

ENGINEERING

Dynamic characteristics of a tractor cabin during plow tillage and rotary tillage

Jong Dae Park¹, Min Jong Park¹, Seung Min Baek¹, Seung Yun Baek¹, Hyeon Ho Jeon¹, Dae Wun Kim¹, Dae Seung Hwang¹, 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

Due to the environment of irregular soil characteristic for agricultural fields, dynamic characteristic occurs in the tractor cabin during agricultural operations. Operator's fatigue is increased, and operation performance is decreased by these irregular environment conditions. This study was conducted to measure and analyze the dynamic characteristic of a tractor cabin, a major agriculture machinery, during agricultural operations. The specification of tractor used in the study was a 95 kW class tractor. To analyze the dynamic characteristics of the tractor cabin, the main agricultural operations, plow tillage and rotary tillage, were selected. To measure data of dynamic characteristic of the cabin, which continuously changes during operations, an Ellipse Series INS (inertia navigation system) with a built-in IMU (inertia measurement unit) was attached to the center of gravity of the cabin. During field test, the gear stages of plow tillage were B4 (4.3 km · h⁻¹) and B5 (5.6 km · h⁻¹), and the gear stages of rotary tillage were A3 (3.3 km · h⁻¹) and A4 (4.2 km · h⁻¹), which are the most commonly used. To analyze dynamic characteristic such as roll and pitch during operations according to the gear stages. As a result, the dynamic characteristics of pitch increased more than the dynamic characteristics of roll as the travel speed increased, and the dynamic characteristics of both agricultural operations were in the range of 2 to 5°.

Keywords: agriculture machinery, dynamic characteristic, plow tillage, rotary tillage, tractor cabin

OPEN ACCESS


Citation: Park JD, Park MJ, Baek SM, Baek SY, Jeon HH, Kim DW, Hwang DS, Kim YJ. 2024. Dynamic characteristics of a tractor cabin during plow tillage and rotary tillage. Korean Journal of Agricultural Science 51:295-305. <https://doi.org/10.7744/kjoas.510305>

Received: April 08, 2024

Revised: July 04, 2024

Accepted: July 16, 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.

Introduction

농업용 트랙터는 작업기를 장착하여 필요한 작업을 수행하는 다목적용 차량이며, 단일 형태의 농기계로는 세계 농기계 시장에서 가장 중요한 농업용 차량이다(Son et al., 2023). 농업용 트랙터는 주로 토양환경에서 운용되며, 다양한 농작업에 범용적으로 활용이 가능하다(Kim et al., 2023; Lee and Kim, 2023). 현재 국내 농업 기계분야에서는 트랙터를 중심으로 연구가 진행되고 있으며, 실제 농작업 환경에 최적화된 설계를 위해 필드시험을 수행하여 데이터를 수집하고 있다(Bae et al., 2023; Lee et al., 2023). 국내 트랙터의 사용 비율은 약 71.8%를 차지하고 있으며 그 비율은 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 또한 국내 트랙터 공급대수는 전체

농업기계의 약 59.2%로 가장 높은 비율을 차지하고 있다(Baek et al., 2022). 농업용 트랙터의 캐빈은 작업자에게 필요한 조작기구와 냉 난방 장치를 구비하여 작업자에게 안락한 작업공간을 제공하여 운전자의 작업 피로도를 경감시키고 작업능률 향상에 기여한다. 그러나 국내 대부분의 트랙터는 최대 출력 조건에서 작업이 수행되고 있는데 이러한 작업조건은 작업자에게 전달되는 진동 및 소음을 증가시킬 수 있다(Park et al., 2011). 또한, 이러한 지속적인 진동 및 소음은 작업자의 피로도를 증가시키고 작업 능률을 저하시킨다(Lim et al., 2021).

국외 선진사는 농작업간 발생하는 진동 저감을 하기 위한 기술들을 지속적으로 개발하고 있다. 대표적인 진동저감 기술로는 트랙터 앞 차축 유압식 서스펜션을 구성하고, 캐빈에는 스프링 타입의 2점 식 서스펜션이 결합된 트랙터 서스펜션 시스템(Achen et al., 2008)이 있으며, 국내에 도입되는 해외 선진사 제품에도 다수 적용되고 있는 기술이다. 또한, John Deere 社에서는 TLS (triple-link suspension) 시스템을 적용하여 전차축 및 캐빈 모두에 전자 유압식 서스펜션을 부착하여 조건에 따라서 가변형으로 댐퍼를 조절하여 승차감을 증대시킬 수 있는 시스템도 상용화되고 있다. 그러나 이런 가변형 댐퍼 시스템의 경우 상당히 고가에 가격이 형성되어 있으며, 상대적으로 가격에 민감한 국내 트랙터 수요 시장에서는 적용하기 어려운 실정이다. 또한 트랙터 승차 진동 저감을 위한 가장 높은 기술이라고 판단되는 캐빈 서스펜션은 국내 기술로 개발되지 않았으며, 장착된 트랙터 역시 전무하다(Oh et al., 2019). 이에 따라, 저렴한 가격으로도 캐빈 내 환경 개선이 가능한 서스펜션에 대한 연구가 필요한 실정이다.

