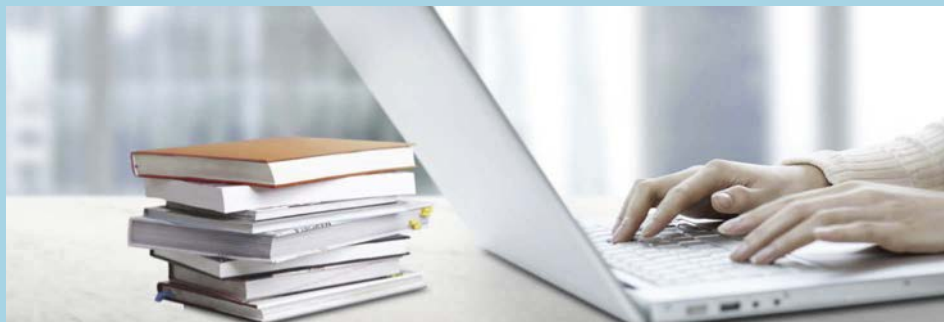


특 집

도시침수 대응

- 14 대심도 터널의 저류수 배제를 위한 설계·운영 의사결정 지원 소프트웨어: DeepDrain
민경원·강두선·이승엽·유도근·정동휘
- 26 AI 리빙랩 기반 도시침수 대응 플랫폼 개발 및 현장실증
이기하·문수진·이문환
- 32 도시침수 대응을 위한 대심도 빗물저류배수시설의 구축 확대와 예방적 유지관리
이강훈
- 46 지하방수로 통수능력 향상 및 설계 고도화 실험 연구
최성욱·이동섭

SPECIAL
ISSUE



대심도 터널의 저류수 배제를 위한 설계·운영 의사결정 지원 소프트웨어: DeepDrain



민경원
경희대학교
사회기반시스템공학과
연구교수
min0706@khu.ac.kr



강두선
경희대학교
사회기반시스템공학과
교수
doosunkang@khu.ac.kr



이승엽
명지대학교
스마트인프라공학부
교수
slee@mju.ac.kr



유도근
수원대학교
건설환경에너지공학부
교수
dgyoo411@suwon.ac.kr



정동휘
고려대학교
건축사회환경공학부
교수
sunnyjung625@korea.ac.kr

01 들어가며

최근 기후변화에 따른 국지성 집중호우와 도시지역의 불투수면적 증가는 기존 우수배제시설의 처리능력을 초과하는 도시침수 위험을 증가시키고 있다. 이에 따라 지표면의 우수를 신속하게 지하로 유도하여 일시적으로 저류하고, 침투 유출량을 저장할 수 있는 대심도 터널, 지하 저류시설 등의 도입이 확대되고 있다. 이러한 지하 인프라는 강우 시 유입되는 대규모 우수를 시설 내부에 일시적으로 저장함으로써 하천 및 하수관로의 부담을 완화하고, 저지대의 침수피해를 줄이는 핵심적인 도시 수방시설로 활용될 수 있다.

그러나 지하 저류시설의 성능은 강우 시 우수를 얼마나 많이 수용할 수 있는가에 의해서만 결정되지 않는다. 강우 종료 후 시설 내부에 잔류한 저류수를 신속하고 안정적으로 배제하여 다음 강우에 대비한 가용 저류용량을 회복하는 과정 역시 시설의 수방성능을 결정하는 중요한 요소이다. 특히 연속적인 강우사상이 발생하거나 선행강우와 후속강우 사이의 무강우 시간이 짧은 경우에는, 저류수 배제가 지연될수록

후속 강우에 대응할 수 있는 시설의 유효 저류용량이 감소한다. 따라서 목표시간 이내에 저류수를 배제할 수 있는 배수시설 설계와 운영전략을 사전에 마련하는 것이 필요하다.

지하 인프라의 저류수 배제과정은 시설 내부의 수리·구조적 특성과 밀접하게 연계되어 있다. 동일한 수위라 하더라도 터널의 단면형상, 종단경사, 관경, 관저고, 수직구 및 연결관로의 배치 등에 따라 실제 저류량이 달라질 수 있으며, 저류수위 변화에 따라 자연배수와 강제배제의 수리조건도 지속적으로 변화한다. 자연배수 과정에서는 유입-유출부의 수두차와 역사이편 조건, 관로의 통수능, 유사 퇴적에 따른 유효단면 감소 등을 함께 고려해야 한다. 또한 자연배수 이후 잔류하는 저류수는 배수펌프를 이용하여 강제배제해야 하므로, 펌프의 용량과 대수뿐만 아니라 운전수위에 따른 양정 및 토출량 변화, 펌프 성능곡선, 운전조합, 목표 배제시간과 같은 조건을 종합적으로 검토해야 한다.

그러나 기존의 지하 인프라 배수시설 설계 및 운영 검토에서는 수위별 저류량 산정, 자연배수능 평가, 펌프 용량 결정, 강제배제 성능 검토 및 운영계획 수립이 개별적인 절차로 수행되는 경우가 많았다. 또한 설계조건이나 운영조건이 변경될 경우 관련 분석을 반복 수행해야 하므로, 다수의 대안을 체계적으로 비교·평가하는데 상당한 시간과 노력이 소요된다. 이러한 문제는 설계자와 운영자 간 분석결과의 일관성을 저하시킬 뿐만 아니라, 실제 강우상황에서 신속한 운영 의사결정을 수행하는 데에도 제약으로 작용할 수 있다.

이러한 한계를 개선하기 위해 대심도 터널의 저류수를 안정적으로 배제하기 위한 배수시설의 설계 및 운영 의사결정 지원 도구인 DeepDrain(DD)을 개발하였다. DD는 지하 인프라의 구조적 제원과 유입량 시나리오를 기반으로 저류특성 분석, 자연배수 및 강제배제량 산정, 배수펌프 설계와 운영계획 수립을 하나의 분석체계로 연계한 의사결정 지원 소프트웨어이다 (그림 1). 개별적으로 수행되던 설계 및 운영 분석을 순차적으로 연결함으로써 입력자료의 반복 구축을 최소화하고, 다양한 시설·유입·운영조건에 대한 분석결과를 일관된 기준으로 비교할 수 있도록 구성하였다.

본 기사에서는 DD의 전체 시스템 구성과 분석 흐름을 소개하고, 이를 구성하는 저수위-저류량 관계곡선, 자연배수량 평가, 저류수 배제 펌프 설계, 강제배제량 평가 및 운영계획수립 모듈의 주요 기능과 활용방안을 순차적으로 설명하고자 한다. DD는 이들 5개 핵심 모듈을 GUI 기반 시스템에서 통합하여 지하 인프라 저류수 배제와 관련된 설계 및 운영 의사결정을 지원하도록 구성되었다.



그림 1. DeepDrain(DD) 소프트웨어의 사용자 인터페이스

02 DeepDrain 소프트웨어 구성 및 분석체계

DD는 지하 인프라에 유입·저류되는 우수의 수리적 거동과 배수시설의 설계 및 운영과정을 통합적으로 분석하기 위한 모듈형 소프트웨어이다. 지하 인프라의 형상과 구조, 강우사상별 유입조건, 자연배수시설의 수리특성, 배수펌프의 설계조건 및 운영상 제약조건을 하나의 프로젝트 단위로 관리하며, 각 분석단계에서 산정된 결과가 다음 단계의 입력자료로 연계되도록 구성하였다. 따라서 개별 분석모형을 독립적으로 적용하는 방식과 달리, 시설의 저류특성 산정에서부터 최종 운영계획 수립에 이르는 전 과정을 일관된 자료체계와 분석조건에서 수행할 수 있다.

DD에서 활용되는 입력자료는 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 대심도 터널 및 관로의 길이, 관경, 종단경사, 관저고, 수직구 위치, 연결관로 및 최대 저류용량과 같은 시설의 구조적 제원이다. 둘째, 수직구별 유입량 시계열, 초기 저류수위, 유사 퇴적조건 및 유입 수문 운영조건과 같은 수문·수리조건이다. 셋째, 잔류수 목표 배제시간, 펌프 대수, 펌프 성능곡선, 토출량 제약 및 펌프 운전조합과 같은 기계·운영조건이다. DD는 이러한 입력자료를 모듈별로 활용하면서도 공통 프로젝트 자료로 관리하여, 설계조건의 변경이 후속 분석과 운영결과에 미치는 영향을 연속적으로 검토할 수 있도록 하였다. 이와 같은 입력자료를 분석 목적에 따라 체계적으로 처리하고, 저류특성 분석에서 운영계획 수립까지의 절차를 단계적으로 수행하기 위해 DD는 다음의 5개 핵심 모듈로 구성하였다.

- ① 저수위-저류량 관계곡선 산정 모듈
- ② 자연배수량 평가 모듈
- ③ 저류수 배제 펌프 설계 모듈
- ④ 강제배제량 평가 모듈

⑤ 운영계획수립 모듈

이하에서는 각 모듈의 분석 목적, 주요 입력자료 및 출력결과를 순차적으로 설명한다.

① 저수위-저류량 관계곡선 산정 모듈

DD의 저수위-저류량 관계곡선 모듈은 대심도 터널 내 수위에 따른 저류량을 산정하고, 운영 중 예측된 수위로부터 현재 저류량과 잔여 저류용량을 추정하기 위한 기능이다 (그림 2). 대심도 터널은 집중호우 시 초과 우수를 일시적으로 저류하여 도시침수를 저감하지만, 터널 내부의 접근성과 예측환경 제약으로 인해 저류량을 직접 측정하기 어렵다. 따라서 비교적 예측이 용이한 유출 수직구의 수위를 이용하여 터널 전체의 저류상태를 추정할 수 있는 수위-저류량 관계의 구축이 필요하다.

본 모듈은 EPA-SWMM 입력파일에 포함된 터널 및 수직구의 구조자료를 기반으로 수위별 저류량을 산정한다. 주요 입력자료는 터널의 단면형상과 직경, 구간별 길이, 상·하류 관저고, 종단경사 및 수직구 높이 등이다. 대심도 터널은 종단경사를 갖기 때문에 수위가 상승함에 따라 저류구간이 상류 방향으로 확대되고, 각 구간의 흐름상태도 부분 충전에서 만관 상태로 변화한다. 이에 따라 유효저류길이와 대응하는 단면적을 누적하여 전체 저류량을 산정해야 한다.

저류량 산정은 유출 수직구의 최저수위에서 계획 최고수위까지 일정한 계산 간격으로 수위를 증가시키며 수행된다. 각 수위에서 터널 바닥고와 수면고의 차이를 이용하여 물이 채워지는 유효구간을 결정하고, 계산구간별 수심을 산정한다. 원형 터널의 경우 수심에 대응하는 원호단면적을 산정하며, 수심이 터널 직경 이상인 구간은 만관 상태로 처리한다. 이후 인접 계산지점의 단면적과 구간길이를 이용하여 구간별 체적을 계산하고, 전체 터널 구간과 수직구의 체적을 합산하여 해당 수위에서의 총 저류량을 산정한다.

주요 출력결과는 수위-저류량 관계곡선, 수위별 저류량 조회표 및 운영과정에서 활용할 수 있는 수위-저류량 환산식으로 구성된다. 사용자는 계산 수위 간격과 관계식 구간을 설정할 수 있으며, 산정결과는 그래프와 표로 시각화된다. 이를 통해 특정 수위에서의 현재 저류량뿐만 아니라 최대 저류용량 대비 잔여용량도 신속하게 파악할 수 있다.

제안한 방법은 신월 대심도 터널의 설계 제원을 적용하여 검토하였다. 산정된 수위-저류량 관계곡선을 기존 수리수문자료집의 기준곡선과 비교한 결과, 결정계수는 0.99로 나타났으며 수위별 저류량의 상대오차는 0.5% 미만으로

확인되었다 (서울특별시, 2021). 또한 실제 호우사상의 관측자료와 비교한 추가 검토에서도 저류량의 증가와 감소 경향을 비교적 적절하게 재현하는 것으로 나타나, 수위자료를 활용한 저류량 추정방법의 적용 가능성을 확인하였다.

본 모듈에서 도출된 수위-저류량 관계는 DD의 후속 분석을 위한 기초자료로 활용된다. 자연배수량 및 강제배제량 평가에서는 배수과정에서의 저류상태와 잔류 저류량을 해석하기 위한 기준자료로 활용되며, 운영계획수립 모듈에서는 현재 저류량, 최대 저류율 및 가용 저류용량을 판단하는 데 이용한다. 따라서 본 모듈은 대심도 터널의 계획 저류용량 검토에서부터 실시간 저류상태 파악과 배수 운영 의사결정까지 연결하는 DD 분석체계의 출발점에 해당한다.

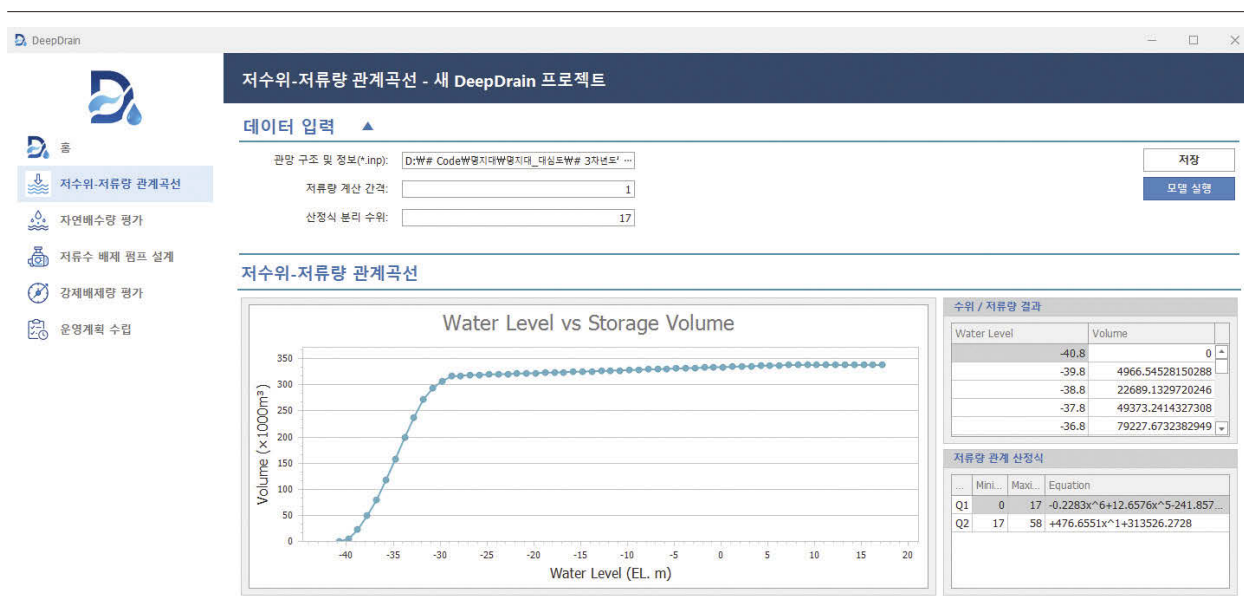


그림 2. DeepDrain(DD) 저수위-저류량 관계곡선 모듈의 입력 및 결과 화면

② 자연배수량 평가 모듈

DD의 자연배수 평가 모듈은 대심도 터널의 유입량과 설계인자에 따른 배수 특성(총 배수량, 배수시간, 최대 배수량)을 정량적으로 평가한다 (그림 3). 역사이편 구조인 대심도 터널의 배수는 유입량과 설계인자의 조건(관경, 관로 경사 및 유입·유출부의 관경고 차)에 큰 영향을 받는다. 따라서 다양한 유입량 시나리오와 설계인자 변동의 종합적 검토가 필요하다.

