

수처리공정의 디지털 트윈 요소기술과 추진 전략

조영만* · 정용준***

*한국상하수도협회

**부산가톨릭대학교 소방방재학과

Element Technology and Strategy of Digital Twin in the Water Treatment

Young-Man Cho* · Yong-Jun Jung***

*Korea Water and Wastewater Works Association

**Department of Fire&Disaster Prevention, Catholic University of Pusan

(Received : 11 August 2023, Revised : 8 October 2023, Accepted : 13 October 2023)

요약

국내 상하수도 시설들은 운전과 관리 인력의 노후화와 같은 유지관리의 어려움이 가속화되고 있으므로 디지털트윈 기술이 유력한 관리 기술로 부각되고 있다. 국내 정수장의 디지털트윈 기술은 환경부의 지능형 하수처리, 일부 지자체에서 독자적으로 진행되는 사업 및 K-water 주관의 디지털 트윈 과제 등이 포함되지만, 적용 범위가 각 기관별로 상이하다. 이에 따라 정수공정에서는 시행착오를 줄이고, 미래 사업 활성화를 위해서는 기술표준화와 순차적 도입과정이 필요하다. 본 연구의 목적은 환경부 스마트하수처리사업, K-water 지능형정수공정 구현사업, 지자체 사업 등 각 기관별로 추진되고 있는 디지털트윈 관련 기술에 대한 효율적인 추진 전략을 제공하는데 있다.

핵심용어 : 인공지능, 전산유체역학, 디지털트윈, 사물인터넷, 네트워크, 상수도

Abstract

Domestic water supply and sewage facilities are rapidly aging and maintenance difficulties such as aging of operation and management personnel are overlapping, so Digital Twin technology is attracting attention as an intelligent means of process management. Digital twin projects for domestic water treatment processes include the smart sewage treatment project promoted by the Ministry of Environment, projects independently promoted by some local governments, and digital twin purification plant projects promoted by K-water. However, the content of digital twin promotion is different for each institution. Therefore, in the water treatment process, technological standardization and step-by-step implementation methods for digital twins must be preceded to reduce trial and error in future business promotion. This study aims to provide an efficient promotion plan by prescribing the digital twin element technology and composition method in the water treatment process and reviewing the contents currently being promoted by the Ministry of Environment, local governments, and K-Water individually.

Key words : AI, Computational Fluid Dynamics(CFD), Digital twin, IoT, Network, Water supply

*To whom correspondence should be addressed.

Department of Fire and Disaster Prevention, Catholic University of Pusan
E-mail : yjjung@cup.ac.kr

• Young-Man Cho Korea Water and Wastewater Works Association / Professional committee member (cho12211@daum.net)

• Yong-Jun Jung Department of Fire and Disaster Prevention, Catholic University of Pusan / Professor (yjjung@cup.ac.kr)

