

# 지능형 센서 기반 하수도 관리 기술의 글로벌 동향 분석

## Trends in Intelligent Sensor-Based Customized Management Technologies for Sewer Infrastructure

강미선 (M.S. Kang, tams37@etri.re.kr)

AI인프라연구실 선임연구원/기술총괄

배현수 (H.S. Bae, baehs@etri.re.kr)

AI인프라연구실 연구원

유정원 (J.W. Yu, gardenyoo@etri.re.kr)

AI인프라연구실 선임연구원

장인수 (I.S. Jang, jef1015@etri.re.kr)

AI인프라연구실 책임연구원

문기영 (K.Y. Moon, kymoon@etri.re.kr)

AI인프라연구실 책임연구원

김광주 (K.J. Kim, kwangju@etri.re.kr)

AI인프라연구실 선임연구원/실장

### ABSTRACT

Rapid urbanization and the increasing frequency of localized heavy rainfall caused by climate change have intensified the demand for efficient and proactive sewer system management. Aging infrastructure and limited capacity frequently result in sewer overflow and pollution, posing risks to public health and environmental safety. Many countries are implementing smart sewer systems that combine internet-of-things-based intelligent sensors, wireless communication technologies, artificial intelligence (AI), and digital twin models.

Smart sewer management enables the real-time monitoring and adaptive control of key indicators such as water level, flow rate, water quality, and hazardous gases. This study reviews the development trends and functionalities of core technologies, including intelligent sensors, autonomous inspection robots, AI-powered data analytics, digital twins, and edge-cloud computing architectures, and assesses them using the strengths, weaknesses, opportunities, and threats analysis framework.

Furthermore, we present a comparative overview of national strategies and implementation cases across 12 countries and regions: South Korea, the United States, Japan, Germany, the United Kingdom, France, the Netherlands, Singapore, Indonesia, Australia, Brazil, and Chile. By combining global technology trends with practical applications, this study offers actionable insights for improving the resilience and efficiency of sewer infrastructure and supporting strategic planning for smart water management in Korea and beyond.

**KEYWORDS** 디지털 트윈, 사물인터넷, 예측 유지보수, 인공지능, 자율로봇, 지능형하수도관리

\* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2025.J.400408>

\* 본 연구는 한국전자통신연구원 연구운영지원사업의 일환으로 수행되었음[25ZD1120, 대경권 지역산업 기반 ICT 융합기술 고도화 지원사업], [24BD1100, 24RD1300, 지능형 센서 기반 하수도 인프라의 맞춤형 관리 기술 개발 연구].

## I. 서론

도시 인구 증가와 기후변화로 인한 국지성 폭우 등으로 인해 도시 하수도 시스템의 효율적 관리가 점점 더 중요해지고 있다. 노후화된 관로와 불충분한 용량 문제는 자주 하수 범람이나 오염 유출 사고로 이어지며, 이는 시민 안전과 환경에 큰 위협이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전 세계 각국에서는 지능형 센서와 정보통신기술(ICT: Information and Communication Technology)을 접목한 스마트 하수도 관리 기술에 주목하고 있다. 스마트 하수도 관리란 하수관로 내 수위, 유량, 수질 등을 실시간으로 모니터링하고, 데이터를 원격지에서 분석·제어하여 하수도 시스템을 능동적으로 운영하는 것을 말한다. 이러한 시스템은 사전에 이상 징후를 감지하여 침수나 하수 역류를 예방하고, 설비 관리의 효율성을 높이는 혁신적인 접근 방식이다[1].

스마트 하수도 관리의 핵심은 사물인터넷(IoT: Internet of Things) 기반의 지능형 센서와 통신망, 그리고 이를 활용한 인공지능(AI: Artificial Intelligence) 분석 및 디지털 트윈 등의 기술적 요소들을 종합적으로 적용하는 것이다. 각종 센서로부터 얻은 실시간 데이터는 클라우드에 축적되어 AI 알고리즘으로 분석되며, 필요시 현장의 펌프나 밸브를 자동 제어하거나 담당자에게 경보를 보낸다[2]. 또한, 로봇 기술을 활용하면 사람이 접근하기 어려운 하수관 내부 점검과 보수가 가능해지며, 디지털 트윈은 가상공간에서 하수도망을 재현하여 시나리오별 의사결정을 지원한다. 이러한 기술들을 통해 예방적 유지관리와 신속한 대응이 가능해지고, 궁극적으로 적은 비용으로 더 높은 서비스 수준을 달성할 수 있다[3].

본고에서는 지능형 센서 기반 하수도 관리 기술의 글로벌 기술 동향을 자세히 살펴보고자 한다. 우선 스마트 하수도 관리의 구성 요소별로 최신 기술

개발과 장단점을 분석하고, 대한민국, 미국, 일본, 독일을 비롯한 주요국의 적용 사례와 정책 동향을 비교하여 소개한다. 또한, 유럽 주요국(영국, 프랑스, 네덜란드 등), 동남아(인도네시아, 싱가포르), 오세아니아(호주), 중남미(브라질, 칠레) 등 전 세계의 다양한 추진 현황을 다루며 향후 발전 방향에 대한 시사점을 제시한다. 이를 통해 지능형 센서 기반 하수도 관리 기술의 글로벌 트렌드를 종합적으로 이해하고, 우리나라 하수도 스마트 관리 전략 수립에 참고할 수 있는 정보를 제공하고자 한다.

