

ENGINEERING

# Development and performance evaluation of lateral control simulation-based multi-body dynamics model for autonomous agricultural tractor

Mo A Son<sup>1</sup>, Hyeon Ho Jeon<sup>2</sup>, Seung Yun Baek<sup>2</sup>, Seung Min Baek<sup>2</sup>, Wan Soo Kim<sup>3</sup>, Yeon Soo Kim<sup>4</sup>, Dae Yun Shin<sup>5</sup>, Ryu Gap Lim<sup>6,\*</sup>, Yong Joo Kim<sup>1,2,7,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Agricultural Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

<sup>2</sup>Department of Smart Agriculture System, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

<sup>3</sup>Department of Bio Industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

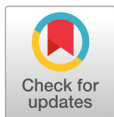
<sup>4</sup>Department of Bio Industrial Machinery Engineering, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

<sup>5</sup>Chungnam National University, CEO, Sejong Rain Co., Ltd., Daejeon 34134, Korea

<sup>6</sup>Innovalley Substantiation Team, Korea Agriculture Technology Promotion Agency, Iksan 54667, Korea

<sup>7</sup>Department of Biosystem Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

\*Corresponding authors: [limso@koat.or.kr](mailto:limso@koat.or.kr), [babina@cnu.ac.kr](mailto:babina@cnu.ac.kr)



## OPEN ACCESS

**Citation:** Son MA, Jeon HH, Baek SY, Baek SM, Kim WS, Kim YS, Shin DY, Lim RG, Kim YJ. Development and performance evaluation of lateral control simulation-based multi-body dynamics model for autonomous agricultural tractor. Korean Journal of Agricultural Science 50:773-784. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500415>

**Received:** September 07, 2023

**Revised:** November 01, 2023

**Accepted:** November 07, 2023

**Copyright:** © 2023 Korean Journal of Agricultural Science



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

In this study, we developed a dynamic model and steering controller model for an autonomous tractor and evaluated their performance. The traction force was measured using a 6-component load cell, and the rotational speed of the wheels was monitored using proximity sensors installed on the axles. Torque sensors were employed to measure the axle torque. The PI (proportional integral) controller's coefficients were determined using the trial-error method. The coefficient of the P varied in the range of 0.1 - 0.5 and the I coefficient was determined in 3 increments of 0.01, 0.05, and 0.1. To validate the simulation model, we conducted RMS (root mean square) comparisons between the measured data of axle torque and the simulation results. The performance of the steering controller model was evaluated by analyzing the damping ratio calculated with the first and second overshoots. The average front and rear axle torque ranged from 3.29 - 3.44 and 6.98 - 7.41 kNm, respectively. The average rotational speed of the wheel ranged from 29.21 - 30.55 rpm at the front, and from 21.46 - 21.63 rpm at the rear. The steering controller model exhibited the most stable control performance when the coefficients of P and I were set at 0.5 and 0.01, respectively. The RMS analysis of the axle torque results indicated that the left and right wheel errors were approximately 1.52% and 2.61% (at front) and 7.45% and 7.28% (at rear), respectively.

**Keywords:** agricultural tractor, lateral control, multi body dynamics model, performance evaluation, simulation

## Introduction

농업용 트랙터는 농업기계 중에서 가장 활용도가 높은 농업기계로서 농작업의 종류에 따라 작업기를 부착하여 농작업을 수행한다(Kim et al., 2019). 국내 트랙터의 사용 비율은 약 71.8%를 차지하고 있으며 그 비율은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다(Lee et al., 2020). 또한 국내 트랙터 공급대수는 전체 농업기계의 약 59.2%로 가장 높은 비율을 차지하고 있다(Baek et al., 2022). 최근 국내의 농업 환경은 지속적인 농업인구 감소와 농촌 고령화로 인하여 농업 노동력 감소 문제가 점차 심화되고 있는 추세이며(Noh et al., 2022), 이와 같은 노동력 문제는 농업 생산성 감소를 초래하고 있다(Cho et al., 2022). 이를 해결하기 위한 방법으로 자율주행 농업기계 기술에 대한 연구가 필요하다(Kim et al., 2022).

최근 실차 시험에 소요되는 시간 및 비용의 효율성을 개선하기 위하여 동역학 시뮬레이션을 활용한 연구는 다양하게 수행되고 있다. 물리적 시험에 비해 시뮬레이션은 시험 환경을 완벽하게 제어할 수 있으며, 다양한 조건과 시나리오 구성이 가능하다. 또한 시험 결과를 토대로 모델을 수정하고 다시 시뮬레이션을 실행하여 설계의 최적화와 개선을 빠르게 수행할 수 있다.

Lim (2019)은 트랙터의 노지 주행 및 쟁기작업 시 구동부에 발생하는 부하 및 주행속도 검출을 위한 동역학 모델을 개발하였으며, 시뮬레이션 결과와 포장시험을 통하여 계측된 차축 부하, 주행속도와 비교 분석하여 쟁기작업 시 발생하는 부하가 노지 주행 조건보다 슬립 등의 영향을 받아서 원하는 경로로 주행이 어렵다는 결과를 도출하였다.

