

RESEARCH ARTICLE

경상남도 지역의 양파 재배 환경에 따른 양파 수확기 작업 성능 분석

황재서¹, 강영선², 이가영³, 김완수^{1,4,5,*}

¹경북대학교 농업생명과학대학 생물산업기계공학과

²충남대학교 친환경 수소·전기 농기계 연구소

³현대농기계

⁴경북대학교 농업생명과학대학 스마트생물산업기계공학과

⁵경북대학교 발농업기계개발연구센터

Analysis of the performance of onion harvester in the onion cultivation environment of Gyeongsangnam-do

Jae-Seo Hwang¹, Young-Sun Kang², Ka-Young Lee³, Wan-Soo Kim^{1,4,5,*}

¹Department of Bio-Industrial Machinery Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea

²Eco-friendly Hydrogen Electric Tractor & Agricultural Machinery Institute, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

³Hyundae Agricultural Machinery Co., Iksan 54584, Republic of Korea

⁴Department of Smart Bio-Industrial Mechanical Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea

⁵Upland Field Machinery Research Center, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea

*Corresponding author: wansoo.kim@knu.ac.kr



OPEN ACCESS

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.20240001>

Received: October 21, 2024

Revised: November 15, 2024

Accepted: November 23, 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.

Abstract

Onion cultivation in Korea faces challenges in mechanization due to small-scale farming plots, sloped terrains, and varying cultivation methods across different regions. Onion farming is conducted in both upland fields and paddy fields. The objective of this study is to evaluate and analyze the performance of commercial onion harvesters in Changnyeong-gun, Gyeongsangnam-do, one of the major onion-producing areas. In this study, two representative digging-type harvesters were tested in both upland and paddy field environments, with work efficiency and loss rate selected as performance indicators. The comparison of harvester performance in upland fields showed that harvester A and B had work efficiencies of 0.157 ha/h and 0.153 ha/h, respectively, with loss rates of 0.28% and 1.11%, indicating that Harvester A performed better. In the paddy field, the work efficiencies of harvester A and B were 0.167 ha/h and 0.24 ha/h, respectively, with harvester B performing better. The loss rates were 0.42% and 0.55%, respectively. These findings are expected to provide valuable insights for the development of harvesters optimized for specific field conditions.

Keywords: Onion, Harvester, Working performance, Field experiment

Introduction

국내 양파 생산량은 '24년 기준 1,175,276 ton으로 국내 조미채소 중 가장 많은 양을 생산하고 있으며, 재배면적의 경우 '80년 기준 7,741 ha에서 '24년 기준 18,614 ha 로 지속적으로 증가하고 있는 고부가가치 작물이다 (Statistics Korea, 2024; Koo, 2022). 국내 농업 인구는 '80년 기준 10,826,748명에서 '23년 기준 2,088,781명으로 약 80.71% 대폭 감소하였으며, 이는 국내 총인구 51,774,521명 대비 약 4.03%로 매우 낮은 비율을 차지하는 수치이다 (Statistics Korea, 2023a; Statistics Korea, 2023b). 또한, 우리나라 농업인구는 지속적인 고령화와 여성화로 인하여 노동력 부족 문제가 심각해지고 있다 (Jo et al., 2023). 이러한 문제점은 농가의 생산량 감소를 야기하며 (Won et al., 2022), 이를 해결하기 위하여 농업 기계화 및 고효율 농기계 개발이 필요하다.

양파 재배 기계화율은 '21년 기준 전 주기 작업에 대하여 평균 66.3%이며, 이는 평균 99.3% 수준인 논농업 기계화율에 비해 현저히 낮은 실정이다. 그 중 수확 작업의 기계화율은 25.8%로 특히 저조하다 (RDA, 2021a; RDA, 2021b). 이는 국내 밭농업 특성상 소규모 필드, 경사 지형, 그리고 지역별로 상이한 재배양식 등으로 인해 기계화가 어렵기 때문인 것으로 판단된다 (Jeon et al., 2023). 특히, 양파 재배양식의 경우 재배지 유형에 따라 밭양파와 논양파로 나뉘며, 기계화를 향상을 위해서 모든 토양 조건에서 우수한 작업 성능을 갖는 양파 재배용 농기계가 필요한 실정이다.