## II. 주요 기술 구성 요소별 동향 및 사례

스마트 하수도 관리는 기존의 수동적·반복적 방식에서 벗어나, 센서와 통신장치를 활용하여 하수도 시설의 상태를 실시간으로 감시하고 원격 제어하는 기술이다. 하수관로, 맨홀, 펌프장 등에 설치된 센서들은 수위, 유량, 수질 등을 측정해 LoRaWAN(Long Range Low-Power Wide Area Network), NB-IoT(Narrowband Internet of Things)와 같은 저전력 통신망을 통해 중앙시스템에 데이터를 전송한다[4].

이 데이터는 클라우드 또는 빅데이터 플랫폼에 저장되며, 대시보드로 시각화되어 운영자가 실시간 상황을 파악할 수 있다. AI 알고리즘은 정상 패턴과 비교해 이상 징후를 자동 탐지하고, 필요시 경보를 발생시키거나 원격 제어를 통해 즉시 대응이 가능하다[5,6].

이러한 기술은 효율성과 안전성 측면에서 높은 성과를 보인다. 미국 사우스벤드는 스마트 하수도 시스템을 통해 월류량을 크게 줄이고, 수질 지표도 개선하였다[6]. 영국 서던워터는 22,000개의 센서와 AI 기반 예측 시스템을 통해 하수 역류 및 외부 범람 사고 예방 효과를 기대하고 있다[7]. 서울시는 IoT 센서를 내장한 스마트 맨홀 시스템을 도입하여 침수

취약 지역의 실시간 모니터링을 시행하고 있다[8].

이처럼 다양한 국가의 사례들은 스마트 기술을 통해 도시 홍수 대응력과 환경 위생 수준을 향상시킬 수 있음을 보여준다. 다음 절에서는 스마트 하수도 관리의 핵심 요소인 지능형 센서, 로봇, AI 분석, 디지털 트윈, 엣지·클라우드 컴퓨팅 등의 기술 동향을 상세히 살펴보고, 각 기술의 장단점에 대해 분석한다.

## 1. 지능형 센서 기술

하수도 환경에서 활용되는 지능형 센서란 수위, 유속, 유량과 같은 수리정보는 물론 수질 상태(예: pH, 탁도, 온도, 오염물 농도)와 유해가스 농도(황화수소 등)를 실시간 측정하여 무선 전송할 수 있는 센서를 뜻한다. 최근 센서 기술의 발달로 적은 전력으로 장기간 동작하면서도 하수의 극한 환경에서 견딜 수 있는 내구성 센서가 개발되고 있다[9]. 예를 들어, 초음파 수위계나 레이다 유속계는 직접 접촉 없이 관로 내 흐름을 감지하며, 광학식 IoT 수질센서는 하수의 화학물질 농도를 연속 측정할 수 있다[9,10]. 이러한 센서들은 배터리로 수년간 구동 가능하고, LoRa 등 저전력 광역통신망을 통해 데이터를 전송함으로써 배선 공사 없이도 손쉽게 설치된다[11,12].

특히 무선 IoT 센서는 기존 유선 계측망 대비 설치 비용을 30~40% 절감할 수 있어, 예산이 제한된 지방자치단체에도 현실적인 대안이 된다[12]. 실제로 센서 1대를 수 시간 이내에 신속히 장착하고 위치 변경도 수월하여, 긴급 감시가 필요한 지점에 유연하게 대응할 수 있다[12]. 지능형 센서를 활용하면 365일 24시간 모니터링이 가능해져 사람의 육안 점검 주기에 놓쳤던 이상 현상을 즉각 파악할 수 있다. 예를 들어, 평상시 흐름 패턴에서 벗어나 수위가

갑자기 상승하면 관로 막힘을 의심할 수 있고, 센서가 이를 조기에 알려주면 관리자가 현장에 출동해 본격적인 막힘과 범람 전에 조치할 수 있다[12].

또한, 센서 데이터는 시간 경과에 따른 하수량 추이나 침투·유입(I/I: Infiltration and Inflow) 현상을 정량화하는 데도 유용하다. 다만, 이러한 센서 기술에도 몇 가지 약점이 있다. 첫째, 하수 내 이물질과 기름때로 인해 센서의 오염 및 드리프트가 발생할 수 있어 주기적 보정과 유지보수가 필요하다. 둘째, 통신 신호가 지하 깊은 관로나 밀폐된 맨홀에서는 약해질 수 있어 중계기 설치 등 통신 인프라 보강이 필요하다. 셋째, 수위·유량 등의 국지 측정값을 전체 시스템의 상황으로 해석하는 데 한계가 있으므로, 이를 해석할 상위 분석기술이 뒷받침되어야 한다. 마지막으로, 초기 도입 시 다수의 센서를 설치해야 하므로 투자비용 부담이 있으며, 노후 관로에 센서를 설치하는 작업 자체가 어려울 수 있다. 그럼에도 센서 기술은 빠르게 발전하고 가격이 하락하는 추세여서, 미래 하수도 관리의 필수 구성요소로 자리 잡을 전망이다. 상기 내용을 바탕으로, 지능형 센서 기술이 하수도 환경에서 갖는 기술적 가능성과 한계, 외부 기회 요인 및 위험 요인을 종합적으로 정리하면 표 1과 같다. 표 1에서는 지능형 하수도 모니터링 센서 기술의 SWOT(Strengths, Weaknesses, Opportu-

표 1 지능형 하수도 모니터링 센서 기술의 SWOT 분석

강점(Strength) · 기회(Opportunity)	약점(Weakness) · 위협(Threat)
<ul style="list-style-type: none"><li>수위·유량·수질 등을 실시간 감시하여 이상징후를 조기 발견[1]</li><li>배선 불필요한 무선 IoT로 설치 용이 및 비용 절감[2,12]</li><li>축적 데이터로 관로 상태 파악 및 예방정비 계획 가능[13]</li><li>센서 가격 하락과 성능 향상으로 도입 장벽 완화[14]</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>기름때 등으로 센서 오염 시 오작동 및 주기적 유지보수 필요[2]</li><li>지하 환경에서 무선 통신 신호 약화 가능성[11]</li><li>초기 설치비 부담 및 노후 관로에 장비 설치의 어려움[13]</li><li>사이버 공격 등으로 데이터 위변조 시 잘못된 판단 위험[14]</li></ul>

nities, Threats) 분석 결과를 제시하였다.