자연배수 평가 모듈은 대심도 터널의 관망 구조 및 제원이 포함된 EPA-SWMM 입력파일과 각 유입수직구의 시간별 유입량 자료를 기반으로 수리해석을 수행한다. SWMM 내 Dynamic wave 조건에서, 개수로 흐름 이후 만관의 조건에서 터널의

연속적인 흐름 유지를 위해 Preissmann slot 기법의 압력흐름을 모의한다. 특히 하류부가 건조한 조건(Downstream Dry Condition)에서는 상류부에 충분한 수두가 확보된 경우에만 자연적으로 배수가 발생한다. 대심도 터널의 관경, 관로 경사 및 관정고 차를 주요 변동 설계인자로 설정하여 설계인자의 변동과 조합에 따른 자연배수 특성을 비교할 수 있도록 하였다.

대심도 터널 내 유입 유량 내 유사 및 슬러지 퇴적을 고려하기 위해 유입량-유사 관계식을 적용하여 터널 구간별 유사 퇴적 깊이를 산정하고, 퇴적 단면적을 제외한 유효 통수단면적을 자연배수 해석에 반영하였다. 이를 통해 유사 적용 전후의 자연배수 성능 비교가 가능하다.

주요 출력결과로는 설계인자 조합별 자연배수 평가 히트맵, 터널 구간별 유사 퇴적 깊이, 유사 적용 여부에 따른 자연배수량 및 배수시간 비교 결과로 구성된다. 히트맵을 통해 설계인자 조합(관경-경사, 관경-관정고 차, 경사-관정고 차)에 따른 배수 특성을 확인할 수 있다. 또한, 산정된 구간별 유사 퇴적 깊이를 자연배수 해석에 반영하여 유사 적용 전후의 배수 특성을 비교할 수 있다.

본 모듈은 대심도 터널의 설계조건별 자연배수 성능을 사전에 검토하고, 유사 유입으로 인한 자연배수량 변화를 정량적으로 검토할 수 있다. 또한, 자연배수 이후 터널에 남아 있는 저류량을 산정하여 후속 강제배제량 평가 및 운영계획 수립을 위한 기초자료를 제공할 수 있다.

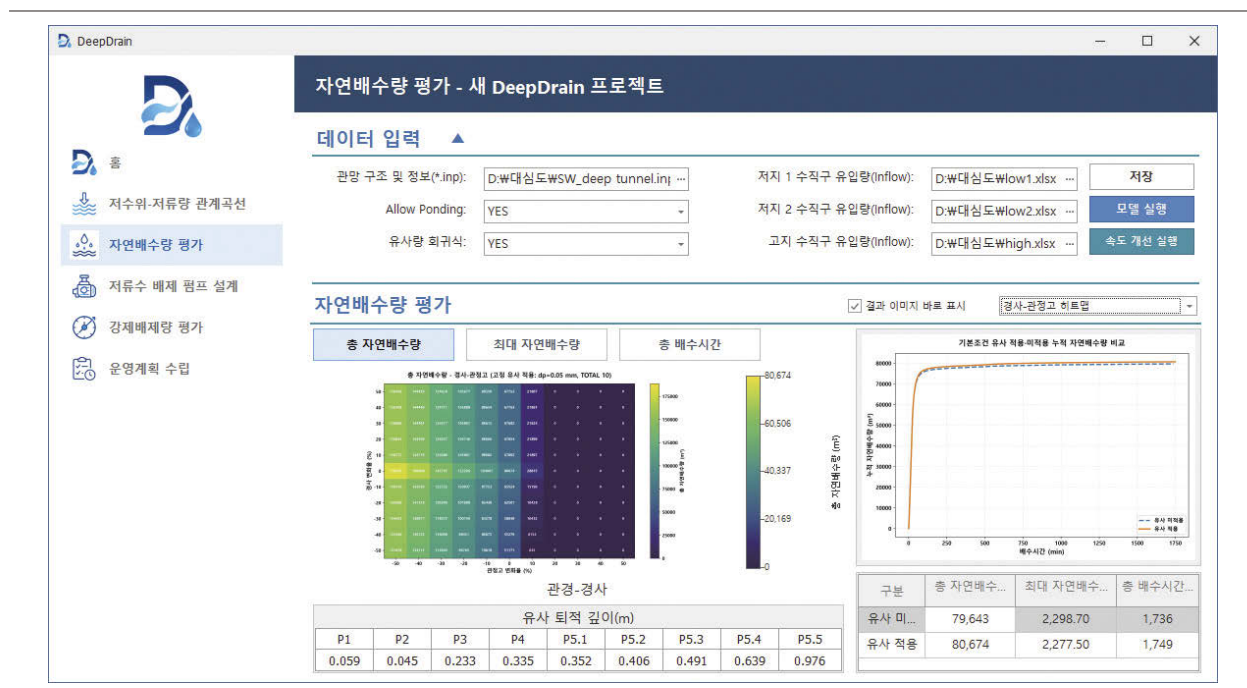


그림 3. DeepDrain(DD) 자연배수량 평가 모듈의 입력 및 결과 화면

③ 저류수 배제 펌프 설계 모듈

DD의 저류수 배제 펌프 설계 모듈은 대심도 터널 내부에 잔류하는 저류수를 목표시간 이내에 배제하기 위해 필요한 펌프의 용량과 대수를 산정하고, 서로 다른 용량의 펌프를 조합한 복수의 설계대안을 제시한다 (그림 4). 동일한 저류용량과 총 토출능력을 확보하더라도 대용량 펌프를 소수 설치하는 경우와 중·소용량 펌프를 다수 설치하는 경우에는 초기비용, 전력부하, 운전 유연성 및 고장 시 대응성에서 차이가 발생한다. 따라서 펌프 설계 시에는 총 요구 토출량뿐만 아니라 목표 배제시간과 운영 목적을 고려한 용량별 구성과 설치 대수를 함께 검토해야 한다.

본 모듈의 설계 방법은 신월 대심도 터널의 실시설계 사례를 참고하여 구성하였다. 기존 설계에서는 대심도 터널의 최대 저류량, 목표 배제시간 및 운전 펌프 대수를 기준으로 펌프 1대당 요구 토출량을 산정하였다. DD에서는 이러한 기본 개념을 확장하여 최대 저류량, 목표 배제시간 및 펌프 대수를 주요 입력변수로 설정하고, 펌프별 상대 용량비를 적용하여 개별 펌프의 설계 토출량을 자동으로 산정한다. 이를 통해 동일 용량의 펌프뿐만 아니라 고·중·저용량 펌프를 혼합한 다양한 설계안을 도출할 수 있다.

펌프 구성은 네 가지 설계대안으로 구분된다. 설계안 1은 고용량 펌프로만 구성하여 높은 배제능력을 확보하는 방식이며, 설계안 2는 고용량과 중용량 펌프를 혼합하여 배제성과 경제성 간 균형을 고려한 방식이다. 설계안 3은 중용량 펌프를 중심으로 구성하여 유지관리 부담과 고장 위험을 분산하고 운전 유연성을 확보하며, 설계안 4는 저용량 펌프를 포함하여 저유입 조건에서 세밀한 단계별 운전이 가능하도록 구성하였다. 사용자는 현장의 설치공간, 전력공급 여건, 경제성 및 운영 목적에 따라 적정 설계안을 비교·선정할 수 있다.

또한 터널 내부로 상시 유입되는 지하수를 별도로 배제할 수 있도록 지하수 배제 펌프 설계기능을 포함하였다. 일평균 지하수 발생량, 설계 여유계수 및 펌프 대수를 입력하면 지하수 배제 전용 펌프의 요구 토출량을 산정할 수 있으며, 이를 통해 저류수 배제 펌프와 지하수 배제 펌프의 기능을 구분하여 설계할 수 있다.

주요 출력결과는 설계안별 펌프 용량, 대수, 총 설계 토출량 및 용량별 구성비로 제시되며, GUI에서 그래프와 표 형태로 비교할 수 있다. 본 모듈에서 도출된 펌프 설계안은 후속 강제배제량 평가 모듈에서 입력자료로 활용되며, 운영계획수립 모듈에서는 펌프 운전조합을 결정하는 기초자료로 활용된다.

그림 4. DeepDrain(DD) 저류수 배제 펌프 설계 모듈의 입력 및 결과 화면

④ 강제배제량 평가 모듈

DD의 강제배제 평가 모듈은 배수 펌프의 성능 저하에 따른 대심도 터널의 저류수 배제 성능을 평가한다(그림 5). 배수 펌프는 장기간 운영, 노후화, 유지관리 상태 등에 따라 성능이 저하될 수 있으며, 이러한 성능 변화는 대심도 터널의 운영계획(배수 시간, 배제량)에 영향을 미친다. 따라서 배수 펌프 성능 변화에 따른 사전 모의를 통해, 대심도 터널의 운영 계획의 안정성과 적정성 검토가 필요하다.

강제배제 평가 모듈은 대심도 터널 관망 구조와 펌프 정보가 포함된 EPA-SWMM 입력파일을 제공받아 펌프(Pump), 노드(Node), 성능 곡선(Pump Curve), 제어 조건(Control Rule)을 기반으로 수리해석을 수행한다. EPA-SWMM에서 펌프는 연결된 노드 간 유량을 전달하는 관(Link) 요소로 정의되며, 제어 조건이 충족되면 작동한다. 이때 펌프 전·후단 노드의 수위 차로부터 계산된 양정(Head)을 기준으로 수두-유량(Head-Flow) 성능곡선을 적용하여 시간별 펌프 유량을 산정한다.

강제배제 평가 모듈의 사용을 위해 펌프 종류별 설계 펌프 성능 곡선 입력 후, 성능 인자로 양정(Head) 또는 토출량(Discharge)을 선택하여 각 성능 인자의 변동에 따른 펌프 성능곡선을 도출한다. 양정 변화 조건은 동일 유량 대비 가용 양정의 변화를, 토출량 변화 조건은 펌프 용량 변동에 따른 성능 변화를 반영하여 성능곡선을 생성한다. 생성된 성능곡선은 EPA-SWMM 모델에 적용되어 각 성능 변화 시나리오별 펌프 운영에 따른 수리해석을 수행한다.

펌프 작동에 따른 시간별 배제 유량, 터널 내 수위 변화, 잔류수 배제 완료 시간 및 총 배제량을 산정하여 펌프 성능 변화가 강제배제 능력에 미치는 영향을 정량적으로 평가한다.

본 모듈은 펌프 성능 변화에 따른 강제배제 성능을 정량적으로 평가하여 대심도 터널 배수 시스템의 운영 및 유지관리 의사결정을 지원한다. 또한 다양한 성능 변화 시나리오를 기반으로 설계된 펌프 시스템의 안정성과 신뢰성을 검증하고, 성능 저하에 따른 대응 기준을 마련하는 데 활용될 수 있다.

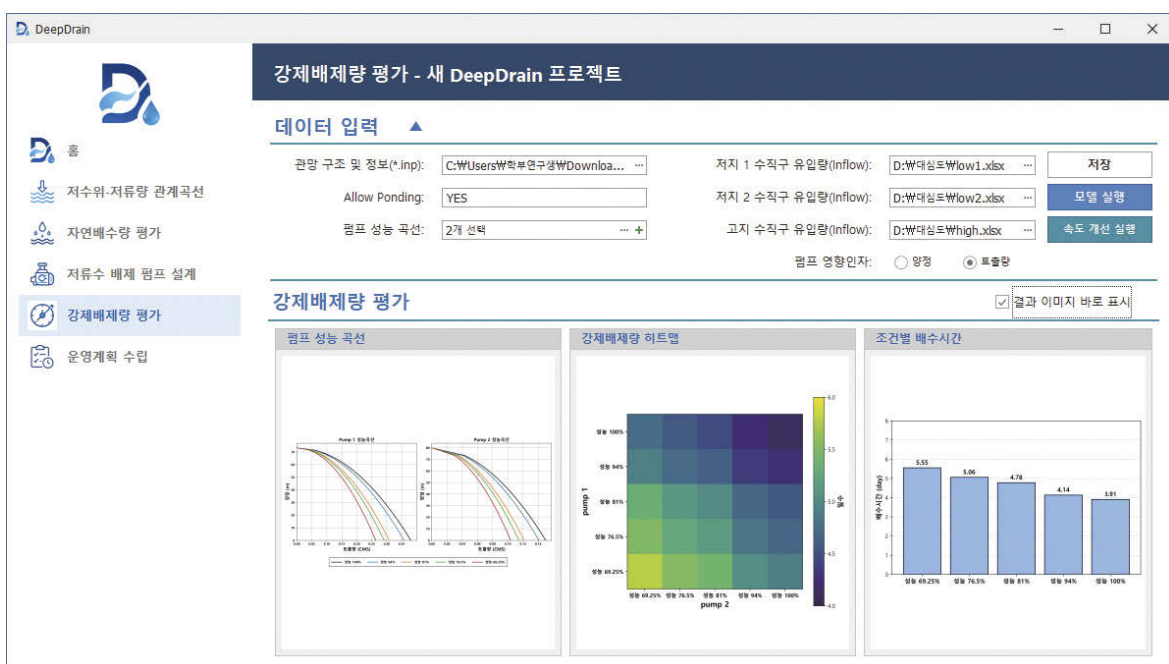


그림 5. DeepDrain(DD) 강제배제량 평가 모듈의 입력 및 결과 화면

⑤ 운영계획수립 모듈

DD의 펌프 운영계획수립 모듈은 앞선 모듈에서 산정된 수위-저류량 관계, 자연배수 특성, 펌프 설계안 및 강제배제 성능을 종합하여 대심도 터널의 운영 목적에 적합한 계획을 수립한다. 운영 목적에 따라 수방 운영 모드와 (비수방) 다목적 운영 모드로 구분되며, 각 모드별로 입력조건과 분석결과가 다르게 구성된다 (그림 6).

