

## RESEARCH ARTICLE

# 자주식 양파수확기의 두둑 추종 방식 조향 제어 연구 및 실험

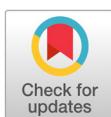
임훈<sup>1\*</sup>, 윤병운<sup>2</sup>, 방병주<sup>2</sup>, 윤준섭<sup>2</sup><sup>1</sup>한국건설기계연구원 지능제어연구실<sup>2</sup>신흥공업사 기업부설연구소

## A study and experiment on steering control of a self-propelled onion harvesters for ridge tracking

Hoon Lim<sup>1\*</sup>, Byong-Un Yun<sup>2</sup>, Byoung-Ju Bang<sup>2</sup>, Jun-Seop Yun<sup>2</sup><sup>1</sup>Intelligent Control Lab, Korea Construction Equipment Technology Institute, Gunsan, Republic of Korea<sup>2</sup>Research and Development Institute, Shinheung Industry Company, Hwaseong, Republic of Korea*\*Corresponding author: hoon.lim@koceti.re.kr*

### Abstract

This paper attempts to introduce the development contents of a steering control system using the displacement difference ridge tracking method of a self-propelled onion harvester, a representative bulbous equipment. Currently, the self-propelled onion harvester is operated manually, and it is easy to automate because it performs repetitive and regular movements and operations in a regularized ridge area. Therefore, we studied a method that can control the steering so that it does not deviate from the path or invade the side ridge while following the center of the ridge being worked. The purpose of this study is to increase the work efficiency and convenience of the self-propelled onion harvester used in field farming.



### OPEN ACCESS

Journal of Agricultural Machinery Engineering  
5(4):139-152

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.2025.5.4.4>

Received: November 19, 2025

Revised: December 15, 2025

Accepted: December 17, 2025

Copyright: © 2025 Korean Society for  
Agricultural Machinery

 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.

**Keywords:** Self-Propelled Onion Harvester, Ridge Tracking, Steering Control Experiment

### Introduction

“융합(Convergence)”이라는 키워드로 대표되는 4차 산업혁명(The Fourth Industrial Revolution)이란 화두가 등장한 이후, 농업 분야에서도 각종 기술들이 기존의 농사 방식들과 다양하게 결합되며, 생산성과 수익성 그리고 편의성과 안전성 등을 향상시키며 새로운 변화의 바람들을 일으키고 있다. 그 중 대표적인 기술 발전으로는 농기계 자동화를 기반으로 한 지능화와 무인화 등을 꼽을 수 있다. 이러한 연구 개발들은 농업 선진국을 필두로 활발하게 진행되고 있으며, 이에 대한 시장과 소비자의 니즈(Needs)와 만족도도 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 이러한 변화의 트렌드를 기반으로 국

내 농촌의 급속한 노령화와 여성 인구 비율의 증가로 인해 발생되는 여러 문제점들을 해결하기 위하여 정부 차원에서 밭 농사용 농기계 및 장비들을 대상으로 자동화 및 지능화하기 위한 다양한 정책과 지원들이 추진되고 있는 상황이다.

그 중에서도 트랙터와 결합 없이 독립적으로 구동 가능한 자주식 타입의 양파수확기 장비에 대한 자동화 연구의 필요성이 점차 커지고 있는 상황이다.

왜냐하면 국내 주요 작물 중 하나인 양파를 수확하는데 큰 도움이 되는 자주식 양파수확기는 차체에 엔진이 탑재되어 스스로 구동할 수 있는 장점이 있지만 두둑 주행과 수확 작업에 관한 모든 조작들을 운전자가 직접 수동으로 조작해야 되는 기능적 한계가 존재하고 있다.

이로 인해 장비 구동에 대한 편의성이 떨어지고, 본 장비를 실제 조작하며 운전해야 되는 고령 운전자 또는 여성 운전자에게는 큰 부담이 될 수 있다.

그러므로 두둑 주행 시 가장 기본이 되는 조향 제어부터 자동화가 이뤄진다면 본 장비를 조작하는 운전자의 편의성이 크게 향상될 수 있을 것이다.

이와 관련하여 현재까지 국내외에서 기존 선행 연구된 농기계 조향 제어 및 경로 추종 방안들은 주로 카메라 비전, GPS, Lidar 등을 주로 사용하여 비교적 고가(高價)의 복잡하고 소프트웨어적으로 무거운 시스템들로 구성되어 있다(Kim et al., 2018, Son et al., 2018, Paul et al., 2016, Chung et al., 1999).

하지만 이러한 기존의 시스템들은 연구 단계에서는 일정 부분 성과들을 내고 있지만 밭이라는 실외 환경의 특수성에서 발생될 수 있는 다양한 제어 변수들과 내구성 및 비용적 측면 그리고 A/S 부분의 문제점들로 인해 아직까지는 실제 현장에 적용하여 상용화하기에는 어려움과 제약이 있는 것도 사실이다.

이러한 기술적 단점을 해결하기 위해 앞서 선행 연구한 “양파 수확기의 주행 경로 궤적 이탈 방지를 위한 조향 최적화 연구”에서 사용된 수확기 모델인 SHI-1300 모델을 대상으로 도출한 기구학 수식, 조향 각도, 센서 기구부 설계안 등을 적용하여 이번 후속 연구를 진행하였다(Lim et al., 2024).

본 논문에서는 자주식 양파수확기라는 장비에 기존 연구들 대비 상대적으로 심플하고 저렴한 센서들로 구성된 시스템을 개발하고, 조향 제어 시뮬레이션을 통해 어떻게 최적의 조향 제어 방법을 도출할 것인지에 대한 연구 방향을 제시한다. 그리고 이를 바탕으로 경로 인식과 경로 주행이라는 두둑 추종 방식으로 안정적으로 조향 제어가 가능하다는 연구 목표를 달성하고 이를 실제 현장에서 실험하며 검증하는 내용을 제안하게 되었다.

## 자주식 양파수확기의 조향 제어 방안 소개

### 경로 인식과 경로 주행

본 논문의 연구 대상인 자주식 양파수확기 장비는 수확기 자체의 동력만으로 실외의 밭 환경에서 저속의 작업 속도로 주행하며 구근류 작물을 굽춰, 수확하는 밭농사용 땅속작물 수확기의 대표적인 모델 중 하나이다. 현재 모든 구동 과정을 운전자가 직접 수동으로 조작하고 있는데, 자주식 양파수확기의 이동 경로는 직선에 가까운 형태로 정형화된 두둑과 고랑이라는 특정 구역을 일정한 속도로 추종하며 직진 주행하는 단순하고 규칙적인 동작 패턴을 반복적으로 수행하고 있으므로 자동화 적용이 필요한 상황이다.