Kim 등(2020)은 지게차의 작업모드에 따라 발생하는 지게차의 동적부하를 관측하기 위해 동역학 모델을 개발하였으며 시뮬레이션 데이터와 실차 시험을 통하여 산출된 데이터를 비교분석 하여 동역학 모델의 유효성을 확인하였다. 타이어의 강성에 따른 영향은 리프팅 작업 시 밸브 사이에서 발생하는 압력의 진동이 타이어 종류에 영향을 크게 받는 것을 확인하였다.

Yun 등(2011)은 굴절차량의 선형과 비선형 동역학 모델을 개발해 조향각, 속도, 타이어 미끄러짐 현상 조건으로 시뮬레이션을 수행하여 두 모델의 결과를 비교하고 외란에 대한 분석으로 선형과 비선형 모델에 대하여 검증하였다.

Han과 Lee (2022)는 특수차량에 대한 동역학 모델을 개발하고 선회주행 시 무게중심에서 발생하는 요속도와 횡슬립을 고려한 선회특성 분석을 통해 원격주행 6륜 차량의 조향비율 결정에 대한 연구를 수행하였다. 시뮬레이션을 기준속도별 3개의 구간 조건으로 수행하여 대상 차량의 1,3축에 대한 조향비율을 결정하고 적합성을 검증하였다.

이와 같이 동역학 시뮬레이션 모델을 기반으로 한 연구는 다양한 분야에서 수행되고 있다. 앞선 연구를 분석하여 볼 때, 트랙터 연구에 포장시험을 실시함에 따라 재연성 및 환경에 영향을 많이 받으면 데이터 산출이 어려운 문제점이 발생할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 트랙터의 동역학 모델을 개발하여 시뮬레이션을 통한 결과값과 실험데이터를 비교 분석하여 신뢰성을 검증하고 추가적인 재연성 실험을 통한 문제점을 분석하여 모델의 정확도를 높이려 한다. 따라서 본 연구는 자율주행 트랙터의 동역학 모델 개발을 위한 기초연구로써, 실시간으로 횡 방향 오차를 수신 받아 제어가 가능한 조향제어모델과 동역학 모델을 개발하고 각 모델에 대한 성능평가와 Co-sim을 통한 그 성능을 농작업 시 부하 데이터를 이용하여 분석하였다.

## Materials and Methods

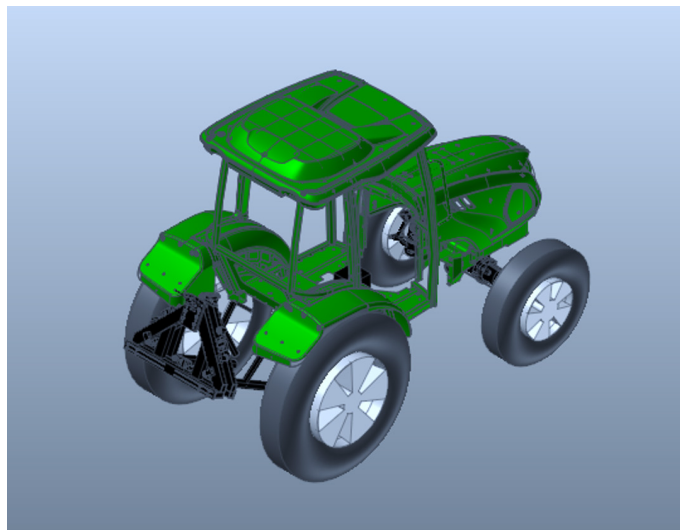
### 동역학 시뮬레이션 모델 개발

동역학 모델 개발을 위한 트랙터는 Fig. 1과 같이 최근 국내에서 가장 수요가 많은 78 kW급 대형 트랙터(S07, TYM Co Ltd., Korea)를 선정하였다. 트랙터의 중량은 4,000 kg이며, 크기는 4,225 mm × 2,140 mm × 2,830 mm (length × width × height)이다. 동역학 모델은 상용 소프트웨어인 RecurDyn (V9R4, FunctionBay Inc., Korea)을 권장

사양에 적합한 PC를 이용하여 Fig. 2와 같이 개발하였다. 동역학 모델을 구성하기 위한 입력 데이터는 플라우 작업 시 육분력계에서 계측된 견인력 데이터와 각 차축의 회전속도로 설정하였다. 시뮬레이션 모델의 구속 조건은 실제 트랙터의 구성을 참고하여 구성하였다. 타이어 구동을 위해 회전운동이 가능한 revolute joint를 적용하였으며, 전 차축 타이로드에 좌·우 조향제어를 구현을 위해 병진운동이 가능한 translational joint 적용하였다. 타이어 모델은 UA (University of Arizona)를 이용하여 개발하여 지면과의 접촉을 구현하였으며, 지면의 마찰계수와 타이어의 구름저항은 선행연구를 참고하여 마찰계수는 0.6으로, 구름저항은 0.3으로 선정하였다. 3점하치 위치에 플라우 구현을 위한 지오메트리를 구성하고 작업기의 무게와 육분력계에서 계측된 견인력을 적용하여 부하를 구현하였다. 개발한 동역학 모델은 조향제어모델과 co-sim을 통하여 플라우 작업 시 동역학 모델의 중심을 기준점으로 거동에 따른 횡 방향 제어 시뮬레이션 수행을 하였다.



