

밭농업용 다목적 플랫폼의 견인동력 및 구동토크 예측을 위한 시뮬레이션 모델 개발 및 검증

Development and Validation of Simulation Model for Traction Power and Driving Torque Prediction of Upland Multipurpose Platform

전현호<sup>1</sup> · 백승민<sup>1</sup> · 백승윤<sup>1</sup> · 홍이수<sup>2</sup> · 김택진<sup>2</sup> · 최용<sup>3</sup> · 김영근<sup>3</sup> · 이상희<sup>3\*</sup> · 김용주<sup>1,4\*</sup>

Hyeon Ho Jeon, Seung Min Baek, Seung Yun Baek, Yi Su Hong, Taek Jin Kim, Yong Choi, Young Keun Kim, Sang Hee Lee and Yong Joo Kim

Received: 17 Oct. 2022, Revised: 25 Jan 2023, Accepted: 21 Feb. 2023

**Key Words** : Upland Multipurpose Platform(밭농업용 다목적 플랫폼), Traction Power(견인 동력), Driving Torque (구동 토크), Simulation(시뮬레이션)

**Abstract:** Although the upland field area of Korea is high as 44.8%, the platform optimized for the upland field is insufficient. It is necessary to develop an optimized platform for the upland field because the upland field environment is an irregular environment with many slopes. In addition, due to the characteristic of agricultural operations, the traction power and torque of the platform have to be sufficient. Therefore, in this study, a simulation model that can predict the traction power and driving torque of a crawler-type platform for the upland field was developed and validated using the specifications of the crawler platform. The simulation model was developed using Amesim (19.1, Siemens, Germany). The development of the model was conducted using the specifications of the platform. A measurement system was developed to validate the simulation model. The traction power data of the simulation model was validated with the traction force and vehicle speed. The driving torque data of the simulation model was validated with the torque of the sprocket on the crawler system. As a result of the analysis, the error between measurement and simulation results occurred within 10%, and it was determined that the traction power and driving torque prediction of the crawler platform using this model was possible.

기호 설명

$P_t$  : Traction power, kW

$F$  : Traction force, kN

$V$  : Velocity, m/s

$E$  : Error, %

$D_m$  : Measurement data

$D_s$  : Simulation results

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

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

2 Department of Drive System Team, TYM R&D Center, Iksan 54576, Korea

3 Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Jeonju 54875, Republic of Korea

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

Copyright © 2023, KSFC

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

1. 서론

국내 밭 면적은 전체 농지 면적의 44.8%인 수준으로 높게 나타나고 있다.<sup>1)</sup> 그러나 밭 작업 환경은 수도작 작업 환경에 비해 소규모 및 경사지 등 비정형 환경이 대부분이기 때문에 지면의 붕괴 등 열악한 주행환경이라는 특성이 있다.<sup>2)</sup> 이를 해결하고 작업 효율을 높이기 위해 밭 작업 환경에서 궤도형 플

랫폼을 사용하기 위한 연구들이 다양하게 수행되고 있다.<sup>3,4)</sup> 궤도형 플랫폼은 차륜형과 비교하였을 때 접촉 면적이 넓어 상대적으로 비정형 환경에서의 작업이 유리하며, 밭 작업 환경에서의 활용도가 높아 궤도를 이용한 밭 작업 전용 플랫폼 개발에 관한 연구들이 다양하게 수행되고 있다.<sup>3,4)</sup>

Lee et al (2022)은 궤도형 농작업 플랫폼의 자율주행 성능 평가에 대한 연구를 수행하였다. 개발된 궤도형 농작업 플랫폼을 이용하여 경로 추종 알고리즘을 개발하고, 추종 성능을 향상하기 위한 알고리즘 개발에 관한 연구를 수행하였다. Lee et al (2021)은 개발 중인 궤도형 밭작물 플랫폼에 승차감 개선에 관한 연구를 수행하였다. 궤도 주행부에 이퀄라이저 설치 유무에 따른 차량 거동 분석 및 승차감 평가에 관한 연구를 수행하였다. Sohn et al (2021)은 개발 중인 밭작물 플랫폼의 자율주행 성능 평가를 위한 동역학 시뮬레이션 모델 개발에 관한 연구를 수행하였다. 개발 중인 플랫폼의 3D 모델을 이용하여 동역학 모델을 개발하였고, 이를 활용하여 자율주행 경로 추종 성능 평가에 대한 연구를 수행하였다.

위와 같이 궤도를 이용한 밭 작업 전용 플랫폼 개발에 관한 연구들이 수행되고 있다. 이는 대부분 차량 거동 및 자율주행 작업에 관한 연구들이 대부분이다. 그러나 농작업 플랫폼은 견인동력을 이용하는 플라우 경운 작업 및 트레일러 작업, PTO (Power Take-Off)의 동력을 이용하는 로터리 작업 등을 수행하고 있으며<sup>5,6)</sup>, 특히 가장 많이 사용되고 있는 플라우 경운 작업의 경우 높은 수준의 견인력을 요구하는 작업이다. 따라서, 궤도 플랫폼에서도 견인력 및 견인동력을 높여 작업 효율을 증대시키기 위한 연구들도 필요한 실정이다. 실제로 농업기계 분야에서도 차륜형 플랫폼의 작업 효율을 높이기 위해 견인력 및 견인동력에 관한 연구들이 수행되고 있다.<sup>7,8)</sup> 견인력 및 견인 출력을 향상하기 위해 농작업 간 계측을 통한 부하 측정<sup>9)</sup> 및 플랫폼 개선에 관한 다양한 연구들이 수행되고 있으며, 이를 통해 농작업 효율 증대에 관한 연구들이 다양하게 수행되고 있다.

Kim et al (2022)은 플라우 경운 작업의 경심에 따른 견인효율에 관한 연구를 수행하였다. 경심에 따라 토양 성분과 경심을 분석하였으며, 각 인자에 따른 견인효율 분석을 수행하였다. Lee et al (2006)은

트랙터의 견인 작업 효율을 높이기 위해 견인 부하에 따른 비례제어밸브 시스템을 개발하고, 이에 대한 성능 평가에 대한 연구 등을 수행하였다. 모델을 이용한 실내 평가와 계측 시험을 통해 수집된 데이터를 이용하여 개발한 시스템에 대한 성능 평가를 수행하였다. Lee et al (2009)은 경험적 방법을 이용한 견인력 예측 모델에 관한 연구를 수행하였다. 각 경험적 모델들로 견인력을 예측하고, 이를 실외 시험을 통하여 각 모델의 타당성 검토에 관한 연구를 수행하였다.