## 2. 로봇 기술

하수도 로봇 기술은 사람 대신 하수관 내부를 주행하며 검사, 청소, 보수 등의 작업을 수행하는 자율 또는 원격 로봇을 의미한다. 하수관은 밀폐된 공간이며 유독가스가 존재할 수 있어 작업자의 진입이 제한되므로, 로봇은 안전성과 작업 효율을 동시에 향상시킬 수 있다. 현재 세계 각국에서는 바퀴, 무궤도, 다족보행 등의 다양한 형태의 하수관 로봇이 개발되고 있다[15].

일본에서는 직경 200mm의 협소한 관로도 주행 가능한 8족 로봇 SPD1을 개발한 후, 이를 기반으로 16개 관절형 다리를 적용한 SPD-X 모델을 발표해 장애물 극복 성능을 강화하였다[16]. 한편, 대한민국의 탑전자(Tap Electronics)는 Robocam이라는 자율형 점검 로봇을 개발하였으며, 다양한 직경의 관로에서 주행 가능하고 회전형 카메라와 자이로 센서를 탑재해 구조 이상을 판단할 수 있다. 서울시 및 한국환경공단과의 실증에서 시간 절감과 탐지 성능 향상을 입증하였다[17].

하수도는 진흙과 유속이 존재해 로봇 주행이 어렵기 때문에, 미국·유럽 등에서는 드론이나 뱀형 로봇 같은 새로운 접근이 연구되고 있다[18]. 고해상도 카메라와 라이더(LiDAR: Light Detection and Ranging)를 통해 관벽의 손상 상태를 정밀 스캔하고, AI로 자동 판독하는 기술도 상용화되고 있다[19]. 일부 로봇은 점검뿐만 아니라 관 내 보수 작업까지 수행할 수 있어 향후 유지관리 무인화에 기여할 것으로 기대된다.

로봇 기술은 사람이 접근하기 어려운 구간의 점검을 가능케 하고, 반복 점검을 통해 조기 이상 감지가 가능하다. 수집된 데이터는 디지털트윈 구축에

표 2 하수도 관리 로봇 기술의 SWOT

강점(Strength) · 기회(Opportunity)	약점(Weakness) · 위협(Threat)
• 인간 접근 곤란 지역의 자동 점검으로 안전성 향상	• 로봇 장비 및 유지보수 비용 高, 운용 인력 훈련 필요
• 빈번하고 정밀한 내부 검사로 초기 결함 발견 및 조기 보수	• 복잡한 관로 지형에서 주행 안정성 확보 난제
• 카메라·센서로 얻은 데이터의 축적으로 디지털 트윈 등 고도분석 지원	• 배터리 지속시간 한계로 장시간 연속 작업 곤란
• 로봇·드론 기술 발전 및 가격 하락으로 활용 분야 확대	• 로봇 고장·미아 시 회수 어려움
	• 인력 대체로 인한 노동시장 위축 우려

도 활용될 수 있다. 그러나 장비 비용, 복잡한 지형에서의 주행 안정성, 무선통신의 한계, 배터리 제약, 고장 시 회수 곤란 등의 문제가 존재한다. 또한, 기존 인력의 역할 축소와 로봇으로 인한 관로 손상 가능성 등도 고려되어야 한다. 상기 내용을 바탕으로, 하수도 로봇 기술이 갖는 현장 적용 가능성과 기술적 제약, 관련 산업의 발전 기회 및 잠재적 위험 요소를 종합적으로 정리하면 표 2와 같다. 표 2에서는 하수도 관리 로봇 기술의 SWOT 분석 결과를 항목별로 제시하였다.

## 3. 인공지능 데이터 분석 기술

스마트 하수도 관리에서는 인공지능(AI)과 머신러닝 기술이 방대한 센서 데이터로부터 의미 있는 패턴을 찾아내고, 이상 상황을 예측하는 핵심 역할을 담당한다. 전통적으로 하수도 운영자는 경험에 기반하여 청소 주기나 대응을 결정했으나, 이제는 AI가 수집된 다년간의 데이터를 학습하여 관로 막힘 징후나 월류 가능성을 조기에 경고해 줄 수 있다. 예를 들어, 영국 Wessex Water는 AI 스타트업의 알고리즘을 도입하여 관로 수위 센서 데이터를 실시간 분석한 결과, 약 92%의 정확도로 막힘 형성을 탐지하는데 성공하였다. 이 솔루션은 기존 규칙기반 경

보 시스템에서는 폭우 시 4,500건이나 발생하던 경보를 AI가 강우로 인한 정상 수위 상승과 구분하여 138건으로 97% 필터링해 주었고, 그중 124건은 실제 막힘 또는 센서고장으로 판정되어 거짓경보를 획기적으로 저감하였다[20]. 이처럼 AI를 활용하면 불필요한 출동을 줄이고 실제 문제에 집중적으로 대응할 수 있어 운영 효율이 높아진다.