**Fig. 1.** A photo of tractor used in this study.



**Fig. 2.** 3D model of tractor for dynamic simulation.

## 조향제어모델 개발

자율주행 트랙터의 조향제어모델은 Fig. 3과 같이 SIMULINK (R2022a, MathWorks Inc., USA) 상용 소프트웨어를 이용하여 구현하였으며, 동역학 모델과의 연성해석(co-simulation)을 통해 모델을 개발하였다. 조향제어모델은 동역학 모델의 차량 위치를 중심으로 조향 시 발생하는 차량 중심과 조향각 과의 오차를 줄일 수 있도록 개발하였다. 그러므로, 동역학 시뮬레이션 모델은 횡 방향 경로에 따라 조향제어를 하여 그 경로 오차를 줄이도록 개발하였으며, 이때 조향제어 알고리즘은 신속한 조향과 경로 수렴을 위하여 PI (proportional integral) 제어를 사용하였다. PI 제어기의 계수는 trial-error 방식으로 P 계수는 0.1에서 0.5까지 5수준으로, I 계수는 0.01, 0.05, 0.1의 3수준으로 변경하며 선정하였다. 이때, PI 계수의 선정은 감쇠비를 이용하여 선정하였으며, 감쇠비는 가장 높은 오차인 1차 오버슈트와 2차 오버슈트의 비로 식(1)과 같이 계산하였다.

$$\zeta = \frac{2nd\ overshoot}{1st\ overshoot} \times 100 \quad (1)$$

여기서,  $\zeta$  = damping ratio (%)이다.

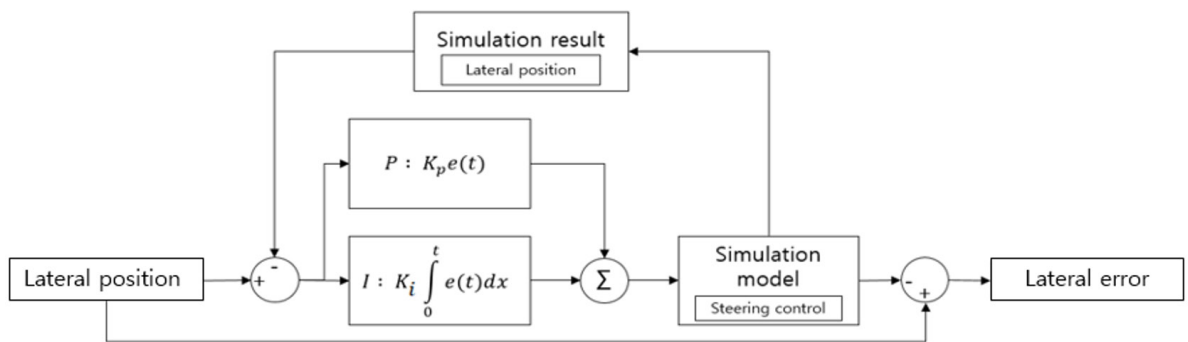
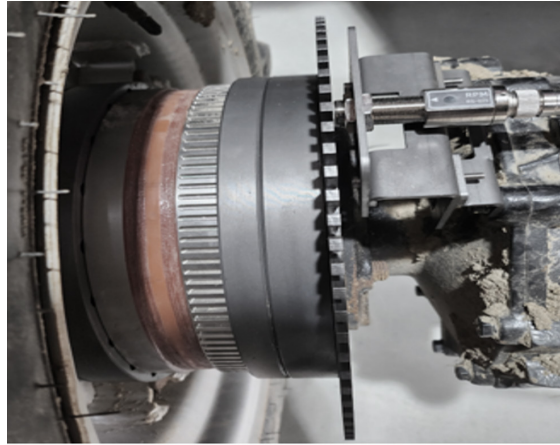


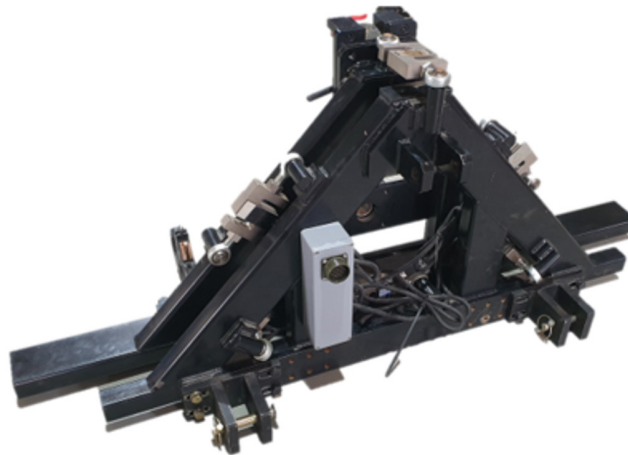
Fig. 3. A diagram of the steering model based on PI (proportional integral) controller in this study.

