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,*}

1 Department of Smart Agricultural Systems, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea 2 Department 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 km \cdot 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 , 이로 인해 세계의 여러 국가에서
· Stage V 규제를 시행하고 있으며,
———————————————— 춶뾶붆퐪뽢쬂붛흖쑪. 쵾뻳Tier-4 Final, 즃Stage V 뽢쬂푢빦쯶,

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-Com-

mercial 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 협 (Lee et al., 2022; Kim et al., 2023b). 또한, 2023년무터 5년 단위로 파리 협
가하기 위한 이행점검이 시행되고 있다(Kook et al., 2021). 이러한 규제를
·동력원으로 사용하려는 움직임이 있으며, 그 중 배터리를 동력원으로 하
i]고 있다. Kim 등(2019)은 78 kW급 전기구동 트랙터 파워트레인을 설계 성의 이행 및 상기 목표 날성 가능성을 평가하기 위한 이행섬검이 시행되고 있다 성의 이행 및 상기 목표 날성 가능성을 평가하기 위한 이행섬검이 시행되고 있다(Kook et al., 2021). 이러한 규제를
만족하기 위해 최근에는 다양한 에너지를 동력원으로 사용하려는 움직임이 있으며, 그 중 배터리를 동력원으로 하
는 전기구동에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. Kim 등(2019)은 78 kW급 전기구동 트랙터 파워트레인을 설계
하기 위해 실제 농작업 조건 및 환경에 만족하기 위해 최근에는 다양한 에너지를 동력워으로 사용하려는 움직임이 있으며, 그 중 배터리를 동력워으로 하 만속하기 위해 죄근에는 다양한 에너지를 농력원으로 사용하려는 움직임이 있으며, 그 중 배터리를 농력원으로 하
는 전기구동에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. Kim 등(2019)은 78 kW급 전기구동 트랙터 파워트레인을 설계
하기 위해 실제 농작업 조건 및 환경에 따라 상용 모터에 다양한 기어 감속비 조합을 분석하였으며 감속비 선정 단
계를 제시하였다. Baek 등(2022b)은 44 kW 는 전기구동에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. Kim 등(2019)은 78 kW금 전기구동 트랙터 파워트레인을 설계 . Kim 능(2019)은 78 kW급 전기구농 트랙터 파워트레인을 설계
로터에 다양한 기어 감속비 조합을 분석하였으며 감속비 선정 단
구동 트랙터의 단수에 따른 농작업 가능 여부를 판단하여 전기구
022a)은 4륜 전기구동 트랙터를 설계 및 개발하고 시험 차량을 견 : Baek 능(2022b)은 44 kW급 선기구농 트랙터의 단수에 따른 농삭업 가능 여부를 판단하여 선기구
| 검증을 수행하였으며, Baek 등(2022a)은 4륜 전기구동 트랙터를 설계 및 개발하고 시험 차량을 견
!랙터의 견인력을 평가하였다. 하지만 이러한 연구들은 주로 농기계 중 사용빈도가 가장 높은 트랙
·행되었으며, 전체 농지 면적 중 밭 면적 비율이 44.8%인 국내 농업 환경을 농 시스템의 설계 검증을 수행하였으며 , Baek 능(2022a)은 4듄 선기구동 트랙터를 설계 및 개말하고 시험 자당을 견
하였다. 하지만 이러한 연구들은 주로 농기계 중 사용빈도가 가장 높은 트랙
| 면적 중 밭 면적 비율이 44.8%인 국내 농업 환경을 고려했을 때 밭 농업 플 인하여 개말한 트랙터의 견인력을 평가하였다 . 하지만 이러한 연구들은 수도 농기계 중 사용빈노가 가상 높은 트랙
중 밭 면적 비율이 44.8%인 국내 농업 환경을 고려했을 때 밭 농업 플

연구가 수행되고 있으며, 주로 다양한 작업을 수행할 수 있는 주행플 터들 대상으로 수행뇌었으며 랫폼에 대한 연구 또한 필요하다.

, 선제 농지 면석 숭 밭 면석 비율이 44.8%인 국내 농업 완경을 고려했을 때 맡 농업 플
하다.
뱃폼 개발에 대한 연구가 수행되고 있으며, 주로 다양한 작업을 수행할 수 있는 주행플

인행되고 있다(Cho et al., 2023). Kim 등(2021)은 밭 농업을 위한 모듈형 농업 로봇 플랫 .
5
. 죄근에는 밭 농업 도못 플랫폼 개말에 대한 연구가 수행되고 있으며 , 수도 다양한 삭업을 수행할 수 있는 수행을
21)은 밭 농업을 위한 모듈형 농업 로봇 플랫
기 위한 실험을 수행하였다. Cho 등(2020)은
봇 플랫폼을 개발하여 요소별 주행 평가를 통 랫폼 중심으로 기술 개말이 신행뇌고 있다 (Cho et al., 2023). Kim 능(2021)은 맡 농업을 위한 모듈형 농업 도못 플랫
1된 플랫폼의 성능을 확인하기 위한 실험을 수행하였다. Cho 등(2020)은
용할 수 있는 모듈형 농업 로봇 플랫폼을 개발하여 요소별 주행 평가를 통
은 600 W 모터 4개로 구동되는 가변형 농업용 로봇인 Thorvald 플랫폼을 <mark>쏨 개선에 대한 연구들 수행하</mark>였으며 , 개선된 플랫폼의 성능을 왁인하기 위한 실험을 수행하였다. Cho 능(2020)은
에 적용할 수 있는 모듈형 농업 로봇 플랫폼을 개발하여 요소별 주행 평가를 통
015)은 600 W 모터 4개로 구동되는 가변형 농업용 로봇인 Thorvald 플랫폼을
업기를 개발하고 부착하여 농작업을 수행하였다. 밭 농업 환경 외에도 다양한 밭 완경에서 다양한 삭물과 재배양식에 석용할 수 있는 모듈형 농업 도못 플랫폼을 개발하여 요소별 수행 평가를 동 해 성능을 검증하였다. Grimstad 등(2015)은 600 W 모터 4개로 구동되는 가변형 농업용 로봇인 Thorvald 플랫폼을 . Grimstad 능(2015)은 600 W 모터 4개로 구동뇌는 가면형 농업용 로못인 Thorvald 플랫폼을
합한 다양한 작업기를 개발하고 부착하여 농작업을 수행하였다. 밭 농업 환경 외에도 다양한
동 플랫폼에 대한 연구가 진행되고 있다. Zeeshan과 Aized (2023)는 소형 수확 로봇을 개발하
안정성을 평가하였으며, Rathore 등(2023)은 사과 수확 로봇을 개발하여 수확 개발하고 플랫폼에 적합한 다양한 작업기를 개발하고 부착하여 농작업을 수행하였다. 밭 농업 환경 외에도 다양한 . 밭 농업 환경 외에도 다양한
))는 소형 수확 로봇을 개발하
ll발하여 수확 작업 중 성능을 농업 환경에서 전기구농 플랫폼에 대한 연구가 진행되고 있다 . Zeeshan과 Aized (2023)는 소형 수확 로못을 개발하
3)은 사과 수확 로봇을 개발하여 수확 작업 중 성능을

조건에 따른 각 부품의 성능을 평가할 경우, 자동차와 여 수확 작업 중 주행 안정성을 평가하였으며, Rathore 등(2023)은 사과 수확 로봇을 개발하여 수확 작업 중 성능을 평가하였다.