또 다른 활용 예로, 영국 Yorkshire Water는 하수관 거동을 학습한 AI로 막힘 전조를 포착하여 선제적으로 고압세척팀을 투입한 결과, 다수의 가정 및 정원 침수를 예방하였다[21]. AI 모델은 수위 상승 패턴, 유속 저하, 우수 유입 등을 종합 분석하여 통상의 강우 영향과 구분되는 비정상 상황을 감지한다. 미국 사우스벤드의 시스템도 실시간 의사결정 지원에 AI를 적용하여 강우 시 각각의 관로 용량을 계산, 어느 위치에서 방류를 일시적으로 저장하고 어느 우수터널로 우회시킬지 등을 자동 판단함으로써 월류를 최소화하였다[22]. 이처럼 AI는 예측 모델로서 역할을 하여, 수작업으로는 불가능한 복잡한 최적 제어를 실현한다.

AI 기술의 장점은 경험이 부족한 운영자라도 데이터 기반 의사결정을 할 수 있게 해주며, 과거에는 알 수 없었던 미묘한 상관관계까지 포착해 낸다는 것이다. 또한, 시간이 지날수록 학습데이터가 쌓이며 알고리즘 정확도가 향상되어 자율 최적화가 가능해진다.

그러나 약점도 존재한다. 첫째, AI 모델의 성능은 입력 데이터 품질에 좌우되므로 센서 고장이나 통신 오류 시 오탐지의 위험이 있다. 둘째, AI 판단 과정이 복잡하여 운영자가 그 결과를 신뢰하지 못하거나 설명하기 어려운 경우가 있다.셋째, 초기 도입 시 모델 훈련을 위해 과거 사고 데이터 등의 라벨링 작업과 전문인력 투입이 필요하다. 외부 환경 변화(예: 새로운 건설공사로 인한 유량 패턴 변화 등)에 모델

표 3 스마트 하수도 관리에서 AI 기반 데이터 분석 기술의 SWOT 분석

강점(Strength) · 기회(Opportunity)	약점(Weakness) · 위협(Threat)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대용량 센서데이터에서 패턴 탐지 및 조기 경보 정확도 향상</li> <li>• 인적 경험 의존↓, 데이터 근거한 합리적 의사결정 지원</li> <li>• 지속 학습 통해 시간 경과에 따라 예측 성능 향상</li> <li>• 클라우드 연계로 타 지역 데이터 활용 등 스마트 시티 통합 가능성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 학습데이터 편향이나 센서 오류 시 오탐/누락 가능</li> <li>• 블랙박스 모델에 대한 운영자의 신뢰 및 설명력 부족</li> <li>• 초기 모델 구축 위해 전문 인력 및 기간 필요</li> <li>• 환경 변화에 따른 모델 재학습 필요</li> <li>• 해킹 등 사이버 위협 시 AI 시스템 마비 위험</li> </ul>

이 적응하지 못하면 잘못된 예측을 할 수 있다는 점도 유의해야 한다. 마지막으로, 사이버 공격 등으로 AI 시스템이 마비될 경우 대응 공백이 생길 수 있어 보안 대책도 필수적이다. 상기 내용을 바탕으로, 스마트 하수도 관리에서 인공지능(AI) 기반 데이터 분석 기술이 갖는 기술적 장점과 한계, 도입 확산 가능성과 잠재적 위험 요소를 종합적으로 정리하면 표 3과 같다. 표 3에서는 AI 기반 데이터 분석 기술의 SWOT(강점, 약점, 기회, 위협) 분석 결과를 항목별로 제시하였다.

#### 4. 디지털 트윈 기술

디지털 트윈(Digital Twin)은 실제 하수도 시스템을 가상공간에 정밀하게 모사하고, 실시간 데이터를 연동하여 하수도망의 상태를 분석·예측할 수 있는 기술이다. 하수관, 펌프장, 처리시설, 강우 시스템 등을 통합하여 물순환 전체를 시뮬레이션할 수 있으며, 최근에는 상하수도 운영의 최적화와 홍수 대비 시나리오 모의훈련 도구로 활용되고 있다[23]. 예를 들어, 싱가포르는 섬 전체의 물관리 시스템을 디지털 트윈 기반으로 구축하여, 일상 운영에서는 에너지 효율을 높이고, 강우 시에는 침수 위험을 예

측하고 대응책을 수립하는 데 활용하고 있다[24].

유럽에서는 EU의 Digital Water City 프로젝트를 통해 베를린, 파리 등에서 디지털 트윈 기술을 적용한 도시 수자원 관리가 실증되고 있다. 특히 하수망과 처리시설을 통합한 플랫폼은 실시간 예측 제어를 통해 방류수질과 월류량을 효과적으로 관리하고 있으며, 코펜하겐의 경우 48시간 선행 배수용량을 예측하여 처리장 유입수량을 사전에 조절함으로써 폭우 피해를 최소화하고 있다[25].

