

RESEARCH ARTICLE

# 양파 수확기의 주행 경로 궤적 이탈 방지를 위한 조향 최적화 연구

임훈<sup>1\*</sup>, 윤병운<sup>2</sup>, 방병주<sup>2</sup>, 윤준섭<sup>2</sup>

<sup>1</sup>건설기계부품연구원 지능제어연구실

<sup>2</sup>신흥공업사 기업부설연구소

## A research on steering optimization to prevent deviation from the driving path trajectory of an onion harvester

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](mailto:hoon.lim@koceti.re.kr)

### Abstract

Agricultural harvesters currently used in rural areas are configured in a manual manner in which all driving operations are directly operated by the driver. However automation is possible because the driving path is a repetitive, regular, and standardized pattern. In order to implement driving automation of agricultural harvesters, theoretical research on steering control, the most important element, is necessary. Accordingly, a study was conducted to analyze and derive the driving environment, steering kinematics of the driving mechanism, steering control algorithm, and steering angle for onion harvesters that are actually used in field agriculture. In this paper, we would like to introduce a steering control method that allows agricultural harvesters to drive stably without deviating from a certain path made of ridges and furrows.

**Keywords:** Self-Propelled Harvester, Steering Control System, Ridge Tracking Method

### Introduction

우리가 흔히 농기계라 말하는 농업용 기계는 농사를 짓기 위해 사용되는 기기들을 통칭하는 용어로 크게 논농사용 농기계와 밭농사용 농기계로 구분할 수 있다. 현재 이앙기, 경운기, 콤바인 등으로 분류되는 논농사용 농기계들 중 가장 많이 사용되는 트랙터를 필두로 자동화, 무인화 등과 연계된 많은 연구 개발들이 진행되고 있으며, 그로 인해 실제 노동의 많은 부분을 기계화하여 논농사의 생



### OPEN ACCESS

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.20240003>

Received: November 27, 2024

Revised: December 16, 2024

Accepted: December 17, 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.

산성 향상에 큰 기여를 하고 있다.

하지만 이와 달리 발농사용 농기계들은 수많은 작물별 재배, 수확 패턴과 다양한 작업 환경들이 여러 형태로 조합되는 복잡한 작업 특성들로 인하여 아직도 사람의 노동력이 필수로 들어가야 하는 수동 방식의 농기계들이 대다수이며, 이로 인한 생산성 향상에 한계가 있다.

또한 농림축산식품부의 주요 통계 자료에 따르면 현재 국내 논농사의 기계화율이 95% 이상이지만, 발농사의 기계화율은 아직 60% 수준에 머물러 있어, 발농업 기계화율을 높이려는 다양한 정책과 연구 개발 지원이 추진되고 있다(MAFRA, 2016).

이에 본 논문에서는 발농사에 많이 사용되는 농업용 수확기들 중에 조향 자동화를 구현할 수 있는 대상으로 트랙터의 PTO (Power take off)에 연결 없이 차체에 엔진이 탑재되어 스스로 구동할 수 있는 자주식 양파 수확기를 연구 모델로 선정하였다. 해당 양파 수확기는 구동 시, 자주식 형태이기는 하지만, 주행과 작업에 관한 모든 구동들을 운전자가 직접 수동으로 조작해야 되는 큰 번거로움이 있기 때문이다. 그러므로 본 연구의 필요성으로 발 작업 시, 조향 자동화가 구현된다면 실제 사용자에게 큰 도움이 될 수 있으므로, 자주식 양파 수확기가 주행 경로의 궤적을 이탈하지 않고, 조향을 최적화 할 수 있는 제어 방안을 연구하였다.

기준에 선행 연구된 농기계 조향 제어 및 경로 추종 방안들과 관련하여 제안하는 방법들은 GPS, Lidar, 카메라 비전류 등을 주로 사용하여 비교적 고가(高價)의 복잡한 시스템을 구성하고 있다(Chung et al., 1999, Kim et al., 2018, Paul et al., 2016, Luca et al., 2016, Son et al., 2018, Yun et al., 2017).