이러한 자주식 양파수확기는 전륜 구동 방식으로 앞 바퀴를 통해 조향 제어가 가능하도록 구동부가 설계되어 있으므로, 반복적이고 정형화된 주행 패턴을 자동화하기 위해서는 안정적으로 기준 두둑의 중앙부를 감지하고 두 개의 앞 바퀴를 조향시킬 수 있는 시스템의 개발이 필수적이다.

본 장비의 차체 특성 상 수확기 전면부에 부착된 굽취부의 러그들이 두둑을 파헤쳐나가며 두둑 밑 흙 속의 구근류 작물

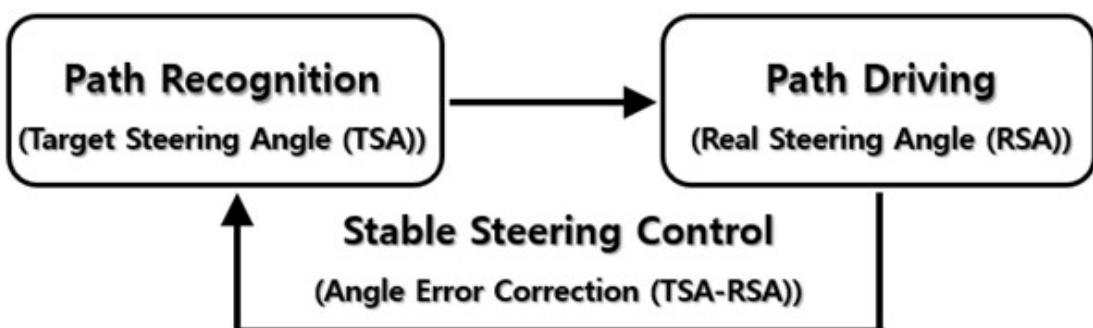
들을 굽춰, 수확하는 작업 패턴이기 때문에 결과적으로 Fig. 1과 같이 주행하며 작업 중인 두둑의 파손 및 평탄화 현상은 불가피하다.



**Fig. 1.** Ridges damaged by harvester operations

그러므로 주행 중 발생되는 조향 동작 시, 전면부에 부착된 굽취부나 앞 바퀴로 인한 옆 두둑으로의 침범이나 두둑 파손을 최대한 방지해야만 지정된 경로인 기준 두둑의 작업을 무사히 마친 후, 작업을 해야 될 다음 경로인 옆 두둑의 주행 자동화를 원활히 수행할 수 있으므로 조향 제어는 최대한 정밀하고 안정적으로 이루어져야 한다.

본 논문에서 소개하는 두둑을 추종하는 센서 기반의 조향 제어 방식의 구조는 Fig. 2와 같이 '경로 인식(Path Recognition)'과 '경로 주행(Path Driving)'이라는 두 가지 요소로 크게 나눌 수 있다.



**Fig. 2.** Steering control scheme that follows the ridge

첫 번째, 경로 인식이란 Fig. 3과 같이 수확기 전면부에 부착된 굽취부의 좌측과 우측에 장착된 두 개의 포텐셔미터 센서 (RV30YN20S, COSMOS TOKYO社, Japan)를 통해 수확기가 주행하고 있는 현재 기준 두둑에서의 앞 바퀴의 조향 각도를 좌측과 우측의 센서로 측정한다. 그리고 각각의 센서에서 측정된 두 값의 변위차를 통해 향후 조향해야 될 앞 바퀴의 목표 조향 각도(Target Steering Angle, 이하 TSA)를 도출하는 것을 의미한다.



**Fig. 3.** Ridge detection sensor method and performance test on the ridge line

두 번째, 경로 주행이란 기준 두둑을 주행하며 조향을 담당하는 전륜 휠 부위에 장착된 와이어 포텐셔미터 센서(CWP-S1000S, CALT社, China)를 통해 측정한 앞 바퀴의 실제 조향 각도(Real Steering Angle, 이하 RSA)와 앞서 경로 인식 단계에서 계산된 목표 조향 각도(TSA) 사이에 발생되는 조향 각도 오차(TSA-RSA)를 실시간으로 보정하여 기준 경로를 안정적으로 추종하며 주행하는 것을 의미한다.

참고로 와이어 포텐셔미터 센서(Wire Potentiometer Sensor, 이하 WPS)는 Fig. 4와 같이 수확기 전륜 축의 우측 앞바퀴 실린더 아래에 1개를 부착하여 앞 바퀴 회전 시, WPS의 와이어가 당기며 포텐셔미터의 전압 변화를 통해 얼마나 조향 되었는지 실제 조향 각도를 측정할 수 있다.



**Fig. 4.** Sensor installed on the front axle of the harvester

## PID 제어 기법 관점에서 설계한 조향 시뮬레이션과 시스템 블록도

### PD 제어기 조향 시뮬레이션

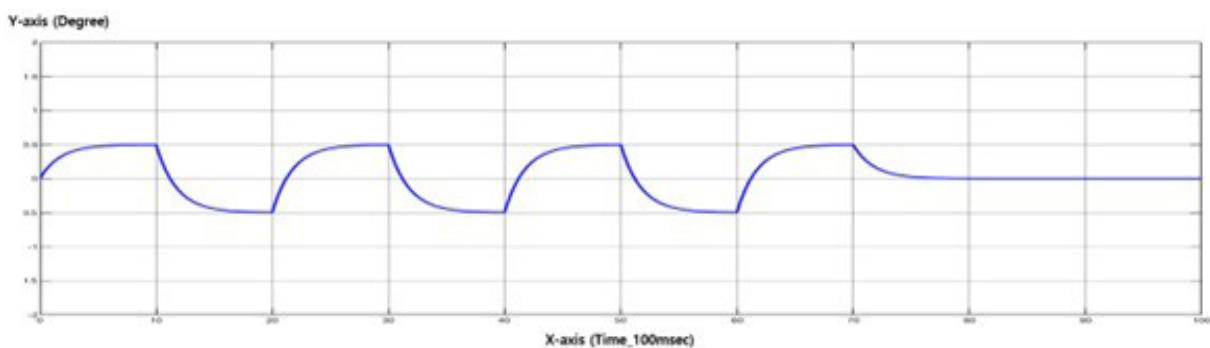
본 연구에서는 조향 시뮬레이션을 하기 위해, 조향 제어에 많이 사용된 PID 제어기의 일종인 PD제어기와 P 제어기를 대상으로 선정하였다. I 제어기를 제외한 이유로는 지면의 불규칙성, 노면의 이물질 등 다양한 외부 환경의 외란 요소들로 인하여 목표 조향 각도에 급격한 변화를 겪게 될 때, 신속한 방향 전환을 하기 위해서이다.

