

RESEARCH ARTICLE

# 농업용 전동 플랫폼의 차축 토크 예측을 위한 다물체 동역학 시뮬레이션 모델 개발

박민중<sup>1†</sup>, 전현호<sup>1</sup>, 박종대<sup>1</sup>, 백승윤<sup>2</sup>, 백승만<sup>2</sup>, Md. Abu Ayub Siddique<sup>3</sup>, 박민재<sup>3</sup>, 양철우<sup>3</sup>, 김용주<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 스마트농업시스템학과

<sup>2</sup>충남대학교 친환경 수소·전기 농기계 연구소

<sup>3</sup>충남대학교 바이오시스템기계공학과

## Development of a MBD simulation model for axle torque prediction of an electric agricultural vehicle

Min-Jong Park<sup>1†</sup>, Hyeon-Ho Jeon<sup>1</sup>, Jong-Dae Park<sup>1</sup>, Seung-Yun Baek<sup>2</sup>, Seung-Min Baek<sup>2</sup>, Md. Abu Ayub Siddique<sup>3</sup>, Min-Jae Park<sup>3</sup>, Cheol-Woo Yang<sup>3</sup>, Yong-Joo Kim<sup>1,2,3\*</sup>

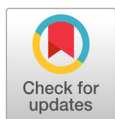
<sup>1</sup>Department of Smart Agriculture Systems, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Republic of Korea

<sup>2</sup>Eco-friendly Hydrogen Electric Tractor & Agricultural Machinery Institute, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Republic of Korea

\*Corresponding author: babina@cnu.ac.kr

†These authors equally contributed to this study as first author.



### OPEN ACCESS

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.20240006>

Received: December 20, 2024

Revised: December 27, 2024

Accepted: December 27, 2024

Copyright: © 2024 Journal of Agricultural Machinery Engineering



This is an Open Access article distributed under the terms of

the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## Abstract

The purpose of this study is to develop an electric all-wheel-drive vehicle simulation model for axle torque prediction. Simulation model was developed using RecurDyn, a multibody dynamics software, and tire-soil interaction parameters were inputted to reflect soil conditions. Driving simulation was performed at a speed of 7.5 km/h, which is the rated speed of driving motor. Traction was inputted between the soil and simulation model, and traction forces were considered as 25, 50, 75, and 100 N. Simulation was conducted for 20 seconds, and for the first 10 seconds, the simulation model was stabilized. As a result of simulation, maximum and average torque was analyzed. On 25 N traction condition, maximum torques of the front left, front right, rear left, and rear right wheels were 19.07, 19.14, 24.37, and 24.37 Nm, respectively. Under 50 N traction conditions, the maximum torques for the front left, front right, rear left, and rear right wheels were 19.49, 19.56, 25.95, and 25.95 Nm, respectively. In the case of 75 N traction, maximum torques were 19.93, 20.00, 27.62, and 27.62 Nm for the front left, front right, rear left, and rear right wheels, respectively. The maximum torques were 20.33, 20.40, 29.25, and 29.25 Nm for the front left, front right, rear left, and rear right wheels, respectively on 100 N traction condition. The average axle torques for the front

left, front right, rear left, and rear right wheels were approximately 8.96, 8.95, 6.86, and 6.85 Nm on every traction condition, respectively. It was shown that the axle torque was directly proportional to the applied traction forces. It was noticed that for the initial period, torque on the rear axle was higher than the front axle due to the box located on the rear side of simulation model, and torque on the front axle was higher than rear axle after the initial period because the front axle overcomes the rolling resistance. In this study, the axle torques were analyzed based on various traction forces. However, various conditions like weight and tire parameters would be reflected in the future study.

**Keywords:** agricultural all-wheel-drive vehicle, electrification, multi-body dynamics, simulation model, traction

## Introduction

2023년 국내 경지면적은 151만 2천 ha이며, 그 중 밭 농업 면적 및 생산량은 각각 약 74만 8천 ha, 8,254천 ton에 달한다 (MAFRA, 2024). 하지만 밭 농업 환경은 논 농업 환경과 달리 고산지 등 비정형적으로, 작업 환경이 열악하며 이로 인해 농사에 비해 기계화율이 저조한 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 밭농업 기계화를 제고, 농업기계 이용 촉진, 농업 기계 연구 및 개발 등을 목표로 연구개발이 활발히 수행되고 있다.