수방 운영 모드는 집중호우 이후 터널 내부의 저류수를 신속하게 배제하여 후속 강우에 대비한 가용 저류용량을 확보하는 것을 최우선 목표로 한다. 주요 입력자료는 펌프 설계안, 펌프 성능 또는 토출 제약조건, 목표 배제시간, 수직구별 유입량 시나리오, 유입 수문 차단 여부 및 차단기준 등이다. 특히 펌프 설계

모듈에서 도출된 설계대안과 강제배제량 평가 모듈에서 검토된 펌프 성능조건을 연계함으로써 실제 수리조건을 고려한 운영계획을 수립할 수 있다.

수방 운영전략은 펌프 가동시점에 따라 구분된다. 운영전략 1은 유입이 지속되는 동안 터널 내 저류율이 사전에 설정한 기준에 도달하면 강제배제를 시작하는 방식이며, 운영전략 2는 유입 종료 후 펌프를 가동하여 잔류 저류수를 배제하는 방식이다. 또한 유입 수문을 개방하여 자연배수를 병행하는 조건과 수문을 차단하여 강제배제만 수행하는 조건을 함께 고려할 수 있다. 분석결과로는 펌프 가동기준, 펌프 조합, 자연배수량, 강제배제량, 최대 저류율, 총 운영시간, 펌프 가동시간 및 목표 배제시간 만족 여부 등이 제시되며, 이를 통해 운영전략별 배제성과 안정성을 비교할 수 있다.

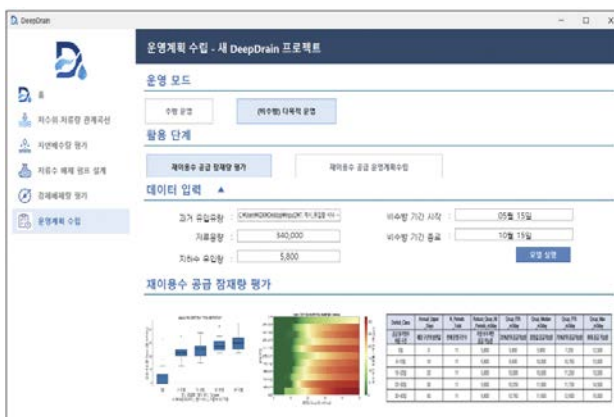
(비수방) 다목적 운영 모드는 평상시 터널에 유입되거나 저장된 물(지하수 포함)을 재이용수로 활용하는 방안으로 대심도 터널의 활용성을 확대하기 위한 기능으로, 재이용수 공급 잠재량 평가와 재이용수 공급 운영계획 수립으로 구분된다.

재이용수 공급 잠재량 평가는 과거 유입량, 비수방 운영기간, 터널의 최대 저류용량, 상시 지하수 유입량 및 용도별 허용 부족일수 등을 기반으로 해당 유역과 기상조건에서 안정적으로 공급할 수 있는 저류수의 재이용수 활용가능 범위를 산정한다. 공급량별 일 단위 저류량 변화를 모의하고, 공급불가일수와 최저 저류량을 평가하여 하천유지용수, 청소용수 또는 조경용수 등 용도별 운영기준을 만족하는 공급 가능량을 제시한다. 따라서 특정 규모의 대심도 터널을 설치할 경우 비수방 기간 동안 확보할 수 있는 장기적인 재이용수 공급 잠재력을 검토하는 데 활용할 수 있다.

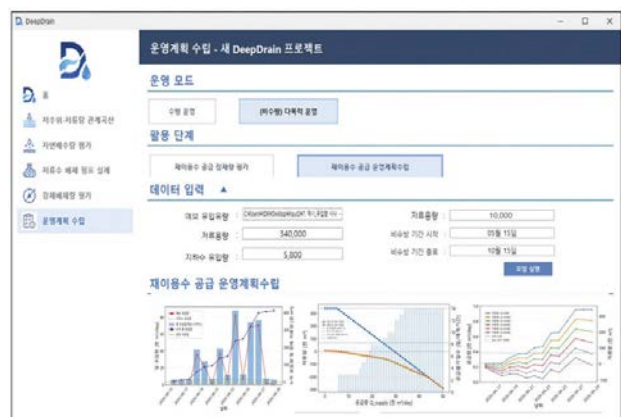
재이용수 공급 운영계획 수립은 현재 터널 내 저류량과 향후 예측 유입량을 기반으로 단기 재이용수 공급계획을 수립하는 기능이다. 현재 저류량, 예보 유입량, 상시 지하수 유입량 및 공급량 시나리오를 적용하여 시간에 따른 저류량 변화를 분석하고, 외부 수요처에 공급 가능한 일수와 일별 공급량을 산정한다. 이를 통해 향후 강우 및 유입 전망을 고려하여 공급계획을 제시할 수 있다.

운영계획수립 모듈은 대심도 터널을 단순한 홍수저감시설로 운영하는 데 그치지 않고, 수방기에는 신속한 저류용량 회복을 지원하고 비수방기에는 재이용수 공급 가능성을 평가하는 통합 의사결정 기능을 제공한다. 이를 통해 운영자는 강우조건, 터널 저류상태 및 펌프 성능에 따라 적정 운영전략을 선택하고, 운영 목적별 결과를 정량적으로 비교할 수 있다.

(a) 수방 운영 모드 입력 및 결과 화면



(c) (비수방) 다목적 운영 모드의
제이용수 공급 잠재량 평가 화면



(d) (비수방) 다목적 운영 모드의
제이용수 공급 운영계획수입 화면

그림 6. DeepDrain(DD) 운영계획수입 모듈의 입력 및 결과 화면

03 맺음말

DD는 대심도 터널을 비롯한 지하 인프라의 저류수 배제 문제를 수위-저류량 관계 산정, 자연배수 성능평가, 저류수 배제 펌프 설계, 강제배제 성능평가 및 운영계획 수립의 전 과정에서 통합적으로 검토하기 위해 개발된 설계·운영 의사결정 지원 소프트웨어이다. 기존에 개별적으로 수행되던 분석절차를 5개 핵심 모듈로 체계화하고, 각 모듈의 입력자료와 분석결과가 후속 단계로 연계되도록 구성함으로써 시설 설계에서 실제 운영계획 수립까지 일관된 분석체계를 제공한다.

DD의 주요 특징은 지하 인프라의 구조적 특성, 유입량의 시간적 변동, 자연배수

조건, 펌프의 용량 및 성능, 목표 배제시간과 같은 다양한 설계·운영조건을 시나리오 기반으로 비교할 수 있다는 점이다. 이를 통해 사용자는 저류량과 목표 배제시간에 적합한 펌프 설계안을 도출하고, 수위 및 양정 변화에 따른 실제 강제배제 성능을 검토할 수 있다. 또한 수방 운영 모드에서는 후속 경우에 대비한 저류용량의 신속한 회복을 지원하고, 비수방 다목적 운영 모드에서는 재이용수 공급 잠재량과 단기 공급계획을 분석함으로써 대심도 터널의 활용범위를 확장할 수 있다.

DD는 GUI 기반의 통합 모의절차를 제공함으로써 동일한 시설정보를 분석단계마다 반복적으로 구축해야 하는 부담을 줄이고, 설계조건 및 운영전략 변경에 따른 결과를 그래프와 표를 통해 직관적으로 비교할 수 있도록 한다. 따라서 DD는 단순한 수리해석 도구를 넘어, 배수시설의 설계 적정성 검토, 펌프 구성안 비교, 목표 배제시간 만족 여부 판단 및 운영전략 선정 등을 지원하는 의사결정 도구로 활용될 수 있다.

향후에는 실제 대심도 터널 및 지하 저류시설을 대상으로 한 현장 적용과 관측자료 기반의 검·보정이 필요하다. 또한 펌프의 운전상태, 설비 고장과 성능 저하를 고려한 비상운영 시나리오 분석 등이 보완될 필요가 있다. 이러한 기능이 단계적으로 고도화된다면 DD는 지하 인프라의 안전한 저류수 배제뿐만 아니라 시설 운영의 효율성, 신뢰성 및 수자원 활용성을 종합적으로 향상시키는 실무형 의사결정 지원 시스템으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 결과물은 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업(R&D)의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2024-00398012).

참고문헌

서울특별시, 『신월 빗물저류배수시설 모니터링 수리·수문 자료집』, 서울특별시 (2021).



AI 리빙랩 기반 도시침수 대응 플랫폼 개발 및 현장실증

- 사용자 참여형 의견수렴이 만드는 실무형 재난대응 기술 -



이 기 하

경북대학교
건설방재공학과 교수
leegiha@knu.ac.kr



문 수 진

(주)에임스
기업부설연구소
대표이사
sujin4729@naver.com



이 문 환

한국환경연구원
국토환경연구본부
연구위원
mhlee@kei.re.kr

01 서론

최근 짧은 시간에 집중되는 극한강우로 도시침수 피해가 반복되면서, 침수 발생 가능성을 사전에 예측하고 현장에서 신속하게 대응할 수 있는 기술의 중요성이 커지고 있다. 특히 도시침수 대응기술이 실제 재난관리 현장에서 활용되기 위해서는 예측 정확도와 기술적 완성도뿐만 아니라, 현장 적용성, 사용자 편의성 및 재난관리 담당자의 수용성을 함께 확보할 필요가 있다. 본 연구팀은 「AI 기반 도시침수 피해 위험도 예측 및 평가 실용화 기술개발」 과제를 수행하고 있으며 강우 추정·예측, 도시침수 예측, 피해 위험도 평가, 예·경보 및 재난대응 의사결정 지원에 이르는 일련의 기술을 하나의 플랫폼으로 연계·통합하는 것을 목표로 한다. 특히, 기존 도시침수 연구개발이 개별 예측기술의 정확도 향상과 시스템 구축에 중점을 두어 왔다면, 본 과제는 기술개발 전 과정에 AI 리빙랩 방식의 현장실증과 사용자 의견수렴 절차를 결합했다는 점에서 차별화된다. 지방정부 재난관리 담당자와 관련 실무자가 기술의 개발·검증 과정에 참여하여 실제 업무환경에서 필요한 기능과 개선사항을 제시하고, 이를 플랫폼에 지속적으로 반영함으로써 기술의 현장 적용성과 실용성을 높이고자 한다. 본 기사에서는 AI 기반 도시침수 예측·평가 플랫폼의 주요 기술 구성과 연계체계를 살펴보고, 리빙랩 기반 현장실증의 추진

방식과 그 과정에서 도출된 시사점을 중심으로 사용자 참여형 기술개발이 도시침수 재난대응의 실효성을 높이는 데 갖는 의미를 소개하고자 한다.

02 AI 기반 도시침수 대응 플랫폼 개요

본 플랫폼은 실시간 강우·지형·수위·유량·인구·시설 정보를 입력받아, ① AI 기반 강우 보정·예측, ② 물리모형-AI 연계 침수 모의, ③ 침수피해 위험도 평가, ④ 통합 예·경보 판단을 순차적으로 수행한다. 결과는 도시침수 위험도 지도, 예·경보 알림, 대피경로 및 대화형 재난대응 지원 정보로 제공된다. 개별 시스템에서 정보를 확인하던 기존 방식에서 벗어나 감시·위험판단·대피지원·복구계획에 필요한 정보를 경량 디지털트윈 플랫폼(PURGE)에서 통합 제공함으로써, 침수 발생 후 대응을 사전·선제 대응으로 전환하는 것이 핵심이다(그림 1).



그림 1. AI 기반 도시침수 대응 플랫폼의 개요도

03 핵심 기술 모듈 소개

3.1 AI 기반 정량적 강우 추정·예측(QPE/QPF)

레이더 강우와 지점 관측자료(AWS/ASOS) 간에는 관측 방식의 차이로 인한 시·공간적 오차가 존재한다. 정량적 강우 추정(QPE)은 랜덤포레스트 기반 AI가 레이더 패턴과 지상 관측값의 관계를 학습한 뒤, 관측값과 추정값의 잔차를 추가 보정하여 고해상도 강우 입력자료를 생산한다. 정량적 강우 예측(QPF)은 현재와 과거 QPE 자료에서 강우의 이동·발달·약화 특성을 학습하여 향후 10~180분의

강우분포를 생성한다. 검증 사례에서 QPE의 결정계수(R^2)는 최대 0.901로 나타나 기존 합성 레이더 자료보다 관측값과의 일치도가 개선되었다.

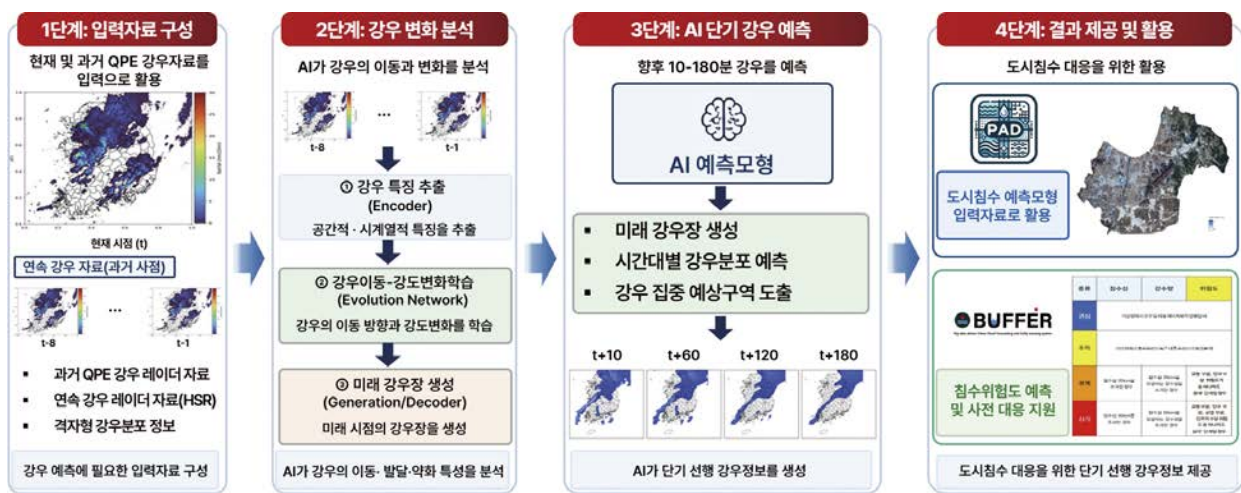


그림 2. AI 기반 정량적 강우예측 기술

3.2 AI 기반 도시침수 예측

지형자료(DEM)·토지이용도·강우자료를 입력으로 하는 물리모형의 침수지도를 AI 학습자료로 활용한다. 운영 단계에서는 현재까지의 관측강우와 향후 예측강우를 입력하여 최대 침수심과 침수범위 지도를 향후 3시간까지 10분 간격으로 생성한다. 군산시 검증결과, 물리모형 결과와 유사한 침수 양상이 신속하게 재현되었으며, 이를 통해 교통통제, 주민안내가 필요한 우선지역을 빠르게 선별할 수 있다.



