

청계천의 AI 수방체계 전환을 위한 중장기 로드맵 연구

이정훈, 김수진
서울연구원 지속가능연구실
e-mail: sujinkim@si.re.kr

AI-Based Flood Management Transition Roadmap for Cheonggyecheon Stream

Jung-Hun Lee, Sujin Kim
Urban Environment and Climate Change Research Division, The Seoul Institute

요약

청계천은 2005년 복원 이후 연간 약 1,800만 명이 방문하는 도심 하천이자 서울 도심의 핵심 수방 인프라로 기능하고 있다. 그러나 2006년부터 2024년까지 19년간의 운영 통계에 따르면 연평균 출입통제 횟수(35회)가 실제 산책로 침수 횟수(18회)의 약 2배에 달하는 과잉 통제가 반복되고 있으며, 이는 가압식 수문의 구조적 특성과 경험에 의존한 수동 판단 체계의 한계에서 비롯된 것으로 분석된다. 이 연구는 청계천 수방 운영 현황의 구조적 문제를 진단하고, K-water·구글·코펜하겐·일본 등 국내외 AI 수방 정책 사례 분석을 통해 도출한 시사점을 기반으로 데이터 기반 AI 예측의사결정 지원체계로의 전환 방향과 중장기 로드맵을 제시하는 것을 목적으로 한다. 로드맵은 "데이터 기반 구축, 알고리즘 개발, 시스템 구현"의 3단계로 구성되며, 수문 개방 빈도가 높은 배오개다리·마전교 등 핵심 지점을 우선 타겟으로 삼아 AI 학습용 데이터셋을 구축하고(1단계), 수문 개방 예측 모델 고도화 및 상황실 연동(2단계), 청계천 전역 무인 AI 시스템 완성 및 도림천·중랑천 등 서울시 주요 도심하천으로의 확산(3단계)을 단계적으로 추진하는 전략을 제안한다. 본 로드맵이 실현될 경우 시민 안전 확보, 출입통제 기준의 정량화·표준화, 서울시 AI 수방체계 표준 모델 정립 등의 효과가 발생할 것으로 기대한다.

1. 서론

청계천은 2005년 복원 이후 서울 도심의 대표적인 생태·문화 공간으로 자리매김하였으나, 하천 구조상 복개구조물과 합류식 하수관로가 복합적으로 연계되어 있어 강우 시 수위가 급격히 상승하는 구조적 특성을 가진다. 최근 기후변화로 인한 국지성 집중호우 및 돌발강우의 빈도가 지속적으로 증가하면서, 이러한 구조적 취약성은 도심 침수 위험으로 이어지고 있다. 실제로 2006년부터 2024년까지 19년간의 운영 통계에 따르면, 연평균 독립강우 65회 중 청계천의 연간 수문 개방 횟수는 평균 약 30회(약 46% 수준)에 달하며 이 추세는 강우 패턴 변화와 함께 심화되고 있다[1].

현행 청계천 수방 체계는 두 가지 측면에서 구조적 한계를 드러낸다. 첫째, 청계천 복개구조물에 설치된 수문은 가압식 자동 개폐 방식으로, 일정 수위 도달 시 수압에 의해 자동으로 작동하는 구조이다. 이로 인해 강우 강도 변화나 하류 수위 조건에 따른 유연하고 능동적인 제어가 근본적으로 어렵다. 둘째, 산책로 출입통제는 수문 개방과 연동된 자동화 체계 없이 담당자가 CCTV 영상·기상자료·현장 순찰 정보를 종합하여 경험적으로 판단하는 수동 방식에 의존하고 있다[2]. 이 때문에 담당