위와 같이 농작업 플랫폼의 견인성능을 향상하기 위한 연구들은 다양하게 수행되고 있다. 그러나 궤도 플랫폼을 이용한 견인력 및 견인동력에 관한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 궤도형 플랫폼의 견인동력 예측을 위한 시뮬레이션 모델을 개발하고, 시험을 통해 해당 모델에 대한 검증을 수행하였다. 또한, 개발된 모델을 이용하여 유압 부하를 입력값으로 설정하고 이때 구동부의 부하를 예측 및 검증에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 다목적 플랫폼의 궤도 시스템

다목적 플랫폼은 밭 작업 환경에서 높은 견인 작업을 수행할 수 있도록 궤도 시스템을 기반으로 제작되었다. 궤도 시스템은 Fig. 1과 같이 스프라켓 (Sprocket), 장력 조절을 위한 아이들러 (Idler), 하부롤러 (Track roller), 상부롤러 (Carrier roller) 및 이퀄라이저 (Equalizer)로 구성되어 있다. 스프라켓은 궤도를 구동하기 위해서 유압모터에 부착되어 있으며, 궤도 최전방에서 위치하여 유압모터 구동에 따라 궤도를 구동시켜준다. 아이들러는 궤도의 차량 후방에 위치하여 필요에 따라 궤도의 장력을 조절할 수 있도록 구성되어 있다. 하부롤러는 궤도 하부에서 지면과 접촉하고 있으며, 이를 통해 차량의 하중을 넓은 면적으로 배분하여 접지압을 줄여주는 역할을 한다. 상부롤러는 궤도의 형태를 유지해주어 고무 궤도의 회전을 원활하게 구동시켜준다. 이퀄라이저는 하부롤러 2개가 부착되어 구성되며, 궤도 1쪽당 총 2개의 이퀄라이저가 부착되어 있다. 이퀄라이저는 플랫폼이 비정형 환경에서 주행할 때 궤도 시스템의 모양에 변화를 주어 원활하게 주행할 수 있도록 한다.

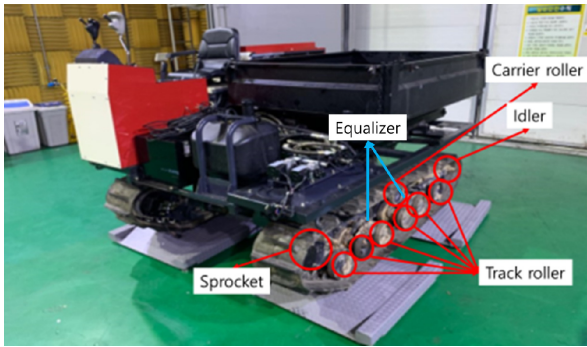


Fig. 1 A photo of track system for upland multipurpose platform

## 2.2 유압 동력 전달 시스템

다목적 플랫폼의 유압 동력 전달 시스템은 Fig. 2 와 같이 구성되어 있다. 엔진(Engine)에 직결된 유압 펌프(Hydraulic pump)는 엔진으로부터 동력을 전달 받아 구동된다. 유압펌프에서 발생한 유압 동력은 차량의 조향제어를 수행하는 비례제어밸브(Proportional valve)에 전달되며, 이후 유압모터(Hydraulic motor)로 동력이 전달된다. 유압모터는 전달받은 동력을 이용하여 유압모터에 부착된 스프라켓을 회전시키며, 이에 따라 차량이 구동된다. 이후 구동에 사용된 유압 유는 유압탱크로 배출된다. 또한, 릴리프밸브(Relief valve)는 유압 동력 전달 시스템을 보호하기 위해 설치되어 있으며, 유압시스템 내 250 bar 이상의 유압이 발생하면 유압을 감압밸브 쪽으로 배출할 수 있게 구성되어 있다.

동력 전달 시스템에 사용된 유압펌프(JP20, JOYANG, Korea)는 1회전당 14 cc의 유량을 토출하며, 이는 정격 회전속도인 2,600 rpm에서 유압모터에서 요구하는 35 L/min의 유량을 충족시킬 수 있도록 구성되어 있다. 유압펌프는 총 2개가 구성되어 있으며, 각각 좌·우측 유압모터의 제어를 수행하는 비례제어밸브와 연결되어 있다. 해당 펌프는 2개가 직렬로 연결되어 있으며, 동력을 엔진으로 전달받을 수 있게 엔진에 직결되어 있다.

비례제어밸브는 차량의 조향 값을 전달받아 설정된 제어 로직에 의해서 개폐량을 설정한다. 세부 제원은 Table 1과 같이 최대 250 bar까지 구동할 수 있으며, 정격 유량(Rated flow)은 35 L/min이다. 밸브 내 유압은 최소 50 bar에서 250 bar까지 제어할 수 있으며, 차량 제어기에서 제어 신호를 받아 전진, 후진 및 선회 등의 제어를 수행한다.

유압모터(JMJ3000, JEIL PMC, Korea)는 총 2개가 설치되어 있으며, 각각 좌·우측 궤도에 각각 설

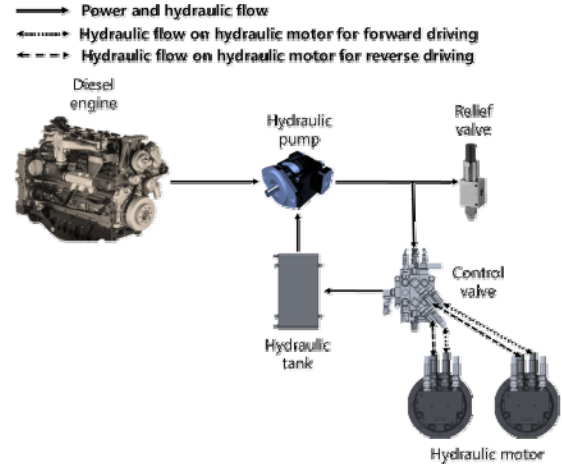


Fig. 2 Configuration of the engine and hydraulic transmission system for multipurpose platform

Table 1 Specification of proportional valve and hydraulic motor

Item		Specification
Proportional valve	Rated pressure (bar)	250
	Rated flow (L/min)	35
	Pressure range (bar)	50~250
Hydraulic motor	Motor displacement (cc/rev)	16.4
	System press of relief (bar)	250
	Rated flow (L/min)	35
	Max out torque (Nm)	2,782
	Max out speed (rpm)	50

치되어 있다. 전진 및 후진을 구현하기 위해 양방향 유압모터를 사용하였다. 세부 제원은 Table 1과 같이 정격 유량은 35 L/min 이며, 정격 유량 시 최대 2,782 Nm까지 구동할 수 있으며, 최대 50 rpm까지 회전할 수 있다. 제어 밸브의 유압 흐름 방향에 따라 유압모터는 전진 및 후진 방향으로 구동할 수 있다.

