

RESEARCH ARTICLE

과수원 무인 제초로봇용 가변 폭 제초장치 설계 및 커버리지 향상

정희종¹, 전진택², 이대현^{2*}

¹긴트(주), ²충남대학교 농업기계공학과

Design of a Variable-Width Weeding Device for Unmanned Weeding Robot in Orchards and Coverage Improvement

Huijong Chung¹, Jintack Jeon², Dae-Hyun Lee^{2*}

¹Gint Co. Ltd., Seongnam, Republic of Korea

²Department of Agricultural Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

*Corresponding author: leedh7@cnu.ac.kr

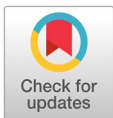
Abstract

Efficient weed control in orchards demands autonomous solutions due to labor shortages and rising operational costs. This study developed an autonomous orchard weeding robot featuring a detachable variable-width mechanism. The mechanism integrates contact-based obstacle detection to dynamically adapt to orchard environments with varying row spacings. The mechanism was designed to automatically adjust its weeding width and height, significantly enhancing coverage by reducing missed and redundant weeding areas. Field experiments conducted at two orchard sites demonstrated that, particularly in narrower working paths of 3.0 m and 4.0 m width, total weeding coverage markedly improved from approximately 87–92% (fixed-width operation) to over 99% (variable-width operation). Additionally, although the variable-width mechanism required an extra 22.7% power consumption (300W), its improved operational efficiency effectively reduced overall energy use per unit area. These results confirm that the proposed weeding system can significantly enhance both operational and energy efficiency, particularly in orchards with narrow inter-row spacing and frequent obstacles.

Keywords: Weeding robot, Variable mechanism, Orchard, Coverage, Autonomous navigation

Introduction

과수원의 제초작업은 사과와 복숭아 등 주요 과일의 생산량과 품질 유지를 위한 핵심 관리 요소



OPEN ACCESS

Journal of Agricultural Machinery Engineering
5(3):79-88

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.2025.5.3.1>

Received: August 09, 2025

Revised: August 23, 2025

Accepted: August 25, 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.

이다 (Mia et al., 2020). 잡초는 과수와 수분 및 양분을 두고 경쟁하며 군락을 형성한다 (Atay et al., 2017). 결과적으로 과실의 크기, 당도, 조직 강도와 같은 품질 지표를 유의미하게 저하시킨다 (Sharma et al., 2022). 국내에서는 관행적으로 예초기를 이용한 물리적 제초와 제초제를 이용한 화학적 제초를 병행하여 잡초를 관리하고 있다 (Bloomer et al., 2024). 물리적 제초 방식은 작업자가 장시간 장비를 운용해야 하기 때문에 노동 집약적이며, 과수원의 규모가 커질수록 작업 효율이 급격히 저하된다 (Zhang et al., 2022). 화학적 제초 방식은 초기에는 작업효율이 높지만 제초제 저항성 잡초 확산과 토양 및 수질 오염을 유발하는 등 지속 가능성 측면에서 문제가 제기된다 (Lytridis and Pachidis, 2024).

이러한 기존 방식의 한계를 극복하고 지속 가능한 잡초 관리 방안으로서 무인 제초 로봇 기술이 주목받고 있으며, 최근 국내외에서 활발한 연구 개발이 이루어지고 있다 (Xu et al., 2025). 국내에서는 센서 융합 기술을 적용하여 제초장치의 높이를 자동으로 조정하거나 (Kim et al., 2012), 지면 기복 및 장애물 인식을 통해 안정적 주행이 가능한 로봇 플랫폼 (Kim et al., 2014) 및 딥러닝 기반의 작물 위치 인식을 통해 정밀한 제초 작업을 수행하는 기술이 보고된 바 있다 (Cho et al., 2023). 해외에서는 포도원의 전기 구동 로봇이 제초장치의 형상과 위치를 실시간으로 조정하여 효율성을 높였다 (Reiser et al., 2019). 또한 RGB-D 카메라와 로봇 팔 기반 혼합형 제초 로봇 (Visentin et al., 2023) 및 레이저 기반 가변 제초장치 시스템 (Krupanek et al., 2024) 등이 상용화를 위해 개발되었다.

그러나 국내 과수원의 특수한 구조적 환경에서는 기존의 제초 로봇 기술 적용에 제한점이 있다. 대부분의 국내 과수원은 세장방추형 수형으로 인해 나무 간격이 좁고, 지면에는 10–30 cm 높이의 두둑과 관수 파이프, 지주 기둥 등 장애물이 밀집되어 있다 (Choi et al., 2023). 이에 기존의 고정 폭(1.5–1.8 m) 제초장치로는 약 4 m 내외의 작업 통로 전체를 효과적으로 제초하기 어렵고, 나무 근주 주변 및 두둑 경계부의 접근성 문제로 미제초 구역이 발생한다 (Sampurno et al., 2024). 결국 잔여 잡초 제거를 위한 반복 주행 또는 추가 인력 투입으로 인해 운영 비용과 에너지 소모가 증가하는 문제가 발생한다 (Yaseen and Long, 2024).

