

RESEARCH ARTICLE

# 크롤러 타입 자주식 땅속 작물 수확기의 횡전도 평가를 위한 시뮬레이션 모델 개발

박종대<sup>1</sup>, 백승윤<sup>2</sup>, 백승민<sup>2</sup>, 전현호<sup>1</sup>, Md. Abu Ayub Siddique<sup>3</sup>, 박민중<sup>1</sup>, 양철우<sup>3</sup>, 박민재<sup>3</sup>, 김용주<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 스마트농업시스템학과

<sup>2</sup>충남대학교 친환경 수소 전기 농기계 연구소

<sup>3</sup>충남대학교 바이오시스템기계공학과

## Development of a Simulation Model for the Overturning Angle Evaluation of Crawler-type Self-propelled Underground Crop Harvester

Jong Dae Park<sup>1</sup>, Seung Yun Baek<sup>2</sup>, Seung Min Baek<sup>2</sup>, Hyeon Ho Jeon<sup>1</sup>, Md. Abu Ayub Siddique<sup>3</sup>, Min Jong Park<sup>1</sup>, Cheol Woo Yang<sup>3</sup>, Min Jae Park<sup>3</sup>, Yong Joo Kim<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Smart Agricultural Systems, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

<sup>2</sup>Eco-friendly Hydrogen Electric Tractor & Agricultural Machinery Institute, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

\*Corresponding author: [babina@cnu.ac.kr](mailto:babina@cnu.ac.kr)

### Abstract

In this study, a simulation model of the self-propelled underground crop harvester was developed using Recurdyn to analyze and prevent its overturning. For the analysis of the overturning angle for the self-propelled underground crop harvester, the test jig was selected in the same steel condition. The dynamic friction coefficient of the crawler of driving part contact with the test jig was selected as the dynamic friction coefficient of 3 condition(steel, unpaved road, and asphalt) to perform the simulation. The overturning angle and contact force of the self-propelled underground crop harvester using dynamics simulation were analyzed. It was found that the overturning angle at each condition did not conduct under 30° in the no-load state, which is the test standard for agricultural machinery conduction test of the Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, and it was judged that the test standard was suitable for the test. The overturning angle of the self-propelled underground crop harvester was 32.32° when the dynamic friction coefficient of steel was selected as 0.25. The overturning angle of the self-propelled underground crop harvester was 37.54° when the dynamic friction coefficient of unpaved road was selected as 0.5. Also, the overturning angle of the self-propelled underground crop harvester was 44.69° when the dynamic friction coefficient of asphalt was selected as 0.8. By changing the dynamic friction coefficient, the results of the overturning angle analysis showed that the overturning angle increased as



### OPEN ACCESS

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.20240004>

Received: December 17, 2024

Revised: December 23, 2024

Accepted: December 24, 2024

Copyright: © 2024 Journal of Agricultural Machinery Engineering



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.

the friction coefficient increased. Accordingly, it is judged that the overturning angle of 37.54°- 44.69° should be considered when working in upland where self-propelled underground crop harvesters are mainly used.

**Keywords:** Self-propelled harvester, Underground crop, Dynamic Simulation, Overturning Angle.

## Introduction

국내 밭 면적은 전체 농지 면적의 49%지만, 수도작 기계화율에 비해 밭농업 기계화율은 매우 저조한 수준이다.<sup>1)</sup> 또한, 밭 작업 환경은 수도작 작업 환경에 비해 경사도가 높다. 이러한 밭 작업 환경으로 인해 차륜형 플랫폼 보다는 지면과의 접지 면적을 넓히기 위해 궤도형 플랫폼 사용 및 관련 연구가 증가하는 추세이다.<sup>2)</sup>

