

수직농장 폐양액 재활용을 위한 EC·pH 자동 보정 알고리즘 설계 및 검증

(Design and Experimental Verification of an Automatic EC - pH Compensation Algorithm for Nutrient Solution Recycling in Vertical Farming)

정현장*, 김현준*, 이명훈**

(Hyeon Chang Jeong*, Hyun Jun Kim*, Meong Hun Lee**)

요약

기후변화로 인한 식량 위기에 대응하여, 수직농장은 연중 안정적 작물 생산이 가능한 대안으로 주목받고 있다. 그러나 폐양액의 과다 발생과 수동 기반의 EC·pH 관리 방식은 재활용 효율과 작물 생육 안정성을 저해하는 문제로 지적된다. 본 연구는 이러한 한계를 해결하고자, 센서 데이터를 기반으로 EC 및 pH를 실시간 감지하고 자동 보정하는 퍼지 제어 알고리즘을 설계하였다. 제안된 시스템은 오차 및 변화율을 입력값으로 활용해 희석수와 산 염기 주입량을 퍼지 추론 방식으로 제어하며, 복합 변수 간 상호 간섭을 최소화하는 구조로 구현되었다. 소형 수직농장 환경에서의 반복 실험 결과, EC는 약 90초, pH는 140초 이내에 목표값에 안정적으로 수렴하였고, 평균 오차는 각각 ± 0.03 , ± 0.04 수준으로 유지되었다. 수동 제어 대비 전체 안정화 시간은 약 40% 단축되었으며, 평균 오차율은 52% 이상 개선되었다. 본 연구는 수직농장의 폐양액을 생육 가능 수준으로 자동 보정할 수 있는 기술적 기반을 제시하였으며, 향후 고정밀 센서 보강, 대규모 시스템 확장성, 디지털 트윈 기반 검증 체계 및 지능형 제어 프레임워크 개발 등 후속 연구로의 확장이 요구된다.

■ 중심어 : 수직농장 ; 폐양액 재활용 ; EC ; pH ; 자동 보정 알고리즘

Abstract

In response to the global food crisis driven by climate change and urbanization, vertical farming has emerged as a promising solution for stable year-round crop production. However, excessive discharge of nutrient solution and the limitations of manual EC and pH control hinder recycling efficiency and crop growth stability. This study addresses these challenges by designing a fuzzy control algorithm that automatically detects and adjusts EC and pH in real time based on sensor data. The proposed system calculates errors and their rates of change to regulate the injection of diluents and acids/bases through fuzzy inference, minimizing interference between control variables. Experimental validation in a small-scale vertical farm showed that EC and pH stabilized to their target values within approximately 90 and 140 seconds, respectively, with mean errors maintained at ± 0.03 and ± 0.04 . Compared to manual control, total stabilization time was reduced by about 40%, and the average error rate improved by over 52%. This research presents a technical foundation for automatically adjusting discharged nutrient solutions to crop-appropriate quality levels and highlights the need for future work in sensor accuracy enhancement, system scalability, digital twin-based verification, and intelligent control frameworks.

■ keywords : Vertical farming ; Nutrient solution recycling ; Electrical conductivity ; Potential of Hydrogen ; Automatic compensation algorithm

I. 서 론

기후변화, 인구 증가, 도시화로 인한 식량 문제에 대응하여, 외부 환경 영향을 최소화하면서 연중 안정적으로 작물을 생산할 수 있는 수직농장은 지속가능 농업의 핵심 인프라이지만, 높은 에너지 소비와 함께 재배 과정에서 다량의 폐양액이 발생하며, 이의 적절한 정화 및

재활용이 주요 과제로 지적된다. 폐양액은 이온 농도 불균형과 pH 편차로 인해 재사용이 어렵고, 대다수는 희석 배출되어 환경 부담을 초래하고 있다. 이에 따라 폐양액을 회수·정화한 후 EC와 pH를 정밀하게 재조정함으로써 재활용 가능한 품질로 전환하는 기술 개발의 필요성이 증가하고 있다[1].

현재의 양액 보정 시스템은 EC(전기전도도)와 pH를

* 준회원, 국립순천대학교 스마트농업공학과

* 정회원, 국립순천대학교 스마트농업전공

** 정회원, 국립순천대학교 융합바이오시스템기계공학과

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

접수일자 : 2025년 10월 17일

수정일자 : 2025년 11월 06일

게재확정일 : 2025년 11월 09일

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

수동 측정·보정하는 방식에 의존하고 있어[2], 농도 유지의 일관성이 낮고 숙련 인력에 대한 의존도가 높다. 특히 EC와 pH는 생육에 중요한 지표로, 실시간 센서 기반 피드백과 자동 보정 제어가 이루어지지 않으면 생육 저하와 양분 불균형으로 이어질 수 있다. 이에 따라 EC·pH를 동시에 정밀하게 자동 보정할 수 있는 기술적 대안이 요구된다[3].

