

ENGINEERING

Development of simulation model of an electric all-wheel-drive vehicle for agricultural work

Min Jong Park¹, Hyeon Ho Jeon¹, Seung Yun Baek¹, Seung Min Baek¹, Dong Il Kang¹,
Seung Jin Ma¹, Yong Joo Kim^{1,2,*}

¹Department of Smart Agricultural Systems, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*Corresponding author: babina@cnu.ac.kr

Abstract

This study was conducted for simulation model development of an electric all-wheel-drive vehicle to adapt the agricultural machinery. Data measurement system was installed on a four-wheel electric driven vehicle using proximity sensor, torque-meter, global positioning system (GPS) and data acquisition (DAQ) device. Axle torque and rotational speed were measured using a torque-meter and a proximity sensor. Driving test was performed on an upland field at a speed of $7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Simulation model was developed using a multi-body dynamics software, and tire properties were measured and calculated to reflect the similar road conditions. Measured and simulated data were compared to validate the developed simulation model performance, and axle rotational speed was selected as simulation input data and axle torque and power were selected as simulation output data. As a result of driving performance, an average axle rotational speed was 115 rpm for each wheel. Average axle torque and power were 4.50, 4.21, 4.04, and 3.22 Nm and 53.42, 50.56, 47.34, and 38.07 W on front left, front right, rear left, and rear right wheel, respectively. As a result of simulation driving, average axle torque and power were 4.51, 3.9, 4.16, and 3.32 Nm and 55.79, 48.11, 51.62, and 41.2 W on front left, front right, rear left, and rear right wheel, respectively. Absolute error of axle torque was calculated as 0.22, 7.36, 2.97, and 3.11% on front left, front right, rear left, rear right wheel, respectively, and absolute error of axle power was calculated as 4.44, 4.85, 9.04, and 8.22% on front left, front right, rear left, and rear right wheel, respectively. As a result of absolute error, it was shown that developed simulation model can be used for driving performance prediction of electric driven vehicle. Only straight driving was considered in this study, and various road and driving conditions would be considered in future study.

Keywords: agricultural machinery, data acquisition, electric driven vehicle, simulation, verification

Introduction

최근 배기가스 배출로 인한 환경 문제가 대두되고 있으며, 이로 인해 세계의 여러 국가에서 배기가스 규제를 강화 중에 있다. 미국은 Tier-4 Final, 유럽은 Stage V 규제를 시행하고 있으며,

OPEN ACCESS

Citation: 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 51:315-329. <https://doi.org/10.7744/kjoas.510307>

Received: May 16, 2024

Revised: July 07, 2024

Accepted: July 08, 2024

Copyright: © 2024 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://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.

국내에서도 동일한 기준을 적용하고 있다(Lee et al., 2022; Kim et al., 2023b). 또한, 2023년부터 5년 단위로 파리 협정의 이행 및 장기 목표 달성 가능성을 평가하기 위한 이행점검이 시행되고 있다(Kook et al., 2021). 이러한 규제를 만족하기 위해 최근에는 다양한 에너지를 동력원으로 사용하려는 움직임이 있으며, 그 중 배터리를 동력원으로 하는 전기구동에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. Kim 등(2019)은 78 kW급 전기구동 트랙터 파워트레인을 설계하기 위해 실제 농작업 조건 및 환경에 따라 상용 모터에 다양한 기어 감속비 조합을 분석하였으며 감속비 선정 단계를 제시하였다. Baek 등(2022b)은 44 kW급 전기구동 트랙터의 단수에 따른 농작업 가능 여부를 판단하여 전기구동 시스템의 설계 검증을 수행하였으며, Baek 등(2022a)은 4륜 전기구동 트랙터를 설계 및 개발하고 시험 차량을 견인하여 개발한 트랙터의 견인력을 평가하였다. 하지만 이러한 연구들은 주로 농기계 중 사용빈도가 가장 높은 트랙터를 대상으로 수행되었으며, 전체 농지 면적 중 밭 면적 비율이 44.8%인 국내 농업 환경을 고려했을 때 밭 농업 플랫폼에 대한 연구 또한 필요하다.

최근에는 밭 농업 로봇 플랫폼 개발에 대한 연구가 수행되고 있으며, 주로 다양한 작업을 수행할 수 있는 주행 플랫폼 중심으로 기술 개발이 진행되고 있다(Cho et al., 2023). Kim 등(2021)은 밭 농업을 위한 모듈형 농업 로봇 플랫폼 개선에 대한 연구를 수행하였으며, 개선된 플랫폼의 성능을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. Cho 등(2020)은 밭 환경에서 다양한 작물과 재배양식에 적용할 수 있는 모듈형 농업 로봇 플랫폼을 개발하여 요소별 주행 평가를 통해 성능을 검증하였다. Grimstad 등(2015)은 600 W 모터 4개로 구동되는 가변형 농업용 로봇인 Thorvald 플랫폼을 개발하고 플랫폼에 적합한 다양한 작업기를 개발하고 부착하여 농작업을 수행하였다. 밭 농업 환경 외에도 다양한 농업 환경에서 전기구동 플랫폼에 대한 연구가 진행되고 있다. Zeeshan과 Aized (2023)는 소형 수확 로봇을 개발하여 수확 작업 중 주행 안정성을 평가하였으며, Rathore 등(2023)은 사과 수확 로봇을 개발하여 수확 작업 중 성능을 평가하였다.

