

작물의 생리적 반응 피드백을 이용한 감각기반 지능형 수직농장 제어에 대한 연구

(A Study on Sensory-Based Intelligent Vertical Farm Control Using Physiological Response Feedback from Crops)

전진효*, 김현준*, 이명훈**

(Jeon Jin Hyo*, Kim Hyun Jun*, Lee Meong Hun**)

요약

본 연구는 수직농장의 에너지 낭비와 제어 비효율 문제를 해결하기 위해 작물의 생리적 반응을 직접 피드백 신호로 활용하는 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘을 제안하였다. RGB, 열화상 스펙트럼 센서로부터 엽온, 엽색, NDVI 등의 생리적 지표를 실시간으로 수집하고, 이를 환경 센서(온도, 습도, CO_2 , 조도) 데이터와 융합하여 작물의 생리 상태를 판단하였다. 제어 알고리즘은 정상·스트레스·광포화·스트레스·광포화 상태로 분류된 결과에 따라 조명, 냉난방, 급액 등의 장비를 지능적으로 운용하였다. 순천대학교 수직농장 실증 환경에서 수행된 결과, 제안한 알고리즘은 기존 임계값 기반 제어 대비 LED 조명 27.8%, 냉난방 19.4%, 급액 펌프 31.2%의 에너지 절감 효과를 보였으며, 전체 전력 소비량은 평균 23.6% 감소하였다. 또한 엽온이 평균 1.2°C 낮아지고 NDVI 값이 향상되어 작물의 광합성 효율 및 생육 안정성이 개선되었다. 본 연구는 수직농장의 제어 패러다임을 환경 중심에서 작물 상태 기반 피드백 제어 구조로 확장하였다는 점에서 의의가 있다. 향후에는 강화학습 기반 제어 모델과 멀티 피드백 루프 구조를 적용하여 다양한 작물과 환경 조건에서도 자율적으로 적용 가능한 지속기능형 스마트 수직농장 모델로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

■ 중심어 : 작물 상태 기반 피드백 제어 ; 수직농장 ; 생리반응 ; 에너지 절감 ; 지능형 제어 알고리즘

Abstract

This study proposes a crop-state-based feedback control algorithm that utilizes crop physiological responses as direct feedback signals to address energy waste and control inefficiency issues in vertical farms. Physiological indicators such as leaf temperature, leaf color, and NDVI were collected in real-time from RGB, thermal imaging, and spectral sensors. These were fused with environmental sensor data (temperature, humidity, CO_2 , illuminance) to determine the physiological state of the crops. The control algorithm intelligently operated equipment such as lighting, heating/cooling, and irrigation based on the results classified into normal, stress, light saturation, and stress+light saturation states. Results from the pilot environment at Suncheon National University's vertical farm demonstrated that the proposed algorithm achieved energy savings of 27.8% for LED lighting, 19.4% for heating/cooling, and 31.2% for irrigation pumps compared to existing threshold-based control. Overall power consumption decreased by an average of 23.6%. Additionally, leaf temperature decreased by an average of 1.2°C, and NDVI values improved, enhancing crop photosynthetic efficiency and growth stability. This study is significant in expanding the control paradigm of vertical farms from an environment-centric approach to a crop-condition-based feedback control structure. Future work is expected to advance this into a sustainable smart vertical farm model capable of autonomous adaptation across diverse crops and environmental conditions by applying reinforcement learning-based control models and multi-feedback loop structures.

