

대표 시료 기반 폐양액 포집 및 최소 정제·재제조 시스템 설계

정우혁, 이명훈*

*국립순천대학교

juh0329@naver.com, *leemh777@scnu.ac.kr

Design of a Representative-Sample-Based Drainage Collection and Minimal Filtration - Remanufacturing System

Jung Uhyeok , Lee Meong Hun*

*Sunchon National Univ.

요약

배지 기반 스마트팜 재배 시스템에서는 관수 과정에서 폐양액이 지속적으로 발생하나, 고비용 정제 공정과 시간적 변동성으로 인해 재사용에는 한계가 있다. 본 연구는 관수 시작 후 60분간 배출되는 폐양액을 하나의 대표 시료로 구성하는 접근을 제안하였다. 대표 시료는 100 μm 및 5 μm의 최소 여과 공정을 통해 물리적 불순물을 제거하고, EC와 pH 실측값을 기반으로 관수 이벤트 단위의 농도 특성을 평가하였다. 또한 EC·pH 기반 진단과 조성 보정이 가능한 양액 재제조 시스템의 개념을 제시하였다. 본 연구는 스마트팜 환경에서 적용 가능한 비용 효율적 폐양액 재사용 시스템의 기초 프레임워크를 제공한다.

I. 서 론

배지 기반 스마트팜 재배 환경에서는 관수 이후 일정 시간 동안 폐양액이 지속적으로 배출되며, 적절한 관리가 이루어지지 않을 경우 양분 손실, 폐수 증가, 환경 부하로 이어질 수 있다.[1-2] 특히 스마트팜 보급 확대와 함께 양액 사용량과 폐양액 발생량이 증가하면서, 폐양액을 단순 배출이 아닌 자원으로 활용하기 위한 기술적 대응의 필요성이 커지고 있다.[3] 기존 연구는 막여과, 활성탄 흡착, 역삼투등 고도 정제 공정이나 시간대별 성분 변화 분석에 주로 초점을 맞추어 왔다.[4] 그러나 이러한 접근은 설비 비용과 유지관리 부담이 크며, 실제 농가 환경에서는 일사량, 배지 수분 상태, 관수 시점 등 다양한 요인으로 인해 시간 의존적 성분 변동성을 정밀하게 반영하기 어렵다는 한계가 있다. 그 결과, 현장 적용이 가능한 실용적이고 비용 효율적인 재사용 전략은 충분히 제시되지 못하고 있다.[5]

이에 본 연구는 관수 시작 후 60분 동안 배출되는 폐양액을 하나의 대표 시료로 구성하는 접근을 제안한다. 대표 시료는 100 μm 1차 여과와 5 μm 2차 미세여과로 구성된 최소 정제 공정을 통해 물리적 불순물만 제거하고, 영양 성분은 최대한 유지하도록 설계되었다. 폐양액의 화학적 안정성 평가는 상용 스마트팜 환경에서 신뢰성 있게 측정 가능한 pH와 EC를 중심으로 수행하였으며, 이를 통해 관수 이벤트 단위에서 재제조 기준으로 활용 가능한 일관된 농도 특성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

또한 향후 폐양액 재사용 시스템 고도화를 위해 K⁺ 및 NO₃⁻와 같은 주요 영양 이온을 핵심 변수로 포함할 수 있는 개념적 구조를 제시하였다. 본 연구는 시간적 변동성과 환경 요인의 영향을 최소화할 수 있는 대표 시료 기반 접근을 통해, 실제 스마트팜 환경에 적용 가능한 폐양액 재사용 시스템의 구조적 프레임워크와 설계 방향을 제안한다.

II. 시스템 구조 및 설계

스마트팜 배지재배 환경에서 발생하는 폐양액은 관수 시점, 배지 수분 상태, 일사량 등 다양한 요인에 의해 관수 이벤트마다 불규칙한 변동성을 보

인다. 이러한 시간적 변동성은 성분 분석 기준의 일관성을 저해하므로, 본 연구에서는 관수 시작 후 60분 동안 배출되는 폐양액을 하나의 저장조에 집수하여 대표 시료로 구성하는 전략을 적용하였다. 이 대표 시료 기반 접근은 시간 의존적 변화를 효과적으로 제거하면서도 실제 농가 환경에서 단순하게 재현하고 적용할 수 있다는 장점을 가진다.

구성된 대표 시료는 재사용 과정에서의 안정성과 장치 운용성을 확보하기 위해 최소 정제 공정을 거친다. 본 연구에서는 100 μm 1차 여과와 5 μm 2차 미세여과로 이루어진 두 단계 필터링을 적용하여 배지 잔사, 미세 입자, 부유물을 제거하였다. 해당 공정은 이온 제거 기능은 없지만 용존 영양 성분을 보존한 채 물리적 불순물만 제거함으로써, 센서 오염과 접적 기 막힘을 방지하고 비용 대비 효율이 높은 전처리 단계로 기능한다.