이렇게 시스템을 구성한 이유는 해당 기준 두둑의 위치와 형상 등을 일반 노면과 구별하고 감지하기 위해서이다. 하지만 기존의 이러한 시스템들은 연구 단계에서는 일정 부분의 성과들을 내고 있지만, 아직까지 실제 적용 단계에서는 기술적인 여러 이유들과 실의 환경이라는 특수성에서 발생할 수 있는 다양한 변수들의 조합으로 인하여 내구성을 유지하기 어려운 것이 사실이다. 또한 비용적인 측면에서도 일반 농기계 장비들에 부담 없이 적용하여 상용화하거나 향후 A/S부분에서도 아직까지 어려움 및 제약이 있는 것 또한 사실이다.

특히 농업이라는 환경적인 특성 상 먼지, 온도, 습도, 수분량, 일조량 등이 일정하지 않은 경우가 대다수이기 때문에 해당 시스템의 방수, 방진, 방열, 충격, 진동 등 여러 외부 환경 요소들에 대한 내구 설계가 철저하게 대비되지 않을 경우, 오작동 확률이 높아지고 수명이 단축된다는 치명적인 단점들이 존재한다.

그러므로 본 논문에서는 기존의 시스템 구성이 아닌 저가의 센서 기반으로 상대적으로 단순한 시스템 구성 및 알고리즘을 통해 두둑을 감지할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

## Materials and Methods

### 주행 환경 및 수확기 스펙

자주식 양파 수확기가 주행하고 작업하는 밭의 환경은 주로 모래 성분의 토양 재질로 된 전형적인 오프로드 노면으로 크게 두둑과 고랑 형태로 이루어져 있다. 국내 주요 양파 생산 지역인 경남 함안과 창녕 그리고 전남 무안 쪽을 조사해 본 결과, 두둑과 고랑의 너비(width), 폭, 높이 등에서 지역마다 약간씩의 차이는 있었지만, 작업 시 수확기에 탑승하여 Fig. 1과 같이 수확기가 두둑을 따라 주행하며 양파 작물들을 굴취, 수확해야 되는 반복 작업을 해야 되므로 전반적으로 유사한 형상으로 만들어져 있었고, 정형화된 경로로 구성되어 있었다.

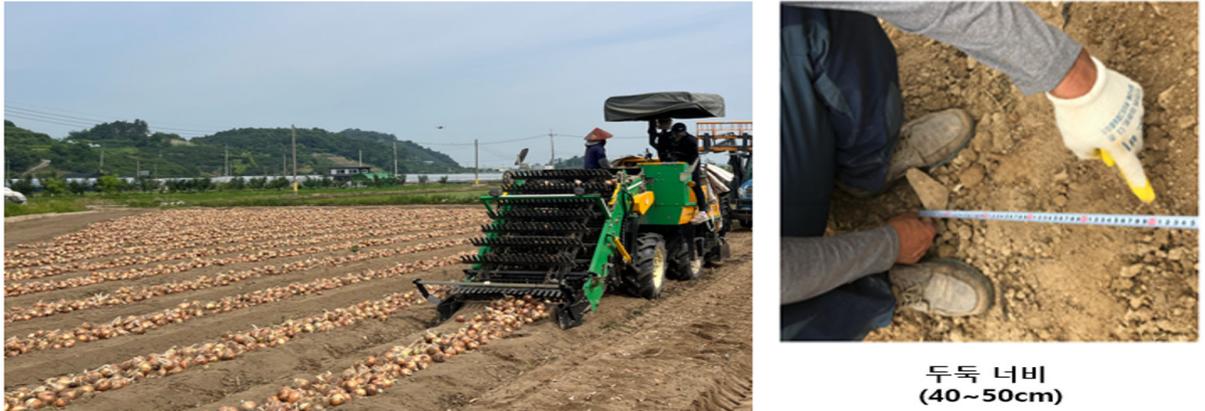


Fig. 1. Width of ridge and furrows

이에 본 논문에서는 위에서 언급한 지역들의 두둑과 고랑의 평균치를 정하여, 평지 노면을 기준으로 두둑 높이 300 mm, 두둑 폭 500 mm, 고랑 폭 600 mm, 작업 두둑에서 옆 두둑까지의 폭 1,600 mm로 Fig. 2와 같이 형상을 수치화 하였다.