■ keywords : Crop Condition-Based Feedback Control ; Vertical farm ; Physiological response ; Energy efficiency ; Intelligent control algorithm

I. 서 론

최근 농업 현장은 인구 감소와 기후변화로 인해 안정적

* 준회원, 국립순천대학교 스마트농업공학과

* 정회원, 국립순천대학교 스마트농업전공

** 정회원, 국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과

본 과제는 2025년도 교육부 및 전라남도의 재원으로 전라남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(2025-RISE-14-003)

접수일자 : 2025년 10월 17일

수정일자 : 2025년 11월 18일

제재확정일 : 2025년 11월 24일

교신저자 : 이명훈 e-mail : leemh777@scnu.ac.kr

인 식량 생산이 어려워지고 있으며, 이에 대한 대안으로 밀폐형 환경제어가 가능한 수직농장(vertical farm)이 빠르게 확산되고 있다. 수직농장은 외부 기후의 영향을 받지 않고 연중 재배가 가능하다는 점에서 미래형 농업의 핵심 인프라로 주목받고 있으며, LED 광원, 냉난방, 양액공급, 환경제어 등 첨단 ICT 기반 장비를 활용하여 생산성을 극대화하고 있다[1][2]. 그러나 현재의 수직농장 운영은 대부분 온도, 습도, 조도, CO_2 농도 등 일정한 환경변수를 기준으로 장비를 제어하는 설정값 기반의 단순 자동화 구조에 머물러 있다[3]. 이러한 방식은 작물의 실제 생리적 상태를 고려하지 못하기 때문에, 에너지 낭비와 생산 효율 저하의 주요 원인으로 작용하고 있다[4][5].

기존의 수직농장 제어 연구는 조명 효율 개선, 냉난방 최적화, CO_2 공급량 조절 등 개별 설비 중심의 기술 개발에 집중되어 왔다. 일부 연구에서는 IoT 센서를 활용한 환경 모니터링 및 자동제어 시스템을 구축하여 제어 효율을 향상시키고자 하였으나, 여전히 각 제어 요소를 독립적으로 운영하거나 시간 기반으로 단순 제어하는 수준에 머물러 있다. 이러한 접근은 작물의 생리적 반응, 즉 엽온, 기공 개폐율, 엽록소 농도 등의 생리 지표가 환경 제어에 직접 반영되지 못한다는 한계를 지닌다. 그 결과, 광합성이 이미 포화된 상태에서도 LED 조명이 지속적으로 작동하거나, 작물이 생리적으로 안정 상태임에도 냉난방과 급액이 불필요하게 수행되는 사례가 빈번히 발생한다. 이는 수직농장의 높은 에너지 부하를 가중시키고, 장비의 구동 효율 저하 및 운영비 증가로 이어질 수 있다[6].

이러한 문제를 해결하기 위해서는 환경 데이터 중심의 제어가 아닌 작물의 생리적 반응 데이터를 직접 피드백 신호로 활용하는 지능형 제어 알고리즘이 요구된다. 최근 RGB 열화상, 스펙트럼 센서 등 다양한 비파괴적 계측 기술의 발전으로 작물의 생리적 상태를 정량적으로 관찰할 수 있는 기반이 마련되어 있다. 이를 활용하면 작물의 실제 상태에 따라 조명·냉난방·양액 공급 장비의 동작을 실시간으로 조정할 수 있으며, 이는 곧 불필요한 에너지 소비를 최소화하고 생육 효율을 극대화하는 방향으로 이어진다. 특히, 식물의 생리적 반응은 외부 환경 변화보다 더 직접적인 생육 지표이므로, 이를 제어 알고리즘의 핵심 입력으로 활용할 경우 '식물이 스스로 제어를 유도하는 자율형 수직농장'으로 진화할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

본 연구는 이러한 관점에서, 작물의 생리적 반응을 감지하고 이를 피드백 신호로 활용하여 수직농장의 각 장비를 자동 제어하는 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘을 설계하는 것을 목적으로 한다. 제안하는 알고리즘은 RGB 및 열화상 센서를 통해 획득한 생리 반응 데이터를 기반으로 작물의 생육 상태를 판별하고, 이에 따라 LED 광량, 냉난방,

급액 시스템을 자동으로 운용하도록 설계한다. 이를 통해 기존 설정값 기반 제어 방식에서 발생하던 에너지 과소·과잉 제어 문제를 개선하고, 수직농장의 운영 효율성과 지속 가능성 향상시키는 새로운 제어 패러다임을 제시하고자 한다. 본 논문의 구성을 다음과 같다. 2장에서는 관련 기술과 선행연구를 검토하고, 3장에서는 제안하는 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘의 설계 구조와 동작 절차를 기술하며, 4장에서는 알고리즘의 에너지 절감 효과와 제어 효율을 분석하며, 끝으로 5장에서는 결론 및 향후 연구 방향을 제시하며 마친다.

