

# 유한요소해석 기반의 전동 킥보드 연결부 형상에 따른 구조적 안전성 분석

김민규\*, 김정진\*,#

\*계명대학교 기계공학과

## Structural Safety Analysis of Electric Kickboard According to Shape of Connection Parts Using Finite Element Analysis

Min Gyu Kim\*, Jung Jin Kim\*#

\*Department of Mechanical Engineering, Keimyung University .

(Received 06 October 2021; received in revised form 13 October 2021; accepted 19 October 2021)

### ABSTRACT

Electric kickboards are inviting attention as next-generation transportation systems with their number of users increasing rapidly every year. However, the number of related accidents similarly increases with the increase in the number of users. The purpose of this study is to analyze the structural safety of electric kickboards according to the shape of the connection parts. For this purpose, four different shapes of the connection parts, i.e., cube, cylinder, toroid, and divided cube were selected. Subsequently, the safety was analyzed based on the finite element (FE) analysis under the front collision scenario. The results showed that the shape of the divided cube induced the lowest von Mises stress and the highest safety factor amongst the four models. Moreover, only the shape showed a safety factor higher than 1. However, the shape of the cylinder exhibited the lowest structural vulnerability. These results demonstrate the importance of the shape of the connection part in maintaining the overall safety of an electric kickboard.

**Keywords:** Electric Kickboard(전동 킥보드), Finite Element Analysis(유한요소해석), Structural Safety(구조적 안전성)

### 1. 서 론

전기로 움직이는 교통수단인 스마트 모빌리티(Smart Mobility)는 차세대 교통수단으로 주목받고 있다. 특히 전동 킥보드는 대표적 1인승 교통수단(Personal Mobility, PM)으로 많은 관심을 받고 있다. 전동 킥보드는 기존 킥보드의 형태에 전동모터를

장착하여 구동되어, 가격이 저렴하고 이용이 편리하다는 장점이 있다. 최근에는 개인형뿐만 아니라 공유형 이동수단으로 확대 운영되고 있어 대학교나 변화가 주변에서 쉽게 찾아볼 수 있다. 더불어 전동 킥보드의 이용량 역시 최근 급격히 증가하고 있다<sup>[1]</sup>. 다만, 전동 킥보드 이용자가 증가하면서 관련 사고 역시 증가하고 있어 주의가 요구되는 상황이다.

일반적으로 전동 킥보드 관련 사고는 사용자의 운영에 인한 사고와 킥보드의 품질 불량으로 인한

# Corresponding Author : [kjj4537@gmail.com](mailto:kjj4537@gmail.com)

Tel: +82-53-580-5290, Fax: +82-53-580-5165

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사고로 구분할 수 있다. 운영에 의한 사고는 법규 제정을 통해 예방하고 있으나, 품질 문제로 인한 사고는 아직 명확하게 규정 및 예방되지 못하고 있다. 특히 품질 불량으로 인한 사고 사례는 전 세계적으로도 증가하고 있는 실정이다<sup>[2,3]</sup>. 따라서 전동 키펠드의 설계 및 품질 문제에 대한 관심과 연구의 필요성이 대두되고 있다.

최근 몇몇 연구자들에 의해 전동 키펠드에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. Mesicek<sup>[4]</sup>은 키펠드 프레임의 경량화를 위한 위상최적설계 및 3차원 프린팅 기술을 제안하였다. 천세영<sup>[5]</sup>은 탑승자 무게를 고려한 키펠드 프레임의 최소 두께 결정에 대한 연구를 진행하였다. 최계광<sup>[6]</sup>은 구조해석을 통해 전동 키펠드의 보강 필요성을 제시했다. Fadzly<sup>[7]</sup>는 인체 공학적 측면에서 키펠드의 구조를 분석하고 새로운 설계안을 제시하였다. Hwang<sup>[8]</sup>은 동적해석 기반의 키펠드 안전성 개선 방법을 제시하였다. 다만, 위 연구자들의 기여에도 불구하고 아직까지 전동 키펠드의 대표적 파손 부위인 핸들 지지대와 발판의 연결 부분에 대한 구조해석 연구는 미비한 상황이다.

