# 수직농장 온도 제어 시스템 설계에 관한 연구

정현준, 서현무, 이명훈*
국립순천대학교
kerberos0519@gmail.com, seohm0425@naver.com, leemh777@scnu.ac.kr

# Study on the design of a vertical farm temperature control system

Jeong Hyun Jun, Seo Hyeon Moo, Lee Meong Hun*
National SunChon University.

요 약

본 연구는 수직농장에서의 온도 제어를 정밀하고 에너지 효율적으로 수행하기 위한 이론적 시스템 설계를 목적으로 한다. 수직농장은 밀폐된 구조에서 인공적인 환경 조절을 통해 작물을 재배하므로, 온도는 생육 속도, 품질, 병해 저항성 등에 결정적인 영향을 미친다. 그러나 현재의 제어 시스템은 대부분 고정값 기반의 단순 반응형 제어에 머물러 있어 실시간 환경 변화나 작물 생장 단계에 따라 유연하게 대응하지 못하는 한계가 있다. 이에 본 연구는 온도 제어 시스템을 구성하는 주요 이론적 요소로 환경 센서 네트워크 기반 데이터 수집 구조, 작물 생육 주기별 예측 제어 모델, LED 조명 방열 성능 개선 설계, 디지털 트윈 기반 시뮬레이션 환경을 통합 설계하였다. 각 요소는 기존 선행연구의 이론을 기반으로 설계적 타당성을 확보하였으며, 전체적으로 하나의 통합적 제어 프레임워크로 구성된다. 본 연구는 구현 실험 없이도 논리적 정합성을 통해 실제 응용이 가능한 설계 원형을 제안함으로써, 향후 수직농장 제어 기술의 고도화를 위한 기반을 마련한다.

## Ⅰ. 서 론

전 세계적인 도시화와 기후 변화는 농업 생산 방식의 전환을 요구하고 있다. 이러한 변화 속에서 수직농장(vertical farm)은 공간 활용의 극대화, 연중 생산 가능성, 외부 환경에 대한 독립성 등의 장점을 통해 차세대 농업 모델로 부상하고 있다. 그러나 수직농장의 성공적인 운영을 위해서는 작물 생육에 필수적인 환경 요소, 특히 온도를 정밀하게 제어할 수 있는 시스템이 핵심 요건으로 작용한다.

수직농장은 밀폐된 구조와 인공 광원에 의해 구성되므로 외부 기후와 단절된 상태에서 온도, 습도, 조도, $CO_2$ 등의 다양한 환경 요인을 전적으로 인위적으로 유지해야 한다. 그중에서도 온도는 작물의 생장 속도, 대사 반응, 병해 발생률 등에 직접적으로 영향을 미치며, 생육 단계에 따라 필요한 온도 조건이 상이하다는 점에서 더욱 정교한 관리가 요구된다. 그러나 현재까지의 수직농장 온도 제어 시스템은 대부분 고정된 설정값에 따라 냉난방 장치를 단순 ON/OFF로 작동시키는 형태로 운영되고 있으며, 이러한 방식은 실제 환경의 동적 변화나 작물 생육 요구에 효과적으로 대응하지 못하는 한계가 있다. 뿐만 아니라, 수직농장에서 필수적으로 사용되는 LED 조명은 지속적인 열을 발생시켜 실내 온도 상승의 주요 원인이 되며, 냉방 부하를 증가시켜 결과적으로 에너지 효율을 저하시킨다. 따라서 수직농장의 온도 제어는 단순한 '냉난방' 수준의 기술이 아니라, 환경 센싱, 예측 제어, 열원 관리, 그리고 전체 시스템의 통합된 작동까지 포함하는 복합적인 이론적 기반 위에서 정립되어야 하는 과제이다.