최근에는 수확, 운반, 예찰 등 다양한 농작업을 수행가능한 밭 농업 로봇 플랫폼 개발에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. Cho et al. (2020)은 밭 노지 환경에서 모듈형 농업 로봇 플랫폼의 주행에 대한 연구를 수행하였으며, 다양한 작물의 재배 양식에 따른 모듈형 농업 로봇 플랫폼을 개발 및 안정적인 밭 환경에서의 운전을 위해 주행 간 요소별 평가를 통해 성능 검증을 수행하였다. Kim et al. (2021a)은 밭 노지 환경에서 작업 가능한 모듈형 농업 로봇 플랫폼을 개선하기 위한 연구를 수행하였으며, 개발한 농업 로봇 플랫폼을 밭 환경에서 테스트하였으며, 테스트 간 발생한 문제를 개선하기 위해 기구 설계 및 전장부 구조를 변경하였으며, 4륜 조향 기능의 알고리즘을 개선하여 등판 각도, 자세제어, 속도 및 장애물 통과 등을 테스트하였다.

농작업 간 발생하는 토크는 변속기 최적화에 적용될 수 있으며 성능 평가 및 변속기 가속 수명 시험의 중요한 데이터로 사용될 수 있어 그 중요성이 높다(Kim et al., 2020a). Kim et al. (2020a)은 엔진 토크, 엔진 회전속도, 경운 깊이, 슬립율, 그리고 주행 속도를 변수로 설정하였으며, 계측시스템을 개발하여 데이터를 수집하였다. 이후, 계측 데이터를 이용하여 회귀 모델을 개발하여 차축 토크 예측 모델을 개발하였다. Kim et al. (2021b)은 인공 신경망을 이용하여 트랙터의 차축 토크를 추정하는 모델을 개발하였으며, 개발한 모델과 다중선형회귀 기반 모델과의 비교를 통해 성능 검증을 수행하였다. 이렇듯, 기존 내연기관 트랙터의 토크 예측 모델에 관한 연구는 활발히 수행되고 있다.

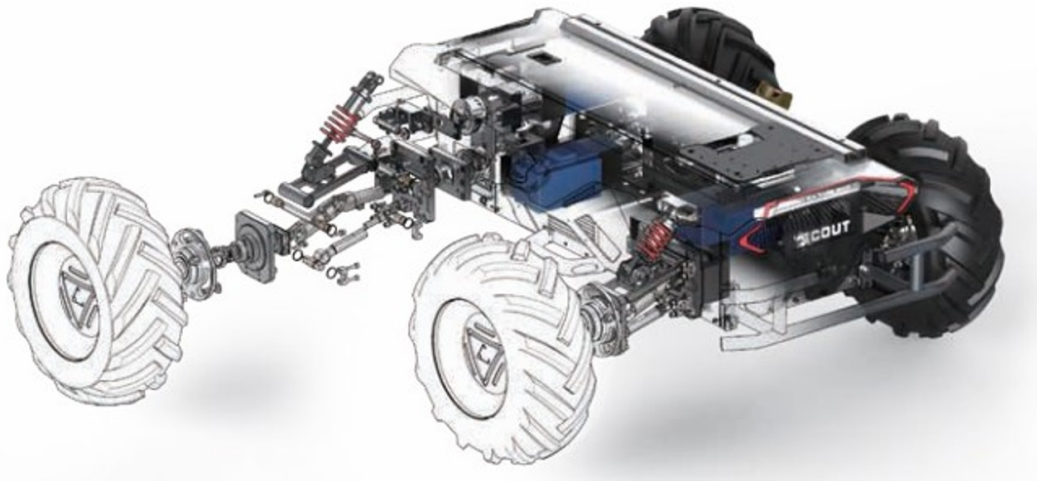
최근에는 농업용 전동플랫폼의 설계 및 개발에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으나, 아직 농업용 전동플랫폼의 토크를 고려한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구는 시뮬레이션을 이용한 농업용 전동 플랫폼의 작업 시 토크 분석을 목표로, 전동 농업 플랫폼을 이용하여 동역학 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 시뮬레이션 모델에 작용하는 견인력을 변화시키며 농작업 시 발생하는 토크를 분석하였다.

