

계단 이동이 가능한 전동휠 구조 설계에 관한 연구

A Study on the Design of an Electric Wheel Structure Capable for Moving Stairs

배진용*† · 이상국**
Jin-Yong Bae*† and Sang-Guk Lee**

(Received 21 February 2022, Revision received 15 June 2022, Accepted 15 June 2022)

Abstract : In this paper, we would like to report the advanced structure of electric-powered wheel that can go upstairs or downstairs. One of the reasons of electric wheelchair accidents that occur recently is the rollover accident from wheel jamming at a step or stairs. Commercially available electric-powered wheels have a serious problem with malfunctioning of electric wheels. When the gap or step difference is larger than 5 cm, the electric wheel is not working properly. We have intensively investigated this matter by using a variable track wheel method rather than the conventional triangular wheel method that had been studied mostly in the past. We have engineered a prototype electric wheel with a variable track wheel which is tested at various conditions. Our result shows that the performance of the electric-powered wheel with variable track wheel is stable for both of flatland and stairs due to the contracting action of actuator.

Key Words : Electric wheel, Moving stairs, Variable track wheel, Support plate, Actuator

1. 서 론

기후온난화 및 미세먼지 저감을 위한 대안으로서 가정용 220 V의 전원으로 충전을 통하여 수 내지 수십 km의 이동이 가능한 친환경 모빌리티 (Mobility)에 대한 관심이 증가하고 있다.^{1,2)} 특히 친환경 모빌리티의 대부분을 차지하는 전동휠 이동에 있어서 큰 문제점은 단지 5 cm의 단차 이동이 어렵다는 한계점이 있었으며, 이의 해결을 위한 다각적인 노력이 진행되어 왔다.³⁻²⁰⁾ 전동휠에

서 이러한 단차(段差)에 대한 한계점을 극복하기 위한 가장 대표적인 방법으로 삼각휠(Triangular wheel)을 전동휠의 앞바퀴와 뒷바퀴에 모두 배치하는 방법에 대한 연구가 본격적으로 진행되었다.³⁻⁷⁾ 이와 같이 삼각휠을 전동휠에 앞바퀴와 뒷바퀴에 모두 배치하는 경우, 일반적인 규격의 계단 및 단차의 이동은 가능하지만, 평지에 대한 이동성은 상당히 떨어지며, 계단의 폭이 매우 넓거나 매우 좁은 경우에 이동성이 떨어지는 한계점 있다.³⁻⁷⁾ 이를 보완하기 위하여 앞바퀴 및 뒷바퀴

*† 배진용(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0554-3621>) : 교수, 동신대학교 전기자동차학과
E-mail : bjy@dsu.ac.kr, Tel : 061-330-7652
**이상국(ORCID:<https://orcid.org/0000-002-5324-2471>) : 겸임교수, 동신대학교 전기자동차학과

*† Jin-Yong Bae(ORCID:<https://orcid.org/0000-0003-0554-3621>) : Professor, Department of Electric Vehicle Engineering, Donshin University.
E-mail : bjy@dsu.ac.kr, Tel : 061-330-7652
**Sang-Guk Lee(ORCID:<https://orcid.org/0000-002-5324-2471>) : Adjunct Professor, Department of Electric Vehicle Engineering, Donshin University.