## 플라우 작업 데이터 수집

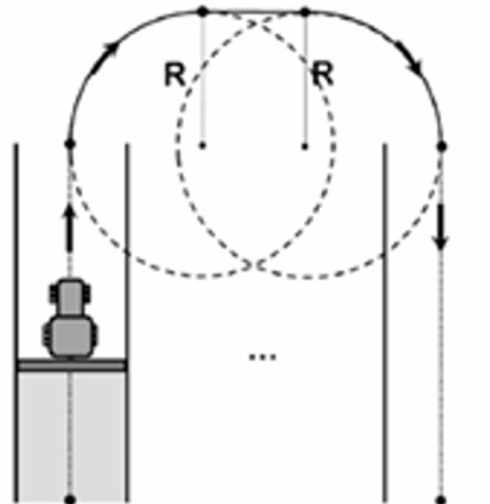
동역학 모델의 검증을 위하여 트랙터 작업 중 가장 부하 수준이 높은 플라우 작업을 수집하였다. 플라우 작업 시 데이터는 각 차축의 토크와 회전속도, 육분력계를 이용한 견인력을 측정하였다. 차축의 토크데이터는 휠 토크미터를 이용하여 텔레메트리 방법으로 측정하였으며, 회전속도는 Fig. 4와 같이 스프라켓을 100개의 톱니 모양으로 가공하여 차축에 회전에 따른 신호를 측정하여 분당회전속도로 환산하였다. 견인력은 Fig. 5와 같이 육분력계의 상부 및 하부의 3개의 로드셀을 각각 설치하여 구성하였다. 각각의 데이터는 유니버설 타입의 데이터수집장치 (840B, Hottinger Brüel & Kjær, Germany)를 이용하여 수집하였다. 포장 시험은 충남 당진(36°55'49.1"N, 126°37'57.3"E)에 위치한 가로 100 m 세로 80 m의 한 논 포장에서 Fig. 6과 같이 플라우 작업 시 주로 사용하는 C형 작업 방법으로 직진과 선회를 반복하였으며, 총 13번의 100 m 직진과 선회를 반복하며, 데이터를 수집하였다.



**Fig. 4.** A photo of axle rotational speed measurement part used in this study.



**Fig. 5.** A photo of 6-component load cell used in this study.



**Fig. 6.** A photo of plow tillage operation with C-type.

## 동역학 시뮬레이션 모델 성능 분석

동역학 시뮬레이션 모델의 성능은 계측한 농작업 데이터와 시뮬레이션 결과값의 각 차축별 토크의 제곱평균제곱근(root mean square, RMS)를 식(2)를 참고하여 계산하였으며, 오차는 식(3)과 같이 계산하였다(Baek et al., 2020).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k^2} \quad (2)$$

$$E = \frac{|A_s - A_m|}{A_m} \times 100 \quad (3)$$

여기서,  $x$  = Each axle torque (kNm)

$n$  = Number of data

$E$  = Error between measured and simulated value (%)

$A_s$  = RMS value of simulation value (kNm)

$A_m$  = RMS value of measured value (kNm)이다.

## Results and Discussion

### 플라우 작업 데이터 분석

차축 회전속도와 토크는 플라우 경운 시작 후 부착 작업기 견인을 위하여 급격하게 증가하여 각각 Fig. 7과 Fig. 8과 같이 나타났다. 전륜 좌·우측의 회전속도는 모두 25 - 32 rpm의 범위를 보이며, 후륜 좌·우측의 회전속도는 모두