Yu 등(2013)은 MATLAB/Simulink을 통해 3D 시뮬레이션 모델을 설계하였으며, 시뮬레이션 모델을 통해 승차감에 가장 큰 영향을 주는 수직방향의 진동과 pitch 방향으로의 거동 데이터를 실제 실험 데이터와 비교 및 분석하여 작업속도에 따른 캐빈 진동 특성 및 거동을 검증하였다. Cho 등(2016)은 트랙터에 장착되는 작업기로 인하여 발생하는 진동에 대한 연구를 수행하였다. 트랙터 프론트 로더 시스템의 피치 진동을 저감하기 위해 유압 시뮬레이션을 활용한 봄 서스펜션의 충격 감쇠효과 분석하여 실차 실험을 통한 충격 저감 효과를 검증하였다. Chung 등(2017)은 국내 제조사에서 판매중인 90 kW 트랙터의 제원을 이용하여 동역학 모델을 개발하였다. 개발한 동역학 모델을 이용하여 캐빈의 서스펜션 시스템 감쇠계수 변화에 따른 승차감 개선에 대한 연구를 수행하였다. Seo 등(2019)은 트랙터 캐빈의 FEM (finite elements methods) 기법을 이용하여 차체와 연결되는 방진고무 형상에 따른 캐빈 내 진동에 대한 연구를 수행하였다. 방진고무 형상에 따라 캐빈 내 형성되는 진동을 비교 및 분석하고 이를 활용하여 설계 최적화에 대한 방안을 제시하였다. Choi 등(2019)은 simulink를 통해 감쇠력 제어 및 수평위치 제어로직 모델을 구성하였으며, 트랙터 캐빈용 반능동 서스펜션 제어로직 개발 연구를 수행하였다. Oh (2022)는 트랙터의 반능동 (semi-active) 캐빈 서스펜션 시스템을 개발하여 시뮬레이션 모델을 통해 승차 진동을 ISO (1997)에서 제시한 방법을 활용하여 분석 및 개선하였으며, 승차진동 개선 결과에 대한 재현성 확보를 위해 LQG 제어 알고리즘을 개발하여 트랙터의 승차 진동 분석 연구를 수행하였다.

문헌 연구 결과 대부분의 연구는 트랙터 캐빈의 거동 분석을 위하여 시뮬레이션을 통한 해석을 수행하였으며, 이를 검증하는 재현성 실험에 대한 부분 및 실제 농작업 시 발생하는 트랙터 캐빈의 거동 데이터를 활용한 분석은 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 해외 트랙터 대비 저렴한 캐빈 서스펜션 시스템 개발을 위한 기초연구로서 농작업 시 발생하는 캐빈의 거동을 측정하는 실증 실험용 시스템을 구축하여 캐빈의 거동을 측정하고 분석하였다.

Materials and Methods

농업용 트랙터 및 작업기

농작업 시 트랙터 캐빈의 거동은 최근 국내 농기계에서 가장 높은 수요를 보이고 있는 대형트랙터(T130, TYM Co., Ltd., Korea)를 대상으로 측정하였다. 본 연구에서 사용된 트랙터는 디젤엔진이 탑재된 95 kW급 대형 트랙터이며, 정격 회전속도는 2,220 rpm, 크기 및 무게는 각각 4,490 × 2,360 × 2,940 mm (length × width × height) 무게는

4,545 kg이다. 트랙터 농작업은 트랙터 캐빈 진동 및 거동 관련 선행연구에서 주로 수행하는 쟁기 및 로타리 작업을 선정하였다. 트랙터의 작업기는 출력에 따라서 선정되어 사용되고 있으며, 제조사 권장사항을 참고하여 선정하였다. 쟁기는 8련 이랑쟁기(WJSP-8, WOONGJIN Machinery Co., Ltd., Korea), 로타리(WJ260C, WOONGJIN Machinery Co., Ltd., Korea)는 10개의 플랜지를 가지고 있는 경폭 2.6 m 제품을 선정하였다. 이랑쟁기의 중량 및 크기는 각각 495 kg, 2,180 × 2,800 × 1,285 mm (length × width × height)이며, 로타리의 중량 및 크기는 각각 600 kg, 900 × 2,730 × 1,250 mm (length × width × height)이다.

계측시스템 및 시험

농작업 간 캐빈의 거동을 측정하기 위해 계측시스템을 구성하였다. 캐빈의 자세 데이터는 IMU (inertia measurement unit) 및 GPS (global positioning system)가 내장되어 있는 INS (inertia navigation system)를 이용하였다. INS는 SBG社의 Ellipse-D 모델을 선정하였으며 세부 제원은 Table 1과 같다. 센서는 트랙터 캐빈의 무게중심에 부착하였으며, 측정오차는 roll 및 pitch에 대하여 각각 $\pm 0.1^\circ$ 이다. 계측 장비의 output rate는 200 - 1,000 Hz이며, 센서의 성능 및 ISO 2631-1 기반 인체가 민감하게 반응하는 진동 범위인 1 - 8 Hz를 고려하여 계측 장비의 데이터 측정 속도를 설정하였다. Nyquist 샘플링 이론을 고려하여 인체가 민감하게 반응하는 진동 범위보다 10배 이상인 10 - 80 Hz 진동 범위를 측정하기 위해 계측 장비의 데이터 측정 속도를 200 Hz로 선정하였으며, 0.05 s 단위로 데이터 분석을 수행하였다.