중에서 특정(特定) 바퀴에 레일(Rail)을 나머지 특정(特定) 바퀴에 삼각휠을 배치하는 방식이 제안되었으며, 이는 계단의 이동성에 대한 성능은 보다 향상되지만 레일을 사용함을 통하여 평지 이동성능은 매우 나빠지는 단점이 있다.^{8,9)} 그리고 삼각휠 방식은 계단의 이동에 안전성이 떨어지므로 보다 안정적으로 계단 이동을 위하여 삼각휠을 사용하지 않고 레일(Rail) 기반의 전동휠이 제안되었으며,¹⁰⁻¹²⁾ 레일과 바퀴를 결합하여서 로봇의 이동성을 보다 향상시키는 방법이 공개되기도 하였다.^{13,14)} 아울러 평지의 이동성 및 계단의 이동성을 동시에 향상시키는 방법으로 평지에서는 원형의 바퀴를 형성하고, 계단의 이동 시 반원형의 바퀴로 변형시키는 로봇이 제안되었고,^{15,16)} 계단의 이동을 더욱 개선시키는 로봇으로 십자(+) 형상의 바퀴가 제안된 바 있다.¹⁷⁾ 또한 계단, 분균일한 지반 및 울퉁불퉁한 지역의 이동을 위하여 3개 / 4개 / 6개의 바퀴의 이동형 로봇이 제시되었다.¹⁸⁻²⁰⁾ 현재까지의 연구들에서 계단을 이동하는 전동휠에서는 삼각휠은 계단의 높이와 폭이 균일하지 않는 경우 이동 시 한계가 있을 뿐만 아니라 안정성이 떨어지며, 레일의 경우 계단에서 이동성 및 안정성이 상대적으로 우수하지만 마찰력으로 인하여 평지 이동이 나쁜 단점들이 있다.

따라서 본 연구에서는 계단 이동의 안정성을 높이며 동시에 평지에서 이동성을 향상시키기 위한 다양한 설계 방법론의 연구를 통하여 계단 이동 시 안정성과 함께 평지 이동성능의 향상을 극대화하는 전동휠 바퀴 구조의 최적 설계 방법에 대하여 제안하고자 한다.

2. 기존의 전동휠 구조

Fig. 1은 기존의 삼각휠 기반 전동휠 구조를 나타낸다.³⁾ 이러한 구조는 앞바퀴에 비교적 작은 구조의 삼각휠을 배치하고 뒷바퀴는 앞바퀴와 비교하여 상대적으로 큰 삼각휠을 배치하는 것을 특징으로 한다. 하지만 계단의 폭에 따른 삼각휠의 이동성이 떨어짐으로 인하여 계단 이동이 안정하지 못하고, 90°로 각진 부분의 마찰력이 떨어지는

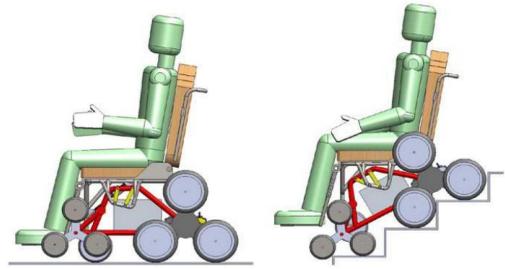


Fig. 1 Triangular wheel-based electric wheel

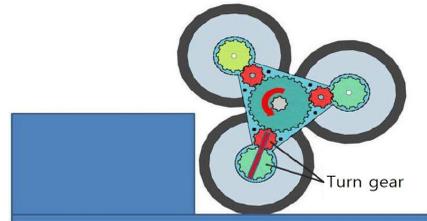


Fig. 2 Structure of triangle wheel

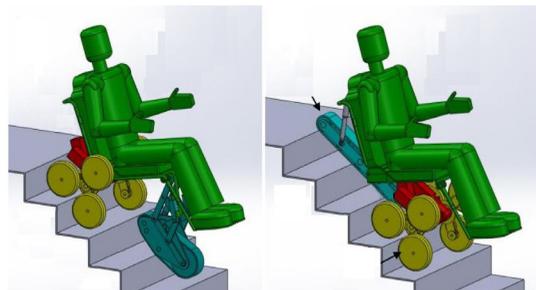


Fig. 3 Electric wheel combined with triangular wheel and rail

경우 전동휠이 미끄러지는 경우가 발생한다는 문제점이 있었다.³⁾

Fig. 2는 삼각휠의 세부적인 기어 구조를 나타낸다.³⁾ 이러한 삼각휠의 기어는 정지된 바퀴 기어와 방향 전환 기어가 배치되어 있으며, 계단을 이동하기 위하여 토크가 많이 걸리므로 여기에 사용되는 모든 기어는 매우 강한 재료적 특성이 요구된다.