그림 3. AI 기반 도시침수 예측 기술

3.3 침수피해 위험도평가 및 예·경보

침수피해 위험도 평가는 강우량·침수심과 재해영향지표(Impact Library)를 결합하여 보행·교통·시설 등 7개 분야의 영향을 관심·주의·경계·심각 단계로 등급화한다. 시설물 손상함수 기반 피해액 추정과 PEOPLES Framework 기반 재난회복력 평가를 함께 수행하여 피해 규모와 복구 우선순위 판단을 지원한다. 예·경보 모듈은 강우량, 침수심, 분야별 위험도를 100m 격자로 통일한 후 격자별 단계로 결정하고, 읍·면·동 내 최고단계를 최종 예·경보로 제시한다. 침수심 20cm와 50cm 등 단계별 판단기준은 현장조치 행동매뉴얼의 비상단계 및 대피지원 정보와 연계된다.

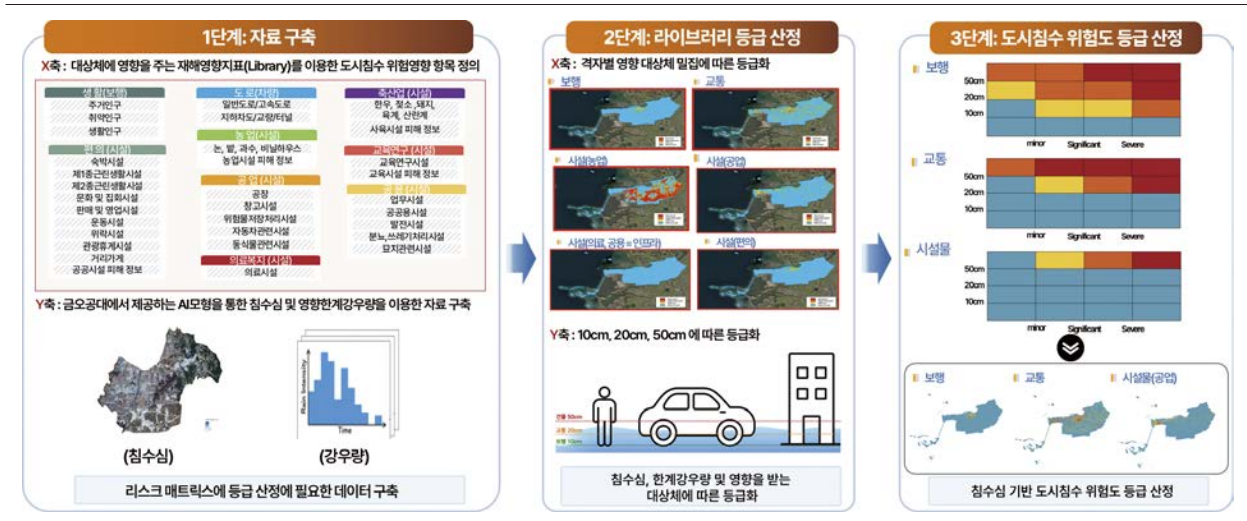


그림 4. AI 기반 도시침수 위험도 평가 기술

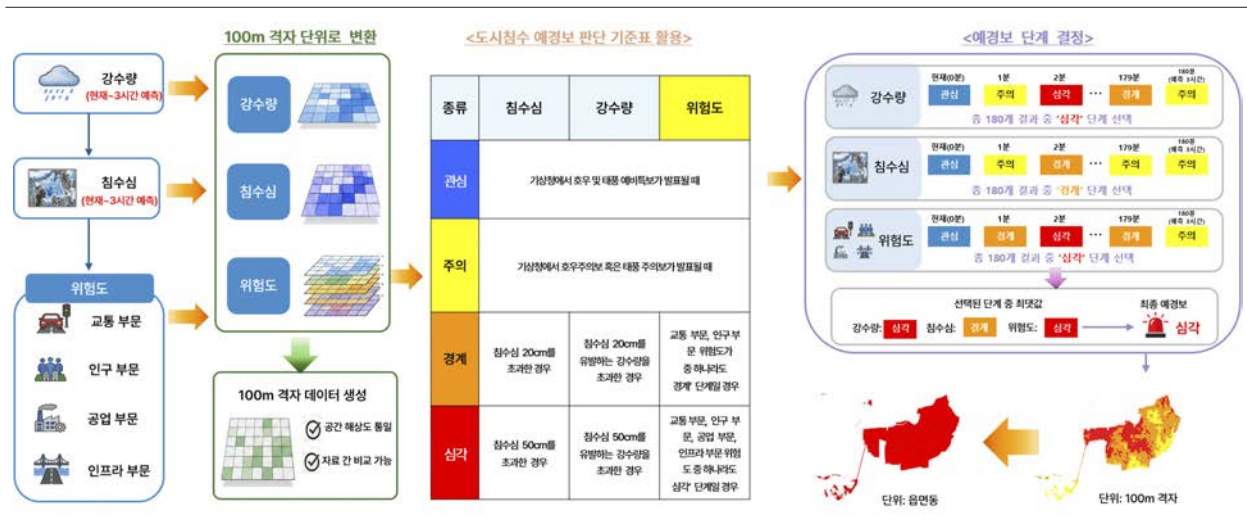


그림 5. 도시침수 피해 상황 예·경보 기술

3.4 재난대응 대화형 AI 에이전트와 통합 플랫폼

재난 담당자가 반복적으로 수행하는 실시간 기상정보 확인, 현장조치 매뉴얼 검토, 상황보고서 작성 업무를 지원하기 위해 대화형 AI 에이전트를 개발하였다. 에이전트는 사용자 질의의 의도를 분석한 뒤 기상청 API 조회와 현장조치 매뉴얼의 검색증강생성(RAG) 검색을 병렬로 수행하고, 근거가 포함된 대응 정보를 제공한다. 일일기상보고서 자동생성 기능은 기상특보·현재기온·기상전망, 조석 및 강우량 등 5개 데이터 소스를 실시간 수집·정규화하고, 공식 매뉴얼과 대규모 언어모델(LLM)을 활용해 행동방침을 작성한 뒤 DOCX·PDF·HWPX 형식으로 출력한다. 통합 플랫폼에서는 관측·예측·과거 침수위험지도·기반시설·위험도·예·경보·챗봇을 함께 제공하며, 결과 다운로드와 사용자 의견 등록도 지원한다.



그림 6. 재난대응 대화형 인공지능 에이전트 모듈 개요

04 AI 리빙랩 기반 현장실증

군산시는 2024년 7월 10일 1시간 강우량 131.7mm, 총 누적강우량 271mm, 3시간 최대 누적강우량 181mm의 집중호우로 학교·상가·공장 등에 약 493억원의 피해가 발생한 지역이다. 이러한 사례는 짧은 시간에 급격히 확대되는 침수위험을 사전에 파악하고 지역 여건에 맞게 대응할 필요성을 보여준다. 본 과제는 군산시를 연구대상지로 설정하고 지역 침수 현안 수렴 → 사용자 요구사항 도출 → 플랫폼 기능 시연 → 재난대응 담당자 교육 → 사용자 평가 → 기능 개선으로 이어지는 순환형 AI 리빙랩을 운영하였다. 리빙랩 과정에서는 상습침수지역과 배수시설 관리, 재난정보 제공, 대피지원 등 현장의 요구를 수렴하고, 시나리오 기반 침수분석, 과거 침수피해지역 표출, 인근 대피소 정보 제공, 예·경보와 행동매뉴얼 연계 등을 플랫폼 고도화 과제로 구체화하였다.

플랫폼 내 게시판은 사용자가 개선의견을 등록하면 관리자에게 자동으로 알림을 전달하도록 구성하여, 시연 이후에도 의견을 지속적으로 수렴할 수 있도록 하였다. 담당 공무원 대상 평가에서는 플랫폼 만족도 90.2점, 교육 만족도 90.3점으로 나타나 기술 이해도와 실무 활용 가능성을 함께 확인하였다. 리빙랩의 의미는 단순히 완성된 기술의 만족도를 조사하는 데 있지 않다. 현장 의견을 기능 요구사항, 데이터 표출방식, 예·경보 기준, 매뉴얼 연계 및 사용자 화면 개선에 반영하고, 수정된 기능을 다시 검증하는 환류구조를 구축하는 데 있다. 이는 기술을 개발한 뒤 일방적으로 보급하는 방식에서 벗어나, 지자체와 함께 개발·검증하면서 실제 재난대응 업무에 안착할 가능성을 높이는 접근이다.

05 정책 연계 방안 및 향후 계획

플랫폼의 실용화를 위해서는 첫째, 기상·수위·조위·시설자료의 안정적 연계와 갱신주기·품질관리 기준을 마련해야 한다. 둘째, 예·경보 단계와 지자체 현장조치 행동매뉴얼을 연결하여 단계별 담당부서, 전파방식, 현장점검 및 대피지원 절차를 구체화할 필요가 있다. 셋째, 실제 강우사례를 활용한 모형 성능 점검, 사용자 교육, 개선의견 반영을 정례화하여 기술 성능과 업무 적합성을 지속적으로 관리해야 한다. 향후에는 군산시 실증 결과를 바탕으로 다른 지자체에 적용하되, 지역별 강우·침수 특성, 기반시설, 인구·시설 분포 및 재난대응 체계를 반영한 맞춤형 검증이 필요하다. 이러한 운영체계는 지자체 도시침수 대응계획, 재난대응 매뉴얼 및 침수취약지역 사전관리와 연계될 수 있다.

06 결론

본 과제는 AI 기반 강우 추정·예측, 도시침수 예측, 위험도·회복력 평가, 예·경보, 대화형 의사결정 지원을 하나의 플랫폼으로 통합하고, AI 리빙랩을 통해 현장 수요 확인과 기능 개선을 반복한다는 점에서 의의가 있다. 플랫폼의 역할은 재난 담당자의 판단을 대신하는 것이 아니라, 침수위험지역과 대응시점을 빠르게 제시하고 그 근거를 제공하는 데 있다. 앞으로도 실제 강우사례와 지자체 업무환경을 바탕으로 현장실증과 사용자 환류를 지속하여, 신뢰할 수 있는 선제적 도시침수 대응도구로 고도화할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 2024년도 행정안전부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00398858)



도시침수 대응을 위한 대심도 빗물저류배수 시설의 구축 확대와 예방적 유지관리



이강훈

가톨릭대학교
에너지환경공학과
부교수

diasyong@catholic.ac.kr

01 서론

최근 기후변화로 인해 강우의 시·공간적 변동성이 증가하고, 과거의 강우 관측자료만으로는 설명하기 어려운 국지성 집중호우와 돌발강우가 빈번하게 발생하고 있다. 짧은 시간에 강우가 집중되는 극한호우는 기존 확률강우량과 설계빈도를 기준으로 구축된 하수관로, 빗물펌프장 및 저류시설의 처리용량을 초과할 수 있다. 2022년 8월 서울지역에서는 동작구에 시간당 141 mm, 강남구에 시간당 116 mm에 달하는 극한강우가 발생하였으며, 이를 계기로 기존의 사후복구 중심 치수정책을 사전예방 중심으로 전환해야 한다는 필요성이 더욱 커지고 있다. 서울특별시는 이후 주요 지역의 방재성능목표를 상향하고 대심도 빗물배수터널, 빗물펌프장, 저류조 및 하수관로 정비 등을 연계한 도시침수 대응정책을 추진하고 있다.

도시지역은 도로, 건축물 및 포장면과 같은 불투수면의 비율이 높아 강우가 토양으로 침투하지 못하고 빠르게 지표유출로 전환된다. 이에 따라 강우 발생 후 짧은 시간 안에 하수관로로 유입되는 유량이 급격히 증가하고, 관로의 통수능력을 초과하거나 하류 하천의 수위 상승으로 방류가 제한되면 관로 내 수위가 상승하면서 지표면 침수가 발생할 수 있다. 또한 빗물받이 막힘, 관로 내 퇴적, 관로의 붕괴·파손·변형, 연결관 돌출, 이음부 단차와 이탈, 펌프장 기능저하 등도 배수성능을 감소시키는 주요 원인으로 작용한다. 도시침수는 단순히 강우량만으로 결정되는 현상이 아니라 강우특성, 토지이용, 지형, 관로상태, 저류시설의 잔여용량, 펌프 운전상태 및 방류수역의 수위가 복합적으로 작용하여 발생하는 도시 물순환 문제이다.

이러한 도시침수 문제에 대응하기 위해서는 기존 하수관로의 정비와 증설뿐

아니라, 강우 유출수를 일시적으로 저류하거나 침수취약지역 외부로 이송할 수 있는 대규모 방재시설이 필요하다. 그러나 고밀도 도시지역에서는 지상부 공간 확보, 지하 매설물, 교통통제, 공사비 및 민원 등의 제약으로 인해 기존 관로를 대규모로 확장하는 데 한계가 있다. 이에 따라 지하 40~50 m 내외의 깊은 공간에 대규모 터널을 설치하여 집중호우 시 유출수를 일시 저장하거나 하류 수역으로 이송하는 대심도 빗물저류배수시설이 주요 구조적 대책으로 도입되고 있다. 서울특별시는 대심도 빗물배수터널을 지하 깊은 공간에 설치된 대규모 터널을 통해 폭우 시 빗물을 저장하고 이후 하천으로 방류하는 시설로 정의하고 있다.

국가의 도시침수 대응정책도 개별 시설 중심에서 유역 단위의 통합관리 방향으로 변화하고 있다. 「도시하천유역 침수피해방지대책법」, 이른바 도시침수방지법은 기후변화와 도시화에 따른 대규모 홍수에 대응하고 도시하천 유역의 침수피해를 방지하기 위해 2024년 3월 15일부터 시행되었다. 동 법령은 하수와 하천을 각각의 법률에 따라 개별적으로 정비하던 기존 방식에서 벗어나 하수도, 하천, 저류시설, 수로터널 및 기타 침수방지시설을 통합적으로 계획하고 관리할 수 있는 제도적 기반을 마련하였다. 시행령에서는 수로터널을 침수방지시설의 세부 범위에 포함하고 있어, 대심도 빗물저류배수터널의 계획·운영·사후관리가 국가 도시침수 대응체계의 주요 구성요소임을 명확히 하고 있다.