Lee et al (2016)은 전기구동 궤도 플랫폼 개발을 제안하였으며, 시뮬레이션을 활용하여 주행 성능 및 설계 적합성을 분석하였다. Kim et al (2023)은 하나의 플랫폼을 활용하여 여러 가지 밭 작업기 장착이 가능한 무한궤도 기반의 주행 플랫폼을 개발하여, 주행 성능을 분석하였다. Siddique et al (2023)은 크롤러 타입 자주식 땅속 작물 수확기 개발의 기초 연구로써 트랙터 부착형 땅속 작물 수확기의 시뮬레이션 모델을 개발하여 부착형 땅속 작물 수확기의 동력 전달을 분석하였다. 국내 궤도형 플랫폼 개발 관련 연구가 다양하게 수행되는 시점에서 궤도형 플랫폼을 활용한 작업 시 안전사고 방지를 위한 연구가 필요한 실정이다. Kim (2014)은 동역학 시뮬레이션을 활용하여 반궤도식 임내 작업차의 동역학 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 전도각 및 등판능력 분석을 통하여 주행 안정성 분석 연구를 수행하였다. Kim et al (2022)은 동역학 시뮬레이션을 활용한 휠 타입 자주식 무 수확기 전도각 분석 연구를 수행하였다. Son et al (2023)은 시뮬레이션을 활용하여 전기 트랙터 주요 부품 배치에 따른 전도각 분석을 수행하였다. 이와 같이 농업기계의 작업 안정성 분석 연구는 다양하게 수행되고 있지만 경사도가 높은 밭에서 작업이 이루어지는 크롤러 타입의 농업 기계의 작업 안정성 분석 연구는 부족한 실정이다. 또한, 자주식 땅속 작물 수확기가 개발 초기 단계라는 점을 고려했을 때 작업 안정성 분석을 위한 횡전도 분석이 필요하다.

따라서 본 연구는 동역학 시뮬레이션을 활용하여 밭 작업 시 자주식 땅속 작물 수확기의 안정성 분석을 위하여 횡전도 분석을 수행하였다.

## Materials and Methods

### 크롤러 타입 자주식 땅속 작물 수확기

본 연구에서 사용한 자주식 땅속 작물 수확기는(Hyundae Agricultural Machinery Co., Ltd., Iksan, Korea) Fig. 1과 같다. 자주식 땅속 작물 수확기의 세부 제원은 Table 1과 같이 크기 및 무게가 각각 5,230 × 2,350 × 2,430 mm (length × width × height) 3,500 kg이며, 정격출력이 2,600 rpm에서 44 kW인 디젤 엔진(4B243TLWS, Daedong Co., Ltd, Korea)이 탑재 되어있다.



**Fig. 1.** A photo of self-propelled underground crop harvester used in this study

**Table 1.** Specification of a self-propelled underground crop harvester used in this study

Parameter	Value
Dimension [mm <sup>3</sup> ]	5,230 × 2,350 × 2,430
Empty Weight [kg]	3,800
Rated power[kW]	44
Rated speed[rpm]	2,600
Max torque[N·m]	190.2

### 동역학 시뮬레이션 모델 개발

크롤러 타입 자주식 땅속 작물 수확기의 시뮬레이션 모델은 상용 프로그램인 Recurdyn (V9R4, Functionbay, Korea)을 이용하여 개발하였다. 시뮬레이션 모델은 Fig. 2와 같이 실제 제원을 바탕으로 구성하였으며, 궤도형 주행부 (Driving part), 작물을 굴취하는 수집부 (Harvesting part), 굴취한 작물을 이송하는 이송부 (Conveying part)로 구분하여 모델을 개발하였다. 자주식 땅속 작물 수확기의 궤도형 주행부 모형은 동역학 시뮬레이션의 Track LM 모듈을 활용하여 제작하였으며 Fig. 3과 같다. 궤도형 주행부는 스프라켓(Sprocket), 상부롤러(Carrier roller), 하부롤러(Track roller), 장력조절을 위한 아이들러(Idler) 및 트랙(Track) 5가지로 구성하였으며, 제조사로부터 제공받은 제원을 활용하여 개발하였다. 동역학 시뮬레이션을 활용하여 작업 안정성 분석을 수행하기 위해 자주식 땅속 작물 수확기의 무게, 무게 중심, 차량 관성모멘트(Inertial) 값을 시뮬레이션 입력 값으로 선정하였다. 무게 및 무게중심은 제조사에서 제공받아 선정하였으며, Inertial 값은 3D CAD 프로그램을 이용하여 부품의 물성치 및 형상을 고려하여 선정하였다. 자주식 땅속 작물 수확기의 무게, 무게중심 및 Inertial 값을 Table 2와 같이 선정하였다.