II. 수직농장 기술 현황 분석

1. 수직농장 제어 기술의 발전 저해 요소

수직농장은 밀폐형 환경제어를 통해 외부 기후에 영향을 받지 않고 연중 생산이 가능한 첨단 농업 시스템으로, 초기에는 조명, 냉난방, CO_2 공급 등 개별 장비의 성능 향상에 초점이 맞춰져 있었다. 이후 IoT 센서 네트워크를 활용한 환경기반 자동제어(Environment-driven Control) 방식이 등장하여 온도, 습도, 조도 등의 환경 변화를 실시간으로 감지하고 제어하는 체계가 보급되었다[2]. 그러나 이러한 제어는 대부분 설정값(Threshold)을 기준으로 수행되기 때문에, 작물의 생리적 요구를 반영하지 못하고 동일한 패턴의 제어를 반복한다는 한계를 지닌다. 이로 인해 광합성과 무관한 냉난방·조명 운전이 빈번히 발생하고, 결과적으로 에너지 낭비와 생산 효율 저하로 이어지고 있다.

2. 생리반응 감지 기술 동향

최근에는 작물의 생리 상태를 정량적으로 파악하기 위한 영상 기반 및 스펙트럼 기반 센서 기술이 발전하고 있다[8]. RGB 영상은 엽색, 형상, 면적을 통해 생육 정도를 추정하고, 열화상 카메라는 엽온 변화를 비접촉식으로 감지하여 수분 스트레스나 광합성 반응을 진단한다. 또한 NDVI나 GCI와 같은 식생지수는 광합성 효율을 수치화하는 지표로 활용된다. 이러한 기술은 작물의 반응을 직접 관찰할 수 있게 하여, 환경 데이터만으로는 파악하기 어려웠던 생리적 상태의 실시간 감지를 가능하게 한다. 즉, 작물 상태 기반 피드백 제어 구조로의 전환을 위한 기반이 마련되고 있다.

3. 작물 상태 기반 피드백 기반 제어 연구 방향

작물 상태 기반 피드백 제어는 환경데이터와 식물 반응데이터를 통합 분석하여 제어결정을 수행하는 구조로, 최근 머신러닝·데이터 융합 기술의 발전에 따라 활발히 연구되고 있다[6]. CNN, LSTM 등 AI 모

델을 활용하면 작물의 생리 반응을 자동으로 분류하거나, 생육 단계에 따른 최적 제어 값을 스스로 산출할 수 있다. 이러한 기술은 단순한 환경유지형 제어를 넘어, 식물이 필요로 하는 시점에 정확히 제어가 이루어지는 자율형 농장 모델을 구현할 수 있는 기반이 된다. 향후에는 생리·환경 데이터를 동시에 학습하는 멀티모달 융합, 실시간 피드백 자동보정, 에너지·생육 효율의 동시 최적화 방향으로 발전할 것으로 전망된다.

4. 기존 연구와의 차별성 도출

본 연구는 기존의 환경변수 중심 제어 방식에서 벗어나, 작물의 생리적 반응을 직접 피드백 입력으로 활용하는 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘을 제안한다. RGB 및 열화상 영상으로부터 온도, 온도, 온도면적 등의 생리지표를 추출하고, 이를 환경 센서 데이터와 융합하여 작물의 상태를 실시간으로 판단한다. 판단된 결과는 LED, 냉난방기, 펌프 등 주요 제어기에 전달되어, 작물이 요구하는 시점에 필요한 제어가 이루어지도록 동작하며 이러한 접근은 작물의 생리적 반응을 직접 제어 루프에 포함시킴으로써, 기존 시스템의 한계였던 과잉 제어와 에너지 낭비 문제를 근본적으로 개선할 수 있을 것으로 보였다. 아래는 기준 임계값 기반 피드백 제어 루프와 본 연구에서 제안하는 작물 상태 기반 피드백 제어 루프를 비교한 그림이다.