도시 침수방지법은 과거 최대강우량과 기후변화의 영향을 고려하여

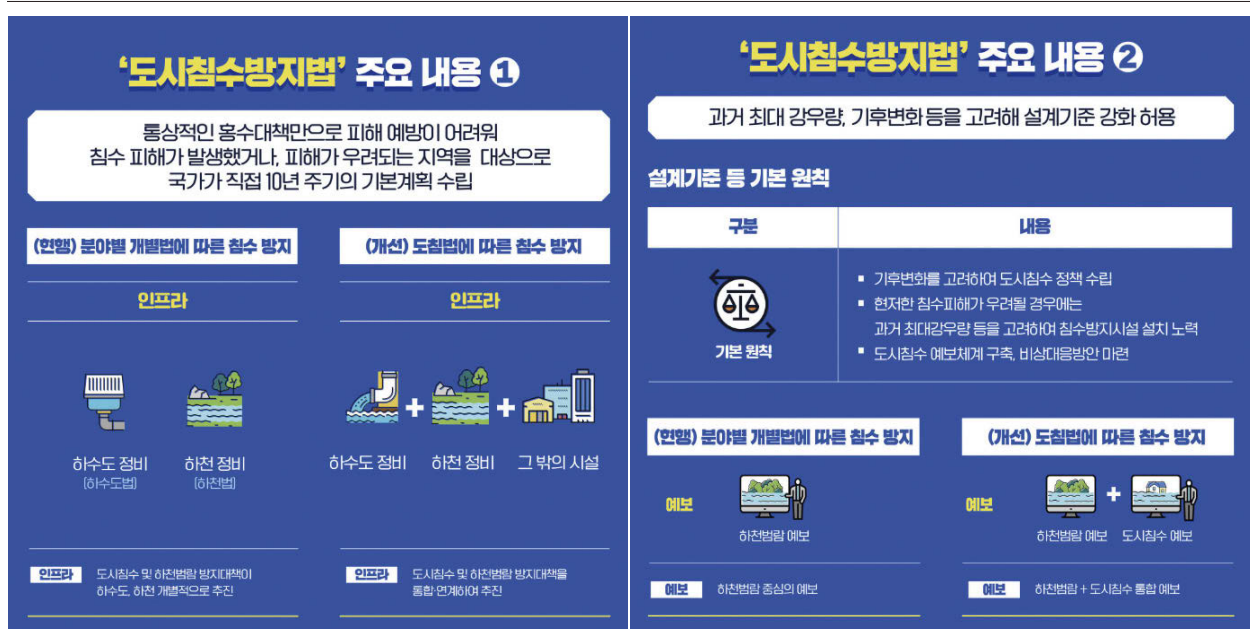


그림 1. 도시침수방지법에 따른 도시침수 대응체계의 전환

자료: 환경부(2023), 「도시침수피해를 막기 위해 국가의 역할을 강화하겠습니다」

침수방지시설의 설계기준을 강화할 수 있도록 하고, 하천범람뿐 아니라 도시지역의 침수위험을 사전에 예측하는 도시침수예보의 법적 근거를 마련하였다. 2026년 6월 19일부터는 서울 강남역과 신대방역 일대를 포함한 6개 자치구를 대상으로 법 시행 이후 최초의 도시침수예보가 실시되었다. 도시침수예보는 강우량, 하수도 수위, 도시하천 수위, 펌프장 정보 및 지형공간정보를 통합하여 예상 침수시간과 침수범위를 분석하고, 위험이 예상될 경우 지방자치단체·경찰·소방의 현장 대응과 대국민 안전안내문자를 연계하는 체계이다. 이는 도시침수 관리가 단순한 시설 설치와 사후복구 중심에서 벗어나 위험예측, 상황전파 및 선제적 대응을 포함하는 통합적 관리체계로 전환되고 있음을 보여준다.

도시침수예보와 비상대응체계가 고도화되더라도 실제 강우 유출수를 안정적으로 수집·저류·배제할 수 있는 시설의 기능이 확보되지 않으면 침수피해를 근본적으로 저감하기 어렵다. 대심도 빗물저류배수시설은 평상시보다 집중호우 시 기능의 중요성이 급격히 높아지는 방재시설로서, 계획된 저류·배수성능을 필요한 시점에 안정적으로 발휘해야 한다. 따라서 대심도 터널의 설치 확대와 함께 터널 구조물, 수직구, 수문, 스크린, 펌프, 전기설비 및 계측설비의 상태를 체계적으로 점검하고, 시설별 중요도와 위험도를 고려하여 유지보수 우선순위를 결정할 수 있는 관리체계가 필요하다.

본 원고에서는 도시침수의 발생 특성과 도시 우수배제시스템의 구성을 검토하고, 신월 빗물저류배수시설을 중심으로 대심도 터널의 기능과 국내 구축 확대 방향을 살펴보았다. 또한 대심도 빗물저류배수시설의 안정적인 기능 유지를 위해 요구되는 유지관리 특성을 분석하고, 인벤토리 구축, 상태평가, 잔존수명 및 위험도 평가, 서비스 수준 설정과 중장기 투자계획을 포함하는 자산관리체계의 적용 방향을 제시하고자 한다.

02 도시 우수배제 시스템과 대심도 빗물저류배수시설

도시의 우수배제시스템은 강우 시 지표면에서 발생한 유출수를 빗물받이와 집수정으로 수집하고, 하수관로와 저류시설을 통해 이송·조절한 후 하천 또는 바다로 최종 방류하는 일련의 시설체계로 구성된다. 유역 상류에서는 산지와 도심 경계에서 발생한 빗물과 유출수를 집수하여 하류로 이송하고, 중류에서는 저류조와 같은 시설을 이용하여 침투유출량을 일시적으로 저장하거나 분산한다. 하류에서는 확대된 하수관로, 우수지 및 빗물펌프장을 통해 집수된 빗물을 하천이나 바다로 배제한다. 자연방류가 가능한 경우에는 중력에 의해 우수를 배출하지만, 하천 수위가 높거나 지형적으로 자연방류가 어려운 지역에서는 펌프를 이용한 강제배수가 필요하다.

강우 발생 초기에는 빗물이 지표면의 경사를 따라 빗물받이와 집수정으로 이동한 후 하수관로로 유입된다. 그러나 도시화로 불투수면적이 증가하면 침투량이 감소하고 지표유출량과 유출속도가 증가한다. 강우 유출량이 하수관로의 통수능력을 초과하면 관로 내 수위와 압력이 상승하고, 저지대에서는 맨홀이나 빗물받이를 통해 우수가 역류할 수 있다. 특히 상류에서 유출수가 집중되는 저지대, 하류 하천의 수위가 높아 배수가 제한되는 지역, 관로 단면이 부족하거나 퇴적물이 많은 구간은 침수위험이 상대적으로 높다. 지하철도, 지하철역, 지하상가 및 반지하 주택과 같이 지표보다 낮은 공간은 소량의 유입수도 대규모 인명·재산 피해로 이어질 수 있으므로 시설적 대책과 예·경보, 교통통제 및 주민대피를 함께 고려해야 한다.

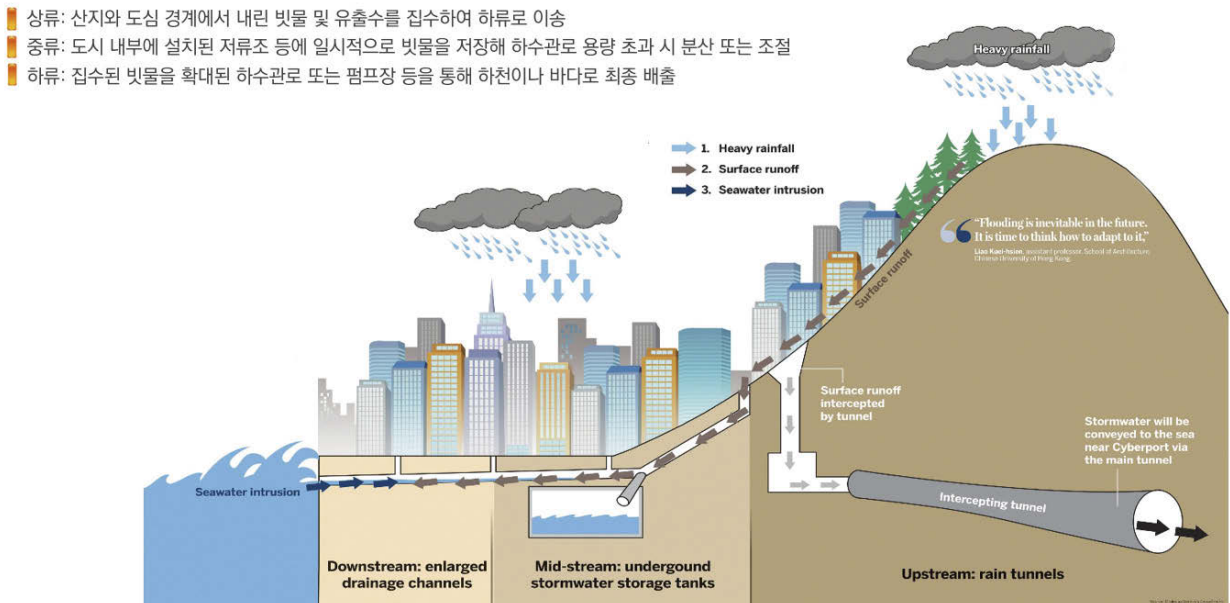


그림 2. 도시 우수배제시스템의 구성

기존 하수관로의 통수능력을 초과하는 유출수가 발생할 경우에는 우수를 일시적으로 저장하거나 유역 외부 또는 하류로 우회시키는 시설이 필요하다. 지상 저류조는 침투유출량을 저감하고 하수관로로 유입되는 유량을 시간적으로 분산할 수 있으나, 토지이용도가 높은 도심에서는 대규모 부지 확보가 어렵다. 도심도 빗물저류배수시설은 지하 깊은 공간을 활용하므로 지상부 토지이용에 미치는 영향을 줄이면서 대규모 저류·이송 용량을 확보할 수 있다는 장점이 있다.

도심도 빗물저류배수시설은 기능에 따라 저류형, 배수형 또는 저류·배수

복합형으로 구분할 수 있다. 저류형 시설은 강우 시 유출수를 터널 내부에 일시 저장한 후 강우 종료 후 펌핑하여 배제하는 방식이고, 배수형 시설은 상습침수지역의 유출수를 수직구로 유입시킨 뒤 하류 하천이나 우수지까지 직접 이송하는 방식이다. 저류·배수 복합형은 초기에는 터널 내부에 우수를 저장하고 저류용량이 일정 수준 이상 도달하면 수두차 또는 펌프를 이용해 하류로 이송한다. 실제 시설에서는 강우강도, 유입수문 개방조건, 터널 수위, 하류 수위 및 펌프 운전상태를 종합적으로 고려하여 저류와 배수 기능을 조절해야 한다.

대심도 터널이 계획된 성능을 발휘하기 위해서는 지표면과 기존 하수관로에서 유입수직구까지 유출수가 원활하게 도달해야 하며, 유입수문의 개폐, 스크린의 통수성, 터널의 잔여 저류용량, 펌프의 운전 가능 상태 및 하류 방류조건이 동시에 확보되어야 한다. 대심도 터널 자체의 규모가 충분하더라도 유입부의 통수능력이 부족하거나 스크린이 협잡물로 막히면 계획된 유량이 터널로 유입되지 못한다. 반대로 터널에 충분한 우수가 유입되더라도 펌프 또는 전력설비의 고장으로 적시에 배수하지 못하면 다음 강우에 사용할 수 있는 저류용량이 감소한다. 따라서 대심도 터널은 독립된 단일 시설이 아니라 하수관로, 저류시설, 펌프장, 하천 및 예·경보시스템과 연계하여 운영해야 하는 도시 우수배제시스템의 핵심 구성요소이다.

03

신월 빗물저류배수 시설과 국내 대심도 터널 확대

신월 빗물저류배수시설은 서울특별시 양천구 신월동과 강서구 화곡동 일대의 반복적인 침수피해를 저감하기 위해 구축된 국내 최초의 대규모 대심도 빗물저류배수시설이다. 신월동과 화곡동 일대는 분지형 저지대와 주택 밀집지역이 포함되어 있고 기존 하수관로의 배수능력이 제한되어 집중호우 시 침수피해가 반복적으로 발생하였다. 2010년 9월에는 시간당 93 mm, 일 최대 302 mm의 집중호우로 약 6,000세대가 침수피해를 입었으며, 이를 계기로 기존 관로 정비와 함께 대규모 지하 저류배수시설이 추진되었다.

신월 빗물저류배수시설은 지하 약 50 m에 설치된 저류배수터널과 유도수로터널, 유입·유출수직구, 저지·고지수직구, 환기수직구, 유지관리수직구, 수문, 스크린 및 펌프설비 등으로 구성된다. 전체 터널 연장은 약 4.7 km이며, 저류배수터널의 주요 직경은 약 10 m, 유도수로터널의 직경은 약 5.5 m이다. 집중호우 시 신월동과 화곡동 일대의 유출수는 유입수직구를 통해 저류배수터널로 유입되고, 터널 내부에 일시 저장되거나 목동빗물펌프장 방향으로 이송된 후 안양천으로 최종 방류된다.

시설의 최대 저류용량은 약 32만 m^3 이며, 30년 빈도와 시간당 100 mm 수준의 집중호우에 대응하도록 계획되었다. 최대 처리용량은 분당 약 12,360톤으로

제시되어 있으며, 저류용량을 초과하는 유입수는 유입구와 유출구 사이의 수두차를 이용하여 목동빗물펌프장 유수지로 이송된 후 안양천으로 배제될 수 있다. 저류배수터널의 직경은 수리모형실험 결과를 반영해 기존 계획보다 확대되었으며, 이에 따라 저류용량도 18.2만 m³에서 32만 m³로 증가하였다.