1. 서론

전 세계는 4차 산업혁명 시대에 직면하면서 산업 전 분야에 걸쳐 혁신으로 기존 패러다임의 변화에 대응하고 있고, 비대면 서비스의 확대가 가속화됨에 따라 신개념의 디지털 전환 시대에 돌입하게 되었다(Callcut, M., et al., 2021, Diego, MBS., et al., 2022, Javaid, M., et al., 2023). 국내 대부분의 수 처리시설은 '60~70년대에 집중적으로 설치되어 시설의 노후화가 급속하게 진행되고 있어 성능저하와 시설의 유지관리 비용이 빠르게 증가하고 있을 뿐만 아니라 운영관리 요원의 고령화는 물론 기상이변, 미량유해물질 오염 등 새로운 유형의 재난으로 자연과 사회구조적 환경은 갈수록 악화되고 있다(Berglund et al., 2021). 정수처리시스템 전반에 대한 위험도가 높아지고 있음에도 불구하고, 이에 대응할 수 있는 정수처리 진단 및 지능화 시스템은 크게 부족한 실정이다. 정부는 이와 같은 시대적 상황에 대응하기 위해서 2020년 한국형 뉴딜 정책으로 디지털 뉴딜과 그린 뉴딜 정책을 발표하면서 환경산업 분야에 디지털트윈(Digital twin) 기술을 소개하였다(Ahn et al., 2020, Park et al., 2021). 현재 과학기술정보통신부 주관으로 국가 차원의 디지털트윈 활성화 사업이 추진되고 있으나, 각각의 산업분야는 자신의 고유한 산업특성에 적합한 방향설정과 기술 표준화가 필요한 실정이다. 수처리공정에 대한 디지털트윈 기술은 원·정수 수질오염, 각종 기기 및 시설물의 오작동 및 전력소비 증가 등 이상 징후 등을 사전에 예측함으로써 에너지 절감과 시설의 수명연장, 설비 가동효율 최적화 등을 가능하게 한다(Shim et al., 2022, Hosamo et al., 2022, Helena et al., 2022). 정수공정에서 디지털트윈(Digital Twin) 기술의 핵심 요소기술은 네 가지 기술로 구성될 수 있다. 첫째는 공정 상태를 파악하기 위한 측정 기술과 측정된 자료를 송수신하는 네트워크 IoT 기술이다. 둘째는 2차원 도면을 입체화하는 기술과 실제 세계와 가상세계를 결합하는 가상현실(Virtual Reality, VR), 증강현실(Augmented Reality, AR), 혼합현실(MR, Mixed Reality) 기술로 대변되는 3차원가시화이다. 셋째는 공정을 진단하고 평가하는 전산유체시뮬레이션(Computational Fluid

Dynamics, CFD)이다. 넷째는 공정을 진단 예측하여 자율 운영을 목표로 하는 인공지능 통합운영시스템이다.

수처리공정에서 디지털트윈 기술 구현은 전문한 네 가지 요소기술 간의 상호 유기적인 통합을 위해 요소기술 구성 방법, 표준 등 기술요구 조건 등을 명확히 해야 한다. 본 연구는 수처리 공정에서 디지털트윈 요소기술 및 구성방법을 규정하고 현재 환경부, 지자체, 한국수자원공사(K-water)가 개별적으로 추진하고 있는 내용을 검토하여 국내 수처리공정에서 디지털트윈 기술 구현을 위한 효율적인 추진방안을 제시하고자 한다.

2. 연구 범위 및 방법

2.1 연구 범위

수처리 공정에서 디지털트윈 시스템을 구현하기 위해서는 Fig. 1과 같이 데이터 측정과 네트워크 기술, 공정의 3차원가시화 기술, 전산유체시뮬레이션 기술, 인공지능(Artificial Intelligence, AI)을 포함하는 통합관리시스템 등 4가지 기술이 상호 유기적으로 결합되어야 한다.

수처리 공정에 디지털트윈의 첫 번째 요소 기술은 공정 상태의 물리량을 계측하는 측정기술이며 측정은 모든 요소 기술의 기본이 되는 중요한 기술이다. 공정을 3차원으로 가시화하는 기술은 공정을 3D 입체화하여 후속 기술인 전산유체시뮬레이션 그래픽 자료로 활용될 뿐만 아니라 VR, AR, MR로 응용되는 기술이다. 전산유체시뮬레이션은 시뮬레이션 진단을 통해 공정진단이 이루어지고 결과는 통합관리시스템에서 전체 공정이 연동제어 된다. 정수공정을 실시간으로 진단 평가하기 위해서는 실제 공정의 운전 상태를 계측하여 수집되는 수많은 데이터를 인공지능 기술을 통해 분석 평가하게 되며, 이와 같이 측정·분석된 자료가 통합관리시스템에서 통합 관리된다. 본 연구의 연구 범위는 디지털트윈의 4가지 요소기술인 측정, 3차원가시화, 전산유체시뮬레이션, AI 통합관리시스템에 대한 기술적 내용과 요소 기술 간의 상호 유기적 관계 등을 규명하는 것이다.