, Rathore 능(2023)은 사과 수확 로못을 개발하여 수확 삭업 중 성능을
램을 통해 작업 조건에 따른 각 부품의 성능을 평가할 경우, 자동차와
른 부하 데이터를 활용해야 한다(Baek et al., 2019). 하지만 밭 농업 로 .
|
|
| 농업 기계 문야에서는 시뮬레이션 프로그램을 통해 작업 조건에 따른 각 무품의 성능을 평가할 경우 , 자농자와
밭 농업 로
|에 비해 소
|을 개발하 삭업 조건이 다르기 때문에 농작업 조건에 따른 무하 데이터를 활용해야 한다 (Baek et al., 2019). 하지만 밭 농업 로
서의 작업은 논에서의 작업에 비해 소
., 2023a), 밭 작업용 플랫폼을 개발하
을 예측하여 설계하는 것이 필요하다 봇 플랫폼의 소요동력 및 출력에 관한 연구는 아직까지 미비한 실정이다. 밭에서의 작업은 논에서의 작업에 비해 소 . 밭에서의 삭업은 논에서의 삭업에 비해 소
n et al., 2023a), 밭 작업용 플랫폼을 개발하
동력을 예측하여 설계하는 것이 필요하다 규모 및 경사지 등 비정형 환경이 대부분으로 주행환경이 열악하며(Jeon et al., 2023a), 밭 작업용 플랫폼을 개발하 (Jeon et al., 2023a), 맡 삭업용 플랫폼을 개말하
소요동력을 예측하여 설계하는 것이 필요하다

랑스의 VitiBot에서는 와인용 포도 재배에 활용 기 위해서는 농억학 시뮬레이션을 통해 구농 가능성을 왁인하고 소요농력을 예측하여 설계하는 것이 필요하다

(Yoon et al., 2022)
최근 해외에서는
잘 수 있는 Bakus를
폼 BoniRob을 개발 최근 해외에서는 다양한 농업용 로봇 플랫폼이 개발되고 있다. 프랑스의 VitiBot에서는 와인용 포도 재배에 활용 : 프당스의 VitiBot에서는 와인용 포노 재배에 왈용
|서는 제초, 파종, 수확 등 다목적 농업용 로봇 플랫
|농업 환경과 다르기 때문에 해외에서 개발된 밭 농

이 필요하다. 밭작업은 작물의 재배환경 및 작물 특 할 수 있는 Bakus를 개발하였으며, 독일의 Deepfield Robotics에서는 제초, 파종, 수확 등 다목적 농업용 로봇 플랫 Bakus를 개말하였으며, 독일의 Deepfield Robotics에서는 제조, 파송, 수왁 등 다목석 동업용 도못 플랫
›을 개발하였다. 하지만 국내 밭 농업 환경은 해외 밭 농업 환경과 다르기 때문에 해외에서 개발된 밭 농
플랫폼의 국내 노지 농업에 활용 가능성 여부는 분석이 필요하다. 밭작업은 작물의 재배환경 및 작물 특
작업 조건에 대한 고려가 필요하기 때문에 다양한 실험이 필요하다(K 峕. BoniRob을 개말하였다. 하지만 국내 맡 동업 완경은 해외 맡 동업 완경과 다르기 때문에 해외에서 개말된 맡 동
용 로봇 플랫폼의 국내 노지 농업에 활용 가능성 여부는 분석이 필요하다. 밭작업은 작물의 재배환경 및 작물 특
에 맞는 작업 조건에 대한 고려가 필요하기 때문에 다양한 실험이 필요하다(Kim et al., 2023a).
따라서, 본 연구는 밭 농업에서 다목적으로 사용 가능한 전기 업쑝 도봇 플랫폼의 국내 노지 농업에 왈쑝 가능성 여무는 문석이 필요하다 성에 맞는 작업 조건에 대한 고려가 필요하기 때문에 다양한 실험이 필요하다(Kim et al., 2023a).

. 맡삭업은 삭물의 재배완경 및 삭물 득
·다(Kim et al., 2023a).
시뮬레이션 모델 개발을 위한 기초연구

 -
이용하여 개발하였으며, 밭 농업 전 、
뮬레이션 모델 개발
- 이용하여 개발하<u>있</u>
- 이용하여 개발하있 따라서 , 몬 연구는 밭 농업에서 다목적으로 사용 가능한 전기구동 자량의 시뮬레이션 모델 개발을 위한 기조연구
물레이션 모델은 타이어 물성을 계측하여 다물체 동역학 소프트웨어를 이용하여 개발하였으며, 밭 농업 전
·랫폼의 주행성능 시험을 통하여 시뮬레이션 모델의 정확도를 분석하였다.
* 도서 , 시뮬레이션 모델은 타이어 물성을 계즉하여 다물제 농역학 소프트웨어를 이용하여 개발하였으며, 밭 농업 전
동 플랫폼의 주행성능 시험을 통하여 시뮬레이션 모델의 정확도를 분석하였다.
 기구농 플랫폼의 수행성능 시험을 통하여 시뮬레이션 모델의 성확도를 문석하였다

Materials and Methods

공시 전기구동 차량

본 연구에서는 국내 소형 밭 농업 환경에서 농작물 등 환경 모니터링에 활용하기 위하여 Fig. 1의 1.6 kW급 전기 Fig. 11.6 kW뾏뾶 구동 플랫폼을 대상으로 선성하였다(Scout 2.0, AgileX, China). 선기구동 플랫폼의 크기는 930 mm (L) × 699 mm
Interval Science 51(3) September 2024
a16