## Materials and Methods

### 소형 전기구동 플랫폼

본 연구에서는 국내 밭 농업 환경에서 운용 가능한 Fig. 1의 1.6 kW급 소형 전기구동 플랫폼을 선정하여 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 전기구동 플랫폼은 실외 및 실내 환경에서 사용하기 적합한 스키드 조향을 채택하였으며, 최대 속도는 1.5 m/s, 최대 50 kg의 하중까지 운반할 수 있다. 전기구동 플랫폼은 24V30Ah의 리튬 배터리를 이용하여 전원을 공급하며, 총 용량은 720 Wh으로, 최대 15 km의 거리까지 주행이 가능하다. 400 W의 BLDC 모터 4개는 각 휠과 직결되어 독립적으로 구동하며, 모터와 휠 사이의 감속비는 30이다. 바이어스 플라이 타입의 타이어는 280 kPa에서 200 kgs의 최대 부하를 가지며, 직경 33 cm, 단면 폭 12.7 cm, 림 반경은 15.24 cm이다. 전기구동 플랫폼의 세부 제원은 Table 1과 같다.



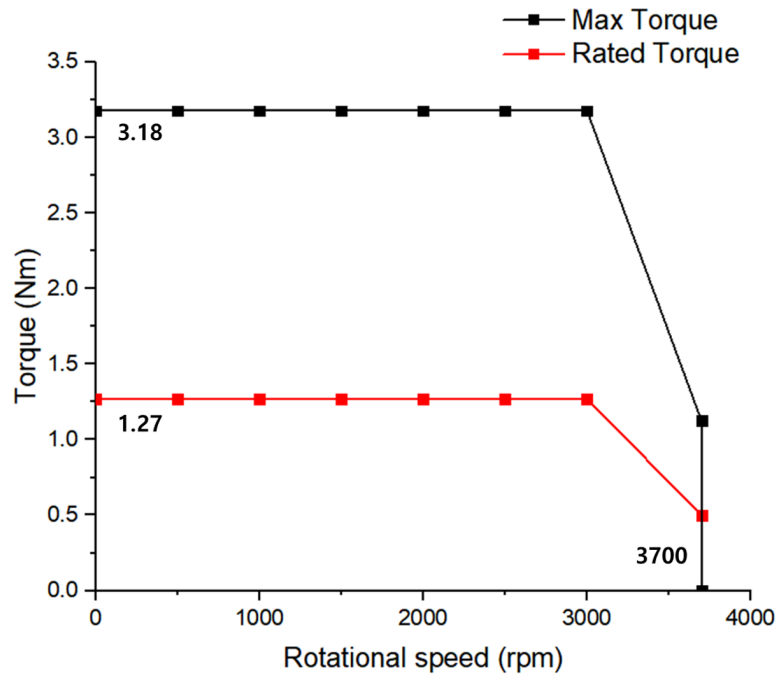
**Fig. 1.** A photo of an electric all-wheel-drive vehicle used in this study.

**Table 1.** Specifications of an electric all-wheel-drive vehicle used in this study.

Items	Specification
Dimension (L x W x H) (mm)	930 x 699 x 349
Weight (kgf)	68
Motor power (kW)	1.6

### 구동모터 성능곡선 분석

전기구동 플랫폼 구동모터의 성능곡선은 Fig. 2와 같으며, 정격 회전속도와 토크는 각각 3,000 rpm, 1.27 Nm이다.

