



디지털 트윈과 시로 구현하는 차세대 댐 안전관리 체계

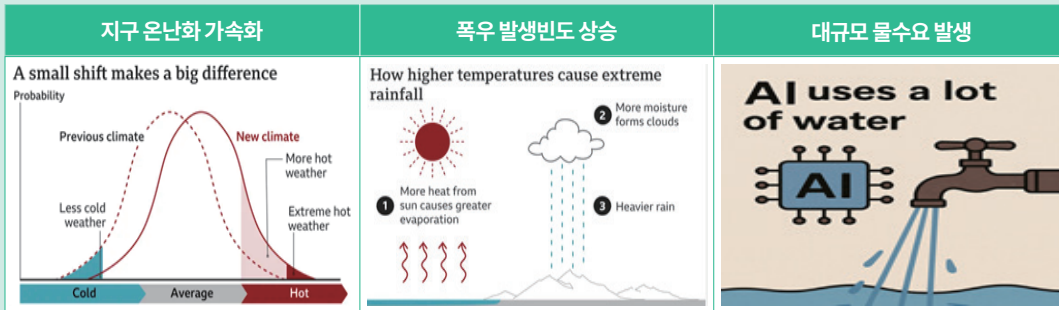


이상의 댐안전관리센터장
K-water 수자원시설처

1. 추진배경

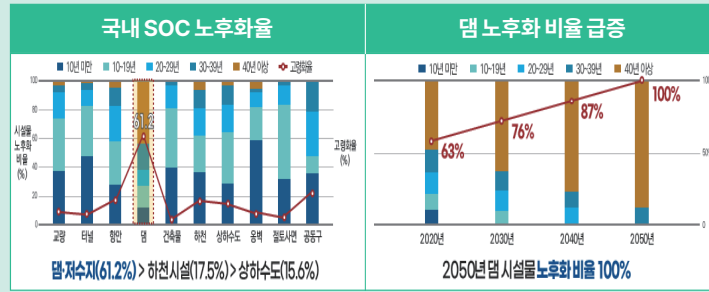
1.1. 극심한 기후변화 및 첨단산업 대규모 물수요 발생

최근 기후변화가 가속화되면서, 댐을 포함한 수자원 관리체계는 새로운 도전에 직면하고 있다. 국지성 집중호우, 장기 가뭄, 계절 별 수문 불균형 등 극한기상 현상이 일상화되면서 댐 운영의 불확실성이 크게 확대되고 있다. 이러한 환경 변화는 홍수기와 갈수기의 수위 조절 범위를 더욱 복잡하게 만들고, 기존의 예측 기반보다 한층 더 정밀한 대응체계를 요구하고 있다. 한편, 반도체·AI 등 첨단산업의 급속한 성장으로 인해 대규모 물공급 수요가 빠르게 증가하고 있다. 이에 따라 각 댐의 용수 운영은 점점 더 고수위 조건으로 전환되고 있으며, 운영의 안정성과 구조적 신뢰도 확보가 그 어느 때보다 중요해졌다.



1.2 댐 시설물 노후도 비율 증가

SOC(Social Overhead Capital) 시설의 경우 30년 이상 된 시설의 비율이 갈수록 증가하고 있으며, 특히 댐·저수지 시설의 경우 특성상 노후화 비율은 타 시설 대비 높은 수준이다. 이러한 댐 노후화 비율은 급격히 증가하여 2050년에는 국내 모든 댐이 30년 이상의 노후 댐이 된다. 일반적으로 댐은 절대 무너지지 않는다고 여겨지지만, `02년 장현댐, `17년 미국 오로빌 댐, `19년 브라질 브루마지뉴 댐 사례에서 알 수 있듯이 댐도 노후화, 환경 변화 등에 따라 상시 붕괴 위험에 노출될 수 있는 인공 구조물이다. 최근 극한기상 현상과 더불어 댐 시설 노후화는 상시 사고위험을 가중할 수 있는 중요 요소이며, 댐 사고는 대형 재난으로 재산피해뿐만 아니라 대규모 인명피해로 이어질 수 있으므로 꼼꼼한 댐 시설관리를 통해 사전에 재난을 예방해야 한다.