즉, 적분 성향을 가진 I 제어기는 목표 값에 도달하기 위해 정상 상태 오차를 줄이려고 하는데, 조향 제어의 특성 상 실시간으로 방향을 좌/우로 신속하게 전환해야 되므로, 목표 값에 대한 정상상태 오차를 줄이기 위한 I 제어기의 특성은 도리어 방향 전환을 해야 되는 조향 제어에 있어 부하를 증가시키는 요인이 되기 때문이다(Guangzhao et al., 2019).

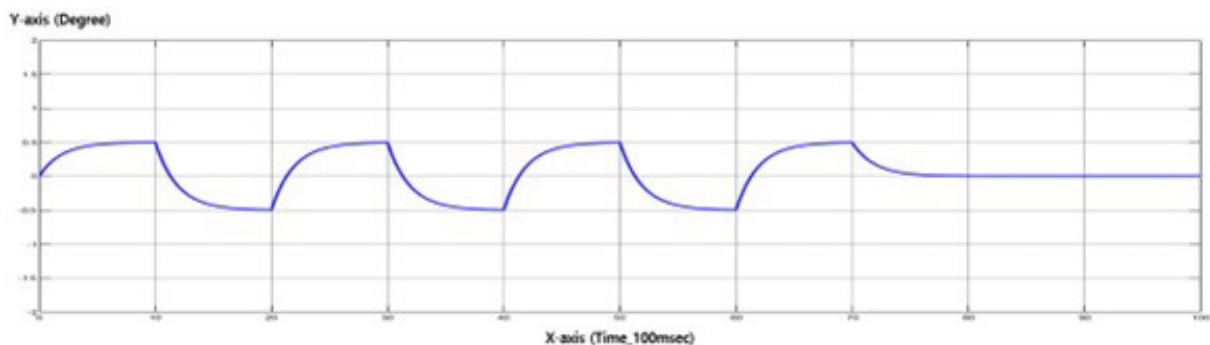
PD 제어기는 비례 구성 요소의 시스템 덤핑(감쇠비) 증가로 인해 오버슈트를 억제하고, 진동 시간을 감소시키며, 속도의 변화에 따라 시스템을 빠르게 안정화시킬 수 있다(Guangzhao et al., 2019).

이에 앞서 연구한 “양파 수확기의 주행 경로 궤적 이탈 방지를 위한 조향 최적화 연구” 내용을 바탕으로 매트랩 프로그램(MATLAB 2020b, MathWorks社, USA)을 통해 시뮬레이션을 수행하였다(Lim et al., 2024).

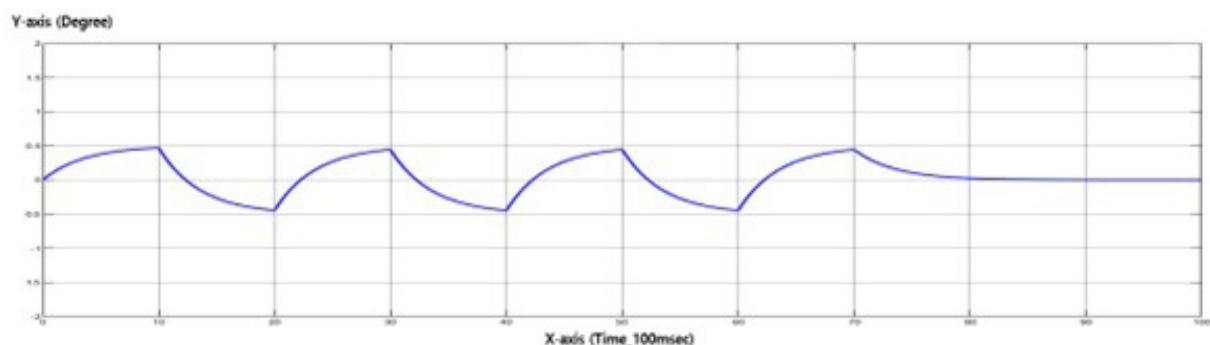
이를 통해 아래 Fig. 5부터 Fig. 9까지의 그래프들이 도출되었다.



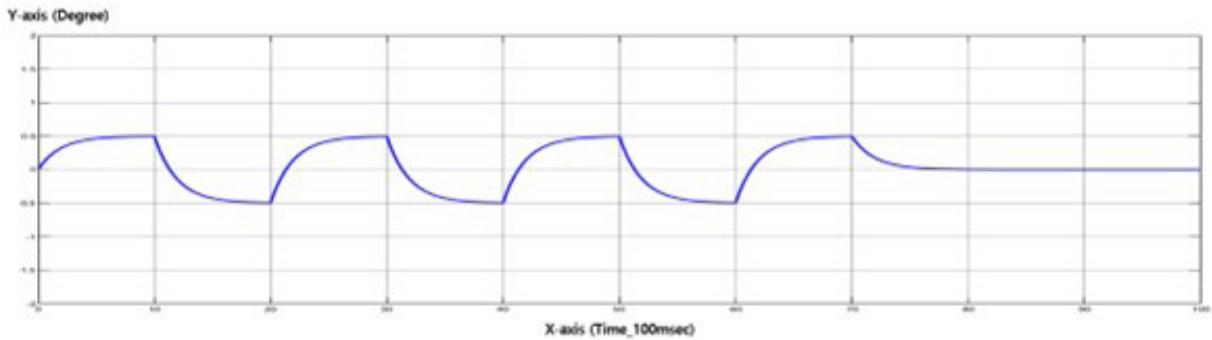
**Fig. 5.** The PD controller simulation results when D Gain=1, P Gain=1



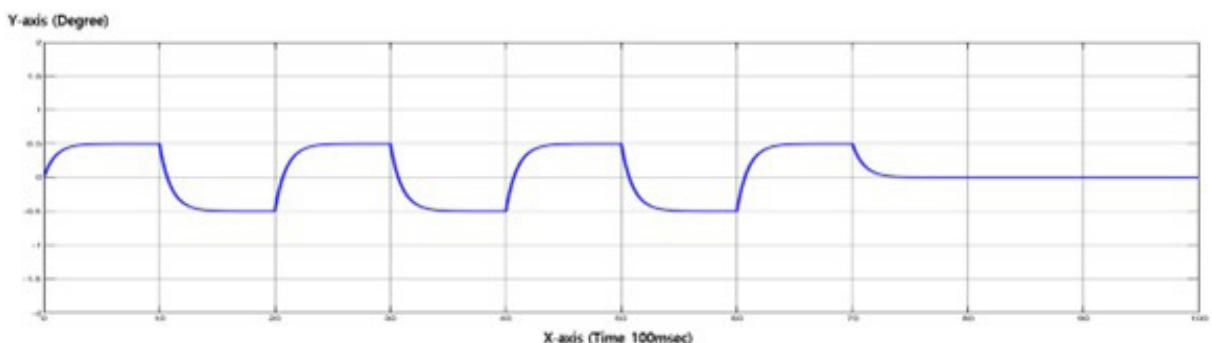
**Fig. 6.** The PD controller simulation results when D Gain=1, P Gain=4