본 연구는 접촉 센서 기반으로 장애물을 자동으로 회피할 수 있는 탈부착형 가변 폭(variable-width) 제초장치를 설계하였다. 이를 기존의 무인 제초 로봇 플랫폼에 탑재하고, 국내 과수원 환경에서 현장 평가를 수행하였다. 개발된 가변형 제초장치는 기존의 고정된 주 제초부와 보조 제초부로 구성된다. 보조 제초부는 장애물과의 접촉 시 자동으로 접혔다가 장애물 통과 후 즉시 원래 위치로 복귀하도록 설계되었으며, 이를 통해 장애물 주변 및 두둑 경계부의 제초 커버리지를 향상시킬 수 있다.

본 연구의 목표는 다음과 같다.

- 1) 가변 폭 제초장치의 적용에 따른 제초 커버리지(%) 향상 효과 정량적 평가
- 2) 작업 경로 폭에 따른 제초 중복도(%) 저감 효과 및 최적 작업 조건 제안
- 3) 가변 폭 제초장치의 에너지 효율성 분석 및 운영 효율성 평가

본 연구의 결과는 국내 과수원의 제초 작업 효율성을 실질적으로 향상시키고 지속 가능한 잡초 관리에 기여할 것으로 기대된다.

Materials and Methods

제초로봇 시스템 구성

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 무인 제초로봇 플랫폼 (KFM-O2000, Koreatriaxle Co. Ltd., Korea)의 주요 구성 요소를 나타낸다. 플랫폼의 주행부는 RTK-GNSS (TDR-3000, Synerex, Korea) 기반 위치측정 장치, 주행 제어 컨트롤러 (NOVA-L, Hetronic

International, USA) 및 BLDC 모터 구동 시스템(Lunyee Industries Co. Ltd., China)으로 구성되어 있다. 동력 전달을 위한 감속기는 하이포이드 방식의 헬리컬-베벨 기어(NMRV, Motovario, Italy)를 적용하였다. 제초 작업을 위한 제어부는 플랫폼 중앙에 설치된 고정식 주 제초부로 구성되어 있으며, 4개의 예초날이 장착되어 1800 mm의 고정된 작업폭을 제공한다. 가변형 보조 제초부는 플랫폼 한쪽 측면에 탈부착 가능한 모듈 형태로 설치되며, 전동식 액추에이터(TA2 series, TiMOTION, Taiwan)를 통해 사용자가 설정한 높이와 작업폭으로 독립적으로 조정된다. 보조 제초부 전면에 장착된 접촉 센서는 장애물 감지 시 즉시 보조 제초부가 접히고, 장애물 통과 후 자동으로 원래 위치로 복귀하도록 설계되었다. 주 제초부와 보조 제초부의 회전 구동은 모두 48V BLDC 모터로 이루어지며, 제초장치의 회전 속도는 3600 RPM으로 설정하였다. 로봇 플랫폼 및 제초 시스템의 상세 제원은 Table 1에 정리하였다.