이에 본 연구는 전동 키펠드 연결부 형상에 따른 구조적 안전성 분석을 목표로 한다. 이를 위해 본 연구는 먼저 시중에서 판매 및 운영되고 있는 대표 모델과 연결부 형상을 선정하였다. 그리고 구조적 안전성을 정면충돌 시나리오 아래 최대 응력 분포와 안전율을 통해 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구 모델 선정

본 연구에서는 연구 모델로 Segway-Ninebot의 Ninebot Max(G30)를 선정하였다. 크기는 높이 1,203mm, 길이 1,167mm, 폭 472mm이며 몸무게 100kg의 성인이 탑승할 수 있다. 10인치 타이어로 최대 25km/h의 속도로 운영 가능하며, 무게는 19kg이다. Fig. 1은 Ninebot MAX(G30)의 주요 치수와 본 연구에서 사용한 3차원 CAD 모델을 나타낸다.

본 연구의 목적은 전동 키펠드에서 대표적 파손 부위인 핸들 지지대와 발판의 연결부 형상에 따른 안전성 분석이다. 이 목적을 위해 4개의 각기 다른 연결부 형상을 가지는 모델들을 생성하였다(Fig. 2).

첫 번째 모델(Model A)은 Ninebot MAX(G30)와 동일한 모델로, 연결부 형상은 50×60mm 크기의 입방체형이다. 모서리 부분은 10mm로 모따기가 수행되었다. 두 번째 모델(Model B)은 Xiaomi Mijia 1S 모델의 원통 형상 연결부를 가진다. 원형의 직경은 50mm로 핸들 지지대의 직경과 동일하다. 세 번째 모델(Model C)은 Minimotors Dualtron eagle의 토로이드형 연결부를 가진다. 토로이드는 앞바퀴 축을 중심으로 회전한 형태이며 단면은 Model A와 동일하다. 모델(Model D)의 연결부는 Model A의 연결부를 2개로 분할한 형태이다. 2개의 분할된 연결부 단면의 크기는 50×30mm(5mm 모따기)로 동일하다. 단면 간의 간격은 20mm이다. 2개의 연결부는 각각 발판부의 윗면과 앞면에 연결되도록 모델링하였다. 본 연구에서 4개의 연결부들은 모두 5mm두께의 중공 구조를 가진다.

연결부 외 전체적인 모델의 형상 및 치수는 Ninebot MAX(G30)와 동일하다. 발판의 길이, 높이, 폭은 각각 760mm, 90mm, 180mm이며, 핸들의 길이와 직경은 각각 480mm와 30mm이다. 핸들 지지대는 700mm의 길이와 50mm의 직경을 가진다. 앞서 언급하였던 핸들 지지대와 핸들은 동일한 두께를 가지는 중공 구조이다.

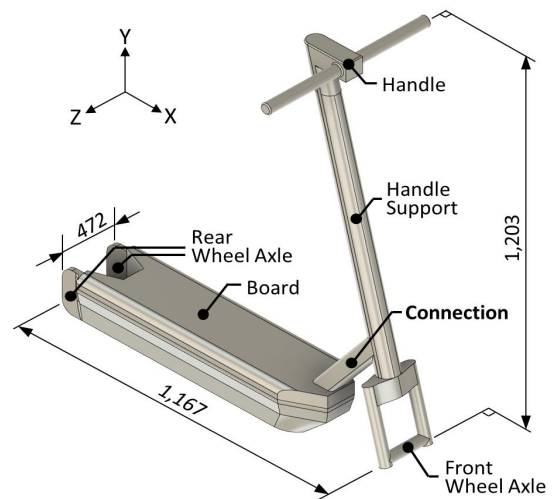


Fig. 1 Detailed specifications of electric kickboard (Ninebot MAX)