스마트팜 기술의 발전과 함께 퍼지 제어, 모델 예측 제어(MPC), 뉴럴 PID, 적응형 퍼지 제어 등 다양한 지능형 알고리즘이 온실의 온도·습도·CO₂ 와 같은 공기 환경 제어에 적용되며 높은 제어 정밀도를 입증하고 있다. 그러나 양액 관리 시스템에 이러한 기술을 적용한 연구는 매우 제한적이며[4], 특히 EC와 pH를 복합적으로 실시간 제어하는 사례는 드문 설정이다. pH는 비선형성과 외란 민감도가 높은 변수로, 고전적인 선형 제어로는 과조정, 응답 지연 등의 문제가 발생하는 한계가 있다.

본 연구는 이러한 기술적 한계를 극복하고자, 수직농장의 폐양액 재활용 과정에서 발생하는 EC 및 pH 편차를 실시간 감지하고 자동으로 보정하는 퍼지 제어 기반 알고리즘을 설계하였다. 센서로부터 수집된 데이터를 기반으로 오차 및 변화율을 계산하고, 희석수 및 산·염기 주입량을 자동 산출하여 농도 편차를 신속히 안정화한다[5]. 제안된 시스템은 소형 수직농장 실험 환경에서 구현되었으며, 반복 실험을 통해 알고리즘의 수렴 속도, 제어 정밀도, 재현성을 정량적으로 검증하였다. 본 연구는 폐양액 재활용 효율을 향상시키고, 인력 의존도를 실질적으로 저감할 수 있는 스마트 수직농장 기반 기술로서의 실효성을 입증하고자 한다.

II. 관련 연구

스마트 수경재배 환경에서는 양액의 품질 유지를 위해 EC와 pH를 동시에 정밀하게 제어하는 자동화 기술이 필수적이다. Zhang et al. (2022)은 식물공장을 대상으로 ANFIS 기반 비선형 예측 제어 기법을 적용하여 pH 조절의 응답성과 안정성을 향상시켰으나, EC에 대한 제어는 고려되지 않아 실제 양액 재조성 환경에는 제한적이며[7]. 한편, Giménez et al. (2023)은 EC 기준의 폐양액 보충 시스템을 실험하여 자원 순환 가능성을 제시했지만, pH 균형 제어가 포함되지 않아 화학적 안정성을 확보하는 데 어려움이 있다[8]. Lee et al. (2023)은 IoT와 강화학습을 기반으로 공기 환경 제어의 실시간성과 효율성을 입증했으나, 수질 제어 분야로의 확장은 이루어지지 않았다[9]. 이처럼 기존 연구들은 EC 또는 pH 중 하나에 국한되거나 적용 범위가 제한되어 있어, 폐양액을

대상으로 EC와 pH를 복합적으로 실시간 보정하고 실제 시스템을 통해 실증한 연구는 매우 드문 설정이다. 본 연구는 이러한 공백을 해결하고, 폐양액을 재배 가능한 품질로 자동 조정하는 기술적 기반을 제시하고자 한다.

III. 시스템 구성 및 제어 이론

1. 수직농장 폐양액 재활용 시스템 개요

본 연구에서는 수직농장 내에서 발생하는 폐양액을 희수·정화·재조성하여 재활용하는 자원순환형 양액 제어 시스템을 제안한다[10]. 폐양액은 작물 생육 단계에 따라 농도 변화가 크고, 일부 영암염류가 과다 축적되어 재사용이 어렵다. 이를 적절히 처리하지 않으면 수질 오염과 운영비 증가를 초래하므로, 효율적인 정화 및 재활용 기술이 필요하다. 제안된 시스템은 그림 1과 같이 총 네 단계로 구성된다.

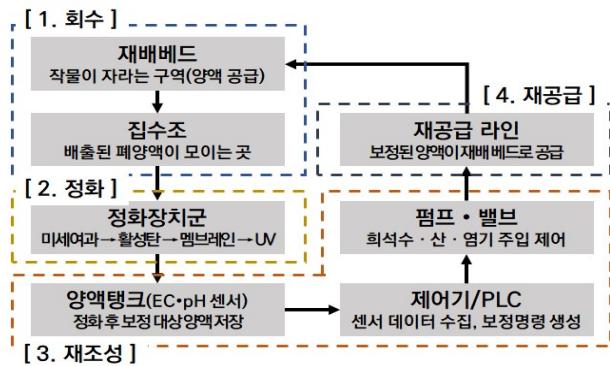


그림 1. 수직농장 폐양액 재활용 시스템 구성도

회수 단계에서는 작물베드 하부의 배액관을 통해 사용 후 양액을 집수조로 모으고, 정화 단계에서는 미세 여과 필터, 활성탄, 멤브레인, 자외선 살균을 통해 부유물질 및 병원균을 제거한다. 재조성 단계에서는 EC·pH 센서의 측정값을 기반으로 희석수 또는 산·염기를 주입해 목표 농도로 보정한다[11]. 재공급 단계에서는 보정된 양액을 탱크에 저장한 뒤 순환펌프를 통해 재배베드로 재공급한다.