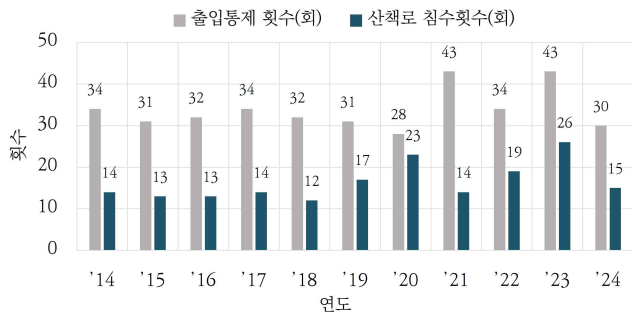
자는 사실상 24시간 상시 감시 근무를 수행해야 하며, 이는 판단의 일관성 저하와 인력 운영 비효율을 동시에 초래하는 구조이다. 이러한 수동 통제 체계의 가장 직접적인 폐해는 과잉 통제로 나타난다. 최근 3년간 청계천 산책로의 실제 침수 발생 횟수는 20회였으나, 같은 기간 출입통제는 36회 실시되어 약 1.8배의 격차가 발생하였다. 이는 정확한 수문 개방 시점 예측이 어려운 상황에서 안전을 우선한 보수적 운영이 반복된 결과로, 시민의 청계천 이용권이 불필요하게 제한되고 있음을 의미한다.

이를 해소하기 위해서는 강우·수위·유량·영상 데이터를 통합 분석하여 수문 개방 시점을 사전에 예측하고, 산책로 출입통제를 선제적·과학적으로 지원하는 AI 기반 수방 의사결정 체계로의 전환이 필요하다. 전 세계적으로도 도시 홍수 대응에서 AI와 실시간 제어를 결합한 스마트 수방 체계로의 전환이 가속화되고 있으며[3], 국내에서도 「물관리기본법」, 「스마트도시 조성 및 산업진흥 등에 관한 법률」 등을 기반으로 관련 정책 기반이 마련되고 있다. 이 연구는 청계천 수방체계의 현황과 한계를 진단하고, 국내외 AI 수방 정책 사례를 분석하여 데이터 기반 AI 예측 체계로의 단계적 전환을 위한 중장기 로드맵을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 청계천 운영 현황 및 국내외 AI 수방 사례

2.1 청계천 수방 운영 현황

2014년부터 2024년까지 11년간의 청계천 운영 통계에 따르면, 연평균 출입통제 34회, 수문 개방 28회, 산책로 침수 16회가 발생한 것으로 나타났다. 이는 실제 산책로 침수 대비 출입통제가 약 2배 빈번하게 발생하고 있으며, 경험에 의존한 보수적 운영 기준이 과잉 통제를 낳고 있음을 보여준다. 이 외에도, 수문 개방 횟수와 출입통제 횟수 간 높은 상관관계($r=0.73$)를 확인한 결과, 연간 수문 개방 횟수를 9회 줄일 경우 시민 이용 편의와 유지관리비 절감을 합산한 연간 편익이 약 21.5억 원에 달하는 것으로 추정되어 수문 운영 정밀화의 필요성이 제기된다[1].



[그림 1] 청계천 연도별 출입통제, 산책로 침수 현황

이처럼 과잉 통제가 반복되는 배경에는 청계천 수방 체계의 구조적 한계가 자리한다. 청계천 복개구조물에 설치된 수문은 관리자가 개폐를 직접 제어하는 방식이 아니라, 강우 시 관로 내 수위가 일정 수준에 도달하면 수압에 의해 위치와 무관하게 자동으로 개방되는 가압식 구조를 갖는다. 이로 인해 출입통제는 수문 개방과 연동된 자동화 체계 없이, 담당자가 CCTV·기상자료·현장 순찰 정보를 종합하여 경험적으로 판단하는 수동 방식에 의존할 수밖에 없다. 이러한 판단 구조는 정확한 수문 개방 시점 예측을 어렵게 만들어 필연적으로 보수적·선제적 통제를 초래한다. 여기에 더해 배오개다리·마전교 등 일부 구간이 역구배 차집관로, 완만한 하상경사, 타 구간 대비 25% 수준의 좁은 단면적 등 구조적 취약성으로 인해 약한 강우에서도 수위가 빠르게 상승하는 특성을 가짐을 확인하였다. 이는 전 구간에 동일한 통제 기준을 일률 적용하는 현행 방식이 구조적으로 과잉 통제를 유발할 수밖에 없음을 뒷받침한다.