1.3 기존 댐 관리방식 한계 도래

앞서 말한 극심한 기후변화, 시설 노후화 등 여건 속에서 기존의 댐 관리방식은 명확한 한계가 있어 안전을 담보하기에는 부족한 실정이다. 우선, 기존의 댐 관리방식의 경우 인력 위주의 주기적인 댐 안전점검 방식으로 오결측 등 점검 자료에 대한 신뢰도가 떨어지고, 인력 직접 점검에 대한 안전사고가 우려된다. 또한, 댐 설계도서, 준공 도면 등 대부분 자료가 아날로그 형식으로 보존되어 있어 자료관리 및 공유가 어려우며 데이터 분석 또한 인력이 직접 수행하므로 분석에 오랜 시간이 소요된다는 단점이 존재한다.



1.4 AI 디지털 패러다임 대전환

더욱이 전 세계적으로 AX:DX 패러다임 대전환이 일어나고 있으며, 우리나라는 `20년 한국판 뉴딜에 디지털 뉴딜을 포함하여 발표하였으며, `23년에는 디지털 플랫폼 정부 로드맵을 제시하였다. 또한 `25년에는 AI 기본법을 제정하였으며, AI 3대 강국 도약 선언 등 정부에서도 국가 핵심 아젠다(Agenda)로 선정하여 적극적으로 추진하고 있다. 이러한 시대적 흐름에 발맞춰 댐 안전관리 또한 새로운 패러다임으로의 전환이 필요하다.



[AI 기본법 제정, AI 3대 강국 도약 선언]

2. 스마트 댐 안전관리 사업

2.1 추진경과 & 사업개요

먼저, “스마트 댐 안전관리” 사업은 ‘20년 한국판 뉴딜정책에 선정되어 추진 되었다. 이후 ‘21년 본격적인 사업을 개시하여 스마트 댐 안전관리 기본계획을 수립하였고, 댐 안전관리센터를 개소하였다. 또한, 핵심사업 중 하나인 드론기반 댐 점검체계를 처음 도입하였다. ‘22년부터는 전 댐에 실시간 스마트 모니터링 체계를 도입하여 GPS 및 경사계 기반으로 댐체 변형에 대한 실시간 감시 체계를 구축하였으며, 섬진강댐에 디지털 트윈을 시범적으로 적용하였다. ‘23년은 국내 최초 수로터널 점검용 ROV 제작에 착수하였으며, 섬진강댐에 시범 구축한 디지털 트윈을 소양강댐과 남강댐에 확대하여 구축하였다. ‘24년은 실시간 댐 누수감시를 위해 콘크리트댐에는 열화상 카메라를, 필댐에는 전기비저항 장비를 설치하여 누수감시 체계를 구축하였고, 수로터널 점검용 ROV 제작을 완료하였다. 마지막으로 ‘25년에는 전 댐에 디지털 트윈을 구축하여 D/T 기반의 스마트 댐 안전관리 플랫폼을 정식으로 론칭하였다.

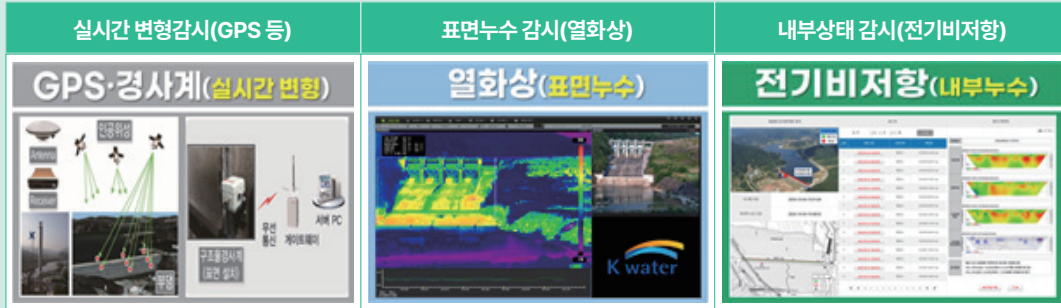


아래 모식도는 스마트 댐 안전관리 사업의 주요 내용을 모식화한 그림이다.