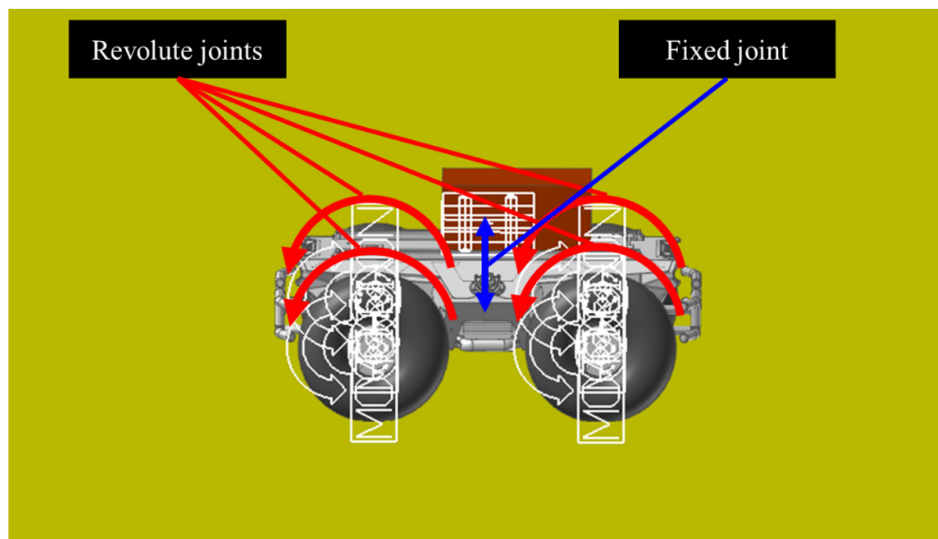


**Fig. 2.** Driving motor T-N curve of electric all-wheel-drive vehicle.

### 시뮬레이션 모델 개발

소형 전기구동 플랫폼 시뮬레이션 모델은 다물체 동역학 소프트웨어(Recurdyn V9R4, FunctionBay Inc., Republic of Korea)를 이용하여 개발하였으며, 차량의 제원과 동일하게 Fig. 3과 같이 개발하였다. 차량의 움직임은 각 휠에 회전 조건을 부여하여 구현하였으며, 회전조건 입력값을 변경하여 차량의 주행속도를 조정하였다.

타이어 모델은 토양과 차량 간의 부하를 구현하고, 입력계수로 토양 조건을 구현할 수 있는 UA(University of Arizona) 모델을 활용하였다. UA 모델의 타이어 입력계수로는 동반경(rolling radius), 종방향강성(longitudinal stiffness), 횡방향강성(lateral stiffness), 수직강성(vertical stiffness), 댐핑계수(vertical damping ratio), 구름저항계수(rolling resistance coefficient), 마찰



**Fig. 3.** Dynamic simulation model of an electric all-wheel-drive vehicle and joints.

계수(friction coefficient), 등이 있다(Park et al., 2024).

### 종방향강성

종방향강성은 차량이 진행하는 방향으로의 슬립율과 타이어의 견인력을 이용하여 식 (1)을 이용하여 계산된다.

$$LS = \frac{F_t}{K_l} \quad (1)$$

Where,  $LS$  = longitudinal stiffness (N)

$F_t$  = traction on tire (N)

$K_l$  = longitudinal slip

선행연구에 따르면 슬립율은 토양 상태에 따라 결정된다. 건조한 노면 조건에서 슬립율은 0.1에서 0.35로 고려되어, 0.2로 선정하였다. 따라서, 종방향강성은 타이어의 견인력과 선정된 슬립율을 이용하여 계산하였다.

### 수직강성

수직강성은 Fig. 4와 같이 재료 물성시험기(ST-1002, SALT Co. Ltd., Korea)를 이용하여 계측하였다. 타이어는 지그를 이용하여 상단 및 하단부를 고정하였으며, 압축력을 지속적으로 증가시키며 타이어 변형량을 측정하였다. 수직강성은 계측된 값을 이용하여 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$k_r = \frac{F_r}{D} \quad (2)$$

Where,  $k_r$  = vertical stiffness (N/mm)

$F_r$  = vertical force (N)

$D$  = displacement (mm)



**Fig. 4.** Measurement of tire vertical stiffness using universal material tester and jigs (Park et al., 2024, p. 320).

## 구름저항

구름저항은 표면 위에서 타이어가 회전할 때 발생하는 저항을 의미한다. 선행연구에 따르면, 구름저항 계수는 50 km/h의 이하의 속도에서는 노면의 조건에 따라 선정된다. 노면 조건에 따른 구름저항계수는 Table 2와 같다(Renius, 2020).