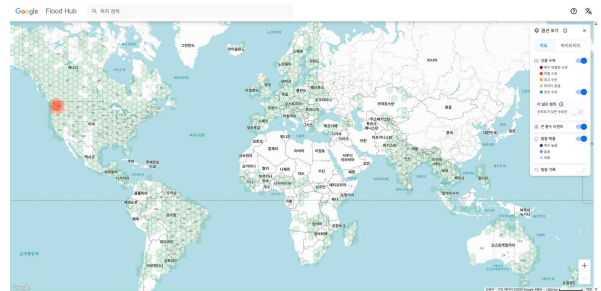
이러한 구조적 한계를 해소하기 위해서는 경험 기반 수동 판단에서 데이터 기반 AI 예측 체계로의 전환이 필요하다. 강우·수위·유량·CCTV 영상 등 다양한 데이터를 통합 분석하여 수문 개방 시점을 사전에 예측하고, 지점별 특성을 반영한 차등 통제 기준을 자동으로 판단하는 체계가 갖춰진다면 불필

요한 출입통제를 줄이면서도 시민 안전 확보가 가능해진다.

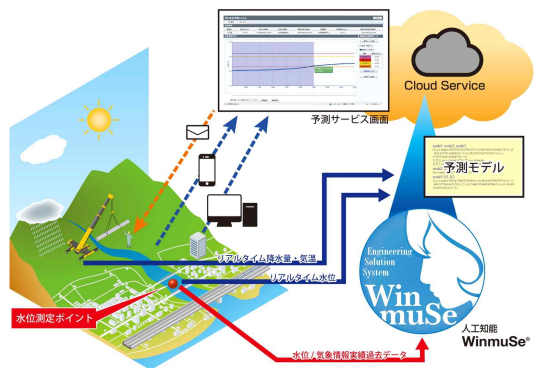
2.2 국내외 AI 수방 정책 사례

국내에서는 K-water가 디지털 트윈 기반 통합 물관리 운영 체계를 구축하고, 댐·수문 예측 지능화와 수질·환경 통합 관리를 연계하는 'AI First' 전략을 추진 중이다[4]. 환경부와 K-water는 도시유역 강우-유출 분석 기술을 내재화한 K-Series(K-River, K-Flood) 플랫폼을 구축하였으며[5], 부산시는 '부산 안전 ON' 통합정보시스템을 통해 침수 위험 사전 예측 및 인근 대피경로를 안내하는 스마트 선제 대응 체계를 추진하고 있다[6].

해외에서는 구글(Google)이 Flood Hub를 통해 도심 돌발홍수 예측 AI 모델을 개발·운영 중이다[7]. 이 모델은 과거 7일간의 기상 데이터와 향후 24시간 예보를 입력으로 하여 돌발홍수 발생 확률을 예측하며, 기존 하천 수위 관측 기반 모델과 별개로 도심 어디에서든 발생할 수 있는 돌발홍수에 대응할 수 있도록 설계되었다. 또한 덴마크 코펜하겐은 레이더 기반 유량 예측과 실시간 최적화 제어(RTC)를 결합하여 2분 주기로 수문·펌프에 제어 신호를 전송하는 선도적 운영 사례를 보여주며[8], 일본은 DNN 기반 유입 예측 모델과 DQN 강화학습 방류 조작 모델을 결합하여 예측-제어-피드백의 선순환 구조(WinmuSE 시스템)를 구현하고 있다[9].



[그림 2] 구글의 홍수예측 AI시스템 (Flood Hub)



[그림 3] 일본의 WinmuSE 시스템

2.3 시사점

청계천 운영 현황 및 국내외 사례 분석 결과를 종합하면 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다. 첫째, 청계천의 과잉 통제 문제는 경험 기반 수동 판단 체계의 구조적 한계에서 비롯된 것으로, 수문 개방 시점을 사전에 예측하고 지점별 차등 통제 기준을 자동으로 판단하는 데이터 기반 의사결정 체계로의 전환 절차가 필요하다.

둘째, 실시간 데이터 수집 인프라가 AI 예측 모델의 전제 조건이라는 점이다. K-water의 디지털 트윈 기반 물관리 체계나 구글의 Flood Hub 모두 방대한 실측 데이터의 선형 축적을 전제로 하며, 이는 청계천에서도 계측망 정비와 AI 학습용 데이터셋 구축이 선행되어야 함을 시사한다.

