

인공지능 기반 통합 가상물리시스템을 활용한 하수처리 자율제어 및 검증

여우석*, 김민철**, 김종규***

*신한대학교 건설환경기술연구원

**서울물재생시설공단 물재생연구소

***신한대학교 에너지공학과

e-mail:jkim@shinhhan.ac.kr

Autonomous control and verification of wastewater treatment using an AI-based integrated cyber-physical system

Wooseok Yeo*, Kim Mincheol**, Jong Kyu Kim***

*Institutie of Construction & Environmental Technology, Shinhhan University

**Water Regeneration Research Institute of Seoul Water Recycling Corporation

***Dept. of Energy Engineering, Shinhhan University

요약

본 논문에서는 하수처리장의 효율적이고 안정적인 운영을 위해 인공지능 기반 통합 가상물리시스템(Cyber-Pysical System, CPS)을 개발하고 Pilot Plant를 통해 성능을 검증하였다. 개발된 CPS는 모니터링, 시뮬레이션, 제어, 시각화 기능을 통합하여 실시간 최적 운전을 지원하며, MLE 및 A2O 공정 Pilot Plant에 적용한 결과 방류수 수질 안정성을 안정적으로 유지하고 송풍량 최적화로 에너지 절감 효과를 확인하였다. 본 기술은 향후 실규모 적용을 통해 하수처리장의 스마트화와 지속가능한 운영에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

합 제어 플랫폼으로, 모니터링·예측·제어·시각화의 기능을 유기적으로 연계한다.

1. 서론

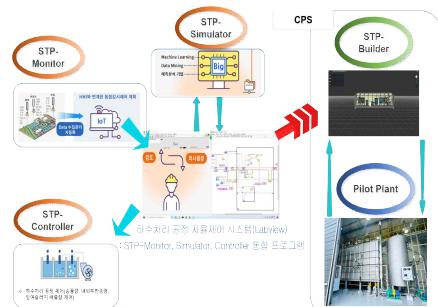
지속적인 도시화와 인구 증가로 인한 하수 발생량 증가는 하수처리장의 안정적 운영과 효율성 확보를 중요한 과제로 만들고 있다. 특히 강화되는 방류수 수질 기준은 기존의 경험적·수동적 제어 방식에 한계를 드러내고 있으며, 이는 에너지 낭비와 처리수질의 변동성을 야기한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 하수처리 분야에서도 인공지능(AI)과 디지털 트윈 기술을 접목한 자율제어 시스템 도입이 요구되고 있다.

본 연구는 하수처리 공정을 대상으로 실시간 모니터링, 예측, 제어, 시각화를 통합한 가상물리시스템(Cyber-Physical System, CPS)을 개발하고, 이를 Pilot Plant에 적용하여 현장 검증을 수행하는 것을 목표로 하였다.

2. 본론

2.1 CPS 시스템 개발

개발된 CPS는 하수처리 공정의 데이터를 기반으로 한 통



[그림 1] 통합가상물리시스템 구축 모식도

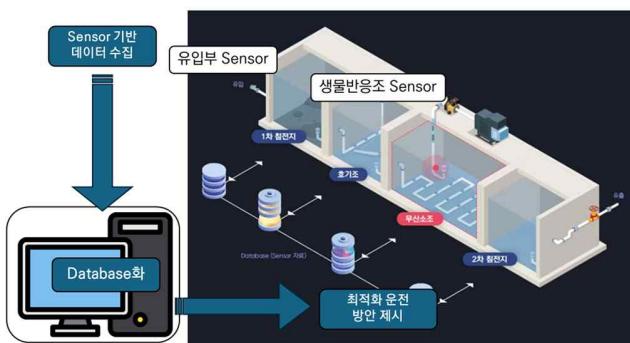
먼저 STP Monitor는 센서를 통해 유입수와 반응조 내의 유량 및 수질을 실시간으로 수집하여 데이터베이스화하고, 운전자가 이를 통해 공정의 상태를 정확히 파악할 수 있도록 한다. 이렇게 확보된 데이터는 STP Simulator로 전달되며, 활성슬러지 모델(ASM)과 인공지능 알고리즘을 활용하여 방류수 수질을 예측하고 최적 운전 조건을 산출한다. 산출된 조건은 STP Controller를 통해 실제 운전에 반영되어 송풍량과 내부·외부 반송량 등 주요 제어 인자가 자동으로 조정된다. 마지막으로 STP Builder는 이러한 과정을 디지털 트윈 기반의 3차원 가상공간에서 구현하여, 운전자가 직관적으로 공정

의 동작과 제어 결과를 확인할 수 있도록 한다.

참고문헌

2.2 Pilot Plant 구축 및 운전

CPS의 현장 적용성을 검증하기 위해 MLE(100 m³/d)와 A2O(60 m³/d) 공정을 기반으로 한 Pilot Plant를 구축하였다. 계절별·부하별 유입수 특성을 분석하고, GPS-X 기반 공정 모사를 수행하여 다양한 운전 시나리오를 검토하였다. 이를 통해 송풍량, 내부·외부 반송량 등 주요 운전 인자의 최적 조건을 도출하고, 인공지능 제어 알고리즘에 반영하여 실시간 제어 체계로 구현하였다.



[그림 2] CPS 가동 구조

2.3 성능검증 결과

자율제어 모드와 기존 수동 운전을 비교한 결과, CPS는 변동 조건에서도 방류수 수질을 안정적으로 유지하였다. 또한 송풍 제어 최적화를 통해 불필요한 전력 사용을 줄일 수 있었으며, 이를 통해 에너지 절감과 운전 효율 향상 가능성을 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 하수처리 공정의 안정적이고 효율적인 운영을 위해 인공지능 기반 통합 CPS를 개발하고, Pilot Plant를 통해 성능을 검증하였다. 그 결과, 제안된 CPS는 방류수 수질 안정성과 에너지 절감을 동시에 달성할 수 있음을 확인하였다. 또한 디지털 트윈 기반의 시각화와 실시간 제어 기능을 통해 운전자의 의사결정을 지원하고, 운영의 신뢰성을 높일 수 있음을 보여주었다.

향후에는 실규모 하수처리장에 본 기술을 적용하여 장기적인 운영 데이터를 확보하고, 제어 알고리즘을 고도화함으로써 안정성과 경제성을 더욱 강화할 필요가 있다. 본 연구에서 제안한 AI-CPS 자율제어 기술은 하수처리장의 스마트화에 기여할 수 있는 실질적 방안이며, 지속 가능한 수자원 관리와 환경 보호를 위한 중요한 기술적 기반이 될 것으로 기대된다.

- [1] 김민한, 지승희, 장정희, “하수처리장의 포기조 최적 DO 농도 산정 및 공기송풍량 자동제어를 통한 에너지 절감 효과 도출”, 에너지공학, 제 23권 2호, pp. 49–56, 6월, 2014년.
- [2] 주형구, 임준목, “하수처리시설 수질인자의 머신러닝 예측 모델”, 대한산업공학회지, 제 49권, 1호, pp. 95–106, 2월, 2023년
- [3] 남의석, “설명가능한 신경회로망을 이용한 하수처리시스템의 활성슬러지 공정 최적화”, 전기학회논문지, 제 69권, 12호, pp. 1950–1956, 12월, 2020년
- [4] 이승명, 김한래, 기경서, “사전감지기술 및 송풍량 자동제어를 기반으로 한 저에너지 하수관리기술에 관한 연구”, 환경영향평가, 제 28권, 6호, pp. 592–603, 12월, 2019년