**Fig. 7.** The PD controller simulation results when D Gain=1, P Gain=5



**Fig. 8.** The PD controller simulation results when D Gain=1, P Gain=6



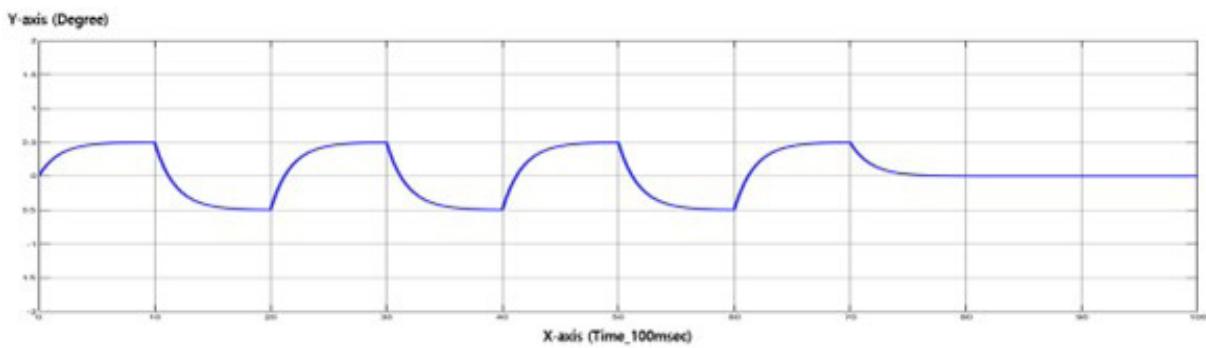
**Fig. 9.** The PD controller simulation results when D Gain=1, P Gain=10

위에서 소개한 PD 제어기의 5종류 실험 시뮬레이션 그래프들은 수확기의 권장 작업 속도인 1km/h를 D Gain의 파라미터로 설정함으로써, D Gain 값을 1로 고정하고 P Gain 값을 1부터 10까지 넣었을 때, 조향 제어의 변화가 가장 잘 발생되는 경우들을 선택하여 정리한 내용이다. 이 때 P Gain 값이 5에서 조향 제어가 가장 안정적이고 간단하게 결과 값이 나오는 것을 확인할 수 있다.

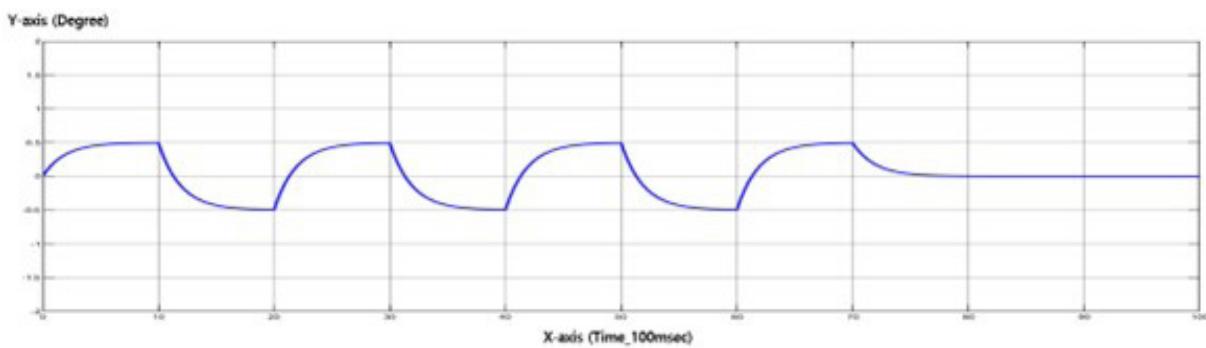
### P 제어기 조향 시뮬레이션

지금까지의 결과들을 통해, PD 제어에서 P 제어는 목표 값에 도달하는 시간을 줄여주고, D 제어는 안정성을 향상시켜주는 역할을 하는 것을 알게 되었다. 이 때 안정성을 향상시켜주는 D 제어 파라미터는 속도에 영향을 받는데, 본 연구에서는 수확기의 권장 작업 속도인 1km/h라는 저속의 고정된 등속도를 유지하므로, D 제어 파라미터는 '1'이라는 상수로 처리하면 된다. 그러므로 P 제어만으로도 충분히 최적의 조향 제어가 가능하리라는 결론에 도달하게 된다.

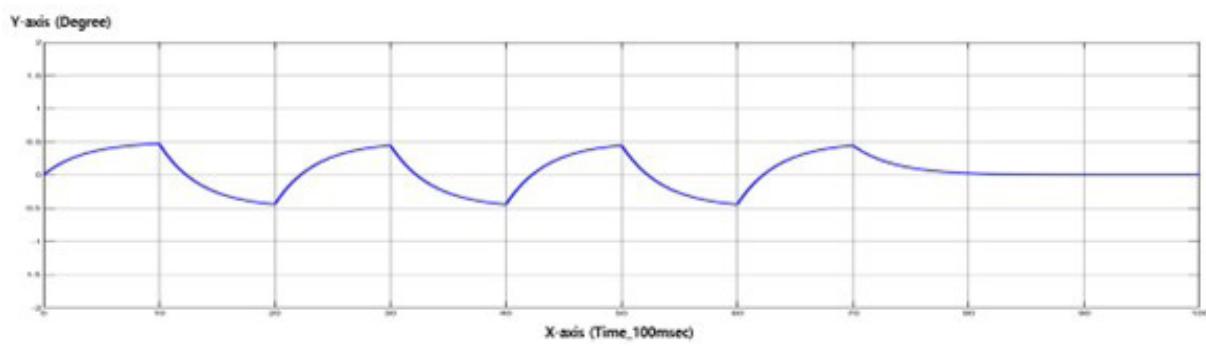
이를 증명하기 위해 P 제어기로 각각의 이득 값을 입력하여, 조향 제어 시뮬레이션을 수행하였고, 아래 Fig. 10부터 Fig. 14까지의 그래프들이 도출되었다.