## 2.3 견인 출력 시험

농업기계 분야에서의 견인 출력 측정은 차량 후방의 트레일러 및 견인 카 등을 부착하여 수행한다. 후방에 부착된 트레일러 및 견인카는 지속해서 차량을 세우기 위한 부하를 가중하고, 이때 견인력 (Traction force) 및 차량의 속도(Velocity)를 측정한다. 이렇게 수집된 데이터를 이용하여 견인 출력은 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$P_t = F \times V \quad (1)$$

다목적 플랫폼의 견인력 측정은 차량 후방에 트렉터를 연결하고, 트렉터와 플랫폼 사이에 로드셀(SBA-3T, CAS, Korea)을 측정하여 수행하였다. 로드셀은 차량의 중량 및 마찰계수 등을 고려하였을 때, 최대 3,000 kgf까지 측정이 가능한 센서로 선정하였으며, 세부 제원은 Table 2와 같다.

다목적 플랫폼의 속도 측정은 GPS (Global Positioning System) (Duro Inertial, Swift, USA)는 차량 속도를 측정하기 위해 트렉터에 설치하였으며, 견인 출력 측정을 위한 시스템은 Fig. 3과 같이 구성하였다. GPS의 세부 제원은 Table 2와 같으며, 정지상태(Position accuracy)에서 최대 0.02 m 오차범위 이내에서 측정할 수 있으며, 동적상황에서의 정확도(Velocity accuracy)는 최대 0.08 m/s 오차범위 내에서 측정할 수 있다.

데이터 계측기(QuantumX 840B, HBM, Germany)는 유니버설 타입으로 선정하였으며, 해당 계측기를 이용하여 GPS 데이터는 CAN (Controller Area Network)통신 방식을 이용하여 수집하였으며, 로드셀 데이터는 아날로그 신호를 이용하여 수집하였다. 데이터 수집속도(Data rates)는 센서들의 제원을 고려하여 10 Hz로 설정하여 수집하였다.

견인시험은 충남 공주시 우성면 상서리(36°28'45.5"N 127°05'21.6"E)에서 수행하였으며, 견인 출력 측정 시험은 다목적 플랫폼을 먼저 출발시킨 후 후방에 연결된 트렉터에서 브레이크를 작동시키면서 증가되는 견인력을 측정하였다. 계측은 총 25 초간 수행하였으며, 최대 견인 출력에 도달한 뒤 계측을 종료하였다. 계측된 플랫폼의 최대 견인 출력은 시뮬레이션 모델의 검증 값으로 사용하였다.

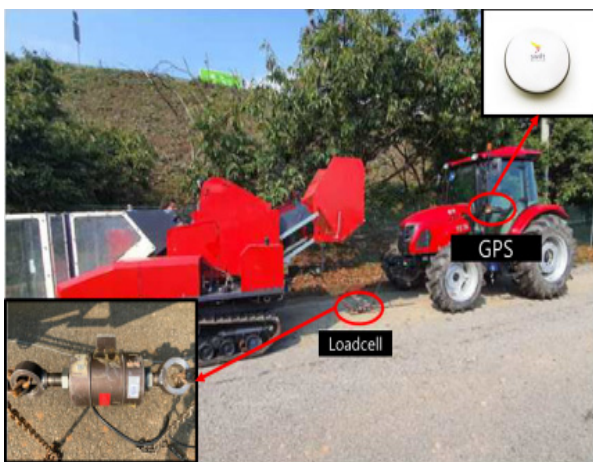


Fig. 3 A photo of traction performance test of the multipurpose platform

Table 2 Specification of the loadcell and GPS to measure traction power

Item		Specification
Loadcell	Rated output (mV/V)	3
	Measurement range (kgf)	~3,000
	Operating temperature range (°C)	-10~40
GPS	Navigation outputs	SBP and NMEA 0183
	Reference inputs/ouputs	RTCM 3.X
	Data rates (Hz)	10
	Position accuracy (m)	0.02
	Velocity accuracy (m/s)	0.08

#### 2.4 구동 토크 및 유압 측정 시험

시뮬레이션 모델에 대한 성능 평가를 수행하기 위하여, 최대 견인 출력 예측을 통해 검증된 모델은 구동 토크 예측에 사용하였다. 입력 값으로 유압펌프에 발생하는 압력으로 설정하여 압력에 따른 구동 토크(Driving torque)를 예측하였다. 이후, 예측된 구동 토크와 계측된 구동 토크 간의 비교를 통해 모델에 대한 성능 평가를 수행하였다.

유압펌프의 압력 계측은 유압펌프에 유압센서(A-10, WIKA, Germany)를 설치하여 수행하였으며, 유압펌프가 총 2개이기 때문에 2개의 유압센서를 설치하였다. 유압 센서는 동력 전달 시스템의 운용 압력을 고려하여 250 bar까지 측정할 수 있는 센서로 선정하였다.

구동 토크 계측은 별도의 센서 부착이 어려운 레도 특성상 스프라켓을 가공 및 교정하여 수행하였다. Fig. 4와 같이 스프라켓을 가공하고 스트레인 게이지를 부착하였으며, 이후 토크 데이터를 수집 가능하게 교정 시험을 수행하였다. 교정 시험은 비틀림 시험기(215.45, MTS, USA)를 이용하여 수행하였으며, Fig. 5와 같이 교정을 위한 지그를 제작하여 시험기에 부착하여 시험을 수행하였다. 회전체 특성상 토크 데이터 수집을 위해 텔레메트리 장비(TAS TRS1, WS-ENG, Kkorea)를 이용하였다. 해당 장치는 풀 브릿지(Full bridge) 스트레인게이지에 대한 데이터 수집이 가능하며, 최대 1.2 kHz 속도로 데이터 수집이 가능하다. 교정 시험은 차량의 제원 및 중량을 고려하여 최대 5.5 kNm 까지 수행하였다.