Fig. 3은 삼각휠 기반 전동휠 구조³⁾를 기본적으로 개선하고, 계단 이동 시 미끄럼 방지로서 안전성을 더욱 개선한 삼각휠과 레일을 결합한 전동휠을 제안하였다.⁸⁾

이렇게 삼각휠과 레일을 결합한 전동휠의 경우 계단의 이동성 및 안전성을 비교적 우수하지만, 평지의 이동성능은 레일의 마찰력 증대로 인하여 매우 불리하며, 작은 단차 또는 장애물을 만나도 평지 이동성능이 급격하게 떨어진다는 한계점을 가지고 있다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 가변 바퀴 기반의 로봇을 나타낸다. 이러한 바퀴는 평지 이동 시 원형의 바퀴를 가지므로 평지 이동성이 매우 우수하다.

아울러 계단 이동 시에는 변형된 형상의 바퀴를 가지는 것을 특징으로 한다.^{15,16)} Fig. 4와 같이 설계되는, Chen¹⁵⁾은 반원으로 바퀴가 변화하며, Fig. 5와 같이 설계되는, Mostyn¹⁶⁾은 바람개비 형상으로 바퀴가 변화하는 것을 제안하였다.

하지만 이러한 가변 바퀴는 사람이 타고 이동하는 전동휠에는 바퀴가 무거운 하중을 견딜 수

없는 구조로 인해서 적합하지 않으므로 가벼운 이동용 로봇에서만 사용할 수 있는 근본적인 한계점을 가지고 있다.

3. 가변 궤도바퀴 기반 전동휠 설계

본 연구에서는 단차(段差) 또는 계단을 원활하게 이동이 가능한 사람이 탈 수 있는 전동휠을 Fig. 6과 같이 설계 및 제안하였다.

Fig. 6은 계단 이동이 가능한 전동휠의 설계도를 나타내며, Fig. 7은 평지 이동 시 바퀴 운동의 개념도를 각각 나타내었다. Fig. 8은 비포장 도로의 이동 시 바퀴 운동의 개념도를 나타낸다.

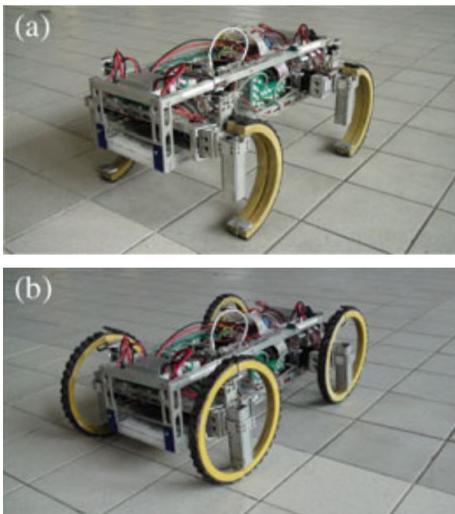
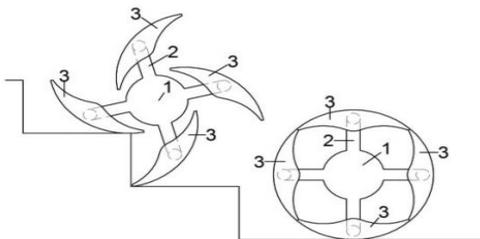


Fig. 4 Variable wheel based robot



(1: Central axis 2: Support 3: Variable wing)