양파 재배를 위한 수확기 관련 선행연구를 검토한 결과, Bagherpour and Talab (2024)은 소규모 밭에서 채소의 줄기와 뿌리를 손상시키지 않는 소형 경량형 수확기를 설계하고 개발하였다. Kumawat and Raheman (2023a)은 양파에 적합한 수확기를 설계하기 위하여 수확 단계에서 양파 구근의 공학적 특성을 결정하기 위한 연구를 수행하였다. Dorokhov 등 (2023)은 작물 손상을 감소하고 수확 속도를 향상시키기 위해 변화 가능한 각도 컨베이어를 가진 양파 수확기를 개발하였다. Kumawat and Raheman 등 (2023b)은 양파 작물에 적절한 수확기 개발을 위해 경운기 부착형 굴착-컨베이어 장비에서 굴취 각도 및 굴착 깊이에 따른 견인력을 예측하였다. Lee 등 (2024)는 신안 지역에서의 양파 기계 수확 작업 체계에 대한 실증시험을 진행하여 노동비를 절감하고 작업 효율성을 높일 수 있음을 확인하였다. 그리고 위와 같은 선행연구들은 수확기 자체 성능에 대한 기술 개발, 양파 구근에 대한 연구에 집중해 있으며, 수확기가 적용되는 필드에 따른 수확기 성능 개발에 관한 연구는 다소 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구는 밭과 논 필드에서 국내 상용화된 굴취형 양파 수확기의 성능을 계측 및 분석하여 각 필드별로 우수한 성능을 나타낸 수확기를 선정하고, 해당 수확기에 대한 하드웨어 분석 및 토양 조건과의 관계를 분석하여 최종적으로 토양 조건별로 상용화된 굴취형 양파 수확기의 토양 조건별 특성을 분석하고, 작업 성능을 평가하는 것을 목적으로 한다.

Materials and Methods

굴취형 수확기

본 연구에서는 국내 대표적인 굴취형 양파 수확기 두 곳 제조사의 제품을 사용하였다. 두 수확기는 컨베이어 벨트가 있는 동일한 형태의 굴취형 수확기이며, 작업폭은 Model A, Model B 수확기 모두 1,400 mm, 무게는 각각 640, 325 kg이다. Table 1은 실험에 사용된 굴취형 양파 수확기의 세부 제원을 나타낸다.

Table 1. The specifications of the onion harvester used in this study

Items	Specifications	
	Model A	Model B
Manufacture	A	B
Nation	South Korea	South Korea
Type	Tractor-mounted	Tractor-mounted
Size (L×W×H, mm)	2,200 × 1,750 × 1,300	1,620 × 1,650 × 1,090
Digging width (mm)	1,400	1,400
Weight (kg)	640	325
Vibration of digging part	X	O

필드 실험

필드 실험은 창녕군농업기술센터를 통해 경상남도의 양파 주산지 중 하나인 창녕군 소재의 실제 농가를 대상으로 밭 (35°32'47.2"N, 128°28'18.5"E)과 논(35°32'52.0"N, 128°26'54.7"E) 총 2곳의 필지에서 실험을 진행하였으며, 밭과 논의 면적은 각각 약 464 m², 약 468 m² 이다. 이 중, 밭과 논 필드에서 각각 두 개의 두둑을 형성하여 실험을 수행하였다.

필드 실험을 위하여 본 연구에서는 국내 트랙터 제조사의 56마력의 중형 트랙터(RX560PSC, Daedong, Republic of Korea)를 사용하였다. 필드 작업 시 엔진 회전속도는 1,400 rpm 으로 설정하였으며, PTO는 1단(정격 기준 540 rpm)으로 설정되었으며 약 310 rpm의 속도를 갖는다. 트랙터 작업 단수는 저속 2단으로 설정되어 0.5~1 km/h의 속도에서 작업을 수행하였다. 트랙터 주행 속도는 양파가 두둑 밖으로 낙하하지 않도록 수준으로 설정하였다.