**Table 2.** Rolling resistance coefficient based on road conditions.

Road conditions	Rolling resistance coefficient
Gravel	0.2-0.3
Sand or rock	0.2-0.3
Sandy loam	0.3-0.4
Asphalt	0.04

선행연구에 따르면, 국내 밭 토양은 사질 양토(Sandy loam)으로, 구름저항계수는 0.3와 0.4의 평균값인 0.35로 선정하였다(Cho et al., 2012).

## 마찰계수

마찰계수는 노면 상태에 따라 선정되며, 선행연구에 따르면 노면 상태에 따른 타이어 마찰계수는 Table 3과 같다(ASM Su and D Ahmad, 2017). 따라서, Sand 함량이 높은 Sandy loam을 고려하여 타이어 마찰계수는 0.5로 선정하였다.

**Table 3.** Friction coefficient based on soil type.

Soil type	Friction coefficient
Clay	0.3-0.5
Sand	0.45-0.6
Silt	0.2-0.35

이외의 계수들인 횡방향강성, 댐핑계수는 선행연구를 참고하여 선정하여 시뮬레이션을 수행하였다(Yoon et al., 2022). 타이어 모델 입력 파라미터 값은 Table 4와 같다.

**Table 4.** Input parameters of tire model.

Tire parameters	Coefficient	References
Longitudinal stiffness	44.63	Measured
Lateral slip stiffness	2,400	Yoon et al. (2022)
Damping ratio coefficient	0.2	Yoon et al. (2022)
Vertical stiffness	37	Measured
Camber stiffness	3,000	Yoon et al. (2022)
Rolling resistance	0.35	Renius (2020)
Maximum friction	0.5	ASM Su and D Ahmad (2017)
Minimum friction	0.5	ASM Su and D Ahmad (2017)

속도 조건은 모터의 정격 회전속도인 3,000 rpm으로 선정하여 수행하였으며, 이 때의 휠 회전속도는 감속비를 이용하여 100 rpm으로 계산된다. 전기구동 플랫폼의 주행속도는 휠 회전속도와 식 (3)을 이용하여 약 2.08 m/s로 계산되었다.

$$N = \frac{60}{2\pi \times r} \times v \quad (3)$$

where,  $N$  : wheel rotational speed (rpm)

$r$  : wheel radius (m)

$v$  : velocity (m/s)

또한, Fig. 5와 같이 시뮬레이션 모델 후방에 25, 50, 75, 100 N의 4가지 경우의 견인력을 구현하여 각각의 경우에 대해 주행 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션은 약 20초 동안 수행하였으며, 초기 10초 동안에는 시뮬레이션 모델을 안정화시킬 수 있는 시간을 두었다.

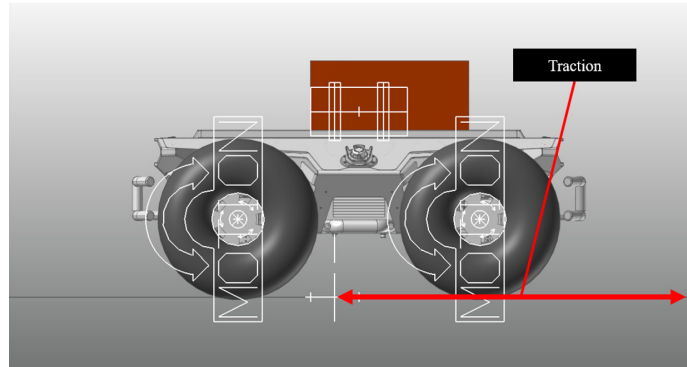


Fig. 5. Traction model applied to the electric all-wheel-drive vehicle simulation model.

## Results and Discussion

### 전기구동 차량 주행 결과

소형 전기구동 플랫폼 시뮬레이션 결과, 차축 회전속도는 Fig. 6과 같이 모든 차축에서 동일하게 약 100 rpm으로 나타났다.

25, 50, 75, 100 N의 견인력 조건에서 전륜 및 후륜 차축 토크는 각각 Fig 7, 8, 9, 10과 같이 나타났다.