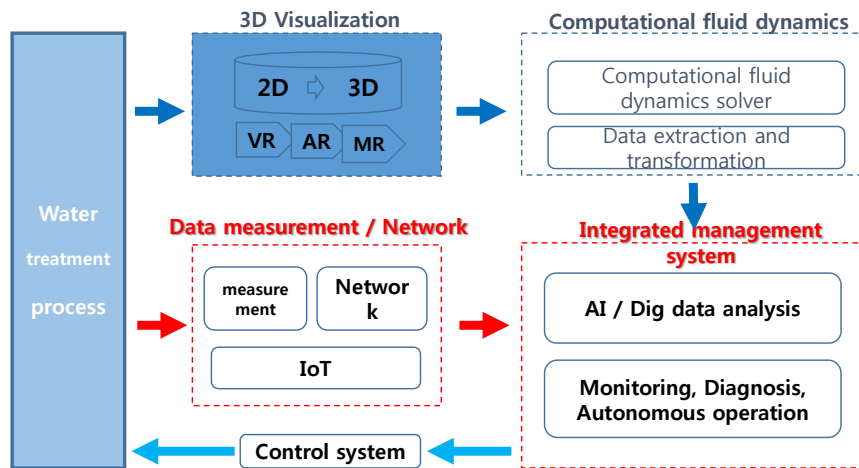


Fig. 1. Configuration diagram of digital twin element technology in water treatment process.

2.2 연구 방법

수처리 공정에서 디지털트윈 기술은 국가 기관인 환경부와 공기업인 한국수자원공사, 한국환경공단 그리고 특·광역시로 대변되는 지자체가 개별적으로 사업을 추진하고 있다. 따라서 디지털트윈에 대한 개념에서 추진 방법, 내용 등이 각 사업주체에 따라 매우 상이하다. 본 연구에서는 이와 같은 각 주체간의 추진 내용과 차이를 구분하고 분석하기 위해 환경부가 추진하고 있는 하수처리장지능화 사업을 비롯하여 한국수자원공사 그리고 서울시를 포함하여 8개 특·광역시의 디지털트윈 관련 사업 진행사항을 조사 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 데이터 측정 및 수집

단위 공정에 대한 물리량을 측정하는 기술은 모든 공정 운영의 기초가 되는 데이터를 1차적으로 생산하는 의미에서 매우 중요한 기술이다. 또한 측정된 자료의 수집은 단위 공정에 설치된 수질 계측기기로부터 특정 항목을 측정하고, 측정·기록된 데이터를 네트워크를 통해 서버에 송신·저장되는 일련의 과정을 말한다. 생산된 데이터는 통합관리를 위해서 데이터를 송수신해야 하는데 Table 1은 국내 지자체 주요 정수장의 자료 송수신 방법과 네트워크 구성 내용을 정리한 것으로, 대다수의 지자체가 PLC(Programmable Logic Controller)를 데이터 송수신 기기로 사용하고 있고, 네트워크는 Ethernet과 Field bus 방식을 도입하고 있다.

수처리 시설은 공정을 관리하기 위해 수질, 수압, 수위, 유량 등 다양한 센서들이 설치되어 있고, 이들 센서에서 수집한 데이터는 인터넷을 통해 중앙 관리실로 전송되어 데이터가 수집·관리 된다. 수처리 시설에서 실시간으로 데이터를 측정, 생산하고 대량의 데이터를 처리하고 실시간으로 관리하기 위해 각종 센서와 IoT 기술이 활용된다. 이를 위해 네트워크 토폴로지와 프로토콜 등을 고려하여 설계된 안정적인 네트워크 인프라와 대용량 데이터 전송 기술이 필요하다. 이처럼 정수처리 시설에서도 네트워크 기술은 매우 중요한 역할을 하며, 안정적이고 신속한 데이터 전송을 위해 끊임없는 기술 발전이 이루어져야 한다. 현재 수처리 시설에서는 데이터 보안을 위해 모두 유선 네트워크 기술

이 활용되고 있다.