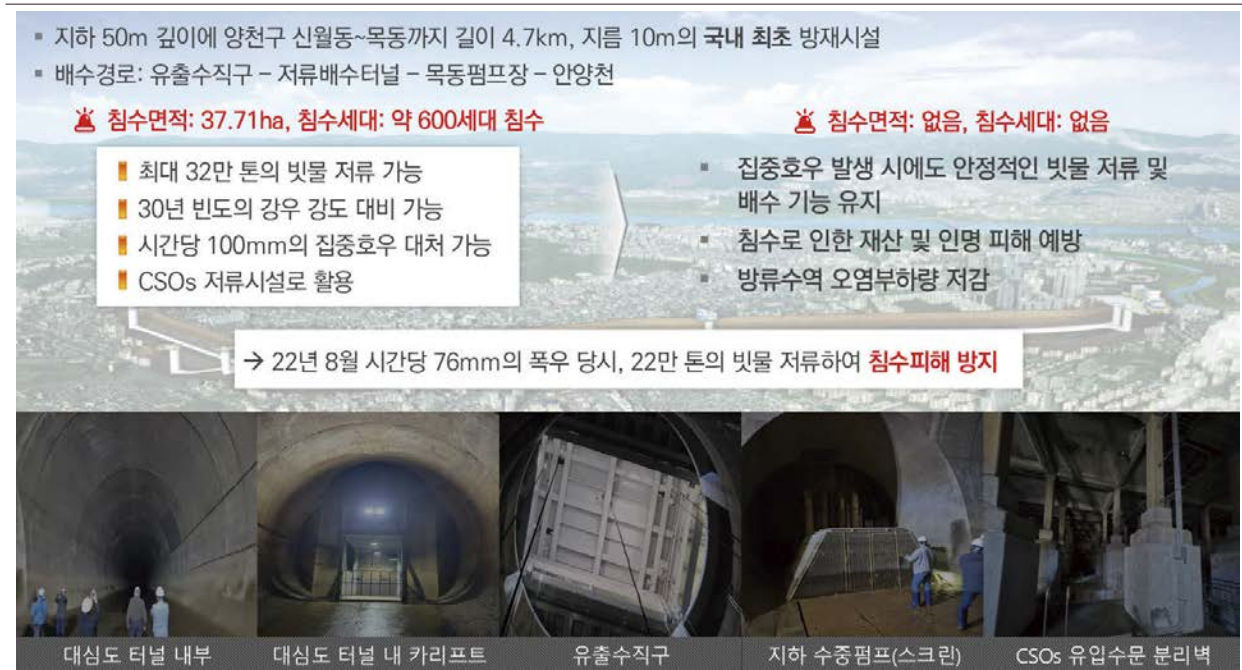


그림 3. 신월 빗물저류배수시설의 구성과 주요 시설

신월 빗물저류배수시설은 대심도 터널의 실질적인 침수저감 효과를 보여주는 대표적인 사례이다. 2022년 8월 호우 당시 신월 시설은 약 17만 톤의 빗물을 저류하였으며, 시설이 없는 조건을 가정한 모의분석에서는 약 37 ha의 면적과 600세대가 침수될 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 2020년 운영 이후 2022년 8월까지 강우 시 총 33회의 수문 가동이 이루어졌으며, 해당 기간 중 역류현상은 보고되지 않았다.

신월 시설은 도시침수 방지뿐 아니라 합류식 하수관로 월류수의 일시 저류를 통한 수질오염 저감 기능도 수행할 수 있다. 합류식 하수관로에서는 강우 초기 도로와 관로에 축적된 오염물질이 우수와 함께 고농도로 유출될 수 있다. 초기우수를 터널에 일시 저장한 후 하수처리 또는 관리된 방류조건과 연계하면 하천으로 직접 유입되는 부유물질과 유기물 등의 오염부하를 완화할 수 있다. 따라서 대심도 빗물저류배수시설은 도시침수 저감과 수환경 보호를 동시에 지원하는 다기능 도시물관리 기반시설로 활용될 수 있다.

설계와 시공 단계에서부터 운영·유지관리·성능개선·폐기에 이르는 전 생애주기를 고려해야 한다. 특히 집중호우 시 시설의 일부가 기능을 상실하면 저류·배수능력이 급격히 감소하여 대규모 침수피해로 이어질 수 있으므로, 시설 설치 확대와 유지관리 기술 개발이 병행되어야 한다.

04 대심도 빗물저류 배수시설의 유지관리 특성과 문제점

대심도 빗물저류배수시설은 터널 구조물뿐 아니라 수직구, 수문, 스크린, 펌프, 배관, 전기설비, 계측설비, 환기설비 및 제어시스템 등 다양한 자산으로 구성된 복합 기반시설이다. 각각의 자산은 고유한 열화특성과 고장형태를 가지지만, 전체 시설의 침수방지 기능은 개별 자산의 상호연계에 의해 결정된다. 예를 들어 유입수문이 정상적으로 개방되지 않으면 터널의 저류용량이 충분하더라도 유출수가 유입되지 못하며, 펌프 또는 전력설비가 고장 나면 강우 종료 후 터널에 저장된 우수를 배출하지 못하여 후속 강우에 대비한 저류용량을 확보하기 어렵다.

대심도 터널은 평상시보다 집중호우 시 시설의 중요도가 급격히 증가하는 간헐적 운전시설이다. 평상시 운전빈도가 낮다는 이유로 시설의 열화가 크지 않을 것으로 판단할 수 있으나, 장기간 정지상태가 지속되면 수문과 밸브의 고착, 펌프 부품의 열화, 전기·계측설비의 접촉 불량 및 센서 오차가 발생할 수 있다. 이러한 이상은 평상시에는 드러나지 않다가 실제 강우 운전 시점에 기능고장으로 나타날 수 있으므로 정기적인 동작시험과 상태기반 점검이 필요하다.

강우 시에는 우수뿐 아니라 토사, 나뭇가지, 플라스틱류 및 도로 표면의 오염물질이 함께 유입될 수 있다. 협잡물은 유입구와 스크린을 막아 유량을 감소시키고, 토사는 터널 바닥에 퇴적되어 유효 저류용량과 통수단면을 감소시킬 수 있다. 펌프에 고형물이 유입되면 임펠러 마모, 진동 증가, 효율 저하 및 과부하 운전이 발생할 수 있다. 따라서 강우 전후 스크린과 유입부 점검, 터널 내부 퇴적량 조사 및 펌프 운전상태 확인이 필요하다.

대심도 시설의 내부는 높은 습도, 잔류수, 제한된 환기 및 부식성 물질에 노출될 수 있다. 합류식 하수관로 월류수가 유입되는 경우 유기물 분해에 의해 황화수소가 발생할 수 있으며, 염화물과 산성물질은 금속설비와 콘크리트 구조물의 열화를 촉진할 수 있다. 펌프와 배관의 금속재료는 부식, 국부손상 및 표면 피막의 열화에 노출될 수 있고, 콘크리트 구조물은 균열, 누수, 박리, 철근부식 및 화학적 침식의 영향을 받을 수 있다. 이에 따라 대심도 시설의 상태평가는 구조적 안전성뿐 아니라 수질, 대기환경, 퇴적, 부식 및 기계·전기설비의 기능을 함께 고려해야 한다.

현재 유지관리는 주로 육안검사, 동작검사, 계측값 확인 및 정기점검을 중심으로 수행되고 있다. 이러한 방법은 현재의 이상 유무를 확인하는 데 유효하지만,

운영자의 경험에 의존하여 상태를 판단하거나 점검 결과가 문서와 개별 파일에 분산되는 경우 시설별 상태변화와 고장이력을 장기적으로 분석하기 어렵다. 또한 정기점검 시점 사이에 발생하는 상태변화를 실시간으로 파악하기 어렵고, 유지보수가 고장 발생 이후에 이루어지는 사후대응형 관리로 이어질 가능성이 있다.

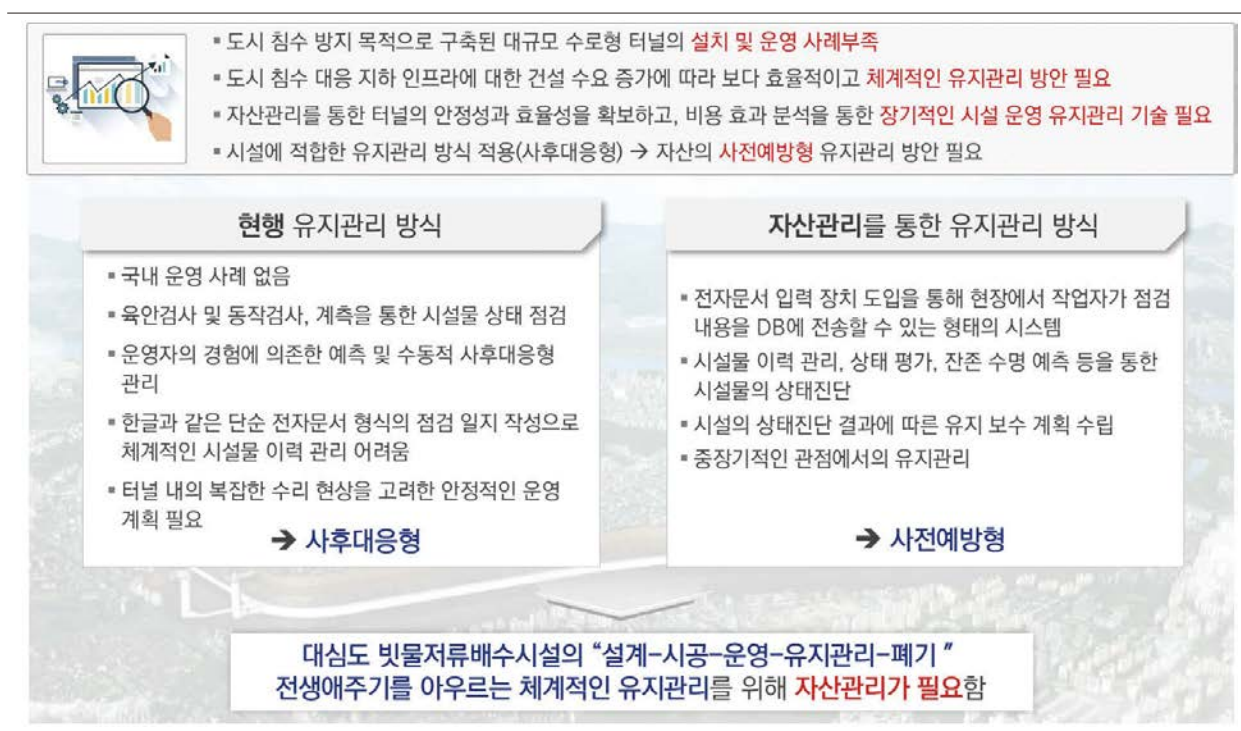


그림 5. 대심도 빗물저류배수시설 유지관리 패러다임의 전환

「지속가능한 기반시설 관리 기본법」은 기반시설의 계획, 설계, 건설, 운영, 유지관리, 성능개선, 해체 및 처분에 이르는 전 생애주기에서 발생하는 총비용을 생애주기비용으로 정의하고 있다. 또한 시설의 안전성, 사용성 및 내구성을 종합적으로 고려한 선제적 관리를 통해 노후화에 따른 생애주기비용을 최소화하도록 규정하고 있다. 이는 대심도 터널의 유지관리도 단기적인 보수와 고장 대응에서 벗어나 장기적인 시설상태, 위험도, 서비스 수준 및 재정계획을 연계해야 함을 의미한다.

환경부는 공공하수도 시설의 체계적인 관리를 위해 시설별 자산목록 구축, 상태평가, 유지관리 이력관리 및 중장기 투자계획 수립을 포함하는 자산관리체계의 도입을 추진하고 있으며, 2022년에는 「공공하수도 자산관리체계 구축 업무매뉴얼」을 마련하였다. 공공하수도 자산관리는 시설의 위치, 규격, 설치연도 및 내용연수와 같은 기본정보뿐 아니라 점검결과, 상태등급, 고장이력 및 유지보수

이력을 지속적으로 축적하고, 이를 바탕으로 시설별 유지관리 우선순위와 개량시점을 결정하는 것을 목적으로 한다.

대심도 빗물저류배수시설은 일반적인 공공하수도 시설보다 규모가 크고 접근성이 낮으며, 집중호우 시 일부 시설의 기능상실이 도시침수 피해로 직접 연결될 수 있다는 특성이 있다. 따라서 일반 공공하수도의 자산관리 절차를 기반으로 하되, 대심도 터널의 구조적 특성, 수리학적 기능, 유입수의 환경적 특성 및 간헐적 운전조건을 반영한 별도의 상태평가 기준과 유지관리 의사결정체계를 마련할 필요가 있다.

05 대심도 터널 자산 관리체계 구축

대심도 빗물저류배수시설의 자산관리는 인벤토리 DB 구축, 상태평가, 잔존수명 예측 및 가치평가, 서비스 수준 설정, 위험도 평가 및 개량수요 예측, 최적투자계획 수립, 재정수지 분석의 단계로 구성할 수 있다. 각 단계는 독립적으로 수행되는 것이 아니라 이전 단계의 결과를 다음 단계의 입력자료로 활용하는 연속적인 의사결정체계로 구축되어야 한다.

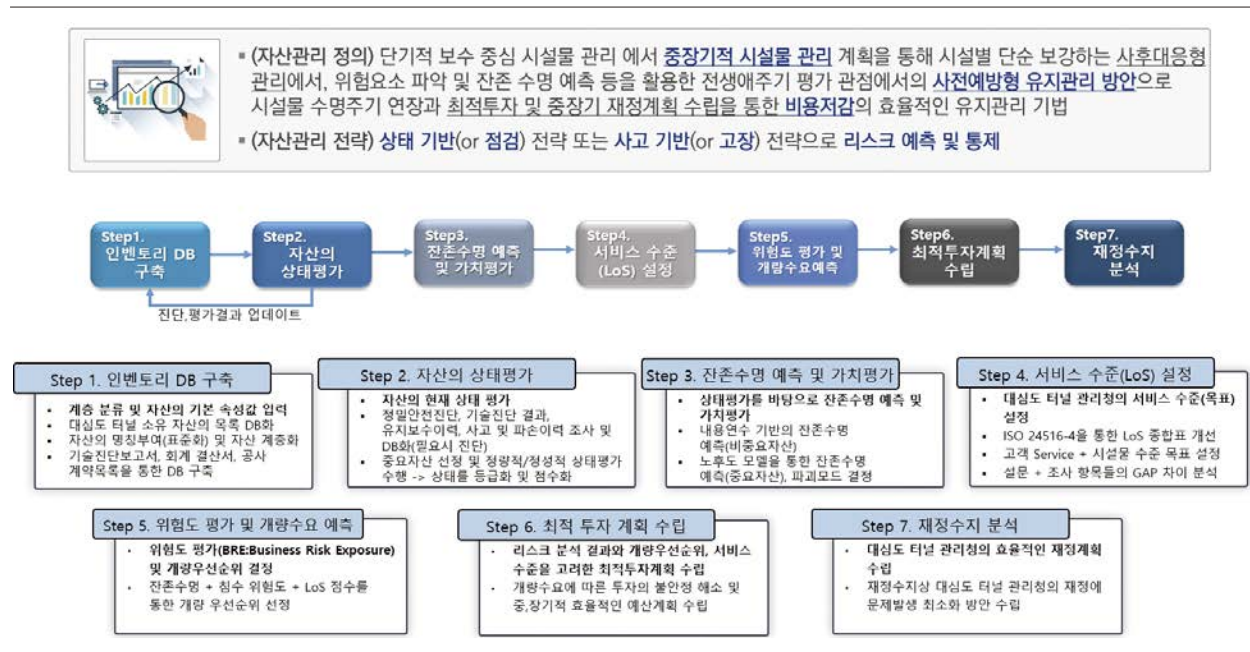


그림 6. 대심도 빗물저류배수시설의 자산관리 구축 절차

5.1 인벤토리 DB 구축

인벤토리 DB 구축은 관리대상 시설의 위치, 형식, 규격, 재질, 설치연도, 설계성능, 내용연수 및 유지보수 이력을 체계적으로 정리하는 단계이다. 대심도 시설은 터널-수직구-기계설비-전기설비-계측설비와 같이 기능과 공간을 기준으로 계층화할 수

있다. 각각의 자산에는 표준화된 관리번호를 부여하고, 준공도서, 기술진단보고서, 설비대장, 공사계약자료 및 유지보수 이력을 관리번호와 연계해야 한다.