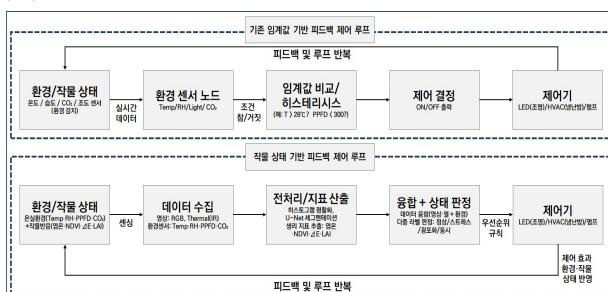


그림 1. 암계값 기반 제어와 직물 상태 기반 피드백 제어의 구조 비교

III. 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘의 설계 및 동작 구조

본 연구에서 제안하는 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘은 수직농장의 각 제어 장비(조명, 냉난방, 급액 등)를 작물의 생리적 반응에 따라 자동 운용하기 위해 설계하였다. 기준의 임계값 중심 제어와 달리 본 알고리즘은 작물 상태를 직접 감지하고 그 결과를 실시간 제어 명령으로 변환하는 작물 상태 기반 피드백 제어 구조를 갖는다. 이를 통해 환경 변화에 대한 단순 반응이 아니라 작물의 생리적 신호에 근거한

지능적 제어가 가능하도록 구현하고자 한다.

1. 시스템 구성 및 데이터 흐름 구조

시스템은 크게 센싱 모듈, 데이터 처리 모듈, 제어 알고리즘 모듈, 장비 제어 모듈의 네 단계로 구성하였다.

센싱 모듈은 RGB 카메라, 열화상 센서, 스펙트럼 센서 등으로 구성되어 작물의 엽온, 엽색, 면적, NDVI 등의 생리지표를 수집하는 동시에 온도, 습도, 조도, CO₂ 농도 등의 환경 데이터를 IoT 센서를 통해 수집하였다[7][8]. 해당 데이터는 시간·공간 단위로 동기화되어 데이터 처리 모듈로 전달된다.



그림 2 작품 상태 기반 피드백 제어 알고리즘의 데이터 흐름도

데이터 처리 모듈은 영상 데이터를 전처리(노이즈 제거, 색상 정규화)하고, 열화상·스펙트럼 데이터를 정량화하여 생리 지표를 추출한다. 이후, 환경 데이터와 융합되어 AI 기반의 제어 알고리즘 입력값으로 전달된다. 제어 알고리즘 모듈은 작물의 생리적 상태를 분류하고, 각 상태에 대응되는 최적 제어 명령을 결정한다. 마지막으로 제어 명령은 장비 제어 모듈을 통해 조명, 냉난방, 양액 펌프 등으로 전송되어 즉각적인 동작이 이루어진다.

2. 생리·환경 데이터 융합 및 상태 분류 절차

수집된 데이터는 시간 동기화를 통해 동일 시점 기준으로 정렬되며, 각 센서의 특징값은 표준화되어 모델 입력값으로 변환한다. 영상으로부터는 엽면적, 엽색, NDVI, 엽온 등의 지표를 추출하고, 환경데이터로는 온도, 습도, CO_2 농도, 조도를 사용한다. 본 연구에서는 이들 데이터를 융합 특징 벡터(Fused Feature

Vector)로 구성하고, AI 모델을 통해 작물 상태를 네 가지 범주로 분류하였다.

표 1. 작물 상태 기반 피드백 상태 분류 표

구분 상태	주요 사항
정상	광합성과 생육이 정상적으로 유지되는 조건
비정상(스트레스)	엽온 상승, 엽색 변화 등 이상 징후 감지
비정상(광포화)	광합성이 포화되어 추가 조명 불필요
비정상 (스트레스+광포화)	광포화 신호와 스트레스 신호가 동시에 발생한 상태

각 상태에 따라 LED 밝기, 냉난방 세기, 급액 빈도 등의 제어 파라미터가 자동 조정되도록 구현하였다.