3.2 3차원 가시화 기술

현재 수처리 공정은 대부분 2차원 평면 도면을 갖고 운영되고 있어 운영자가 도면을 해독하기 어려울 뿐만 아니라 운영관리상 여러 가지 문제를 야기하고 있다. 2차원 도면을 3차원 도면으로 가시화하게 되면 설비 운영의 효율성과 안전성을 보장하는 데 매우 유용하며 운영자의 공정 이해도를 크게 향상시킬 수 있다(Choi et al., 2022). 또한 설비의 구조와 작동 방식을 보다 명확하게 파악할 수 있어야 문제 발생 시 빠른 대처가 가능하다. 이뿐만 아니라 공정을 3차원으로 입체화하면 공정의 문제점이나 오류가 최소화할 수 있고 설비 구성 요소들 간의 간섭 문제를 사전에 파악할 수 있어 작업 시간과 비용을 절감할 수 있다.

특히 수처리 공정에서 3차원 가시화 기술이 중요한 이유는 3차원 도면을 이용하여 운전 전 시뮬레이션을 수행하여 오류를 사전에 발견하고 대처할 수 있고, 새로운 시설을 추가하거나 기존 시설을 개선할 때도 3차원 도면을 이용하여 추가 설계 작업을 보다 쉽게 수행할 수 있다. 또한 전산유체 진단을 위한 진단 도면으로 활용할 수 있을 뿐만 아니라 VR, AR, MR 기술을 위한 기초 도면으로 필요한 기본 기술이다. 향후 정수기술 역시 모든 시설 운영은 실제 세계와 가상 세계를 결합하여 사용자 경험을 증강시키는 기술인 가상현실, 증강현실, 혼합현실 기술과 결합을 위해서도 3차원 가시화 기술은 디지털트윈의 중요한 요소 기술이다.

3차원 가시화 기술은 가상현실 기술과 전산유체 진단 기술로 활용되어야 하므로 소프트웨어 호환성이 무엇보다 중요하다. 현재 활용되고 있는 수많은 소프트웨어들은 사용 목적, 즉 사용 편리성, 전문성 인터페이스의 직관성, 산업체 용도 등에 따라 고유한 장단점이 있으므로, 현재 국내 CFD 시뮬레이션 진단 시장은 크게 Ansys Fluent와 Flow-3D로 양분되어 있다. Ansys Fluent에 호환이 가능한 소프트웨어는 Space Claim, Design Modeler, Blade Gem, Catia, creo Elements, Fe Modeler, Inventor, JT, Monte carlo n-particle, NX, ACIS, AMF, Auto CAD, Solid Edge, Solid Works, ECAD, D3D, Para solid, PLY, Rhino, Sketch up, tereolithography 등이 있고, Flow-3D와 활용 가능한 소프트웨어로는 STEP, IGES, OBJ 등이 있다.

Table 1. Current state of local government network composition

Local gov.	Transmitter Devi.	Network	Data analysis
Seoul	PLC	Ethernet	Oracle/PC save
Busan	PLC	Filed bus/Ethernet	PC save
Daejeon	HMI9MP5000)	Ethernet	PC save
Incheon	PLC/RS-232	Filed bus/Ethernet	SCADA/CIMON V-Eye
Gwangju	KJ WATER	Ethernet	Oracle, Excel
Ulsan	PLC	Ethernet	Cimon SCDA
K WATER	PLC/ETOS	Filed bus/Ethernet	SCADA/Iwater

3.3 전산유체 진단 기술

수처리 공정에서 CFD기술은 유체 유동, 열전달 및 관련 현상을 시뮬레이션하고 분석할 수 있는 중요한 기술이다. Table 2에 정리한 것과 같이 스크린, 침전지, 여과지, 혐기성소화 공정은 물론 영양염류 제거에 이르기까지 엔지니어와 연구자들은 수처리 공정의 수리학적 기술을 기반으로 하여 효과적인 공정설계는 물론 운영관리 개선 등에 활용할 수 있다(Moller et al., 2022).

전산유체역학 기술의 가장 중요한 기능들은 수처리 공정의 유동 패턴과 혼합 조건을 최적화할 수 있고, 수처리 공정의 개선을 통한 오염물질 제거 효율을 향상시키며, 에너지 소비를 줄여 유지관리 비용 절감과 운영관리를 용이하게 할 수 있다는 것이다.

