

크롤러 타입 자주식 수집형 감자 수확기 개발 및 성능분석

Development and Performance Analysis of Self-Propelled Crawler and Gathering Type Potato Harvester

김원경¹ · 이상희^{1*} · 최덕규¹ · 박석호¹ · 강연구¹ · 문석표¹ · 천창욱¹ · 김용주² · 장성혁²

Won-Kyung Kim, Sang Hee Lee, Deok Gyu Choi, Seok Ho Park, Youn Koo Kang,
Seok Pyo Moon, Chang Uk Cheon, Young Joo Kim, Sung Hyuk Jang

Received: 6 Mar. 2024, Accepted: 27 Mar. 2024

Key Words : Potato(감자), Harvester(수확기), Performance Evaluation(성능분석), Self-Propelled Type(자주식)

Abstract: Potatoes are one of the world's four major crops, and domestic consumption is currently increasing in Korea. However, the mechanization rate of potatoes is very low, and especially, harvesting is the most labor-intensive task in potato production. In Korea, potato-collecting work depends on manpower, so it is necessary to develop a gathering-type harvester that can be used for processes from digging to harvesting. Therefore, in this study, a self-propelled-type potato harvester was developed, and its performance was analyzed to mechanize harvesting. The potato harvester was developed to have a crawler-type driving part with a 60 hp diesel engine and consisted of a digging part that digs potatoes from the ground, a vertical transporting part that transfers the dug potatoes to the height of the collection bag, a separating part that separates debris, such as stones and soil, and a collecting part that loads the collection box. A field test of the potato harvester was conducted, and performance was evaluated by the damage, loss, and debris mixing proportions, which were 2.5%, 2.8%, and 2.6%, respectively. The working capacity was 1.2 h/10 a. The economic analysis results showed that the cost of harvesting work could be reduced by 12.7% compared to manual harvesting.

기호 설명

P_d : damage ratio, %

W_{dp} : weight of damaged potatoes, kg

W_p : weight of all potatoes collected, kg

P_l : loss ratio, %

W_l : weight of potatoes not collected, kg

W_{pp} : weight of all potatoes in plot, kg

P_m : debris mixing ratio, %

W_{de} : weight of debris collected, kg

T : working capacity, h/10a

v : working speed, m/s

t : turning time, s

b : effective working width, mm

* Corresponding author: shlee8868@korea.kr

1 Upland Mechanization Team, National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Jeonju 54875, Korea

2 Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

Copyright © 2024, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

감자는 세계 4대 식량자원 중 하나로 국내에서도 식생활의 서구화로 인하여 소비가 증가하고 있는 주요 작목 중 하나이다¹⁻²⁾. 국내 농가 인구는 2000년 403만 명에서 2022년 216만 명으로 지속적으로 감소 중이며³⁻⁶⁾, 이에 따라 인건비는 지속적으로 상승하고 있다⁶⁻⁷⁾. 감자 총 생산비 중 인건비가 차지하는 비중

은 16.7%로 가장 큰 비중을 차지하고 있다⁸⁾. 인건비 상승에 따라 감자 생산비는 지속적으로 상승할 것으로 전망되어 생산비 절감을 위해서는 기계화가 필수적이다.

하지만, 감자 기계화율은 2022년 72.4%로 미흡하며 노동력이 많이 드는 파종, 수확 작업의 기계화율은 4.6%, 77.2%로 다른 작업공정에 비해 미흡하다⁹⁾. 그중에서도 수확 작업은 감자 생산 중 가장 많은 노동력이 필요한 작업으로 생산에 필요한 총 노동시간 중 29.5%를 차지하고 있다¹⁰⁾. 국내의 감자 수확 작업은 굴취형 수확기를 이용해 땅속의 감자를 캔 뒤 인력으로 수집하고 있어 굴취에서 수집까지 동시에 작업할 수 있는 수집형 수확기 개발이 필요하다¹⁾.

외국은 굴취에서 수집까지 동시 작업이 가능한 자주식 감자 수확기가 개발되어 활발히 보급중이나¹¹⁾, 대규모 농가에 적합한 대형 수확기로 소규모 농가가 많은 국내 도입은 어렵다. 국내의 경우 감자 기계화를 위해 굴취형 수확기가 개발되어 보급되고 있으며⁷⁾, 트랙터용 수집형 수확기가 개발되었으나 보급이 미흡한 실정이다¹⁾. 트랙터용 수집형 감자 수확기는 트랙터에 연결되므로 기계 크기가 길어 선회반경이 큰 단점이 있어 소규모 필지에는 적합하지 않은 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 감자 굴취 및 수집작업 일관 기계화를 위해 굴취에서 수집까지 동시 작업이 가능하고, 선회반경을 줄일 수 있는 자주식 수확기 개발연구를 수행하였다.