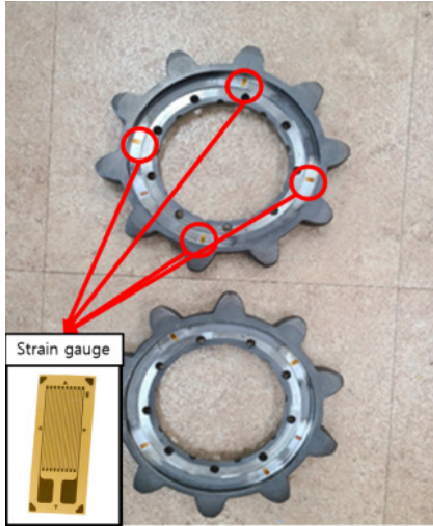


Fig. 4 A photo of sprocket with strain gauge to measure driving torque

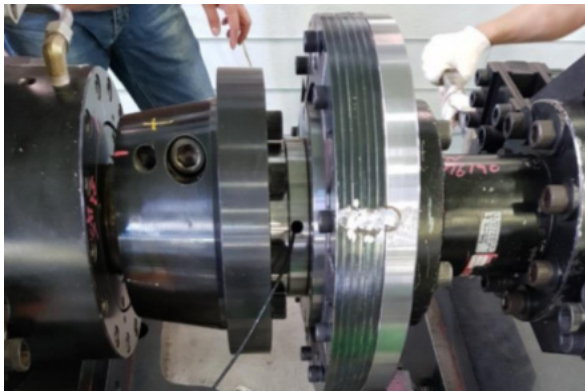


Fig. 5 A photo of calibration test of strain gauge installed sprocket

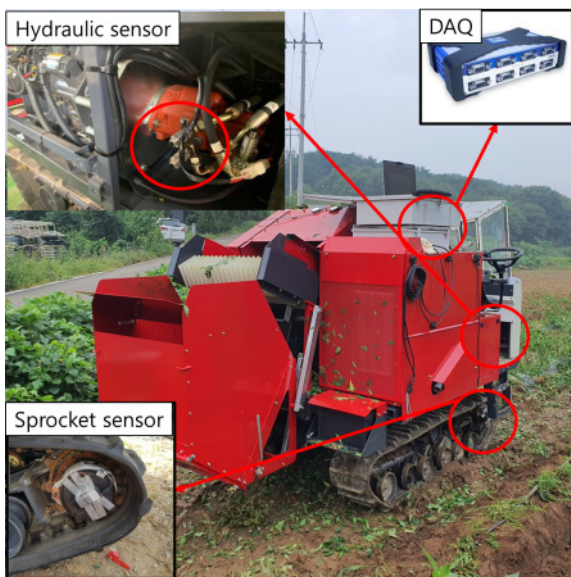


Fig. 6 Configuration of measurement system to measure hydraulic pressure and driving torque

Table 3 Specification of sensors to measure hydraulic pressure and driving torque

Item		Specification
Hydraulic sensor	Measurement range	0-250
	Current signal (mA)	4-20
Telemetry system	Strain gauge	Full bridge
	Excitation (V)	10
	Maximum sampling rate (kHz)	1.2

부하 계측 시스템은 Fig. 6과 같이 구성하였으며, 센서들의 세부제원은 Table 3과 같다. 데이터 수집 장치는 각각 유압 센서와 토크 센서와 연결되어있으며, PC와 연결되어 데이터를 수집 및 저장할 수 있도록 구성하였다. 데이터 수집 속도는 각 센서의 제원을 고려하여 100 Hz로 설정하였다. 부하 측정 시험은 노지 단순 주행 조건에서 수행되었으며, 충남 당진(36°52'16.7"N, 126°40'17.7"E)에 위치한 밭에서 수행하였다. 2 km/h 조건에서 95초간 수행하였으며, 계측된 데이터는 각각 시뮬레이션 모델의 입력 값(유압) 및 검증 값(구동 토크)으로 사용하였다.

### 2.5 시뮬레이션 모델

다목적 플랫폼의 견인동력 및 구동 토크 예측을 수행하기 위해 시뮬레이션 모델 개발을 수행하였다. 시뮬레이션 모델 개발은 다목적 플랫폼의 동력 전달 시스템의 구성 및 제원을 이용하여 Fig. 7과 같이 구성하였다. 모델 구성에는 1-D 유압 시뮬레이션 프로그램인 Amesim (19.1, Siemens, Germany)를 이용하였다. 시뮬레이션 모델의 엔진에는 두 개의 펌프 모델을 연결하였으며, 유압펌프 모델의 동력은 이후 비례제어밸브 모델에게 전달되며 제어 값에 따라 유압모터의 전진 방향 및 후진 방향으로 전달된다. 이후 사용된 작동유들은 유압탱크와 연결되어 배출되게 구성하였다. 유압모터에는 스프라켓의 역할을 해줄 수 있는 회전체를 부착하였다.

각 단품 모델의 세부 제원은 Table 4와 같이 설정하였으며, 해당 제원은 다목적 플랫폼의 부품들과 동일한 제원이다. 엔진 회전속도는 시험 수행 간 정격 회전속도(@2,600 rpm) 조건에서 수행하였기 때문에 시험 조건과 동일하게 2,600 rpm으로 설정하였다. 유압펌프의 토출유량(Pump displacement)은 14 cc/rev로 설정하였으며, 비례제어밸브는 최대 토출

유량이 35 L/min가 되도록 설정하였다. 또한, 비례 제어밸브는 최대 압력 250 bar까지 수용이 가능하며, 해당 수치 이상이 되면 릴리프 밸브가 작동함에 따라 유압탱크로 작동유가 배출된다. 유압모터는 16.4 cc당 1회전 구동되게 설정하였다.

시뮬레이션은 견인시험과 유사하게 수행하기 위해 무부하 조건에서 차량을 약 16초 정도 주행시켰다. 16초 이후에 유압모터에 지속해서 부하를 증가시켰으며, 최대 약 28 kN까지 견인 부하를 구현하였다. 총 시뮬레이션은 약 100초간 수행되도록 구성하였다.

개발된 모델의 성능 평가는 유압 부하에 따른 견인 토크 예측을 통하여 수행하였다. 유압 펌프당에 계측된 유압을 입력값으로 설정하였고, 이후 유압모터 단에서 발생하는 구동 토크를 예측하였다. 예측된 구동 토크는 계측된 구동 토크 데이터와 비교 및 평가에 사용하였다. 시뮬레이션은 계측데이터와 같이 총 95초간 수행하였다.