Table 1. Specification of Ellipse-D used in this study.

Item	Specification
Model	Ellipse-D
Roll, Pitch	$0.1^\circ / 0.05^\circ$ (RTK)
Heading	$< 0.2^\circ$ dual GPS (> 1 m baseline)
Velocity	$0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Position	Single point L1/L2: 1.2 m SBAS: 0.6 m DGPS: 0.4 m RTK: 2 cm + 2 ppm (option) PPK: 1 cm (option)

RTK, real time kinematic; GPS, global positioning system; SBAS, satellite based augmentation system; DGPS, differential global positioning system; PPK, post processing kinematic.

농작업간 캐빈 데이터를 수집하기 위하여 계측시험은 충남 당진($36^\circ 55' 49.8''\text{N}$, $126^\circ 37' 57.3''\text{E}$)에 위치한 필드에서 수행하였다. 시험 포장의 토성은 미농무성(USDA)법을 이용하여 측정하였으며, 그 성분은 미사 50% 이상과 점토 12 - 27%를 함유한 미사질양토(silt loam)이다. 농작업은 트랙터 작업 중 가장 많은 비중을 차지하는 쟁기 및 로타리를 이용하여 수행하였다. 쟁기 및 로타리 작업 속도는 국내 논 밭에서 주로 수행하는 2개의 작업속도로 선정하였으며, 이랑쟁기는 B4 ($4.30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 및 B5 ($5.60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)단수, 로타리는 A3 ($3.30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 및 A4 ($4.20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)에서 수행하였다. 일반적으로 로타리 작업은 2 - 3 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 의 작업속도에서 작업을 진행하지만 본 연구는 주로 해외 대형 트랙터에 장착 되어있는 능동(active) 또는 반능동 서스펜션 시스템 개발을 위한 기초연구이며, 대형 트랙터가 일반 트랙터 대비 상대적으로 속도가 빠르다는 점을 고려하여, 작업속도를 일반적인 작업속도에 비해 상대적으로 빠른 4 - 6 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 범위로 선정하여 수행하였다.

농작업의 작업 패턴은 Fig. 1과 같이 국내에서 일반적으로 널리 사용되고 있는 C-type을 선정하여, 전진-선회-전

진의 순서로 작업을 수행하였다. 전진-선회를 2 - 3번 반복 작업을 수행하였으며, 전진 구간의 거리는 100 m로 설정하여 작업을 수행하였다. 이때 경심은 20 cm를 유지하도록 하였다.

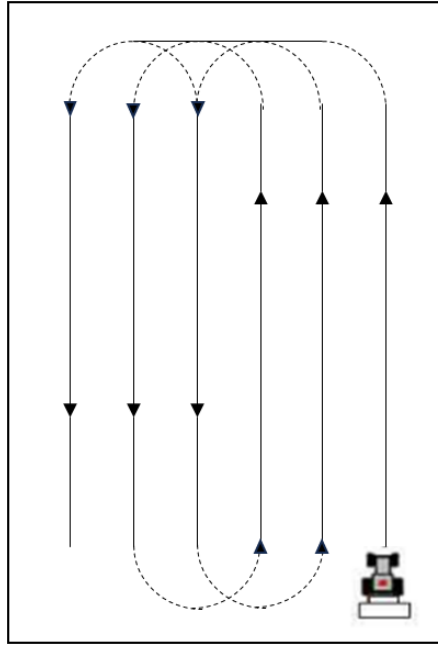


Fig. 1. C-type working pattern of plow tillage and rotary tillage used in this study.

트랙터 캐빈 거동 데이터 분석

트랙터 캐빈 거동은 농작업 시 측정된 데이터의 표준편차를 이용하여 분석하였다. 표준편차 분석은 선회 작업 시에는 트랙터가 회전하고 있으므로, 정확한 캐빈 거동 분석을 위해 직진 작업 시에만 수행하였다. 또한, 농작업 시 측정된 캐빈의 거동 데이터를 박스 그래프(box plot)를 통해 산포도 분석을 수행하였다. 표준편차는 농작업간 트랙터 캐빈 자세의 변화 정도를 판단할 수 있으며, 분산 및 박스 그래프는 캐빈의 자세 변화 데이터의 분포의 중심 및 퍼짐 정도를 분석할 수 있다.

Results and Discussion

쟁기 작업 및 로타리 작업에 따른 캐빈 거동

쟁기 작업 시 pitch 및 roll 방향으로의 거동변화는 각각 Fig. 2와 Fig. 3과 같으며, 작업단수에 따라 구분하였다. 쟁기 작업 수행 시 작업속도 증가에 따라 pitch 및 roll 방향으로의 거동 변화가 더 크게 발생하는 것으로 나타났다.

쟁기 작업에 따른 캐빈의 거동 데이터는 Table 2와 같이 나타났다. B4 ($4.30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 작업 단수에서 쟁기 작업 수행 시 pitch 및 roll 방향으로의 표준편차는 각각 2.24° , 1.28° 로 나타났다. B5 ($5.60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 작업 단수에서 pitch 및 roll 방향으로의 표준편차는 각각 2.26° , 1.30° 로 나타났다. 쟁기 작업 시 작업 속도 증가에 따라 pitch 및 roll 방향으로의 표준편차는 각각 B4 작업속도 대비 0.01%, 0.02% 증가하는 것으로 나타났으며, 작업 속도가 증가함에 따라 거동이 더 크게 발생한다고 판단했다.

