

측정된 데이터 항목은 수질 및 환경 센서 값과 생물 성장 지표표를 포함하며, 구체적으로 pH, 전기전도도(EC), 용존산소(DO), 수온, 조도, 질산염, 암모늄 농도 등의 수질 데이터와, 수경 펌프의 가동 주기, 식물의 생장량, 어류의 생장량 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

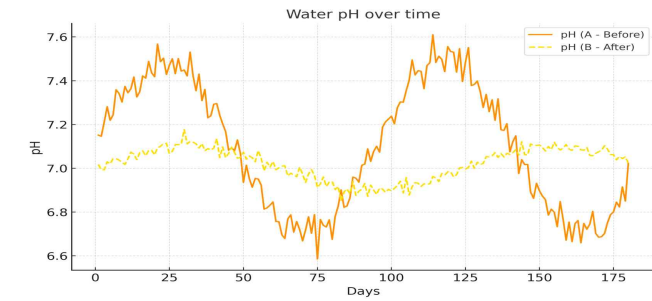


그림 2. 시간에 따른 수질의 pH 변화 추이  
fig 2. Variation of Water pH over Time

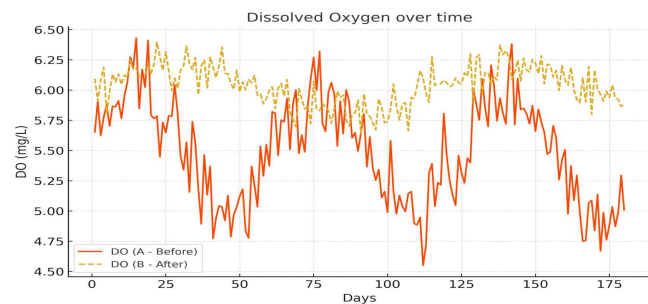


그림 3 시간에 따른 DO 변화 추이  
fig 3. Variation of Dissolved Oxygen(DO) over Time

<그림 2>와 <그림3>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( $\text{NO}_3^-$ ) 농도를 예측 변수로 하여 6개월간의 시계열 데이터를 기

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

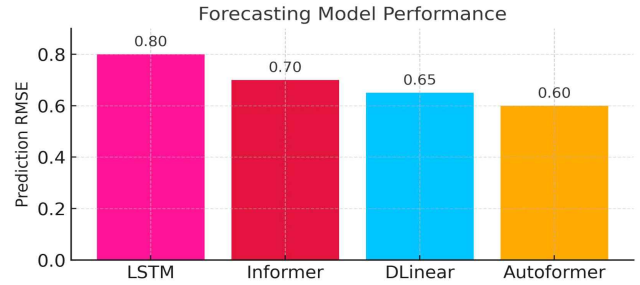


그림 4. 모델별 질산염 예측 정확도

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)