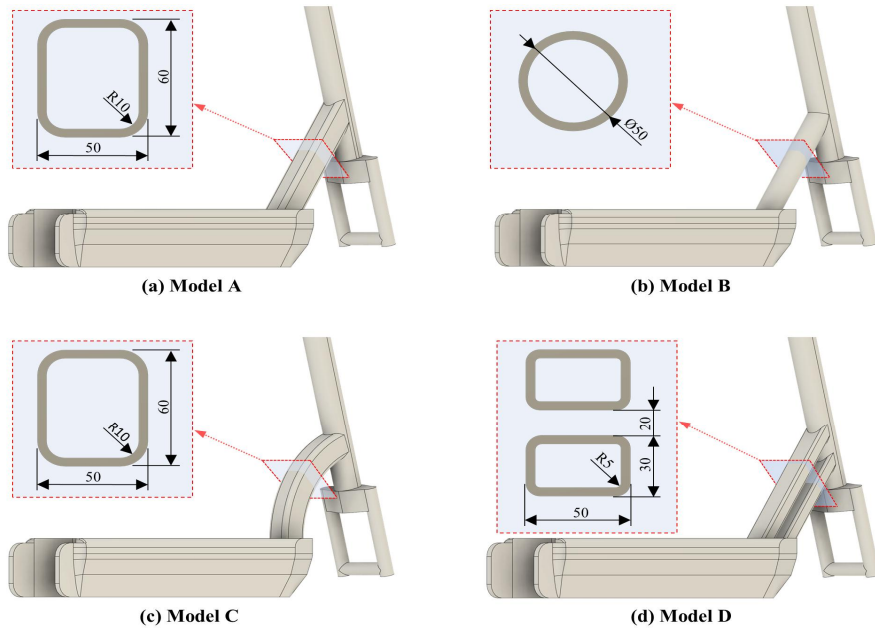


Fig. 2 Shapes of connection for electric kickboard: (a) cube, (b) cylinder, (c) toroid, and (d) divided cube

## 2.2 유한요소해석 기반 구조적 거동 분석

본 연구에서는 유한요소해석 상용소프트웨어인 ANSYS 2021 R2의 Workbench를 사용하여 4가지 모델에 대한 구조적 거동을 분석하였다.

이를 위해 먼저 4가지 모델들을 2차원 셸(Shell) 요소와 3차원 육면체 요소로 구성하였다. 핸들부와 앞바퀴부는 ANSYS의 Hex Dominant 기능을 활용하여 5mm 크기의 육면체 요소로 구성하였다. 그 외 나머지 부분은 Quadrilateral Dominant 기능을 활용하여 3mm 크기의 셸 요소로 구성하였으며 두께는 5mm로 설정하였다. Table 1은 각 모델에 대한 유한요소모델의 총 절점 수(평균 15만 개)와 요소 수(평균 9만 개)를 나타낸다. 유한요소모델의 평균 무게는 12kg이다. 본 연구에서는 구조적인 거동에 영향이 적은 바퀴, 모터, 배터리, 전자장치들을 고려하지 않았다.

각 요소에는 알루미늄 합금의 물성치(Young's Modulus: 71.00GPa, Poisson's Ratio: 0.33, Yield Strength: 280.00MPa)를 부여하였다.

전동 키보드의 정면충돌 시나리오는 발판에 981N( $F_{weight}$ ) 크기의 하중과 앞바퀴 축에 8332.80N

( $F_{impact}$ ) 크기의 하중을 부여하여 구현하였다.  $F_{weight}$ 는 탑승자 질량을 무게로 변환한 하중이다.  $F_{impact}$ 는 101kg의 탑승자가 최대 속도 25km/h로 운영 중 0.1초의 충돌이 일어나는 상황을 가정하여 충격량-운동량 보존의 법칙으로 계산되었다(식(1)).

$$|F_{impact}| = \frac{(101 [kg] + 19 [kg]) \times 25 [km/h]}{0.1 [s]} = 8332.8N \quad (1)$$

경계 조건은 앞바퀴 축에 롤러(Roller) 조건과 뒷바퀴 축에 고정(Fixed) 조건을 부여하였다(Fig. 3). 해석은 개인용 PC(CPU: AMD RYZEN 3700X, GPU: GEFORCE 1660, RAM: 8GB)를 이용하여 수행하였으며, 해석에 평균 110초가 소요되었다.