농업 기계 분야에서는 시뮬레이션 프로그램을 통해 작업 조건에 따른 각 부품의 성능을 평가할 경우, 자동차와 작업 조건이 다르기 때문에 농작업 조건에 따른 부하 데이터를 활용해야 한다(Baek et al., 2019). 하지만 밭 농업 로봇 플랫폼의 소요동력 및 출력에 관한 연구는 아직까지 미비한 실정이다. 밭에서의 작업은 논에서의 작업에 비해 소규모 및 경사지 등 비정형 환경이 대부분으로 주행환경이 열악하며(Jeon et al., 2023a), 밭 작업용 플랫폼을 개발하기 위해서는 동역학 시뮬레이션을 통해 구동 가능성을 확인하고 소요동력을 예측하여 설계하는 것이 필요하다(Yoon et al., 2022).

최근 해외에서는 다양한 농업용 로봇 플랫폼이 개발되고 있다. 프랑스의 VitiBot에서는 와인용 포도 재배에 활용할 수 있는 Bakus를 개발하였으며, 독일의 Deepfield Robotics에서는 제초, 파종, 수확 등 다목적 농업용 로봇 플랫폼 BoniRob을 개발하였다. 하지만 국내 밭 농업 환경은 해외 밭 농업 환경과 다르기 때문에 해외에서 개발된 밭 농업용 로봇 플랫폼의 국내 노지 농업에 활용 가능성 여부는 분석이 필요하다. 밭작업은 작물의 재배환경 및 작물 특성에 맞는 작업 조건에 대한 고려가 필요하기 때문에 다양한 실험이 필요하다(Kim et al., 2023a).

따라서, 본 연구는 밭 농업에서 다목적으로 사용 가능한 전기구동 차량의 시뮬레이션 모델 개발을 위한 기초연구로서, 시뮬레이션 모델은 타이어 물성을 계측하여 다물체 동역학 소프트웨어를 이용하여 개발하였으며, 밭 농업 전기구동 플랫폼의 주행성능 시험을 통하여 시뮬레이션 모델의 정확도를 분석하였다.

Materials and Methods

공시 전기구동 차량

본 연구에서는 국내 소형 밭 농업 환경에서 농작물 등 환경 모니터링에 활용하기 위하여 Fig. 1의 1.6 kW급 전기구동 플랫폼을 대상으로 선정하였다(Scout 2.0, AgileX, China). 전기구동 플랫폼의 크기는 930 mm (L) × 699 mm

(W) × 349 mm (H)이며, 무게는 666 N이다. 전력원은 24 V 30 Ah의 리튬 배터리로 총 720 Wh의 용량으로 구성되며, 구동 시스템은 400 W의 모터 4개를 사용하여 독립적으로 구동한다. 구동 모터의 성능곡선은 Fig. 2와 같으며, 정격 회전속도와 토크는 각각 3,000 rpm, 1.27 Nm이다. 모터는 인휠 타입으로 타이어와 직결되어 동력을 전달하도록 구성되어 있으며, 제어가 용이하기 때문에 소형 전기 플랫폼에서 자주 사용되고 있다. 모터와 타이어 사이의 감속비는 30이다. 타이어는 바이어스 플라이 타입으로, 최대 부하는 280 kPa에서 200 kgs이며, 지름은 33 cm, 폭은 12.7 cm, 림 반경은 15.24 cm이다.



Fig. 1. An electric all-wheel-drive vehicle (Scout 2.0, AgileX, China) used in this study.

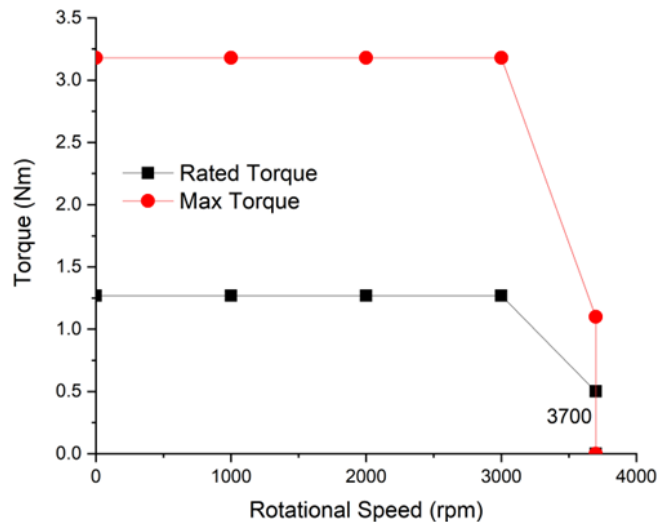


Fig. 2. T-N curve of driving motor.

계측 시스템 구성

전기구동 플랫폼의 시뮬레이션 모델 개발을 위한 입력 데이터는 차축 회전속도이며, 검증 데이터는 차축 토크로 선정하였다. 차축 회전속도와 토크는 각 차축에 근접센서(DZ-Sensor Laser, MANNER Sensortelemetrie GmbH, Germany)와 토크미터(MW_0.5 kNm, MANNER Sensortelemetrie GmbH, Germany)를 설치하여 계측하였다.

GPS (global positioning system) (BU-353S4, GlobalSat WorldCom, Taiwan)는 차량 속도를 계측하기 위해 설치하였으며 하중은 62.37 g, 채널 수는 48개, 위치 정확도는 15 m 이내, 속도 정확도는 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이내, 시간 정확도는 $\pm 100 \text{ ns}$ 이다. 데이터는 CAN 모듈(Q.bloxx module, Gantner, Austria)을 이용하여 수집하였으며, CAN 모듈의 하중은 200 g, 해상도는 24 bit, 샘플링레이트는 10 kHz이다. 계측 박스는 주행 중 CAN 모듈을 고정할 수 있도록 설치하였으며, 계측 시스템은 Fig. 3과 같이 구성하였다.