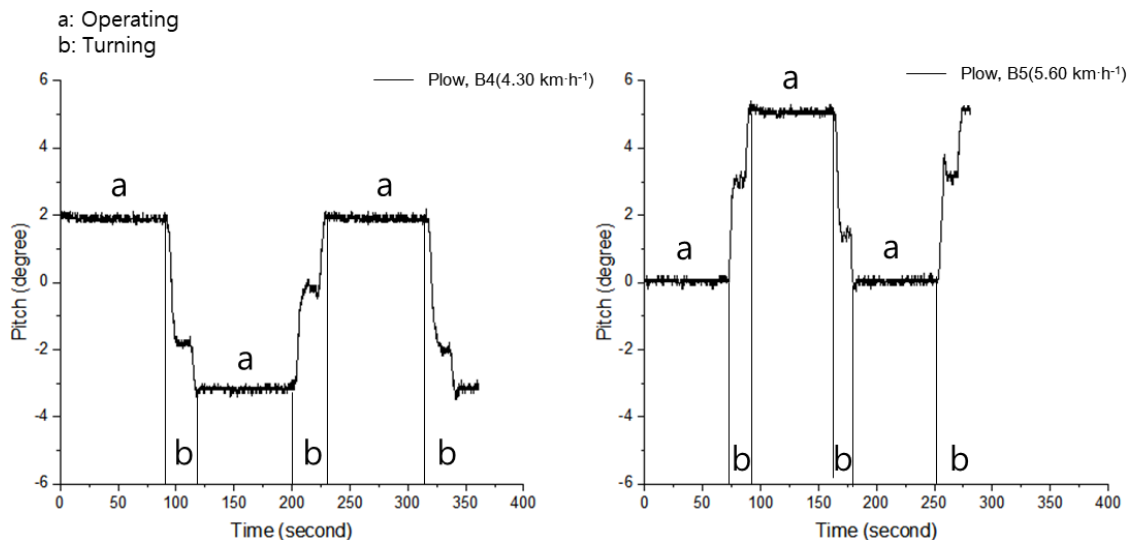


Fig. 2. Pitch data of the tractor cabin measured during plow tillage.

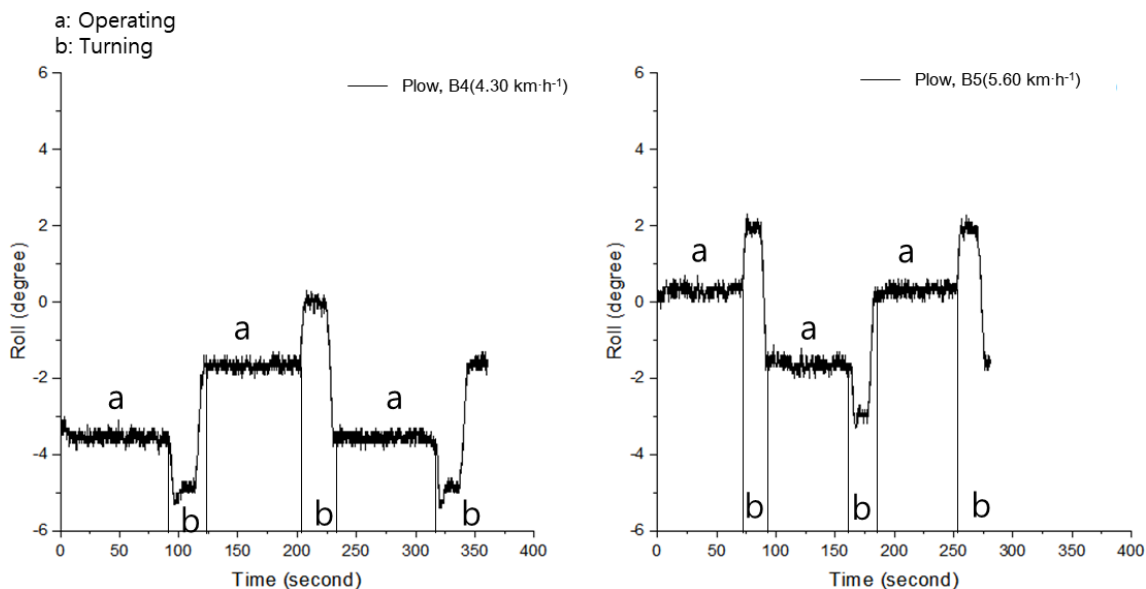


Fig. 3. Roll data of the tractor cabin measured during plow tillage.

Table 2. Characteristics data of a tractor cabin during plow tillage.

Gear stage	B4 (4.3 km·h ⁻¹)		B5 (5.6 km·h ⁻¹)	
Section	Operation		Operation	
Degree	Pitch	Roll	Pitch	Roll
Standard deviation	2.24°	1.28°	2.26°	1.30°

로타리 작업 시 pitch 및 roll 방향으로의 거동변화는 각각 Fig. 4와 Fig. 5와 같으며, 작업단수에 따라 구분하였다. 로타리 작업 수행 시 작업 속도 증가에 따라 pitch 및 roll 방향으로의 거동 변화가 더 크게 발생했다.