또한 CFD 시뮬레이션은 수처리 과정에서 공정 변수와 운전 조건이 처리 과정에 미치는 영향을 평가할 수 있고, 잠재적인 문제점을 사전에 발견하며, 공정 매개 변수를 최적화하여 전반적인 시스템 성능을 향상시키는 데 도움을 줄 수 있는 매우 유용한 기술이다.

하지만, 국내 지자체가 추진하여 활용중인 CFD기술은 기술력에서 많은 편차가 있으므로, 관련기술 발전을 위해 지속적인 전문 인력 확보와 장비 보강 등이 이루어져야하며 각 지자체간 기술격차를 줄이기 위한 상호 기술 공유 노력이 필요하다. 또한 전산유체 진단은 통합운영관리시스템 소

프트웨어 기능에서 3차원 모델링과 디지털트윈 기술과의 상호작용을 위한 호환성이 중요하며 현재 호환 가능한 소프트웨어는 ANSYS (FLUENT, CFX), Twin Bilder, Flow-3D 등이 있지만, 국내 시장을 양분하고 있는 ANSYS와 Flow-3D를 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다(Jang et al., 2017). ANSYS, Twin Bilder는 확장성과 호환성에서 유리하며 Flow-3D는 수처리에 특화된 장점이 있다.

3.4 인공지능 통합운영관리 시스템

수처리 공정에서 공정의 통합운영관리 시스템은 여러 단위공정을 종합적으로 관리하고 제어하는 시스템으로 모니터링, 공정진단 평가 그리고 최종적으로 자율 운영을 목표로 발전해 나가고 있으며 공정 제어, 데이터 수집 및 분석, 문제 해결, 보고서 작성 등 다양한 기능을 수행한다(Wagg et al., 2020). 통합관리시스템은 대량의 데이터가 수집되고 평가되어야 하므로 빅 데이터 분석 및 인공지능 기술과 결합되어야 최적의 운영을 가능하게 하며 고장 발생 시 빠른 대처를 가능하게 하여 사고를 예방하고, 안전한 운영을 유지할 수 있도록 운영자에게 많은 유용한 정보와 판단자료를 제공할 수 있다.

인공지능 기술은 대량의 데이터를 학습하고, 이를 바탕으로 정밀한 예측과 분석을 수행할 수 있으며 이를 통해 수질

Table 2. The application of CFD technology in various unit processes of wastewater treatment

Unit Process	CFD Application	Areas of Improvement	Design Considerations
Screening	Flow and sedimentation analysis	Improved flow patterns for better sedimentation	Optimal spacing and inclination of screens
Grit removal	Flow and particle analysis	Improved flow patterns for better particle settling	Optimal flow velocity and inlet design
Primary sedimentation	Flow and sedimentation analysis	Improved flow patterns for better sedimentation	Optimal tank dimensions and inlet/outlet design
Aeration tanks	Flow and oxygen transfer analysis	Improved mixing and oxygen transfer efficiency	Optimal aeration rate and diffuser design
Secondary sedimentation	Flow and sedimentation analysis	Improved flow patterns for better sedimentation	Optimal tank dimensions and inlet/outlet design
Membrane bio reactors	Flow and fouling analysis	Improved membrane fouling control	Optimal membrane layout and cleaning protocol
Anaerobic digestion	Flow and mixing analysis	Improved mixing and organic matter degradation	Optimal mixing rate and tank design
Nutrient removal	Flow and nutrient analysis	Improved nutrient removal efficiency	Optimal flow patterns and nutrient dosing strategy

Table 3. Artificial intelligence algorithms used in different applications:

AI Algorithm	Application
Artificial Neural Network	Prediction, classification, and control
Decision Tree	Classification and prediction
Support Vector Machine	Classification and regression
Random Forest	Classification, regression, and feature selection
Clustering	Grouping similar data points
Deep Learning	Image and speech recognition, natural language processing
Reinforcement Learning	Optimal control and decision-making
Genetic Algorithm	Optimization and search problems