셋째, 모든 수문에 동일 기준을 적용하는 방식보다 지점별 위험도와 구조적 특성에 따른 차등 관리 체계가 운영 효율성과 시민 안전을 동시에 확보하는 데 효과적이다. 이는 코펜하겐·일본 등 해외 선도 사례에서도 구간별 특성을 반영한 실시간 제어 전략이 핵심 성공 요인으로 작용하였음이 확인된다.

3. AI 수방체계 중·장기 로드맵

3.1 로드맵 수립 방향

본 로드맵은 2장에서 도출한 세 가지 시사점, 즉 ① 데이터 기반 의사결정 체계로의 전환, ② 계측망 정비와 데이터셋 구축 선행, ③ 지점별 차등 관리 체계 구축을 설계 원칙으로 삼는다. 전면 자동화를 목표로 일시에 전환하는 방식이 아니라, 수문 개방 빈도가 높은 핵심 지점에서 가시적 성과를 먼저 도출하고 이를 기반으로 적용 범위를 단계적으로 확장하는 "데이터 기반 구축 → 알고리즘 개발 → 시스템 구현"의 3단계 접근을 기본 방향으로 한다.

3.2 단계별 추진 전략

① 1단계(1~2년): 데이터 기반 조성 및 진단

소프트웨어 측면에서는 기상청·현장 데이터 간 괴리 분석, AI 학습용 멀티모달 데이터셋 구축, 배오개다리·마전교 등 수문 개방 빈도가 높은 지점을 우선순위로 한 테스트베드 선정 및 초기 AI 모델 시험을 수행한다. 하드웨어 측면에서는 수문시설 노후화 진단, 모니터링 환경 분석, CCTV 기반 영상유속계(STIV) 등 추가 계측 장비 설치를 추진한다. 운영 측면에서는 통합상황실 구조 분석을 통해 향후 AI 연동을 위한 시스템 아키텍처를 설계한다. 여름철 강우 데이터를 충분히 확보한 후 서울시 후속 과제 예산 신청을 추진한다.

② 2단계(~5년): 분석 체계 고도화

소프트웨어 측면에서는 수위 예측 AI 적용 타당성 검토와 함께 CCTV 영상 기반 알고리즘을 고도화하여 수위·유속 인식 및 이상 징후 탐지 기능을 확보한다. 하드웨어 측면에서는 테스트베드를 인접 지점으로 순차 확대하고 AI 서버 및 네트워크를 확충한다. 운영 측면에서는 지점별 차등 관리 기준을 수립하고 AI-상황실 연동 체계를 구축하며, 수문 자동제어 시스템 도입 타당성을 단계적으로 검토한다.

③ 3단계(~10년): 무인 AI 시스템 완성

소프트웨어 측면에서는 장기 운영 데이터 기반의 예측 정확도를 개선하고 청계천 전역 AI 자동 분석·판단·제어 체계를 완성한다. 하드웨어 측면에서는 청계천 전역 무인 시스템을 적용하고 CCTV·센서 네트워크를 고도화한다. 운영 측면에서는 무인 시스템 운영 매뉴얼 표준화와 함께 대심도 터널 연계 운영방안을 모색하고, 도립천·중랑천 등 서울시 주요 도심하천으로의 확산 적용을 목표로 한다.

[표 1] 중장기 로드맵

	■ 1단계 (단기, 1~2년) 데이터 기반 조성 및 진단	■ 2단계 (중기, ~5년) 분석 체계 고도화	■ 3단계 (장기, ~10년) 무인 AI시스템 완성
소프트웨어	<ul style="list-style-type: none"> - 기상청-현장 데이터 괴리 분석 - 토심-구조물 변수 정량화 - AI 학습용 멀티모달 데이터셋 구축 - 배오개·마전교 우선 초기 모델 시험 	<ul style="list-style-type: none"> - 수위 예측 AI 타당성 검토 - CCTV 영상 기반 알고리즘 고도화 - 수위·유속 인식 / 이상징후 탐지 	<ul style="list-style-type: none"> - 장기 운영 데이터 기반 예측 정확도 개선 - 청계천 전역 AI 자동 분석·판단·제어
하드웨어	<ul style="list-style-type: none"> - 수문시설 노후화 진단 - 모니터링 환경 분석 (HW·네트워크) - CCTV 기반 영상유속계 (STIV) 설치 	<ul style="list-style-type: none"> - 테스트베드 인접 지점 순차 확대 - AI 서버·네트워크 확충 - 추가 계측 장비 설치 	<ul style="list-style-type: none"> - 청계천 전역 무인 시스템 적용 - CCTV·센서 네트워크 고도화 - 장기 데이터 축적 스토리지 구축
운영	<ul style="list-style-type: none"> - 통합상황실 구조 분석 - AI 연동 시스템 아키텍처 설계 	<ul style="list-style-type: none"> - 지점별 차등 관리 기준 수립 - AI-상황실 연동 체계 구축 - 수문 자동제어 타당성 검토 	<ul style="list-style-type: none"> - 무인 시스템 운영 매뉴얼 표준화 - 대심도 터널 연계 운영방안 모색 - 도립천·중랑천 등 주요 도심하천 확산