(W) × 349 mm (H)이며, 무게는 666 N이다. 선력원은 24 V 30 Ah의 리튬 배터리로 종 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 구
성되어 있 구동 시스템은 400 W의 모터 4개를 사용하여 독립적으로 구동한다. 구동 모터의 성능곡선은 Fig. 2와 같으며, 정격 400 W의 모터 4개를 사용하여 녹립석으로 구동한다. 구동 모터의 성능곡선은 Fig. 2와 같으며, 성격
크는 각각 3,000 rpm, 1.27 Nm이다. 모터는 인휠 타입으로 타이어와 직결되어 동력을 전달하도록 구
. 제어가 용이하기 때문에 소형 전기 플랫폼에서 자주 사용되고 있다. 모터와 타이어 사이의 감속비
|어는 바이어스 플라이 타입으로, 최대 부하는 280 kPa에서 200 kgs이 회전속도와 토크는 각각 : 3,000 rpm, 1.27 Nm이다. 모터는 인월 타입으로 타이어와 식결되어 농력을 전날하도록 구
}이하기 때문에 소형 전기 플랫폼에서 자주 사용되고 있다. 모터와 타이어 사이의 감속비

이어스 플라이 타입으로, 최대 부하는 280 kPa에서 200 kgs이며, 지름은 33 cm, 폭은 12.7
이다. 성되어 있으며 , 제어가 용이하기 때문에 소형 전기 플랫폼에서 자수 사용되고 있다. 모터와 타이어 사이의 감속비
이어는 바이어스 플라이 타입으로, 최대 부하는 280 kPa에서 200 kgs이며, 지름은 33 cm, 폭은 12.7
15.24 cm이다.
 쐚30쑪. 휺쐚춚휺퐪줂짢, 쒆켆쐚280 kPa흖튢200 kgs쯶, 쬊33 cm, 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 , 검승 데이터는 자숙 토크로
ER Sensortelemetrie GmbH,
- 설치하여 계측하였다.
-선성하였다 . 자숙 회선속노와 토크는 각 자숙에 근섭센서(DZ-Sensor Laser, MANNER Sensortelemetrie GmbH,
| 토크미터(MW_0.5 kNm, MANNER Sensortelemetrie GmbH, Germany)를 설치하여 계측하였다.
| Germany)ퟆ쵾(MW_0.5 kNm, MANNER Sensortelemetrie GmbH, Germany)쬂튪흲빊힆쑪.

GPS (global positioning system) (BU-353S4, GlobalSat WorldCom, Taiwan)는 자량 속도를 계즉하기 위해 설치하
으며 하중은 62.37 g, 채널 수는 48개, 위치 정확도는 15 m 이내, 속도 정확도는 0.1 m·s⁻¹ 이내, 시간 정확도는 ±100
이다. 데이터는 CAN 모듈(Q.bloxx module, Gantner, Austria) 였으며 하중은 62.37 g, 채널 수는 48개, 위치 정확도는 15 m 이내, 속도 정확도는 0.1 m·s⁻¹ 이내, 시간 정확도는 ±100
ns이다. 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 고 ns이다. 데이터는 CAN 모뉼(Q.bloxx module, Gantner, Austria)을 이용하여 수십하였으며, CAN 모듈의 하숭은 200
g, 해상도는 24 bit, 샘플링레이트는 10 kHz이다. 계측 박스는 주행 중 CAN 모듈을 고정할 수 있도록 설치하였으며,
계측 시스템은 Fig. 3과 같이 구성하였다. g, 퉇않쐚24 bit, 퉞쭇즎쐚10 kHz쑪. 빊춛퐪쐚CAN 찮왎빦펞않짣튪힆쯶,

계측 시험은 전기구동 플랫폼이 밭 농업 환경에서 주로 직진 주행을 하는 것을 고려하여, Fig. 4와 같이 충남대학교 , Fig. 4와 같이 중남대학교
조건을 고려하여 모터 정격
|량의 주행속도인 7 km·h⁻¹ 밭 환경(36°36'68.8"N, 127°35'25.0"E)에서 수행하였다. 주행 간 험지 극복 등 높은 부하 조건을 고려하여 모터 정격 (36°36′68.8″N, 127°35′25.0″E)에서 수행하였다. 수행 간 험지 극목 능 높은 무하 소건을 고려하여 모터 성격
도의 120%를 주행 조건으로 선정하였다. 이때의 차륜 회전속도는 120 rpm이며, 차량의 주행속도인 7 km·h⁻¹
· 시험 중 주행속도로 선정하였다. 회전속도의 120%를 주행 조건으로 선정하였다. 이때의 차륜 회전속도는 120 rpm이며, 차량의 주행속도인 7 km·h⁻¹
를 계측 시험 중 주행속도로 선정하였다.
 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, (Recurdyn V9R4, FunctionBay, Inc., Korea)를 이용하여 수행하였으며,
}하였다. 동역학 모델은 회전 조건과 고정 조건 총 2개의 구속조건을 사
|전 조건을 이용하여 주행 시뮬레이션을 구현하였다. 차량 상부의 육면
측 박스는 고정 조건을 이용하여 차량 상부에 고정되도록 하였다. 농역학 모델은 자량의 제원과 농일하게 구성하였다 . 농역학 모델은 회전 조건과 고성 조건 종 2개의 구속조건을 사
!을 이용하여 주행 시뮬레이션을 구현하였다. 차량 상부의 육면
는 고정 조건을 이용하여 차량 상부에 고정되도록 하였다.
 뵹하여∶ Fig. 5ퟆ붟뻲힆쑪. 붇뷺흲푢촲즎틞뻲힆쑪. 쥏퉇켆쯺