이처럼 디지털 트윈은 단순 모니터링을 넘어, 가상의 what-if 시나리오 실험, 정책 효과 분석, 위기 대응 훈련, 이해관계자 설득을 위한 3D 시각화 지원 등 다양한 기능을 제공한다. 다만, 모델의 정확도를 유지하기 위해서는 방대한 입력자료와 지속적인 보정이 필요하고, 초기 투자비와 운영 전문성이 높은 점, 그리고 데이터 오류나 통신 지연 시 잘못된 판단을 유도할 수 있다는 점은 주의가 필요하다. 특히 시스템에 대한 과도한 의존은 현장 경험 기반 대응력을 약화시킬 수 있으며, 사이버 보안 위협에 따른 리스크도 존재한다. 상기 내용을 바탕으로, 하수도 분야에서 디지털 트윈 기술이 갖는 적용 가능성과 기술적 제약, 정책적 활용 기회 및 잠재적 위협 요소를

종합적으로 정리하면 표 4와 같다. 표 4에서는 디지털 트윈 기술의 SWOT(강점, 약점, 기회, 위협) 분석 결과를 항목별로 제시하였다.

## 5. 엣지 및 클라우드 컴퓨팅

스마트 하수도 관리에서는 대규모 센서 데이터의 실시간 처리와 저장을 위한 컴퓨팅 구조가 핵심 요소 중 하나다. 엣지(Edge) 컴퓨팅은 센서 인근 장치에서 데이터를 1차 처리하고, 클라우드 컴퓨팅은 모든 데이터를 중앙 서버로 보내 통합 분석하는 방식이다. 실시간 제어가 필요한 펌프나 밸브는 엣지에서 즉각 반응하고, 장기적인 AI 학습과 도시 전체 분석은 클라우드에서 수행하는 하이브리드 구조가 일반화되고 있다[26].

엣지 컴퓨팅은 통신 장애 시에도 독립 동작이 가능하며, 전송 데이터양이 적어 통신비 절감과 보안성 확보에 유리하다. 예를 들어, 강우 센서를 기반으로 엣지 AI가 펌프를 자동 가동해 침수를 막는 사례가 존재한다. 반면, 클라우드는 기상·교통 등 외부 데이터를 연계하거나, 도시 간 성능 비교 분석에 적합하다[27].

국내 일부 지방자치단체는 중앙 클라우드 관제센터를 공동 구축하여, 지역별 데이터를 통합 관리하고 AI 분석을 공유하는 방안을 추진 중이다. 이는 예산과 인력이 부족한 지방정부에 효과적인 해결책이 될 수 있다. 다만, 클라우드 의존 시 네트워크 장애에 대비한 엣지 자동제어 로직이 필수적이며, 모바일 엣지 컴퓨팅(MEC: Mobile Edge Computing)과 5G 기반 실시간 분산처리 기술도 주목받고 있다[28]. 상기 내용을 바탕으로, 엣지 및 클라우드 컴퓨팅 기술을 하수도 관리에 적용할 때 나타나는 기술적 장점과 한계, 향후 확산 가능성과 잠재적 위협 요소를 종합적으로 정리하면 표 5와 같다. 표 5에서는 해당

표 4 하수도 분야의 디지털 트윈 기술에 대한 SWOT

강점(Strength) · 기회(Opportunity)	약점(Weakness) · 위협(Threat)
<ul style="list-style-type: none"><li>실제 하수도망의 가상 복제로 종합적 상황 파악 및 시나리오 분석 가능</li><li>우수·오수 통합관리 등 전체 시스템 최적화 지원</li><li>홍수 등 비상시 모의훈련과 대응계획 검증 용이</li><li>3D 가시화로 이해당사자 설득 및 협업 용이</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>정밀 모델 구축·유지에 높은 비용과 전문성 요구</li><li>입력자료 불충분하거나 보정 실패 시 모델 신뢰도 저하</li><li>현실 세계 복잡성 모두 모사 어려워 모델-현실 간 갭 존재</li><li>사이버상의 오류나 해킹이 실제 시스템에 잘못된 제어 야기 위험</li><li>초기 투자 대비 효과 산정 불확실로 조직 내 지원 부족 가능</li></ul>

**표 5 엣지 및 클라우드 컴퓨팅을 하수도 관리에 적용하는 경우의 SWOT**

강점(Strength) · 기회(Opportunity)	약점(Weakness) · 위협(Threat)
• 엣지: 현장 실시간 제어로 신속 대응 및 통신 장애 시 운영 지속	• 엣지 단말 성능 제한으로 복잡한 AI 분석 곤란
• 클라우드: 높은 연산자원으로 대규모 데이터 통합분석 가능, 이종 데이터 융합 용이	• 클라우드 의존 심화 시 네트워크 대역폭 및 장애에 취약
• 범용 클라우드 플랫폼 활용으로 초기 구축 비용 절감	• 민감 데이터의 외부 저장에 따른 보안·프라이버시 우려
• 5G/MEC 발전으로 지연 단축 및 안정성 향상	• 다수 시스템 구성으로 전체 구조 복잡성 증가 → 관리 부담
	• 상용 클라우드 업체 종속 및 비용 인상 위험

기술의 SWOT(강점, 약점, 기회, 위협) 분석 결과를 항목별로 제시하였다.

### III. 국가별 스마트 하수도 관리 추진 동향 및 사례

#### 1. 대한민국

대한민국은 스마트 상하수도 혁신을 국가적 과제로 추진하고 있으며, 서울시 용산구는 국내 최초로 IoT 기반 하수도 모니터링 시스템을 구축해 실시간 수위 및 유해가스 감시체계를 운영 중이다. 해당 시스템은 약취지도 작성과 침수 예측에 활용되며, 무선 IoT 센서 기반으로 설치와 유지 비용도 절감되었다. 환경부와 한국환경공단은 공공처리시설에 AI 기반 예측정비 시스템을 도입해 에너지 효율 향상과 운영 최적화를 도모하고 있다. 정책적으로는 스마트시티 사업과 연계된 하수관망 디지털화 실증이 진행 중이며, 침수 예·경보 AI 및 AR 기반 관제 기술 개발도 병행되고 있다[29].