2.2 실시간 스마트 모니터링

실시간 스마트 모니터링은 기존의 광파기를 활용하여 댐의 변위를 점검하던것과, 인력이 직접 육안으로 댐 누수를 확인하던 점검체계에서 GPS, 경사계를 활용하여 지표상 위치 측정을 통해 실시간으로 댐의 변형을 감시하고, 콘크리트댐에는 열화상 카메라, 필댐에는 전기비저항 장비를 설치하여 실시간으로 댐의 누수를 감시하는 체계를 구축하였다. 이를 통해 실시간으로 데이터의 확인이 가능해졌으며 트렌드 분석을 통해 모니터링 체계를 강화하여 관리할 수 있게 되었다.



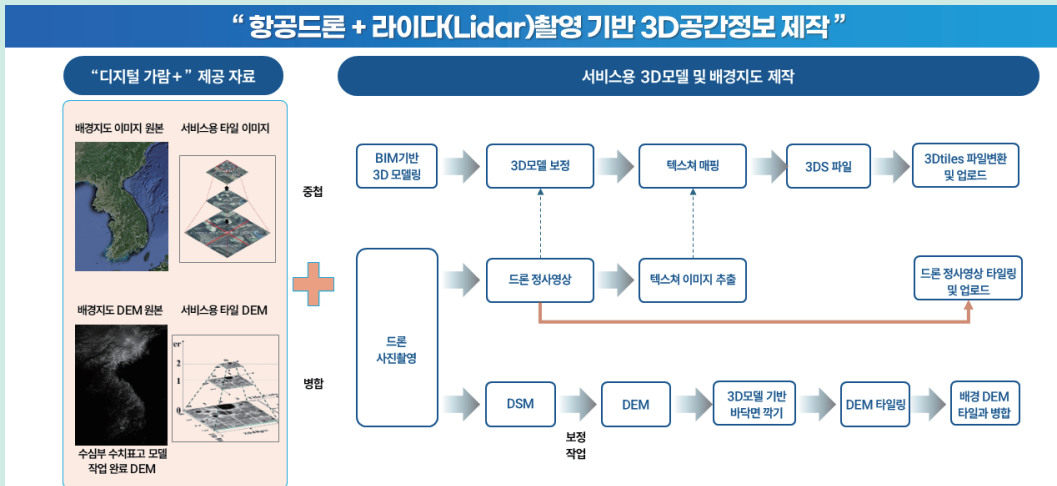
2.3 드론기반 안전점검 체계

다음은 드론기반 안전점검 체계 구축이다. 기존에는 인력 위주로 댐 시설물 점검·관리를 하였으나 이는 점검의 시각지대 발생, 고소작업, 수중작업 등에 따른 점검자의 안전사고 문제 등 다양한 단점이 있다. 이를 보완하고자 인력 위주의 고소작업에는 항공드론을 투입하여 점검하며, 드론의 점검 경로를 자동으로 설정해주는 기능을 자체 개발하여 초보자도 쉽게 점검할 수 있도록 구축하였다. 또한, AI 기반의 시설물 손상 검출 시스템을 개발하여 드론으로 찍은 영상을 자동으로 분석하여 손상 부위를 찾아내고 조사 결과 보고서까지 생성할 수 있도록 개발하였다. 수중구조물의 경우 수중 ROV를 도입하여 잠수사를 대체할 수 있도록 하였으며, 국내 최초로 무단수 수로터널 점검이 가능한 수로터널 점검용 ROV를 자체 개발하여 운영하고 있다.