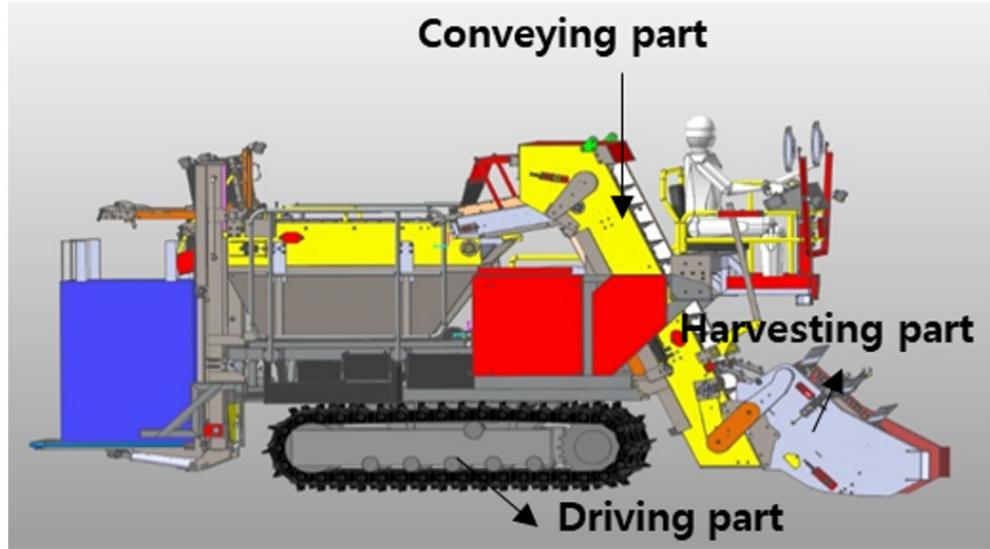


Fig. 2. Configuration of simulation model for self-propelled underground crop harvester

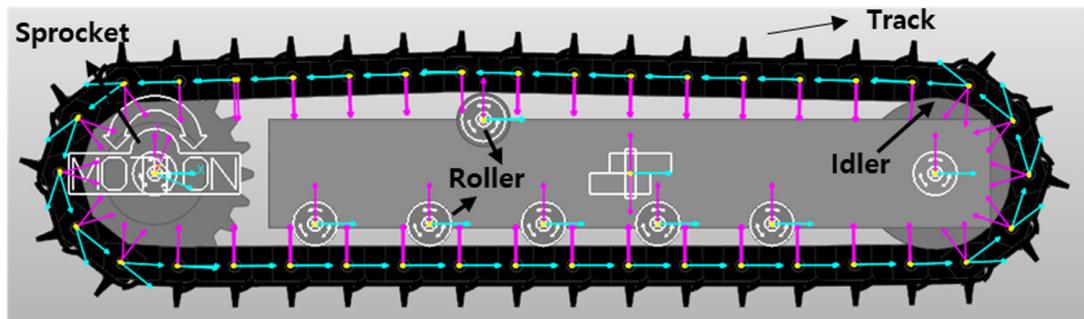


Fig. 3. Configuration of simulation model for self-propelled underground crop harvester driving part

Table 2. Information of weight, center of gravity and moment of inertia about self-propelled underground crop harvester

Parameter		Value
Weight [kg]		3,800
Center of gravity		3030, 1100, 7
Moment of inertia	$I_{xx}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	655
	$I_{yy}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	1,489
	$I_{zz}$ [kg·m <sup>2</sup> ]	1,732

### 회전도 분석

자주식 땅속 작물 수확기의 작업 안정성 분석을 수행하기 위해 회전도 분석을 수행하였다. 회전도는 중량 배분, 중심의 위치 관계, 타이어 강성 등에 영향을 받으며 특히 중심의 중량 배분 및 위치 관계가 중요하며 1차 회전도 및 2차 회전도로 나누어진다. 1차 회전도란 지면 경사각을 서서히 높일 때 농업기계 중량의 합력의 작용선이 앞차축 피봇점과 계곡쪽 후륜 접지점을 연결하는 선을 지나는 순간 산쪽 후륜이 지면에서 떠서 회전하기 시작한 때이며, 2차 회전도는 1차 회전도가 시

작된 후 산쪽 전륜이 떠서 회전하기 시작할 때를 말한다. 농업기계가 횡전도 되는 모습은 Fig. 4와 같고,  $\theta$ 는 지면 경사각이고,  $\psi_{MAX}$ 는 전차축의 최대 좌우 회전각이고, G는 무게중심을 나타낸다.