Fig. 5 Variable wheel based robot

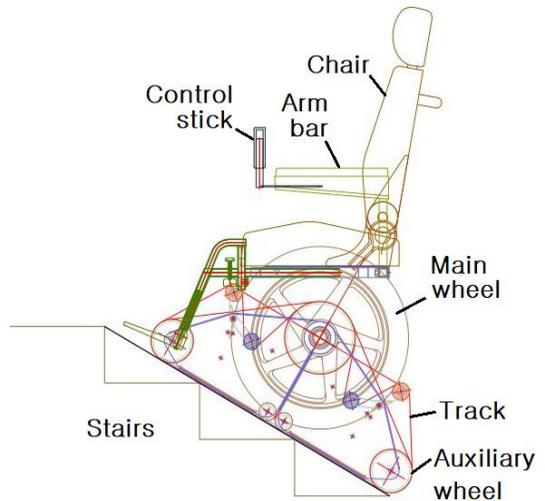


Fig. 6 Schematic of the proposed electric wheel for stair movement

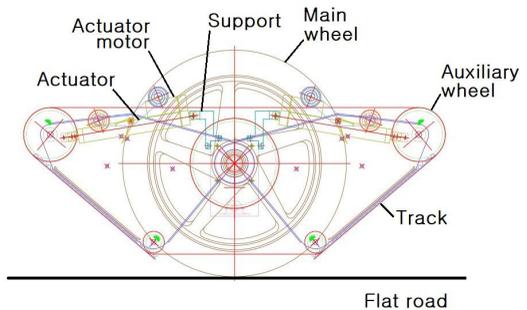


Fig. 7 Concept diagram for moving wheel on flat ground

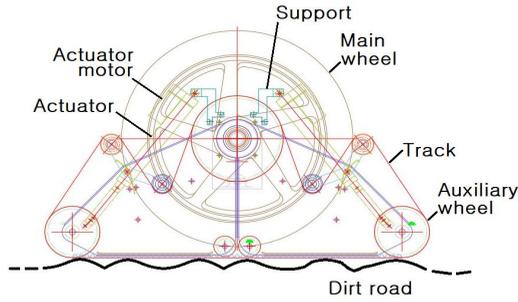


Fig. 8 Concept diagram when moving wheel on dirt road

본 연구 대상의 전동휠은 단차(段差) 또는 계단의 이동 시 이동하는 사람이 안정적으로 이동하기 위하여 무게 중심이 최대한 앞바퀴로 배치하는 것이 바람직하다. 이를 위하여 궤도 바퀴의 형상 및 위치를 변화시키는 2개의 지지판을 설계했으며, 이는 액추에이터에 의해서 그 형상을 변화시키도록 하였다.

본 연구에서 제안된 전동휠이 평지 이동 시 2개의 지지판은 나비 모양의 형상으로 변경되며, 주 바퀴가 궤도 바퀴보다 아래로 배치되므로 주 바퀴를 통해서 전동휠의 이동이 가능하도록 설계하였다. 아울러 단차(段差) 또는 계단을 이동하는 경우, 나비 모양 형상의 2개의 지지판은 하나로 합쳐짐을 통해서 궤도 바퀴가 주 바퀴보다 아래로 배치되고, 궤도 바퀴를 통해서 계단을 이동하므로 계단 이동 시 안전성을 개선시키는 특징이 있다.

4. 제안된 전동휠의 안전한 계단 이동을 위한 모터 토크 설계

제안된 전동휠의 설계에서는 모터의 힘과 다음과 같은 토크 모델을 기반으로 식 (1)을 바탕으로 설계하였다.

$$T_M \geq T_{fri} + T_{gra} + T_{ine} \quad (1)$$

여기서,

T_M : 전동휠 모터에서 발생되는 토크 [Nm]

T_{fri} : 전동휠 이동 시작 시 마찰 토크 [Nm]

T_{grv} : 전동휠의 중력보상 토크 [Nm]

T_{ine} : 전동휠의 관성보상 토크 [Nm]

전동휠의 모터에서 발생하는 토크는 전동휠 이동 시작 시 마찰 토크와 전동휠 중력 보상 토크와 전동휠의 관성보상 토크보다 크게 설계하는 것이 필요하다.

$$T_{fri} = \frac{d\varphi}{dt} G_B \quad (2)$$

여기서,

$\frac{d\varphi}{dt}$: 전동휠 이동 시 각속도

G_B : 마찰보상 상수

$$T_{grv} = \mu R W_t \cos \theta \quad (3)$$

여기서,

μ : 마찰상수

R : 레일(Rail)이 지면에 닿는 길이 [m]

W_t : 전동휠 및 사람의 전체 무게 [kg]