2.4 스마트 댐 안전관리 시스템

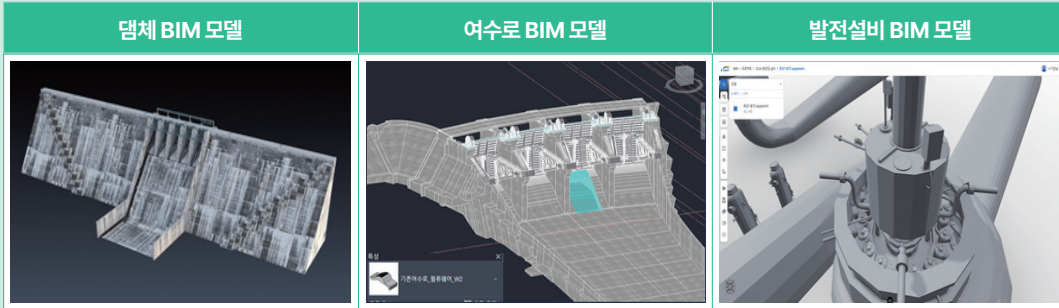
마지막으로 스마트 댐 안전관리 시스템은 댐 안전관리에 필요한 다양한 기능들을 탑재하고 있는 플랫폼이며, 사용자 편의를 고려하여 개발되었다. 이는 디지털 트윈 기반으로 가상세계에 실제와 똑같은 환경을 조성하여 현장에 직접 가지 않더라도 댐 시설관에 많은 도움을 받을 수 있다. 주요 기능으로는 3D 정밀 BIM, 지능형 영상감시 시스템, 파노라마 뷰 등이 탑재되어 있으며, 지진 및 고수위 상황에서의 댐 안전성 분석이나 방류 시 구조물 영향 분석을 위한 기능도 활용할 수 있도록 구성되었다. 이와 같이 예측부터 분석, 대응까지 통합하여 운영할 수 있는 댐 안전관리 혁신 플랫폼이다.



3. 시스템 주요기능 소개

3.1 3D BIM

3D BIM(Bulding Information Modeling)은 댐의 전 생애주기 정보를 3D 기반의 디지털 모델로 구축하여 댐 시설관리 업무의 체계화, 표준화 및 효율화를 추진하기 위하여 구축되었다. 모델의 이름, 준공연도, 비용 등 다양한 정보를 포함하고 있는 3D 디지털 모델을 가상공간에 구축함으로써 시설 및 안전관리에 활용할 수 있다. 스마트 댐 안전관리 플랫폼에서는 오픈소스 기반의 Speckle을 활용하여 Web 기반 BIM을 구축하였다.



3.2 아날로그 디지털화

아날로그 디지털화는 기존 댐 준공 도면, 설계보고서 등 아날로그 형태의 자료들을 디지털화하여 한글파일 또는 CAD 도면으로 변환하여 댐 관리자의 업무 편의를 개선하는 작업을 말한다. 또한, 과거 보고서 등 자주 쓰이는 외국어를 모두 한글로 변환하는 작업까지 포함한다. 작업은 댐 지사를 통해 아날로그 자료를 수집한 뒤, 문자 인식(OCR) 기술을 활용하여 문구를 추출하고 이를 편집이 가능하도록 전산화하고 번역한다. 이 과정을 통해 모든 댐 보고서, 도면 등 아날로그 자료가 한글 및 CAD 도면으로 전산화되었다.



3.3 계측기기

댐의 모든 계측기기를 실좌표에 맞게 디지털 트윈 플랫폼에 등록하였다. 이를 통해 댐 내부의 매설계기까지 정확한 위치를 확인할 수 있다. 또한, 계측기기별 실시간 계측값을 표출하여 트렌드 분석이 가능하며, 댐 시설의 어디 지점에서 어떤 변화가 있는지 실시간으로 확인할 수 있다.



3.4 지능형 영상감시체계

지능형 영상감시체계는 CCTV에 AI 객체 탐지 기반의 지능형 영상 안전관리기술을 적용하여 6개 항목(침입, 배회, 쓰러짐, 구조 신호, 화재, 침수)에 대한 감지 및 알림 시스템이다. 이 시스템을 통해 산재된 댐 시설 내 이상 상황 발생 시, 위험 요소에 대해 선제적 감지·분석이 가능하게 되어, 안전사고에 대해 사전에 예방할 수 있게 된다. 지능형 CCTV는 K-water에서 관리하는 국가댐 쏘댐(37개소)에 적용되며, 총 476대의 CCTV를 설치·보완하여 활용 중이다.