모든 견인력 조건에서 차축 토크는 각 차축에서 모두 동일하게 주행 초기 구간에 증가하였다가 이후 감소하는 경향을 보였다. 이는 주행 시작 시, 정지 마찰력을 이겨내기 위한 것이기 때문으로 판단된다. 또한, 모든 조건에서 주행 초기에는 후륜 차축 토크가 높게 나타났으며, 이후 구간에서는 전륜 차축 토크가 높게 나타났다. 이는 차량 상부의 박스 구조물이 차량의 뒤쪽에 위치하여, 주행 초기에는 후륜 차축 토크가 높게 나타나며, 이후에는 전륜이 토양과의 구름저항을 이겨내며 주행하기 때문인 것으로 판단된다.

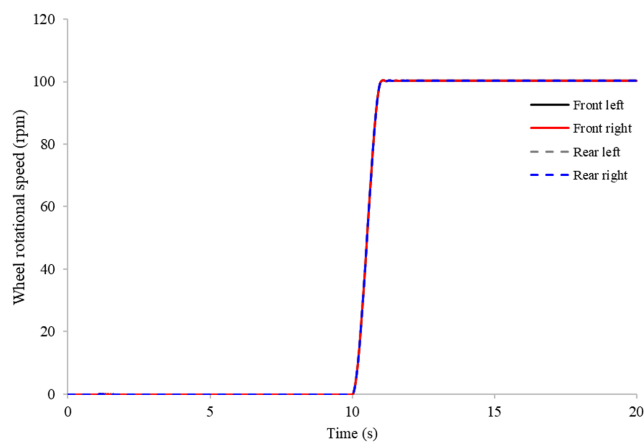
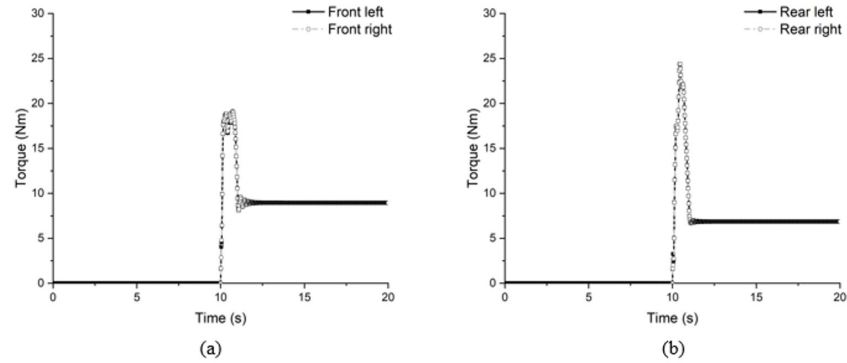
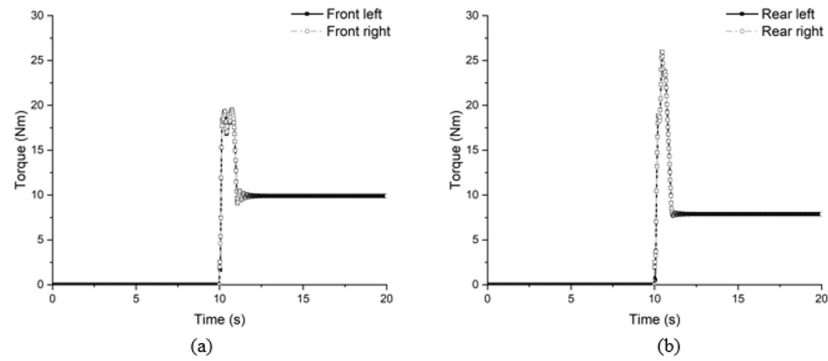


Fig. 6. Wheel rotational speed of an electric all-wheel-drive vehicle simulation model.

