

아쿠아포닉스 시스템에서 물·양분 순환 효율 최적화 방안 연구

정광훈, 이명훈*

*국립순천대학교

gwanghoon5035@gmail.com, *leemh777@scnu.ac.kr

A Study on the Optimization of Water - Nutrient Circulation Efficiency in an Aquaponics System

Jung Gwang Hoon, Lee Meong Hoon*

*Sunchon National Univ.

요약

본 연구는 스마트 제어 기반 아쿠아포닉스 시스템의 물·양분 순환 효율 최적화 방안을 제안하였다. 약 6개월간 스마트 제어 미적용(A)과 적용(B) 시스템을 비교한 결과, B 시스템은 pH와 DO의 변동 폭이 감소하고, 질산염 및 암모늄 농도가 안정적으로 유지되어 수질 안정성과 양분 순환 효율이 향상되었다. 또한 시계열 데이터를 이용해 LSTM, Informer, Autoformer, DLinear 모델을 비교한 결과, Autoformer 모델이 RMSE 0.60으로 가장 높은 예측 정확도를 보여 수질 변화 예측과 자동 제어 최적화에 유효함을 확인하였다. 이러한 결과는 스마트 제어 기술이 단순한 모니터링을 넘어, 실시간 데이터 분석과 예측 기반 제어를 통해 아쿠아포닉스 운영의 자동화 수준을 크게 높일 수 있음을 의미한다. 특히 예측 모델을 활용하면 수질 악화나 양분 불균형을 사전에 감지하여 에너지 낭비를 줄이고 생산성을 극대화할 수 있다. 본 연구는 센서 기반 제어와 AI 예측 모델을 결합한 스마트 아쿠아포닉스 운영 전략의 효과성을 입증하였으며, 향후 지능형 폐쇄 루프 제어 시스템으로 발전할 경우 지속가능한 도심형 농업과 자원 순환형 스마트팜의 구현에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

아쿠아포닉스는 수경재배(hydroponics)와 양식(aquaculture)을 결합하여 물과 양분을 순환시키는 지속가능한 농업 방식이다[1]. 어류의 배설물로 발생한 암모니아성 질소는 미생물에 의해 아질산염과 질산염으로 변환되며, 이 질산염은 식물의 양분으로 흡수되어 물을 정화한다. 이러한 순환을 통해 폐쇄형 수생태계가 형성되어 물 사용량을 크게 줄이고 환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있다[2]. 그러나 가정용 소규모 아쿠아포닉스의 경우 수질 화학에 대한 전문 지식 부족과 유지관리 어려움으로 인해 안정적 운영에 어려움을 겪는다[3]. 수질 악화를 방지하면 어류 스트레스 증가와 작물 생산 저해로 이어지며, 극단적 경우 어류 폐사나 작물 실패를 초래할 수 있다[4].

센서와 자동화 기술을 접목한 스마트 아쿠아포닉스는 이러한 문제의 해결책으로 주목받고 있다. 다양한 센서를 통해 pH, 용존산소(DO), 수온, 양분 농도 등을 실시간 모니터링하고, 자동 제어를 통해 최적 환경을 유지함으로써 운영 효율과 생산성을 향상시킬 수 있다[5].

본 연구의 목적은 아쿠아포닉스 시스템에서 센서 기반 스마트 제어가 물·양분 순환 효율에 미치는 효과를 실증적으로 평가하고, 최신 시계열 예측 기법을 활용하여 시스템 효율을 극대화할 수 있는 운용 전략을 제시하는 것이다.

본 연구에서는 약 6개월간 동일한 조건에서 스마트 제어 시스템 미설치 상태(A)와 설치 후 상태(B)를 비교 분석하여, 수질 및 양분 지표의 개선 정도와 어류/작물 생산에 미치는 영향을 정량적으로 평가한다. 또한 수집된 시계열 센서 데이터를 바탕으로 Transformer 계열의 예측 모델과 LSTM을 적용하여 향후 수질과 양분 변화를 예측하고, 이를 토대로 예측 기반 사전 제어 등 효율 최적화 방안을 모색한다. 이러한 접근을 통해 스마트 아쿠아포닉스의 실용적 이점을 검증하고, 향후 지능형 제어를 통한 지속가능한 도심형 농업의 발전 방향을 제시하고자 한다.