[지능형 영상감시체계]

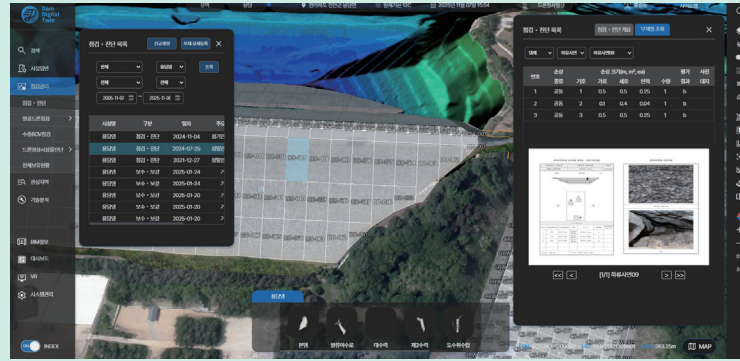
3.5 파노라마 뷰

파노라마 뷰는 댐 디지털 트윈에서 3D 공간 구현 시, 표현이 어려운 실내공간 및 설비를 대상으로 360° 파노라마 이미지를 통해 공간정보를 구현한 기능이다. 이를 통해 직접 현장에 가지 않더라도 생생한 현장감을 제공하며, BIM 및 보고서 등과 연계하여 시설·설비의 제원, 점검 이력 등 데이터를 표출하는 기능까지 탑재하였다. 현재 국가댐 37개소 전체에 대하여 발전소, 취수탑, 갤러리, 관리동 등 106개소에 적용되었다.



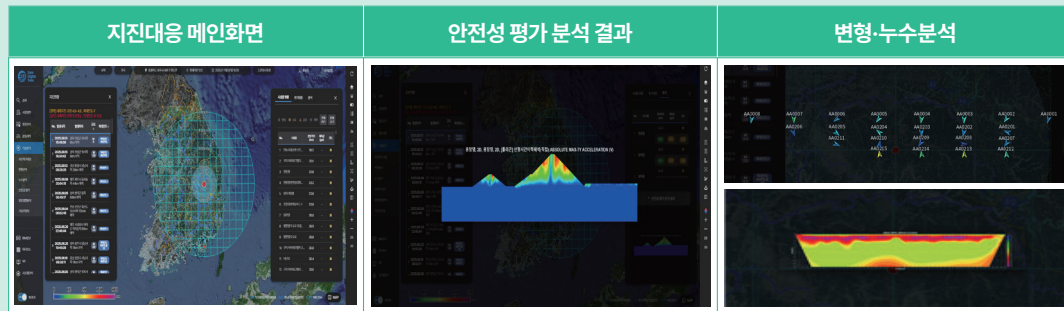
3.6 점검관리

댐 점검 관리에는 각종 법정점검, 자체점검이 있고, 이에 따른 보수, 보강이 이루어지고 있다. 기존 외관조사방도를 정밀한 좌표에 맞춰 설정하였고, 모든 시설 부위에 대한 점검 및 보수현황을 조회하고 신규로 등록할 수 있다. 앞으로 이루어질 점검, 진단에 대해서도 자동으로 등록될 수 있도록 제도 및 시스템을 정비할 예정이다.