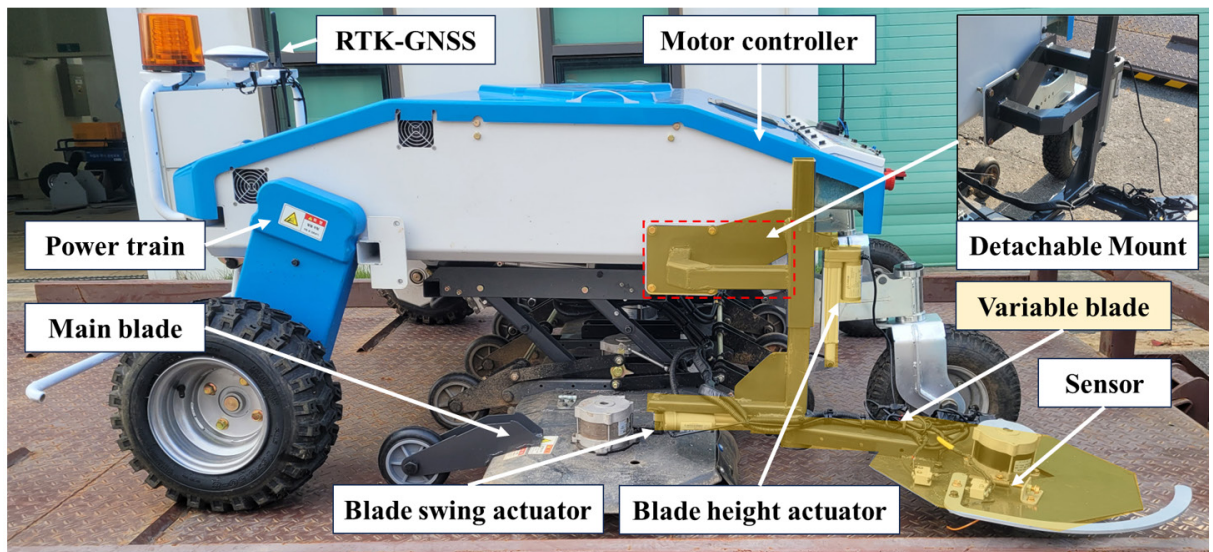


Fig. 1. Main components of the autonomous orchard weeding robot platform

Table 1. Specifications of autonomous orchard robot platform and weeding system

Classification	Description	Specification
Robot platform	Dimension (L x W x H)	1400 x 1520 x 930 mm
	Weight	430 kg
	Payload	Max. 500 kg
	Driving speed	Max. 4 km/h
	BLDC motor	2 kW (48 V) 3000 rpm (2ea)
	Reducer ratio	55:1 (55-wheel rpm @ 2700 motor rpm)
	Battery	Li-ion 50.8 V, 150 Ah (2ea) (7.5 kWh)
Weeding system	Main blade width	1800 mm
	Variable blade width	450 mm (Max. total 2250 mm)
	Number of weeding motors	5 (main: 4, variable: 1)
	Variable mechanism	Electric actuator
	Sensor	Contact sensor

가변 폭 제초장치 메커니즘

Fig. 2는 본 연구에서 설계한 가변 폭 제초장치의 측면 구성도를 나타낸다. 가변형 보조 제초부는 전동식 액추에이터로 높이를 조절할 수 있으며, 조정 가능 범위는 최소 100 mm에서 최대 400 mm이다. 이 높이 조정 범위는 국내 일반적인 사과 과수원의 두둑 높이가 약 100 mm에서 300 mm 사이로 구성되어 있는 환경적 특성을 고려하여 설정하였다. 또한 보조 제초부는 최대 450 mm까지 추가적으로 작업폭을 확장 가능하며, 전체 작업폭을 최대 2250 mm까지 확보할 수 있다. 이러한 설계를 통해 두둑과 같이 지면의 높이가 불균일한 환경에서도 일정한 제초부 높이를 유지하며 안정적인 제초 작업이 가능하도록 하였다.

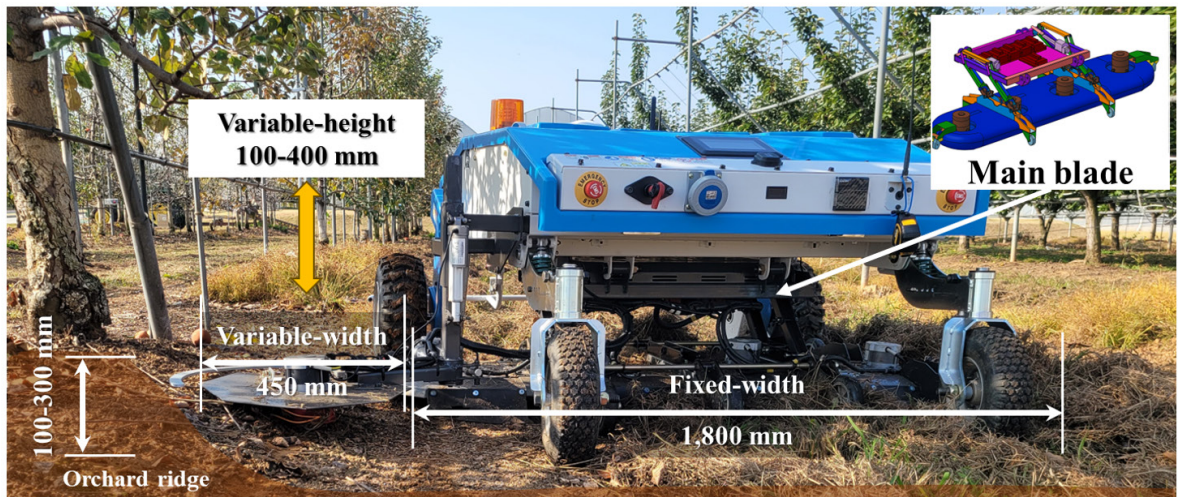


Fig. 2. Side-view illustration of variable-width weeding mechanism with orchard ridge

Fig. 3은 본 연구에서 개발한 가변 폭 제초장치의 작동 메커니즘을 나타낸 개략도이다. 가변 제초부 전면에 설치된 접촉식 범퍼 센서는 나무 근주와 같은 장애물과의 접촉을 실시간으로 감지한다. 장애물 접촉이 발생하면 범퍼 센서의 변위가 발생하며, 가변 제초부는 이 변위량에 비례하여 회전축을 중심으로 일정 각도(θ)만큼 접히게 된다. 제초로봇이 장애물을 완전히 통과하여 접촉이 해제되면, 가변 제초부는 다시 초기 위치로 복귀하여 제초 작업을 지속하게 된다. 범퍼 센서 변위(Δx)와 가변 제초부의 회전 각도(θ) 간의 비례 관계는 다음 수식으로 정의하였다.

$$\theta = k \cdot \Delta x \quad (1)$$

여기서 k 는 장치의 기구적 설계에 따라 실험적으로 결정되는 비례상수이며, 범퍼 센서 변위에 따른 가변 제초부 회전각의 민감도를 나타낸다. 본 연구에서는 범퍼의 최대 변위량과 가변 제초부의 최대 회전각을 실험적으로 측정하여 비례상수 값을 도출하였다.