밭필드와 논필드의 재배양식은 다음과 같이 구성되었다. 밭필드의 경우 주간거리 11 cm, 조간거리 18 cm, 두둑 폭 95 cm, 두둑높이, 12~18 cm, 고랑폭 50 cm, 줄 수 6줄로 구성되었다. 논필드의 경우, 주간거리 12 cm, 조간거리 19 cm, 두둑 폭 110 cm, 두둑높이 10 cm, 고랑폭 45 cm, 줄 수 6줄로 구성되었다. Fig. 1은 각 필드의 재배양식을 그림으로 요약하여 나타낸다.

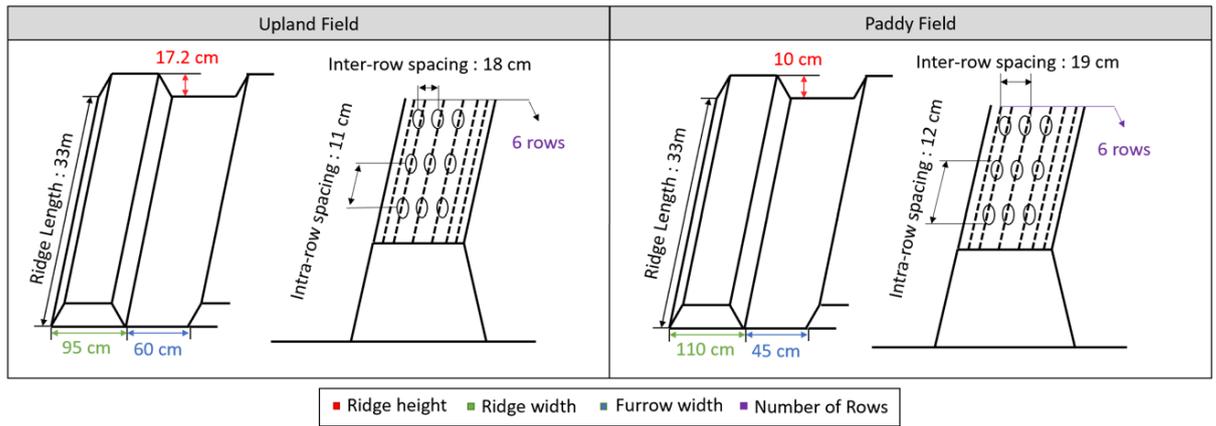


Fig. 1. Diagram of detailed cultivation conditions for upland field and paddy field

수확기의 경우 국내 2개 사의 굴취형 양파 수확기를 활용하여 실험하였다. 본 연구는 수확 작업 전에 양파 줄기는 모두 제거한 상태로 수확 작업만을 대상으로 수행되었다. 두 개의 굴취형 양파 수확기는 논, 밭 필드에서 각각 1회씩 서로 다른 두둑에서 굴취 작업을 총 2회 수행하였으며, 필드 실험 사진은 Fig. 2와 같다.



Fig. 2. Field experiment of each digging-type onion harvesters

카메라를 통해 정차 및 정비 시간을 제외한 순 작업시간을 측정하였으며, 이를 직접 측정한 작업 길이를 통해 작업 속도를 계산하였다. 최종적으로 작업부 폭과 작업 속도를 아래 식을 활용하여 이론작업능력(Theoretical field capacity)을 계산하였다.

$$A_{th} = (S \times W) / 10$$

이때, A_{th} = 이론포장능력 (ha/h), S = 작업속도 (km/h), W = 작업폭 (m)이다.

또한, 실험자가 육안으로 굴취 작업 후 두둑 밖으로 떨어지는 양파의 수를 측정하였으며, 두둑 밖으로 떨어진 양파 수를 이론적 양파 재배 개수로 나누어 굴취 작업 후 양파의 이탈률(Loss rate)을 분석하였다.

$$L_r = \frac{E_l}{E_T} \times 100(\%)$$

이때, L_r = 이탈률 (%), E_l = 이탈한 양파 수, E_T = 전체 양파 수이다.