자산 계층구조는 관리 목적에 따라 시설, 구조물, 설비 및 부품 수준으로 구분할 수 있다. 예를 들어 목동펌프장을 상위 시설로 설정하고, 그 하위에 펌프설비, 전동기, 배관, 밸브, 제어반 및 계측센서를 배치할 수 있다. 펌프설비는 다시 펌프 본체, 임펠러, 축, 베어링 및 밀봉장치로 세분화할 수 있다. 이러한 계층구조는 특정 부품의 이상이 상위 설비와 전체 시설의 기능에 미치는 영향을 분석하는 기반이 된다.

인벤토리 DB에는 정적 정보와 동적 정보를 함께 연계해야 한다. 정적 정보는 자산의 규격, 위치, 설치연도 및 재질과 같이 비교적 변하지 않는 정보이며, 동적 정보는 점검결과, 상태등급, 고장이력, 유지보수 이력, 센서값 및 운전시간과 같이 지속적으로 갱신되는 정보이다. 자산코드를 기준으로 정적·동적 정보를 연계하면 특정 설비의 과거 상태변화와 현재 운전상태를 동시에 확인할 수 있다.

5.2 자산 상태평가

대심도 터널 구조물의 상태평가를 위해서는 균열, 누수, 박리, 백태, 철근노출, 단면손실 및 변형 등의 손상유형을 구분하고, 손상의 위치·범위·심각도를 일정한 기준에 따라 기록해야 한다. 특히 동일 위치에서 반복적으로 발생하거나 확대되는 균열과 누수는 구조물의 장기적인 내구성과 사용성에 영향을 줄 수 있으므로 이전 점검결과와 비교하여 진행 여부를 확인할 필요가 있다.

구조물 점검결과는 터널 구간, 수직구 및 시설별 관리번호에 따라 정리하고, 손상 위치도, 현장사진, 손상규모, 상태등급 및 보수이력을 함께 관리해야 한다. 동일 구간의 점검결과를 시계열적으로 비교하면 손상의 발생과 진행경향을 파악할 수 있으며, 상태변화가 크거나 안전성과 기능에 미치는 영향이 큰 구간을 우선적인 정밀조사 및 보수대상으로 선정할 수 있다.

또한 구조물 상태평가 결과는 기계·전기설비의 기능상태와 함께 검토해야 한다. 터널 내부의 누수와 높은 습도는 전기설비 및 금속부품의 열화를 촉진할 수 있고, 퇴적물의 증가는 통수단면과 저류용량을 감소시킬 수 있다. 따라서 구조물, 기계설비, 전기설비 및 시설의 수리학적 기능을 종합적으로 고려한 상태평가가 필요하다.

5.3 잔존수명 예측과 가치평가

잔존수명은 자산이 최소 요구성능을 유지할 수 있는 남은 기간을 의미한다. 상태평가 이력이 충분한 경우에는 시간에 따른 상태등급 변화를 회귀모델이나

확률모델로 분석하여 자산이 한계상태에 도달하는 시점을 예측할 수 있다. 상태평가 이력이 부족한 비핵심자산은 법정 내용연수와 제조사의 권고수명을 적용할 수 있으나, 핵심자산은 현장 운전자료, 고장이력 및 실험자료를 이용한 별도의 열화모델을 구축하는 것이 바람직하다.

터널 구조물과 금속설비의 열화특성을 분석하기 위해서는 현장조사와 실내 촉진열화실험을 연계할 수 있다. 대심도 시설에서 예상되는 고습도, 산성물질, 염화물 및 산화성 물질 등의 환경을 모사하고, 재료의 강도, 질량변화, 표면손상, 부식생성물 및 전기화학적 특성을 평가할 수 있다. 실험에서 도출된 열화속도와 현장 상태평가 결과를 교차검증하면 단순 내용연수보다 시설 특성을 반영한 잔존수명 예측이 가능하다.

자산 가치평가는 자산의 재조달가액, 감가상각, 잔존수명 및 기능적 중요도를 종합하여 수행할 수 있다. 단순한 회계가치뿐 아니라 자산 고장으로 인한 침수피해, 서비스 중단 및 긴급복구비용을 고려하면 방재시설의 실질적인 가치를 보다 합리적으로 평가할 수 있다.

5.4 서비스 수준 설정

서비스 수준은 관리기관이 이용자와 사회에 제공하고자 하는 시설의 성능목표를 의미한다. 대심도 터널의 서비스 수준은 단순한 구조물 상태뿐 아니라 침수방지 기능, 펌프 가동 신뢰성, 비상대응시간, 저류용량 확보율, 퇴적관리, 악취·대기환경, 수질오염 저감 및 시민안전 등을 포함해야 한다.

서비스 수준은 현재 수준과 목표 수준으로 구분하여 설정할 수 있다. 현재 수준은 점검결과, 운전자료, 민원 및 사고이력을 통해 평가하고, 목표 수준은 법적 기준, 시설의 설계목표, 관리기관의 정책 및 이해관계자의 요구를 반영하여 설정한다. 현재 수준과 목표 수준의 차이가 큰 항목은 우선적인 개선대상으로 선정할 수 있다. 관리기관, 운영자, 설계자, 외부 전문가 및 시민의 요구를 함께 반영하면 기술적 안전성과 사회적 수용성을 균형 있게 고려할 수 있다.

5.5 위험도 평가와 개량수요 예측

위험도는 일반적으로 고장 가능성(Probability of Failure)과 고장 결과(Consequence of Failure)를 결합하여 평가한다. 고장 가능성은 상태등급, 사용연수, 고장이력, 운전시간 및 열화환경을 이용해 산정할 수 있으며, 고장 결과는 침수방지 기능의 저하, 인명·재산피해 가능성, 환경영향, 복구비용 및 서비스 중단기간을 고려하여 평가할 수 있다.

동일한 상태등급의 자산이라도 고장결과가 크면 높은 유지관리 우선순위를 부여해야 한다. 예를 들어 예비설비가 없는 핵심 펌프나 주전력 공급설비는 상태가 비교적 양호하더라도 고장 시 전체 배수기능에 미치는 영향이 크므로 지속적인 모니터링이 필요하다. 반면 고장 시 영향이 제한적이고 쉽게 교체할 수 있는 부품은 상태가 다소 저하되더라도 계획정비 시점까지 사용할 수 있다.

개량수요는 기술진단 결과, 목표 서비스 수준, 잔존수명, 위험도 및 자산의 중요도를 종합하여 산정한다. 이를 통해 어느 자산을 언제 보수·보강·교체해야 하는지 결정하고, 연도별 개량수요와 필요한 예산을 예측할 수 있다.

5.6 최적투자계획과 재정수지 분석

최적투자계획은 제한된 예산 내에서 위험을 효과적으로 줄이고 목표 서비스 수준을 유지하기 위한 유지관리 대안과 시행시점을 결정하는 과정이다. 자산별로 무조치, 점검 강화, 보수, 보강 및 교체 등의 대안을 설정하고, 각 대안에 필요한 비용과 상태개선 효과를 비교할 수 있다. 생애주기비용 분석을 적용하면 초기 보수비용뿐 아니라 향후 점검비, 운영비, 고장복구비 및 교체비를 함께 고려할 수 있다.

개별 자산의 최적 시점을 단순히 합산하면 특정 연도에 교체수요가 집중될 수 있다. 따라서 시설 전체의 연도별 예산과 위험도를 고려하여 사업시기를 분산하고, 위험도가 높은 자산을 우선적으로 개선하는 중장기 투자계획이 필요하다. 재정수지 분석은 향후 발생할 유지관리비, 성능개선비 및 교체비를 예측하고 관리기관의 예산 확보 가능성과 비교함으로써 시설의 지속가능한 운영을 지원한다.

06 맺음말

기후변화에 따른 국지성 집중호우와 극한강우의 증가는 기존 도시 우수배제시스템의 한계를 확대하고 있다. 도시침수 피해를 줄이기 위해서는 하수관로, 빗물펌프장, 저류시설, 하천 및 예·경보체계를 유역 단위에서 통합적으로 운영해야 한다. 도시침수방지법의 시행과 최초 도시침수예보의 도입은 국내 도시침수 관리가 시설별·사후대응 중심에서 통합적·예방적 관리로 전환되고 있음을 보여준다.

대심도 빗물저류배수시설은 고밀도 도시지역에서 대규모 저류·배수용량을 확보할 수 있는 핵심 방재시설이다. 신월 빗물저류배수시설은 실제 집중호우에서 침수피해를 저감한 대표적인 사례이며, 서울특별시는 강남역, 도림천, 광화문, 사당역, 한강로 및 길동 일대로 대심도 시설을 확대하고 있다. 그러나 대심도 터널의 확대는 장기간 관리해야 할 고비용 공공자산의 증가를 의미하므로, 시설 설치와

함께 운영·유지관리 기술의 고도화가 필요하다.

대심도 터널의 안정적인 기능 유지를 위해서는 자산 인벤토리, 상태평가, 잔존수명, 서비스 수준, 위험도, 최적투자계획 및 재정수지 분석을 연계한 자산관리체계가 요구된다. 또한 터널 수위와 펌프 상태를 실시간으로 모니터링하고 AI를 이용하여 미래 상태를 예측하면, 고장 발생 이후 대응하는 방식에서 벗어나 이상 징후를 사전에 인지하고 대응하는 예방적 운영이 가능하다. 구조물 영상진단, BIM, SLAM, 실시간 센서, AI 예측 및 자산관리시스템의 통합은 대심도 시설의 물리적 상태와 운영상태를 함께 관리할 수 있는 기반을 제공한다.

향후 신월 시설에서 축적되는 운영·점검·보수자료를 지속적으로 분석하고 신규 대심도 터널에 표준화된 자산관리체계를 적용한다면, 시설의 신뢰성과 수명을 향상하고 유지관리비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 나아가 대심도 시설의 최적 기능을 안정적으로 확보함으로써 극한강우에 대한 도시의 회복력을 높이고, 도시침수로 인한 인명과 재산 피해를 최소화하는 데 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 관계부처 합동. (2021). 제1차 국가물관리기본계획(2021~2030).
- 환경부. (2022). 공공하수도 자산관리체계 구축 업무매뉴얼.
- 환경부. (2023). 도시침수방지법 주요 내용.
- 국가법령정보센터. (2024). 도시하천유역 침수피해방지대책법 및 같은 법 시행령.
- 국가법령정보센터. (2026). 지속가능한 기반시설 관리 기본법.
- 기후에너지환경부. (2026). '도시침수방지법' 시행 후 첫 도시침수예보 개시.
- 서울특별시. (2018). 신월빗물저류배수시설 임시사용 시작.
- 서울특별시. (2022). 신월 빗물저류배수시설의 집중호우 운영성과 설명자료.
- 서울특별시. (2026a). 서울시 풍수해대책.
- 서울특별시. (2026b). 강남역·도림천·광화문 일대 대심도 빗물배수터널 건설사업.
- 서울특별시. (2026c). 사후복구에서 예방 중심 치수정책으로의 전환 및 대심도 빗물배수터널 추진현황.
- Chang, S. (2016). Bracing up for the big flood. China Daily, Hong Kong Edition, 2016. 12. 29, p. 9.



지하방수로 통수능력 향상 및 설계 고도화 실험 연구



최성욱

한국건설기술연구원
수자원하천연구본부
수석연구원
csu1220@kict.re.kr



이동섭

한국건설기술연구원
수자원하천연구본부
연구위원
dsrhee@kict.re.kr

01 서론

우리나라에서는 2020년부터 집중호우 발생이 잦아지며 도시침수에 대한 관심이 커지고 있다. 2022년에는 서울 동작구에서 시간당 141.5 mm 강수가 발생하거나, 2024년에도 전북 군산시에 시간당 146 mm 강수가 발생하는 등 500년 빈도에 가까운 강수가 발생하기도 한다. 홍수에 의한 침수 피해는 제내지에 발생한 강수가 하천으로 충분히 유출되지 않아 잠기게 되는 내수침수와 하천 수위가 제방고보다 높거나 제방이 붕괴되어 하천수가 제내지로 유입되는 외수범람으로 구분된다. 홍수로 인한 인명피해와 재산피해가 빈번해지는 상황에서 새로운 침수방지 대책이 요구되고 있다. 이미 개발된 도시에서 침수 대응능력 강화를 위해 우수관로 및 하천의 치수능력을 증대시키는 것은 한계가 있으므로, 그 대안으로 30 m 이상 깊이 공간을 활용하는 대심도 지하방수로의 활용이 주목받고 있다. 대심도 지하방수로의 경우 일반적인 토지 이용에 지장이 없는 한계심도에서 건설되어 토지보상 비용을 제외시켜 적은 개발비로 우수를 대량으로 배제할 수 있어 서울에서는 신월 빗물저류배수시설 준공 후 강남역, 광화문, 도림천에 대심도 지하방수로 건설을 추진하고 있다. 그 외에도 기후에너지환경부 주관으로 부산 온천천 등 침수피해가 잦은 지역에 대해 대심도 지하방수를 추진하고 있으며, 앞으로 대심도 지하방수로의 수요가 커질 것으로 예상된다. 대심도 지하방수로 유입구는 일반적으로 지하방수로에 물을 보내는 접근수로, 대심도로 물을 보내기 위한 수심 미터 깊이의 수직구, 접근수로와 수직구를 연결하는 연결수로로 구성되어, 수직구와 연결수로 제원에 따라 지하방수로에 유입되는 유량의 효율이 달라진다. 국내외에서 지하방수로 유입부의 수리특성에 관한 다양한 연구가 수행되어 왔으나, 보다 다양한 조건에

적용할 수 있는 설계기술의 고도화를 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 본 기사에서는 한국건설기술연구원이 기후에너지환경부의 지원을 받아 수행하고 있는 「도시침수대응 지하 인프라 통수능력 향상 및 설계 고도화 기술 개발」 연구과제 중 지하방수로의 통·배수능력 향상 및 설계 고도화와 관련된 내용을 일부 소개하고자 한다. 현재 연구가 진행 중인 점을 고려하여 대심도 지하방수로에서 발생하는 주요 흐름 현상을 설명하고, 현재까지 수행한 실험 및 수치모의 결과의 일부를 소개하고자 한다.