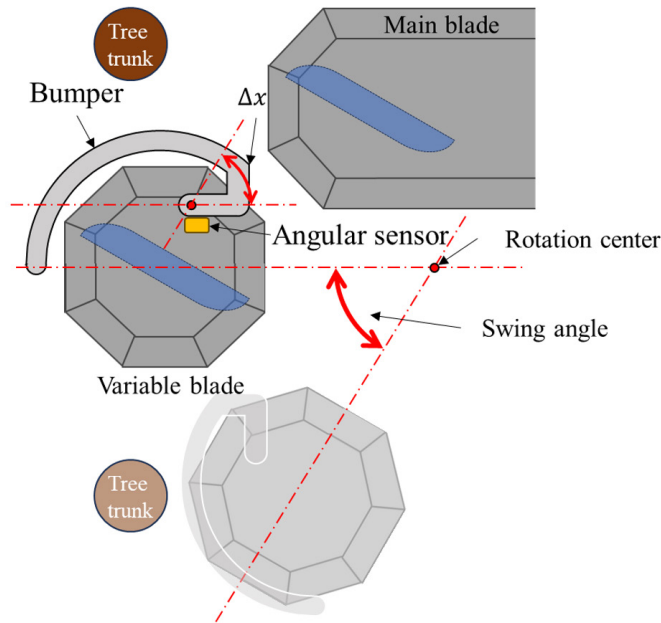


Fig. 3. Mechanism illustrating the dynamic rotational response of the variable-width weeding device based on bumper sensor displacement

실험 환경 및 평가 방법

본 연구에서 개발한 가변형 제초장치의 현장 적용성과 성능을 평가하기 위하여 국내 사과 과수원 두 곳에서 현장 실험을 수행하였다. 두 실험 대상지는 국내 사과 재배에서 널리 이용되는 수형으로 조성되었으나, 재배 방식과 환경 조건에서 차이가 있다. Fig. 4(a)의 충청북도농업기술원 사과 과수원 (시험면적 150 m²)은 다축 수형으로 구성되었으며, 나무 간의 작업 통로 폭은 3.0–3.5 m로 좁고, 지주대 및 관수 파이프 등 다양한 장애물이 존재하여 제초 작업이 어려운 환경을 갖추고 있다. 반면 Fig. 4(b)의 국립원예특작과학원 사과 과수원(시험면적 500 m²)은 세장방추형으로 구성되어 있으며, 나무 간의 통로 폭은 4.0–4.5 m로 넓고, 상대적으로 평탄하며 장애물의 밀도가 낮다.

각 시험 포장에서 로봇 플랫폼의 주행 경로는 RTK-GNSS 기반의 경로 생성 시스템을 이용하여 미리 계획하였다. 경로 설정은 실제 농업 현장에서 주로 사용되는 왕복 주행 전략을 따랐으며, 모든 시험 조건에서 왕복 2회로 설정하였다. 로봇 플랫폼의 주행 속도는 실험의 일관성을 확보하기 위해 평균 2.3 km/h로 일정하게 유지하였다. 실제 로봇 주행 궤적은 RTK-GNSS 데이터를 통해 실시간으로 기록하였다. 실험 조건으로는 충청북도농업기술원 과수원에서 작업 경로 폭을 각각 3.0 m (경로 A), 3.5 m (경로 B)로 설정하였으며, 국립원예특작과학원 과수원에서는 작업 경로 폭을 각각 4.0 m (경로 C), 4.5 m (경로 D)로 설정하였다.

가변형 제초장치의 적용 효과를 정량적으로 분석하기 위해 제초 커버리지(Weeding Coverage, C), 중복도(Overlap, O), 추가 커버리지 향상폭(Incremental Coverage, ΔC), 그리고 에너지 소비 효율성 지수(Energy Cost Index, ECI)를 성능 지표로 사용하였다. 제초 커버리지는 식 1과 같이 전체 작업 대상 면적(A_{total})에 대한 실제 제초된 면적(A_{weeded})의 비율로 정의하였고, 중복도는 식 2와 같이 실제 제초된 면적 중에서 2회 이상 작업이 수행된 중복 면적($A_{overlap}$)의 비율로 산출하여 작업의 완성도와 효율성을 평가하였다.