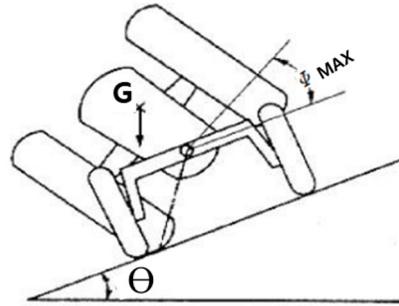


Fig. 4. The definition of state of side overturning

### 동역학 시뮬레이션 모델 검증 방법 선정

자주식 땅속 작물 수확기 횡전도 분석을 수행하기 위해 동역학 시뮬레이션을 활용하여 횡전도각 동해석 모델을 개발하였으며, Fig 5와 같다. 횡전도각 동해석 모델은 자주식 땅속 작물 수확기, Ground 및 Test jig 3가지로 구성하였다. 동역학 시뮬레이션 특성 상 Ground 생성 시 구속 조건에 의해 Ground가 고정되어 있어 회전이 가능한 횡전도판 역할을 해주는 Test jig를 별도로 횡전도각 동해석 모델에 구성하였다. Test jig는 Ground의 특성과는 달리 별도의 구속조건이 없으며, 자주식 땅속 작물 수확기의 궤도형 주행부와 접촉이 가능하다. 또한 Test jig의 Material type 조건을 변경하여 다양한 조건에서의 시뮬레이션 수행이 가능하다. 회전이 불가능한 Ground의 특성을 고려하여 Test jig 정면 좌측 하단에 Revolute joint를 적용하였다. 또한, 횡전도 분석 시 자주식 땅속 작물 수확기의 미끄럼 방지를 위해 궤도형 주행부 옆에 미끄럼 방지판을 구성하였다. Test jig는 Ground를 기준으로 반시계 방향으로 회전하도록 Revolute joint의 입력 값 중 하나인 각속도를 0.017 rad/s로 회전하도록 설정하였다. 시뮬레이션 조건은 기존 동역학 시뮬레이션 프로그램을 이용한 횡전도 시뮬레이션 논문(Son et al., 2023)을 참고하여 선정하였다. 시뮬레이션 조건은 Test jig가 회전하는 0.017 rad/s 일때 초당 1°회전하기 때문에 농림축산식품부 농업기계 전도 시험 검정 기준인 무부하 상태에서 30°이하에서 전도되지 않는 검정 기준을 고려하여 해당 기준의 2배인 60°까지 회전할 수 있도록 해석 시간(End time)은 60초, 해석 단계(Step)는 1,000으로 설정하였다. 횡전도각 동해석 모델을 활용한 횡전도 분석은 농림축산식품부 농업기계 전도 시험 검정 기준인 무부하 상태에서 30°이하에서 전도가 발생하지 않는 기준을 고려하여 시뮬레이션 설정 값을 선정하였으며, 시뮬레이션 분석은 Test jig가 10°, 20°, 30°일때 전도 유무 분석을 수행하였다. 또한, 전도되는 시점은 궤도와 지면의 접촉면에서 발생하는 contact force 값이 0 N이 되었을 때를 기준으로 하였으며, 횡전도 분석은 공차시의 정지 횡전도 분석을 수행하였다.