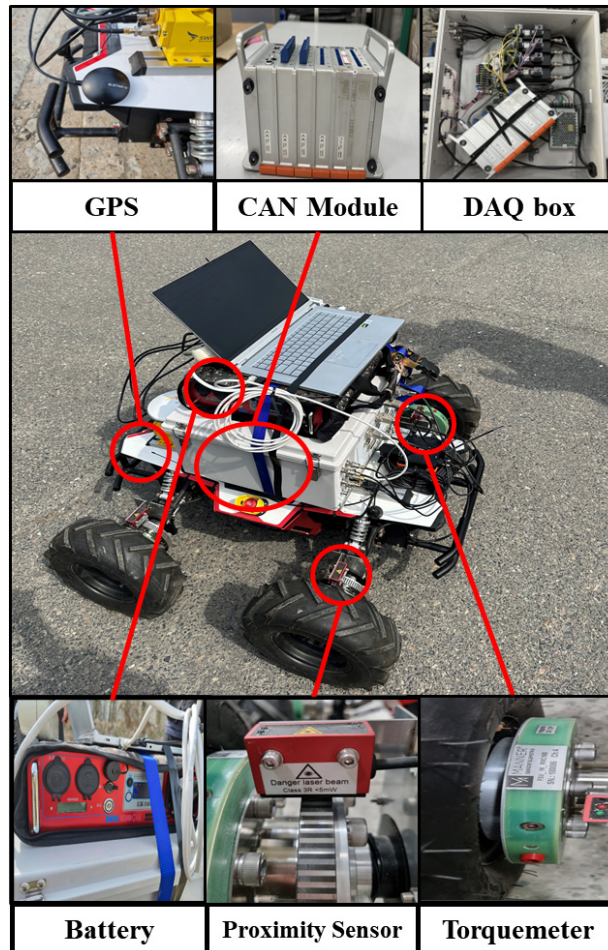


Fig. 3. Data acquisition system installed in an electric all-wheel-drive vehicle. GPS, global positioning system; DAQ, data acquisition.

계측 시험은 전기구동 플랫폼이 밭 농업 환경에서 주로 직진 주행을 하는 것을 고려하여, Fig. 4와 같이 충남대학교 밭 환경($36^{\circ}36'68.8''\text{N}$, $127^{\circ}35'25.0''\text{E}$)에서 수행하였다. 주행 간 험지 극복 등 높은 부하 조건을 고려하여 모터 정격 회전속도의 120%를 주행 조건으로 선정하였다. 이때의 차륜 회전속도는 120 rpm이며, 차량의 주행속도인 $7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 를 계측 시험 중 주행속도로 선정하였다.

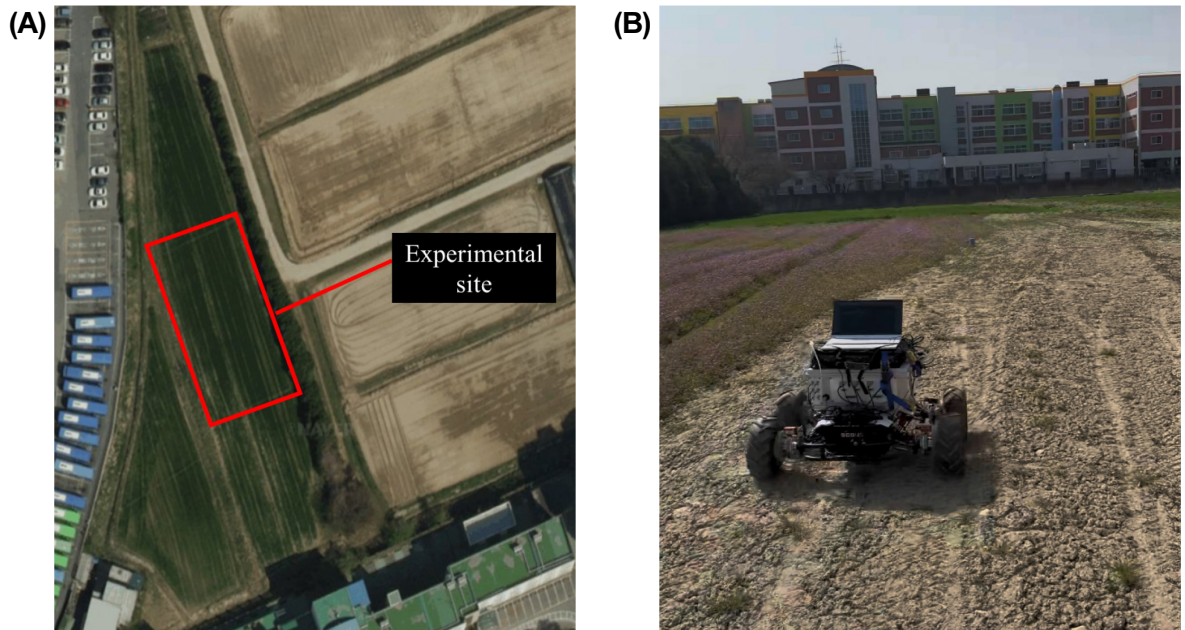


Fig. 4. Field operation; (A) experimental site; (B) driving operation.

시뮬레이션 모델 개발

시뮬레이션은 다물체 동역학 소프트웨어(Recurdyn V9R4, FunctionBay, Inc., Korea)를 이용하여 수행하였으며, 동역학 모델은 차량의 제원과 동일하게 구성하였다. 동역학 모델은 회전 조건과 고정 조건 총 2개의 구속조건을 사용하여 Fig. 5와 같이 구현하였다. 각 휠은 회전 조건을 이용하여 주행 시뮬레이션을 구현하였다. 차량 상부의 육면체 구조물은 계측 박스를 구현하였으며, 계측 박스는 고정 조건을 이용하여 차량 상부에 고정되도록 하였다.