양액 재활용 공정의 데이터 흐름은 그림 2와 같다. 센서 모듈에서 측정된 EC·pH 값은 제어기로 전달되어, 목표값과의 오차 및 오차 변화율을 계산한다. 제어 알고리즘은 이를 기반으로 펌프의 구동 명령을 생성하며, 보정된 양액은 안정화 과정을 거쳐 재사용된다. 이러한 자동 피드백 기반 제어 체계는 폐수 배출을 최소화하고, 양액 사용 효율을 향상시켜 수직농장의 에너지 절감과 지속 가능성은 동시에 확보한다[12].

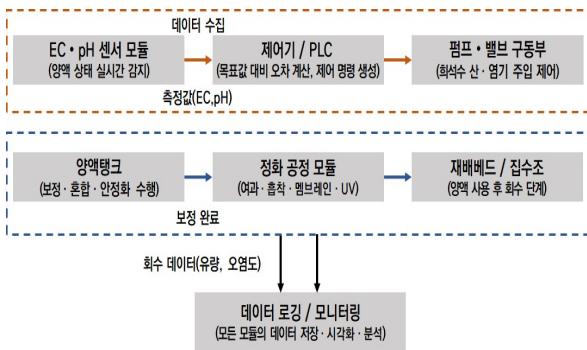


그림 2. 양액 재조성 단계의 데이터 흐름 및 제어 구조

그림 2는 양액 재조성 단계의 제어 구조를 나타낸다. 본 시스템은 양액의 전기전도도와 수소이온 농도를 실시간으로 감지하여 제어기가 오차의 크기와 변화 추세를 분석하고 자동으로 보정하도록 설계되었다. 이를 통해 인력 개입 없이 농도 편차를 최소화하며 안정적인 양액 품질을 유지할 수 있다. 또한, 제어 루프의 자동화는 재활용 효율을 높이고 시스템의 에너지 소비를 줄이는 데 기여한다.

2. EC·pH 제어 원리 및 제어기 구조

양액 재조성 단계에서의 EC와 pH 제어는 농도 균일성과 작물 생육 안정성 유지에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요소이다. 수직농장의 양액은 재활용 과정에서 농도 편차와 화학 조성 변화가 반복되므로, 이를 실시간으로 감지하고 자동으로 보정하는 제어 시스템이 필수적이다.

본 연구의 제어기는 센서로부터 측정된 EC 및 pH 값을 입력받아 목표값과의 오차 $e(t)$ 및 오차 변화율 $\Delta e(t)$ 을 계산하고, 퍼지 제어 알고리즘에 따라 보정 명령을 생성한다. 퍼지 제어는 오차와 변화율을 언어 변수로 변환한 후, 미리 정의된 If-Then 규칙 집합을 기반으로 제어 출력을 도출한다. 제어 출력은 비퍼지화 과정을 거쳐 펌프의 개도율 및 주입 시간을 결정하며, 입력 변수는 오차 $e(t)$ 와 오차 변화율 $\Delta e(t)$ 이며, 출력 변수는 제어 신호 $u(t)$ 로 구성된다. 각 변수는 “Negative Big(NB)”, “Negative Small(NS)”, “Zero(ZO)”, “Positive Small(PS)”, “Positive Big(PB)”의 5단계 소속함수로 정의되어, 비선형적인 EC·pH 변동에도 유연하게 대응할 수 있다.

그림 3은 EC·pH 자동 보정 시스템의 제어 구조를 나타낸다. 센서 모듈에서 측정된 신호는 제어기로 전달되어 규칙 기반 추론을 거친 뒤, 회석수, 산, 염기

주입량을 제어한다. 양액 공정은 혼합 반응 및 시간 지연 요소 r 을 포함하며, 외란 $d(t)$ 와 노이즈 $n(t)$ 의 영향을 받을 수 있다. 제어기는 출력값 $y(t)$ 을 목표값 $r(t)$ 과 비교하여 새로운 오차를 계산하고, 이를 반복적으로 피드백으로써 퍼지 제어 루프를 형성한다.

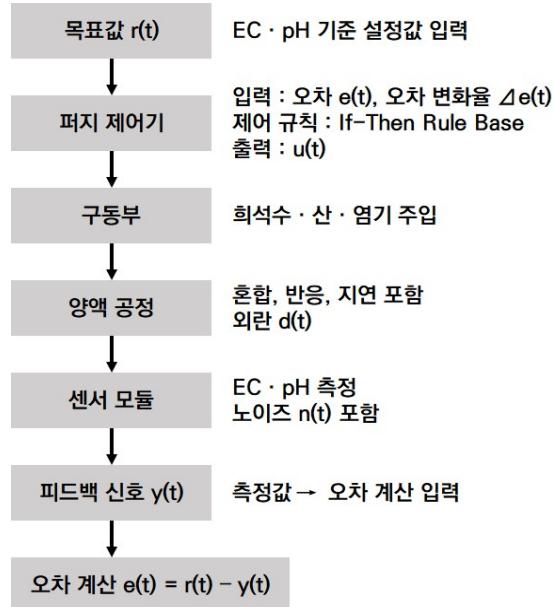


그림 3. EC·pH 자동 보정 시스템의 피드백 제어 블록 다이어그램

제어 루프는 센서, 퍼지 제어기, 구동부, 양액 공정, 센서의 순환 구조로 구성되며, 각 제어 주기마다 입력이 갱신된다. EC와 pH가 목표값에 근접하면 제어 출력은 점진적으로 감소하여 안정 상태를 유지하고, 외란이나 센서 노이즈로 편차가 발생하면 루프가 자동으로 재가동되어 보정을 반복한다. 이러한 퍼지 제어 구조는 비선형 구간에서도 안정적인 제어 성능을 확보하며, 결과적으로 양액 재활용 효율과 시스템 신뢰성을 향상시킨다.