2. 자주식 감자 수확기 설계 및 제작

2.1 수확 시스템

본 연구에서 개발하고자 하는 감자 수확기는 굴취부터 수집까지 동시 작업이 가능한 수확기로 크게 땅속의 감자를 굴취하는 굴취부, 굴취된 감자를 수집함 높이까지 이송하는 수직이송부, 감자와 돌, 흙 등 이물질을 분리하는 선별부, 수집함을 적재하는 수집부로 구성되며, 개략도는 Fig. 1과 같다.

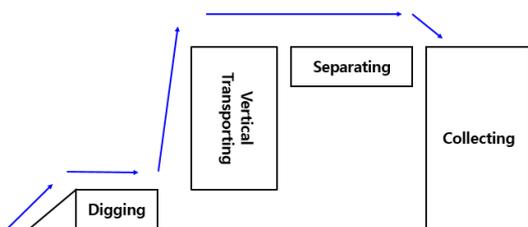


Fig. 1 Schematic diagram of harvesting system of potato harvester

2.2 주요부 설계

2.2.1 굴취부

굴취부는 수확기 전면에서 토양을 파쇄하며 땅속의 감자를 굴취하여 이송부에 전달하는 장치이다. 굴취부는 토양을 절삭하는 굴취날, 굴취된 감자를 이송하는 체인컨베이어, 체인컨베이어 위의 감자가 떨어지지 않고 원활히 이송할 수 있도록 하는 이송릴로 Fig. 2와 같이 구성하였다.

굴취폭은 평두둑 1줄 재배의 경우 한 번에 2개의 두둑을 굴취하며, 둥근 두둑 2줄 재배의 경우 한 번에 1개의 두둑을 굴취 하도록 1,300 mm로 설계하였다. 또한, 감자는 두둑 상부로부터 150 ~ 200 mm 깊이 이내에 분포하며¹²⁾, 고랑표면에서 50 mm부터 토양경도가 급격하게 증가하므로¹³⁾ 견인 부하를 최소화하기 위해 굴취 깊이는 고랑 표면으로부터 50 mm 이내로 Fig. 3과 같이 설계하였다.

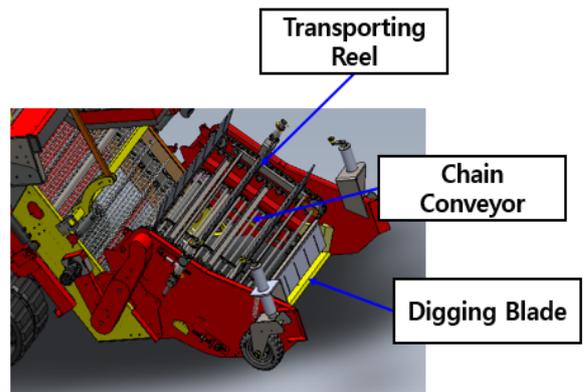


Fig. 2 Digging part of potato harvester

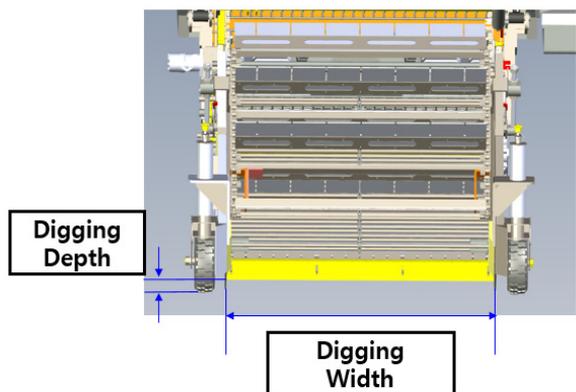


Fig. 3 Digging width and depth of potato harvester

2.2.2 수직이송부

수직이송부는 굴취부에서 굴취된 감자와 이물질

중 흙을 분리하며 감자를 수집함 높이까지 이송하는 장치이다. Fig. 4와 같이 수직이송을 위해 경사진 컨베이어 형태로 설계를 하였으며 체인컨베이어에 핑거타입의 러그를 부착하여 이송 중 감자가 손실되지 않으며, 흙을 배출할 수 있도록 설계하였다.