본 연구에 사용된 자주식 양파 수확기의 차량 스펙은 다음과 같다. 6,600(L)x2,190(W)x3,080(H) mm, 중량은 최대 4,300 kg, 타이어는 TIRON社의 폭 300 mm의 HS617 모델 사용, 100마력급 디젤 엔진을 바탕으로 1 km/h~5 km/h까지의 권장 작업 속도를 가진 SHI-1300 모델을 대상으로 하였다.

해당 양파 수확기 모델을 대상으로 밭 노면 주행 시, 고랑의 폭이 600 mm, 고랑을 지나가는 수확기 타이어의 폭이 300 mm이므로, 고랑 내에서 옆 두둑을 침범하지 않고 바퀴가 조향 가능한 최대 폭은 남은 300 mm이므로, 이 남은 폭 안에서 작업 속도에 따른 최적의 조향 제어를 해야만 한다.

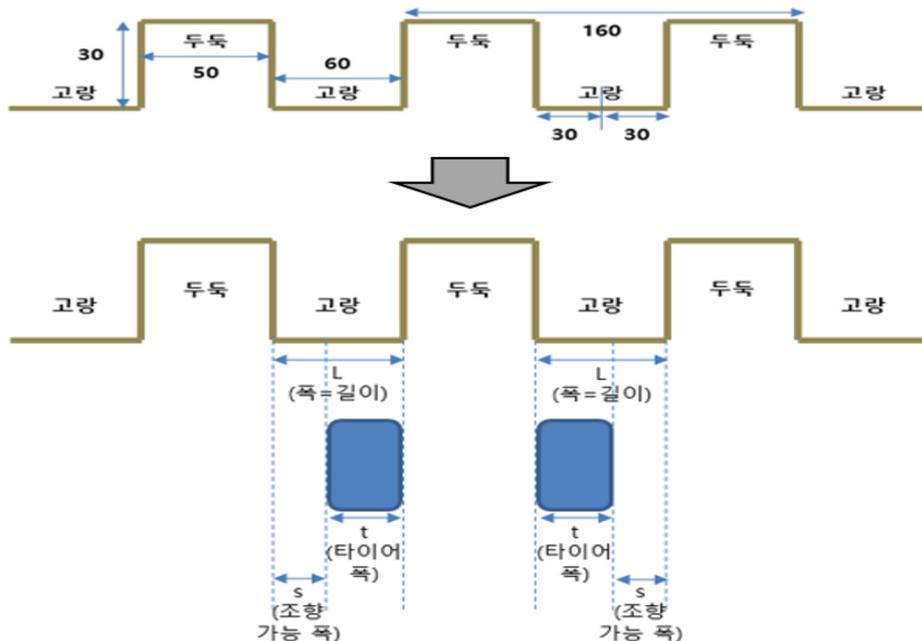


Fig. 2. Field environment quantification

## 조향 최적화 방법

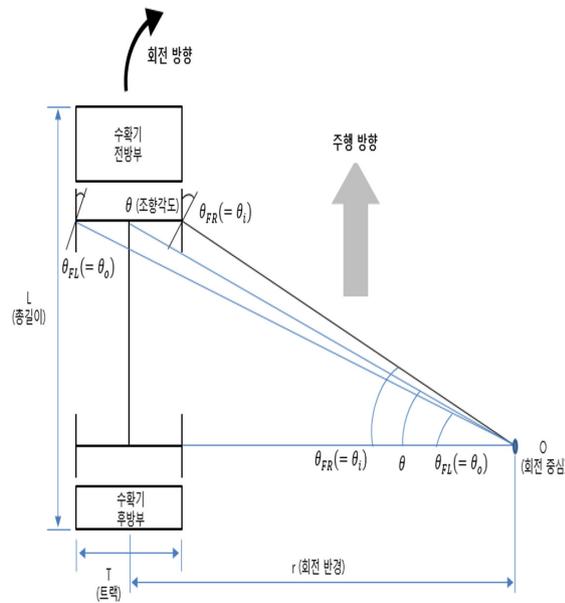
자주식 양파 수확기가 두둑과 고랑으로 이루어진 노면 경로에서 최적의 조향 자동화를 구현하기 위해서는 일정한 모양으로 정형화된 두둑을 감지하고 감지된 주행 두둑을 추종하며 지나가야 된다. 이 때 주의할 점은 수확기가 전진 주행 시, 옆 두둑의 훼손을 막아야 된다는 점이다. 즉, 주행 경로 궤적의 이탈 방지를 위해 옆 두둑을 침범하지 않고, 주어진 환경 내에서 최적의 조향 각도를 찾아 제어하는 것이 본 조향 최적화 연구의 핵심 목표라고 할 수 있다.

이에 본 논문에서는 자주식 양파 수확기의 조향 기구부에 따른 수학적 해석과 작업 속도에 따른 조향 각도 도출, 두둑을 감지하는 방안, 그에 따른 알고리즘을 소개한다. 이러한 순차적인 연구 단계에 따라 양파 수확기의 최적 조향 자동화를 구현할 수 있는 조향 제어 방안에 대해 소개하고자 한다.

## Results and Discussion

### Ackerman 조향 기구학을 적용한 모델링 설계

본 연구의 대상인 자주식 양파 수확기는 전륜 구동 방식의 Ackerman 조향 기구부를 가지고 있다. 이에 Ackerman 조향 기구학을 적용하여 자주식 양파 수확기의 수학적 모델링을 설계하면 Fig. 3과 같이 도식화 할 수 있다.