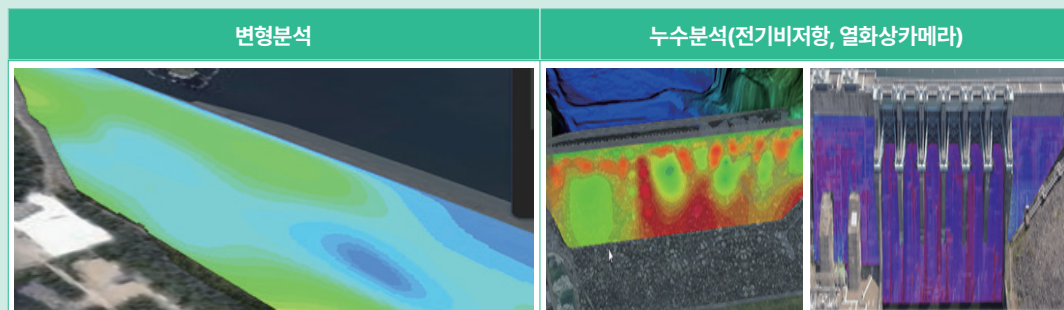
3.7 지진대응

지진대응 기능은 후술할 변형누수분석, 댐 안전성 평가 기능과 연계하여 지진 발생 시 진앙 위치, 지진 규모 및 진도를 고려하여 K-water에서 관리하는 국가댐 37개소에 대해 안전성 분석 및 변형누수분석 후 이상여부에 대해 알려주는 기능이다. 진앙지 및 반경 거리에 대해 직관적으로 알 수 있도록 가시화하였으며, 진앙지로부터 가까운 시설물을 리스트로 표출될 수 있도록 하였다. 또한, 부서 자체 위기대응 차원에서 긴급점검, 확인점검, 정밀점검의 시행 여부에 대해서도 확인이 가능하도록 하였다.



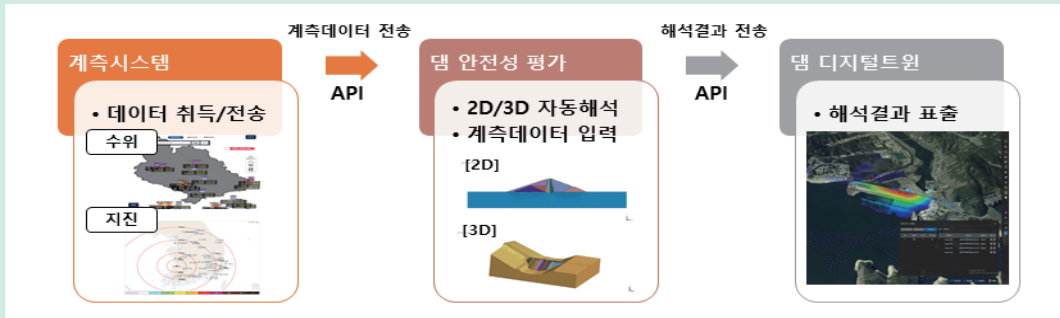
3.8 변형누수분석

변형누수분석 기능은 크게 변형분석과 누수분석으로 구분할 수 있는데, 변형분석은 GPS, 경사계 데이터를 바탕으로 기존 좌표 기준 댐의 변형이 얼마나 일어났는지를 보여주며, 누수분석은 댐 형식에 따라(필름, 콘크리트댐) 열화상 카메라 또는 전기비저항 장비를 활용하여 시간의 흐름에 따라 직관적으로 확인 가능하며, 지점별 변화 여부도 같이 확인할 수 있다.