및 수량 등을 예측하고 공정 변화에 선제적인 대처할 수 있도록 운영자에게 도움을 줄 수 있다(Diego et al., 2022). 따라서 이와 같은 데이터의 학습과 분석 평가는 향후 수처리 공정 지능화에 핵심기술로 자리 잡을 것으로 예상된다. 수집된 대용량 자료는 Table 3과 같이 인공지능 알고리즘 기술을 활용하여 데이터 분석 평가가 이루어져야 한다. 기존에는 전체 데이터를 확보하기 어려운 조건에서 샘플을 통해 전체적인 상황을 예측하는 노력을 하였다면, 오늘날에는 대용량의 데이터로부터 패턴인식, 인공지능 기법 등을 활용하여 숨겨진 데이터 간의 상호 관련성과 유용한 정보를 추출함으로써 분석평가가 가능하게 된다.

수처리 단위공정에서 권장되는 인공지능 알고리즘은 Table 3과 같이 요약될 수 있다. 인공지능 모형의 활용은 목적에 따라 모형 형태별로 다양하게 구분할 수 있지만, 수처리 공정에서 인공지능 학습 방식의 대부분은 과거 운영 자료를 학습하여 현재 수집된 자료를 분석평가하고 공정을 예측하는 기술로 활용된다.

Fig. 2에는 가상과 실제 정수장을 대상으로 한 디지털트윈 요소기술 간의 구성 관계를 나타낸 것이다. 정수공정에 대한 실시간 정수공정진단 시스템에서 각 기술 구성 요소 간의 관계는 크게 실시간 공정을 감시·제어할 수 있는 진단 시스템과 이 자료를 바탕으로 공정을 예측·평가하기 위해 임의로 관리자가 가상의 시나리오를 통해 공정을 예측·평가하는 가상 진단시스템으로 구분할 수 있다.

수처리 공정에서 전체 공정의 통합운영관리 시스템은 공정 안정성, 운영 효율성, 경제성 등 다양한 측면에서 필수적이며 운영관리 및 수처리 공정의 안정성과 최적화를 위해서 지속적인 기술개발 노력이 필요하다.

통합운영관리 시스템에는 다양한 기능들을 포함하게 되는데 일반적으로 자동제어 시스템 (Automated Control System, ACS), 수질정보시스템 (Water Information Management System, WIMS), 유지보수관리 시스템 (Maintenance Monitoring System, MMS), 수질예보 및 모니터링 시스템 (Water Quality Monitoring System, WQMS) 등의 기능들을 포함하며 수처리 공정에서 발생하는 데이터를 수집, 저장, 분석하고, 시스템의 효율성을 최적화하고 유지보수 및 관리를 위한 다양한 기능을 제공한다

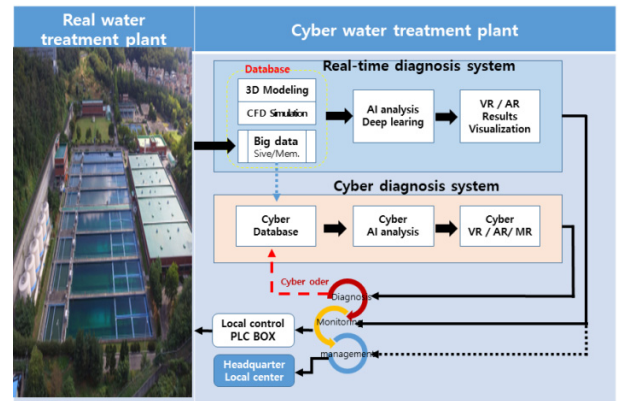


Fig. 2. Architecture of Cyber process and Real Process in Water Treatment Process.

(Adjei & Montasari, 2023).

현재 세계적으로 활용되고 있는 통합운영시스템 소프트웨어는 AQUARIUS, WaterGEMS, PCSWMM, MIKE URBAN, SCADAWatch, EPASWMM, H₂OMAP Water, Wastewater360, WaterTrax 등이 있다.