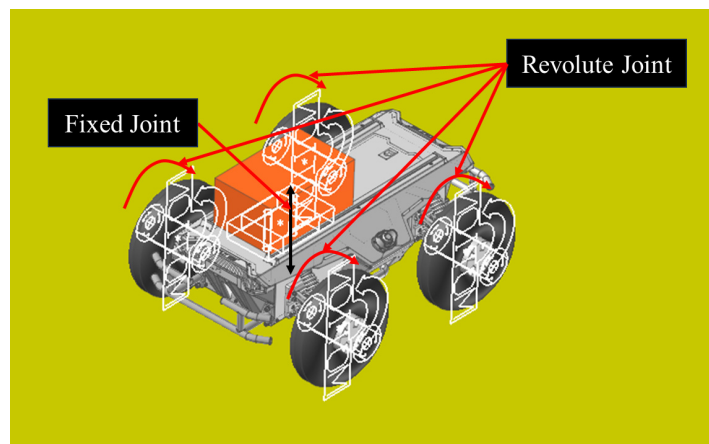


Fig. 5. Dynamic simulation model of all-wheel-drive vehicle and joints.

지면과 차량의 부하를 구현하기 위하여 타이어 모델은 UA (University of Arizona)를 활용하였다. 타이어 모델은 입력되는 계수로 토양 조건을 구현하기 용이하기 때문에 해당 모델을 이용하였다. 타이어 입력 계수로는 수직강성 계수(radial stiffness coefficient), 댐핑계수(damping ratio coefficient), 종방향강성계수(longitudinal stiffness coeffi-

cient), 슬립에 따른 횡방향 강성계수(lateral slip stiffness coefficient), 캠버각에 따른 횡방향 강성계수(camber stiffness coefficient), 마찰계수(friction coefficient) 및 구름저항 계수(rolling resistance coefficient)가 있다(Jeon et al., 2023b). 수직강성계수는 수직으로 작용하는 힘에 따른 타이어의 변형량이며, 댐핑계수는 마찰력에 의해 진동 에너지가 분산될 때 타이어가 얼마나 빨리 안정 상태로 돌아가는지 나타내는 계수이다. 종방향강성계수는 차량 진행방향의 견인력에 따른 차량의 슬립 비율이다. 슬립에 따른 횡방향 강성계수는 측방력에 따른 슬립각으로 계산되며, 캠버각에 따른 횡방향 강성계수는 측방력에 따른 캠버각으로 계산된다. 이 중 상대적으로 측정이 용이한 수직강성계수와 종방향강성계수는 측정하였으며, 이외의 계수들은 선행연구를 참고하여 선정하였다.

수직강성계수

수직강성계수는 Fig. 6과 같이 재료시험기(ST-1002, SALT Co., Ltd., Korea)를 이용하여 3번 반복 계측하였으며, 평균값을 사용하였다. 타이어 상단 및 하단부를 지그를 이용하여 고정하였으며, 지속적으로 압축시키는 힘을 증가시키며 이 때의 변형량을 측정하였다. 수직강성계수는 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$k_r = \frac{F_r}{D} \quad (1)$$

여기서, k_r : radial stiffness ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)

F_r : radial force (N)

D : displacement (mm)



Fig. 6. Tire radial stiffness measurement using universal material tester.

종방향강성계수

종방향강성계수는 타이어의 견인력과 차량 진행방향으로의 슬립율을 이용하여 식(2)와 같이 계산하였으며 종방향강성계수를 계산하기 위해 해당 파라미터를 계측하였다.

$$LS = \frac{F_t}{K_l} \quad (2)$$

여기서, LS : longitudinal stiffness (N)

F_t : traction on tire (N)

K_l : longitudinal slip

슬립율은 식(3)과 같이 플랫폼의 실제 속도와 이론 속도를 이용하여 계산한다. 플랫폼에 설치된 GPS를 활용하여 플랫폼의 실제 속도를 계측하였으며, 플랫폼의 이론 속도는 휠 회전속도를 이용하여 식(4)를 통해 계산하였다. 휠 회전속도는 차량 휠에 근접 센서를 설치하여 계측하였으며, GR 은 모터와 구동륜 사이의 감속비이다.

$$K_l = \frac{V_{th} - V_a}{V_{th}} \quad (3)$$

$$V_{th} = \frac{\pi \times D_w \times N_w \times GR \times 3.6}{60} \quad (4)$$

여기서, K_l : longitudinal slip

V_{th} : theoretical vehicle travel speed ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)

V_a : actual vehicle travel speed of longitudinal axis ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)

D_w : diameter of the wheel (m)

N_w : wheel axle rotational speed (rpm)

GR : gear ratio between motor and wheel

타이어의 견인력은 식(5)와 같이 차축 토크와 타이어의 지름을 이용하여 계산한다.

$$F_t = \frac{T}{r} \quad (5)$$

여기서, F_t : traction on tire (N)

T : axle torque (Nm)

r : tire radius (m)

종방향강성계수는 견인력 계측을 통해 도출한 차량 진행방향으로의 슬립율로 나누어 도출하였다.

마찰계수

마찰계수는 슬립율을 이용하여 선정하였으며, 슬립율은 선행연구(Kim et al., 2022)를 참고하여 계측하였다. 시험이 수행된 노지의 토성은 모래 또는 돌이 섞인 도로이며 sand 비율이 24%, silt 비율이 62%, clay 비율이 14%로 나타났다. 따라서, USDA (United States Department of Agriculture) 토성 분류법에 따라 미사질양토(silt loam)로 분류되었으며 토성에 따라 최대마찰계수, 최소마찰계수를 각각 1.0, 0.2로 선정하였다.