Table 1 Major composition information about the four finite element models

	Number of Nodes	Number of Elements	Mass [kg]
Model A	154,736	92,223	12.144
Model B	152,118	90,538	12.006
Model C	154,805	92,830	12.197
Model D	156,920	94,806	12.432

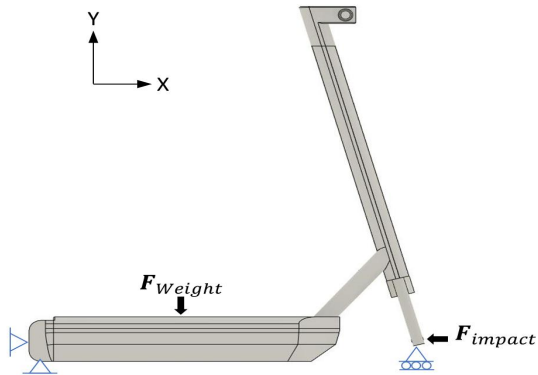


Fig. 3 Loading and boundary conditions for front collision of electric kickboard

### 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 4와 Fig. 5는 4개의 모델들의 응력 분포와 안전율을 보여준다. Model D를 제외한 모델들에서 공통으로 핸들 지지대와 발판 사이의 연결부 하단에서 최대 응력이 발생하였다. 이는 정면충돌로 인한 충격이 연결부에 집중되어 파손될 수 있음을 의미하며, 킥보드 내에서 기하학적 구조의 급격한 변화로 인한 결과로 생각할 수 있다. 더불어 최대 응력 발생 부위는 실제 전동 킥보드의 대표적 파손 부위와도 일치한다. 이러한 사실은 본 연구의 구조 해석이 실제 사례를 모사할 수 있도록 바르게 수행되었음을 의미한다.

Table 2는 정면충돌 시 연결부 형상별 최대 응력과 최소 안전율을 보인다. 시중에 판매 중인 연결부 형상을 가진 모델(Model A-C) 중 토로이드형 모델(Model C)이 가장 낮은 최대 응력(381MPa)을 가졌다. 이는 토로이드 형상이 정면충돌 시 발생하는 굽힘 응력(또는 하중)을 잘 분산시켰음을 말한다. 다만, 최소 안전율이 1 이하로 충돌에 대한 파손의 위험성은 나머지 2개 모델(Model A, B)과 동일하게 높은 문제점을 가진다.

4개의 모델들의 응력을 비교하면, 원통형 모델(Model B)이 가장 높은 응력(426MPa)을 보였으며, 분할된 입방체형(Model D)이 가장 낮은 응력(260MPa)을 보였다. 이 결과는 정면충돌로 인한 응력이 분할된 2개의 연결부로 적절히 분산되어 발생