표 1. EC·pH 제어 변수 및 제어 파라미터 정의

구분	기호	제어 변수	설명
입력 변수	$e(t)$	오차	EC·pH 오차
입력 변수	$\Delta e(t)$	오차 변화율	시간에 따른 오차 변화
출력 변수	$u(t)$	제어 신호	펌프 개도율
제어 규칙	R_n	Rule Base	If-Then 형태의 제어 규칙
소속 함수	u	Membership Function	NB, NS, ZO, PS, PB 등 단계별 정의
추론 방식	-	Fuzzy Inference	Mamdani형 퍼지 추론
비퍼지화	-	Defuzzification	Center of Gravity 방식

3. 퍼지 제어 채택 배경

퍼지 제어의 도입 타당성을 검증하기 위해, 본 연구

에서는 동일한 환경 조건에서 기존의 PID 제어 방식과의 비교 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 제안된 퍼지 제어 알고리즘의 성능을 기존의 PID 제어와 비교하여 평가하였다. 두 제어 방식은 동일한 조건에서 각각 5회 반복 실험을 통해 비교되었으며, 주요 평가 비교 지표는 안정화 시간, 오차 범위, 과조정 여부, 평균 제어 편차로 설정하였다.

표 2. 퍼지 제어와 PID 제어 성능 비교 결과

구분	안정화 시간(초)	오차 범위	과조정 발생	평균 제어 편차(%)
PID 제어	98.4	±0.42	3/5	11.2
퍼지 제어	62.7	±0.21	0/5	4.3

실험 결과, 퍼지 제어 방식은 평균 응답 시간이 약 36초 빠르고, 오차 범위도 절반 수준으로 감소하였다. 또한 과조정 현상이 관찰되지 않았으며, 평균 제어 편차도 역시 낮았다. 이는 퍼지 제어가 실제 수직농장 양액 제어 시스템에서 더욱 안정적이고 정밀한 제어 성능을 발휘할 수 있음을 의미한다.

IV. EC-pH 자동 보정 알고리즘 설계

본 장에서는 II장에서 제시한 제어 구조를 기반으로, 각 제어 주기 T_s 마다 센서로부터 측정된 EC 및 pH 값을 입력받아 목표값과의 오차를 계산하고, 이에 따른 보정 명령을 실시간으로 산출하는 알고리즘을 설계하였다. 제안된 알고리즘은 센서 입력 및 신호 전처리, 오차 계산 및 퍼지 제어 연산, 제어 명령 수행, 안정화 판정 및 피드백의 네 단계 절차로 구성되며, 설계 과정에서 시스템의 지연, 포화, 외란, 센서 노이즈 등을 요인을 함께 고려하였다.

1. 센서 입력 및 신호 전처리

양액 재조성 시스템은 일정 제어 주기 T_s 로 동작하며, 센서 신호 측정, 연산, 구동 명령 전송의 순환 사이클로 운영된다. EC-pH 센서는 양액탱크 내 농도를 실시간으로 측정하여 제어기로 전송하며, 측정 신호는 노이즈 제거 필터를 거쳐 안정화된 디지털 데이터로 변환된다. EC와 pH 신호는 각각 온도 및 전극 전압 보정을 표준화하였다. 센서 이상이나 순간적인 신호 손실 시, 최근 측정값을 보간하여 제어 루프의 연속성을 유지하도록 설계하였다. 이러한 전처리 과정은 측정 신호의 신뢰성을 확보하고, 제어 입력의 안정성을 향상시키는 역할을 한다.

2. 오차 계산 및 퍼지 제어 연산

퍼지 제어기는 목표값 $r(t)$ 과 측정값 $y(t)$ 의 차이를 오차

$e(t)$ 로 정의하고, 그 변화율 $\Delta e(t)$ 을 함께 고려하여 제어 출력을 계산한다. 입력 변수 $e(t)$ 와 $\Delta e(t)$ 는 소속함수를 통해 퍼지화되며, 미리 정의된 If-Then 구칙에 따라 추론이 수행된다. 추론 결과는 비퍼지화 과정을 거쳐 실제 제어 출력 $u(t)$ 로 변환된다. 이러한 구조는 시스템의 비선형 특성과 외란에 유연하게 대응하며, 입력 변화에 따라 제어 민감도를 자동으로 조정할 수 있다. 또한 제어 신호가 물리적 한계를 초과하지 않도록 포화 제한을 적용하여 안정적인 구동을 확보하였다.