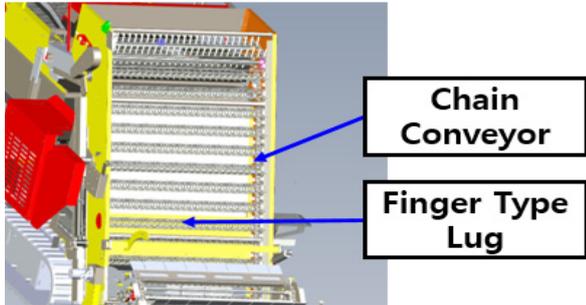


Fig. 4 3D modeling of vertical transporting part of potato harvester

2.2.3 선별부

선별부는 다수의 원형봉 체인을 연결한 체인컨베이어 방식으로 설계하였으며, 수직이송부에서 감자와 돌, 흙 등 이물질이 선별부 중앙부로 투입되면 좌우에 탑승한 보조작업자가 이물질을 선별하는 방식으로 컨베이어 좌우로 선별된 이물질은 컨베이어 끝단에서 아래로 배출되며, 컨베이어 중앙의 감자는 수집함에 담길 수 있도록 Fig. 5와 같이 설계하였다.

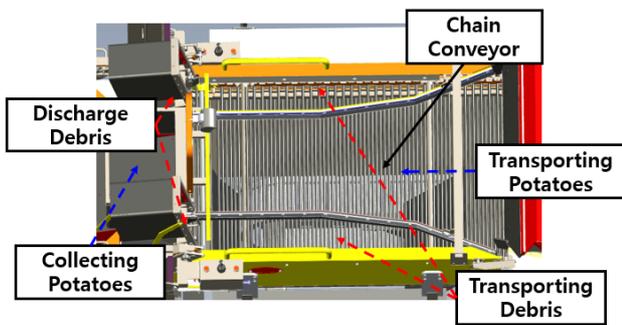


Fig. 5 3D modeling of separating part of potato harvester

2.2.4 수집부

수집부는 500 kg 톤백을 이용하여 감자를 수집할 수 있도록 하였으며, 수집 시 손상을 줄이기 위해 유압실린더를 부착하여 수집 높이를 조절할 수 있도록 하였다. 또한, 톤백 배출을 위해 톤백 받침판이 경사지게 슬라이딩 될 수 있는 구조로 Fig. 6과 같이 설계하였다.

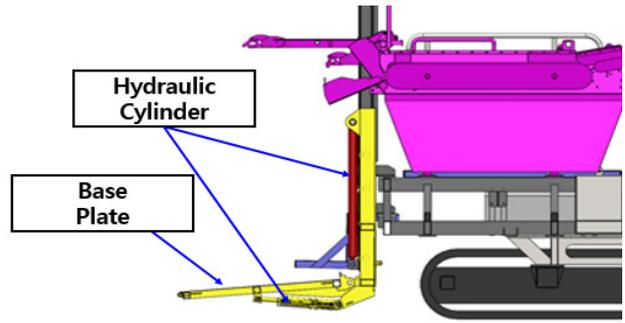
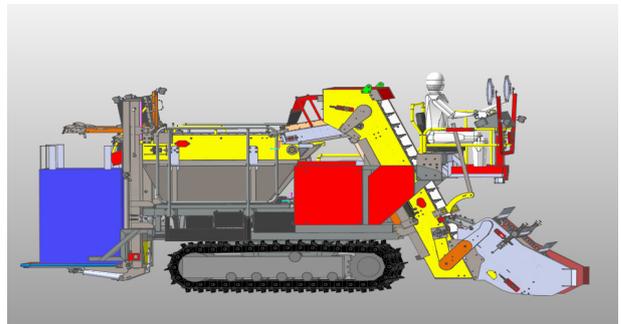


Fig. 6 3D modeling of collecting part of potato harvester

2.3 통합 시작기 제작

앞서 설계한 굴취부, 수직이송부, 선별부, 수집부를 본체 프레임에 연결하여 Fig. 7과 같이 통합시작기를 설계 및 제작하였다. 시작기는 60 hp 디젤엔진을 사용하여 무한궤도 타입으로 개발하였으며, 크기는 5,400×2,200×2,550(L×W×H, mm), 무게는 3,800 kg, 선회반경은 6,250 mm로 상세제원은 Table 1과 같다.