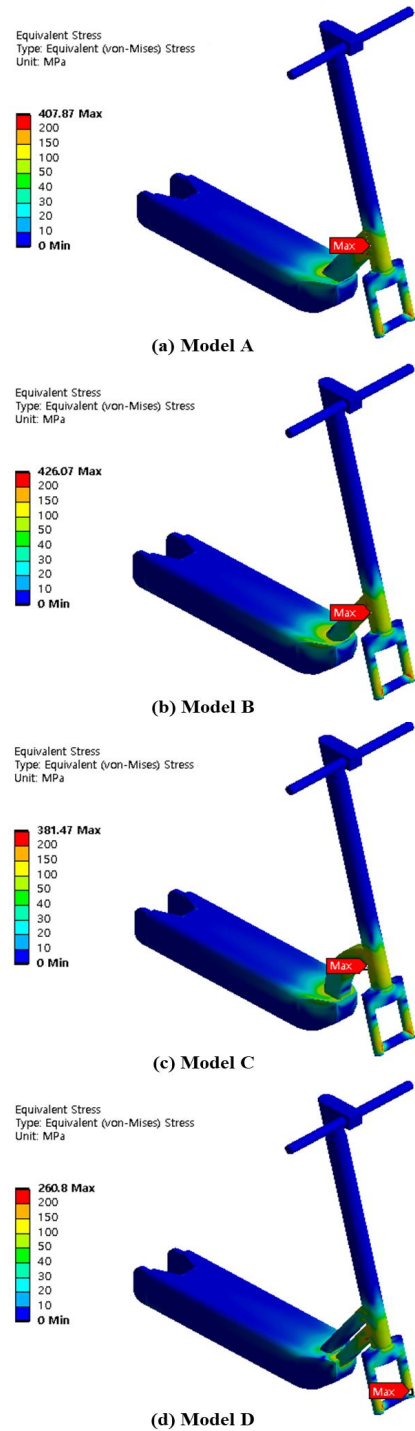


Fig. 4 Comparison of Von-Mises stress

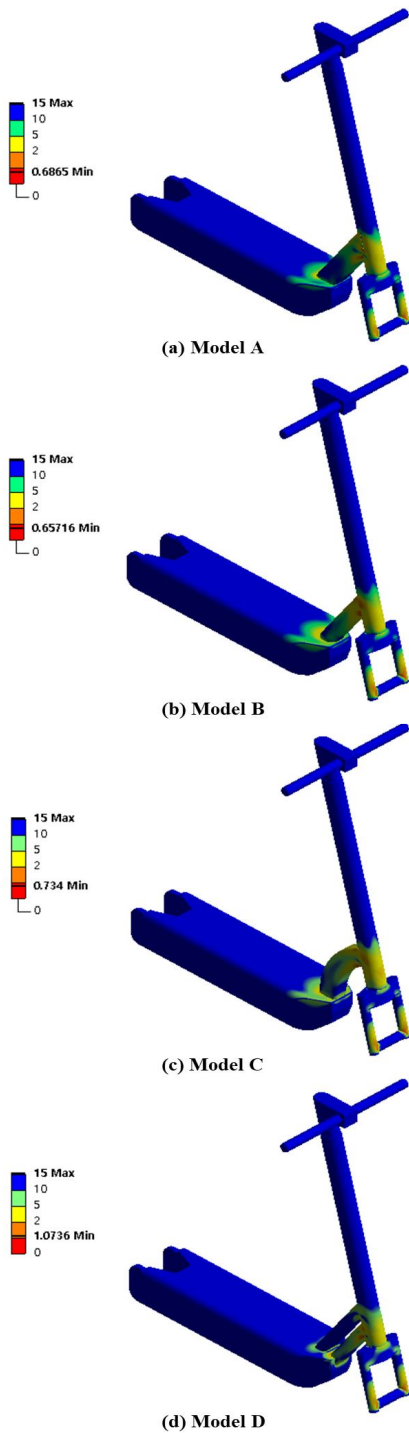


Fig. 5 Comparison of safety factors

Table 2 Von-Mises stress and safety factor

	Maximum Von-Mises stress [MPa]	Minimum safety factor
Model A	407.87	0.68
Model B	426.07	0.65
Model C	381.47	0.73
Model D	260.80	1.07

현상으로 생각할 수 있다. 그리고 분할된 입방체형의 모델만 유일하게 동일한 하중조건에서 1 이상의 안전율을 보였다. 더불어 앞서 언급하였듯 최대 응력 발생 위치가 나머지 모델들과 달리 앞바퀴 축 주변으로 변경되었음을 확인하였다. 이러한 사실들은 연결부 형상에 따라 구조적 안전성이 개선될 수 있으며, 안전사고 예방을 위해 설계 시 연결부 형상에 대한 고려가 필수적임을 의미한다.