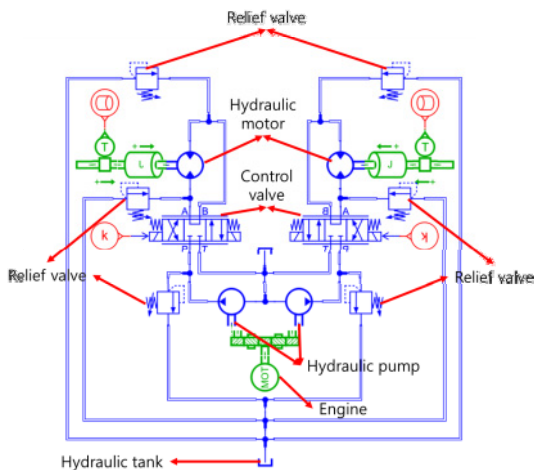


Fig. 7 Configuration of simulation model for predicting traction power and driving torque

Table 4 Specification of parts for simulation model

Item		Specification
Engine	Rotational speed (rpm)	2,600
Hydraulic pump	Pump displacement (cc/rev)	14
Proportional valve	Flow rate at maximum opening (L/min)	35
	Maximum pressure (bar)	250
Hydraulic motor	Motor displacement (cc/rev)	16

### 2.5 모델 검증 및 성능 평가

다목적 플랫폼의 견인동력 예측에 대한 검증은 최대 견인 출력 값과 견인력 및 차량의 속도 및 최대 출력에 대한 비교 및 분석을 통해 수행하였다. 계측 결과값 및 시뮬레이션 결과값에서의 최대 견인 출력 점을 도출하였다. 이후 최대 견인 출력 점에서의 견인력, 차량의 속도 및 최대 견인 출력에 대하여 각각 오차 분석을 수행하였다. 오차 분석 식(2)을 이용하여 계산하였다.

구동 토크 예측을 통한 모델 성능 평가도 같은 방법으로 수행하였다. 계측된 구동 토크의 평균값과 예측된 구동 토크의 평균값과의 오차 분석을 통해 수행하였다.

$$E = \frac{D_m - D_s}{D_m} \times 100 \quad (2)$$

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 견인 출력 시험 결과

견인 출력 측정 시험은 총 25초간 수행되었다. 견인 출력을 계산하기 위해 견인력 및 속도 측정을 수행하였다. 측정 시험 결과는 Table 5와 같이 나타났으며, 견인력은 최대 19.6 kN로 나타났으며, 속도는 최대 1.8 m/s로 나타났다. 최대 견인 출력은 24.8 kW로 나타났으며, 최대 견인 출력 점에서의 견인력 및 속도는 각각 19.6 kN, 1.3 m/s로 나타났다.

견인력은 Fig. 8과 같은 개형으로 나타났으며, 약 1초부터 트랙터가 브레이크를 인가함에 따라 지속해서 증가하는 것으로 판단된다. 이후 약 24초 이후 브레이크를 차단함에 따라 다시 견인력이 감소하는 것으로 판단된다. 차량 속도는 Fig. 9와 같은 개형으로 나타났으며, 트랙터의 브레이크 인가 이전에 최대속도를 달성한 것으로 나타났다. 이후 트랙터가 브레이크를 인가함에 따라 속도는 지속해서 감소하였다가, 트랙터의 브레이크를 차단함에 따라 차량 속도가 다시 증가하는 것으로 판단된다. 최대 견인 출력은 Fig. 10과 같은 개형으로 나타났으며, 트랙터의 브레이크를 인가함에 따라 지속적으로 견인 출력이 증가하는 것으로 나타났다. 이후 약 12초에 최대 출력을 달성하였으며, 이후 속도 감소폭이 높아짐에 따라 견인 출력이 점차 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

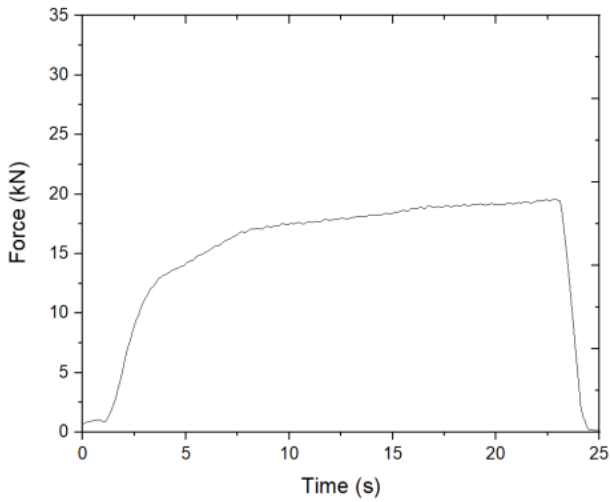


Fig. 8 Traction force measured during traction power measurement test

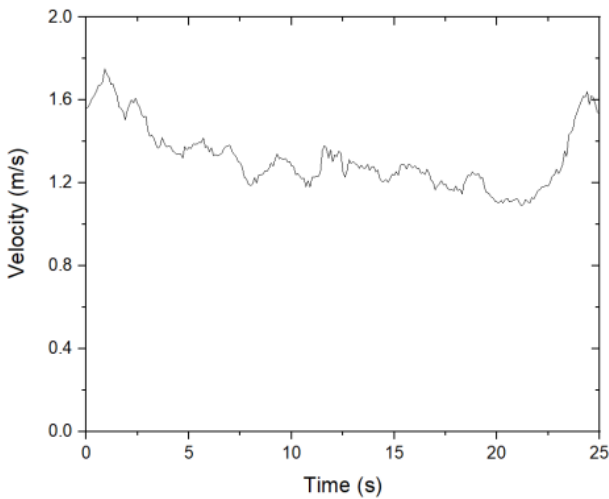


Fig. 9 Velocity measured during traction power measurement test

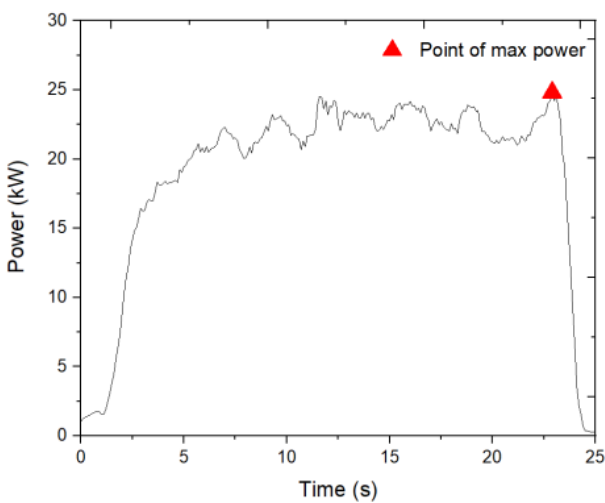


Fig. 10 Traction power measured during traction power measurement test

Table 5 Measurement results for measuring the traction power of multipurpose platform