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 UA (University of Arizona)를 활용하였다. 타이어 모델은
해당 모델을 이용하였다. 타이어 입력 계수로는 수직강성
coefficient), 종방향강성계수(longitudinal stiffness coeffi-
 입력되는 계수로 토양 조건을 구현하기 용이하기 때문에 해당 모델을 이용하였다. 타이어 입력 계수로는 수직강성 . 타이어 입력 계수도는 수식강성
계수(longitudinal stiffness coeffi-
 계수(radial stiffness coefficient), 댐핑계수(damping ratio coefficient), 송방향강성계수(longitudinal stiffness coeffi-
ht Agricultural Science 51(3) Sentember 2024
319

cient), 슬립에 따른 횡방향 강성계수(lateral slip stiffness coeffieicnt), 캠버각에 따른 횡방향 강성계수(camber stiff-
ness coefficient), 마찰계수(friction coefficient) 및 구름저항 계수(rolling resistance coefficient)가 있다(Jeon et al.,
2023b). 수직강성계수는 수직으로 작용하 ness coefficient), 마잘계수(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 에너
지가 분산될 때 타이어가 얼마나 빨리 안정 상태로 돌아가는지 나타내는 계수이다. 종방향강성계수 2023b). 수식상성계수는 수식으로 삭용하는 힘에 따른 타이어의 변형량이며, 댐핑계수는 마잘력에 의해 진동 에너
지가 분산될 때 타이어가 얼마나 빨리 안정 상태로 돌아가는지 나타내는 계수이다. 종방향강성계수는 차량 진행방
향의 견인력에 따른 차량의 슬립 비율이다. 슬립에 따른 횡방향 강성계수는 측방력에 따른 슬립각으로 계산되며,
캠버각에 따른 횡방향 강성계수는 측방력에 따른 캠버각으로 계산된 지가 부산될 때 타이어가 얼마나 빨리 안정 상태로 돌아가는지 나타내는 계수이다. 종방향강성계수는 차량 진행방 : 송방향강성계수는 자량 진행방
력에 따른 슬립각으로 계산되며,
|적으로 측정이 용이한 수직강성

선정하였다. . 슬립에 따른 횡방향 강성계수는 즉방력에 따른 슬립각으로 계산되며,
|| 따른 캠버각으로 계산된다. 이 중 상대적으로 측정이 용이한 수직강성
|
외의 계수들은 선행연구를 참고하여 선정하였다. 캠버각에 따른 횡방향 강성계수는 즉방력에 따른 캠버각으로 계산뇐다. 이 중 상대석으로 즉성이 용이한 수식강성
계수와 종방향강성계수는 측정하였으며, 이외의 계수들은 선행연구를 참고하여 선정하였다.

수직강성계수 계수와 종방향강성계수는 측정하였으며, 이외의 계수들은 선행연구를 참고하여 선정하였다. mt), 슬립
ss coeffi
23b). 수 분산¹
가 분산¹
의 견인 종
수직강성
수직강성
수직강성
구값을 기
가 있는 *F*_r

수직강성계수

수와 송방향강성계수는 즉성하였으며, 이외의 계수들은 선행연구를 잠고하여 선성하였다.
수직강성계수
수직강성계수

수직강성계수는 Fig. 6과 같이 재료시험기(ST-1002, SALT Co., Ltd., Korea)를 이용하여 3번 Fig. 6과 같이 재료시험기(ST-1002, SALT Co., Ltd., Korea)를 이용하여 3번 반목 계속하였으며,
다. 타이어 상단 및 하단부를 지그를 이용하여 고정하였으며, 지속적으로 압축시키는 힘을 증가
_{병량을} 측정하였다. 수직강성계수는 식(1)을 이용하여 계산하였다.
 뽦붘툲힆쑪. 휺퉇쑮축쑮켆쬂뽾쬂흲빦힆쯶, 팓짢훛푢쐚붆 시키며 이 때의 변형량을 즉성하였다. 수식강성계수는 식(1)을 이용하여 계산하였다. $k_r = \frac{F_r}{D}$

$$
k_r = \frac{F_r}{D}
$$

 (1)

여기서, k_r : radial stiffness (N·mm⁻¹)
 F_r : radial force (N)
 $D:$ displacement (mm)

 F_r : radial force (N)

 $:$ displacement (\mathbf{r}) \overline{D} \mathbf{d}

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

종방향강성계수

송방향강성계수는 타이어의 견인력과 자량 진행방향으로의 슬립율을 이용하여 식(2)와 같이 계산하였으며 송
향강성계수를 계산하기 위해 해당 파라미터를 계측하였다.
F, 방향강성계수를 계산하기 위해 해당 파라미터를 계측하였다. 좋방향강
종방향강
향강성겨
LS= $\frac{F_t}{K}$

$$
LS = \frac{F_t}{K_l}
$$

7|*A*], *LS*: longitudinal stiffness (N)

여기서, LS : longitudinal stiffness (N)
 F_t : traction on tire (N)
 K_l : longitudinal slip

 F_t : traction on tire (N)

: longitudinal slip
: longitudinal slip

 길이 플랭 K_i : longitudinal slip

.
- 식(3)과 같이 플
실제 속도를 계측 슬립퓰은 식 (3)과 같이 플랫폼의 실제 속노와 이론 속노들 이용하여 계산한다. 플랫폼에 설지된 GPS를 활용하여
 속도를 계측하였으며, 플랫폼의 이론 속도는 휠 회전속도를 이용하여 식(4)를 통해 계산하였다. 휠
량 휠에 근접 센서를 설치하여 계측하였으며, GR은 모터와 구동륜 사이의 감속비이다.
 플랫폼의 실제 <mark>쪽노들 계즉하</mark>였으며 , 줱짦팓않쐚팓않쬂흲푣(4)쬂빊툶힆쑪. Bevelopment of simulation
- 장방향강성계수
종방향강성계수는 타이어의 견
향강성계수를 계산하기 위해 ㅎ
향강성계수를 계산하기 위해 ㅎ
 $LS = \frac{F_t}{K_l}$ 기서, LS : longitudinal stiffness
 F_t : traction on tire (N)
 K_l : longitudinal slip
슬립율은 식(3)과 같이 플랫폼의
댓폼의 실제 속도를 계측하였으
전속

회선속노는 자량 윌에 군업 셈서를 셸지하여 계속아었으며, GR은 보터와 구동是 사이의 삼속비이다.
\n
$$
K_{l} = \frac{V_{th} - V_{a}}{V_{th}}
$$
\n(3)
\n
$$
V_{th} = \frac{\pi \times D_{w} \times N_{w} \times GR \times 3.6}{60}
$$
\n(4)
\n
$$
\alpha J | \lambda |, K_{l}: \text{longitudinal slip}
$$
\n
$$
V_{th}: \text{theoretical vehicle travel speed (km·h-1)}
$$
\n
$$
V_{\alpha}: \text{actual vehicle travel speed of longitudinal axis (km·h-1)}
$$
\n
$$
D_{w}: \text{diameter of the wheel (m)}
$$
\n
$$
N_{w}: \text{wheel axle rotational speed (rpm)}
$$
\n
$$
GR: \text{ger ratio between motor and wheel}
$$
\nFo) of 21-12 = 41. (3)
\nFo) of 21-13 = 42. (4)