토양 환경 계측

토성은 논, 밭 각 필드별로 세 곳의 토양 시료를 채취하여 미국농무성 (United States Department of Agriculture, USDA)의 방식을 채택하여 토성삼각도를 이용하여 분석되었다. 토성 분석은 충남대학교

토양분석센터에 의뢰하여 전용 장비를 이용하여 분석되었다.

토양의 수분함량은 Fig. 3(a)와 같이 토양 수분함량 센서 (Field-Scout TDR-350, Spectrum Technologies Inc., Aurora, USA)를 활용하여 측정하였으며, 논, 밭 각각 2개 두둑에 대하여 두둑 당 15회로 총 30회 측정을 진행하였다. 측정 위치는 Fig. 3(b)와 같이 두둑의 중앙부에서 측정하였다.



(a)



(b)

Fig. 3. Measurement of soil properties: (a) soil moisture sensor, (b) soil moisture easurement

Results and Discussion

토양 환경 분석 결과

밭 필드 토양 시료의 입자 분포는 모래 52.7%, 실트 20.1%, 점토 27.3%로 나타났으며, 토성은 Sandy Clay Loam (사질식양토)로 분석되었다. 논 필드 토양 시료의 경우 모래 33.3%, 실트 29.7%, 점토 37.0%로 나타났으며, 토성은 Clay Loam (식양토)로 분석되었다. 각 필드별 평균 토양 수분함량 값을 분석한 결과, 밭의 경우 25.4%, 논외의 경우 31.3%로 나타났다. 전반적으로 밭 필드에 비해 논 필드의 수분함량이 높게 측정되었다. Table 2는 필드별 토성 및 수분 함량 분석 결과를 요약하여 나타낸다.

Table 2. Results of soil properties analysis by upland and paddy field

Item	Unit	Upland filed	Paddy field
Sand	%	52.7	33.3
Silt		20.1	29.7
Clay		27.3	37.0
Soil texture	-	Sandy Clay Loam	Clay Loam
Soil Moisture content	%	25.4	31.3

실제 경상남도 양파 재배 환경에서 수확기 성능 분석

밭 양파 수확 시 수확기 성능

밭 필드에서 각 수확기의 작업 시간, 작업 길이, 작업 속도를 계산한 결과, Model A의 경우 작업 시간 95 s, 작업 길이 29.5 m, 작업 속도는 0.311 m/s로 측정되었다. 이때 작업 능률은 0.157 ha/h로 나타났다. Model B의 경우 작업 시간 97 s, 작업 길이 29.5 m, 작업 속도는 0.304 m/s로 측정되었다. 이때 작업 능률은 0.153 ha/h로 나타났다. Model B에 비해 Model A의 작업시간이 더 2 s 낮게 나타났으며, 작업능률 또한 Model B 수확기 대비 0.004 ha/h 높게 나타났다. 하지만, 이러한 차이는 작업능률 기준 2.6% 차이로 나타나, 밭 필드에서는 두 수확기가 유사한 성능을 보이는 것으로 판단된다.

Model A 수확기 굴취 작업 시 수확기 후방에 부착된 작물 모음판에 따라 안정적으로 두둑위에 떨어지는 모습을 보였으며, 두둑 밖으로 낙하하는 양파는 약 5개로 굴취작업에 따른 이탈률은 약 0.28%로 나타났다. Model B 수확기 굴취 작업 시 두둑 밖으로 낙하하는 양파의 수가 20개로 굴취작업에 따른 이탈률은 약 1.11%로 나타났다. 이러한 원인은 수확기 후방에 위치한 굴취된 농작물을 모아주는 기능을 갖는 모음판의 너비의 차이에 따른 것으로 판단된다. 이때, 모음판의 너비가 Model A 대비 Model B가 더 길기 때문에 이탈률은 Model B에서 더 높게 나타난 것으로 판단된다. Table 3은 실험을 진행한 두둑의 이론적 작물 개수와 제조사 별 두둑 밖으로 떨어진 작물 개수, 이탈률 분석 결과를 보여준다.