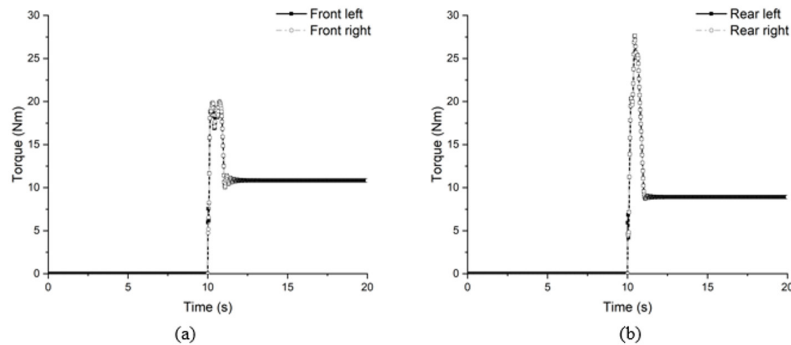




**Fig. 7.** Electric all-wheel-drive vehicle simulation model axle torque on 25 N traction force (a) front axles; (b) rear axles.

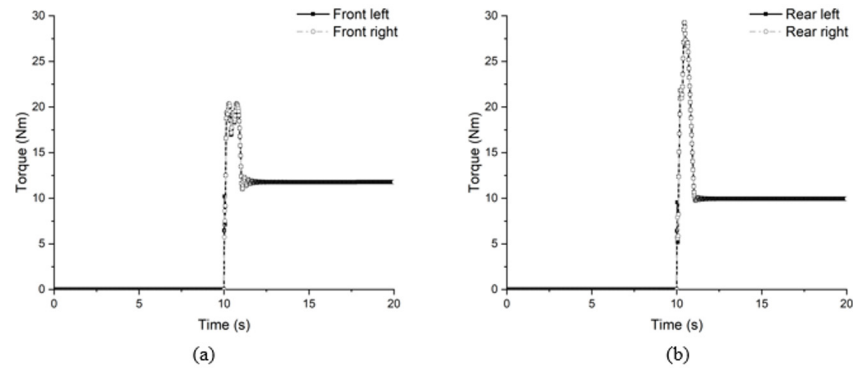


**Fig. 8.** Electric all-wheel-drive vehicle simulation model axle torque on 50 N traction force (a) front axles; (b) rear axles.



**Fig. 9.** Electric all-wheel-drive vehicle simulation model axle torque on 75 N traction force (a) front axles; (b) rear axles.





**Fig. 10.** Electric all-wheel-drive vehicle simulation model axle torque on 100 N traction force (a) front axles; (b) rear axles.

각 견인력 조건에 따른 차축 토크의 최대값, 평균값 및 표준편차 값은 Table 5와 같다.

시뮬레이션 결과, 평균 토크는 후륜보다 전륜에서 약 30% 높게 나타났으며, 이는 주행 초기 이후, 전륜이 토양과의 마찰을 이겨내며 주행하기 때문인 것으로 판단된다.

**Table 5.** Simulation results of an electric all-wheel-drive vehicle simulation model axle torque.

Traction load		Front left	Front right	Rear left	Rear right
25 N	Maximum torque	19.07	19.14	24.37	24.37
	Average torque	8.96	8.95	6.86	6.85
	Standard deviation	2.54	2.57	3.41	3.42
50 N	Maximum torque	19.49	19.56	25.95	25.95
	Average torque	8.96	8.95	6.86	6.85
	Standard deviation	2.42	2.43	3.55	3.54
75 N	Maximum torque	19.93	20.00	27.62	27.62
	Average torque	8.96	8.95	6.86	6.85
	Standard deviation	2.23	2.27	3.65	3.66
100 N	Maximum torque	20.33	20.40	29.25	29.25
	Average torque	8.96	8.95	6.86	6.85
	Standard deviation	2.08	2.11	3.79	3.79

## Conclusion

본 연구는 농업용 전동 플랫폼의 견인 작업 시 발생하는 차축 토크 예측을 목표로, 상용 다물체 동역학 소프트웨어를 이용하여 전동 농업 플랫폼 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 시뮬레이션 모델에서 전동 플랫폼의 견인 작업 시 발생하는 견인력에 따라 차축 토크를 분석하였다.