구름저항

구름저항은 차량이 종방향으로 진행하는데 발생하는 저항 값을 의미하며, 이를 시뮬레이션에 반영하기 위해 구름저항 계수를 선정하였다. 구름저항 계수는 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 이하의 속도에서는 노면 조건에 따라 계수를 선정하며, 기준은 Table 1과 같다(Renius, 2020).

Table 1. Rolling resistance coefficients according to road conditions.

Road conditions	Coefficient
Asphalt	0.04
Concrete	0.07
Block	0.10
Gravel	0.2 - 0.3
Sand or rock	0.2 - 0.3
Sandy loam	0.3 - 0.4

최종 구름저항은 식(6)과 같이 구름저항 계수와 차량 하중의 곱으로 계산된다.

$$R_r = \mu_r \times w \quad (6)$$

여기서, R_r : rolling resistance (kgf)

μ_r : rolling resistance coefficient

w : weight of vehicle (kgf)

이외의 계수인 댐핑계수, 슬립에 따른 횡방향 강성계수, 캠버각에 따른 횡방향강성계수는 선행연구를 참고하여 각각 0.2, 2,400, 3,000으로 선정하였다(Yoon et al., 2022).

시뮬레이션 조건

시뮬레이션 조건은 계측 시험과 마찬가지로 노지 주행을 수행하였으며, 주행환경은 타이어에 노지의 마찰계수를 입력함으로써 반영하였다. 속도 조건은 플랫폼 동역학 모델에 실제로 계측한 플랫폼의 휠 회전속도를 입력하여 시뮬레이션을 수행하였다.

데이터 검증

시뮬레이션 모델을 검증하기 위해 전기구동 차량과 시뮬레이션 모델의 각 차축의 토크 및 출력을 분석하였다. 차축의 출력은 차축 회전속도와 차축 토크를 이용하여 식(7)과 같이 계산하였으며, 데이터는 식(8)과 같이 절대오차를

계산하여 분석하였다.

$$P = \frac{2 \times \pi \times T \times N}{60,000} \quad (7)$$

여기서, P : motor power (kW)

T : axle torque (Nm)

N : wheel axle rotational speed (rpm)

$$\text{Absolute error} = \frac{|\text{Simulated data} - \text{Measured data}|}{\text{Measured data}} \times 100(\%) \quad (8)$$

Results and Discussion

수직강성계수

수직강성계수는 수직변형량에 따른 하중을 분석하여 선정하였으며, 계측 결과 수직강성계수는 Fig. 7과 같이 약 $37 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 로 나타났다.

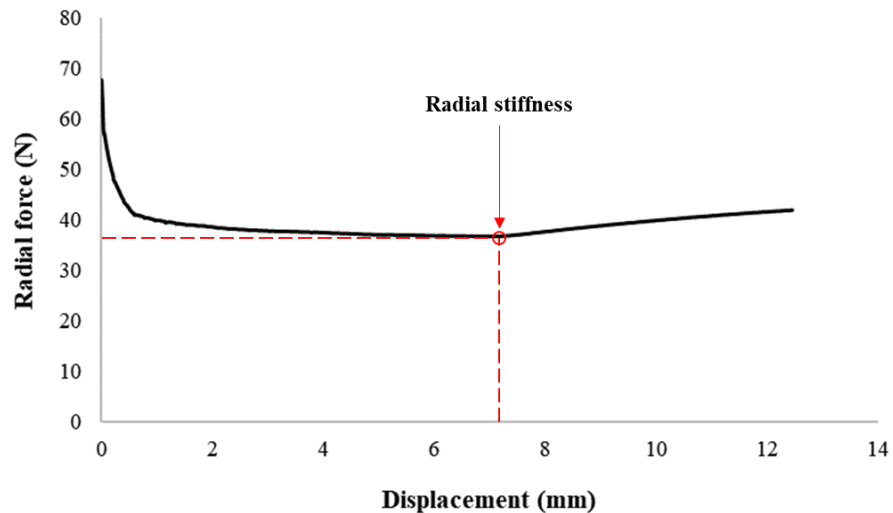


Fig. 7. Result of measured tire radial stiffness.

종방향강성계수

전기구동 플랫폼의 슬립율은 노지에서 약 27%로 나타났으며, 타이어의 견인력은 노지에서 약 12.1 N으로 나타났다. 계산을 통해 얻은 슬립율과 타이어 견인력을 이용하여 종방향강성계수를 계산하였으며, 종방향강성계수는 노지 주행 조건에서 44.63으로 계산되었다.

구름저항

계측 시험은 모래 또는 돌이 섞인 도로 조건에서 수행되었기 때문에 0.25를 구름저항 계수로 선정하였다. 구름저항은 토양의 마찰계수와 차량의 하중의 곱으로 나타나며, 차체 하중 및 계측시스템의 하중을 고려하여 총 하중은 100 kg_f로 고려하였다. 따라서, 최종 구름저항은 25 kg_f로 계산되었다.

타이어 물성에 대한 시뮬레이션 입력값은 Table 2와 같으며, 수직강성계수와 종방향강성계수는 계측값인 37, 44.63을 각각 입력하였다. 이외의 계수들은 선행연구를 참고하여 댐핑계수 0.2, 슬립에 따른 횡방향강성계수 2,400, 캠버각에 따른 횡방향강성계수 3,000, 마찰계수 0.25, 최대 구름저항 계수 1.0, 최소 구름저항 계수 0.2로 입력하였다.

Table 2. Input parameters of tire model.

Tire parameters	Coefficient	References
Radial stiffness coefficient	37	Measured
Damping ratio coefficient	0.2	Yoon et al. (2022)
Longitudinal stiffness coefficient	44.63	Measured
Lateral slip stiffness coefficient	2,400	Yoon et al. (2022)
Camber stiffness coefficient	3,000	Yoon et al. (2022)
Rolling resistance coefficient	0.25	Renius (2020)
Maximum friction coefficient	1.0	Soil Survey Staff (2022)
Minimum friction coefficient	0.2	Soil Survey Staff (2022)

노지 주행 결과

직진 주행 시 각 차축의 회전속도는 Fig. 8과 같이 모든 차축에서 유사하게 나타났다.