EC와 pH 제어 루프는 독립적으로 퍼지 추론을 수행하되, 동일한 주기 내에서 별별로 연산되도록 구성하였다. 실제 구동 순서는 EC 보정 후 pH 보정 순으로 수행되며, 이는 회석수 주입이 pH에도 영향을 미치기 때문에, EC 안정화 후 pH를 미세 조정함으로써 상호 간섭 및 과보정을 방지하였다. 퍼지 제어 규칙은 실험 데이터를 기반으로 설정하였으며, pH의 로그 스케일 특성을 고려해 작동 구간별로 서로 다른 소속함수를 적용하는 구간별 개인 조정 기법을 도입하였다. 이를 통해 제어기의 응답 안정성과 민감도를 개선하였다. 퍼지 제어 규칙은 초기에는 퍼지 이론의 일반적인 설계 원칙을 바탕으로 설정되었으며, 이후 실험적 튜닝을 통해 최적화되었다. 각 규칙 조합($e, \Delta e$)에 대해 응답 속도, 오차 범위, 과조정 발생 여부를 비교하여 성능을 평가하였으며, PB-NS 조합은 빠른 응답성과 낮은 편차를 보이며 우수한 결과를 나타냈다. 이와 같은 조정 결과는 표6에 요약되어 있으며, 퍼지 규칙이 실제 시스템에 적합하게 최적화되었음을 시사한다.

표 3. 주요 퍼지 규칙 조합별 제어 성능 비교

규칙 조합	안정화 시간(초)	과조정 여부	평균 편차(%)
PB-PB	54.2	4회 발생	12.1
PB-NS	63.3	없음	4.2
ZO-ZO	105.7	없음	9.4
NS-NB	71.9	1회 발생	7.5

3. 제어 명령 수행

산출된 제어 출력 $u(t)$ 은 구동부로 전달되어 회석수, 산, 염기의 주입량을 제어한다. EC 제어 루프에서는 제어기의 결과에 따라 회석수 밸브의 개도율을 조정해 전기전도도를 보정하고, pH 제어 루프에서는 산·염기 밸브의 개폐 시간을 조절하여 수소이온 농도를 안정화한다. 두 제어 루프는 상호 간섭을 최소화하기 위해 순차적으로 작동하며, 회석 및 산·염기 주입 과정의 중첩 작용을 방지한다. 또한 주입량의 과도 누적을 억제하기 위해 제어 신호의 변화율을 제한함으로써 시스템의 응답 안정성을 확보하였다. 제어기 설계에

따라 실제 폐양액의 EC 및 pH를 제어하는 실험은 그림4와 같은 절차에 따라 수행되었다. 초기 설정 후 센서 값을 기반으로 오차를 계산하고, 알고리즘이 산출한 제어 명령에 따라 희석수 및 산·염기를 주입하였다. 본 실험은 퍼지 제어 방식에 대해 동일 조건에서 총 5회 반복 실험을 수행하고, 결과 데이터를 비교하였다.

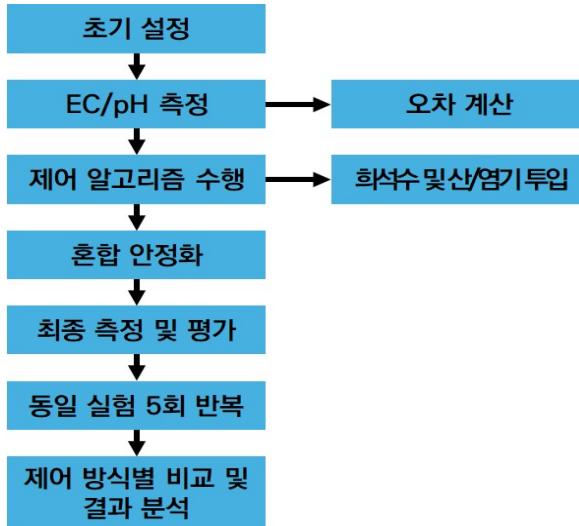


그림 4 EC 및 pH 자동 보정 제어 알고리즘 기본실험 절차 흐름도

본 연구의 EC·pH 자동 보정 알고리즘 수행 흐름 및 실험 절차는 그림 4와 같이 구성된다. 초기 설정 후 센서로부터 EC와 pH 값을 측정하고, 설정된 목표값과의 오차를 계산한다. 해당 오차값을 기반으로 퍼지 제어기 또는 PID 제어기가 제어 명령을 생성하며, 희석수 및 산·염기가 제어기에 의해 자동 투입된다. 투입 후 혼합 안정화를 거친 뒤 최종 측정 및 평가가 수행된다. 이러한 절차는 동일한 조건에서 5회 반복되며, 제어 방식(PID 제어, 퍼지 제어)별 결과를 비교 분석하여 성능을 평가하였다.