4. 결론 및 기대효과

이 연구는 청계천 수방 운영 현황의 구조적 한계를 진단하고, 국내외 AI 수방 정책 사례 분석을 바탕으로 데이터 기반 AI 예측 체계로의 전환을 위한 중·장기 로드맵을 제시하였다. 19년간의 운영 통계 분석 결과, 경험에 의존한 수동 판단 체계와 가압식 수문의 구조적 특성이 복합적으로 작용하여 실제 침수 위험 대비 약 2배에 달하는 과잉 통제가 반복되고 있음을 확인하였다. 이를 해소하기 위해 수문 개방 빈도가 높은 핵심 지점을 우선 타겟으로 삼아 데이터 인프라를 구축하고, 이를 기반으로 AI 예측 모델 개발, 전 구간 통합 운영체계 완성으로 이어지는 3단계 추진 전략을 제안하였다.

본 로드맵이 단계적으로 실현될 경우 세 가지 측면에서 기대효과가 예상된다. 첫째, AI 기반 수문 개방 시점 사전 예측을 통해 시민 대피 골든타임을 확보하고 불필요한 출입통제를 줄임으로써 시민 안전과 이용 편의를 동시에 향상시킬 수 있다. 둘째, 출입통제 기준의 정량화·표준화로 현장 인력 운영 효율성이 향상되고 데이터 기반 과학적 의사결정 체계가 확립될 것으로 기대된다. 셋째, 청계천에서 구축된 AI 수방관리 모델은 도립천·중량천 등 서울시 주요 도심하천으로 확산 적용 가능한 표준 모델로서 스마트 재난관리 정책의 기반을 마련할 것으로 전망된다.

다만 이 연구는 현재 진행 중인 과제로서 로드맵 수립과 기술적 타당성 검증에 초점을 두고 있으며, 구체적인 AI 모델 성능 검증과 시스템 설계는 후속 연구를 통해 보완될 필요가 있다.

후기

이 연구는 서울연구원의 지원을 받아 수행한 연구과제임. (과제 번호 2026-PR-24)

참고문헌

- [1] 서울시설공단, "청계천 내 우·오수 유입 수문 개방 지연방안 검토", 2025.
- [2] 서울특별시, "청계천 하천모니터링 연구용역 최종보고서", 2010.
- [3] 황석환, "구글이 선도하는 홍수예경보 시장과 한국", 국회물포럼 제33차 토론회 발제자료, 2026.
- [4] 한국수자원공사(K-water), "한국수자원공사, OpenAI와 AI 물관리 혁신을 위한 협력방안 논의", (홈페이지 : https://www.kwater.or.kr/news/repoView.do?seq=139458&brdId=KO26&orderByField=&orderByDirection=&s_mid=36)
- [5] 최두용, 허영택, 신은허, 김연수, "K-water의 물관련 소프트웨어 현황 및 개선방향", 한국수자원학회지, 제52권 6호, pp. 33-37, 2019.

- [6] 부산광역시, 부산 안전 ON. (홈페이지 : <https://safecity.busan.go.kr/#/>)
- [7] Google. Flood Hub. (홈페이지 : <https://cities.google/flood-hub>)
- [8] Grum, M., et al., "Full-scale real time control demonstration project in Copenhagen's largest urban drainage catchments", Proceedings of the 12th International Conference on Urban Drainage (ICUD), Porto Alegre, Brazil, 2011.
- [9] Watanabe, M., et al., "AI Utilized Dam Optimal Operation System", JFE Technical Report, 2023.