표 2. 생리·환경 데이터 융합 기반 상태 분류 및 제어 조건

구분	주요 압력 지표	상태 판별 기준	제어 명령 예시
정상 상태	NDVI 0.6~0.8 엽온 < 24°C	광합성 활성 정상	기본
비정상 (스트레스 상태)	엽온 > 28°C 엽색 변화 ΔE > 5	수분 스트레스 감지	조명 냉방 유지 냉방↑, 급액 주기 단축
비정상 (광포화 상태)	NDVI > 0.85 조도 20,000 lux ↑	광합성 포화	LED 밝기↓, CO ₂ 주입 중단
비정상 (스트레스 광포화 상태)	엽온 > 28°C 엽색 변화 ΔE > 5 NDVI > 0.85 조도 20,000 lux ↑	광포화 참 스트레스 참	LED 밝기↓ → 냉방↑ → 급액 주기 단축 → CO ₂ 주입 중단

3. 데이터 융합 기반 제어 알고리즘의 동작 설계

작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘은 “측정-판단-제어-검증”的 4단계 순환 루프를 따르도록 설계하였다. 첫 번째 단계에서 센서 데이터가 수집되고, 두 번째 단계에서 AI 분석 모듈이 생리 상태를 분류한다. 세 번째 단계에서는 분류 결과에 따라 각 장비의 제어 명령이 결정되며, 네 번째 단계에서는 장비 동작 후의 식물 반응이 다시 측정되어 알고리즘의 다음 주기 입력으로 반영된다. 이러한 순환형 제어 구조(Closed-loop Control)는 실시간 자가보정이 가능하다는 점에서 기존 제어 방식과의 근본적 차별성을 가진다. 수식적으로는 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$U_t = f(S_t, E_t)_{[9][10]}$$

여기서 U_t 는 시간 t 에서의 제어 명령, S_t 는 생리적 상태 변수(엽온, NDVI 등), E_t 는 환경변수(온도, 조도 등)으로 설정하였다. 피드백 루프는 $\Delta S_t = S_{t+1} - S_t$ 수식을 통해 상태 변화율을 계산하고, 제어기 파라미터를 실시간으로 조정한다.

결과적으로 제안하는 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘은 수직농장의 에너지 절감과 운영 효율 향상에

기여할 뿐만 아니라, 작물 중심의 자율형 농장으로의 기술적 전환을 실현할 수 있는 기반 기술로 사료된다.

IV. 실증 결과 및 에너지 절감 효과 분석

1. 실험 환경 및 적용 조건

본 연구의 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘은 순천대학교 산학협력형 수직농장 실증 모듈에 적용하였다. 실증 대상은 4단 구조의 밀폐형 재배층으로 구성되어 있으며, 각 층에는 RGB 카메라, 열화상 센서, CO₂ · 온습도·조도 센서, LED 조명 및 냉난방 장치가 설치되어 있다. 실험은 엽채류(상추)를 대상으로 하였으며, 동일 환경 조건에서 기존 환경기반 제어 방식, 작물 상태 기반 피드백 제어 방식 두 가지 모드로 14일간 운용하여 비교 분석하였다.

LED는 PAR(동일 설정)을 기준으로 운용하였으며, 장비 표시 단위는 lux(12,000~20,000)로 기록하였다. 냉난방은 설정 온도 26°C를 중심으로 자동 가동되도록 하였다. 작물 상태 기반 피드백 모드에서는 엽온, NDVI, 엽색 변화를 실시간으로 측정하여, 각 상태별 제어 명령(광량 감광, 냉방 강화, 급액 주기 조정 등)을 적용하였다.