Value		Results
Traction force (kN)	Avg.	15.0
	Max.	19.6
Velocity (m/s)	Avg.	1.3
	Max.	1.8
Traction power (kW)	Avg.	19.0
	Max.	24.8

### 3.2 견인 시뮬레이션 결과

견인 출력 시뮬레이션은 총 100초간 수행되었다. 시뮬레이션 결과는 Table 6과 같이 나타났으며, 견인력은 최대 28.3 kN로 나타났으며, 속도는 최대 1.5 m/s로 나타났다. 최대 견인 출력은 24.8 kW로 나타났으며, 최대 견인 출력 점에서의 견인력 및 속도는 각각 18.9 kN, 1.3 m/s로 나타났다.

견인력은 Fig. 11과 같은 개형으로 나타났으며, 약 16초부터 유압모터에 부하가 인가됨에 따라 지속해서 증가하는 것으로 판단된다. 차량 속도는 Fig. 12과 같은 개형으로 나타났으며, 유압모터에 부하를 인가하기 이전에 최대속도를 달성한 것으로 나타났다. 이후 유압모터에 부하가 인가됨에 따라 속도가 점진적으로 감소하였다가, 50초에서 속도 폭이 급격하게 감소하는 것으로 확인되었다. 이는, 최대 견인 출력 점 이후에 차량의 속도가 급격하게 감소하는 것으로 판단된다. 최대 견인 출력은 Fig. 13과 같은 개형으로 나타났으며, 유압모터의 부하를 인가함에 따라 지속해서 증가하는 것으로 나타났다. 이후 약 60초에 최대 출력을 달성하였으며, 이후 속도 감소 폭이 증가함에 따라 견인 출력도 급격하게 감소하는 것으로 판단된다.

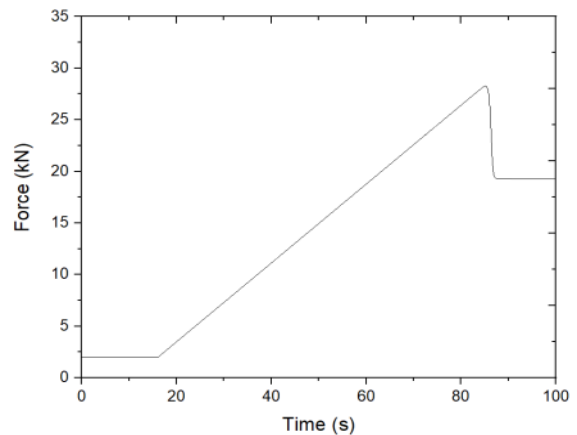


Fig. 11 Simulation results of traction force of upland multipurpose platform

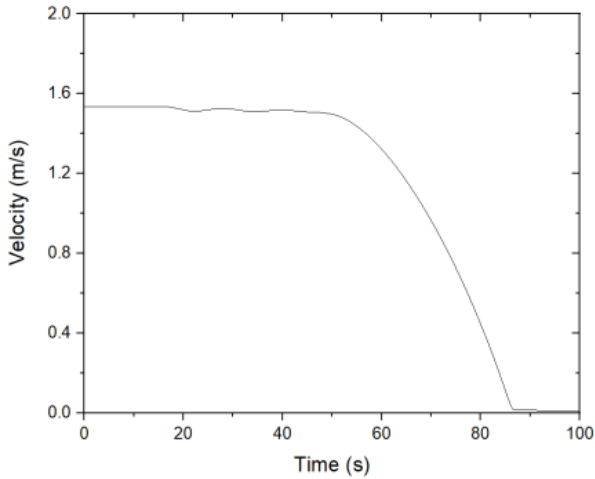


Fig. 12 Simulation results of velocity of upland multipurpose platform

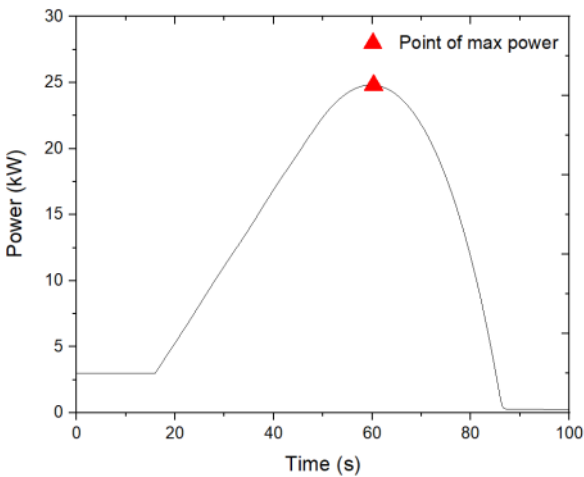


Fig. 13 Simulation results of traction power of upland multipurpose platform

Table 6 Simulation results of traction force, velocity and traction power

Value		Results
Traction force(kN)	Avg.	13.8
	Max.	28.3
Velocity(m/s)	Avg.	1.1
	Max.	1.5
Traction power(kW)	Avg.	11.8
	Max.	24.8

3.3 견인 출력 시험 결과 분석 및 검증

다목적 플랫폼의 최대 견인 출력 예측 모델 검증을 위해 계측값 및 시뮬레이션 결과값과의 비교 및

Table 7 Analysis of measurement and simulation results at point of maximum traction power

	Measurement	Simulation	Error (%)
Traction force (kN)	19.6	18.9	4%
Velocity (m/s)	1.2	1.3	8%
Traction Power (kW)	24.8	24.8	0%

분석을 수행하였으며 그 결과는 Table 7과 같이 나타났다. 계측 시험 수행 결과 최대 견인 출력 점에서 견인력 및 속도는 각각 19.6 kN, 1.2 m/s로 나타났으며, 최대 출력은 24.8 kW로 나타났다. 시뮬레이션 결과 최대 견인 출력 점에서 견인력 및 속도는 각각 18.9 kN, 1.3 m/s로 나타났으며, 최대 출력은 24.8 kW로 나타났다. 각각 견인력, 속도 및 최대 출력에 대해서 오차 분석을 한 결과, 4, 8, 0%로 나타났다. 최대 출력에 대한 예측은 같이 나타났으며, 속도 및 견인력에 대한 오차는 10% 내외로 분석되었다.