정제된 폐양액의 기본 특성 평가는 스마트팜 환경에서 신뢰성 있게 측정 가능한 EC와 pH를 중심으로 수행하였다. EC는 용존 염류 농도를 통합적으로 반영하는 지표로 재제조 시 목표 농도 설정과 보정의 기준으로 활용되며, pH는 영양 성분의 안정성과 식물 흡수 효율에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수이다. 대표 시료의 EC·pH 분석을 통해 관수 이벤트 단위의 일관된 농도 특성을 확보할 수 있으며, 이는 재사용 시스템의 정량적 기준값으로 활용된다.

또한 본 연구는 EC와 pH 기반 진단 결과를 바탕으로 목표 양액 조성에 맞게 농도를 보정하는 재제조 시스템의 개념적 구조를 설계하였으며 이 과정에서 K⁺ 및 NO₃⁻와 같은 주요 영양 이온을 향후 보정 변수로 포함할 수 있도록 확장 가능한 구조를 제안하였다. 비록 본 연구에서는 해당 이온의 직접 측정을 수행하지 않았으나, 향후 센서 기술이나 분석 모듈과 연계될 경우 단계적 농도 조정 및 자동화된 양액 재제조 시스템으로 확장될 수 있다.

제안된 시스템은 대표 시료 구성, 최소 정제, EC·pH 기반 특성 분석, 농도 보정의 순차적 절차로 구성되며, 실제 스마트팜 운영 환경에서 폐양액의 불필요한 배출을 줄이고 재사용을 촉진할 수 있는 실용적 설계 기반을 제공한다.

III. 논의

본 연구는 스마트팜 배지재배 환경에서 발생하는 폐양액을 자원으로 재활용하기 위한 실용적 시스템 구조를 제안하였다. 기존 연구들이 폐양액의 시간대별 성분 변화를 정밀하게 분석하거나 고도 정제 공정을 통해 완전한 양액 수준으로 복원하는 데 초점을 두었던 것과 달리, 본 연구는 실제 농가 운영 환경에서 구현 가능성과 비용 효율성을 우선적으로 고려하였다. 특히 관수 이벤트마다 상이하게 나타나는 폐양액의 시간적 변동성과 외부 환경 요인을 최소화하기 위해, 관수 시작 후 60분 동안 배출되는 폐양액을 하나의 대표 시료로 구성하는 접근을 적용하였다.

대표 시료 기반 전략은 시간 의존적 변화를 제거함으로써 매 관수 이벤트마다 일관된 분석 기준을 제공하며, 실제 스마트팜 환경에서 발생하는 일사량, 배지 수분 상태, 관수 빈도 등의 변동성을 효과적으로 흡수할 수 있다. 이는 폐양액 재사용 여부 판단 및 농도 조절을 위한 기초 데이터를 안정적으로 확보할 수 있다는 점에서 재사용 시스템의 신뢰성을 높이는 핵심 요소로 작용한다. 또한 해당 방식은 추가적인 복잡한 제어 없이 기존 농가 시스템에도 쉽게 적용할 수 있어 현장 활용성이 높다.

폐양액의 재사용을 위해 적용된 최소 정제 공정은 100 μm 1차 여과와 5 μm 2차 미세여과로 구성되며, 이는 고가의 역삼투나 나노여과 공정과 달리 용존 영양 성분의 손실 없이 물리적 불순물만 제거하는 것을 목표로 한다. 이 공정은 비용과 유지관리 측면에서 농가 부담이 적어, 폐양액 재사용 시스템 확산을 위한 현실적인 전처리 방식으로 평가될 수 있다.

본 연구는 EC·pH 기반 분석만으로도 폐양액의 기본 품질 상태를 충분히 파악할 수 있음을 확인하였으며, 이는 센서 기반 자동화 시스템과의 연계 가능성을 높이는 장점으로 작용한다.