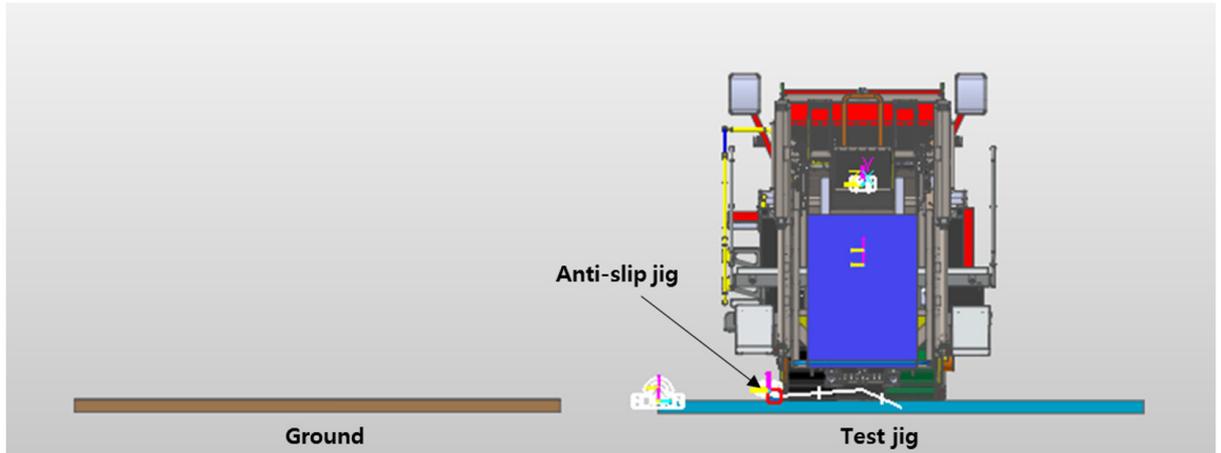


Fig. 5. Dynamic analysis model of overturning angle

### Test jig 조건 및 동적 마찰계수 변경에 따른 횡전도 분석

자주식 땅속 작물 수확기의 횡전도 분석은 Test jig의 조건은 실제 한국 농업기술진흥원에서 진행하는 횡전도 시험 판을 기반으로 Steel로 선정하였다. 또한, 여러가지 조건에서의 횡전도 분석을 수행하기 위해 Test jig와 접지되는 궤도형 주행부의 동적 마찰계수(Dynamic friction coefficient)를 변경하여 시뮬레이션을 수행하였다. 횡전도 시뮬레이션은 Steel, Unpaved road, Asphalt 3가지 조건의 동적 마찰계수를 활용하였으며, 기본 조건을 제외한 2가지 조건은 자주식 땅속 작물 수확기가 활용되는 환경을 고려하여 선정하였다. 각각의 조건의 동적 마찰계수를 활용하여 각각 다른 지형에서 횡전도 분석을 수행한 선행연구를(Kim, 2014) 기반으로 선정하였으며, Table 3 과 같다.

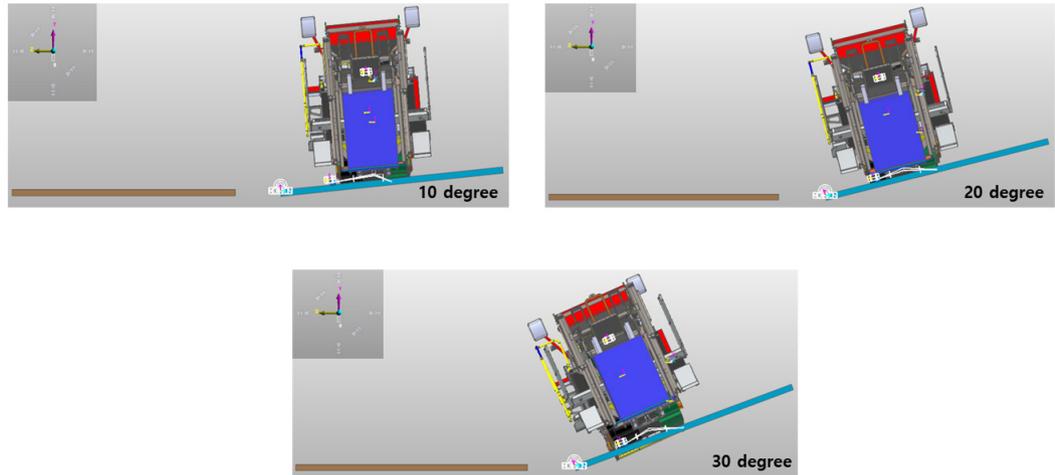
Table 3. Dynamic friction coefficient based on the condition of the test jig

Condition of test jig	Dynamic friction coefficient
Steel	0.25
Unpaved road	0.5
Asphalt	0.8