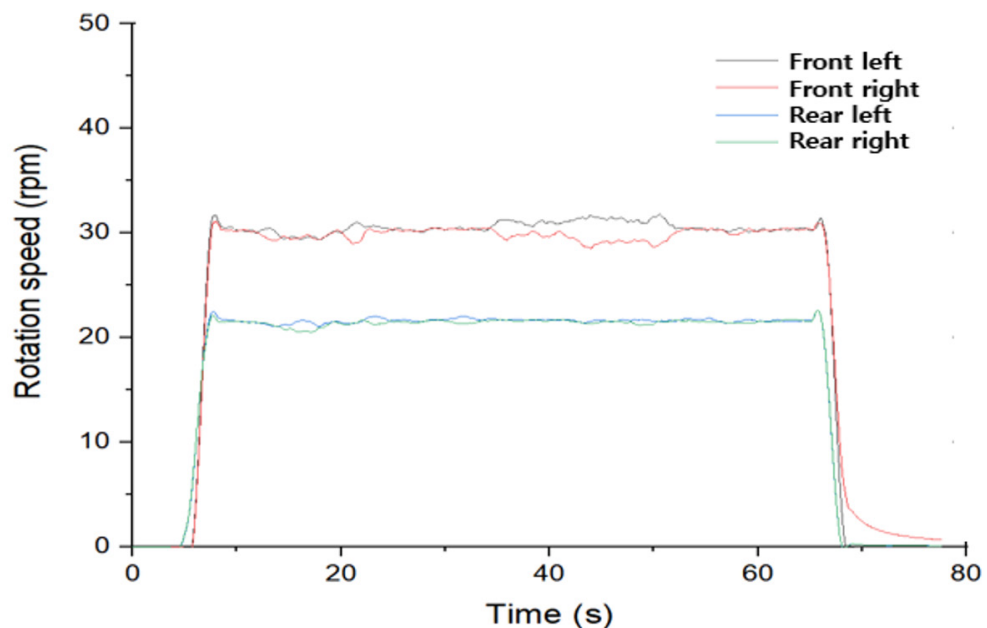
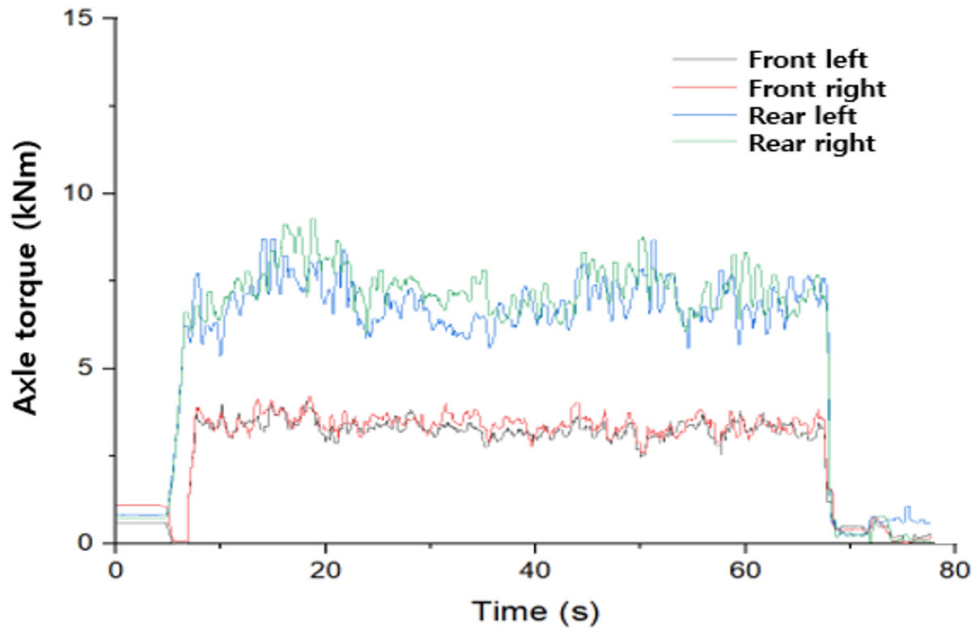


Fig. 7. The results of measured axle rotational speed of a 78 kW tractor.



**Fig. 8.** The results of measured axle torque of a 78 kW tractor.

약 20 - 22 rpm의 범위로 나타났다. 전륜 좌·우측의 토크는 모두 약 3 - 4 kNm의 범위를 보이며, 후륜 좌·우측의 토크는 모두 약 6 - 10 kNm의 범위로 나타났다.

플라우 작업 시 각 차륜의 토크와 회전속도를 분석한 결과는 Table 1과 같이 나타났다. 전륜 좌측의 토크는 각각 최대 4.07, 평균 3.29, 최소 1.66 kNm로 나타났으며 회전속도는 각각 최대 31.80, 평균 30.55, 최소 26.71 rpm으로 나타났다. 전륜 우측의 토크는 각각 최대 4.22, 평균 3.44, 최소 1.78 kNm로 나타났으며 회전속도는 각각 최대 31.15, 평균 29.91, 최소 25.39 rpm으로 나타났다. 후륜 좌측의 토크는 각각 최대 8.71, 평균 6.98, 최소 5.37 kNm로 나타났으며 회전속도는 각각 최대 22.60, 평균 21.63, 최소 20.82 rpm으로 나타났다. 후륜 우측의 토크는 각각 최대 9.28, 평균 7.41, 최소 6.02 kNm로 나타났으며 회전속도는 각각 최대 22.62, 평균 21.46, 최소 20.51 rpm으로 나타났다.