3.5 추진 현황 및 전략

한국환경공단에서는 공공하수처리시설의 에너지 효율을 향상하고 유지보수 방식을 개선하기 위해 2020년 5월 20일부터 ‘공공하수처리시설 지능화 체계(시스템) 구축사업(이하 공공하수처리시설 지능화 사업)’에 착수했다. 공공하수처리시설 지능화 사업은 한국정보화진흥원에서 추진한 ‘2019년 국가기반시설(인프라) 지능 정보화 사업’ 공모를 통해 선정된 과제로 공공하수처리시설에 IoT, 빅데이터, 인공지능 등 지능화 기술을 적용하는 사업이다. 다음은 그동안 추진했던 스마트 하수처리장 사업에 대한 가이드라인으로 향후 정수공정 디지털 트윈 사업 추진에 많은 참고와 시사점이 있다는 점에서 검토가 필요하다. 현재 환경부 주관 스마트 하수처리장 시범사업은 디지털트윈 기술의 핵심 기술요소인 3D 모델링, CFD 시뮬레이션, 데이터 수집 및 분석 등 3가지 기술 중에서 데이터 수집 분석 기술이 핵심을 이루고 있고 3D 및 CFD 시뮬레이션 기술은 빠져 있다. 따라서 이와 같이 추진사항은 사업 진행과정이나 실제 현장 조건에 따라 향후 추가적인 검토가 필요하다.

Table 4. The recommended artificial intelligence algorithms, learning methods, and applications for each unit process in water treatment facilities.

Unit Process	AI Algorithm	Learning Method	Application
Coagulation	Artificial Neural Network Decision Tree, etc.	Learning from past data	Real-time water quality monitoring and prediction
Sedimentation	Decision Tree Random Forest, etc.	Learning from past data	Optimization of sedimentation efficiency
Filtration	Support Vector Machine Artificial Neural Network	Learning from past data	Optimization of filtration efficiency
Disinfection	Random Forest Decision Tree, etc.	Learning from past data	Setting appropriate disinfection concentration
Heavy Metal Removal	Clustering, etc.	Real-time data learning	Prediction of heavy metal concentration

반면 2021년부터 시범사업을 추진하고 있는 K-water의 경우는 3D 모델링, VR, AR, 데이터 수집 및 분석 등 CFD 시뮬레이션 기술을 제외하고 대체로 중기적인 계획이 충실하게 수립되어 시행되고 있는 것으로 판단된다.

서울시가 일부 정수장을 대상으로 재산관리 차원에서 도면을 3차원 입체화하는 사업을 추진하였으나 디지털트윈에 대한 중장기적인 계획이 부재한 상태에서 추진되어 호환성과 확장성이 미흡한 것으로 판단된다. 디지털트윈 사업의 시행착오를 줄이기 위해서는 각 추진 주체의 사업 내용에 대한 면밀한 검토와 분석을 통해 정수 공정의 디지털트윈 기술의 개념, 추진 전략, 방법, 추진 단계 등에 관한 토론과 합의해야 할 것으로 판단된다. 또한 사업을 추진하는 지자체는 현재 기술 인력, 자원 등의 조건 등을 감안한 중장기적인 계획을 수립한 후에 단계적으로 사업을 추진해야 시행착오를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구의 목적은 정수공정의 전산유체 실시간공정진단 시스템을 구현하기 위한 기본 단위기술인 공정의 가시화, IoT, AI, 전산유체 시뮬레이션 및 디지털트윈 기술 간의 유기적 연관성과 기술적 통합을 제시하는데 있다.

- 1) 수처리공정에서 디지털트윈 기술을 구현하기 위한 요소기술은 공정의 3차원가시화, IoT 및 AI 기술, 전산유체진단, 통합운영관리시스템 등의 4가지 기술이 구성될 수 있다.
- 2) 디지털트윈 구현은 추진 주체의 기술수준, 예산 등을 고려하여 단계적 추진이 중요하며 일반적으로는 ① 데이터 측정 및 송수신 → ②공정의 3차원 가시화 → ③전산유체시뮬레이션 → ④인공지능 통합관리시스템 등의 단계가 바람직할 수 있다.
- 3) 현재 환경부 스마트하수처리사업, K-water 지능형정수공정 구현사업, 서울시의 3차원도면화 등 각 기관 별로 추진되고 있는 디지털트윈 관련 기술에 대한 개념, 추진방법 등 추진전략 정립이 필요하다.
- 4) 지자체는 현재 기술인력, 재원 등 여건에 맞는 정수공정디지털트윈 시스템 구축을 위한 중장기 종합계획 수립이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 부산가톨릭대학교 교내연구비와 2021년 한국상수도협회의 연구과제비에 의하여 연구되었습니다.