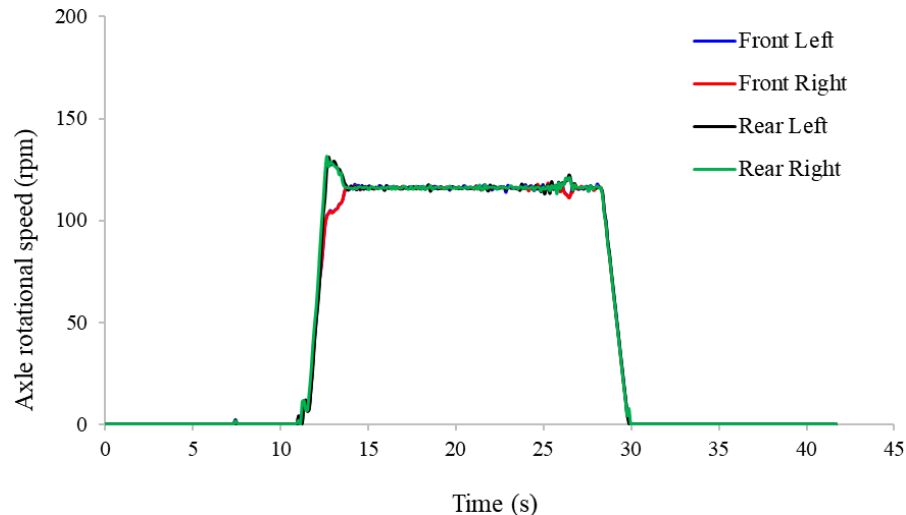


Fig. 8. Results of measured axle rotational speed during driving upland field.

주행 중 차축 토크와 출력은 Fig. 9와 같이 나타났다. 두 그래프의 개형은 유사하게 나타났으며, 이는 차축 출력은 차축 토크와 차축 회전속도의 곱으로 계산하였기 때문인 것으로 판단된다.

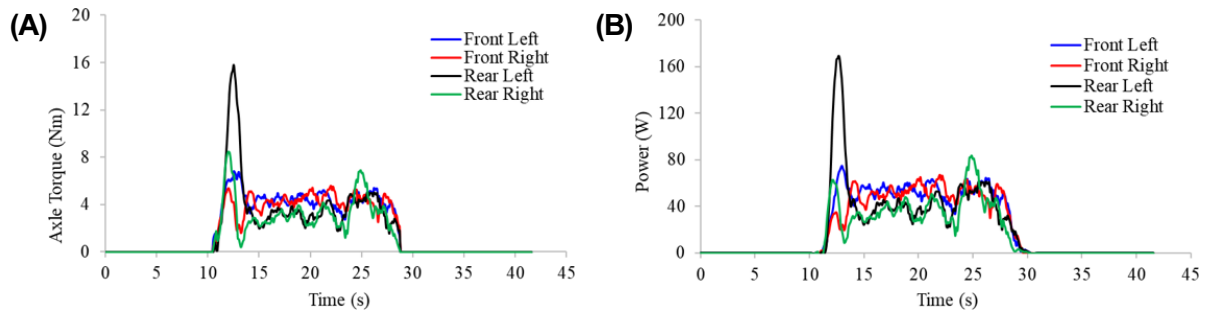


Fig. 9. Results of measured (A) axle torque; (B) axle power during driving upland field.

차축 토크는 주행 초기 구간에 높게 나타나 이후 감소하는 것으로 나타났다. 차축 토크는 주행 초기 구간에서 약 5초 동안 전륜보다 후륜에서 높게 나타났으며, 이는 계측 시스템이 차량의 후면에 위치하기 때문인 것으로 판단된다. 5초 이후로는 차축 토크는 후륜보다 전륜에서 높게 나타났으며, 이는 주행 중 전륜에서 토양과의 마찰을 이겨내기 때문인 것으로 판단된다. 후륜보다 전륜에서 토양 구름저항이 더 크게 작용하는 것은 주행 중 전륜의 궤적을 후륜이 추종하기 때문인 것으로 판단되며, 주행 중 토양 환경의 비정형성으로 인해 후륜좌측 차축 토크가 타 차축 방향 대비 높게 나타나는 경향을 보였다. 주행 구간 동안 차축 토크와 출력 데이터에서 변동이 크게 나타나는 것은 노지 주행 환경의 불안정성으로 인한 것으로 판단된다.

주행 중 각 차축의 회전속도, 토크 및 출력은 Table 3과 같다. 차축의 평균 회전속도는 모든 차축에서 약 115 rpm으로 나타났다. 차축의 평균 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 4.50, 4.21, 4.04, 3.22 Nm로 나타났으며, 최대 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 6.81, 5.56, 15.81, 6.92 Nm로 나타났다. 차축의 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 53.42, 50.56, 47.34, 38.07 W로 계산되었으며, 최대 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 60.47, 65.47, 50.05, 47.99 W로 계산되었다.

Table 3. Result of measured data of the electric all-wheel-drive vehicle during driving.

Items		Front left	Front right	Rear left	Rear right
Axle rotational speed (rpm)	Average	115	115	115	115
Axle torque (Nm)	Average	4.50	4.21	4.04	3.22
	Maximum	6.81	5.56	15.81	6.92
Axle power (W)	Average	53.42	50.56	47.34	38.07
	Maximum	60.47	65.47	50.05	47.99

시뮬레이션 결과

시뮬레이션 중 차축 토크와 출력은 Fig. 10과 같이 나타났으며, 두 그래프의 개형은 유사하게 나타났다. 이는 노지 주행과 마찬가지로, 차축 토크와 회전속도의 곱으로 차축 출력을 계산하였기 때문인 것으로 판단된다.