본 연구는 다음과 같은 한계점을 가진다. 첫째, 정면충돌 시 탑승자의 체중 이동으로 인한 하중을 고려하지 않았다. 둘째, 본 연구는 안전성에 영향을 미칠 수 있는 연결부 두께에 따른 구조적 거동을 분석하지 않았다. 셋째, 연결부 형상 맞춤형 키펀드 구조를 고려하지 않고, 연결부 외의 구조들을 모든 모델에서 동일하게 설정하였다. 그럼에도 불구하고, 본 연구의 목표인 연결부 형상별 구조적 안전성을 성공적으로 비교 분석하였다. 본 연구의 결과들을 바탕으로 위 한계점을 극복할 수 있는 추후 연구가 진행되기를 기대한다.

#### 4. 결론

본 연구는 전동 키펀드의 핸들 지지대와 발판의 연결부 형상에 따른 구조적 거동을 분석하였다. 정량적 분석을 위해 입방체형, 원통형, 토로이드형, 분할된 입방체형의 정면충돌 시 안전성을 평가하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정면충돌 시 입방체형, 원통형, 토로이드형 모델은 연결부에서 모두 최대 응력 및 최소 안전율이 발생하였으며, 토로이드형 모델이 3가지 모델 중 가장 낮은 응력을 보였다.

2. 분석된 4가지 모델 중 분할된 입방체형 모델이 가장 낮은 응력과 1 이상의 최소 안전율을 보였다. 이는 연결부 형상에 따라 구조적 안전성이 개선될 수 있음을 의미한다.
3. 전동 키보드의 안전사고 예방을 위해서는 설계 시 연결부 형상에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

## 후 기

“본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 디지털 신기술 인재양성 혁신공유대학사업의 연구 결과입니다.”

## REFERENCES

1. Kim, S. J., Lee, G. J., Choo, S. H. and Kim, S. H., "Study on Shared E-scooter Usage Characteristics and Influencing Factors," Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems, Vol. 20, No. 1, pp. 40~53, 2021.
2. Trivedi, T. K., Liu, C., Antonio, A. L. M., Wheaton, N., Kreger, V., Yap, A., Schriger, D. and Elmore, J. G., "Injuries Associated With Standing Electric Scooter Use," Journal of the JAMA Network Open, Vol. 2, Issue. 1, pp. 1~9, 2019.
3. Bekhit, M. N. Z., Fevre, J. L. and Bergin, C. J., "Regional healthcare costs and burden of injury associated with electric scooters," Journal of the Injury, Vol. 51, Issue 2, pp. 271~277, 2020.
4. Mesicek, J., Jancar, L., Ma, Q. P., Hainys, J., Tanski, T., Krpec, P. and Pagac, M., "Comprehensive View of Topological Optimization Scooter Frame Design and Manufacturing," Journal of the Symmetry, Vol. 13, Issue 7, pp. 1~14, 2021.
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, Issue 1, pp. 116~121, 2016.
6. Choi, K. K. and Cho, J. U., "A Study on Structural Analysis at Front Collision According to the Shape of Electric Kick Board," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 22, No. 3, pp. 457~462, 2020.
7. Fadzly, M. K., Munurah, A., Shayfull, Z. and Saad, M. S., "Ergonomic study and static analysis for new design of electric scooter," Journal of the AIP Conference Proceedings, Vol. 1885, Issue. 1, 2017.
8. Hwang, Y. L. and Cheng, J. K., "The Dynamic Analysis and Simulation of Electric Scooter," Journal of the Applied Mechanics and Materials, Vol. 479~480, pp. 365~368, 2014.