Table 2와 같이 소규모 농가가 많은 국내 재배환경에 적합하도록 국외에서 판매중인 대형 수확기와 비교하였을 때 소형으로 개발하였다.



(a)



(b)

Fig. 7 3D assembly (a) and Photo of prototype self-propelled type potato harvester (b)

Table 1 Specifications of prototype self-propelled potato harvester

Items		Specifications
Body	L×W×H (mm)	5,400×2,200×2,550
	Weight (kg)	3,800
Engine	Power (hp)	60
Driving Part	Type	Crawler
	Wheelbase (mm)	950
	Earth width (mm)	400
	Turning radius (mm)	6,250
Digging Part	Working width (mm)	1,300
	Digging depth (mm)	~ 300
Vertical Conveying Part	Type	Chain conveyor
	Lug	Finger Type
Separating Part	Type	Chain conveyor
	Material	Rubber
Collecting Part	Collection method	Bulk bag
	Capacity (kg)	500

Table 2 Specifications of prototype self-propelled harvester compared to foreign-made harvester

Items		Specifications	
		Prototype harvester	Foreign-made harvester
Body	L×W×H (mm)	5,400×2,200×2,550	11,557×8,636×4,064
	Weight (kg)	3,800	19,232
Engine	Power (hp)	60	370

3. 자주식 감자 수확기 성능분석

3.1 성능시험 방법

성능시험은 2023년 11월 16일 경상남도 김해시 생림면 생철리에 위치한 감자 재배포장에서 가을 감자를 대상으로 실시하였다. 시험에 사용된 감자의 품종은 수미였으며, 파종 후 약 100일이 경과한 포장에서 실험을 실시하였으며, 시험 모습은 Fig. 8과 같다.



Fig. 8 Photograph for the performance test

3.1.1 작업정밀도 실험

시작기의 작업정밀도로는 한국농업기술진흥원의 농기계 검정기준에 따라 손상률, 손실률, 이물질 혼입률을 분석하였다. 손상률은 수확된 전체 감자 중 손상된 감자의 중량 비율로 아래 식과 같다.

$$P_d = \frac{W_{dp}}{W_p} \times 100 \quad (1)$$

여기서 P_d 는 손상률, W_{dp} 는 손상된 감자의 무게, W_p 는 총 수확된 감자의 무게이다.

손실률은 작업 후 톤백으로 수확되지 못하고 손실된 감자와 작업구간 내 총 감자의 무게 비율로 아래 식과 같다.

$$P_l = \frac{W_l}{W_{pp}} \times 100 \quad (2)$$

여기서 P_l 은 손실률, W_l 은 손실된 감자의 무게, W_{pp} 는 작업 구간 내 총 감자의 무게이다.

이물질 혼입률은 톤백에 수확된 감자와 이물질 전체 무게와 이물질 무게의 중량 비율로 아래 식과 같다.

$$P_m = \frac{W_{de}}{W_p + W_{de}} \times 100 \quad (3)$$

여기서 P_m 은 이물질 혼입률, W_{de} 은 수확된 이물질의 무게, W_p 는 수확된 감자의 무게이다.

실험은 5 m 구간 작업 후 손상률, 손실률, 이물질 혼입률 3가지 항목을 조사하였으며, 총 3 반복으로 실험을 수행하였다.

3.1.2 작업능률 실험

작업능률은 실제 농가에서 사용하는 방식은 연접법을 50×20 m 포장에서 장방향으로 Fig. 9와 같이 작

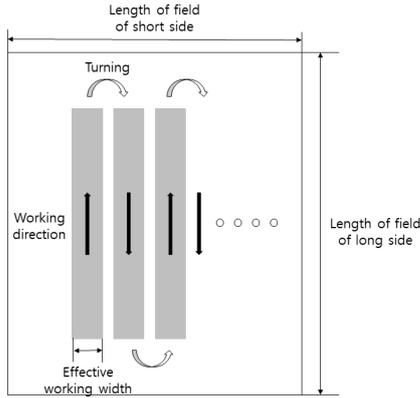


Fig. 9 Working and turning path of a prototype potato harvester¹⁾

업하였을 때의 작업능률 계산하였으며, 계산식은 아래와 같다.

$$T = \left(\frac{50}{v} + t\right) \times \frac{20}{3600b} \quad (4)$$

여기서 T 는 작업능률, v 는 작업속도, t 는 회행 시간, b 는 유효 작업폭이다.