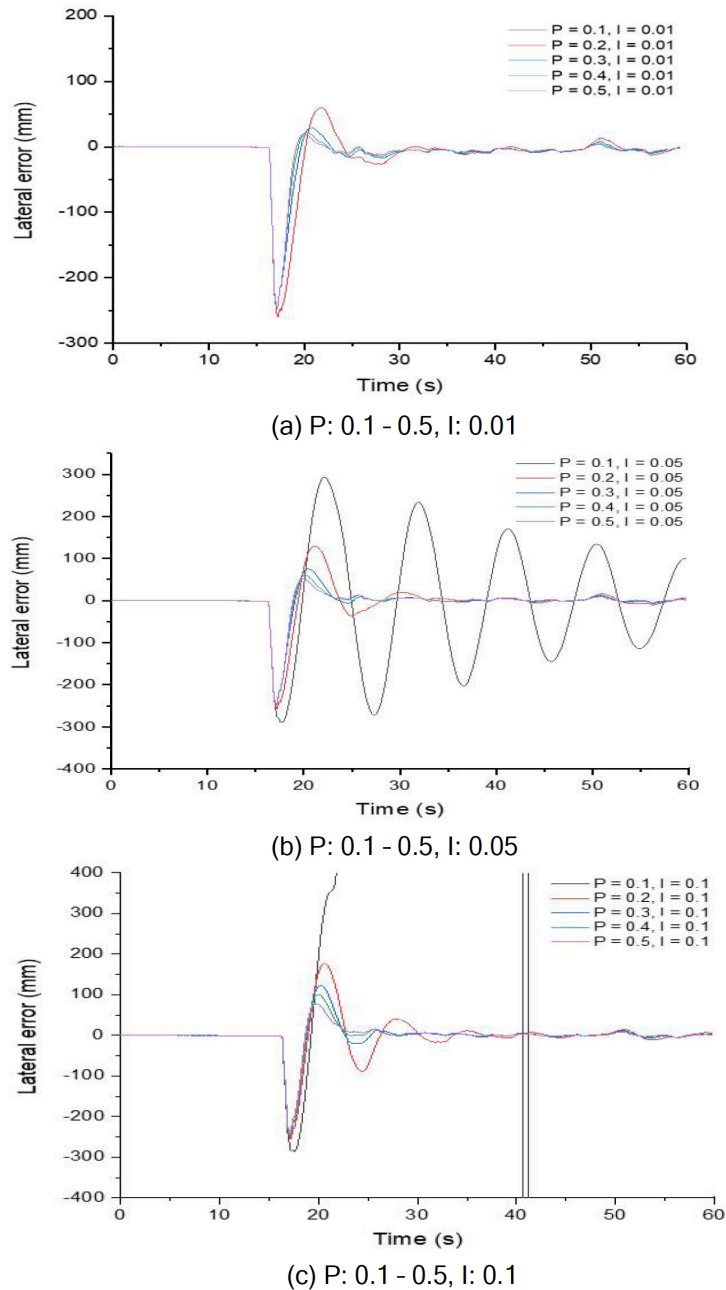
**Table 1.** The results of measured axle torque and rotational speed of a 78 kW tractor.

Item		Maximum	Minimum	Average	Standard deviation
Forward left axle	Torque (kNm)	4.07	1.66	3.29	0.25
	Rotational speed (rpm)	31.80	26.71	30.55	0.54
Forward right axle	Torque (kNm)	4.22	1.78	3.44	0.27
	Rotational speed (rpm)	31.15	25.39	29.91	0.54
Rear left axle	Torque (kNm)	8.71	5.37	6.98	0.65
	Rotational speed (rpm)	22.60	20.82	21.63	0.21
Rear right axle	Torque (kNm)	9.28	6.02	7.41	0.66
	Rotational speed (rpm)	22.62	20.51	21.46	0.27

전체적으로 우측의 토크가 좌측의 토크보다 약 평균 1.05배 높게 나왔으며, 이는 운전자에 따른 우측륜의 부가 무게 증가 때문으로 판단된다. 또한 전체적으로 후륜의 토크가 전륜 토크의 약 평균 2.14 배 높게 나타났으며, 이는 경심에 따라 플라우에 가해지는 부하가 후륜에 집중되어 나타났기 때문으로 판단된다.

## 조향제어모델 성능평가

PI 계수 변경에 따른 횡 방향 오차 그래프는 Fig. 9와 같이 나타났다. 시뮬레이션 결과 P 계수가 0.1일 때 I 계수에 상관없이 모두 불안정한 그래프 개형이 확인되었으며, 오차가 시뮬레이션 조건을 넘어 데이터를 측정할 수 없었다. 이는 제어 시스템이 불안정하여 정상적인 제어를 수행하지 못했기 때문으로 판단된다. PI 계수에 따른 제어 모델의 성능은 Table 2와 같이 1차 오버슈트, 2차 오버슈트 및 감쇠비로 나타났다. 제어 모델의 성능을 분석한 결과 P 제어기 계수가 0.5, I 제어기 계수가 0.1일 때 1차 오버슈트는 -237.35 mm, 2차 오버슈트는 77.72 mm, 감쇠비는 32.74 %로 나타났다. 또한 P 제어기 계수가 0.5, I 제어기 계수가 0.01일 때 최대오버슈트는 -259.69 mm, 2차 오버슈트는



**Fig. 9.** The result of the lateral error according to coefficients of PI (proportional integral) controller.



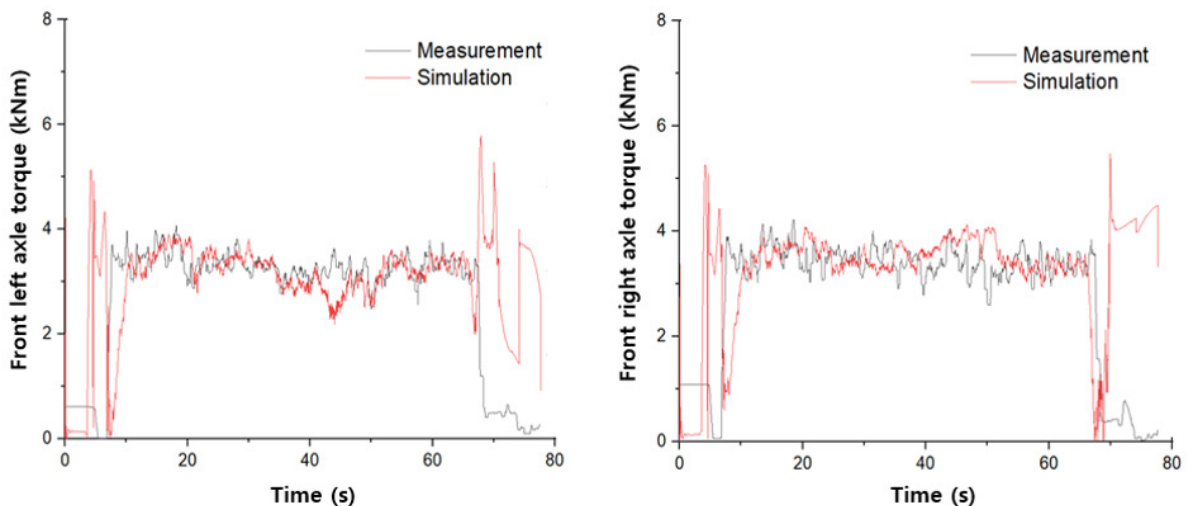
**Table 2.** 1<sup>st</sup> overshoot, 2<sup>nd</sup> overshoot, and damping ratio of the lateral error according to coefficients of PI (proportional integral) controller.