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

여기서, K_l
 V_t

 $h:$ theoretical vehicle transfer of the V_{th} : theoretical vehicle travel speed (km·h⁻¹)
 V_a : actual vehicle travel speed of longitudina
 D_w : diameter of the wheel (m)
 N : wheel axle rotational speed (rpm) V_a : actual vehicle travel speed of longitudinal axis (km·h⁻¹)
 D_w : diameter of the wheel (m)
 N_w : wheel axle rotational speed (rpm)
 GR : gear ratio between motor and wheel

 D_w : diameter of the wheel (m)

: wheel axle rotational spee
? : gear ratio between motor N_w

, where and rotational speed (rpm)
? : gear ratio between motor and wh
| 견이력은 식(5)와 같이 차축 토크! GR : gear ratio between motor and wheel

: gear ratio between motor and wheel

타이어의 선인력은 식(5)와 산이 자국 토크와 타이어의 지음을 이용하여 계산한다.
\n
$$
F_t = \frac{T}{r}
$$
\n(5)
\n기서, F_t : traction on tire (N)

여기서, F_t : traction on tire (N)
 T : axle torque (Nm)
 r : tire radius (m)

 T : axle torque (Nm)

 $r:$ tire radius (m)

: tire radius (m)
강성계수는 견인력 .
강성계수는 견<mark>인</mark>
-송방향상성계수는 견인력 계속을 통해 노술한 자량 신행방향으로의 슬립율로 나누어 노술하었다

마찰계수

마찰계수는 슬립율을 이용하여 서정하였으며, 슬립율은 선행연구(Kim et al., 2022)를 참고하여 계측하였다. 시 , 슬립율은 선행연구(Kim et al., 2022)를 잠고하여 계즉하였다. 시
도로이며 sand 비율이 24%, silt 비율이 62%, clay 비율이 14%로 나
t of Agriculture) 토성 분류법에 따라 미사질양토(silt loam)로 분류
||수를 각각 1.0, 0.2로 선정하였다. 험이 수행된 노지의 토성은 모래 또는 돌이 섞인 도로이며 sand 비율이 24%, silt 비율이 62%, clay 비율이 14%로 나 sand 비율이 24%, silt 비율이 62%, clay 비율이 14%로 나
ulture) 토성 분류법에 따라 미사질양토(silt loam)로 분류
각 1.0, 0.2로 선정하였다. 타났다. 따라서, USDA (United States Department of Agriculture) 토성 문듀법에 따라 미사실양토(silt loam)도 문듀
되었으며 토성에 따라 최대마찰계수, 최소마찰계수를 각각 1.0, 0.2로 선정하였다.
-
구름저항 되었으며 토성에 따라 최대마참계수, 최소마참계수를 각각 1.0, 0.2로 선정하였다.

구름저항

었으며 토성에 따라 죄대마잘계수, 죄소마잘계수를 각각 1.0, 0.2로 선성하였다.
구름저항
구<mark>름저항</mark>
구름저항은 차량이 종방향으로 진행하는데 발생하는 저항 값을 의미하며, 이를 , 이들 시뮬레이션에 반영하기 위해 구
.면 조건에 따라 계수를 선정하며, 기준
. 름저항 계수를 선정하였다. 구름저항 계수는 50 km·h⁻¹ 이하의 속도에서는 노면 조건에 따라 계수를 선정하며, 기준
은 Table 1과 같다(Renius, 2020).
Table 1. Rolling resistance coefficients according to road conditions.

죄송 구듬서항은 식(6)과 같이 구듬서항 계수와 자량 하숭의 곱으로 계산된다.

 $R_r = \mu_r \times w$

 $R_r = \mu_r \times w$

(6)

여기서, R_r : rolling resistance (kgf)
 μ_r : rolling resistance coeff
 w : weight of vehicle (kgf)

 μ_r : rolling resistance coefficient

 w : weight of vehicle (kgf)

: weight of vehicle (kgf)
제수인 댐핑계수. 슬립에 따른 ******;;;;*
계수인 댐핑계수, 슬립어
2,400, 3,000으로 선정하 이외의 계수인 냄꿩계수, 슬립에 따든 욍방향 강성계수, 캠버각에 따든 욍방향강성계수는 선행연구를 잠고하여
각 0.2, 2,400, 3,000으로 선정하였다(Yoon et al., 2022).
시뮬레이션 조건 각각 0.2, 2,400, 3,000으로 선정하였다(Yoon et al., 2022).

시뮬레이션 조건

각 0.2, 2,400, 3,000으로 선성하였다(Yoon et al., 2022).
시뮬레이션 조건
시뮬레이션 조건은 계측 시험과 마찬가지로 노지 주행을 수행하였으며 , 수행환경은 타이어에 노지의 마잘계수
||측한 플랫폼의 휠 회전속도를 입력하여
| 들 입력함으로써 반영하였다. 속도 조건은 플랫폼 농역학 모델에 실제로 계즉한 플랫폼의 윌 회선속도를 입력하여
시뮬레이션을 수행하였다.
-시뮬레이션을 수행하였다.

데이터 검증

. 시뮼레이션 모델을 검증하기 위해 저기구동 차량과 시뮬레이션 모델의 각 차축의 토크 및 출력을 부석하였다. 차 . 자
|를 즫팓않ퟆ쬂흲푣(7)뺂붟빊툶힆쯶, 쓶쐚푣(8)뺂붟쒆쬂

계산하여 부석하였다.

Development of simulation model of an electric all-wheel-driven vehicle for agricult

\n산하여 분석하였다.

\n
$$
P = \frac{2 \times \pi \times T \times N}{60,000}
$$

여기서, *P* : motor power (kW)
 T : axle torque (Nm)
 N : wheel axle rotation

 T : axle torque (Nm)

 $N:$ wheel axle rotation

Absolute error =
$$
\frac{|\textit{Simulated data} - \textit{Measured data}|}{\textit{Measured data}} \times 100\%
$$
)\n

\n**Asults and Discussion**

Results and Discussion

수직강성계수

펞붛튷빊펞쐚펞칆쥏흖욶쫾켊튣흲튦힆쯶, 빊븶뺂펞붛튷빊펞쐚Fig. 7뺂붟휃

Fig. 7. Result of measured tire radial stiffness.

종방향강성계수

전기구동 플랫폼의 슬립율은 노지에서 약 27%로 나타났으며, 타이어의 견인력은 노지에서 약 12.1 N으로 나타 27%로 나타났으며, 타이어의 견인력은 노지에서 약 12.1 N으로 나타

인력을 이용하여 종방향강성계수를 계산하였으며, 종방향강성계수는
 났다. 계산을 동해 얻은 슬립율과 타이어 견인력을 이용하여 송방향강성계수를 계산하였으며, 송방향강성계수는

노지 주행 조건에서 44.63으로 계산되었다.
-노지 수행 소선에서 44.63으로 계산뇌었다.