2. 생리·환경 응답 결과

작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘 적용 후, 작물의 생리 반응은 보다 안정적으로 유지되었다. 엽온은 평균 25.1°C로 기존 대비 약 1.2°C 낮게 유지되었으며, NDVI 값은 0.78로 상승하여 광합성 활성도가 개선되었다. 또한 광포화 구간에서 LED 조명을 자동 감광으로써, 불필요한 조명 에너지 낭비가 감소하였다. 냉난방 가동 횟수 역시 24회에서 18회로 줄어들었으며, 급액 주기는 작물의 수분 스트레스 지표(CWSI)에 따라 실시간 조정되어 과잉 공급이 방지되었다.

표 3. 기존 암개값 제어 vs 작물 상태 기반 피드백 제어의 비교 흐름

구분	제어 흐름
기존방식	환경 암개값 초기→ 장비 ON→환경 회복시 장비 OFF 식물 반응과 무관 반복적인 ON/OFF 제어 발생
작물생체기반 피드백방식	식물 생태반응 감지→상태 분석 필요 제어만 수행→ 반응 안정 시 장비 자동 정지 식물 중심의 선택적 제어 과정 제어 방지

3. 에너지 절감 효과 분석

작물 상태 기반 피드백 기반 제어 적용 전·후의 에

에너지 사용량을 항목별로 비교한 결과, 전체 소비 전력이 약 23.6% 감소하였다. 조명 시스템의 소비 전력은 광포화 구간에서 자동 감광이 이루어지면서 27.8% 감소하였으며, 냉난방 시스템은 엽온 기반 제어를 통해 불필요한 가동을 줄여 19.4% 절감되었다. 급액 펌프의 경우 생리적 수분 스트레스가 없을 때 공급이 중단되어 약 31.2%의 물 절약 효과를 보였다.

표 4. 작물 상태 기반 피드백 제어 적용 전·후 에너지 절감률 비교

단위: (kWh/일)

제어 항목	기존 평균 사용량	적용 후 사용량	절감률 (%)
LED 조명	7.2	5.2	27.8
냉난방	6.7	5.4	19.4
급액 펌프	2.1	1.4	31.2
CO ₂ 공급	1.3	1	23.1
합계	17.3	13	23.6

이러한 결과는 작물 상태 기반 피드백 제어가 단순히 작물 생육을 유지하는 수준을 넘어, 에너지 사용의 효율적 분배와 자율적 절감을 가능하게 한다는 점을 보여주었으며, 각 항목별 절감율은 다음과 같이 요약되었다.

4. 종합 논의 및 적용성 평가

작물 상태 기반 피드백 제어는 작물의 생리 신호를 중심으로 환경 요소를 조정하기 때문에, 환경기반 제어 대비 에너지 절감과 생육 안정성 모두에서 우수한 성능을 보였다. 본 알고리즘의 가장 큰 특징은 조명·냉난방·양액의 제어가 독립적으로 수행되는 것이 아니라, 식물 반응을 매개로 통합적으로 조정된다는 점이다. 즉, 조명 감광으로 인한 엽온 하락이 냉방 제어로 자동 연계되고, 수분 스트레스 감소가 급액 주기 최적화로 이어지는 등, 제어 항목 간의 상호보완적 제어 구조(Synergistic Control)가 구현되었다.

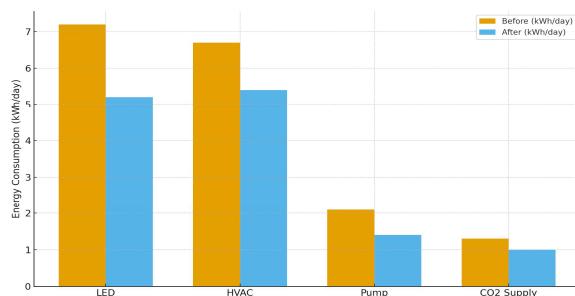


그림 3. 작물 상태 기반 피드백 제어 전·후 에너지 사용량 비교

또한 본 시스템은 기존 제어기 구조를 그대로 활용하면서 센서·AI 모듈을 추가하는 형태로 구현 가능하

므로, 상업용 수직농장에도 손쉽게 적용할 수 있다.