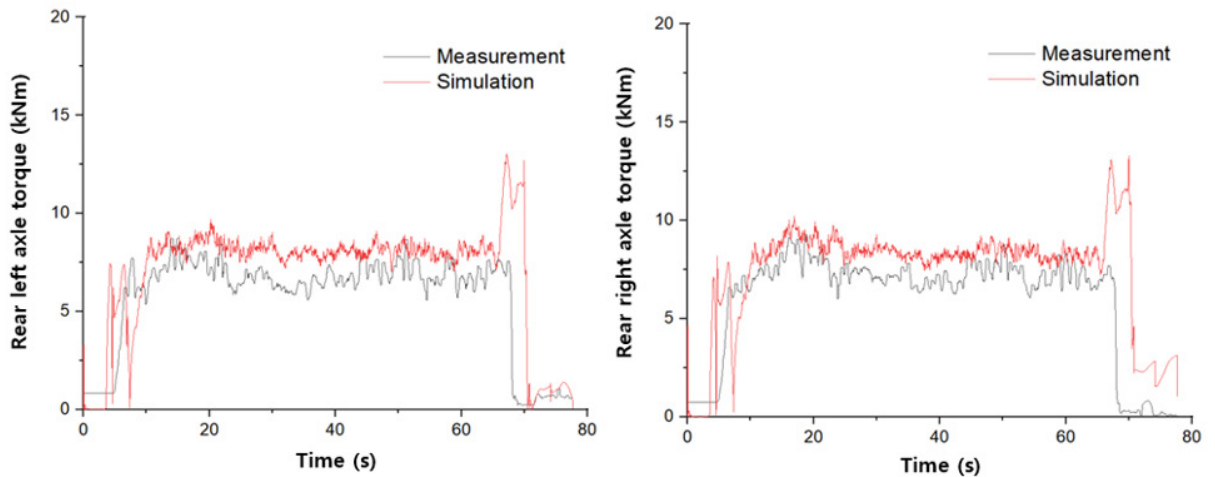
Item		1 <sup>st</sup> overshoot (mm)	2 <sup>nd</sup> overshoot (mm)	Damping ratio (%)
P=0.1		-	-	-
P=0.2		-259.69	59.91	-23.07
P=0.3	I=0.01	-247.46	28.79	-11.64
P=0.4		-246.77	22.17	-8.99
P=0.5		-259.69	19.14	-7.37
P=0.1		-	-	-
P=0.2		-258.18	129.74	-50.25
P=0.3	I=0.05	-246.92	75.31	-30.50
P=0.4		-246.60	59.35	-24.07
P=0.5		-249.14	51.28	-20.58
P=0.1		-	-	-
P=0.2		-255.41	177.00	-69.30
P=0.3	I=0.1	-246.89	122.52	-49.62
P=0.4		-246.30	100.13	-40.65
P=0.5		-237.35	77.72	-32.74

19.14 mm, 감쇠비는 7.37%로 나타났다. 이때 가장 큰 감쇠비를 확인할 수 있었다. 제어 모델의 경우 감쇠비의 크기가 클수록 정상상태의 응답이 안정적인 것이며, 이에 따라 가장 높은 감쇠비를 보인 P 제어기 계수가 0.5, I 제어기 계수가 0.01일 때 가장 안정적인 제어 성능을 수행하는 것으로 나타났다.

### 동역학 시뮬레이션 모델 성능평가

개발된 동역학 시뮬레이션의 플라우 작업 시 차축의 토크데이터는 Fig. 10과 Fig. 11과 같이 측정한 데이터와 유사한 경향을 보여주었으며, 이에 대한 평균값과 오차를 Table 3과 같이 분석하였다. 좌측 전륜 토크데이터는 측정값과 시뮬레이션값이 각각 3.29, 2.24 kNm로 나타났으며, 오차는 약 1.52%로 계산되었다. 우측 전륜 토크데이터는 측정값과 시뮬레이션값이 각각 3.44, 3.53 kNm로 나타났으며, 오차는 약 2.61%로 계산되었다. 좌측 후륜 토크데이