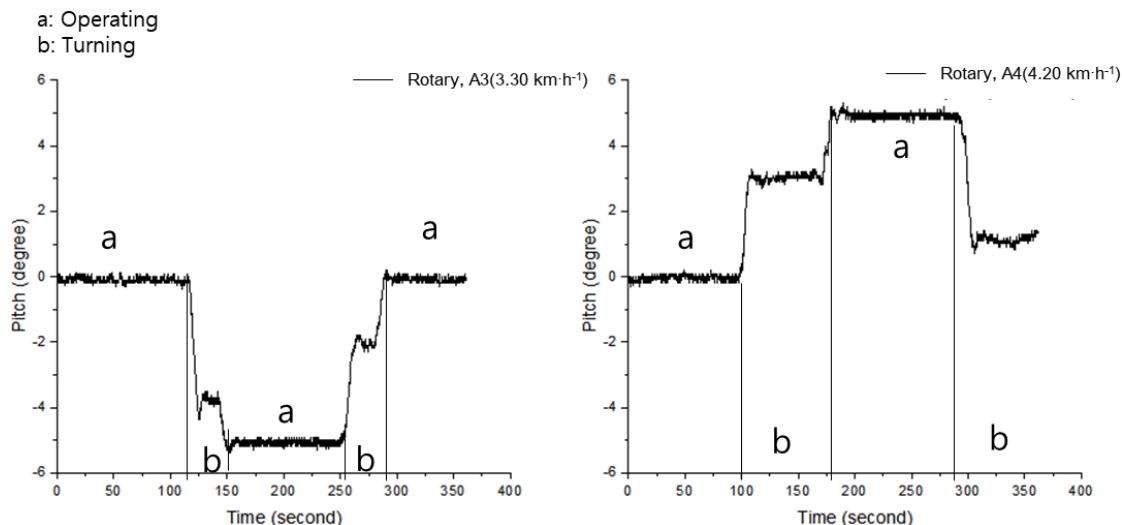


Fig. 4. Pitch data of the tractor cabin measured during rotary tillage.

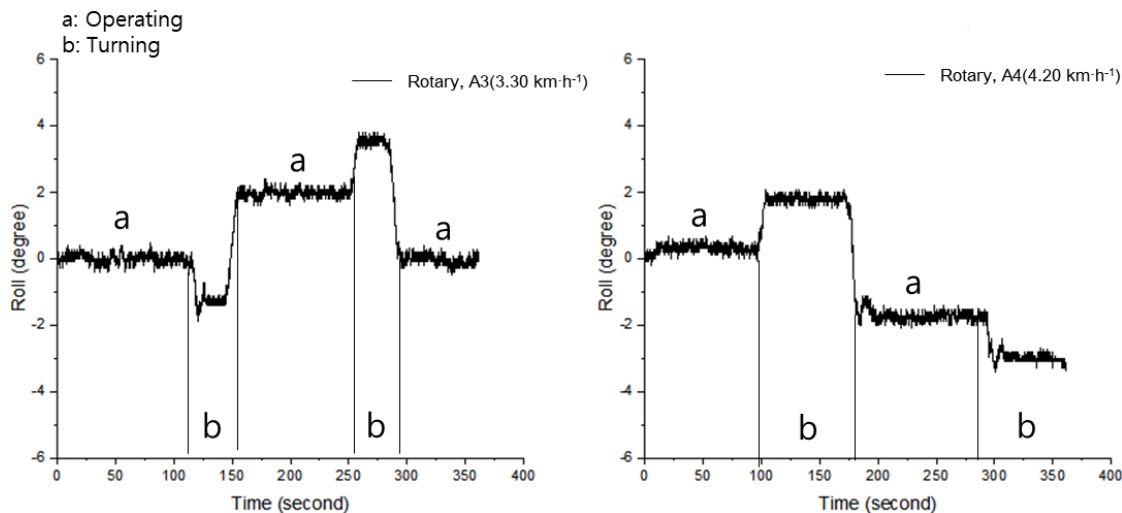


Fig. 5. Roll data of the tractor cabin measured during rotary tillage.

로타리 작업에 따른 캐빈의 거동 데이터는 Table 3과 같이 나타났다. A3 (3.30 km·h⁻¹) 작업 단수에서 로타리 작업 수행 시 pitch 및 roll 방향으로의 표준편차는 각각 2.14°, 1.39°로 나타났다. A4 (4.20 km·h⁻¹) 작업 단수에서 로타리 작업 수행 시 pitch 및 roll 방향으로의 표준편차는 각각 2.28°, 1.40°로 나타났다. 로타리 작업 시 작업 속도 증가에 따라 pitch 및 roll 방향으로의 표준편차는 각각 A3 작업속도 대비 0.11%, 0.01% 증가하는 것으로 나타났으며, 작업속도가 증가함에 따라 거동이 더 크게 발생했다.

Table 3. Characteristics data of a tractor cabin during rotary tillage.

Gear stage	A3 (3.3 km·h ⁻¹)		A4 (4.2 km·h ⁻¹)	
	Operation		Operation	
Degree	Pitch	Roll	Pitch	Roll
Standard deviation	2.14°	1.39°	2.28°	1.40°

쟁기 작업 및 로타리 작업의 거동변화 비교분석을 통해 roll 방향으로의 거동 변화보다 pitch 방향으로 거동 변화가 더 크게 나타나는 것을 확인하였다.