본 연구는 이와 같은 배경에서 출발하여, 실제 구현에 앞서 이론적으로 정합성 있고 기술적으로 설계 가능한 수직농장 온도 제어 시스템의 구조를 제안하고자 한다. 주요 구성 요소로는 환경 센서 네트워크, 작물 생육 기반 제어 모델, LED 방열 이론, 그리고 디지털 트윈 환경에서의 예측 시뮬레이션 모델 등이 있으며, 각 요소는 기존의 선행 이론과 연구 결과를 통합하여 하나의 설계 프레임워크로 구조화된다. 본 논문은 실증이 아닌 설계 이론과 구조 모델에 기반하여, 향후 수직농장에 적용 가능한 표준화된 제어 시스템 구축의 방향성을 제시한다.

## Ⅱ. 본론

수직농장의 온도 제어 시스템을 이론적으로 설계하기 위해서는 먼저 정확한 환경 인식 체계가 필수적으로 구축되어야 한다. 이를 위해 본 연구는 온도, 습도, 조도, $CO_2$ 등의 환경 데이터를 수집할 수 있는 센서 네트워크를 기반으로 한 구조를 가정한다. 이 센서들은 각 재배 선반 단위로 배치되며, 무선 네트워크를 통해 중앙 제어 유닛에 데이터를 전달한다. 김한돈 외(2021)는 이러한 센서 기반 실시간 공기질 모니터링 시스템의 구조를 제시하며 수직농장의 미세 환경 관리의 가능성을 제시하였다 [1].
이러한 데이터를 기반으로 제어를 수행하기 위해서는 작물 생육 단계에 따른 예측 기반 제어 알고리즘이 필요하다. Daniels et al.(2023)은 작물의 생장 주기를 시간에 따라 발아기, 영양생장기, 생식생장기, 수확기로 구분하고, 각 단계별로 요구되는 최적 온도 범위가 상이하다는 사실을 규명하였다 [2]. 본 연구는 이 이론을 기반으로 생육 단계에 맞춘 시계열 예측 제어 모델을 구성하며, 센서로부터 수집된 환경 데이터를 학습하여 다음 시간대의 목표 온도를 예측하고 제어 신호를 생성하는 방식으로 모델링한다. 이는 고정값 기준이 아닌 유동적 제어를 통해 생장 조건 최적화를 가능하게 한다.

수직농장에서 온도 상승의 주요 원인 중 하나는 LED 조명으로, 이를 무시한 온도 제어는 냉방 에너지 낭비로 직결된다. 허승민 외(2025)는 LED 조명 등기구에 금속판을 내부·외부에 연결하는 방열 구조를 적용하여 조명 표면의 온도를 효과적으로 낮추었으며, 냉방기 가동 시간을 줄이는 데 효과가 있음을 제시하였다 [3]. 본 연구는 해당 이론을 적용하여, LED 열원 자체의 제어도 온도 제어 시스템의 일부로 포함시켜 설계한다.

또한 전체 제어 시스템의 동작 검증과 안정성 분석을 위해 디지털 트윈

기반의 시뮬레이션 구조를 도입한다. 고태환 외(2021)는 수직농장의 각 요소를 3D 모델링하고, WebGL을 활용하여 실제 제어 알고리즘이 가상 공간에서 어떻게 작동하는지 실시간 시각화할 수 있는 구조를 제안하였다 [4].