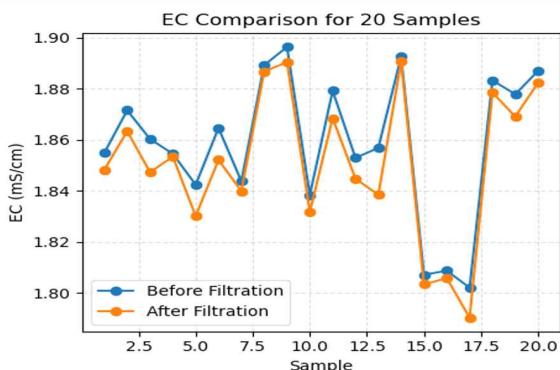


그림 1. 20개 시료에 대한 EC 비교

Figure 1. EC Comparison for 20 Samples

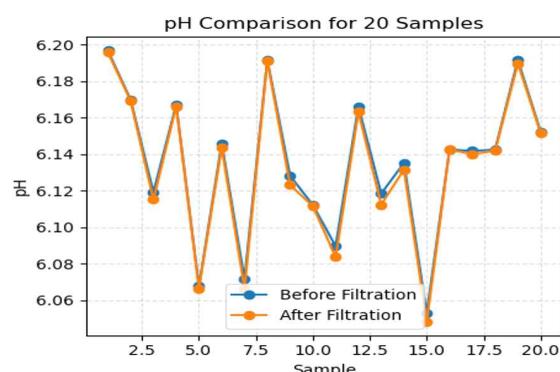


그림 1. 20개 시료에 대한 PH 비교

Figure 1. PH Comparison for 20 Samples

아울러 본 연구는 K^+ , NO_3^- 같은 주요 영양 이온을 향후 재제조 알고리즘에 포함할 수 있는 확장 구조를 제안하였다. 비록 본 연구에서는 해당 이온에 대한 직접적인 정량 분석을 수행하지 않았으나, EC·pH 기반 1단계 재사용 구조에서 출발하여, 다성분 센서 기술과 자동 보정 알고리즘이 도입될 경우 정밀한 양액 재제조 시스템으로 발전할 수 있는 가능성을 제시하였다. 이러한 단계적 확장 구조는 기술 도입 비용과 시스템 복잡도를 점진적으로 증가시킬 수 있어, 스마트팜 운영자의 수용성을 높일 수 있다. 종합적으로 볼 때, 본 연구에서 제안한 대표 시료 기반 폐양액 재사용 시스템은 단순성, 재현성, 비용 효율성을 기반으로 실제 스마트팜 환경에 적용 가능한 구조를 갖는다. 이는 폐양액의 단순 배출로 인한 자원 손실과 환경 부담을 완화하고, 양액 관리의 효율성과 지속가능성을 동시에 향상 시킬 수 있는 실질적인 대안으로 평가될 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 스마트팜 배지재배 환경에서 발생하는 폐양액을 자원으로 재활용하기 위한 실용적 시스템을 제안하였다. 관수 시작 후 60분 동안 배출되는 폐양액을 대표 시료로 구성하는 전략을 통해 시간적 변동성과 운영 환경의 불확실성을 최소화하고, 재사용 시스템 설계를 위한 안정적인 기준을 확보하였다.

대표 시료의 EC와 pH 분석 결과는 폐양액의 기본 특성을 평가하고 재사용 여부 및 농도 보정의 기준값으로 활용 가능함을 보여주었다. 또한 본 연구는 K^+ , NO_3^- 등 주요 이온 성분을 향후 재제조 시스템에 포함할 수 있는 확장 구조를 제시함으로써, EC·pH 기반 1단계 재사용 시스템에서 정밀한 자동 재제조 시스템으로 발전할 수 있는 가능성을 제시하였고 제안된 시스템은 단순성과 비용 효율성을 바탕으로 실제 스마트팜 환경에서 적용 가능하며, 폐양액 배출 저감과 자원순환 촉진에 기여할 수 있다. 향후 연구에서는 주요 영양 이온에 대한 정량 분석과 장기 재사용 실험을 통해 시스템의 효과성을 검증하고, 센서 기반 자동화 기술과 결합한 재제조 알고리즘 개발이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임
(IITP-2025-RS-2023-00259703)

참 고 문 헌

- [1] 양광호, 노지연, and 이명훈, "스마트 온실에서 발생하는 폐양액의 최소화를 위한 모델 설계," 한국통신학회 학술대회논문집, pp. 96-97, 강원, 2023-02-08.
- [2] 박병록, 조홍목, and 김민상, "비순환식 양액재배에서 발생하는 폐양액, 폐배지, 폐작물이 환경에 미치는 영향," 유기물자원화, vol. 29, no. 1, pp. 19-27, 2021. (<https://doi.org/10.17137/korae.2021.29.1.19>)
- [3] 박준영, 우주완, 김치호, 이주영, 서민호, and 최승목, "폐양액 활용 수전해에서 산소발생반응을 위한 코발트 산화물 촉매 합성 최적화 연구," 한국표면공학회 학술발표회 초록집, pp. 107-107, 전남, 2024-10-30.
- [4] 서민호, 이종민, and 우주완, "제일원리 전산모사법을 이용한 폐양액 수전해용 코발트 산화물 촉매의 흡착 이온 특성 연구," 한국표면공학회지, vol. 56, no. 6, pp. 427-436, 2023.
- [5] 이용범, 최기영, 노미영, and 김완순, "폐양액 재사용을 위한 전국 수경 재배농가 양액관리 실태분석," 원예과학기술지, vol. 28, no. 2, pp. 61-61, 2010.