References

Adjei, P, Montasari, R (2023). A critical overview of digital twins -Research anthology on BIM and

- digital twins in smart cities. [https://doi.10.4018/978-1-6684-7548-5.ch001]
- Ahn, EY, Lee, JW, Bae, JH, Kim, JM(2020). Analysis of emerging geo-technologies and markets focusing on digital twin and environmental monitoring in response to digital and green new deal. *Econ. Environ. Geol.*, 53(5), pp.609-617 [Korea literature]. [http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2020.53.5.609]
- Berglund, EZ., Shafiee, ME, Xing, L, Wen, J (2023). Digital twins for water distribution systems. *J.Wat.Res.Plan.Man.*, 149(3). [https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5786]
- Callcut, M, Agliozzo, JPC, Varga, L, McMillan, L (2021). Digital twins in civil infrastructure systems. *Sustainability*, 13, pp.11549 [https://doi.org/10.3390/su132011549]
- Choi, SS, Woo, JY, Kim, J, Lee, JY(2022). Digital twin-based integrated monitoring system: Korean application cases. *Sensors*, 22, pp.5450 [https://doi.org/10.3390/s22145450]
- Diego, MBS, Adriana, SM, Rodrigo, EPG, Mauricio, ARM, Ricardo, ARM, Jorge, JLS (2022). Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 14(6), pp.1335 [https://doi.org/10.3390/rs14061335]
- Helena, MR, Maria, CM, Armando, C, Oreste, F, Kemi, A, Amparo, LJ, Modesto, PS (2022). New challenges towards smart systems' efficiency by digital twin in water distribution networks. *Water*, 14(8), pp.1304 [https://doi.org/10.3390/w14081304]
- Hosamo, HH, Svennevig, PR, Svidt, K, Han, D, Nielsen, HK (2022). A digital twin predictive maintenance framework of air handling units based on automatic fault detection and diagnostics. *Energy&Building*, 261, pp. 111988 [https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111988]
- Jang, HS, Lee HW, Hwang SY, Lee JH(2017). Numerical simulation of erosion rate on pipe elbow using coupled behavior of fluid and particle, 31(1), pp.14-21 [https://doi.org/10.5574/KSOE.2017.31.1.014]
- Javaid, M, Haleem, A, Suman, R(2023). Digital twin applications toward industry 4.0: A review. 3, pp.71-92 [https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003]
- Moller, JK, Goranovic, G, Brath, P, Madsen, H (2022). A data-driven digital twin for water ultrafiltration. *Communications Engineering*, 23(1) [https://doi.org/10.1038/s44172-022-00023-6]
- Park, KH, Kim, SH, Kim, KT(2021). The analysis of decision-making items for operation management of digital twin simulators for sewage and water

- treatment facilities. *J.Kor.Soc.Hazard. Mitig.*, 21(6), pp.403–410 [Korea literature]. [<https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2021.21.6.403>]
- Shim, YR, Lee, NH, Jeong, CH, Heo, SK, Kim, SY, Nam KJ, Yoo, CK(2022). Water digital twin for high-tech electronics industrial wastewater treatment system(I): e-ASM development and digital simulation implementation. *Clean Tech.*, 28(1), pp.63–78 [Korea literature]. [<https://doi.10.7464/ksct.2022.28.1.63>]
- Wagg, DJ, Worder, K, Barthorpe, RJ, Gardner, P(2020). Digital twins: state-of-the-art and future directions for modeling and simulation in engineering dynamics applications. *ASME*, 6(3), pp.030901 [<https://doi.org/10.1115/1.4046739>]