박스 그래프

작업단수에 따른 쟁기 및 로타리 작업 시 pitch 방향으로의 거동변화 데이터는 Fig. 6과 같이 나타났다. 쟁기 작업의 경우 pitch 방향으로 거동변화의 분포는 B4 (4.3 km·h⁻¹) 작업단수에서는 Q1 (first quartile), B5 (5.6 km·h⁻¹) 작업단수에서는 Q3 (third quartile)의 빈도가 높은 것으로 나타났다. 로타리 작업의 경우 pitch 방향으로의 거동변화의 분포는 A3 (3.3 km·h⁻¹) 및 A4 (4.2 km·h⁻¹) 작업단수 모두 Q1의 빈도가 높은 것으로 나타났다.

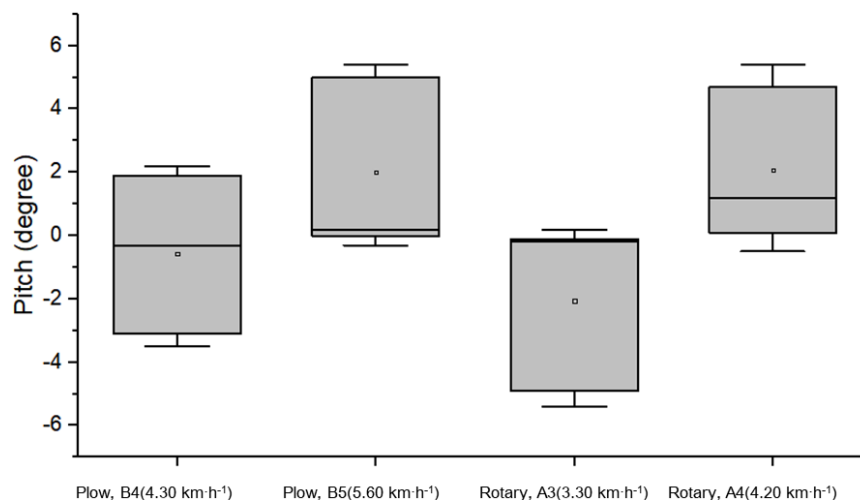


Fig. 6. Box plot of pitch data of the tractor cabin measured during agricultural operation.

쟁기 및 로타리 작업 시 작업단수에 따른 pitch 방향으로의 사분위수는 Table 4와 같이 나타났다. 작업 속도 증가에 따른 거동변화의 분포는 Q1과 Q3의 차이를 나타내는 IQR (Q3 - Q1) 거동변화 분포 데이터를 분석하였다. 쟁기 작업 시 pitch 방향으로 거동변화의 분포는 B4 (4.3 km·h⁻¹), B5 (5.6 km·h⁻¹) 각각 4.9°, 5°로 나타났으며, 로타리 작업 시 pitch 방향으로의 거동변화의 분포는 A3 (3.3 km·h⁻¹), A4 (4.2 km·h⁻¹) 모두 4.9°로 나타났다. 작업속도 증가에 따른 쟁기 및 로타리 작업 모두 거동변화의 분포는 유사하게 나타났다.

Table 4. Quartile of pitch data during plow tillage and rotary tillage.

Agriculture operation (gear stage)	Plow B4 (4.3 km·h ⁻¹)	Plow B5 (5.6 km·h ⁻¹)	Rotary A3 (3.3 km·h ⁻¹)	Rotary A4 (4.2 km·h ⁻¹)
Degree	Pitch	Pitch	Pitch	Pitch
First quartile (Q1: 25% quartile)	-3°	0°	-5°	0°
Median	1.8°	0.2°	-1°	3°
Third quartile (Q3: 75% quartile)	1.9°	5°	-0.1°	4.9°
IQR (Q3 - Q1)	4.9°	5°	4.9°	4.9°

작업단수에 따른 쟁기 및 로타리 작업 시 roll 방향으로의 거동변화 데이터는 Fig. 7과 같이 나타났다. 쟁기 작업의 경우 roll 방향으로 거동변화의 분포는 B4 (4.3 km·h⁻¹) 작업단수에서는 Q3, B5 (5.6 km·h⁻¹) 작업단수에서는 Q1의 빈도가 높은 것으로 나타났다. 로타리 작업의 경우 roll 방향으로의 거동변화의 분포는 A3 (3.3 km·h⁻¹) 작업단수에서는 Q3, A4 (4.2 km·h⁻¹) 작업단수에서는 Q1의 빈도가 높은 것으로 나타났다.

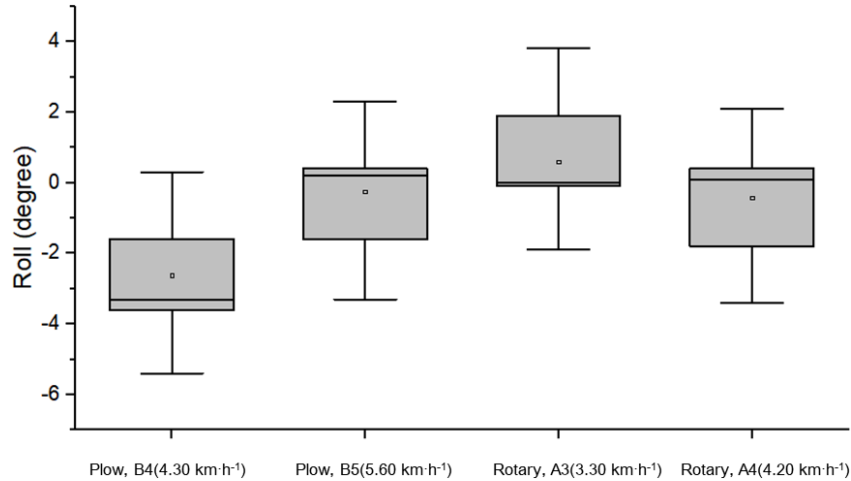


Fig. 7. Box plot of roll data of the tractor cabin measured during agricultural operation.