$$C = \frac{A_{weeded}}{A_{total}} \cdot 100 (\%) \quad (2)$$

여기서, C 는 제초 커버리지(%), A_{weeded} 는 실제 제초된 면적(m^2), A_{total} 는 전체 작업 대상 면적(m^2)이다.

$$O = \frac{A_{\text{overlap}}}{\text{Actual weeded area}} \cdot 100 (\%) \quad (3)$$

여기서, O 는 중복도(%), A_{overlap} 는 중복 면적(m^2), A_{weeded} 는 실제 제초된 면적(m^2)이다. 또한, 가변형 제초장치 추가에 따른 성능 향상분을 평가하기 위해 추가 커버리지 향상폭(ΔC)을 식 4와 같이 정의하였다. 가변형 장치 운용의 에너지 효율성은 식 5와 같이 에너지 소비 효율성 지수(ESI)로 평가하였다. 이때 가변형 제초장치의 모터(300W) 추가로 인한 추가 에너지 소모(ΔE)은 전체 시스템 소비 전력 대비 약 22.7%로 계산되었으며, ESI 값이 낮을수록 에너지 효율성이 높음을 의미한다.

$$\Delta C = C_{\text{variable}} - C_{\text{fixed}} \quad (4)$$

여기서, ΔC 는 추가 커버리지 향상폭(%), C_{variable} 는 가변형 적용 커버리지(%), C_{fixed} 는 고정형 커버리지(%)이다.

$$ESI = \frac{\Delta E}{\Delta C} \quad (5)$$

여기서, ESI는 에너지 소비 효율성 지수, ΔE 는 추가 에너지 소모율(22.7%), ΔC 는 추가 커버리지 향상폭(%)이다. 각 실험 조건(경로 A, B, C, D) 별로 총 3회의 반복 실험을 수행하였으며, 최종 성능 평가 결과는 평균값과 표준편차로 나타내고, 과 수원의 환경 조건에 따른 성능 차이는 통계적 분석을 통해 검정하였다.

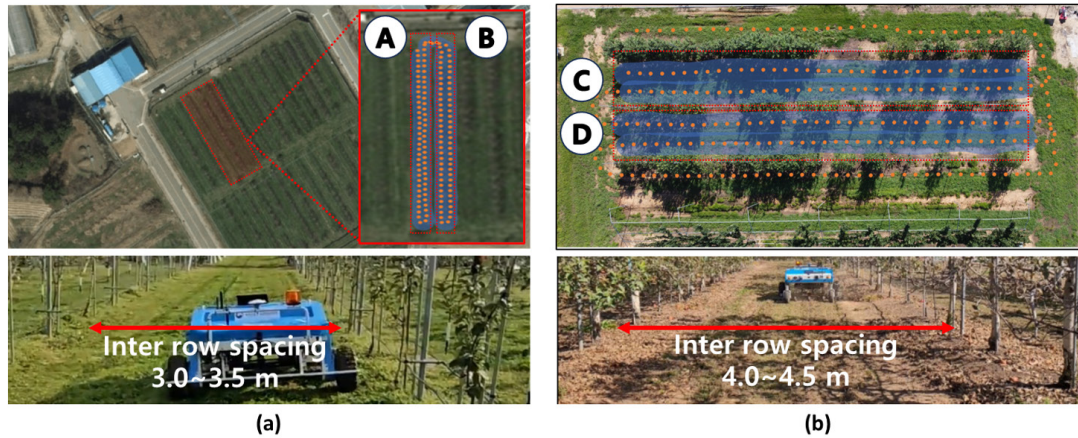


Fig. 4. Experimental orchards and driving route strategies: (a) Chungcheongbuk-do Agricultural Research & Extension Services (orchard width: 3.5 m), (b) National Institute of Horticultural and Herbal Science (orchard width: 4.0 m)

Results and Discussion

제초작업 커버리지 성능 평가

본 연구에서 개발한 가변형 제초장치의 제초 성능은 두 곳의 과수 시험 포장에서 작업 경로의 폭을 달리하여 평가하였다. 가변형 제초장치 적용 전후의 커버리지 및 중복도는 Fig. 5에 시각적으로 나타냈으며, 그 정량적 결과는 Table 2에 요약하였다.

충청북도농업기술원 시험 포장(A, B 경로)에서는 작업 경로 폭에 따라 가변형 제초장치의 성능 차이가 나타났다. 작업 폭을 3.0 m로 설정한 A 경로에서는 고정식 제초장치만 운용 시 87.36%의 커버리지와 17.21%의 중복도를 보여 미제초 및 중복 영역이 많았다. 가변 제초장치를 추가 운용 시 총 커버리지가 99.83%로 증가하였다. 반면, 작업 폭을 3.5 m로 설정한 B 경로는 고정식 장치만으로도 이미 92.29%의 높은 커버리지와 0.21%의 매우 낮은 중복도를 나타냈다. 따라서 가변 제초장치 추가 운용으로 얻을 수 있는 추가 커버리지는 2.97%로 제한적이었다.