**Fig. 3.** Mathematical modeling based on Ackerman Steering Kinematics

이 때, 도출된 각각의 인자들은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$\theta_{FL}$ : 전륜 바깥쪽 바퀴 조향 각도

$\theta_{FR}$ : 전륜 안쪽 바퀴 조향 각도

$\theta$ : Ackerman 조향 각도

$O$ : 회전 중심(Turning Center)

$L$ : 앞 차축과 뒷 차축 사이의 휠베이스

$T$ : 조향바퀴와 조향축 사이의 거리인 트랙

$r$ : 조향 차량의 회전 반지름(회전 반경)

조향을 담당하는 전륜 바퀴의 회전 각도 조건은 회전 방향 기준으로 안쪽 바퀴 각도가 바깥쪽 바퀴 각도보다 항상 커야 된다는 Ackerman 조향 원칙에 의거하여, 자주식 양파 수확기의 각도  $\theta$  는 식 (1)과 같이 정리할 수 있다(Lim et al., 2021).

$$\tan\theta = \frac{L}{r} \quad (1)$$

이를 근거로 조향 제어를 하는 좌, 우 전륜 바퀴의 조향 각도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tan\theta_{FL} = \frac{L}{r + \frac{T}{2}} \quad (2)$$

$$\theta_{FL} = \arctan\left(\frac{L}{\left(\frac{L}{\tan\theta}\right) + \left(\frac{T}{2}\right)}\right) \quad (3)$$

$$\tan\theta_{FR} = \frac{L}{r - \frac{T}{2}} \quad (4)$$

$$\theta_{FR} = \arctan\left(\frac{L}{\left(\frac{L}{\tan\theta}\right) - \left(\frac{T}{2}\right)}\right) \quad (5)$$