4. 안정화 판정 및 피드백

제어 수행 후 센서에서 측정된 EC와 pH의 변화율을 주기적으로 분석하여 안정화 여부를 판단한다. 측정값이 목표 범위 내에서 일정 시간 유지되면 시스템은 안정 상태로 판정하고 제어 출력을 중단한다. 반면 외란 $d(t)$ 나 센서 노이즈 $n(t)$ 로 편차가 발생할 경우, 루프가 자동으로 재가동되어 새로운 오차를 입력으로 받아 보정 반복한다. 제어별 데이터는 로깅되어 이후 성능 보정에 활용된다. 특히 주입량 대비 농도 변화율을 기반으로 규칙의 기증치와 추론 범위를 점진적으로 보정함으로써, 알고리즘은 시간 경과에 따른 적응적 학습 특성을 갖는다. 이러한 구조는 외란과 노이즈가 존재하는 환경에서도 EC·pH

편차를 안정적으로 최소화하며, 장기적인 제어 신뢰성을 보장한다.

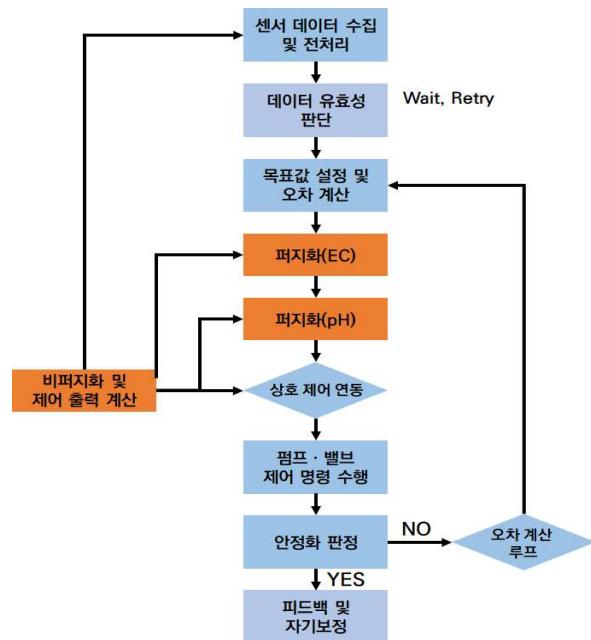


그림 5. EC·pH 자동 보정 알고리즘의 절차적 흐름도

그림 5에서 제안된 EC·pH 자동 보정 알고리즘의 단계적 절차를 나타낸 것으로, 연속시간 피드백 제어 원리에 기반으로 하여 수직농장 양액 재활용 시스템의 제어 안정성과 응답 성능을 향상시킨다.

V. 실험 결과 및 성능 검증

제안된 EC·pH 자동 보정 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 수직농장 양액 순환 시스템을 구축하고 실험을 수행하였다. 본 실험은 제어 알고리즘의 실시간 동작 특성과 응답 특성, 외란 조건에서의 안정성 그리고 양액의 재활용 가능 수준을 확인하는 것을 목적으로 하였다. 시스템 구성은 표 2와 같다. 양액탱크, 희석수 및 산·염기 주입용 펌프, EC·pH 센서, 제어기, 데이터 로깅 장치로 구성하였으며, 제어 주기는 1s, 데이터는 수집 주기는 10Hz로 설정하였다.

표 4. 실험 주요 구성 요소

구성 요소	모델명 / 사양	주요 기능
양액 탱크	50L, PVC 소재	양액 저장 및 순환
펌프	DC 12V, 1.2L/min	희석수 및 산·염기 주입
EC 센서	±0.01 dS/m 정밀도	전기전도도 측정
pH 센서	±0.02 정확도	수소이온 농도 측정
제어기	Arduino Mega 2560	제어 연산 수행
데이터 로거	NVIDIA Jetson Nano	실시간 데이터 수집 및 저장

실험은 초기 EC는 2.85 dS/m, pH는 6.9에서 목표값 EC 20 dS/m, pH 5.8로 자동 보정되는 과정을 관찰하는 방식으로

수행하였다(탱크 온도 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 유지).

EC 제어 결과, 초기 희석수 주입 후 약 90초부터 안정화되어 평균 92초 만에 목표값에 도달하였으며, 안정 구간의 평균 오차는 $\pm 0.03 \text{ dS/m}$ 로 나타났다. 온도 변동 폭은 0.05 dS/m 이내로 유지되어, 온도 변화에 대해 안정적으로 작동함을 확인하였다.

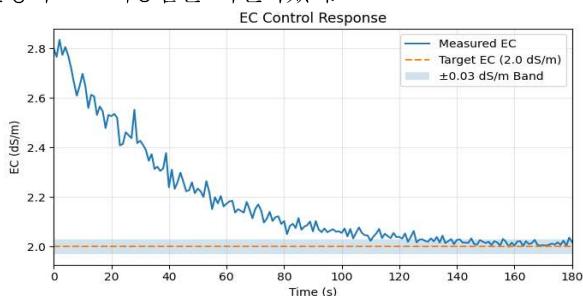


그림 6. EC 제어 응답 곡선

pH 제어 결과, 초기 6.9에서 약 140초 후 목표값 5.8에 도달하였으며, ± 0.04 이내의 안정 범위를 유지하였다.