## Results and Discussion

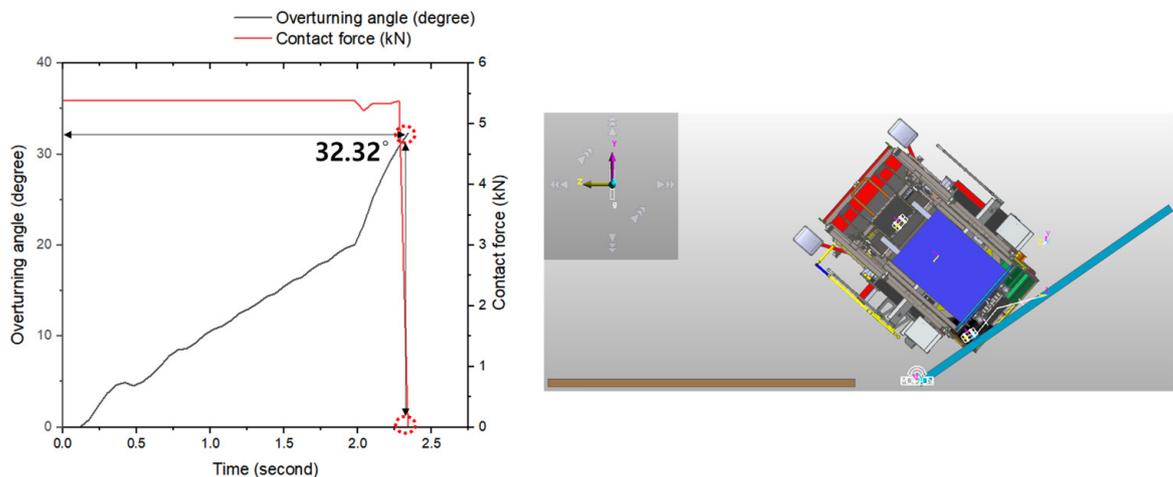
### 자주식 땅속 작물 수확기 횡전도 분석

각각 조건에서 횡전도 분석을 수행하였을 시 농림축산식품부 농업기계 전도 시험 검정 기준인 무부하 상태에서 30°이하에서 전도되지 않는 것으로 나타났으며, Fig. 6과 같다.



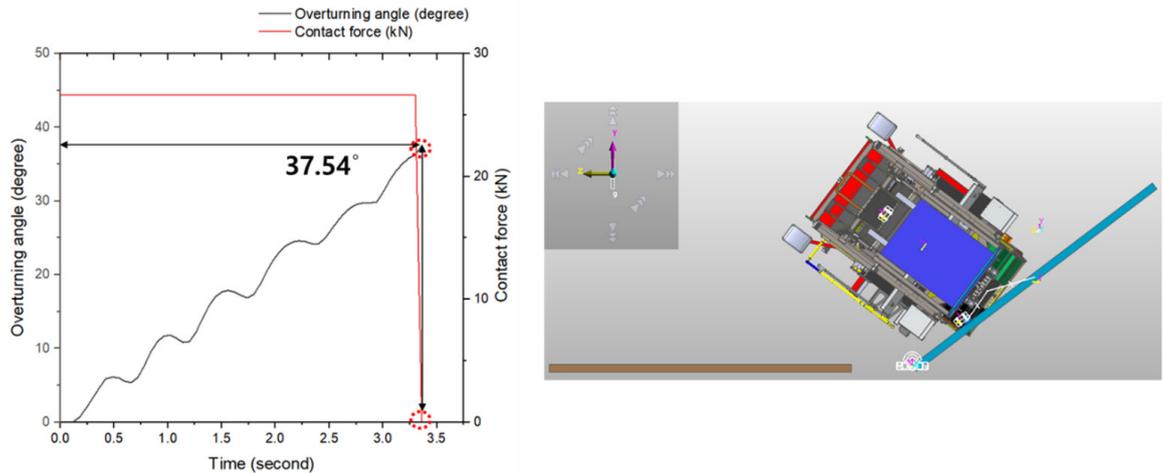
**Fig. 6.** Result of analysis for overturning angle for self-propelled underground crop harvester (10degree, 20degree, 30degree)