(7)

구름저항

계측 시험은 모래 또는 돌이 섞인 도로 조건에서 수행되었기 때문에 0.25를 구름저항 계수로 선정하였다. 구름저 0.25를 구름저항 계수로 선성하였다. 구름저
및 계측시스템의 하중을 고려하여 총 하중은

강성계수와 종방항강성계수는 계측값인 37. 항은 토양의 마잘계수와 자량의 하숭의 곱으로 나타나며

, 자제 하숭 및 계즉시스템의 하숭을 고려하여 종 하숭은
. 계산되었다.
같으며, 수직강성계수와 종방항강성계수는 계측값인 37,
:고하여 댐핑계수 0.2. 슬립에 따른 횡방향강성계수 2.400, 100 kg_f로 고려하였다. 따라서, 최종 구름저항은 25 kgf로 계산되었다.
- 타이어 물성에 대한 시뮬레이션 입력값은 Table 2와 같으며, 수직강성계수와 종방항강성계수는 계측값인 37,
44.63을 각각 입력하였다. 이외의 계수들은 선행연구를 참고하여 댐핑계수 0.2, 슬립에 따른 횡방향강성계수 2,400, 타이어 물성에 대한 시뮬레이션 입력값은 Table 2와 같으며, 주식강성계주와 송망항강성계주는 계즉값인 37,
행연구를 참고하여 댐핑계수 0.2, 슬립에 따른 횡방향강성계수 2,400,
-
0.25, 최대 구름저항 계수 1.0, 최소 구름저항 계수 0.2로 입력하였다.
-44.63을 각각 입력하였다. 이외의 계수들은 선행연구를 잠고하여 냄꿩계수 0.2, 슬립에 따른 욍방향강성계수 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.

Table 2. Input parameters of tire model.

노지 주행 결과

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

수행 숭 자숙 토크와 술력은 Fig. 9와 같이 나타났다. 누 그래프의 개형은 유사하게 나타났으며, 이는 자숙 술력은
축 토크와 차축 회전속도의 곱으로 계산하였기 때문인 것으로 판단된다.
 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 - 자죽 토크는 수행 조기 구간에 높게 나타나 이후 감소하는 것으로 나타났다. 자죽 토크는 수행 조기 구간에서 약
5초 동안 전륜보다 후륜에서 높게 나타났으며, 이는 계측 시스템이 차량의 후면에 위치하기 때문인 것으로 판단된
다. 5초 이후로는 차축 토크는 후륜보다 전륜에서 높게 나타났으며, 이는 주행 중 전륜에서 토양과의 마찰을 이겨내
기 때문인 것으로 판단된다. 후륜보다 전륜에서 토양 구름 5조 농안 전듄보다 우듄에서 높게 나타났으며, 이는 계즉 시스템이 자량의 우면에 위치하기 때문인 것으로 판단된
다. 5초 이후로는 차축 토크는 후륜보다 전륜에서 높게 나타났으며, 이는 주행 중 전륜에서 토양과의 마찰을 이겨내
기 때문인 것으로 판단된다. 후륜보다 전륜에서 토양 구름저항이 더 크게 작용하는 것은 주행 중 전륜의 궤적을 후
륜이 추종하기 때문인 것으로 판단되며, 주행 중 토양 환경 다. 5초 이후로는 차축 토크는 후류보다 저류에서 높게 나타났으며, 이는 주행 중 저류에서 토양과의 마찰을 이겨내 . 5조 이우로는 자죽 토크는 우듄보다 전륜에서 높게 나타났으며, 이는 수행 중 선륜에서 토양과의 마잘을 이겨내
때문인 것으로 판단된다. 후륜보다 전륜에서 토양 구름저항이 더 크게 작용하는 것은 주행 중 전륜의 궤적을 후
이 추종하기 때문인 것으로 판단되며, 주행 중 토양 환경의 비정형성으로 인해 후륜좌측 차축 토크가 타 차축 방
·대비 높게 나타나는 경향을 보였다. 주행 구간 동안 차축 토크 . 우듄보다 전듄에서 토양 구름저항이 더 크게 삭용하는 것은 수행 중 선륜의 궤석을 우
로 판단되며, 주행 중 토양 환경의 비정형성으로 인해 후륜좌측 차축 토크가 타 차축 방
+을 보였다. 주행 구간 동안 차축 토크와 출력 데이터에서 변동이 크게 나타나는 것은 노
로 인한 것으로 판단된다. 듄이 주송하기 때문인 것으로 판난되며 , 수행 숭 도양 완경의 비성형성으로 인해 우듄솨슥 자숙 도크가 타 자숙 방
주행 구간 동안 차축 토크와 출력 데이터에서 변동이 크게 나타나는 것은 노
2로 판단된다.
출력은 Table 3과 같다. 차축의 평균 회전속도는 모든 차축에서 약 115 rpm 향 대비 높게 나타나는 경향을 보었다 지 주행 환경의 불안정성으로 인한 것으로 판단된다.

. 수행 구간 동안 자숙 토크와 출력 데이터에서 변동이 크게 나타나는 것은 노
|으로 판단된다.
및 출력은 Table 3과 같다. 차축의 평균 회전속도는 모든 차축에서 약 115 rpm
|륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 4.50, 4.21, 4.04, 3.22 Nm .
.
.
.
. 주행 중 각 차축의 회전속도, 토크 및 출력은 Table 3과 같다. 차축의 평균 회전속도는 모든 차축에서 약 115 rpm , 토크 및 출력은 Table 3과 같다. 자죽의 평균 회선속노는 모는 자죽에서 약 115 rpm
.크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 4.50, 4.21, 4.04, 3.22 Nm
!륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 6.81, 5.56, 15.81, 6.92 Nm로 나
!륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 53.42, 50.56, 47 으로 나타났다 . 자죽의 평균 토크는 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 각각 약 4.50, 4.21, 4.04, 3.22 Nm
, 최대 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 6.81, 5.56, 15.81, 6.92 Nm로 나
| 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 53.42, 50.56, 47.34, 38.07 W로
최대 출력은 전륜좌측, 전 로 나타났으며, 최대 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 6.81, 5.56, 15.81, 6.92 Nm로 나 , 죄대 토크는 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 각각 약 6.81, 5.56, 15.81, 6.92 Nm도 나
| 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 53.42, 50.56, 47.34, 38.07 W로
최대 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 60.47, 65.47, 50.05, 47.99 W로 계 타났다 . 자죽의 평균 술력은 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 각각 약 53.42, 50.56, 47.34, 38.07 W도
었으며, 최대 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 약 60.47, 65.47, 50.05, 47.99 W로 계
다.
-계산되었으며, 죄대 술력은 전륜좌즉, 전듄우즉, 후륜좌즉, 후듄우즉에서 각각 약 60.47, 65.47, 50.05, 47.99 W로 계
산되었다.
Table 3. Result of measured data of the electric all-wheel-drive vehicle during driving. 산되었다.