위에서 정리된 수식들을 통해, Ackerman 조향 각도  $\theta$  는 전륜 바깥쪽 바퀴와 전륜 안쪽 바퀴의 조향 각도의 평균으로 식 (6)과 같이 근사할 수 있다

$$\theta = \frac{\theta_{FL} + \theta_{FR}}{2} \quad (6)$$

## 작업 속도에 따른 최대 조향 각도 도출

위에서 설명한 Ackerman 조향 기구학에 근거하여 해석하고 정리한 수식들을 활용하여, 제한된 고랑 폭 내에서 옆 두둑을 침범하지 않고, 안정적으로 허용 가능한 최대 조향 각도를 구해야만 한다.

만약 속도가 고정된 종방향의 등속도이거나 비교적 저속인 차량이라면 매개변수의 함수는 일정하고, 동역학적 효과를 무시할 수 있으며 순수한 기구학적 관계식만으로 비례 이득에 사용되는 상수 값을 구할 수 있으므로 이러한 방법을 이용할 것을 제안하고 있다(Konur et al., 1997).

그러므로 이에 따라 5 km/h 이하의 권장 작업 속도를 가진 양파 수확기의 바퀴는 직선 형태의 단단한 평지 노면으로 이루어진 고랑에서 전방으로 주행할 때, 발생하는 마찰이나 미끄럼(Slip) 현상에 큰 영향을 받지 않는다고 가정하여, 본 연구의 고려 조건에서 Slip 현상은 제외한다. 이에 고랑과 타이어 폭을 바탕으로 권장 작업 속도인 1 km/h에서부터 5 km/h까지를 등속도로 가정하여 계산하면 Table 1에서와 같이 작업 속도에 따른 옆 두둑을 침범하지 않는 최대 조향 각도 범위 및 옆 두둑을 침범하기 시작하는 조향 각도의 시작점을 구할 수 있다.

**Table 1.** Allowable steering angle range at moving speed 1km/h to 5km/h.

주행 속도	바퀴 선회 각도 (°)	바퀴와 두둑 이격 거리 (cm)	남은 고랑 폭 넓이 (cm)	상태
1 km/h	0	0	30	
	1	5.89	24.11	
	2	11.77	18.23	
	3	17.65	12.35	
	4	23.53	6.47	
	5	29.39	0.61	허용
2 km/h	6	35.25	-5.25	침범
	0	0	30	
	1	6.37	23.63	
	2	12.75	17.25	
	3	19.12	10.88	
	4	25.48	4.52	허용
3 km/h	5	31.83	-1.83	침범
	0	0	30	
	1	6.86	23.14	
	2	13.72	16.28	
	3	20.58	9.42	
	4	27.43	2.57	허용
4 km/h	5	34.27	-4.27	침범
	0	0	30	
	1	7.35	22.65	
	2	14.70	15.30	
	3	22.05	7.95	
	4	29.38	0.62	허용
5 km/h	5	36.71	-6.71	침범
	0	0	30	
	1	7.82	22.18	
	2	15.64	14.36	
	3	23.46	6.54	허용
	4	31.27	-1.27	침범

### 센서를 이용한 두둑 감지 방안

농업용 수확기인 자주식 양파 수확기가 작업을 하며 조향과 주행을 하는 직선형 밭두둑에 대한 전반적인 모양과 형상은 위에서 설명한대로 평균적으로 일정한 형태로 비슷하며 큰 차이가 없다. 그러므로 수확기 굴취 폭 내에 들어갈 수 있는 모든 두둑의 중앙값을 측정할 수 있도록 Fig. 4와 같이 좌측과 우측의 굴취부 양측에 사다리꼴 형태로 생긴 두둑 감지 센서 더듬이 기구부(L, R)를 설계 제작하여 배치한다.