#### 2. 미국

미국은 합류식 하수도(CSO: Combined Sewer Over-

flow)에 따른 오염 저감과 인프라 비용 절감을 위해 스마트 기술을 적극 채택하고 있다. 인디애나주 사우스벤드는 실시간 센서 네트워크와 원격 제어 밸브를 통해 연간 10억 갤런의 하수 유통률을 80% 이상 감축하며 4억 달러를 절약하였다[6]. 뉴욕, 샌프란시스코 등 대도시는 센서 기반 수위 감시와 펌프 최적 제어를 실행 중이며, 연방 차원에서는 IIJA 법에 따라 스마트 워터 인프라가 우선 지원 분야로 지정되었다. EPA(Environmental Protection Agency)의 WIFIA 프로그램도 스마트 기술 도입을 재정적으로 지원하고 있다[30].

#### 3. 일본

일본은 인구 감소와 노후 인프라 대응을 위해 AI·로봇 기술 중심의 스마트 유지관리 체계를 구축하고 있다. 요코하마시는 세척 영상 분석 AI를 통해 관로 손상을 자동 검출하며, 향후 수명 예측 기능과 통합된다[31]. 또한, 다족보행 하수점검 로봇 SPD-X를 실증하여 자율 점검 시스템을 구축 중이며[15], 중앙정부는 Smart Maintenance 개념하에 디지털 유지관리 예산을 확대 지원하고 있다.

#### 4. 독일

독일은 환경감시 강화를 위한 디지털 하수도 운영을 추진 중이다. 베를린은 광섬유 온도센서로 불법 유입 감지 체계를 운영하며, 뮌헨과 프랑크푸르트는 각각 AI 기반 봉괴 예측과 디지털 트윈 통합 운영을 시범 적용하고 있다. 연방환경부는 디지털 전환 가이드라인과 재정지원을 제공하며, 민간기업 Siemens는 유럽 전역에서 스마트 하수도 기술을 보급하고 있다[32].

## 5. 영국

영국은 민영화된 수도사들이 AI와 IoT 기술을 대규모로 도입하고 있다. Southern Water는 2만여 개 IoT 센서를 통해 하수 수위 이상 감지와 비정상 패턴 분석을 수행하며 오염사고 40% 감축 효과를 보고하였다. Yorkshire Water는 우수받이 수위 센서를 도입해 침수 전 예방 청소를 가능케 했다[33]. 정부는 Ofwat의 혁신펀드를 통해 디지털 기술 보급을 촉진하고 있으며, 민관 간 기술 교류도 활발하다.

## 6. 프랑스

프랑스는 Suez와 Veolia 등 글로벌 물기업 주도로 스마트 하수관망 통합 플랫폼을 구축하고 있다. 파리는 AQUADVANCED 플랫폼으로 CSO 저감과 센강 수질 감시를 실현하고 있으며, 리옹은 악취 모니터링 센서를 활용한 자동 환기시스템으로 운영 효율을 높였다. 또한, 드론 연계 하수 재이용 시스템 등 순환경 연동 기술도 도입 중이다[34].

## 7. 네덜란드

네덜란드는 유해화학물질 감지, 원격 제어 밸브, 시민 참여형 앱을 활용한 하수도 스마트화를 선도하고 있다. 하수 침수 위험 완화를 위해 관로 수위 센서, 스마트 펌프 제어를 접목하고 있으며, 국가 수자원청은 AI 기반 물관리 모델을 구축하고 있다. 각 지역은 연합 플랫폼으로 지침을 공유하며 전국적 수준의 표준화를 달성 중이다[35].

## 8. 싱가포르

싱가포르는 도시 전역을 아우르는 디지털 하수도

운영체계를 구축하였다. PUB는 Smart Sewer Grid와 디지털 트윈 기반 TUAS 하수처리장을 통해, 센서·AI 기반 자산 관리와 실시간 부하 조절 기능을 확보하였다. 해외 기업과 협력한 기술 도입이 활발 하며, 스타트업 시험 적용 기회를 제공하는 생태계도 구축하였다[24].

## 9. 인도네시아

인도네시아는 분산형 하수관리 시스템에 IoT 기술을 시범 적용 중이다. 마카사르시는 빈민 지역을 대상으로 소형 압력식 관로와 IoT 펌프 시스템을 운영하며, 시민 참여형 데이터 수집으로 침수대응 효율을 높이고 있다. 스마트시티 계획과 연계해 장기적으로 자카르타 등 대도시에 중앙감시 시스템이 도입될 전망이다[36].

## 10. 호주

호주는 시드니, 멜버른 등 대도시 중심으로 IoT 기반 하수도 모니터링과 AI 결합 인식 기술을 도입하였다. Sydney Water는 4,800개 센서를 통해 월 3.6 억 원가량 사고 예방 효과를 거두었고, South East Water는 OneBox 시스템으로 분산 펌프 제어를 실현하였다. CSIRO는 황화수소 제어 기술을 개발해 관부식을 줄였다[37,38].

## 11. 브라질

브라질은 민영화 이후 민간기업 중심으로 스마트 기술 도입이 증가하고 있으며, Iguá는 디지털 계량과 IoT 설비 감시를 통해 운영 효율을 높이고 있다. 공영회사 SABESP는 공정 최적화와 침수경보 시스템을 시험 운영 중이며, 정부는 보급률 90% 목표하

에 스마트 기술을 활용하려는 의지를 보인다[39].