02 지하방수로 유입구 설계기술 고도화

유입구에서 수십 미터 아래의 대심도 지하방수로로 물을 안전하게 유도하기 위해서는 와류 유입구(vortex intake) 형상을 적용하는 것이 유리하다. 와류 유입구는 낙하 흐름에 회전운동을 유도하는 구조로, 물이 벽면을 따라 낙하하면서 지속적인 벽면 마찰이 발생하고 와류 중심에는 공기를 배출할 수 있는 공기핵(air core)이 형성된다. 와류 유입구 형태는 소용돌이식(scroll), 나선식(spiral), 접선식(tangential) 등이 있고, 이 중 접선식 유입구가 가장 많이 연구 및 설계에 활용되고 있다. 접선식 유입구는 연결수로가 수직구로 가면서 폭이 점차 작아지는 급경사수로 형태로, 연결수로의 한쪽 벽은 수직구 벽면의 접선인 구조다(그림 1).

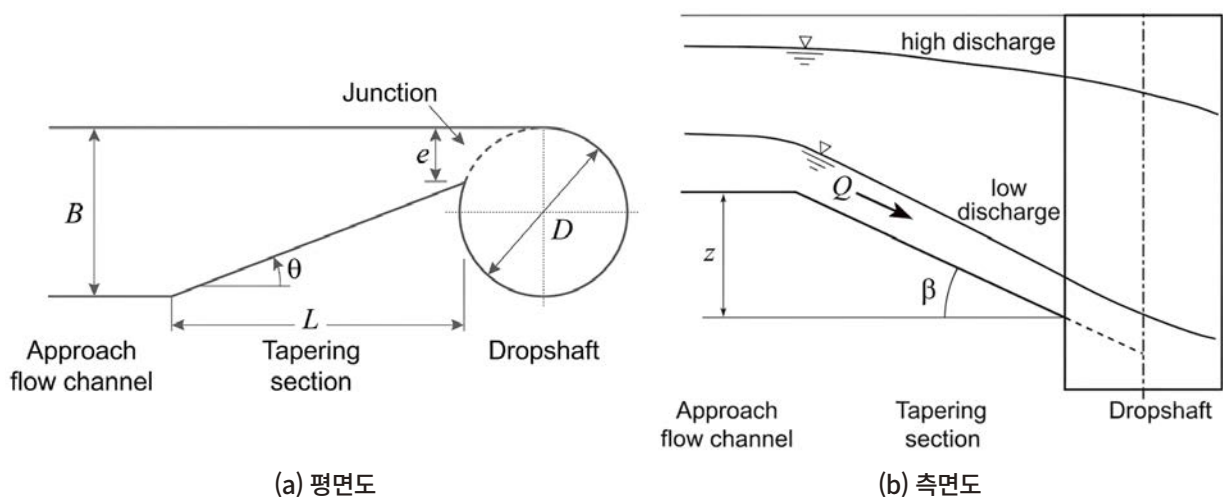


그림 1. 대심도 지하방수로 접선식 유입구 형상

접선식 유입구에서는 접근수로에서 연결수로로 유입된 물이 연결수로 구간에서 급경사수로와 점축수로의 특성에 의해 흐름의 가속과 저항을 모두 크게 받는다. 유량과 연결수로 제원에 따라 연결수로에 유입된 물은 사류 상태를 유지하거나 사각 도수(oblique jump) 또는 급경사면 도수(inclined jump)를 발생시킬 수

있다. 접선식 유입구는 연결수로에서 수직구로 유출될 때 강한 관성력에 의해 원형 벽면을 따라 흐르며 원심력을 받게 되고, 중력가속도의 영향으로 인해 하강 속도가 가속된다. 원심력과 중력에 의해 수직구 내 흐름은 연결수로 근처에서 두꺼워진 후, 아래로 내려가면서 얇아지게 된다. 유입 유량 증가에 따라 수직구 내 흐름 두께가 증가하고 그만큼 중앙 공기핵의 면적이 좁아진다. 공기핵의 면적이 0이 되면 지하방수로 수직구에 안정적으로 물을 공급하는데 문제가 발생함은 물론 수직구 압력 증가로 인한 연결수로 부분 수위 상승을 예상할 수 있으므로, 공기핵이



그림 2. 지하방수로 유입구 실내수로 실험

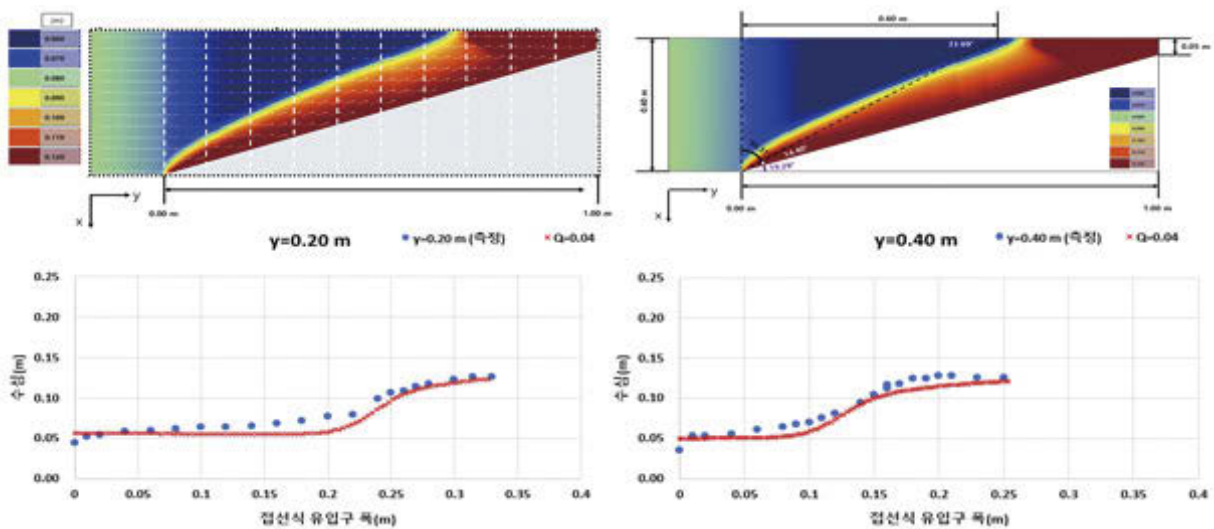


그림 3. 접선식 유입구 연결수로 구간의 수위 분포 실험 및 수치모의

소멸하지 않는 최대 유량을 최대 유입 유량으로 설정할 필요가 있다. Jain(1984)은 설계 시 수직구 단면적 대비 공기핵 면적이 0.25 이상이 되도록 유량을 설정할 것을 권장하고 있으며, 공기핵 단면적에 대한 관계식을 제시하였다. 그 외에도 Yu와 Lee(2009)는 한계점 이동 유량(control shift discharge, Q_c)과 자유 배수 유량(free drainage discharge, Q_f)을 정의하여 연결수로 내부 흐름 특성과 최대 유입 유량에 대하여 수리학적 이론에 기반한 관계식을 개발하고 실험으로 검증을 수행하였다. 한국건설기술연구원에서는 기존 연구에서 충분히 검토하지 못한 실험조건을 보완하여 보다 범용적으로 적용할 수 있는 유량 특성에 대한 관계식을 제시하고자 한다. 그 외에도 유입구 제원과 유량에 따른 수직구 공기핵 두께 변화나 연결수로에서 사각도수, 급경사면 도수가 발생할 때 흐름 특성을 검토하고 있다. 이를 위해 한국건설기술연구원에서는 지하방수로 유입구 실험수로를 제작하고 다양한 흐름 제원을 변화시키며 실험을 수행하고 있다. 1회의 실험에서 연결수로와 수직구에서 각 흐름특성을 측정할 수 있도록 실험 절차를 설계하여 실험 결과를 기록하고 있다. 실험결과는 2차원 수치모형과 OpenFOAM을 이용하여 수치모의를 통해 검증 자료로 사용되어 차후 수치모형을 이용한 상세한 평균흐름 및 난류량 등을 검토할 계획이다.

03

환기수직구 구조 및 위치에 따른 수격 현상 완화 및 배수 터널 흐름 안정화

대심도 지하방수로로는 크게 유입구, 본선 터널, 환기수직구, 유출구로 구성된다. 유입구에서 본선 터널에 유입된 물은 큰 낙차로 인해 빠른 흐름으로 하류에 흐르게 된다. 이때 유입구와 본선 터널 연결지점에는 감세지를 설치하여 낙차에 의한 충격 감소 및 도수를 통한 에너지 감소를 유도한다. 본선 터널을 따라 흐르는 물이 본선 터널 하류단에 도달하면 흐름 차단에 의해 수위와 정수압이 빠르게 증가하고, 이에 따라 상류 방향으로 역전파가 발생한다. 역전파가 본선 터널 상류단에 충돌한 이후 본선 터널은 점차 수위가 증가하고 만관 상태가 되며, 최종적으로 유출구의 수위에 따라 유입구측 수직구의 수위가 상승한 상태에서 정상상태(steady state)에 도달한다. 유입구에서 물이 본선 터널에 유입될 때 수면에서 공기를 연행하게 되므로 본선 터널 내에서는 공기를 포함한 흐름이 발생하게 된다. 공기를 배출하지 못하게 되면 관 내에 거대한 공기주머니가 생성되어 본선 터널의 안전성에 큰 문제를 일으킬 수 있으므로, 본선 터널에 환기수직구를 건설하여 공기가 배출되도록 한다. 상류단에 도달하는 역전파의 크기는 본선 터널과 유출구의 제원과 유량에 따라 달라지며, 유출구에 조압수조를 설치함으로써 이를 완화할 수 있다. 한국건설기술연구원에서는 본선 터널 내에서 환기수직구와 조압수조 설치에 따른 저류시간, 역전파 특성, 감세지와 터널에서의 압력 변화 특성을 검토하였다. 이를

위해 지하방수로 전체 실험수로를 제작하여 실험을 수행하였다. 다양한 실험 조건을 검토하기 위해 본선 터널을 모듈화하여 환기수직구를 자유롭게 설치·분리할 수 있도록 하였고, 본선 터널 직경 및 감세지의 크기를 변화시키며 실험을 수행하고 있다.



그림 4. 지하방수로 본선 터널 흐름 실험

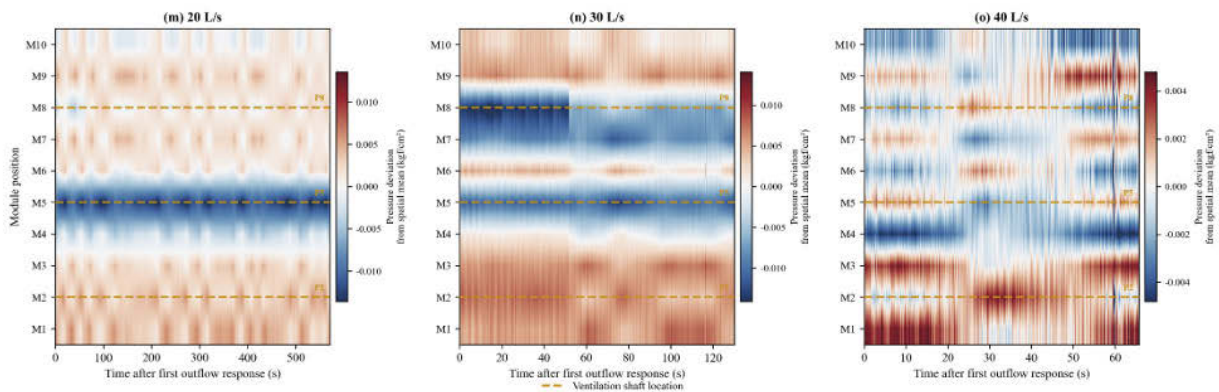


그림 5. 시간 경과에 따른 수로 위치 및 유량별 상대 압력 분포

04 맺음말

최근 기후변화로 인해 기존 설계기준을 넘어서는 집중호우가 빈번하게 발생하면서 도시침수에 대한 보다 적극적인 대응이 요구되고 있다. 특히 이미 고밀도로 개발된 도시지역에서는 기존 우수관로나 하천의 치수능력을 확대하는데 한계가 있어, 대규모 우수를 신속하게 배제할 수 있는 대심도 지하방수로의 활용이 더욱 중요해질 것으로 예상된다. 이와 함께 지하방수로가 계획된

성능을 충분히 발휘하기 위해서는 시설 규모뿐만 아니라 유입부터 배수에 이르는 과정에서 발생하는 다양한 수리현상을 고려한 설계기술이 필요하다. 한국건설기술연구원에서는 이러한 지하방수로의 통·배수능력을 높이고 보다 안정적인 설계가 가능하도록 유입구와 본선 터널을 대상으로 다양한 연구를 수행하고 있다. 유입구에서는 접선식 유입구의 연결수로와 수직구에서 발생하는 흐름 특성, 공기핵 형성 및 최대 유입 유량 등을 실험과 수치모의를 통해 검토하고 있으며, 이를 바탕으로 다양한 시설 제원에 적용할 수 있는 설계기술을 마련하고자 한다. 또한 본선 터널에서는 빠른 수위 상승과 역전파, 공기 연행 등으로 발생할 수 있는 불안정한 흐름을 대상으로 환기수직구와 조압수조의 영향을 검토하고 있으며, 실제 지하방수로의 흐름을 재현할 수 있는 실험시설을 활용하여 관련 자료를 축적하고 있다. 앞으로 다양한 유량과 시설 제원에 대한 실험 및 수치모의 결과를 지속적으로 축적하고 분석하여 지하방수로의 주요 수리현상을 보다 명확하게 규명하고, 이를 실제 설계에 활용할 수 있는 기술로 발전시킬 예정이다. 이러한 연구가 향후 국내 대심도 지하방수로의 계획과 설계 과정에서 통수능력과 수리적 안정성을 함께 확보하고, 도시침수 대응능력을 높이는 데 활용될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

이 연구는 기후에너지환경부 도시홍수시설의 계획, 운영, 유지관리 최적화 기술개발사업(RS-2024-00397821)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Jain, S.C. (1984). Tangential vortex-inlet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(12), 1693-1699, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:12\(1693\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1693))
- Yu, D. and Lee, J.H.W. (2009). Hydraulics of tangential vortex intake for urban drainage. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(3), 164-174, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2009\)135:3\(164\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:3(164))