θ : 이동 경사의 각도 [deg]

$$T_{ine} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} G_C \quad (4)$$

여기서,

$\frac{d^2\varphi}{dt^2}$: 전동휠 이동시 가속도

G_C : 관성보상 상수

모터의 출력과 토크는 다음과 같은 관계 식을 갖는다.

$$P = T_{M0} \cdot \omega \quad (5)$$

$$P = T_{M0} \cdot \frac{2\pi n}{60} \quad (6)$$

여기서,

P : 전동휠 모터의 출력 [W]

T_{M0} : 감속기가 없는 전동휠 모터의 토크

[Nm]

T_M : 감속기를 포함하는 전동휠 모터의 토크

[Nm]

ω : 각속도 [rad/sec]

n : 분당 모터의 회전수 [rpm]

식 (6)으로부터 감속기가 없는 전동휠 모터에서 토크 T_M 은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{M0} = \frac{P \cdot 60}{2 \pi n} \quad (7)$$

제안된 전동휠에서 안전한 계단 이동을 위하여 설계 시 충분한 모터의 토크가 필요하다. 따라서 감속기의 도입으로 인하여 전동휠의 토크를 크게 하는 것이 필수적이다.

전동휠 모터의 토크를 더욱 극대화하기 위하여 2단 기어 기반의 감속기를 부착하였으며, 속도 전달비(k)는 식 (8)에 의해서 설계할 수 있다.

$$k = \frac{Z_1}{Z_2} \times \frac{Z_3}{Z_4} = \frac{n_2}{n_1} \times \frac{n_4}{n_3} \quad (8)$$

여기서,

k : 전체 속도 전달 비

Z_1 내지 Z_4 : 제1 내지 제4 기어 톱니 수

n_1 내지 n_4 : 제1 내지 제4 속도 전달 비

감속기를 포함하는 실질적인 전동휠 모터의 토크 T_M 는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_M = \frac{P \cdot 60}{2 \pi n k} \quad (9)$$

따라서 전동휠 모터의 출력(P)은 충분히 크며, 회전속도(n)는 충분히 낮으며, 더불어 토크의 향상을 위하여 감속기의 속도 전달비(k)는 충분히 낮게 설계하는 것이 바람직하다.

무엇보다 계단의 이동에서 충분히 안정적인

이동을 위하여 식 (1)은 다음의 식 (10)과 같이 고려하는 것이 바람직하다.

$$T_M \geq 2 (T_{fri} + T_{gra} + T_{ine}) \quad (10)$$

전동휠의 안정적인 이동을 위해서 전동휠 모터에서 발생하는 토크(T_M)는 전체 필요 토크의 2 배 이상으로 충분하게 설계하는 것이 필수적이며, 전동휠이 계단을 이동하는데 충분하게 힘을 발휘할 수 있으며 안정적으로 이동할 수 있다.

실험에 사용된 전동휠의 모터는 브러시리스 직류(BLDC) 모터로서 1,000 W, 12 극, 300 rpm의 전동휠 모터를 사용하였으며, 전동휠의 속도 전달비(k)는 0,0416(=24:1)의 감속비를 갖는 것으로 설계하였다. 브러시리스 직류(BLDC) 모터는 토크를 기반으로 인버터(Inverter)에서 제어되며, 식 (7)에 의해서 감속기가 없는 전동휠 모터의 토크 $T_{M0} = 31.831$ Nm로 계산되었다.

이에 감속기의 속도 전달비(k)를 고려하여 식 (8),(9)에 의해서 감속기를 포함하는 실질적인 전동휠 모터의 토크 $T_M = 763.944$ Nm로 설계하였다.

일반적인 건물에 사용되는 표준계단은 높이 $a = 175$ mm, 폭 $b = 270$ mm를 기반으로 한다. 따라서 건물의 표준계단의 각도는 식 (11), (12)와 같이 계산할 수 있다.

$$\cos \theta = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} = 0.839 \quad (11)$$

$$\theta = \cos^{-1}(0.839) = 32.965^\circ \quad (12)$$

따라서 계단 이동을 위한 전동휠의 등판각도는 최소 32.965° 이상이 되도록 설계하는 것이 필수적이다.