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

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

시뮬레이션 결과

시뮬레이션 중 차축 토크와 출력은 Fig. 10과 같이 나타났으며, 두 그래프의 개형은 유사하게 나타났다. 이는 노 Fig. 10과 같이 나타났으며, 누 그래프의 개형은 유사하게 나타났다. 이는 노
|전속도의 곱으로 차축 출력을 계산하였기 때문인 것으로 판단된다.
| 지 수행과 마잔가지도, 자숙 토크와 회선속노의 곱으로 자숙 술력을 계산하었기 때문인 것으로 판난된다.
-
-

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, 후륜우측 Table 4와 같다. 자죽의 평균 토크는 선듄좌즉, 선듄우즉, 우듄좌즉, 우듄우즉
로 나타났으며, 최대 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각
났다. 차축의 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각
산되었으며, 최대 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 에서 각각 약 4.51, 3.90, 4.16, 3.32 Nm로 나타났으며, 최대 토크는 전류좌측, 전류우측, 후류좌측, 후류우측에서 각 4.51, 3.90, 4.16, 3.32 Nm로 나타났으며, 죄대 토크는 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 각
27, 4.32, 4.39 Nm로 나타났다. 차축의 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각
11, 51.62, 41.20 W로 계산되었으며, 최대 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각
53.11, 52.78 W로 계산되었다. 각 약 4.98, 4.27, 4.32, 4.39 Nm로 나타났다. 차축의 평균 출력은 전류좌측, 전류우측, 후류와측, 후류우측에서 각각 4.98, 4.27, 4.32, 4.39 Nm도 나타났다. 자죽의 평균 출력은 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 각각
.79, 48.11, 51.62, 41.20 W로 계산되었으며, 최대 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각
, 51.50, 53.11, 52.78 W로 계산되었다. 휃55.79, 48.11, 51.62, 41.20 W로 계산되었으며, 죄대 술력은 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 각각
78, 51.50, 53.11, 52.78 W로 계산되었다.
ble 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

59.78, 51.50, 53.11, 52.78 W로 계산되었다.
Table 4. Result of simulated data of the e **Table 4.** Result of simulated data of the electric all-wheel-drive vehicle during driving.

시뮬레이션 데이터는 계측 데이터와 비교하였을 때 안정적으로 나타났으며, 이는 시뮬레이션이 주행 화경의 불 안정성을 완벽하게는 반영하지 못한 것으로 파다되다.

, 이는 시뮬레이션이 수행 완경의 물
-

호면에 위치하며, 주행 환경이 고르
후면에 위치하며, 주행 환경이 고르 .
1
1 계즉 결과와 시뮬레이션 결과의 편자는 수행 조기 구간에서 가상 크게 나타났으며 , 우듄좌즉에서 득히 크게 나타
에 위치하며, 주행 환경이 고르
 났다. 이는 수행 조기에 보양과의 마잘을 이겨내야 하며, 계즉 시스템이 자량의 우면에 위지하며, 수행 완경이 고르
지 못했기 때문인 것으로 판단된다.
-
- **시뮼레이셔 걱증** 지 못했기 때문이 것으로 판단된다.

시뮬레이션 검증

시뮬레이션 모델 검증은 노지 주행과 시뮬레이션 주행 데이터의 절대 오차를 분석하였다. 노지 주행과 시뮬레이 . 노지 수행과 시뮬레이
좌측, 전륜우측, 후륜좌
좌측, 전륜우측, 후륜좌
· 각각 약 3.42, 6.64%로 션 주행 사이의 차축 토크 및 출력 절대 오차는 Table 5와 같다. 차축 토크 절대 오차는 전류좌측, 전류우측, 후류좌 Table 5와 같다. 자죽 토크 설대 오자는 전듄좌즉, 전듄우즉, 후듄좌
<mark>-</mark> 계산되었으며, 차축 출력 절대 오차는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌
- 나타났다. 차축 토크와 출력의 평균 오차는 각각 약 3.42, 6.64%로
-즉 , 우듄우즉에서 각각 0.22, 7.36, 2.97, 3.11%로 계산되었으며, 자죽 줄력 설대 오자는 전륜좌즉, 전륜우즉, 우듄좌
, 후륜우측에서 각각 4.44, 4.85, 9.04, 8.22%로 나타났다. 차축 토크와 출력의 평균 오차는 각각 약 3.42, 6.64%로
타났다.
-즉, 우듄우즉에서 각각 4.44, 4.85, 9.04, 8.22%로 나타났다. 자죽 토크와 줄력의 평균 오자는 각각 약 3.42, 6.64%로
나타났다.
 나타났다.

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

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

추후 연구에서는 토양 함수율(water content), 체적 밀도(bulk density), 소성지수(plastic index), 액성 한계(liquid (water content), 제석 빌노(bulk density), 소성지수(plastic index), 액성 한계(liquid
· 토양 환경의 비정형성을 반영할 수 있는 이산요소법 소프트웨어(EDEM)를 활용
!체 동역학 소프트웨어(RecurDyn, FunctionBay, Inc., Korea)와의 co-simulation을
로 판단된다. limit), 소성 한계(plastic limit) 능 토양 환경의 비성형성을 반영할 수 있는 이산요소법 소프트웨어(EDEM)를 활용
하여 토양 모델을 개발하여 다물체 동역학 소프트웨어(RecurDyn, FunctionBay, Inc., Korea)와의 co-simulation을
통한 개선된 연구가 필요할 것으로 판단된다.
 하여 토양 보델을 개발하여 다물제 농역학 소프트웨어(RecurDyn, FunctionBay, Inc., Korea)와의 co-simulation을
통한 개선된 연구가 필요할 것으로 판단된다.
-통하 개선된 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Conclusion