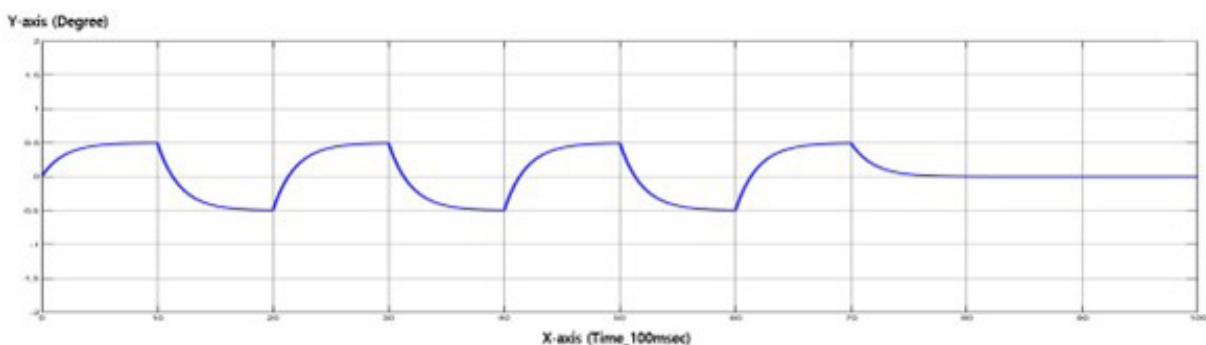
**Fig. 10.** The P controller simulation results when P Gain=1



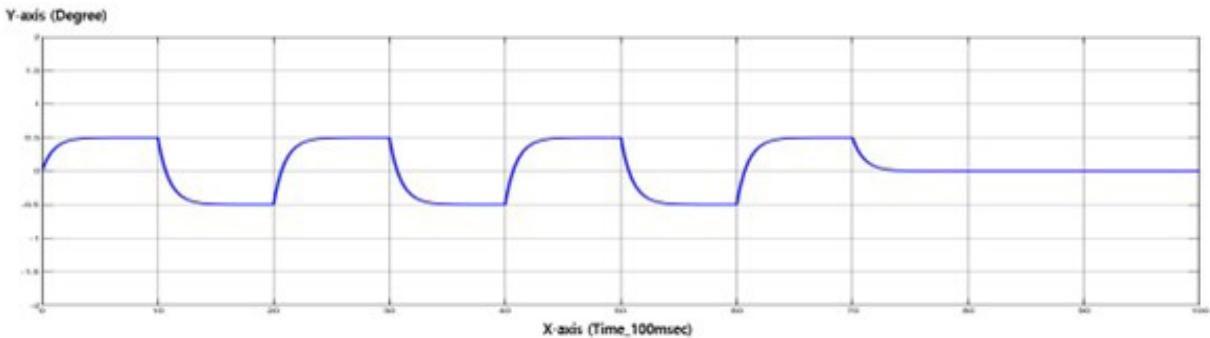
**Fig. 11.** The P controller simulation results when P Gain=4



**Fig. 12.** The P controller simulation results when P Gain=5



**Fig. 13.** The P controller simulation results when P Gain=6



**Fig. 14.** The P controller simulation results when P Gain=10

이상과 같이 PD제어기와 P 제어기의 시뮬레이션을 각각 수행한 결과, D 제어 파라미터가 상수 1이므로 차이가 없음을 그래프들을 통해 확인하였다. 이를 통하여 설계하기 더 편리하고 간단한 P 제어기를 본 자주식 양파수확기의 조향 제어기로 선택하는 것이 최적임을 알 수 있다.

이에 본 논문에서는 P 제어기를 자주식 양파수확기의 최적 조향각 변환 제어기로 최종 선정하게 되었다.

그리고 지금까지의 시뮬레이션 실험 결과들을 바탕으로 각 제어기 별로 Gain 값을 비교해 보았을 때, D Gain 값이 1로 고정되었을 때, P Gain 값은 1~4까지는 시스템이 둔감하여 비교적 조향 제어 전환이 느리며, P Gain 값이 6~10까지는 시스템이 예민하고 오버슈트가 커지며 시스템이 불안정해지는 공통적인 특성을 그래프들의 결과를 통해 확인할 수 있었다. 즉, P 제어기의 Gain 값이 5일 때, 가장 응답 시간이 빠르고, 조향 정확도가(목표 값 대비 실제 값) 정밀하며, 안정적(제어 견고성이 높음을 뜻함)으로 조향 제어를 하였음을 알 수 있다.

### P 제어기를 활용한 조향 제어 시스템 블록도

본 연구에서 기준 두둑의 중앙을 따라가기 위한 조향 각도를 어떻게 계산하여 두둑을 이탈하지 않고 추종할 수 있게 하느냐가 가장 중요한 제어 부분 중 하나이다. 이를 위해서는 목표 조향 각도(TSA)와 실제 조향 각도(RSA), 두 가지의 조향 각도를 알아야만 한다(Sunphong et al., 2019, Hongsheng et al., 2010, Yang et al., 2010, Chung et al., 1999).

자주식 양파수확기의 앞단의 굴취부에 장착된 좌측과 우측의 포텐셔미터 센서 값의 차이를 나타내는 두둑의 위치 편차(변위차)와 전륜 바퀴부에 장착된 와이어 포텐셔미터 센서를 통하여 측정된 바퀴의 실제 조향 각도 값을 확인 비교하면, 현재 수확기가 두둑을 추종하며 조향 제어가 잘 되고 있는지 검증할 수 있다. 두둑의 위치 편차, 즉 변위차가 조향각 변환 제어기를 거치게 되면, 목표 조향 각도가 나온다. 그리고 바퀴의 조향 각도 값을 통해 실제 조향 각도를 확인할 수 있다.

이에 목표 조향 각도와 실제 조향 각도를 생성하는 조향 각도 생성 알고리즘을 다음과 같이 정리하였다. 먼저 목표 조향 각도를 도출하기 위해 받아들이는 조향 제어 시스템의 입력 값인 굴취부의 좌측과 우측 센서가 기준 두둑의 측상부를 감지할 때, 값을 받아들이는 과정은 다음과 같다.

포텐셔미터 센서 저항 값 생성

저항 값이 전압(V) 값으로 변환

전압 값이 12bit AD 컨버터에서 변환

AD 컨버터 내에서 Median 필터를 거침

Median 필터를 거친 데이터 값이 센서 값으로 나옴

이 때, Median Filter를 거치는 이유는 농업용 수확기가 주행하는 밭 환경은 오프로드 노면이므로 돌, 이물질, 움푹 파여진

웅덩이 등 다양한 외부 환경으로 인해 발생되는 노이즈들이 센서에 전달될 수 있으므로, 이 때 섞여 들어가는 최대값과 최소값 등의 노이즈들을 제거하고, 안정적인 중간값만을 도출하기 위해 사용된다. 이렇게 필터링 되어 나온 좌측과 우측의 두드 감지 센서 중앙값은 연산을 거쳐 두둑의 위치 편차 값으로 도출되고, 조향각 변환 제어기에서 최적의 P Gain 값( $K_p$ )과 결합하여 원하는 목표 조향 각도(TSA)로 나오게 된다.