## 12. 질례

질례는 민간 수도기업이 사전 고장예측 AI, 디지털 제어 기반 저류조 운영 등을 도입하며, 디지털 하수도 관리의 선도적 역할을 하고 있다. 규제기관 SISS는 서비스 평가 지표에 ICT 기반 자동 보고를 도입하였으며, 전국 상하수도 100% 민영화와 연계한 스마트시티 계획을 추진하고 있다[40].

## IV. 결론

도시 인프라의 노후화와 기후위기에 따른 하수도 침수 및 오염 사고는 더 이상 국지적 문제가 아닌 전 세계적 도전 과제로 부상하고 있다. 이러한 복합 위협에 대응하기 위해, 지능형 센서 기반의 스마트 하수도 관리 기술은 실시간 감시와 예방적 유지관리를 가능하게 하는 핵심 솔루션으로 자리 잡고 있다. 본고에서는 스마트 하수도 시스템의 기술 구성요소를 지능형 센서, 로봇, 인공지능, 디지털 트윈, 엣지·클라우드 컴퓨팅으로 나누어 고찰하였으며, 각 기술의 특성과 현장 적용 시 고려사항, SWOT 분석을 통해 구체적 이해를 도모하였다.

특히 다양한 국가의 사례 분석을 통해 기술 도입의 성패는 단순한 장비 도입을 넘어서 통합 운영체계 구축과 정책적 뒷받침, 그리고 지역 현실에 맞는 맞춤형 전략이 동반되어야 함을 확인하였다. 선진

국은 AI 분석과 디지털 트윈을 통해 통합적 도시 물 순환 관리를 실현하고 있으며, 개발도상국은 저비용 IoT 센서와 시민참여형 데이터 수집을 통해 현실적인 해법을 모색 중이다.

향후 스마트 하수도 기술의 발전 방향은 △센서의 고정밀화 및 자가보정 기능 강화, △AI 기반 예측 정비 시스템의 고도화, △디지털 트윈의 실시간 제어 기능 확장, △분산형 엣지 컴퓨팅의 효율적 적용 등이 중심이 될 것으로 전망된다. 이를 위해서는 기술 개발뿐만 아니라 법·제도 정비, 예산 확보, 전문 인력 양성 등 정책적 기반 마련이 필수적이다.

결론적으로, 지능형 센서 기반 스마트 하수도 관리는 기술적 진보와 도시 회복탄력성 향상을 동시에 실현할 수 있는 전략적 수단이며, 향후 디지털 기반의 스마트 도시 인프라의 핵심 요소로서 그 중요성이 더욱 커질 것이다. 본고의 분석 결과는 우리나라를 비롯한 각국의 하수도 디지털 전환 전략 수립과 기술 선택에 실질적인 참고자료가 될 수 있을 것이다.

### 용어해설

SPD-X 일본에서 개발된 다족보행형 하수관 점검 로봇으로, 16 개의 관절형 다리로 좁은 관로 내 장애물을 넘으며 자율 주행이 가능한 유지관리 특화 로봇

LoRa / NB-IoT 저전력 광역 통신 기술로, 센서에서 수집한 데이터를 장거리로 전송할 수 있으며, 배선이 불필요하고 유지비용이 낮아 하수도 환경에 적합한 무선 통신 방식

Combined Sewer Overflow (CSO) 생활하수와 빗물을 함께 처리하는 합류식 하수도에서, 강우 시 처리 용량을 초과하여 오염된 하수가 하천이나 바다로 직접 방류되는 현상