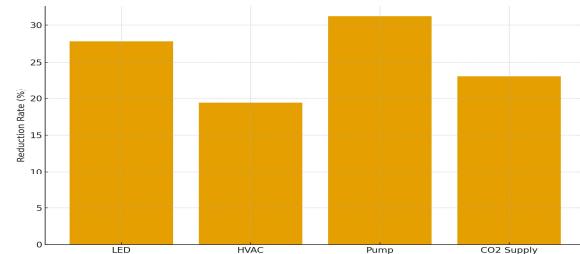


그림 4. 작물 상태 기반 피드백 제어 적용에 따른 항목별 절감률

향후에는 작물별 생리반응 데이터베이스를 구축하고, 강화학습 기반 제어 정책을 적용함으로써, 작물 스스로 환경을 조절하는 완전 자율형 농장으로 발전시킬 수 있을 것으로 사료되었다.

V. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 기존 환경기반 제어 방식의 한계를 극복하기 위해, 작물의 생리적 반응을 직접 피드백 신호로 활용하는 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘을 설계하고 수직농장 실증 환경에 적용하였다. RGB, 열화상, 스펙트럼 센서를 이용해 작물의 엽온, 엽색, NDVI 등의 생리지표를 실시간으로 수집하고, 이를 온도·습도·CO₂·농도·조도 등의 환경데이터와 융합하여 제어 알고리즘의 입력으로 활용하였다. 그 결과, 제안한 알고리즘은 작물의 실제 상태를 반영한 작물 상태 기반 피드백 제어를 구현함으로써, 불필요한 제어 동작을 줄이고 에너지 효율을 향상시켰다. 실증 결과, 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘을 적용한 경우 LED 조명의 에너지 사용량이 약 27.8% 냉난방 장치는 19.4%, 급액 펌프는 31.2% 절감되었으며, 전체 전력 소비량은 평균 23.6% 감소하였다. 또한 작물의 엽온은 평균 1.2°C 낮게 유지되어 생리적 안정성이 향상되었고, NDVI 값의 상승을 통해 광합성 효율 증가가 확인되었다. 이러한 결과는 본 연구의 알고리즘이 단순한 환경 자동화 수준을 넘어, 작물 상태 기반 피드백 제어로 발전할 수 있음을 시사한다.

그러나 본 연구는 한정된 실증 환경과 단일 작물(상추)을 대상으로 수행되었기 때문에, 작물 종별 생리 특성이나 환경 조건 변화에 따른 일반화에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 다양한 작물군에 대한 생리반응 데이터베이스를 구축하고, 이를 학습한 머신러닝·강화학습 기반 제어 정책을 도입함으로써 제어 정확성과 적응성을 높이는 방향으로 발전시킬 필요가 있다. 또한, 각 장비 간 제어 상호작용을 통합적으로 관리할 수 있는 다중 피드백 루프 구조를 설계하여, 에너지

절감과 생육 품질향상 간의 최적 균형을 도출하는 연구가 요구된다.