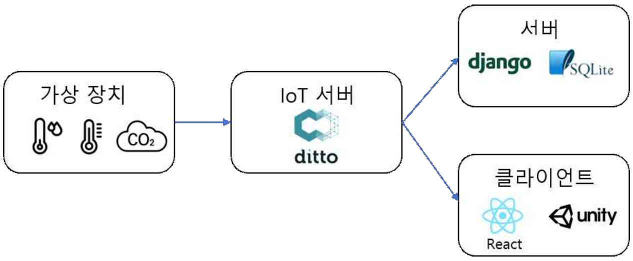


그림1. 디지털 트윈 시스템 구조

Figure 1. Digital twin system structure

본 연구에서는 이 구조를 바탕으로 온도 제어 알고리즘의 반응성, 정밀도, 안정성을 시뮬레이션 기반으로 검증하고자 한다. 이 구조는 물리적 환경에 의존하지 않고 제어 모델의 효과를 사전에 검토할 수 있는 장점을 가진다. 끝으로, 본 설계의 이론적 타당성은 Danfoss(2023)의 수직농장 기후제어 사례를 통해 뒷받침된다. Danfoss는 BEMS 기반 제어 시스템을 통해 수직농장에서 냉난방, 조명, 환기 간의 통합 제어를 구현함으로써 전체 에너지 소비를 20% 이상 절감하였으며, 이는 예측 기반 제어와 연동 구조의 효과성을 입증한 사례다 [5]. 본 연구가 제안하는 이론적 제어 구조 역시 유사한 효과를 이론적으로 달성할 수 있는 방향성을 공유한다.
그림3은 수직 농장 온도 조절 시스템의 전체구성도이다.

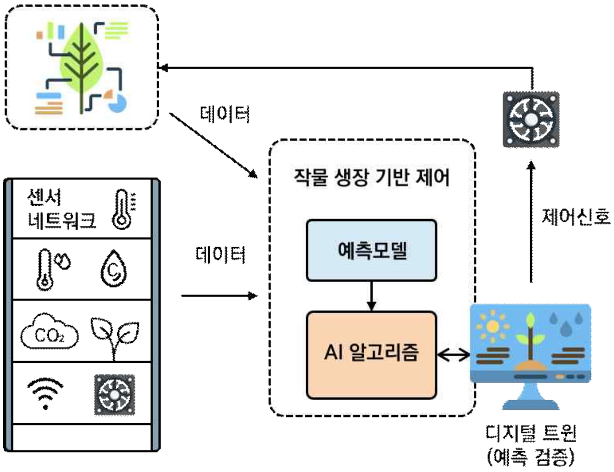


그림2. 수직 농장 온도 조절 시스템

Figure 2. Plant cultivation temperature control system

## Ⅲ. 결론

본 연구는 수직농장에서 요구되는 온도 제어 기술의 정밀성과 복합성을 반영하여, 이론적으로 정립 가능한 설계 구조를 제안하였다. 환경 센서 네트워크를 통한 실시간 데이터 수집, 작물 생육 단계에 기반한 예측 제어 알고리즘, LED 열원 제어를 위한 방열 구조 이론, 디지털 트윈을 통한 가상 시뮬레이션까지, 제어 시스템의 각 요소는 상호 연계된 구조로 통합 설계되었다.

이러한 이론 기반 제어 시스템은 기존 수직농장의 고정 기준 제어 구조에서 벗어나, 작물 생장에 최적화된 동적 대응이 가능한 스마트팜 모델로 확장될 수 있다. 본 논문은 실증 실험이 아닌 이론 모델 기반 설계에 초점을 맞추었으며, 이는 향후 실제 환경에서의 구현 가능성과 실험적 적용을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

향후 연구에서는 본 설계 구조를 기반으로 AI 모델의 적용, 작물별 온도 프로파일 정교화, 외부 기후 정보 연계 제어 등의 방향으로 제어 시스템을 고도화하고, 실증 실험을 통해 이론적 설계의 실제 효과를 정량적으로 검증할 필요가 있다.

## ACKNOWLEDGMENT

“본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성(Grand ICT연구센터) 사업의 연구결과로 수행되었음” (IITP-2025-2020-0-01489)

## 참 고 문 헌

[1] 김한돈 외, “수직형 스마트 팜에 최적화된 공기질 모니터링 시스템 개발,” 한국정보과학회 학술발표논문집, 2021.

[2] Daniels, A., Fink, M., Leibold, M., Wollherr, D., & Asseng, S., “Optimal Control for Indoor Vertical Farms Based on Crop Growth,” arXiv preprint, arXiv:2309.07540, 2023.

[3] 허승민 외, “금속 판을 활용한 식물공장 용 LED 조명 등기구의 방열 성능 개선 및 성능 평가,” 한국조명전기설비학회지, 2025.

[4] 고태환 외, “식물공장 적용 디지털 트윈 프레임워크 설계 연구,” 방송공학회논문지, vol. 26, no. 4, pp. 377 - 389, 2021.

[5] Danfoss, “Energy-efficient climate control in Vertical Farms,” Danfoss White Paper, 2023.