회행 시간은 선회를 위해 작업을 정지한 시점부터 선회 후 다시 작업을 시작한 시점까지의 시간으로 총 10회 측정하여 평균하였다. 작업속도는 5 m 구간 작업에 소요되는 시간을 총 10회 측정하여 평균하였다.

3.1.3 경제성 분석

경제성분석은 트랙터부착형 굴취기를 이용하여 굴취 후 인력으로 수집하는 관행 작업방식과 시작기를 이용하여 굴취, 수집을 동시에 수행하는 방식을 비교하였다. 경제성분석은 농촌진흥청 농업과학기술 경제성 분석 기준 자료집의 기준에 따라 실시하였으며, 수리비 계수는 6%, 연이율 5%를 적용하였다¹⁴⁾. 인건비는 통계청 농가구입가격지수의 2023년 1 ~ 3분기 금액을 평균하여 적용하였으며¹⁵⁾, 연료비는 한국석유공사 오피넷의 2023년 11월 8일 기준 경유 면세유 가격을 적용하였다¹⁶⁾.

3.2 성능시험 결과

3.1.1 작업정밀도

자주식 감자 수확기의 작업정밀도를 분석한 결과는 Table 3과 같다. 시험 결과 시작기의 손상률(Damage ratio)은 2.5%, 손실률(Loss ratio)은 2.8%, 이물질 혼입률(Debris mixing ratio)은 2.6%로 나타나 한국농업기술진흥원 발작물농업기계 검정기준의 땅속

Table 3 Performance of Prototype self-propelled type potato harvester

Damage ratio (%)	Loss ratio (%)	Debris mixing ratio (%)
2.5 ± 1.64	2.8 ± 0.87	2.6 ± 0.46



Fig. 10 Photograph of collected potato

작물수확기 검정기준인 손상률, 손실률, 이물질 혼입률 5% 이내를 만족하는 것으로 나타났다.

3.1.2 작업능률

본 연구에서 새로 개발한 자주식 감자 수확기의 작업능률(Working capacity)을 분석한 결과는 Table 4와 같다. 작업 시 측정된 시작기의 평균 작업속도(Working speed)는 0.19 m/s, 회행 시간(Turning time)은 45s로 조사되어 식 4에 따른 작업능률은 1.2 h/10a로 나타났다.

Table 4 Working capacity of Prototype self-propelled type potato harvester

Working Speed (m/s)	Turning Time (s)	Working capacity (h/10a)
0.19 ± 0.031	45 ± 2.56	1.2

3.1.3 경제성

시작기의 경제성을 분석한 결과는 Table 5와 같다. 관행 트랙터부착형 굴취기를 이용하여 굴취 후 인력으로 수집하는 방식의 소요 비용(Necessary cost)은 333,874원/10a로 나타났으며, 자주식 감자 수확기 시작기를 이용하여 굴취·수집 작업을 할 경우 소요 비용은 291,544원/10a로 분석되어 시작기를 이용할 경우 관행 작업보다 12.7%의 비용 절감 효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 5 Result of economic analysis

	Prototype	Conventional		
		Tractor	Digger	human
Price (won)	65×10 ⁶	69×10 ⁶	4.5×10 ⁶	
Durability Life (year)	5	8	5	
Using hours (hr/year)	120	330	120	
Fixed Cost (won/year)	Depreciation Cost	13×10 ⁶	8.625×10 ⁶	0.9×10 ⁶
	Repair Cost	3.9×10 ⁶	4.14×10 ⁶	0.27×10 ⁶
	Interest	3.25×10 ⁶	3.45×10 ⁶	0.225×10 ⁶
	Total	20.15×10 ⁶	16.215×10 ⁶	1.395×10 ⁶
Fixed Cost (won/hr)	167,917	49,136	11,625	
		60,761		
Variable Cost (won/hr)	Labor Cost	62,575	25,766	18,405
	Fuel Cost	12,461	9,817	
	Total	75,036	35,583	18,405
Cost per hour (won/hr)	242,953	96,345	18,405	
Working Capacity (hr/10a)	1.20	0.6	15	
Necessary Cost (won/10a)	291,544	57,807	276,068	
		333,874		