자주식 땅속 작물 수확기 횡전도 분석의 전도되는 시점의 각도를 분석하기 위해 궤도형 주행부와 반시계 방향으로 회전하는 Test jig의 접촉면에서 발생하는 contact force 값이 0일 때를 기준으로 분석하였다. 시뮬레이션 수행 시 Test jig의 Material type 조건은 모두 동일하게 Steel로 선정하였으며, Test jig와 접지되는 궤도형 주행부의 동적 마찰 계수를 변경하여 시뮬레이션을 수행하였다. Steel의 동적 마찰 계수 0.25로 선정하였을 때 자주식 땅속 작물 수확기의 궤도 주행부와 Test jig의 contact force는 5.38kN을 유지하다가 2.34초 때 0N으로 나타났으며, 당시 횡전도 각은 32.32°로 나타났다. Test jig와 접지되는 궤도형 주행부의 동적 마찰 계수를 0.25로 선정하였을 시 contact force 및 횡전도 각은 Fig. 7 과 같다.



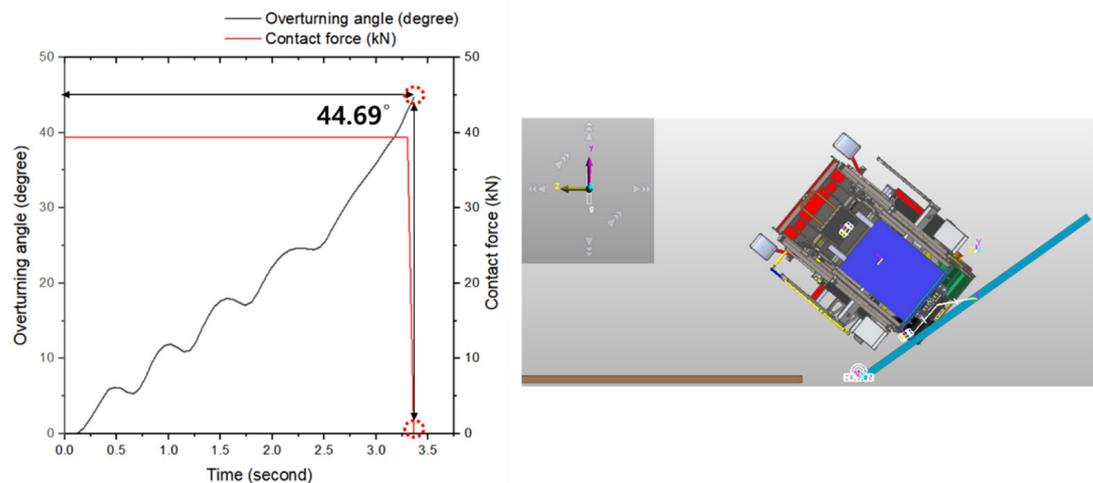
**Fig. 7.** Result of analysis for overturning angle for self-propelled underground crop harvester (Test jig material type: steel)

Unpaved road의 동적 마찰 계수 0.5로 선정하였을 때 자주식 땅속 작물 수확기의 궤도 주행부와 Test jig의 contact force는 26.64kN을 유지하다가 3.36초 때 0N으로 나타났으며, 당시 횡전도 각은 37.54°로 나타났다. Test jig와 접지되는 궤도형 주행부의 동적 마찰 계수를 0.5로 선정하였을 시 contact force 및 횡전도 각은 Fig. 8 과 같다.



**Fig. 8.** Result of analysis for overturning angle for self-propelled underground crop harvester (Test jig material type: Unpaved road)

Asphalt의 동적 마찰 계수 0.8로 선정하였을 때 자주식 땅속 작물 수확기의 궤도 주행부와 Test jig의 contact force는 39.36kN을 유지하다가 3.42초 때 0N으로 나타났으며, 당시 횡전도 각은 44.69°로 나타났다. Test jig와 접지되는 궤도형 주행부의 동적 마찰 계수를 0.8로 선정하였을 시 contact force 및 횡전도 각은 Fig. 9와 같다.