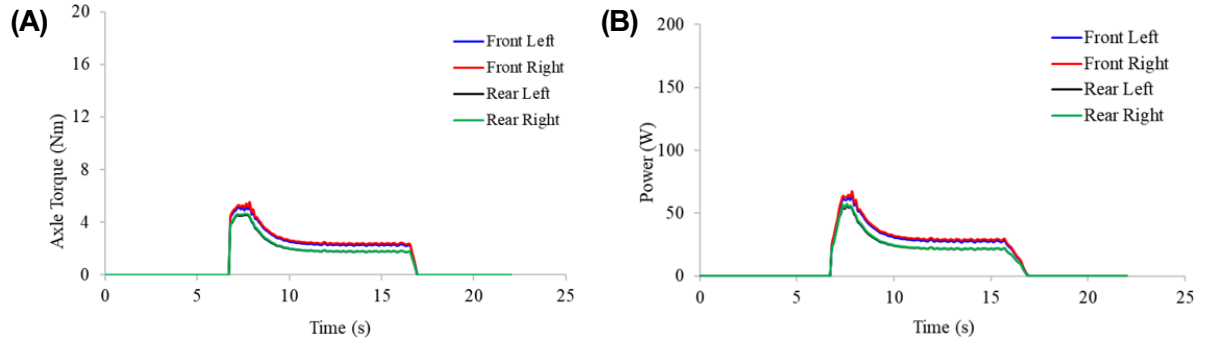


Fig. 10. Results of simulated (A) axle torque; (B) axle power during driving upland field.

시뮬레이션 중 차축 토크 및 출력은 Table 4와 같다. 차축의 평균 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 4.51, 3.90, 4.16, 3.32 Nm로 나타났으며, 최대 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 4.98, 4.27, 4.32, 4.39 Nm로 나타났다. 차축의 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 55.79, 48.11, 51.62, 41.20 W로 계산되었으며, 최대 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 59.78, 51.50, 53.11, 52.78 W로 계산되었다.

Table 4. Result of simulated data of the electric all-wheel-drive vehicle during driving.

Items		Front left	Front right	Rear left	Rear right
Axle torque (Nm)	Average	4.51	3.9	4.16	3.32
	Maximum	4.98	4.27	4.32	4.39
Axle power (W)	Average	55.79	48.11	51.62	41.2
	Maximum	59.78	51.5	53.11	52.78

시뮬레이션 데이터는 계측 데이터와 비교하였을 때 안정적으로 나타났으며, 이는 시뮬레이션이 주행 환경의 불안정성을 완벽하게는 반영하지 못한 것으로 판단된다.

계측 결과와 시뮬레이션 결과의 편차는 주행 초기 구간에서 가장 크게 나타났으며, 후륜좌측에서 특히 크게 나타났다. 이는 주행 초기에 토양과의 마찰을 이겨내야 하며, 계측 시스템이 차량의 후면에 위치하며, 주행 환경이 고르지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

시뮬레이션 검증

시뮬레이션 모델 검증은 노지 주행과 시뮬레이션 주행 데이터의 절대 오차를 분석하였다. 노지 주행과 시뮬레이션 주행 사이의 차축 토크 및 출력 절대 오차는 Table 5와 같다. 차축 토크 절대 오차는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 0.22, 7.36, 2.97, 3.11%로 계산되었으며, 차축 출력 절대 오차는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 4.44, 4.85, 9.04, 8.22%로 나타났다. 차축 토크와 출력의 평균 오차는 각각 약 3.42, 6.64%로 나타났다.

Table 5. Absolute error between measured data and simulation data.

Items	Front left	Front right	Rear left	Rear right
Axle torque (%)	0.22	7.36	2.97	3.11
Axle power (%)	4.44	4.85	9.04	8.22

추후 연구에서는 토양 함수율(water content), 체적 밀도(bulk density), 소성지수(plastic index), 액성 한계(liquid limit), 소성 한계(plastic limit) 등 토양 환경의 비정형성을 반영할 수 있는 이산요소법 소프트웨어(EDEM)를 활용하여 토양 모델을 개발하여 다물체 동역학 소프트웨어(RecurDyn, FunctionBay, Inc., Korea)와의 co-simulation을 통한 개선된 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conclusion

본 연구는 국내 밭 농업에서 다목적으로 사용 가능한 전기구동 차량의 시뮬레이션 모델 개발을 위한 기초 연구로써, 다물체 동역학 소프트웨어를 사용하여 전기구동 차량 모델을 개발하였으며, 계측한 타이어 물성을 시뮬레이션 모델에 반영하였다. 개발한 차량 모델의 성능은 시뮬레이션 모델과 4륜 전기구동 차량의 차축 토크와 출력을 비교함으로써 평가하였다. 4륜 전기구동 차량주행 중 소요동력을 계측하고 분석하였다. 차축 토크와 휠 회전속도를 계측하기 위해 데이터 계측 시스템을 구성하였으며, 주행 시험 중 데이터를 계측하고 분석하였다.