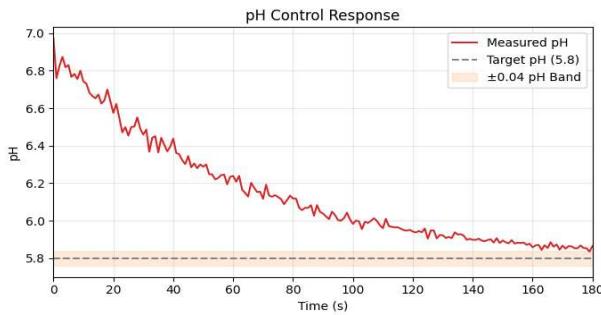


그림 7. pH 제어 응답 곡선

복합 제어 실험에서는 EC와 pH 루프를 동시에 구동하였으며, 두 제어 간 간섭이 거의 발생하지 않았다. EC 보정 완료 후 pH 루프가 순차적으로 활성화되었고, EC 재변동 폭은 $\pm 0.04 \text{ dS/m}$ 이내로 유지되었다. 아래 그림은 EC-pH 복합 제어 응답 곡선을 나타내며, 두 제어 루프가 상호 간섭 없이 안정적으로 수렴함을 보여준다.

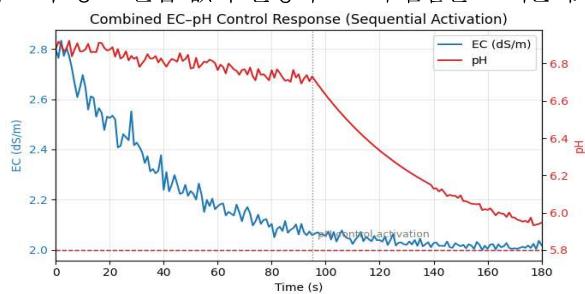


그림 8. EC-pH 복합 제어 응답 곡선

전체 안정화 시간은 퍼지 제어 알고리즘 적용 시 평균 92초로 나타났으며, 이는 일반적인 수동 보정 보다 약 40.1% 단축된 수치이다. 또한 평균 오차율은 약 52% 개선되었다. 본 실험은 동일 조건에서 5회 반복 수행되었으며, EC 안정화 시간의 표준편차는 ± 3.1 초, pH 안정화 시간은 ± 4.3 초로 측정되었다. 평균

오차율의 표준편차는 각각 0.8%(EC), 1.1%(pH)로, 제어 결과의 변동성이 낮고 알고리즘의 재현성이 우수함을 확인할 수 있었다.

표 5. 실험 결과의 평균값 및 표준편차

구분	평균값	표준편차
EC 안정화 시간(초)	92	± 3.1
pH 안정화 시간(초)	140	± 4.3
EC 평균 오차율(%)	4.3	± 0.8
pH 평균 오차율(%)	5.1	± 1.1

자동 제어 방식은 수동 보정에 비해 안정화 속도가 빠르고 오차율이 낮았으며, 목표 범위 내 유지율이 90% 이상이었다. EC와 pH가 각각 목표값 20 dS/m, 5.8로 안정화됨으로써 양액의 이온 농도와 산 염기 평형이 작물 생육에 적합한 수준으로 복원되었음을 확인하였다. 이는 제안된 알고리즘을 통해 페어액이 재활용 가능한 품질로 자동 조정되었음을 의미하며, 실제 수직농장 환경에서도 인력 의존도를 낮추고 시스템 운영 효율을 향상 시킬 수 있음을 시사한다. 향후에는 기존 PID 제어나 단순 규칙 기반 제어 방식과 동일 조건에서 비교 실험을 통해 상대적 성능 우위를 보다 체계적으로 검증하고 제어 신뢰성을 강화할 예정이다.

VI. 결 론

본 연구에서는 수직농장에서 발생하는 페어액의 재활용 효율을 향상시키기 위해, EC-pH 자동 보정 기반의 퍼지 제어 알고리즘을 설계하고 실험적으로 검증하였다. 제안된 퍼지 제어기는 실시간 센서 피드백을 기반으로 양액 농도를 자동 보정한다.

다만 본 연구는 센서 정확도, 반응 지연, 그리고 실험 스케일 측면에서 몇 가지 한계점을 지닌다. 첫째, 사용된 센서의 정밀도는 제한적이며, 실제 대형 수직농장에서 발생할 수 있는 미세 농도 변화를 반영하기에 다소 부족할 수 있다. 둘째, 제어기의 계산 주기 및 구동 응답 시간 또한 실시간성과 정밀도에 영향을 줄 수 있는 요소로, 고성능 제어 하드웨어 적용에 대한 검토가 필요하다. 셋째, 실험은 소형 수직농장 환경에서 수행되었으며, 대규모 시스템에 적용하기 위한 확장성과 시스템 간섭 요인에 대한 후속 분석이 요구된다.