쟁기 및 로타리 작업 시 작업단수에 따른 roll 방향으로의 사분위수는 Table 5와 같이 나타났다. 작업 속도 증가에 따른 거동변화의 분포는 IQR (Q3 - Q1) 거동변화 분포 데이터를 분석하였다. 쟁기 작업 시 roll 방향으로 거동변화의 분포는 B4 (4.3 km·h⁻¹), B5 (5.6 km·h⁻¹) 각각 1.9°, 2°로 나타났으며, 로타리 작업 시 roll 방향으로의 거동변화의 분포는 A3 (3.3 km·h⁻¹), A4 (4.2 km·h⁻¹) 각각 2.1°, 2.3°로 나타났다. 작업속도 증가에 따른 쟁기 작업은 유사한 거동변화 분포를 보였으며, 로타리 작업은 작업속도가 증가함에 따라 거동변화 분포가 증가하였다.

Table 5. Quartile of roll data during plow tillage and rotary tillage.

Agriculture operation (gear stage)	Plow B4 (4.3 km·h ⁻¹)	Plow B5 (5.6 km·h ⁻¹)	Rotary A3 (3.3 km·h ⁻¹)	Rotary A4 (4.2 km·h ⁻¹)
Degree	Roll	Roll	Roll	Roll
First quartile (25% quartile_Q1)	-3.6°	-1.6°	-0.1°	-1.8°
Median	-3.5°	0.2°	0.2°	0.1°
Third quartile (75% quartile_Q3)	-1.7°	0.4°	2°	0.5°
IQR (Q3 - Q1)	1.9°	2°	2.1°	2.3°

쟁기 및 로타리 작업 시 작업단수에 따른 작업속도 증가 시 IQR (Q3 - Q1)을 통한 거동변화 분포는 roll 방향으로의 거동변화 분포보다 pitch 방향으로의 거동변화 분포가 더 크게 나타났으며, 두 농작업 모두 2 - 5° 범위 내에서 거동변화가 나타나는 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 roll 방향 및 pitch 방향으로의 거동변화 비교분석을 통해 pitch 방향으로의 거동변화가 더 많이 발

생하는 것을 확인하였으며, 작업자가 안정적인 농작업을 수행하기 위해서는 roll 방향보다 더 많이 발생하는 pitch 방향으로의 거동변화의 제어가 필요하다고 판단된다.

Conclusion

본 연구는 캐빈의 자세 제어 시스템 개발을 위한 기초 연구로서 95 kW급 대형트랙터의 농작업 시 캐빈 거동 분석 데이터 베이스를 구축하고 작업단수에 따른 거동분석을 수행하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1. 표준편차를 활용하여 농작업간 트랙터 캐빈 거동변화 정도를 판단하였다. B4 (4.30 km·h⁻¹) 작업 단수에서 쟁기 작업 수행 시 pitch 및 roll 방향으로의 표준편차는 각각 2.24°, 1.28°로 나타났다. B5 (5.60 km·h⁻¹) 작업 단수에서 pitch 및 roll 방향으로의 표준편차는 각각 2.26°, 1.30°로 나타났다. A3 (3.30 km·h⁻¹) 작업 단수에서 로타리 작업 수행 시 pitch 및 roll 방향으로의 표준편차는 각각 2.14°, 1.39°로 나타났다. A4 (4.20 km·h⁻¹) 작업 단수에서 로타리 작업 수행 시 pitch 및 roll 방향으로의 표준편차는 각각 2.28°, 1.40°로 나타났다.
2. 표준편차를 활용해 분석한 결과 쟁기 및 로타리 작업 모두 작업 속도 증가에 따라 pitch 방향으로 거동변화는 각각 0.01%, 0.11% 증가하는 것으로 나타났으며, roll 방향으로 거동변화는 0.02%, 0.01% 거동 변화가 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. Roll 방향으로 거동 변화보다 pitch 방향으로의 거동 변화가 0.58% 더 크게 발생하는 것으로 나타났다.
3. 트랙터 캐빈의 거동 변화 분포는 box plot 및 사분위수로 분석하였다. 작업단수에 따른 작업속도 증가 시 쟁기 및 로타리 작업의 거동분포는 Q1 (first quartile)과 Q3 (third quartile)의 차이를 나타내는 IQR (Q3 - Q1)를 분석한 결과 거동변화 분포는 roll 방향으로의 거동변화 분포보다 pitch 방향으로의 거동변화 분포가 더 크게 나타났다.
4. 결과적으로 작업단수에 따른 작업속도가 증가함에 따라 roll 방향으로의 거동변화보다 pitch 방향으로의 거동변화가 더 크게 증가하였으며, 두 농작업 모두 2 - 5° 범위 내에서 거동변화가 나타나는 것으로 판단된다. 이를 통해 작업자가 안정적인 농작업을 수행하기 위해서는 roll 방향보다 더 많이 발생하는 pitch 방향으로의 거동변화 제어가 필요하다고 판단된다. 향후 연구에서는 트랙터 부하조건 및 토양조건을 고려한 트랙터 캐빈 거동 데이터 기반으로 4축의 유압 실린더로 구성된 트랙터 캐빈 시뮬레이션 모델 및 캐빈 거동에 따른 자세변화를 4축의 유압 실린더로 자세제어 모델을 개발하여 트랙터 캐빈 자세제어 시스템 개발에 대한 연구 및 기존 트랙터에 장착된 수동(passive) 서스펜션과 주로 대형 트랙터에 장착된 능동 또는 반능동 서스펜션이 개발된다면 비교 분석 연구를 진행할 예정이다.