또한 식 (3)으로부터 마찰상수 $\mu = 1.2$, 레일(Rail)이 지면에 닿는 길이 $R = 1.4$ m, 전동휠 및 사람의 전체 무게 $W_t = 160$ kg 및 식 (11)로부터 $\cos \theta = 0.839$ 를 고려하며, 식 (3)으로부터 전동휠의 중력보상 토크 $T_{grv} = 225.523$ Nm로

설계할 수 있었다.

전동휠 이동 시작 시 마찰 토크(T_{fri})와 전동휠의 관성보상 토크(T_{ine})의 크기를 명확하게 설정하기가 매우 어렵지만, 전동휠 이동 시 마찰 토크와 전동휠 중력 보상 토크와 전동휠의 관성보상 토크의 합은 식 (13)과 같을 것으로 예측된다.

$$T_{fri} + T_{gra} + T_{ine} \cong 310 \sim 350 \text{ Nm} \quad (13)$$

따라서 식 (9)를 바탕으로 감속기를 포함하는 실질적인 전동휠 모터의 토크 $T_M = 763.944 \text{ Nm}$ 이고, 전동휠 이동시 필요 토크는 식 (13)에 의해서 $T_{fri} + T_{gra} + T_{ine} \cong 310 \sim 350 \text{ Nm}$ 이므로 식 (10)의 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

이를 통하여 산출 및 설계한 전동휠의 세부 항목은 다음과 같다.

전동휠 크기 : 1200 × 960 × 1150 mm

전동휠 무게(배터리 포함) : 82 kg

이동속도(평지) : 최대 8 km/h

주행거리 : 최대 20 km/h

등판각도 : 최소 33 deg

5. 전동휠 제작 및 계단 이동 실험

Fig. 9는 본 연구에서 제안된 휠체어 제작을 위한 전동휠의 세부적인 부품들을 각각 나타내며, Fig. 10은 제작하여 완성된 전동휠을 각각 나타내었다. Fig. 9에서 세부적인 부품의 치수는 전동휠



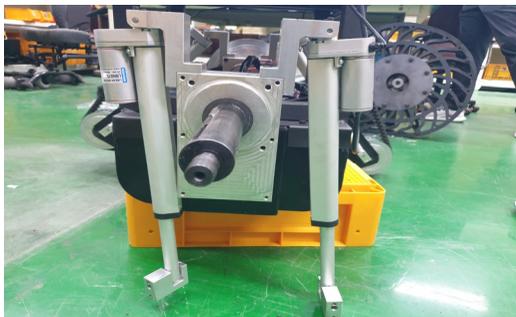
(b) Variable raceway gears and parts



(c) support plate



(d) Assembled gear unit and track wheel



(a) Body part



(e) wheels for moving on flat ground



(f) Assembled gear unit (g) manufactured control unit
 Fig. 9 Electric wheel parts for the production of the proposed wheelchair



Fig. 12 Wheel photo when moving stairs



Fig. 10 Electric wheel for moving stairs



Fig. 13 Photo of electric wheel when moving stairs



Fig. 11 Wheel photo when moving on flat ground

과 사람의 전체 무게와 계단 및 비포장 도로의 주행에서도 안정적인 지지강도를 나타내기 위해서 5 mm 이상의 강판을 기반으로 설계하였다.

Fig. 11은 평지 이동시 바퀴 사진, Fig. 12는 계단 이동 시 바퀴 사진을 각각 나타내었다. 그리고 Fig. 13은 계단 이동 시 전동휠의 사진이며, 20 cm



(a) Electric wheel for step movement



(b) Climbing angle

Fig. 14 Calculation of the slope angle of the manufactured electric wheel

단차도 무난하게 이동할 수 있으며, Fig. 14에 최종 설계된 전동휠의 등판 각도의 계산 항목을 표시하였다.