II. 본론

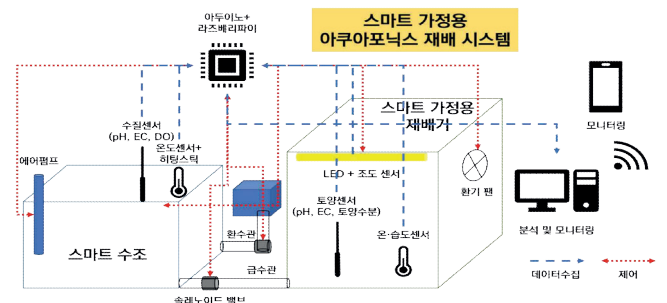


그림 1. 스마트 가정용 아쿠아포닉스 재배 시스템 구성도

fig 1. Configuration Diagram of a Smart Home Aquaponics Cultivation System

본 연구에서 구축한 아쿠아포닉스 재배 시스템 구성도는 <그림 1>과 같다. <그림 1>은 가정용 소규모 모델로, 어류 양식 수조와 식물 재배 수경지대가 물 순환으로 연결된 구조이다.

어류로는 구피를, 식물로는 상추류를 선정하여 일반적인 식물-어류 조합으로 구성하였다. 시스템 A(미설치)는 전통적인 아쿠아포닉스 운영으로, 센서 모니터링은 있으나 제어 장치 개입 없이 사람이 정해진 주기에 따라 수동으로 펌프 가동, 급이, 수질 보정 등을 수행한다. 시스템 B(설치 후)는 자동제어 시스템을 통합하여, 센서 신호에 따라 펌프, 에어레이션, 히터, 조명, 영양분 투입 장치를 실시간 제어하도록 하였다.

측정된 데이터 항목은 수질 및 환경 센서 값과 생물 성장 지표를 포함하며, 구체적으로 pH, 전기전도도(EC), 용존산소(DO), 수온, 조도, 질산염, 암모늄 농도 등의 수질 데이터와, 수경 펌프의 가동 주기, 식물의 생산량, 어류의 성장률 등을 주기적으로 기록하였다. 센서 데이터는 클라우드를 통해 실시간 수집 및 저장되었으며, 약 6개월 간의 시계열 데이터 세트를 구성하였다.

아쿠아포닉스 시스템의 물-양분 순환을 파악하기 위해 질소 순환 관련 지표를 특히 중점적으로 관찰하였다

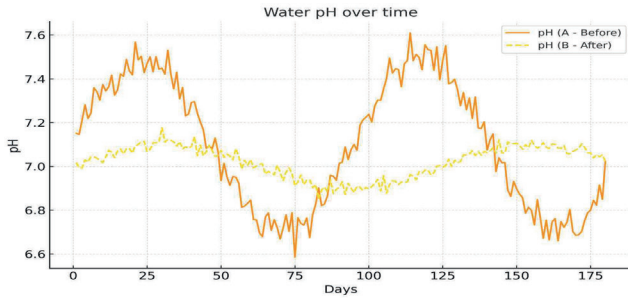


그림 2. 시간에 따른 수질의 pH 변화 추이
fig 2. Variation of Water pH over Time

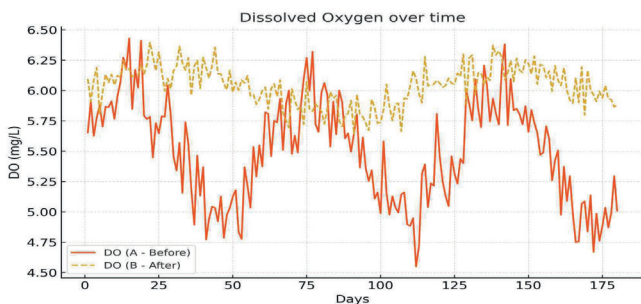


그림 3 시간에 따른 DO 변화 추이
fig 3. Variation of Dissolved Oxygen(DO) over Time

<그림 2>와 <그림 3>은 두 시스템에서 시간 경과에 따른 pH와 DO 변화 추이를 비교한 것이다. pH는 A에서 6.5~7.8 범위로 넓게 변동하며 관리 불안정성이 나타났으나, B에서는 7.0 ± 0.1 수준으로 안정 유지되어 자동 제어의 효과가 확인되었다. DO 역시 A는 심야에 4 mg/L 이하로 하락하는 구간이 있었으나, B는 5.5~6.5 mg/L 범위를 지속적으로 유지하며 저산소 현상이 거의 발생하지 않았다. 이는 B 시스템의 센서 기반 실시간 제어가 산소 공급을 즉각적으로 조정해 어류와 식물에 최적의 수질 환경을 유지했음을 보여준다.

