된 쇼크업쇼마와 타이어로 인한 충격량

흡수를 고려한 동적 충돌해석을 통해 주행 평균 속도에서 프레임에 발생하는 최대응력이 시간에 따라 계속 변동하였지만 재료의 항복응력을 넘지 않음을 확인하였다. 또한 실제 제작을 통해 교환형 배터리 팩 장착이 가능함을 검증하였다. 따라서 본 논문에서 제안된 프레임 형상이 배터리 교환형 전기 이륜차에 적합하다고 판단된다.

후 기

“이 논문은 2017년도 서울형 R&D 지원사업(미세 먼지 저감 기술개발 지원사업, 2017FD17007)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Jang, Y. K., Kim, J., Kim, P. S., Shin, Y. I., Kim, W. S. and Choi, Y. J., “Estimation of Vehicle Kilometers Travelled and Air Pollution Emission from Motorcycles,” Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 26, No. 1, pp. 48-56, 2010.
2. Kim, K. C. and Shin, W. K., “Technological Trends of Electric Motorcycle,” The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 63, No. 11, pp. 32-40, 2014.
3. Lee, S. and Hwang, P., “Industrial and Technological Trends of Personal Mobility in Korea and Abroad,” Auto Journal, Vol. 37, No. 1, pp. 36-45, 2015.
4. Lee, S. H., Kim, T. Y. and Jung, T. W., “Industry and Principal Technology of Electric Motorcycle,” Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 28, No. 1, pp. 50-55, 2014.
5. Chun, S. Y., Seong, K. W., Park, H. I., Kim, I. S. and Kang, S. K., “Structure-Vibration Analysis of Electric Scooter Frame,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 1, pp. 116-121, 2016.
6. Lee, Y., Ha, S. Y. and Kwon, J., “Parametric Analysis for Structural Stiffness Enhancement of Motorcycle Frame,” Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 24, No. 5, pp. 612-617, 2016.
7. Childs, P., Mechanical Design Engineering Handbook, Elsevier, 2013.
8. Chae, S. W. and Jeong, J. H., “Development of a Finite Element Modeling System for Automobile Crash Analysis,” Annual Conference of The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, pp. 1177-1182, 1997.
9. Kang, K. H., Seo, K. S., Shin, D. P., Park, H. Y., Woo, H. K., Jeong, S. W. and Choi, B.I., “A Study on the Free Drop Impact Analysis for Concrete Storage Cask,” Autumn meeting of KNS2003, pp. 10, 2003.
10. Levy, M. and Smith, G. A., “Effectiveness of vibration damping with bicycle suspension systems,” Sports Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 99-106, 2005.