국립원예특작과학원 시험 포장(C, D 경로)에서도 유사한 경향이 관찰되었다. 작업 폭 4.0 m의 C 경로는 고정식 장치만으로도 92.43%의 커버리지와 5.83%의 중복도를 보였다. 하지만 가변 제초장치를 추가 운용했을 때 총 커버리지가 99.97%까지 증가하여, 미제초 영역이 효과적으로 보완됨을 확인하였다. 작업 폭 4.5 m의 D 경로에서는 고정식 장치만으로도 91.70%의 높은 커버리지와 0.26%의 낮은 중복도를 나타냈다. 가변 장치를 추가했을 때 확보된 추가 커버리지는 6.11%로, 최종 커버리지는 97.81%였다.

이러한 결과를 종합하면, 가변형 제초장치의 효과는 고정식 제초장치의 실제 작업 폭 대비 작업 경로의 폭 설정에 따라 달라진다. 즉, 실제 작업 폭 대비 좁은 작업 폭으로 인해 미제초 영역과 중복 영역이 많을수록 가변장치의 효과는 뚜렷했다. 반대로 고정식 제초장치의 작업 폭이 최적화되어 중복 영역이 이미 줄어든 경우에는 추가 효과가 제한적으로 나타났다. 그러나 모든 시험 경로에서 가변형 제초장치는 일정 수준 이상의 추가 커버리지를 확보했다. 이는 고정식 제초장치 운용에서 불가피한 중복 작업과 인력 투입을 최소화함으로써 전체 작업 효율성과 운영 효율성을 향상하는 데 기여할 수 있음을 의미한다 (Jia et al., 2025).

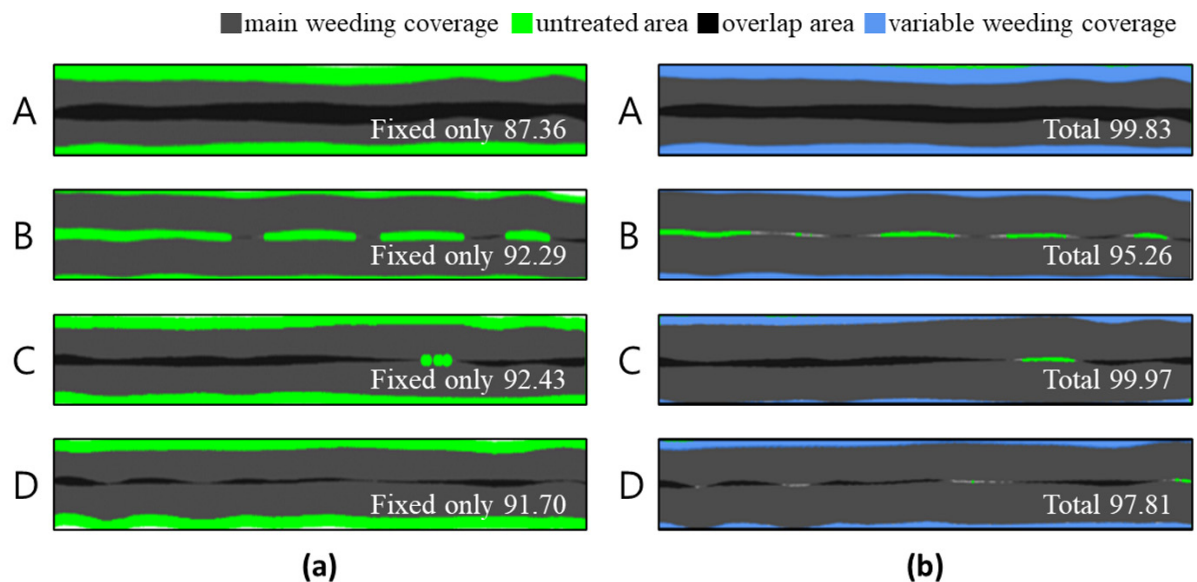


Fig. 4. Visualization of weeding coverage under two operation modes: (a) fixed-width only operation, and (b) combined operation with variable-width blade

Table 2. Summary of weeding performance for fixed-width and variable-width blade configurations across four driving path scenarios

Route	Fixed-width coverage (%)	Fixed-width overlap (%)	Variable-width coverage (%)	Total coverage (%)
A	87.36	17.21	27.67	99.83
B	92.29	0.21	2.97	95.26
C	92.43	5.83	12.61	99.97
D	91.70	0.26	6.11	97.81

가변 폭 제초장치의 효율 분석

가변형 제초장치의 효율성은 추가적인 제초 커버리지 향상과 이에 따른 추가 에너지 소비량을 비교하여 평가하였다. Table 3은 네 가지 작업 경로(A, B, C, D)별 가변형 제초장치의 추가 커버리지 향상폭과 그에 따른 추가 에너지 소비의 효율성을 분석한 결과이다.