Table 3. Results of harvesting experiment in upland field

Model	A	B	Diff
Working width (m)	1.4	1.4	0
Working time (sec)	95	97	2
Working length (m)	29.5	29.5	0
Working speed (m/s)	0.311	0.304	0.007
Theoretical field capacity (ha/h)	0.157	0.153	0.004
Number of Theoretical crops	1,800	1,800	0
Number of fallen crop	5	20	15
Loss rate (%)	0.28	1.11	0.83

논 양파 수확 시 수확기 성능

논 필드에서 각 수확기의 작업 시간, 작업 길이, 작업 속도를 계산한 결과, Model A의 경우 작업 시간, 180 s, 작업 길이 30 m, 작업 속도는 0.167 m/s로 측정되었다. 이때 작업 능률은 0.084 ha/h로 나타났다. Model B의 경우 평균 작업 시간 125 s, 평균 작업 길이 30 m, 평균 작업 속도는 0.24 m/s로 측정되었다. 이때 작업 능률은 0.121 ha/h로 나타났다. 논인 경우 Model A의 수확기가 Model B에 비해 작업 시간이 55 s 느렸으며, 작업능률 또한 Model A가 0.037 ha/h 낮게 나타났다. 이는, Model B 수확기 전방에 있는 굴취 플레이트에 진동 기능이 있어, 점착성이 높은 논 토양에서의 적응성이 더 우수하기 때문인 것으로 판단된다.

Model A 및 Model B 수확기 굴취 작업 시 두둑 밖으로 낙하한 양파의 수는 각각 7, 9개로 굴취작업에 따른 이탈률은 각각 0.42, 0.55%로 나타났다. 이러한 차이는 앞서 밭에서 언급한 것과 같이 굴취된 농작물을 모아주는 모음판의 너비의 차이에 따른 것으로 판단된다. Table 4는 논 필드에서의 수확기 실험 결과를 요약한 표이다.

Table 4. Results of harvesting experiment in paddy field

Model	A	B	Diff
Working width (m)	1.4	1.4	0
Working time (sec)	180	125	55
Working length (m)	30	30	0
Working speed (m/s)	0.167	0.24	0.073
Theoretical field capacity (ha/h)	0.084	0.121	0.037
Number of Theoretical crops	1,650	1,650	0
Number of fallen crop	7	9	2
Loss rate (%)	0.42	0.55	0.13

Conclusion

본 연구에서는 밭과 논필드에 대해 적합한 수확기 설계를 위하여 경상남도의 양파 주산지 중 하나인 창녕군에 밭과 논 2곳의 필드에서 수확실험을 진행하였다. 실험은 국내 2개사의 굴취형 양파 수확기를 이용하여 수행되었다. 이때, 영상촬영을 통해 순 작업시간을 측정하였으며, 성능 평가 지표로 이론작업능력, 이탈률이 사용되었다. 또한, 수확기 사용 조건을 제시해 주기 위하여 논, 밭 각 필드의 토양 특성(토성, 토양 수분)를 측정 및 분석하였다.

각 수확기의 작업 능력을 필드에 따라 분석한 결과, 밭의 경우 Model A는 0.157 ha/h, Model B는 0.153 ha/h로 나타났으며, 논인 경우 Model A는 0.084 ha/h, Model B는 0.121 ha/h로 나타났다. 결과적으로 밭의 경우 두 수확기 모델이 5% 미만의 성능 차이를 보여 유사한 성능을 보이는 것으로 판단되나, 논인 경우 두 수확기 모델이 약 44%의 작업능력 차이를 보여 Model B가 우수한 성능을 보이는 것으로 판단된다. 각 수확기의 이탈률을 필드에 따라 분석한 결과, 밭의 경우 Model A 0.28%, Model B 1.11%로 나타났으며, 논인 경우 Model A 0.42%, Model B 0.55%로 나타났다. 두 필드 모두 Model B 수확기의 이탈률이 높게 나타났다. 이는 Model B가 Model A 대비 농작물 모음판의 너비가 길기 때문에 두둑 밖으로 흘러내리는 양파의 개수가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구는 논, 밭 필드에서 서로 다른 수확기의 이론작업능력, 이탈률 등을 분석하고 그 결과를 제공하였으나, 다음과 같은 몇 가지 한계점을 가지고 있다.