견인력에 따른 시뮬레이션에서, 25 N의 견인 조건의 경우 차축 최대 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 19.07, 19.14, 24.37, 24.37 Nm로 나타났으며, 50 N의 견인 조건의 경우 차축 최대 토크는 약 19.49, 19.56, 25.95, 25.95 Nm로 나타났다. 75 N의 견인 조건의 경우 차축 최대 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 19.93, 20.00, 27.62, 27.62 Nm로 나타났으며, 100 N의 견인 조건의 경우 차축 최대 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 20.33, 20.40, 29.25, 29.25 Nm로 나타났다.

시뮬레이션 결과, 모든 견인력 조건에서 시뮬레이션 초기 구간에 최대 토크는 전륜보다 후륜에서 높게 나타났으며 이는 전기구동 플랫폼 시뮬레이션 모델 상부의 박스 구조물이 차량 후방에 위치하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 초기 구간 이후로 시뮬레이션이 진행되며 차량이 안정화된 구간에서는 후륜보다 전륜에서 평균 토크가 높게 나타났다. 이는 차량 주행 간 전륜이 토양과의 마찰을 이겨내기 때문인 것으로 판단된다.

시뮬레이션 모델에서 발생하는 견인력이 증가함에 따라, 차축 토크도 증가하는 경향을 보였으며, 이를 통해 차량에 적절한 견인력을 작용시킬 수 있다면, 고효율 구간에서 모터가 작동하도록 조작성이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 방법을 통해 전기구동 플랫폼의 작업 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 원활한 시뮬레이션 수행을 위해 시뮬레이션 모델에서 발생하는 견인력 조건에 대해서는 임의로 선정하였다. 추후 연구에서는 시뮬레이션 조건에서 발생하는 견인력 조건에 대해 논리적인 시험 방법을 고려하여 개선된 연구를 수행할 예정이다. 또한, 견인력 이외에 하중, 타이어 매개변수 등 다양한 파라미터를 변화시키며, 다양한 조건에 대해 토크 예측에 관한 연구를 수행할 계획이다.

## Acknowledgements

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 친환경동력원적용농기계기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(322047-5, 322046-03)

## References

- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2024. MAFRA Main Statistics. [in Korean].
- ASM Su, Desa Ahmad. Friction coefficients of selected agricultural soil and agro-products - A review. 2017. Mytribos Symposium 2 (2017) pp.19-21.
- Cho HR, Zhang YS, Han KH, Cho HJ, Ryu JH, Jung KY, Cho KR, Ro AS, Lim SJ, Choi SC, Lee JI, Lee WK, Ahn, BK, Kim BH, Kim CY, Park JH, Hyun SH. Soil physical properties of arable land by land use across the country. 2012. Korean J. Soil Sci Fert. 45(3), 344-352 (2012)
- Cho YJ, Woo SY, Song SH, Hong HG, Yun HY, Oh JS, Kim JS, Kim DO, Seo KH, Kim DH. 2020. A study on modular agricultural robotic platform for upland. Journal of Korea Robotics Society 15:124-130. [in Korean]
- Kim DW, Hong HG, Cho YJ, Yun HY, Oh JS, Gang MS, Park HC, Seo KH. 2021. Improvements to a modular agricultural robot platform for field work. Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers 20:80-87. [in Korean].
- Kim WS, Kim YS, Kim YJ. 2020. Development of prediction model for axle torque of agricultural tractors. Transactions of the ASABE.
- Kim WS, Lee DH, Kim YJ, Kim YS, Park SU. 2021. Estimation of axle torque for an agricultural using an artificial neural network. Sensors. 2021, 21(6), 1989.
- Park MJ, Jeon HH, Baek SY, Baek SM, Kang DI, Ma SJ, Kim YJ. 2024. Development of simulation model of an electric all-wheel-drive vehicle for agricultural work. Korean Journal of Agricultural Science. 2024. pp.315-329. [in Korean].
- Renius KT. 2020. Fundamentals of Tractor Design. Pp.27-30, 32-35. Springer, Berlin, Germany.

Yoon SY, Jeon HH, Baek SM, Baek SY, Lee JH, Kim YJ. 2022. Development of multi-body dynamics simulation model of agricultural 4WD electric vehicle platform for upland farming. Precision Agriculture Science and Technology 4:227-235. [in Korean]