실험 결과, EC 제어에서는 약 90초 내 목표값 (20 dS/m)에 안정적으로 도달하였고, EC는 평균 $\pm 0.03 \text{ dS/m}$, pH는 ± 0.04 의 안정 범위를 유지하며, 대비 수렴 속도와 오차율이 크게 개선되어 알고리즘의 효과성을 입증하였다. 이를 통해 제안된 알고리즘이 기존 수동 제어 방식에 비해 빠른 수렴 속도와 높은 안정성을 가지며, 페어액의 재활용 효율을 유의미하게 향상시킴을 확인하였다.

또한 본 연구는 양액의 EC와 pH가 동시에 제어될 때 발생할 수 있는 상호 간섭 문제를 퍼지 추론 구조를 통해 효과적으로 완화하였으며, 온도 변화나 센서 노이즈 등 외란

조건에서도 안정적으로 제어 성능을 유지하였다. 이러한 결과는 제안된 제어 방식이 폐양액의 품질을 작물 생육에 적합한 수준으로 지동 조정할 수 있음을 의미한다.

향후 연구에서는 제어 대상 변수를 다중화하여 용존산소, 온도, 영양 이온 비율 등 추가 환경인자까지 통합 제어할 예정이다. 또한 데이터 기반 퍼지 규칙 최적화 및 머신러닝 결합형 제어 기법을 도입하여, 보다 자동적이고 자율적인 양액 관리 시스템으로 발전시키고자 한다. 향후 연구에서는 사물레이션- 실험 연계를 통한 디지털 트윈 기반 검증과 기계학습 기반 적응형 제어 구조 접목하여 능동적 보정 프레임워크를 구현할 계획이다. 특히 농장 운영 규모 확대에 따른 네트워크 지연, 센서 이탈, 혼합 반응계 복잡도 증가 등 현실적 제약 요소를 통합 고려한 복합 제어 전략 수립이 향후 핵심 과제가 될 것이다.

REFERENCES

- [1] 이수연, 이성재, 서명훈, 이상우, 심상연, “순환식 상추 양액재배시 양액재활용 기술”, 생물환경조절학회지, 제8권, 제3호, 172-182쪽, 1999년
- [2] 연인원, 이원철, “양액재배를 위한 생육환경 모니터링 및 제어 플랫폼에 관한 연구”, 한국통신학회논문지, 제41권, 제9호, 1132-1140쪽, 2016년 9월
- [3] 정원근, 이병로, 김병철, “양액 자동 공급 제어 시스템의 설계 및 구현”, 한국정보통신학회논문지, 제9권, 제5호, 1059-1065쪽, 2005년 8월
- [4] 박미희, 심미영, 이용범, “잎상추 수경재배에 균관 pH와 EC가 무기이온흡수, 광합성, 증산량 및 생육에 미치는 영향”, 제8권, 제2호, 115-124쪽, 1999년
- [5] 이해진, 양은영, 박금순, 이용범, 배종향, 전경수, “절화 장미 수경재배시 배양액의 농도가 pH와 생육과 품질에 미치는 영향”, 생물환경조절학회지, 제13권, 제4호, 258-265쪽, 2004년 12월
- [6] Yildiz, M., Dursun, M., & Ozden, H. Fuzzy logic controller for automating electrical conductivity and pH in hydroponic cultivation. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 101 - 108. 2022.
- [7] Zhang, J., Liu, H., Wang, Y., & Zhang, G. Nonlinear adaptive generalized predictive control for pH model of nutrient solution in plant factory based on ANFIS. *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 200, 2022.
- [8] Giménez, G., Giné-Bordonaba, J., Gallardo, M., & Thompson, R. B. Application of an alternative nutrient replenishment method to electrical conductivity-based closed-loop soilless cultures of sweet peppers. *Agricultural Water Management*, pp. 281, 2023.
- [9] Lee, J., Kim, S., & Choi, M. Enhancing greenhouse efficiency: Integrating IoT and reinforcement learning

for optimized climate control. *Sensors*, pp. 23, 2023

- [10] 김주신, “다양한 수자원을 이용한 순환식 수경재배 양액 관리 및 나트륨 이온 대응 기술 개발”, 서울대학교 석사학위 논문, 2003년 2월
- [11] 오동규, “수경재배에서 EC가 당근의 생육 및 품질에 미치는 영향”, 제주대학교 석사학위 논문, 2017년 2월
- [12] 김완순, 노미영, 최기영, 이용범, “폐양액 재사용을 위한 전국 수경재배농가 양액관리 실태분석”, 원예과학기술지, 제28권 별호Ⅱ, 61쪽, 2010년 10월

저자 소개

정현창(준회원)



2025년 ~ 국립순천대학교 스마트농업공학과 석사과정 재학

<주관심분야 : 미디어처리, 스마트농업, 인공지능, IoT>

김현준(정회원)



2020년 국립순천대학교 정보통신공학과 졸업
2020년 ~ 2023년 한국스마트팜산업협회 대리
2024년 ~ 국립순천대학교 스마트농업 전공 박사과정 재학

<주관심분야 : 스마트온실 환경제어, 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 융합바이오시스템기계 공학과 교수

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