본 연구는 국내 밭 농업에서 다목적으로 사용 가능한 전기구동 차량의 시뮬레이션 모델 개발을 위한 기초 연구로 써, 다물체 동역학 소프트웨어를 사용하여 전기구동 차량 모델을 개발하였으며, 계측하 타이어 물성을 시뮬레이션 , 다물제 농역학 소프트웨어를 사용하여 선기구농 자량 모델을 개발하였으며, 계즉한 타이어 물성을 시뮬레이션
델에 반영하였다. 개발한 차량 모델의 성능은 시뮬레이션 모델과 4륜 전기구동 차량의 차축 토크와 출력을 비교
으로써 평가하였다. 4륜 전기구동 차량주행 중 소요동력을 계측하고 분석하였다. 차축 토크와 휠 회전속도를 계
하기 위해 데이터 계측 시스템을 구성하였으며, 주행 시험 중 데이터를 모델에 반영하였다. 개발한 차량 모델의 성능은 시뮬레이션 모델과 4륜 전기구동 차량의 차축 토크와 출력을 비교 . 개발한 자량 모델의 성능은 시뮬레이션 모델과 4륜 전기구농 자량의 자죽 토크와 줄력을 비교
다. 4륜 전기구동 차량주행 중 소요동력을 계측하고 분석하였다. 차축 토크와 휠 회전속도를 계
| 계측 시스템을 구성하였으며, 주행 시험 중 데이터를 계측하고 분석하였다.
와 토크를 계측 파라미터로 선정하였으며, 계측 파라미터를 이용하여 차축의 출력을 계산하였 함으로써 평가하였다 측하기 위해 데이터 계측 시스템을 구성하였으며, 주행 시험 중 데이터를 계측하고 부석하였다.

. 4듄 전기구농 자량수행 중 소요농력을 계즉하고 문석하였다. 자죽 토크와 윌 회선속도를 계
눼측 시스템을 구성하였으며, 주행 시험 중 데이터를 계측하고 분석하였다.
- 토크를 계측 파라미터로 선정하였으며, 계측 파라미터를 이용하여 차축의 출력을 계산하였
균 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 4.50, 4.21, 4.04, 3.22 Nm로 나타 , 수행 시험 숭 데이터들 계즉하고 문석하였다.
정하였으며, 계측 파라미터를 이용하여 차축의
측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 4.50, 4.21, 4.0
후륜좌측, 후륜우측에서 각각 53.42, 50.56, 47.3 차축의 회전속도와 토크를 계측 파라미터로 선정하였으며, 계측 파라미터를 이용하여 차축의 축력을 계산하였 , 계즉 파라미터들 이용하여 자숙의 술력을 계산하였
-, 후륜우측에서 각각 4.50, 4.21, 4.04, 3.22 Nm로 나타
:륜우측에서 각각 53.42, 50.56, 47.34, 38.07 W로 계산
륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 4.51, 3.9, 4.16, 다 . 수행 숭 자숙의 평균 토크는 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 각각 4.50, 4.21, 4.04, 3.22 Nm로 나타
으며, 차축의 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 53.42, 50.56, 47.34, 38.07 W로 계산
었다. 시뮬레이션 결과, 차축의 평균 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 4.51, 3.9, 4.16, 났으며 , 자죽의 평균 술력은 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 각각 53.42, 50.56, 47.34, 38.07 W로 계산
. 시뮬레이션 결과, 차축의 평균 토크는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 4.51, 3.9, 4.16,
n로 나타났으며, 차축의 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 55.79, 48.11, 51.62,
'로 계산되었다. 되었다. 시뮬레이션 결과, 차축의 평균 토크는 전류좌측, 전류우측, 후류좌측, 후류우측에서 각각 4.51, 3.9, 4.16, . 시뮬레이션 결과, 자죽의 평균 토크는 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 각각 4.51, 3.9, 4.16,
m로 나타났으며, 차축의 평균 출력은 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 55.79, 48.11, 51.62,
'로 계산되었다. 차축 토크 절대오차는 전륜좌측, 전륜우측, 후륜좌측, 후륜우측에서 각각 0.22, 7.36, 2.97,
로 계산되었으며, 차축 출력 3.32 Nm로 나타났으며, 자숙의 평균 술력은 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 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, 41.2 W도 계산되었다. 자숙 도크 설대오자는 선듄솨슥, 선듄우슥, 우듄솨슥, 우듄우슥에서 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 필요
할 것으로 판단된다. 8.22%로 계산되었다. 추후 연구에서는 토양 환경의 비정형성을 반영한 토양 모델을 개발하여 개선된 연구가 필요 할 것으로 파다되다.

8.22%로 계산되었다. 주우 연구에서는 토양 환경의 비성형성을 반영한 토양 모델을 개발하여 개선된 연구가 필요
할 것으로 판단된다.
- 본 연구에서는 동역학 파라미터를 고려하지 못하고, 타이어의 노지 마찰계수만을 고려하였다. 다양한 주행 환경
을 고려하기 위해 토양 함수율, 체적 밀도, 소성 지수, 액성 한계, 소성 한계 등 토양 환경의 비정형성을 반영할 수 있 .
.
.
.
. 몬 연구에서는 농역학 파라미터를 고려하지 못하고 , 타이어의 노지 마잘계수만을 고려하였다. 다양한 수행 환경
객성 한계, 소성 한계 등 토양 환경의 비정형성을 반영할 수 있
-프트웨어와 다물체 동역학 소프트웨어와의 co-simulation을 을 고려하기 위해 토양 함수율, 체적 밀도, 소성 지수, 액성 한계, 소성 한계 등 토양 환경의 비정형성을 반영할 수 있 , 제석 빌도, 소성 지수, 액성 한계, 소성 한계 능 토양 환경의 비성형성을 반영할 수 있
활용하고, 이산요소법 소프트웨어와 다물체 동역학 소프트웨어와의 co-simulation을
화할 계획이다.
 는 이산요소법 소프트웨어를 활용하고, 이산요소법 소프트웨어와 다물제 농역학 소프트웨어와의 co-simulation을
통해 시뮬레이션 환경을 다양화할 계획이다.
-통해 시뮬레이션 화경을 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/0000-0003-0998-3819
Seung Yun Baek, https://orcid.org/0000-0001-7330-694
Seung Min Baek, https://orcid.org/0000-0002-4627-191 Hyster Con, in part country Core Core Core Core
Seung Yun Baek, https://orcid.org/0000-0002-4627-191
Yong Joo Kim, https://orcid.org/0000-0002-1212-9018 Seung Min Baek, https://orcid.org/0000-0002-4627-191X Yong Joo Kim, https://orcid.org/0000-0002-1212-9018

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 kWclass 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.