4. 결론

본 연구에서는 감자 굴취에서 수집까지 수확 일관 작업에 필요한 노동력을 줄일 수 있는 자주식 감자 수확기를 설계하고 제작하였다. 또한, 개발된 시작기의 작업정밀도, 작업능률 및 경제성을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 감자 굴취에서 수집까지 동시작업이 가능한 60 hp 디젤엔진을 적용한 크롤러타입 주행부를 갖는 자주식 감자 수확기를 개발하였다. 시작기 개발을 위해 땅속의 감자를 굴취하는 굴취부, 굴취된 감자를 수집함 높이까지 이송하는 수직이송부, 수확된 감자, 이물질 중 이물질을 분리하는 선별부 및 감자를 수집하는 수집부 등 각 주요부를 설계하고 통합 시작기를 개발하였다. 시작기의 선회반경은 6,250 mm로 기존 트랙터용 감자 수확기에 비해 크게 감소하여 소규모 농가가 많은 국내 재배환경에 적합하도록 개발

하였다.

2) 시작기의 성능을 분석한 결과 손상률은 2.5%, 손실률은 2.8%, 이물질 혼입률은 2.6%, 작업능률은 1.2 h/10a로 나타나 개발된 시작기의 성능은 한국농업기술진흥원의 땅속작물수확기 검정기준에 적합한 것으로 분석되었다. 또한, 경제성분석 결과 관행 굴취 후 인력수집과 비교하였을 때 시작기를 이용할 경우 소요 비용은 12.7% 줄일 수 있어 인건비 절감을 통해 농산물 생산비를 절감할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서, 감자 수확 작업에 있어 농촌 인구 감소와 고령화로 인한 인력 부족 문제를 해결할 수 있는 대안이 될 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 연구개발사업(과제번호: RS-2021-RD009789)의 지원으로 수행되었음.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) S. H. Lee, *et al.*, “Performance Analysis of a Gathering Type Potato Harvester”, *J. of Agriculture & Life Science*, Vol.54, No.2, pp. 99-105, 2020.
- 2) Md. A. A. Siddique, *et al.*, “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, 2024.
- 3) Census of Agriculture, Forestry and Fisheries, KOSIS, 2023, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1NG0001&vw_cd=MT_ZTITL E&list_id=MT_CTITLE_m&scrId=&seqNo=&lang_m ode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITL E&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsListInd ex.do
- 4) J. K. Woo, *et al.*, “Design and Performance Evaluation of a Variable Control Type Fresh Corn Harvester”, *Journal of Drive and Control*, Vol.20, No.2, pp. 40-46, 2023.

- 5) I. S. Choi, *et al.*, “Design Manufacture and Performance Evaluation of Gathering Type Garlic Harvesting Machine”, *Journal of Drive and Control*, Vol.20, No.4, pp. 64-70, 2023.
- 6) J. K. Woo, *et al.*, “Field Test for Regional Adaptability Improvement of Garlic Harvesting Mechanization Technology”, Vol.20, No.4, pp. 107-114, 2023.
- 7) W. S. Kang, *et al.*, “Development of a potato harvester for tractors”, *J. of Biosystems Engineering*, Vol.18, No.1, pp. 21-29, 1993.
- 8) 2013 Agricultural and livestock products income source book, Rural Development Administration, 2014.
- 9) 2022 Utilization status of agricultural machinery, Rural Development Administration, 2023.
- 10) S. H. Lee, *et al.*, “Digging and transferring factorial design of experiments for developing gathering type potato harvester”, *Proceedings of Korean Society for Agricultural Machinery*, Vol.21, No.2, pp. 67, 2016.
- 11) G. C. Misener, *et al.*, “Evaluation of a prototype potato harvester”, *Transactions of the ASAE*, Vol.27, No.1, pp. 24-28, 1984.
- 12) S. H. Lee, “Development of a Prototype Potato Harvester Attached to Tractor”, Master’s Thesis, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk, 2018.
- 13) G. S. Lee, “Development of gathering type potato harvester”, MAF(Ministry of Agriculture and Forestry), Sejong, 2003.
- 14) D. H. Lee, *et al.*, “Agricultural Science and Technology Economic Analysis Standard Databook”, Rural Development Administration, Korea, 2017.
- 15) The survey of farm sales and purchase price, KOSIS, 2023, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1J62&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=P2_2&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE
- 16) The tax-free price of Diesel, Opinet, 2023, <https://www.opinet.co.kr/searRgTfSelect.do>