수확기 성능 평가 지표를 작업능률과 이탈률로만 보아 실제 유효 작업 능률 및 수확 후 양파 상태에 대한 평가 요인을 고려하지 못했다는 한계가 존재한다. 또한, 재배양식, 주행 속도 등 다양한 변수 조건에 따른 데이터 확보가 부족했다는 한계가 존재한다. 이러한 한계점은 향후 연구에서 지속적으로 개선해 나갈 예정이다. 구체적으로 향후 연구에서는 다양한 실험 조건을 고려하여 실험 횟수를 증가시켜 데이터의 신뢰성을 높이고 수확기 별 차이점을 더 정확하게 분석할 예정이며, 작업자의 숙련도가 실험 결과에 반영되지 않도록 자율주행 키트 등을 사용하여 실험조건 외의 변수에 영향을 최소화할 수 있도록 할 예정이다. 추가적으로 작업 속도 외 양파의 이탈률, 손상률 등 지표에 대한 연구를 추진할 예정이다.

Acknowledgements

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 발농업 기계화 촉진기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(RS-2023-00230838)

References

- Statistics Korea. 2024. Crop Production Survey: Vegetable Production (Seasoning Vegetables).https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0291&conn_path=I2 on 19 July 2024 [in Korean]
- Statistics Korea. 2023a. Number of Farms and Farm Population by Administrative District (City/County/District).https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EA1011&conn_path=I2 on 18 April 2024 [in Korea]
- Statistics Korea. 2023b. Population, Households, and Housing – By Eup/Myeon/Dong (years ending in 0 or 5), By City/County/District (other years). https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_11N1502&conn_path=I2 on 29 July 2024 [in Korean]
- Won JH, Jeon JT, Hong YK, Yang CJ, Kim KC, Kwon KD, Kim GH. 2022. Study on Traveling Characteristics of Straight Automatic Steering Devices for Drivable Agricultural Machinery. *Journal of Drive and Control*. 19(4):19-28
- Rural Development Administration (RDA). 2021a. National Mechanization Rate of Field Crops.https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=143&tblId=DT_143004N_025&conn_path=I2 on January 27 2023 [in Korean]
- Rural Development Administration (RDA). 2021b. Mechanization Rate of Rice Paddies. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=143&tblId=DT_143004N_024&conn_path=I2 on January 27 2023 [in Korean]
- Jeon HH, Baek SM, Baek SY, Hong YS, Kim TJ, Choi Y, Kim YK, Lee SH, Kim YJ. 2023. Development and Validation of Simulation Model for Traction Power and Driving Torque Prediction of Upland Multipurpose Platform. *Journal of Drive and Control* 20(1): 16-26
- Jo SH, Lee CY, Jeong HJ, Kang SW, Lee DH. 2023. Estimation of two-dimensional position of soybean crop for developing weeding robot. *Journal of Drive and Control*. 20(2):15-23
- Koo YM. 2022. PTO Torque and Draft Analyses of an Integrated Tractor-Mounted Implement for Round Ridge Preparation. *Journal of Biosystems Engineering* 47(3): 330-343
- Bagherpour H and Talab MMS. 2024. Design, Construction, and Evaluation of a Precision Vegetable Reaper to Use in Small Plots. *Journal of Biosystems Engineering* 49(1): 41-51
- Kumawat L, Raheman H. 2023a. Determination of engineering properties of onion crop required for designing and onion harvester. *Cogent Engineering* 10(1)
- Dorokhov A, Aksenov A, Sibirev A, Mosyakov M, Sazonov N, Godyaeva M. 2023, Evaluation of Comparative Field Studies for Root and Onion Harvester with Variable Angle Conveyor. *Agriculture* 13(3): 572
- Kumawat L, Raheman H. 2023b. Development of draft force estimation model for hand tractor powered digger-cum-conveyor by rake angle and digging depth. *Journal of Biosystems Engineering* 48(2):152-164
- Lee SH, Kim WK, Eo JW, Lee SB, Choi DG, Park SH, Kang YK, Cheon CU. 2024. Field Test of Harvesting Mechanization Technology of Onion at Shinan Area. *Journal of Drive and Control* 21(3):20-27