평가 결과, 추가 커버리지 효과가 가장 컸던 A 경로의 경우 에너지 효율성이 가장 우수하게 나타났다. 이는 작업 경로 폭 (3.0 m)이 고정식 제초장치의 실제 작업 폭보다 좁아 미제초 및 중복 제초 영역이 많았기 때문이다. 따라서 가변형 제초장치의 추가 운용이 상대적으로 적은 에너지 소모로 높은 커버리지 향상을 달성한 효율적 사례로 평가된다.

반면, B 경로는 고정식 제초장치만으로도 높은 커버리지(92.29%)와 낮은 중복도(0.21%)를 보였다. 따라서 가변장치를 추가했을 때 확보 가능한 추가 커버리지는 2.97%로 제한적이었다. 이 경우 추가 커버리지 확보를 위한 에너지 소모량이 상대적으로 높아 효율성 지수가 가장 낮게 나타났다. 즉, 기존 고정식 제초장치로도 충분한 성능을 확보한 환경에서는 가변 장치의 효율성이 상대적으로 떨어진다는 것을 보여준다.

C와 D 경로는 추가 커버리지 확보 효과가 각각 7.54%와 6.11%로 중간 수준이었으며, 이에 따른 에너지 효율성 역시 A와 B 경로의 중간 정도로 나타났다. 이는 실제 제초작업에서 가변형 제초장치의 효율성이 작업 경로 폭 설정과 기존 고정식 장치의 커버리지 성능에 크게 의존함을 시사한다.

가변 폭 제초장치를 운용할 경우, 기존 고정식 장치(모터 4개, 총 1,200W)에 모터 1개(300W)가 추가되어 약 22.7%의 추가 전력 소모가 발생하였다. 그러나 추가된 에너지 소모에도 불구하고 가변 폭 장치의 운용으로 미제초 및 중복 제초 영역이 크게 감소하였다. 그 결과, 동일한 배터리 용량과 작업 시간 조건에서 단위 시간당 제초 가능한 면적이 더 증가하였다. 따라서 전체 작업 면적 대비 단위 면적당 소모되는 에너지는 감소하였으며, 이는 제한된 에너지와 운영 시간을 효율적으로 활용해야 하는 실제 농업 현장에서 중요한 의미를 가진다. 최근의 농업 로봇 연구에서도 절대적인 전력 소비량보다 단위 에너지 투입량 대비 실질적인 작업 성능과 품질을 극대화하는 운용 전략의 중요성을 강조하고 있다(Bras et al., 2024; Soleimani, 2024).

종합적으로 가변형 제초장치는 미제초 영역이 많은 좁은 작업폭 환경에서 높은 에너지 효율성과 커버리지 향상을 동시에 달성할 수 있는 효과적 수단이다. 하지만 이미 충분한 커버리지 성능이 확보된 환경에서는 효율성이 떨어질 수 있으므로, 실제 과수원의 작업 환경을 면밀히 분석하여 작업 경로 폭 설정과 가변형 제초장치의 운용 전략을 최적화하는 것이 중요하다.

Table 3. Incremental coverage and energy efficiency when adding a variable-width blade

Route	Δ Coverage (%p)	Energy Cost Index ($\Delta E/\Delta C$) *
A	12.47	1.82
B	2.97	7.64
C	7.54	3.01
D	6.11	3.71

* Energy Cost Index ($\Delta E/\Delta C$) = Additional energy consumption rate (22.7%) divided by Δ Coverage; lower values indicate better energy efficiency.

Conclusion

본 연구에서는 접촉 센서 기반 가변 폭 제초장치를 탑재한 무인 제초 로봇을 개발하여 과수원 제초작업의 효율성을 향상시켰다. 가변 폭 제초장치는 고정식 제초장치 대비 최대 12.47%p의 추가 커버리지를 확보하여 전체 제초 커버리지를 99.83%까지 향상시켰다. 특히 작업 경로 폭이 실제 제초부의 작업 폭보다 좁은 환경에서 미제초 영역과 중복 제초 영역을 효과적으로 감소시켜 높은 성능 개선을 달성하였다.

에너지 효율성 측면에서 가변 폭 장치는 22.7%의 추가 전력을 소모하였으나, 단위 면적당 에너지 소비는 오히려 감소하여 제한된 배터리 용량으로 더 넓은 면적의 제초작업이 가능함을 확인하였다. 이러한 결과는 농업 자동화 시스템의 에너지 효율적 운용 전략 수립에 실질적으로 기여할 것으로 기대된다.

향후 가변 폭 제초장치의 자동 제어 알고리즘 정밀화와 다양한 과수원 환경에서의 장기 성능 평가를 통해 시스템을 고도화할 계획이다. 나아가 방제, 수확, 적과 등 다양한 농작업으로 기술을 확장하여 통합적인 과수원 자동화 시스템 구축을 목표로 한다. 본 연구의 성과는 노동력 부족 문제를 겪는 국내 과수 농가의 생산성 향상과 지속가능한 농업 발전에 기여할 것으로 기대된다.