모터 및 배터리에서 전동휠 구동을 위해서 발생하는 동력도 필요 출력에 2배 이상으로 제작하였다. 주 바퀴(Main wheel)의 경우 주행 안정성을 위하여 폭이 800 mm의 타이어로 제작하였으며, 전동휠은 계단을 이동하기 위하여 등판 각도가 35° 이상으로 이동할 수 있도록 액추에이터를 장착하고 제어부에서 이를 조절할 수 있도록 설계하였다.

Fig. 9 내지 Fig. 14를 통하여 최종적으로 제작된 전동휠의 유용성을 확인하였다.

공인시험을 통하여 등판 각도(θ)의 계산은 다음의 식 (14)와 같이 확인할 수 있었다.

- 앞면 또는 뒷면길이(a) = 420 mm

- 높이(b) = 250 mm

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{250}{420}\right) = 36.53^\circ(14)$$

따라서 본 연구에서 제안된 계단 이동이 가능한 전동휠은 36.53°의 등판 각도를 보이며, 일반적인 건물에 사용되는 표준계단의 등판 각도인 식 (12)의 32.965° 이상이 되므로 단차(段差) 또는 계단의 이동이 가능하고, 동시에 평지의 이동성능이 양호함을 시험을 통해서 확인 및 예측할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문은 단차(段差) 또는 계단 이동성능이 우수한 전동휠 구조를 새롭게 설계하여 제안하였다. 설계된 전동휠은 도로 및 평지 이동 시 2개의 지지판은 나비 모양의 형상으로 변경하였으며, 주 바퀴가 궤도 바퀴보다 아래로 배치되도록 설계하여 주 바퀴를 통해서 전동휠의 이동이 가능하도록 하였다. 아울러 단차 또는 계단을 이동하는 경우, 나비모양 형상의 2개의 지지판은 하나로 합쳐짐을 통해서 궤도 바퀴가 주 바퀴보다 아래로 배치하여 설계되고, 궤도 바퀴를 통해서 단차를 이동하는 특징을 가지고 있다. 따라서 본 연구를 통

하여 설계 제안된 전동휠은 등판 각도(θ)가 36.53°로 매우 양호한 등판 각도를 유지하며, 계단 및 단차 이동의 안전성이 향상되고 동시에 평지 이동을 빠르게 할 수 있는 새로운 전동휠 구조로이며, 모터 토크 설계 및 실제 계단 이동을 실험을 통하여 그 유용성을 확인하였다.

Author contributions

J. Y. Bae; Conceptualization, Funding acquisition, Writing-original draft, Writing-review & editing, Data curation, Methodology & Project administration.
S. G. Lee; Investigation, Resources, Supervision, Validation, Visualization.

References

1. D. Brčić, M. Slavulj, D. Šojat and J. Jurak, 2018, "The Role of Smart mobility in Smart Cities", International Conference on Road and Rail Infrastructure. (DOI:10.5592/CO/CETRA.2018.812)
2. P. A. M. S. A. Munhoz et al., 2020, "Smart Mobility: The Main Drivers for Increasing the Intelligence of Urban Mobility", Sustainability, Vol. 12, No. 10675, pp. 1-25. (<https://doi.org/10.3390/su122410675>)
3. G. Quaglia, W. Franco and R. Oderio, 2011, "Wheelchair.q, a motorized wheelchair with stair climbing ability", Mechanism and Machine Theory, Vol. 46, No. 11, pp. 1601-1609. (<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2011.07.005>)
4. A. A. Baltazar, M. H. L. Casanave, E. R. Reyes and A. A. P. Marcos, 2011, "Development of an Electric Wheelchair Designed to Climb Steps and to be Controlled by the Body Movement", International Journal of Applied Biomedical Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 23-30. (DOI:10.1109/WCICA.2011.5970559)
5. J. P. P. Santana et al., 2013, "Profectus:

- Non-conventional Control and Implementation of an Electric Wheelchair Designed to Climb Up Stairs, Controlled via Electromyography and Supported by Computer Vision and Artificial Neural Network Processing", Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology(LACCEI), pp. 1-11.
6. M. J. Lawn and T. Ishimatsu, 2003, "Modeling of a Stair-climbing Wheelchair Mechanism with High Single Step Capability", IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 323-332. (DOI:10.1109/TNSRE.2003.816875)
 7. S. D. Herbert, A. Drenner and N. Papanikolopoulos, 2008, "Loper: A Quadruped-Hybrid Stair Climbing Robot," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 799-804. (DOI:10.1109/ROBOT.2008.4543303)
 8. G. Quaglia and M. Nisi, 2017, "Design of a Self-Leveling Cam Mechanism for a Stair Climbing Wheelchair", Mechanism and Machine Theory, Vol. 112, pp. 84-104. (<https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.02.003>)
 9. T. Jiang and E. Tanaka, 2021, "Design of a Wheelchair with Planetary Wheels and a Crawler to Move Upstairs/Downstairs Stably and Comfortably for the User", Journal of Japan Society for Design Engineering, Vol. 56, No. 12, pp. 643-658. (DOI:10.14953/jjsde.2020.2914)
 10. M. J. Lawn, T. Sakai, M. Kuroiwa and T. Ishimatsu, 2001, "Development and practical application of a stair climbing wheelchair in Nagasaki", Journal of Human Friendly Welfare Robotic Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 33-39.
 11. Y. Kumar, J. Rahul, R. Harikrishnan, T. P. A. Mohan and P. Sreedharan, 2021, "Design and Analysis of Building Diagnostics Robot", Journal of Physics: Conference Series(ICAPSM), Vol. 2070, pp. 1-12.
 12. M. S. Wang, 2010, "A Fuzzy Control Based Stair-Climbing Service Robot", Book of Climbing and Walking Robots, InTech Publisher, pp. 111-126. (DOI:10.5772/8832)
 13. J. S. Lee, W. H. Jeong, J. O. Han, T. S. Kim, and S. H. Oh, 2021, "Barrier-Free Wheelchair with a Mechanical Transmission", Applied sciences, Vol. 11, No. 5280. (<https://doi.org/10.3390/app11115280>)
 14. S. Jha, H. Chaudhary, S. Satardey, P. Kumar, A. Roy and A. Deshmukh, 2018, "Design, Analysis & Prototyping of a Semi-Automated Staircase-Climbing Rehabilitation Robot", International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering(ICMRE), pp. 48-53. (<https://doi.org/10.1145/3191477.3191487>)
 15. S. C. Chen, K. J. Huang, W. H. Chen, S. Y. Shen, C. H. Li and P. C. Lin, 2014, "Quattroped: A Leg-Wheel Transformable Robot", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19, No. 2, pp. 730-742. (DOI:10.1109/TMECH.2013.2253615)
 16. V. Mostyn, V. Krysz, T. Kot, Z. Bobovsky and P. Novak, 2018, "The synthesis of a segmented stair-climbing wheel", International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 15, pp. 1-11. (<https://doi.org/10.1177/1729881417749470>)
 17. B. D. Castillo, Y. F. Kuo and J. J. Chou, 2016, "Novel Design of a Wheelchair with Stair Climbing Capabilities", Journal of Information and Communication Engineering (JICE), Vol. 2, No. 2, pp. 99-105.
 18. N. J. Baishya, B. Bhattacharya and K. Tatsumi, 2021, "Analysis and Design of a Minimalist Step Climbing Robot", Applied Sciences, Vol. 11, No. 7044, pp. 1-24. (<https://doi.org/10.3390/app11157044>)
 19. R. Siegwart, P.e Lamon, T. Estier, M. Lauria and R. Piguet, 2002, "Innovative design for wheeled locomotion in rough terrain", Robotics and Autonomous Systems, Vol. 40, pp. 151-162. ([https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(02\)00240-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(02)00240-3))
 20. J. Talmale, K. Mudaliyar, N. Tayde, A. Zalke, N. Morankar, R. Narde and N. Empreddiwar, 2014, "Fabrication of Multipurpose Obstacle Stair Climbing Robot", Discovery, Vol. 19, No. 59.