차축의 회전속도와 토크를 계측 파라미터로 선정하였으며, 계측 파라미터를 이용하여 차축의 출력을 계산하였다. 주행 중 차축의 평균 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 4.50, 4.21, 4.04, 3.22 Nm로 나타났으며, 차축의 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 53.42, 50.56, 47.34, 38.07 W로 계산되었다. 시뮬레이션 결과, 차축의 평균 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 4.51, 3.9, 4.16, 3.32 Nm로 나타났으며, 차축의 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 55.79, 48.11, 51.62, 41.2 W로 계산되었다. 차축 토크 절대오차는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 0.22, 7.36, 2.97, 3.11%로 계산되었으며, 차축 출력 절대오차는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 4.44, 4.85, 9.04, 8.22%로 계산되었다. 추후 연구에서는 토양 환경의 비정형성을 반영한 토양 모델을 개발하여 개선된 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 동역학 파라미터를 고려하지 못하고, 타이어의 노지 마찰계수만을 고려하였다. 다양한 주행 환경을 고려하기 위해 토양 함수율, 체적 밀도, 소성 지수, 액성 한계, 소성 한계 등 토양 환경의 비정형성을 반영할 수 있는 이산요소법 소프트웨어를 활용하고, 이산요소법 소프트웨어와 다물체 동역학 소프트웨어와의 co-simulation을 통해 시뮬레이션 환경을 다양화할 계획이다.

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 친환경동력원적용농업기계기술개발사업(322045-04)과 기술사업화지원사업(122033-2)의 지원을 받아 연구되었음.

Authors Information

Min Jong Park, <https://orcid.org/0000-0003-2840-339X>

Hyeon Ho Jeon, <https://orcid.org/0000-0003-0998-3819>

Seung Yun Baek, <https://orcid.org/0000-0001-7330-6949>

Seung Min Baek, <https://orcid.org/0000-0002-4627-191X>

Yong Joo Kim, <https://orcid.org/0000-0002-1212-9018>

References

- Baek SY, Baek SM, Jeon HH, Kim WS, Kim YS, Sim TY, Cho KH, Hong SJ, Kim HG, Kim YJ. 2022a. Traction performance evaluation of the electric all-wheel-drive tractor. *Sensors* 22:785.
- Baek SY, Baek SM, Jeon HH, Lee JH, Kim WS, Kim YJ. 2022b. Design verification of an E-driving system of a 44 kW-class electric tractor using agricultural workload data. *Journal of Drive and Control* 19:36-45. [in Korean]
- Baek SY, Kim KW, Lim RG, Choi CH, Kim YJ. 2019. Development of simulation model for electric all-wheel-drive tractor using workload analysis. In: *Proceedings of the 2019 Spring Conference on Drive and Control*. pp. 223-224. Jeju, Korea: KSFC. [in Korean]
- Cho SH, Lee DH, Chung SO. 2023. Technological trends in agricultural engineering. *Journal of Agricultural Machinery Engineering* 3:53-63. [in Korean]
- 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]
- Grimstad L, Pham CD, Phan HT, From PJ. 2015. On the design of a low-cost, light-weight, and highly versatile agricultural robot. In: *Proceedings of the 2015 IEEE International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*. pp. 1-6. Lyon, France: IEEE.
- Jeon HH, Baek SM, Baek SY, Hong YS, Kim TJ, Cho Y, Kim YK, Lee SH, Kim YJ. 2023a. Development and validation of simulation model for traction power and driving torque prediction of upland multipurpose platform. *Journal of Drive and Control* 20:16-26. [in Korean]
- Jeon HH, Baek SM, Baek SY, Kim YJ. 2023b. Development of dynamics simulation model of agricultural tractor for prediction of axle torque. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A* 47:853-864. [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 TJ, Jeon HH, Siddique MAA, Choi JY, Kim YJ. 2023a. Development and performance analysis of a crawler-based driving platform for upland farming. *Journal of Drive and Control* 20:100-106. [in Korean]
- Kim WS, Baek SY, Kim TJ, Kim YS, Park SU, Choi CH, Hong SJ, Kim YJ. 2019. Work load analysis for determination of the reduction gear ratio for a 78 kW all wheel drive electric tractor design. *Korean Journal of Agricultural Science* 46:613-627. [in Korean]
- Kim WS, Lee SE, Baek SM, Baek SY, Jeon HH, Kim TJ, Lim RG, Choi JY, Kim YJ. 2023b. Evaluation of exhaust emissions factor of agricultural tractors using portable emission measurement system (PEMS). *Journal of Drive and Control* 20:15-24. [in Korean]
- Kim YS, Lee SD, Baek SM, Baek SY, Jeon HH, Lee JH, Kim WS, Shim JY, Kim YJ. 2022. Analysis of the effect of tillage depth on the working performance of tractor-moldboard plow system under various field environments. *Sensors* 22:2750.
- Kook JH, Kim NE, Choi KM, Kim YJ, Kim YJ, Seo CD, Kim HT. 2021. Comparison of carbon dioxide emission concentration according to the year of use of agricultural heaters. *Journal of Agricultural Machinery Engineering* 1:47-54. [in Korean]

- Lee JH, Jeon HH, Baek SY, Baek SM, Kim WS, Siddique MAA, Kim YJ. 2022. Analysis of emissions of agricultural tractor according to engine load factor during tillage operation. *Journal of Drive and Control* 19:54-61. [in Korean]
- Rathore D, Divyanth LG, Reddy KLS, Chawla Y, Buragohain M, Soni P, Machavaram R, Hussain SZ, Ray H, Ghosh A. 2023. A two-stage deep-learning model for detection and occlusion-based classification of Kashmiri orchard apples for robotic harvesting. *Journal of Biosystems Engineering* 48:242-256.
- Renius KT. 2020. *Fundamentals of Tractor Design*. pp. 27-30, 32-35. Springer, Berlin, Germany.
- Soil Survey Staff. 2022. *Keys to Soil Taxonomy (13th)*. USDA Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C., USA.
- 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]
- Zeeshan S, Aized T. 2023. Performance analysis of path planning algorithms for fruit harvesting robot. *Journal of Biosystems Engineering* 48:178-197.