**Fig. 4.** Ridge detection principle and ridge detection sensor mechanism

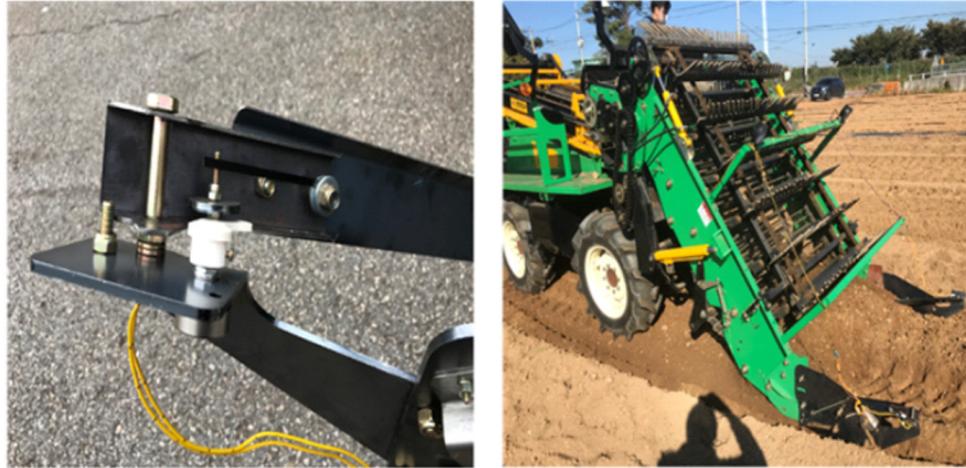
본 논문에서 제안하는 사다리꼴 형태로 배치한 센서 방식이 두둑을 감지하여 중앙값을 찾는 원리는 Fig. 4의 감지 원리에서 도식화 한 것처럼 두둑의 폭에 따라 좌, 우에 배치된 센서 더듬이부 (L, R)가 두둑의 측면 윗부분인 측상부에 걸쳐지고, 주행 시 좌측과 우측의 센서 감지 영역이 미세하게 달라지므로 이 때 나타나는 차이로 두둑의 폭을 알 수 있게 된다.

센서 더듬이부 (L, R) 장치의 구성은 아래 Table 2와 같이 크게 2종류의 포텐서미터 센서들을 사용하였다. 첫 번째로 굴취부 전방 좌, 우 양측에 장착되어 기준 두둑을 감지하며 변위차를 도출하는 센서로 COSMOS TOKYO社의 RV30YN20S 포텐서미터 2개를 철재 더듬이부와 스프링으로 연결하여 사다리꼴 형태로 부착하였다. 두 번째로 전륜축의 우측 앞바퀴 실린더 밑에는 CALT社의 CWP-S1000A 와이어 포텐서미터 1개를 부착하여 앞바퀴 회전 시 조향 각도를 측정할 수 있다.

**Table 2.** Sensor specifications

RV30YN20S (COSMOS TOKYO社)	CWP-S1000S (CALT社)
<ul style="list-style-type: none"> <li>•출력 저항: 100 kΩ</li> <li>•허용 오차: ±10%</li> <li>•정격 전력: 600 mW</li> <li>•외부 형상</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•출력 저항: 10 kΩ</li> <li>•측정 범위: 최대 1000 mm</li> <li>•동작 전압: 12~24 VDC</li> <li>•외부 형상</li> </ul>
	

이처럼 구성된 두둑 감지 센서 기구부의 외형과 실제로 두둑에서 실험한 모습은 Fig. 5와 같다.



**Fig. 5.** Ridge detection sensor mechanism test on the ridge line

Fig. 5에서처럼 각각의 포텐서미터에 연결된 좌, 우 센서 더듬이부가 두둑을 지나갈 때마다 결과 값들이 나오고, 좌, 우의 두 값을 뺀 두둑의 위치 편차, 즉 변위차를 통해 두둑의 중앙을 추종할 수 있게 된다. 변위차가 0에 가깝게 수렴할수록 직선 형태로 두둑 중앙을 지나간다고 판단하여 전륜부의 조향을 덜 하게 되고, 변위차가 0보다 크게 발생할수록 해당 경로인 기준 두둑을 벗어나고 있다고 판단하여 0에 수렴하도록 전륜부 바퀴를 조향하며 주행하는 센서 기반의 두둑 추종 방식이다.