이를 수식으로 정리하면 아래 식 (1)과 같다.

$$(L - R) \times K_p = TSA \quad (1)$$

여기서,

$L$  : 굴취부 포텐셔미터 좌측 센서 값

$R$  : 굴취부 포텐셔미터 우측 센서 값

$K_p$  : 조향 각도로 변환하기 위한 P Gain 값

TSA : 목표 조향 각도(°)

그리고 농업용 수확기의 앞바퀴 조향 각도 값인 실제 조향 각도(RSA)는 전륜부의 최대 조향 각도인 좌/우 10도 내에서 결정이 된다. 이는 전륜부에 장착해놓은 와이어 포텐셔미터 센서(WPS)를 통해 측정하여 확인할 수 있다.

지금까지의 내용들을 바탕으로 조향 제어 시스템에서 계산된 조향각을 이용하여 두둑을 추종하는 방식으로 조향을 제어하는 시스템 블록도는 아래 Fig. 15와 같다.

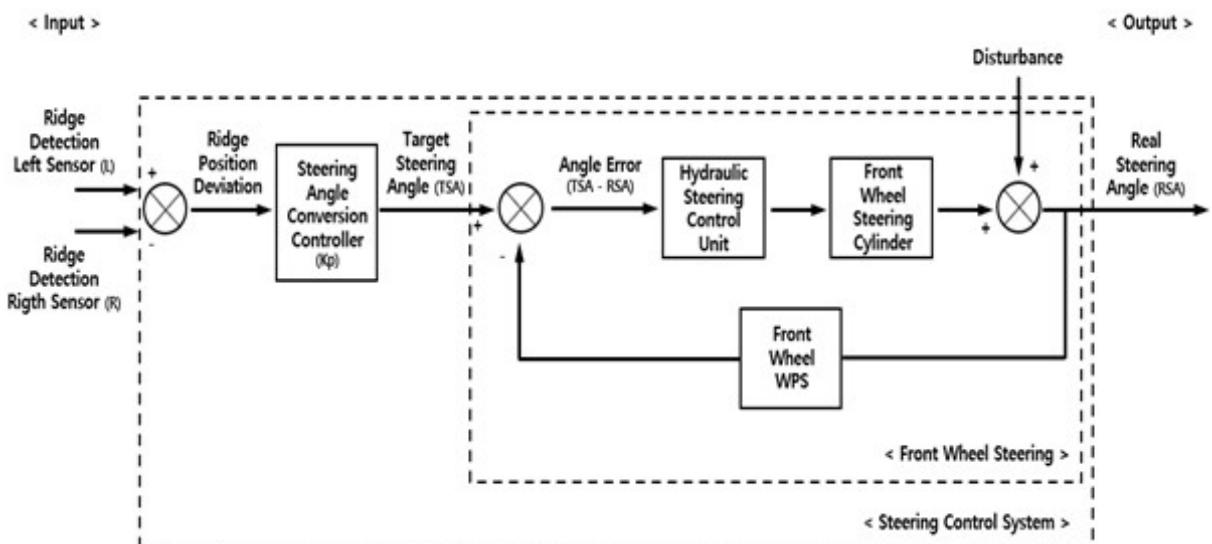


Fig. 15. Steering control system block diagram of self-propelled onion harvester for ridge tracking

## 조향 제어 실험 및 성능 분석

### 실험 환경 및 방법

본 장에서는 지금까지 정리한 결과들을 바탕으로 설계 제작한 자주식 양파수확기의 두둑 추종 방식 조향 제어 시스템에 대한 성능을 실제 환경에서 검증하기 위하여, 두둑과 고랑이 있는 밭 환경의 필드에서 시험을 진행한 방법을 소개하고 그에 대한 결과를 분석한다.

본 연구의 실험 장소는 경기도 화성시에 위치한 평지 조건의 밭 환경에서 Fig. 16과 같이 길이 22m의 직선형 두둑들과 고랑들을 활용하여 조향 실험을 진행하였다. 두둑의 너비는 100cm, 높이는 15cm로 실제 양파 농사에서 사용되는 기준으로 구성하였다.



**Fig. 16.** Experiment environment for ridge pavement

실험 방법으로는 평지 노면의 직선 경로에서 자주식 양파수확기의 권장 작업 진행 속도인 1km/h를 실험 기준 속도로 맞추었다. 그리고 차체에 장착된 각 센서들에서 전송 받을 데이터 제어 주기는 100ms의 속도로 설정하였으며, 시뮬레이션 때와 동일하게 P 제어기를 바탕으로 설계된 조향각 변환 제어기의 Gain 값을 1부터 10까지 변환하면서 최적의 Gain 값을 찾기 위해 실험하였다. 이러한 방식으로 P 제어기의 Gain 값에 따른 직선 주행 시, 좌/우 두둑 센서의 두둑 위치 편차가 0에 최대한 수렴하고, 허용된 조향 각도 값 내에서 차체가 안정적으로 기준 두둑의 중앙인 센터를 따라 추종하며 주행하는지를 확인하는 방식으로 실험 결과를 검증하였다.