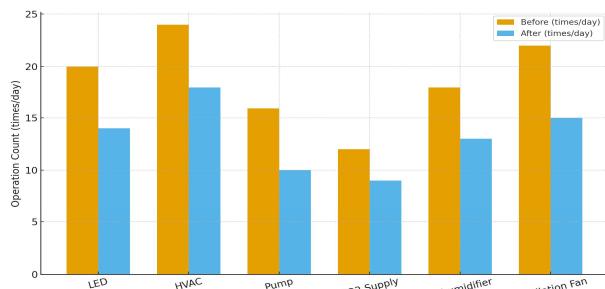


그림 5. 제어 방식 비교: 장비 가동 횟수 변화

결론적으로, 본 연구에서 제안한 작물 상태 기반 피드백 제어 알고리즘은 수직농장의 에너지 절감뿐 아니라, 작물의 생리적 요구에 따른 환경 자율조절이 가능한 지속가능형 스마트농업 모델의 실현 가능성을 제시한다. 향후 본 기술은 수직농장뿐 아니라 온실, 축사 등 다양한 스마트농업 시설로 확장될 수 있으며, 국내외 AI 기반 농업 자동화 표준화 및 에너지 절감형 스마트팜 기술 고도화에 기여할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- E. Heuvelink, S. Hemming, and L. F. M. Marcelis, "Some recent developments in controlled-environment agriculture: on plant physiology, sustainability, and autonomous control," *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, vol. 100, no. 5, 2025, pp. 604 - 614.
- D. D. Avgoustaki and G. Xydis, "Indoor Vertical Farming in the Urban Nexus: Business Growth and Resource Savings," *Sustainability*, vol. 12, no. 5, article 1965, 2020.
- S. van Mourik, B. van 't Ooster, and M. Vellekoop, "Plant Performance in Precision Horticulture: Optimal climate control under stochastic uncertainty," arXiv:2303.14678, 2023.
- S. Kernbach, "Biofeedback-Based Closed-Loop Phytoactuation in Vertical Farming and Controlled-Environment Agriculture," *Technologies*, vol. 9, no. 10, article 640, 2024.
- E. Kaiser, P. Kusuma, and S. Vialet-Chabrand, "Vertical farming goes dynamic: optimizing resource use efficiency, product quality, and energy costs," *Frontiers in Science*, vol. 2, article 1411259, 2024.
- L. Miserocchi and A. Franco, "Benchmarking energy efficiency in vertical farming: Status and prospects," *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 58, article 103165, 2025.

- [7] M.-S. Gang, H.-J. Kim, and D.-W. Kim, "Estimation of Greenhouse Lettuce Growth Indices Based on a Two-Stage CNN Using RGB-D Images," *Sensors*, vol. 22, no. 15, article 5499, 2022.
- [8] L. Hou, Y. Zhu, M. Wang, N. Wei, J. Dong, Y. Tao, J. Zhou, and J. Zhang, "Multimodal Data Fusion for Precise Lettuce Phenotype Estimation Using Deep Learning Algorithms," *Plants*, vol. 13, no. 22, article 3217, 2024.
- [9] F. Mahmood, R. Govindan, A. Bermak, D. Yang, and T. Al-Ansari, "Data-driven robust model predictive control for greenhouse temperature control and energy utilisation assessment," *Applied Energy*, vol. 343, article 121190, 2023.
- [10] W.-H. Chen, N. S. Mattson, and F. You, "Intelligent control and energy optimization in controlled environment agriculture via nonlinear model predictive control of semi-closed greenhouse," *Applied Energy*, vol. 320, article 119334, 2022.

저자 소개

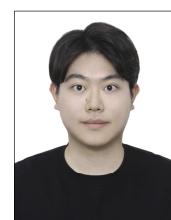


전진호(준회원)

2020년 국립순천대학교 정보통신공학
과 졸업

2025년 ~ 국립순천대학교 스마트농업전
공 석사과정 재학

<주관심분야 : 수직농장 환경 제어,
스마트 농업, IoT, 빅데이터>



김현준(정회원)

2020년 국립순천대학교 정보통신공
학과 졸업

2020년 ~ 2023년 한국스마트팜산업협회 대리

2024년 ~ 국립순천대학교 스마트농업
전공 박사과정 재학

<주관심분야 : 스마트온실 환경 제어, 빅데이터 활용,
스마트 농업, IoT, 빅데이터>



이명훈(정회원)

2006년 국립순천대학교 정보통신공학과
석사 졸업

2011년 국립순천대학교 정보통신공학과
박사 졸업

2010년 ~ 2013년 한국전자통신연구원
선임 연구원

2017년 ~ 2021년 국립농업과학원 연구사

2021년 ~ 현재 : 국립순천대학교 융합
바이오시스템기계공학과 교수

<주관심분야 : 빅데이터 활용, 스마트 농업, 인공지능,
전파 응용 기술, 표준화 >