3.4 구동 토크 및 유압 측정 시험 결과

유압 측정 및 구동 토크 계측은 총 95초 동안 수행되었으며, 그 결과는 Table 8과 같이 나타났다. 유압 부하 계측은 Fig. 14와 같이 수집되었다. 차량이 출발함에 따라 약 20초에 최대 부하가 발생하였으며, 이후 직진 주행을 수행함에 따라 일정한 유압 부하가 발생하였다. 부하 계측 결과 좌측 유압모터를 구동하는 유압모터에서는 최대 120.3 bar가 측정되었으며, 평균 92.5 bar로 측정되었다. 우측 유압모터를 구동하는 유압모터에서는 최대 128.1 bar가 측정되었으며, 평균 86.2 bar로 측정되었다.

구동 토크 계측 결과 Fig. 15와 같이 나타났다. 좌측 스프라켓에서는 최대 713.7 Nm의 토크가 계측되었으며, 평균 215.3 Nm으로 나타났다. 우측 스프라켓에서는 최대 1,308.0 Nm의 토크가 계측되었으며, 평균 223.4 Nm으로 나타났다.

측정된 유압 데이터는 시뮬레이션 모델의 입력값으로 사용하였으며, 계측된 구동 토크는 예측된 구동 토크와의 비교를 통해 모델 검증에 사용되었다.



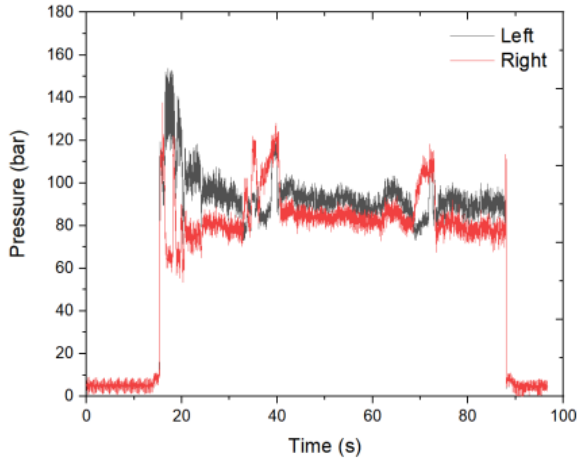


Fig. 14 Result of measured hydraulic pressure of upland multipurpose platform during driving test

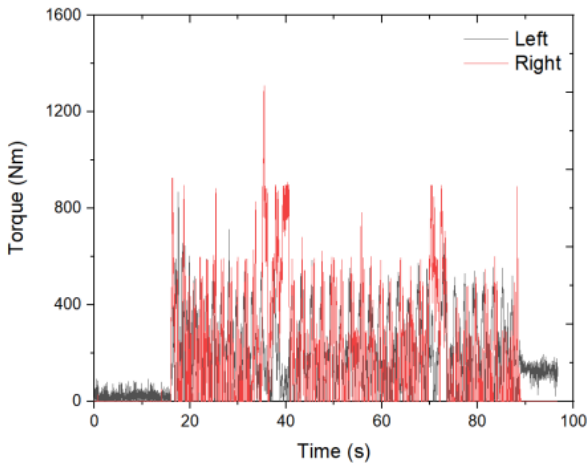


Fig. 15 Result of measured driving torque of upland multipurpose platform during driving test

Table 8 Average and maximum data of hydraulic pressure and driving torque of upland multipurpose platform during driving test

		Track system	
		Left	Right
Hydraulic pressure (bar)	Avg.	92.5	86.2
	Max.	120.3	128.1
Driving torque (Nm)	Avg.	215.3	223.4
	Max.	713.7	1,308.0

### 3.5 시뮬레이션 모델 성능 평가

다목적 플랫폼의 시뮬레이션 모델에 대한 성능 평가를 수행하였으며, 결과는 Table 9와 같이 나타났다. 계측 결과 좌측 구동 토크는 평균 215.3 Nm으로 나타났으며, 우측 구동 토크는 평균 223.4 Nm으로 나타났다. 시뮬레이션 결과 좌측 구동 토크는 평균 195.6 Nm으로 나타났으며, 우측 구동 토크는 227.3 Nm로 나타났다. 각각 좌·우측에 대한 평균값 오차 분석을 한 결과, 각각 9, 2%로 나타났으며, 그래프 개형은 좌·우측 각각 Fig. 16과 Fig. 17과 같이 각각 좌·우측에 나타났다.

계측값과 시뮬레이션 결과값의 오차는 10% 내외로 분석되었다. 이는 차후 차량 구동 토크 예측 때 사용할 수 있을 것으로 판단되며, 차후 새로운 플랫폼 개발 시 유압 부품 단품의 제원을 이용하여 차량의 구동 토크 예측 시 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

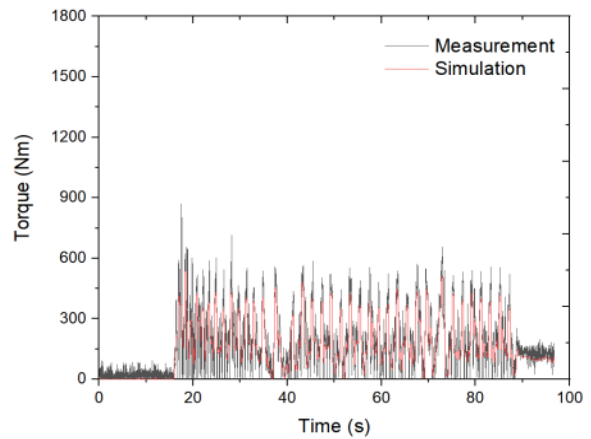


Fig. 16 Results of measured and simulated driving torque of left track system during driving test

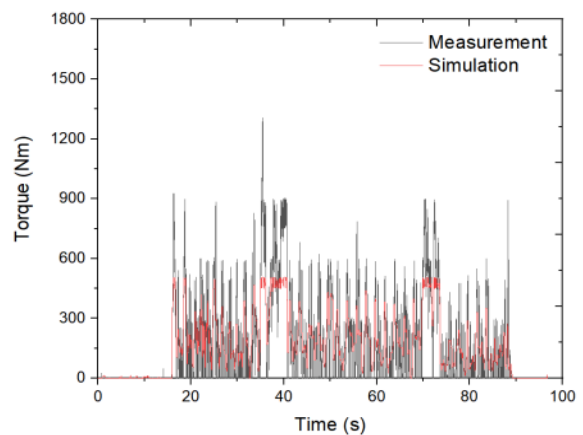


Fig. 17 Results of measured and simulated driving torque of right track system during driving test