### 조향 제어 알고리즘 소개

본 연구에서 주행 두둑의 중앙을 따라가기 위한 조향 각도를 어떻게 계산하여 기준 두둑을 이탈하지 않고 추종할 수 있게 하느냐가 중요한 조향 제어 부분이다. 이를 위해서는 두 가지 조향 각도를 알아야 한다.

자주식 양파 수확기 앞단의 굴취부에 장착된 좌측과 우측의 포텐서미터 센서 값의 차이를 나타내는 두둑의 위치 편차(변위차)와 전륜 바퀴부에 장착된 와이어 포텐서미터 센서를 통해 측정된 바퀴의 실제 조향 각도 값을 확인 비교하면, 현재 수확기가 두둑을 추종하며 조향 제어가 잘 되고 있는지 검증할 수 있다.

즉, 이 두 종류의 포텐서미터 센서의 조합을 통하여 목표 조향 각도(TA)와 실제 조향 각도(RA)를 비교할 수 있고, 제어기를 통해 두 가지 조향 각도 사이의 각도 에러(TA-RA)를 보정함으로써 두둑을 추종하며 주행할 수 있다.

본 조향 제어 시스템의 제어기에 사용된 MCU는 STM사의 STM32F4 모델을 사용하여 10ms의 속도로 센서에서 데이터를 전송 받아 연산을 하고, 유압 밸브로 명령을 전달하여 전륜 바퀴의 조향을 가능하게 한다.

지금까지 설명한 내용들을 바탕으로 이론적으로 정립한 양파 수확기의 조향 제어 알고리즘의 흐름도는 아래 Fig. 6과 같다.