Acknowledgements

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ015595012023)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Mia, M.J., Massetani, F., Murri, G., Facchi, J., Monaci, E., Amadio, L., Neri, D., 2020. Integrated weed management in high density fruit orchards. *Agronomy*. 10, 1492. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101492>.
- Atay, E., Gargin, S., Esitken, A., Guzel, N., Atay, A., Altindal, M., Senyurt, H., Emre, M., 2017. The effect of weed competition on apple fruit quality. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 45, 120. <https://doi.org/10.15835/nbha45110556>.
- Sharma, A., Rana, M., Rana, S., Upadhyay, S., Negi, N., Sankhyan, N., Manuja, S., Sankhyan, N., 2022. Effect of orchard floor management practices on weed population and fruit quality and yield of peach [*Prunus persica* (L.) Batsch]. *Himachal Journal of Agricultural Research*. 48, 31-36. <https://www.researchgate.net/publication/363349547>.
- Bloomer, D.J., Harrington, K.C., Ghanizadeh, H., James, T.K., 2024. Robots and shocks: Emerging non-herbicide weed control options for vegetable and arable cropping. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 67, 81-103. <http://dx.doi.org/10.1080/00288233.2023.2252769>.
- Zhang, W., Miao, Z., Li, N., He, C., Sun, T., 2022. Review of current robotic approaches for precision weed management. *Current Robotics Reports*. 3, 139-151. <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00086-5>.
- Lytridis, C., Pachidis, T., 2024. Recent advances in agricultural robots for automated weeding. *AgriEngineering*. 6, 3279-3296. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030187>.
- Xu, H., Li, T., Hou, X., Wu, H., Shi, G., Li, Y., Zhang, G., 2025. Key technologies and research progress of intelligent weeding robots. *Weed Science*. 73, e25. <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.95>.

- Kim, G.H., Kim, S.C., Hong, Y.K., Han, K.S., Lee, S.G., 2012. A robot platform for unmanned weeding in a paddy field using sensor fusion. 2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE).904-907. <https://doi.org/10.1109/CoASE.2012.6386466>.
- Kim, G.-H., Kim, S.-C., Hong, Y.-K., 2014. Traveling performance of a robot platform for unmanned weeding in a dry field. *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*. 31, 43-50. <https://doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.1.43>.
- Cho, S., Lee, C., Jeong, H., Kang, S., Lee, D., 2023. Estimation of two-dimensional position of soybean crop for developing weeding robot. *Journal of Drive and Control*. 20, 15-23. <https://doi.org/10.7839/ksfc.2023.20.2.015>.
- Reiser, D., Sehsah, E.-S., Bumann, O., Morhard, J., Griepentrog, H.W., 2019. Development of an autonomous electric robot implement for intra-row weeding in vineyards. *Agriculture*. 9. <https://doi.org/10.3390/agriculture9010018>.
- Visentin, F., Cremasco, S., Sozzi, M., Signorini, L., Signorini, M., Marinello, F., Muradore, R., 2023. A mixed-autonomous robotic platform for intra-row and inter-row weed removal for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 214, 108270. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108270>.
- Krupanek, J., Santos, P., Emmi, L., Wollweber, M., Sandmann, H., Scholle, K., Tran, D., Schouteten, J., Andreasen, C., 2024. Environmental performance of an autonomous laser weeding robot—a case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 29, 1-32. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-024-02295-w>.
- Choi, B.-H., Kim, C.-S., Jeong, Y.-J., Jeon, J.-H., Shin, B.-Y., Yoon, T.-M., 2023. Configuration of the tree shape in a bi-axis apple orchard using ‘fuji’/m.9 grafted plants – tree growth and productivity during early years according to the planting distance. *Horticultural Science and Technology*. 41, 560-570. <https://doi.org/10.7235/HORT.20230048>.
- Sampurno, R.M., Liu, Z., Abeyrathna, R.M.R.D., Ahamed, T., 2024. Intrarow uncut weed detection using you-only-look-once instance segmentation for orchard plantations. *Sensors*. 24. <https://doi.org/10.3390/s24030893>.
- Yaseen, M.U., Long, J.M., 2024. Laser weeding technology in cropping systems: A comprehensive review. *Institution*, <https://doi.org/10.3390/agronomy14102253>.
- Jia, W., Tai, K., Dong, X., Ou, M., Wang, X., 2025. Design of and experimentation on an intelligent intra-row obstacle avoidance and weeding machine for orchards. *Agriculture*. 15. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090947>.
- Bras, A., Montanaro, A., Pierre, C., Pradel, M., Laconte, J., 2024. Toward a better understanding of robot energy consumption in agroecological applications. Preprint at: arXiv:2410.07697. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.07697>.
- Soleimani, A., 2024. The soft computing approaches in optimising multi-objective mechanical design of a weeding robot. *Smart Agricultural Technology*. 9, 100674. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100674>.