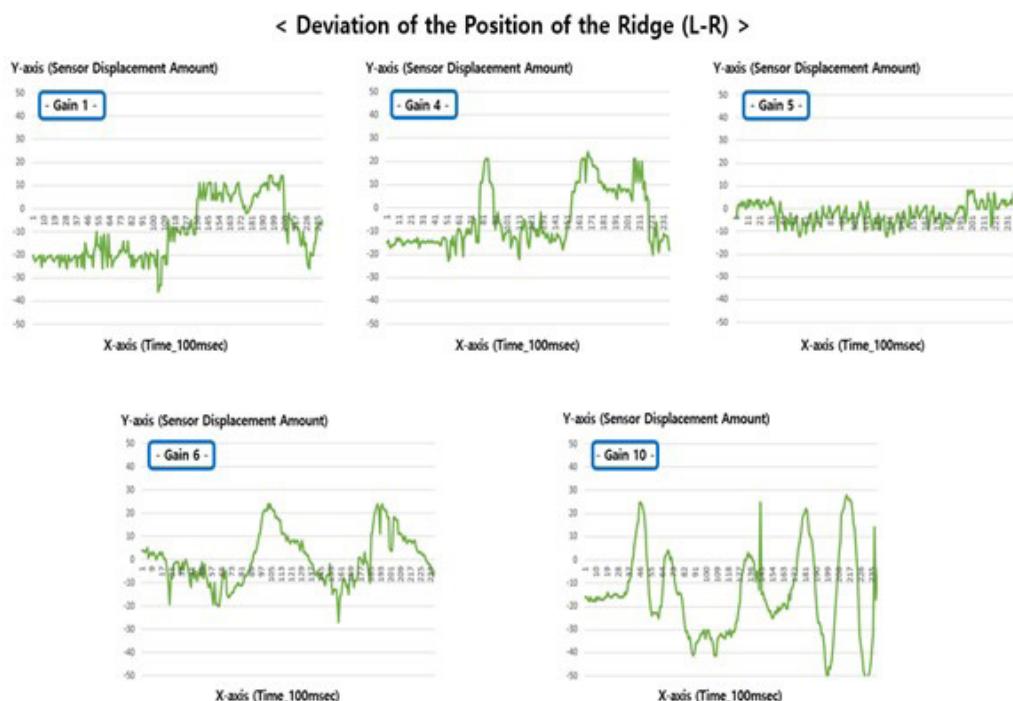
### P 제어기 Gain 값 변화에 따른 조향 제어 성능 그래프

본 실험의 목적은 두둑 감지 센서의 변위차를 활용하여 밭두둑의 중앙을 가장 안정적이고 강인하게 추종하며 주행할 수 있는 P 제어기의 최적 Gain 값을 찾기 위해 진행되었다. 이를 통해 역으로 시뮬레이션 결과 값과 동일한지를 검증함으로써 지금까지 정립한 이론들이 맞는지를 확인할 수 있기 때문이다.

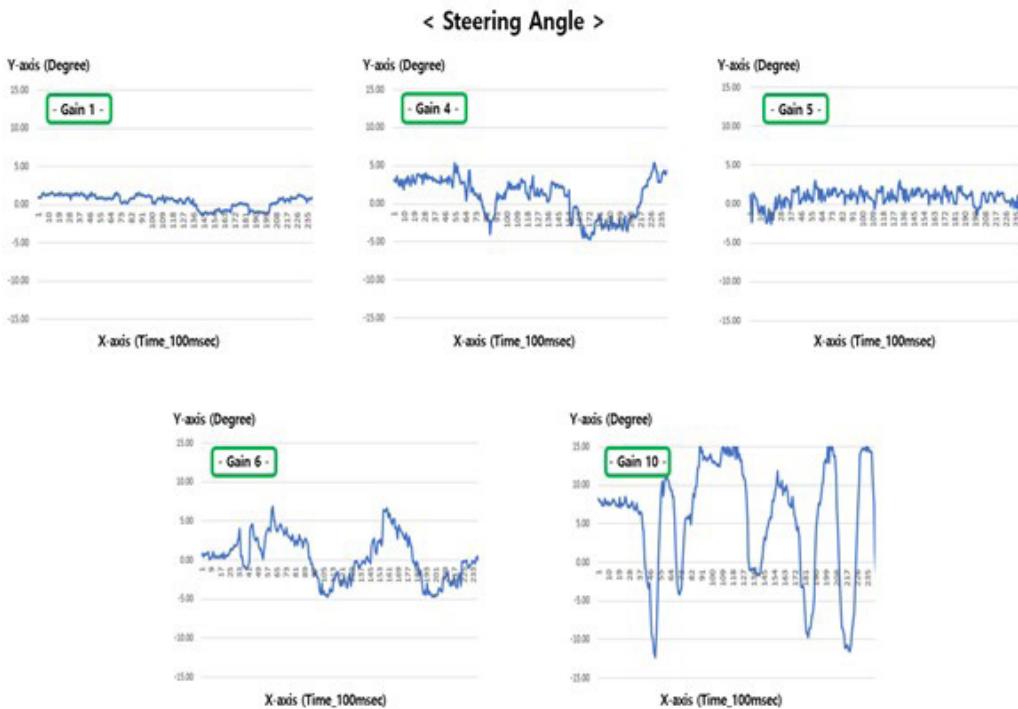
아래 Fig. 17부터 Fig. 19까지 직선 두둑에서의 주요 Gain 값에 따른 조향 성능 및 결과들이 그래프로 나와 있다. 해당 그래프는 총 3개의 결과 값으로 구성되어 있다. Fig. 17은 조향 제어 데이터를 나타내고 있다. 그리고 Fig. 18은 변위차(두둑의 위치 편차)를 나타내고 있다. 마지막 Fig. 19는 조향 각도에 대한 결과를 나타내고 있다.



**Fig. 17.** Steering control data graph according to gain value



**Fig. 18.** Displacement difference graph of the ridge according to gain value



**Fig. 19.** Steering angle performance graph according to gain value

### 조향 제어 성능 분석

지금까지의 필드 실험들을 통해 나온 결과 그래프들로 조향 제어 성능을 분석하기 위해서는 두둑의 위치 편차 상태와 조향 각도 형태를 분석하여야 한다. 두둑의 위치 편차 값이 0에 수렴하는지의 여부를 통해 두둑의 추종 성능을 확인할 수 있으며, 전륜부에 부착된 와이어 포텐셔미터 센서(WPS)에서 감지된 허용 조향 각도 값을 통하여, 조향 시 옆 두둑으로의 침범 여부를 확인할 수 있다. 대표적인 5가지 P Gain 값에 따른 그래프들을 살펴보면, 각 그래프들이 나타내는 raw data들의 상세 의미는 다음과 같다.

첫 번째, 조향 제어 데이터를 나타내는 Fig. 17의 P Gain 1부터 P Gain 4까지는 언더슈트 현상으로 인하여 초기에 좌측 센서와 우측 센서의 폭이 넓었지만, 서서히 좁아지며 수렴하는 형태로 나타난다. 이는 기준 두둑의 중앙을 추종하는 속도는 느리지만 서서히 중앙을 향해 추종하며 주행함을 의미한다. P Gain 5는 좌측 센서와 우측 센서의 폭이 거의 일정하며 수렴하는 형태로 나타난다. 이는 기준 두둑의 중앙을 추종하는 범위 내에서 안정적으로 주행하고 있음을 의미한다. 그리고 P Gain 6부터 P Gain 10까지는 오버슈트 현상으로 인하여 좌측 센서와 우측 센서의 값이 서로 역전되며, 좌/우로 심하게 요동치듯 움직이고 바퀴 조향이 빈번하게 발생되는 형태로 나타난다. 이는 기준 두둑의 중앙을 추종하는 안정적인 범위를 점차 넘어서며 Gain 값이 커질수록 불안정하게 주행함으로써 옆 두둑으로의 침범까지도 가능함을 의미한다.