**Fig. 9.** Result of analysis for overturning angle for self-propelled underground crop harvester (Test jig material type: Asphalt)

## Conclusion

본 연구를 통해 자주식 땅속 작물 수확기의 횡전도 분석을 수행하였다. 횡전도 분석을 수행하기 위해 상용 프로그램인 Recurdyn를 활용하여 동역학 시뮬레이션 및 횡전도 분석이 가능한 시뮬레이션 환경을 개발하였다. 자주식 땅속 작물 수확기의 횡전도 분석은 Test jig의 Material type은 동일하게 Steel조건으로 선정하였으며, Test jig와 접지되는 궤도형 주행부의

동적 마찰 계수를 Steel, Unpaved road, Asphalt 3가지 조건으로 변경하여 시뮬레이션을 수행하였다. 동역학 시뮬레이션을 활용한 자주식 땅속 작물 수확기의 횡전도 분석은 횡전도각 및 Contact force 분석하였다. 각각의 조건 모두 농림축산식품부 농업기계 전도 시험 검정 기준인 무부하 상태에서 30°이하에서 전도되지 않는 것으로 나타났으며, 검정 기준에서 부합한 것으로 나타났다.

Steel의 동적 마찰 계수 0.25로 선정하였을 때 자주식 땅속 작물 수확기의 횡전도 각은 32.32°, Unpaved road의 동적 마찰 계수 0.5로 선정하였을 때 자주식 땅속 작물 수확기의 횡전도 각은 37.54°, Asphalt의 동적 마찰 계수 0.8로 선정하였을 때 자주식 땅속 작물 수확기의 44.69°로 나타났다. 동적 마찰 계수를 변경하여 횡전도 분석 결과를 통해 마찰 계수가 증가함에 따라 횡전도 각이 높게 나타나는 것을 확인하였다. 이에 따라 Unpaved road 횡전도 각인 37.54° 및 Asphalt의 횡전도 각인 44.69°를 고려하였을 때 자주식 땅속 작물 수확기가 주로 사용되는 밭 환경에서 작업 시 37.54°- 44.69°의 횡전도 각을 고려하여 작업이 수행되어야 한다고 판단된다.

본 연구와 유사한 동역학 시뮬레이션을 활용한 횡전도 분석을 통해 작업 안정성 분석 연구가 수행되고 있지만, 실제 농업 시 거동 데이터 또는 횡전도 시험 데이터와 비교 분석을 수행하는 연구는 미비한 실정이다. 향후 연구에서는 한국농업기술진흥원에서 진행되는 횡전도 시험을 수행하여 검정기준에 부합한지 판단할 것이며, 실제 작물 수확 시 자이로스코프 및 IMU 센서 등을 활용하여 자주식 땅속 작물 수확기의 거동 데이터를 계측하여 시뮬레이션 결과 값과 비교 분석 연구를 수행할 예정이다.

## Acknowledgements

This result was supported by "Regional Innovation Strategy (RIS)" through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE)(2021RIS-004)

## References

- KAMICO and KSAM, 2023, Agricultural machinery yearbook in Republic of Korea, Korea agricultural machinery industry cooperative and Korean society for agricultural machinery. [in Korean]
- H. H. Jeon, et. al. 2023. Development and Validation of Simulation Model for Traction Power and Driving Torque Prediction of Upland Multipurpose Platform. Journal of Drive and Control, Vol.20, No.1, pp.16-26. [in Korean]
- J. H. Kim. 2014. A Study on Development of Half Crawler Type Mini-Forwarder. Ph.D. dissertation. Kyungpook National University., Daegu, Korea.
- K. H. Lee, et. al. 2022. 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. [in Korean]
- Y. S. Kim, et al. 2022. Simulation of the Rollover Angle of a Self-Propelled Radish Harvester for Different Load Conditions. Journal of Applied Sciences. Vol.1, No.21. [in Korean]
- Y. J. Lee, et al. 2016. Platform Design of Caterpillar Typed Electrical Vehicle”, Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 26, No. 4, pp. 279-285. [in Korean]
- T. J. Kim, et al. 2023. Development and performance analysis of a crawler-based driving platform for upland farming. Journal of Drive and Control, Vol.20 No.4 pp.100-106. [in Korean]

- Siddique, Md Abu Ayub, et al. 2024. Development and verification of an underground crop harvester simulation model for potato harvesting. *Journal of Drive and Control*, Vol.21 No.1 pp.38-45. [in Korean]
- J. H. Son, et al. 2023. Analysis of Rollover Angle According to Arrangement of Main Parts of Electric Tractor Using Dynamic Simulation. *Journal of Korea Society for simulation*, Vol.32, No.4, pp.77-84. [in Korean]