Conflict of Interests

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

Acknowledgements

This work was supported by the Industrial Strategic Technology Development Program (20023098, Development of power train system for 55kW class electric tractor) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

Authors Information

Jong Dae Park, <https://orcid.org/0009-0009-0494-8791>
 Min Jong Park, <https://orcid.org/0000-0003-2840-339X>
 Seung Min Baek, <https://orcid.org/0000-0002-4627-191X>
 Seung Yun Baek, <https://orcid.org/0000-0001-7330-6949>
 Hyeon Ho Jeon, <https://orcid.org/0000-0003-0998-3819>
 Yong Joo Kim, <https://orcid.org/0000-0002-1212-9018>

References

- Achen A, Toscano J, Marjoram R, StClair K, McMahon B, Goelz A, Shutto S. 2008. Semi-active vehicle cab suspension using magnetorheological (MR) technology. In: *Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power*. pp. 561-564. Toyama, Japan: JFPS.
- Bae BM, Jung DW, Ryu DH, An JH, Choi SO, Kim YS, Kim YJ. 2023. Prediction of draft force of moldboard plow according to travel speed in cohesive soil using discrete element method. *Journal of Drive and Control* 20:71-79. [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 BJ, Ahn SW, Lee CJ, Yoon YH, Lee SS, Kim HJ. 2016. Improved design of hydraulic circuit of front-end loader for bump shock reduction of an agricultural tractor. *Journal of Drive and Control* 13:10-18. [in Korean]
- Choi KJ, Oh JS, Park SU, Park YJ. 2019. Development of semi-active suspension control logic for tractor cabin. In: *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference*. pp. 83-84. Daejeon, Korea: KSME. [in Korean]
- Chung WJ, Oh JS, Park Y, Kim DC, Park YJ. 2017. Optimization of the suspension design to reduce the ride vibration of 90kW-class tractor cabin. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 16:91-98. [in Korean]
- ISO (International Organization for Standardization). 1997. *Mechanical Vibration and Shock — Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration*. ISO 2631-1:1997. ISO, Geneva, Switzerland.
- Kim WS, Lee SE, Baek SM, Baek SY, Jeon HH, Kim TJ, Lim RG, Choi JY, Kim YJ. 2023. Evaluation of exhaust emissions factor of agricultural tractors using portable emission measurement system (PEMS). *Journal of Drive and Control* 20:15-24. [in Korean]
- Lee HN, Kim YJ. 2023. Development of a multi-purpose driving platform for Radish and Chinese cabbage harvester. *Journal of Drive and Control* 20:35-41. [in Korean]
- Lee SE, Kim TJ, Kim YJ, Lim RG, Kim WS. 2023. Analysis of engine load factor for agricultural cultivator during plow and rotary tillage operation. *Journal of Drive and Control* 20:31-39. [in Korean]
- Lim JY, Kim BR, Hwang JH. 2021. A study on the tractor cabin structure to reduce noise and vibration. In: *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference*. pp. 1461-1463. Gwangju, Korea: KSME. [in Korean]
- Oh JS, Han HW, Kim JT, Park YJ. 2019. Evaluation of ride vibration of tractor according to cabin suspension system. In: *Proceedings of the KSAM & ARCS 2018 Autumn Conference*. pp. 493-494. Chuncheon, Korea: KSAM. [in Korean]
- Oh JS. 2022. Development of control algorithm of semi-active cabin suspension system for agricultural tractor. Ph.D. dissertation, Seoul National Univ., Seoul, Korea. [in Korean]
- Park HW, Moon NS, Jeong BS, Park JS, Kim BJ. 2011. An experimental study for the vibration reduction of agricultural tractor. In: *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Autumn Conference*. pp. 749-753. Daegu, Korea: KSNVE. [in Korean]
- Seo JH, Lee BY, Lee SH. 2019. Shape optimal design of anti-vibration rubber assembly in tractor cabin using Taguchi method. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* 18:34-40. [in Korean]

- Son MA, Kang YS, Kim YJ. 2023. Technology trend on hydrogen fuel cell tractor. *Journal of Drive and Control* 20:57-61. [in Korean]
- Yu JK, Shin DH, Oh KS, Yoon JW, Yi KS. 2013. Tractor resonance analysis and validation. In: *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference*. pp. 1972-1976. Jeongseon, Korea: KSME. [in Korean]