Table 9 Measured and simulated driving torque during driving test

Track system	Torque (Nm)		Error (%)
	Measurement	Simulation	
Left	215.3	195.6	9
Right	223.4	227.3	2

#### 4. 결론

본 연구에서는 다목적 플랫폼에 대한 최대 견인 출력 예측에 관한 연구를 수행하였다. 차량 구동을 위한 유압 동력 전달 시스템의 제원을 이용하여 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 유압 동력 전달 시스템은 엔진으로부터 동력을 전달받아 구동되는 유압 펌프, 유압펌프로부터 동력을 전달받아 유압모터 제어를 수행하는 비례제어밸브, 제어 값에 따라 유압을 전달받아 구동되는 유압모터로 구성되며, 유압 회로 보호를 위해 릴리프 밸브가 설치되어 있다.

견인 출력은 견인력 및 차량의 속도를 이용하여 계산하였으며, 각각 로드셀 및 GPS를 이용하여 데이터 수집을 수행하였다. 다목적 플랫폼 후방에는 트랙터를 연결하였으며, 다목적 플랫폼과 트랙터 사이에는 로드셀을 설치하여 견인력을 측정할 수 있도록 구성하였다. GPS는 트랙터에 부착하여 시험간 차량의 속도를 측정할 수 있도록 구성하였다. 견인 출력 측정 시험은 다목적 플랫폼이 먼저 주행하게 한 후 이후에 트랙터가 브레이크를 인가하도록 하였다. 트랙터의 브레이크의 부하가 증가함에 따라 차량은 최대 견인 출력 점에 도달하였으며, 이후에 측정 시험을 종료하였다.

유압 및 구동 토크 계측은 유압 센서 및 스프라켓 센서 화를 통해 수행하였다. 유압은 2개의 유압 펌프에 각각 유압 센서를 설치하여 수집하였으며, 구동 토크는 스프라켓은 가공 및 교정하여 센서 화를 하여 수집하였다.

시뮬레이션 모델개발은 유압 동력 전달 시스템의 구성 및 제원을 이용하여 수행되었으며, 모델개발은 Amesim 프로그램을 이용하여 수행하였다. 실제 시험 조건과 유사하게 구성하기 위해 다목적 플랫폼을 먼저 주행시킨 후 유압모터에 하중을 증가시켜 최대 견인 출력 점을 예측할 수 있도록 하였다. 시뮬레이션도 최대 견인 출력 점에 도달한 후 종료할 수 있도록 구성하였으며, 총 100초에 걸쳐 수행되었

다. 유압에 따른 구동 토크 예측은 계측된 유압 부하를 입력값으로 사용하여 수행하였다. 모델 검증은 각각 측정 및 예측된 최대 견인 출력, 해당 점에서의 견인력 및 속도에 대한 오차 분석을 통해서 수행하였다.

계측 시험은 25초간 수행되었으며, 견인력, 속도 및 견인 출력의 최댓값은 각각 19.6 kN, 1.8 m/s, 24.8 kW로 나타났다. 시뮬레이션은 100초간 수행되었으며, 견인력, 속도 및 견인 출력의 최댓값은 각각 18.9 kN, 1.3 m/s, 24.8 kW로 나타났다. 계측 시 최대 견인 출력 점에서 견인력 및 속도는 각각 19.6 kN 및 1.2 m/s로 나타났으며, 시뮬레이션에서의 최대 견인 출력 점에서 견인력 및 속도는 각각 18.9 kN 및 1.3 m/s로 나타났다. 최대 견인 출력 점에서의 견인력, 속도 및 최대 견인 출력에 대한 측정 및 예측 결과, 각각 4, 8, 0%의 오차가 나타났다.

구동 토크 계측은 총 95초간 수행되었으며, 좌측 구동 토크는 평균 215.3 Nm으로 나타났으며, 우측 구동 토크는 평균 223.4 Nm으로 나타났다. 구동 토크 예측 시뮬레이션 결과 좌측 구동 토크는 평균 195.6 Nm으로 나타났으며, 우측 구동 토크는 평균 227.3 Nm으로 나타났다. 각각 좌·우측에 대한 평균 오차 분석을 한 결과, 각각 9, 2%로 나타났다.

모든 오차는 10% 내외로 분석되었으며, 이는 해당 모델을 이용하여 새로운 플랫폼 개발 시 최대 견인 출력 및 구동 토크를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ0156952022)의 지원에 의해 이루어진 것임.

#### 이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

#### References

- 1) KAMICO and KSAM, 2021, Agricultural Machinery Yearbook, Korea Agricultural Machinery Industry Cooperative and Korean Society for Agricultural Machinery, Chenan and Jeonju,

- pp.74-75.
- 2) K. H. Lee, et. al., "Development of Path Tracking Algorithm and Variable Look Ahead Distance Algorithm to Improve the Path-Following Performance of Autonomous Tracked Platform for Agriculture", Journal of Korea Robotics Society, Vol.17, No.2, pp.142-151, 2022.
  - 3) C. H. Lee, et. al., "Validation of the Impact Reduction Effect for Tracked Vehicles based on dynamics simulation", The Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.45, No.6, pp.507-514, 2021.
  - 4) J. H. Sohn, et. al., "Evaluation of Path Tracking Performance of a Self-driving Tracked Vehicle", The Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.45, No.12, pp.1,167-1, 176, 2021.
  - 5) W. S. Kim, et. al., "Analysis of power requirement of 78 kW class agricultural tractor according to the major field operation", The Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol.43, No.12, pp.911-922, 2019.
  - 6) S. M. Baek, et. al., "Analysis of Engine Load Factor for a 78 kW Class Agricultural Tractor According to Agricultural Operations", Journal of Drive and Control, Vol. 19, No.1, pp.16-25, 2022.
  - 7) D. H. Lee, et. al., "A study on traction prediction of agricultural tractor by empirical method", Journal of Biosystems Engineering, Vol.34, No.5, pp.297-304, 2009.
  - 8) S. Y. Baek, et. al., "Design Verification of an E-driving System of a 44 kW-class Electric Tractor using Agricultural Workload Data", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4 pp36-45, 2022.
  - 9) J. H. Lee, et. al., "Analysis of Emissions of Agricultural Tractor according to Engine Load Factor during Tillage Operation", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4 pp.54-61, 2022.