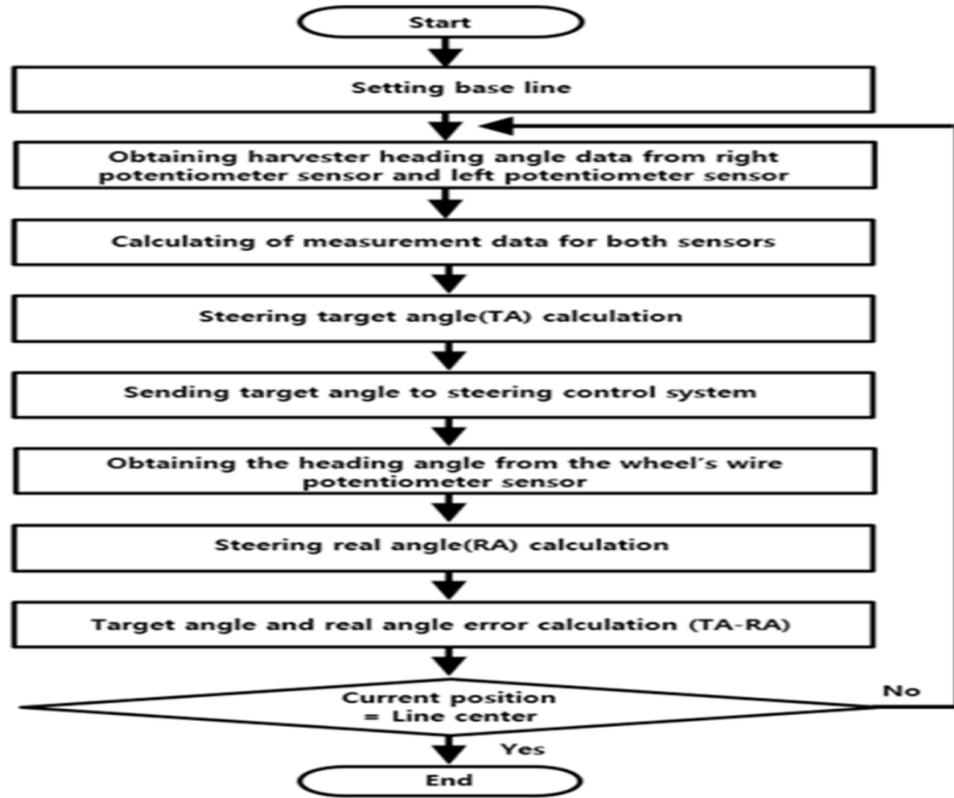


Fig. 6. Steering control algorithm flowchart of agricultural harvesters

## Conclusion

본 논문을 통하여 소개한 연구는 실외의 오프로드 노면인 밭 환경에서 두둑과 고랑이라는 주행 경로에서 트랙터 없이 자체의 동력으로 구동 및 작업 가능한 자주식 타입의 양파 수확기에 적용 가능한 센서 방식의 조향 최적화 방안에 대해 제안하였다.

양파 수확기가 주로 작업을 하는 국내의 구근류(양파) 관련 두둑과 고랑의 밭 환경들을 조사하고 분석하였으며, Ackerman 조향 기구학에 근거한 수학적 해석 방식으로 수확기의 작업 속도에 따른 허용 가능한 최대 조향 각도를 도출하였다. 또한 기존 농기계용 조향 제어 연구 방법들에 대한 문제점을 검토하였으며, 이와 차별화 될 수 있도록 구조적으로 더 단순하고 가격적으로 저렴하게 구성할 수 있는 센서 방식의 조향 제어 방안과 알고리즘을 소개하였다.

이를 통해 두둑과 고랑이 존재하는 실외의 오프로드 밭 환경에서도 단순하지만 안정적이고 정밀하게 작업 경로인 기준 두둑을 추종하며 주행할 수 있는 자주식 모델의 양파 수확기 조향 최적화 제어 방법을 제안하였다.

향후에는 본 논문에서 제안한 조향 제어 방법으로 실제 밭 환경에서 다양한 주행 실험들을 진행하며 나타나는 조향 오차들 및 Fig. 6에서 제안한 조향 제어 알고리즘에 대해 검증하고 수정 보완을 하려 한다. 이렇게 함으로써 조향 최적화 연구 측면에서 다양한 변수와 악조건들이 존재하는 밭두둑 환경에서도 한층 더 강인하고 최적화 된 두둑 추종 조향 제어 시스템 개발 및 농기계용 자동화, 지능화에 대한 연구에 이바지하고자 한다.

## Acknowledgements

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

## References

- Ministry of agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2016. Major statistics for agriculture, Food and rural affairs in 2016. pp.240-247.
- Lim H, Seo MK, Shin HY, Yun BU, Bang BJ, Joo YH. 2021. Development of steering control system for a self-propelled potato harvester using a displacement difference ridge tracking method. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers. Vol. 70. No. 1:213-223.
- Konur A Unyelioglu, Cem hatipglu, Umit Ozguner. 1997. Design and stability analysis of a lane following controller. IEEE. Trans on Control Systems Technology. Vol. 5. No. 1:127-134.
- Chung SH, Lee CW, Choi YJ. 1999. Study on the automatic steering control of a model car using visual servoing. The Korean Society of Automotive Engineers. Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers. Vol. 7. No. 5:162-171.
- 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.
- 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.
- Luca Bascetta, Davide A. Cucci, Matteo Matteucci. 2016. Kinematic trajectory tracking controller for an all terrain Ackermann steering vehicle. IFAC-PapersOnLine. Vol. 49. Issue. 15:13-18.
- 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.
- Yun CH, Kim HJ, Jeon CW. 2017. Furrow detection and real-time path planning algorithm for using stereo camera. The Korean Society of the Agricultural Machinery Conf. pp.70-70.