**Fig. 10.** The results of measured and simulated front axle torque.



**Fig. 11.** The results of measured and simulated rear axle torque.

**Table 3.** The performance evaluation of lateral control simulation based on multi-body dynamics model.

Item	Front left	Front right	Rear left	Rear right
Measurement (kNm)	3.29	3.44	6.98	7.41
Simulation (kNm)	3.24	3.53	6.46	7.95
Error (%)	1.52	2.61	7.45	7.28

터는 계측값과 시뮬레이션값이 각각 6.98, 6.46 kNm로 나타났으며, 오차는 약 7.45%로 계산되었다. 우측 후륜 토크 데이터는 계측값과 시뮬레이션값이 각각 7.41, 7.95 kNm로 나타났으며, 오차는 약 7.28%로 계산되었다. 이상으로 볼 때, 개발된 동역학 시뮬레이션의 오차는 후차축에서 좌우측 각각 7.45, 7.28%로 더 큰 오차를 보였으며, 이는 실제 계측 시에는 플라우 작업 시 3점히치의 거동에 후차축에 토크 변화가 발생하였기 때문으로 판단된다.

## Conclusion

본 연구는 자율주행 트랙터의 동역학 모델과 조향제어모델 개발을 위한 기초 연구로써, 동역학 모델은 플라우 작업 시 발생하는 부하 및 주행속도를 검출하기 위해 시뮬레이션 하였으며, 포장시험에서 계측된 데이터와 비교 분석하였다. 조향제어모델은 동역학 모델이 플라우 작업 시뮬레이션을 수행할 때 횡방향 제어 성능을 분석하고 안정성을 확인하였다. PI 제어기의 계수는 trial-error 방식으로 수행하였으며, 그 결과 가장 안정적인 감쇠비를 나타낸 P 제어기의 계수 0.5, I 제어기의 계수 0.01 로 선정하였다. 동역학 시뮬레이션의 성능평가 결과 계측 데이터와 시뮬레이션 데이터의 토크데이터에 대한 오차는 전륜 좌우측 각각 약 1.52, 2.61%로 나타났으며, 후륜 좌우측은 각각 약 7.45, 7.28%로 나타났다. 이는 실제 계측 시에는 플라우 작업 시 3점히치의 거동에 후차축에 토크 변화가 발생하였기 때문으로 판단되며, 이를 해결하기 위해서는 3점히치의 거동에 대한 동역학 모델 개발이 필요할 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 다양한 농업 환경 조건에 따른 동역학 모델의 동특성 분석과 조향제어모델 성능의 신뢰성 검증을 위하여 토양 조건을 적용한 모델 개발이 필요할 것으로 판단된다.

## Conflict of Interests

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

## Acknowledgements

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20023098).

## Authors Information

Mo A Son, <https://orcid.org/0000-0003-4273-8313>

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>

Wan Soo Kim, <https://orcid.org/0000-0001-9669-4761>

Yeon Soo Kim, <https://orcid.org/0000-0002-9615-683X>

Dae Yun Shin, CEO, Sejong Rain Co., Ltd.

Ryu Gap Lim, <https://orcid.org/0000-0001-7825-7293>

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

## References

- Baek SM, Kim WS, Kim YS, Baek SY, Kim YJ. 2020. Design of the hydro-mechanical transmission for a 55kW-class agricultural tractor. *Journal of Drive and Control* 17:19-27. [in Korean]
- Baek SY, Baek SM, Jeon HH, Lee JH, Kim WS, Kim YJ. 2022. 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]
- Cho SJ, Kim JG, Park JS, Kim YS, Lee D. 2022. Development of the 80-kW test tractor for load measurement of agricultural operations. *Journal of Drive and Control* 19:46-53. [in Korean]
- Han K, Lee H. 2022. Determination of steering ratio of remote driving 6-wheeled vehicles using dynamic analysis. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers* 30:405-415. [in Korean]
- Kim J, An H, An Y, Lee C. 2020. Development and validation of co-simulation model in engine forklift operation mode. *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers* 28:239-246. [in Korean]
- Kim WS, Kim YS, Kim TJ, Park SU, Choi Y, Choi IS, Kim YK, Kim YJ. 2019. Analysis of power requirement of 78 kW class agricultural tractor according to the major field operation. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A* 43:911-922. [in Korean]
- Kim YT, Kim YH, Baek SM, Kim YJ. 2022. Technology trend on autonomous agricultural machinery. *Journal of Drive and Control* 19:95-99. [in Korean]
- Lee NG, Kim YJ, Baek SM, Moon SP, Park SU, Choi YS, Choi CH. 2020. Analysis of traction performance for agricultural tractor according to soil condition. *Journal of Drive and Control* 17:133-140. [in Korean]
- Lim SH. 2019. Development of a dynamic simulation model of an autonomous driving tractor with agricultural workload. Master's thesis, Chungnam National Univ., Daejeon, Korea. [in Korean]

- Noh DK, Lee DW, Lee JS, Jang JS. 2022. Analysis of surplus flow in a hydraulic system applied to a self-propelled spinach harvester. *Journal of Drive and Control* 19:26-33. [in Korean]
- Yun KH, Kim YC, Min KD, Byun YS. 2011. Lateral dynamic model of an all-wheel steered articulated vehicle for guidance control. *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers* 60:1229-1238. [in Korean]