두 번째, 두둑의 위치 편차인 변위차를 나타내는 Fig. 18의 P Gain 1부터 P Gain 4까지는 두둑의 위치 편차가 0에 수렴하려 하지만 전반적으로 반응 속도가 둔감하고 느린 것이 확인된다. P Gain 5는 두둑의 위치 편차가 거의 0에 수렴하는 형태로 안정적으로 나타나며 두둑의 센터를 추종하며 주행한 것으로 확인된다. 그리고 P Gain 6부터 P Gain 10까지는 두둑의 위치 편차가 0에 수렴하지 못하며 두둑의 센터를 안정적으로 추종하지 못하는 것으로 확인된다.

세 번째, 자주식 양파수확기의 주행 시 바퀴 조향 각도를 나타내는 Fig. 19의 P Gain 1부터 P Gain 4까지는 조향 각도 값이 5도를 넘지 않는 것으로 나타난다. 그리고 P Gain 5도 조향 각도 값이 5도를 넘지 않는 것으로 나타난다. 그러나 P Gain 6부

터 P Gain 10까지는 조향 각도 값이 5도를 넘어서며 옆 두둑으로의 침범 사례가 가능하다는 것으로 나타난다.

즉, 지금까지 설명한 그래프들이 나타내는 결과들을 종합적으로 분석해보면, P Gain 1부터 P Gain 4까지는 목표 조향 각도에 비하여 실제 조향 각도 값이 둔감하고 느리게 작동하였음을 확인할 수 있다. 그리고 P Gain 5는 목표 조향 각도 대비 실제 조향 각도 값이 거의 일치하며 두둑의 중앙을 안정적으로 추종하며 작동하였음을 확인할 수 있다. 마지막 P Gain 6부터 P Gain 10까지는 목표 조향 각도에 비해 실제 조향 각도 값이 점차 민감하게 변하며 불안정적으로 작동하였음을 확인할 수 있다.

이를 바탕으로 비교 검증한 결과를 통해 자주식 양파수확기의 권장 작업 속도인 1km/h에서 P 제어기의 Gain 값이 5일 때, 가장 안정적이고 정밀하게 두둑의 중앙인 센터를 추종하며 최적의 조향 제어 성능을 구현할 수 있음을 확인 및 검증하였다.

## Conclusion

본 논문을 통하여 소개한 연구는 두둑이 존재하는 실외의 밭환경에서 저속으로 주행 및 굴취/수확 작업을 하는 자주식 양파수확기에 적용 가능한 센서 방식의 두둑 기반 조향 제어 연구 및 이를 실제 구현한 시스템의 실험과 검증 방안에 대해 제안하였다.

조향 제어 연구에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 PID 제어 기법 중 PD 제어기와 P 제어기를 채택하여 다양한 Gain 값을 적용한 시뮬레이션 그래프와 결과 값을 분석하여 최종적으로 P 제어기를 선정하였다. 이를 바탕으로 시스템 블록도를 정립하며 조향 제어 시스템을 설계하였다. 그리고 양파를 재배하는 밭 환경과 동일한 필드 환경을 조성하여 조향 제어 시스템을 부착한 자주식 양파수확기를 활용하여 조향 제어 실험들을 진행하였다. 이를 통해 사전에 시뮬레이션하여 도출하였던 P 제어기의 최적 Gain 값에 대한 조향 제어 성능을 구현함으로써 지금까지의 이론적 연구 내용들이 타당했는지 검증할 수 있었고, P 제어 기법만으로도 조향 제어가 성공적으로 구동되는 것을 확인하였다.

지금까지 소개한 조향 제어 연구 결과들을 통해 센서 기반의 P 제어기 탑재으로 구성된 조향 제어 시스템만으로도 두둑과 고랑이 존재하는 밭 환경에서 안정적이고 정밀하게 작업 경로인 기준 두둑을 추종하며 주행할 수 있다는 것을 확인하였고, 이에 대해 제안하였다.

향후에는 본 논문에서 제안한 일반적인 평지 외에 경사지 노면과 곡선으로 이루어진 다양한 밭두둑 환경에서도 본 조향 제어 시스템을 사용할 수 있는지 연구하고 검증하려 한다. 이렇게 함으로써 농업용 기계의 조향 제어 연구 측면에서 하드웨어와 소프트웨어적으로 더 심플하면서도 안정적이고 간단한 조향 제어 시스템을 개발하는데 이바지하고자 한다.

## Acknowledgements

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 밭농업 기계화 촉진기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (RS-2023-00227052)

## References

- Lim H, Yun BU, Bang BJ, Yun JS. 2024. A research on steering optimization to prevent deviation from the driving path trajectory of an onion harvester. The Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery Engineering. Vol. 4. No. 1:21-30.

- Guangzhao Tian, Baoxing Gu, Kai Chen, Yufeng Liu, Jianshen Wei. 2019. Method of automatic steering system design and parameter optimization for small tractors. Journal of Engineering (The Institution of Engineering and Technology (IET)), Vol. 2019. Issue. 22:8353-8358.
- Sunphong Thanok, Suppachai Howimanporn. 2019. Designed Fuzzy PD with automatic gain adjustment for intelligent vehicle. IEEE. Control, Robotics and Cybernetics (CRC) on 2019 4th International Conf. pp.33-37.
- Kim MJ, Baek SW, Kim JH. 2018. A study on lead-follow algorithm using sensor fusion of the autonomous caterpillar tractor. The Institute of Electronics and Information Engineers Conf. pp.892-894.
- Son HS, Yang SH, Ha JW, Park GW, In HK. 2018. Development of ridges detection system using 2D-Lidar for autonomous navigation assistance of sowing robot. Korean Society for Precision Engineering Conf. pp.55-55.
- Paul Ritzen, Erik Roebroek, Nathan van de Wouw, Zhong-Ping Jiang, Henk Nijmeijer. 2016. Trailer steering control of a tractor-trailer robot. IEEE. Trans on Control Systems Technology. Vol. 24. Issue. 4:1240-1252.
- Hongsheng Li, Yangquan Chen, Jianhua Zhang, Xiulan Wen. 2010. A tuning algorithm of PD-type iterative learning control. IEEE. The Transactions Chinese Control and Decision Conf. pp.1-6.
- Yang WY, Lee YJ, Ryoo YJ, Chang YH, Lim DY. 2010. Steering control system of mobile robot using PD control. The Transactions Korean Institute of Intelligent System Conf. Vol. 20, No. 1:169-171.
- Chung SH, Lee CW, Choi YJ. 1999. Study on the automatic steering control of a model car using visual servoing. The Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers. Vol. 7, No. 5:162-171.