## 참고문헌

- [1] A.I.A. Alzahrani et al., "Internet of Things (IoT)-Based Wastewater Management in Smart Cities," *Electronics*, vol. 12, 2023.
- [2] M.A. Dada et al., "Review of Smart Water Management: IoT and AI in Water and Wastewater Treatment," *World J. Adv. Res. Rev.*, vol. 21, no. 1, 2024, pp. 1373-1382.
- [3] G. Cicceri et al., "SWIMS: The Smart Wastewater Intelligent Management System," in Proc. IEEE Int. Conf. on Smart Computing (SMARTCOMP), (Irvine, CA, USA), Aug. 2021.
- [4] J. Q. Jiang, "Water Quality Monitoring and Management: A Review," *Water Research*, vol. 137, 2018, pp. 1-12.
- [5] T. Medearis, "The AI/ML Revolution in Sewer Pipeline Condition Assessment and Management Has Already Begun," AUTODESK One Water Blog, 2025. 2. 10. <https://www.autodesk.com/blogs/water/2025/02/10/the-ai-ml-revolution-in-sewer-pipeline-condition-assessment-and-management-has-already-begun/>
- [6] Xylem Inc., "Smart Sewer Technology Saves South Bend \$400M," 2021. 9. 15. [https://www.xylem.com/en-us/about-xylem/newsroom/press-releases/smart-sewer-technology-satisfies-epa-consent-decree-saves-city-\\$400-million/](https://www.xylem.com/en-us/about-xylem/newsroom/press-releases/smart-sewer-technology-satisfies-epa-consent-decree-saves-city-$400-million/)
- [7] Southern Water, "Southern Water unveils £15 million smart sewer technology in battle against pollution," 2023. <https://www.southernwater.co.uk/latest-news/water-unveils-industry-leading-15-million-smart-sewer-technology-in-battle-against-pollution/>
- [8] 서울특별시, "스마트 하수도 사업을 추진합니다," 정책브리핑, 2021. 7. 15.
- [9] J.S. Park et al., "Recent Advances in Information and Communications Technology (ICT) and Sensor Technology for Monitoring Water Quality," *Water*, vol. 12, no. 2, 2020.
- [10] S. Ghosh et al., "Smart Optical Sensors for Water Quality Monitoring," *Sensors*, vol. 20s, no. 5, 2020.
- [11] J. Bravo-Arrabal et al., "Development and Implementation of a Hybrid Wireless Sensor Network of Low Power and Long Range for Urban Environments," *Sensors*, vol. 21, no. 2, 2021.
- [12] A. Sikorski et al., "Cost-Efficient Coverage of Wastewater Networks by IoT Monitoring Devices," *Sensors*, vol. 22, 2022.
- [13] M. Farsi et al., "Digital Twin Technologies and Smart Cities," Springer, 2020.
- [14] D. Alejo et al., "SIAR: Autonomous Robot for Sewer Inspection," in Proc. Jornadas de Automática, (Madrid, Spain), Sep. 2016.
- [15] T. Fujita et al., "Development of Multi-Legged Sewer Inspection Robots: SPD1 to SPD-X," *J. Robot. Mechatron.*, vol. 35, no. 2, 2023, pp. 158-165.
- [16] SoftBank Robotics, "Sewer Pipe Detection Robot SPD-X Unveiled," PR Times, 2023.
- [17] 탑전자산업 웹사이트. <https://www.tap.co.kr/html/business/product01.php>
- [18] J. Liu et al., "Multi-gait snake robot for inspecting inner wall of a pipeline," *Biomim. Intell. Robot.*, vol. 4, 2024.
- [19] RedZone Robotics, "Multi Sensor Inspection for Sewer Infrastructure," 2024. <https://redzone.com/nr/multi-sensor-inspection-msi-sewers/>
- [20] Water Industry Journal, "AI successfully detects blockage formations for Wessex Water," 2021. 6. 4. <https://www.waterindustryjournal.co.uk/ai-successfully-detects-blockage-formations-for-wessex-water>
- [21] Aquatech, "Yorkshire Water adopts predictive AI cleaning system," Aquatech Trade News, 2023. <https://www.aquatechtrade.com/news/article/ai-drives-preventive-cleaning-in-sewer-networks>
- [22] Xylem Inc., "South Bend, Indiana Reduces Combined Sewer Overflow by 80% and Saves \$400 Million," 2022. <https://www.xylem.com/en-us/support/case-studies-white-papers/south-bend-indiana-reduces-combined-sewer-overflow-80-percent-saves-400-million/>
- [23] B. Valverde-Peréz et al., "Digital Water: Operational Digital Twins in the Urban Water Sector," International Water Association (IWA), 2021. 3. 10. <https://iwa-network.org/publications/operational-digital-twins-in-the-urban-water-sector-case-studies/>
- [24] B.R. Johnson et al., "Water Reuse and Recovery Facility Connected Digital Twin Case Study: Singapore PUB's Changi WRP Process, Control, and Hydraulics Digital Twin," in Proc. Water Environ. Fed., Oct. 2021.
- [25] C. Nicolas, "Digital-Water.City: Project Summary," Zenodo, 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8298353>
- [26] P. Roosipuu et al., "Monitoring and control of smart urban drainage systems using NB-IoT cellular sensor networks," *Water Sci. Technol.*, vol. 88, 2023, pp. 339-354.
- [27] Aquatech and Idrica, "Digital Twins in Water: Three notable case studies," 2024. <https://www.idrica.com/resources/digital-twins-in-water/>
- [28] Aquatech, "Tech Dive: Progress of Digital Twins in Water," 2023. 10. 16. <https://www.aquatechtrade.com/news/utilities/digital-twins-in-water>
- [29] 박종일, "용산구, 전국 최초 '스마트 하수도 모니터링 시스템' 구축," 아시아경제, 2021. 6. 9. <https://www.asiae.co.kr/article/2021060907142507078>

- [30] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "Water Infrastructure Finance and Innovation Act (WIFIA) Program," 2025. 3. 18. <https://www.epa.gov/climate-change-water-sector/water-infrastructure-finance-and-innovation-act-program>
- [31] N. Tochibayashi, "How improving wastewater management with technology can foster societal resilience," World Economic Forum, 2025. 3. 21. <https://www.weforum.org/stories/2025/03/japan-wastewater-management-sewers-technology/>
- [32] Siemens, "Siemens makes it easier for water utilities to benefit from artificial intelligence," 2024. 3. 13. <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-makes-it-easier-water-utilities-benefit-artificial-intelligence>
- [33] Water Company News, "Yorkshire Water Launches Project to Reduce Sewer Flooding by Installing 35,000 Customer Sewer Alarms," 2022. 7. 26. <https://www.watermagazine.co.uk/2022/07/26/yorkshire-water-launches-project-to-reduce-sewer-flooding-by-installing-35000-customer-sewer-alarms/>
- [34] <https://www.suez.com/en/asset-advanced>
- [35] <https://www.rijkswaterstaat.nl/>
- [36] <https://una.city/nbs/makassar/rise-indonesia-project>
- [37] <https://kallipr.com/sydney-water-implements-iot-wastewater-monitoring-devices/>
- [38] <https://utilitymagazine.com.au/sydney-water-installs-new-iot-sensors-in-major-rollout/>
- [39] <https://www.Og-association.com/>
- [40] <https://thesourcemagazine.org/chiles-urban-2030-water-and-sanitation-agenda/>