표 1. 스마트 제어 유무에 따른 주요 지표 비교

Table 1. Data Properties

항목	A	B
pH	7.1 ± 0.4	7.0 ± 0.1
DO	5.5 ± 0.8	6.0 ± 0.3
질산염	50.2	29.8
암모늄	0.48	0.09

<표 1>은 두 시스템의 주요 수질 및 생장 지표 평균값을 요약한 것이다. A에서는 질산염 농도가 평균 50 mg/L로 누적되었으나, B에서는 약 30 mg/L 수준으로 감소하여 식물의 양분 흡수 효율이 향상된 것으로 나타났다. 또한 암모늄은 A에서 약 0.5 mg/L 검출되었으나, B에서는 0.1 mg/L 이하로 유지되어 어류 배설물의 질산화가 원활히 이루어졌다. 즉, 스마트 제어 시스템이 양분의 생성 - 전환 - 흡수 과정을 균형 있게 유지시켜, 물속 양분 축적을 최소화하고 순환 효율을 높인 결과로 해석된다.

본 연구에서는 질산염(NO_3^-) 농도를 예측 변수로 하여 6개월간의 시계열 데이터를 기

반으로 LSTM, Informer, Autoformer, DLinear 네 가지 딥러닝 예측 모델을 비교하였다.

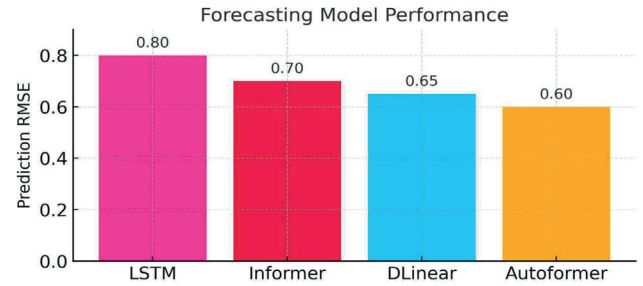


그림 4. 모델별 질산염 예측 정확도

fig 4. Prediction Accuracy of Nitrate Concentration by Model

<그림 4>는 모델별 질산염 예측 정확도 비교 결과로, Autoformer가 RMSE 0.60으로 가장 정확한 예측 성능을 보였고, Informer와 DLinear가 그 뒤를 이었다 (RMSE 0.70, 0.65). LSTM은 장기 추세 학습에 한계가 있었다. 예측 모델을 활용하면 양분 농도 상승이나 수질 변화 등을 사전에 감지해 제어 기준을 자동 조정함으로써, 스마트 아쿠아포닉스의 운영 효율과 에너지 절감 효과를 극대화할 수 있다.

III. 결론

본 연구에서는 스마트 제어 기반 아쿠아포닉스 시스템의 물-양분 순환 효율 최적화 방안을 제시하였다. 약 6개월간의 실험 결과, 자동제어 시스템을 적용한 시스템 B는 기존 방식(A)에 비해 pH와 DO 변동 폭이 줄고, 질산염과 암모늄 농도가 안정적으로 유지되어 수질 안정성과 양분 순환 효율이 향상되었다. 또한 LSTM, Informer, Autoformer, DLinear 등 최신 시계열 예측 모델을 적용한 결과, Autoformer 모델이 가장 높은 예측 정확도(RMSE 0.60)를 보여 향후 수질 변화 예측과 자동 제어 최적화에 유용함을 확인하였다. 따라서 본 연구는 센서 기반 제어와 AI 예측 모델을 결합한 스마트 아쿠아포닉스 운영 전략의 실효성을 입증하였으며, 향후 지능형 폐쇄 루프 제어로 확장 시 지속가능한 도심형 농업 실현에 기여할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

"이 논문은 2025학년도 국립순천대학교 글로벌대학 사업비의 지원을 받아 연구되었음"

참 고 문 헌

- [1] 이현섭 and 김진덕, "생육 환경 개선을 위한 아쿠아포닉스 양분액 다층 순환구조 시스템 설계," 한국정보통신학회 종합학술대회 논문집, pp. 289-290, 경남, 2024-10-24.
- [2] 이현섭 and 김진덕, "아쿠아포닉스 물고기 생태 관리를 위한 스마트 비전 활용 시스템 설계," 한국정보통신학회 종합학술대회 논문집, pp. 278-280, 경남, 2024-10-24.
- [3] 이현섭, 차주형, 배성준, 박지은, 장시웅, and 김진덕, "영상 기반의 실시간 유량 감지를 통한 아쿠아포닉스 환경 유지 시스템 설계," 한국정보통신학회 종합학술대회 논문집, pp. 358-360, 경기, 2023-10-26.
- [4] 이정호, 백정현, and 양오석, "LSTM 모델 기반 아쿠아포닉스 시스템 EC 예측 및 순환수제어 알고리즘 구현," 한국통신학회논문지, vol. 48, no. 12, pp. 1616-1622, 2023. (10.7840/kics.2023.48.12.1616)
- [5] 이정호, 백정현, and 양오석, "LSTM 모델 기반 아쿠아포닉스 시스템 EC 예측 및 순환수제어 알고리즘 구현," 한국통신학회논문지, vol. 48, no. 12, pp. 1616-1622, 2023. (10.7840/kics.2023.48.12.1616)