3.9 안전성 평가

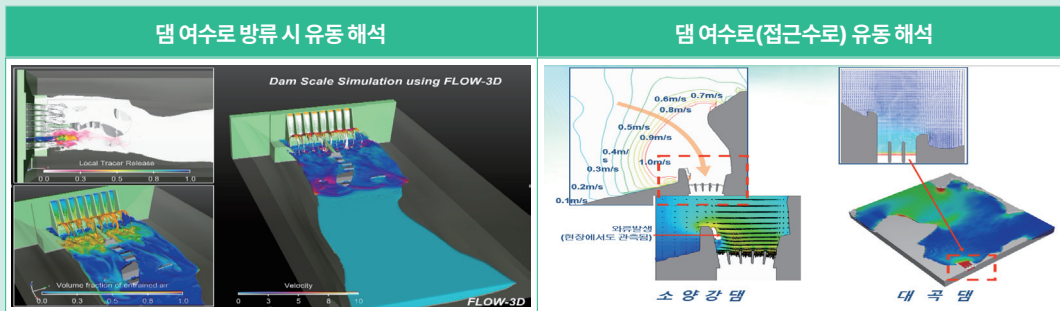
안전성 평가 기능은 상시 및 재난 발생 시 댐 안전성에 대해 분석 가능한 환경을 구축하기 위해 도입되었다. 신뢰성이 확보된 상용 S/W(MIDAS GTS NX)와 연계하여 지진, 수위 등 데이터의 실시간 입력을 통해 전 댐에 대해 안전성을 평가할 수 있도록 구축하였다. 지진 데이터의 경우 K-water의 지진감시시스템(KEMS)와 연계되고, 수위 데이터의 경우 수문정보시스템(HDAPS)와 자동으로 연동되도록 하였다. 안전성 평가는 댐 형식별(필댐, 콘크리트댐) 거동 특성을 고려하여 세분화된다. 필댐의 경우 침투해석을 통해 유속, 동수경사, 침투수량 등 항목을 평가하게 된다. 또한, 사면안정해석을 통해 사면의 안전율을 계산하게 된다. 콘크리트 댐의 경우 응력변형해석을 통해 댐체에 발생하는 압축, 인장, 전단응력이 허용치 이내인지 평가하게 되며, 추가적으로 댐의 안정성(전도, 활동, 지지력)도 검토하게 된다. 마지막으로 지진발생 시 전 댐에 대한 지진응답해석(시간이력해석)을 시행하여 댐에 발생하는 변위 및 응력을 산출한다. 이러한 해석 결과는 2D뿐만 아니라 3D표출 가능하여 댐 관리자가 직관적이고 효율적인 댐 관리를 할 수 있도록 지원한다.



[댐 안전성 분석 시스템]

3.10 방류영향 분석

댐 운영 과정에서 발생할 수 있는 다양한 수리현상을 분석하기 위해 시뮬레이션 시스템을 구축하였다. 특히 방류 시 수리적 영향이 가장 크게 작용하는 구간인 여수로와 감세지 대상으로, 시스템 사용자가 댐의 구조물에 미치는 유동 변화를 직관적으로 확인할 수 있는 체계를 마련하였다. 이 시스템은 상·하류 수위, 방류량 등 여러 조건에 따른 수리적 변화를 사전에 예측·분석할 수 있어, 댐 시설관리의 효율성과 안전성을 동시에 높일 수 있다. 이를 위해 상용 수치해석 프로그램인 Flow-3D*를 댐 디지털 트윈 플랫폼과 연동하여 결과를 시각적으로 구현하였다. 주요 분석 결과로는 방류 시 최대 유속 발생 위치, 수위 변화 패턴, 유속 분포 특성 등을 도출할 수 있으며, 결과물은 이미지, 동영상, 엑셀 데이터 등 다양한 형태로 출력되어 댐 시설 관리자가 직관적으로 활용할 수 있도록 지원한다.



[(FLOW-3D) 자유수면을 가진 유동흐름을 정확하게 예측하는 3차원 수치해석 소프트웨어]

4. 향후계획 및 비전

‘25년 스마트 댐 사업의 준공은 끝이 아닌 또 다른 출발점이다. ‘26년부터 댐 안전관리 플랫폼의 고도화를 꾸준히 추진하고, 정부와의 적극적 소통을 통해 유지관리 예산을 확보하여 안정적인 유지관리 체계를 이어갈 예정이다. 아울러, 사업과 연계한 후속 R&D 사업을 추진하여 지속가능한 혁신체계를 마련할 계획이며, 이러한 선진화된 관리체계 확산을 위해 관리가 미흡한 지자체 댐을 대상으로 스마트 댐 안전관리 사업을 시범 및 확대 적용할 계획이다. 이와 같은 과정을 통해 성과가 검증되고 표준모델이 확립되면 K-water형 스마트 댐 안전관리 Biz 모델을 구축하여 해외시장 진출까지 모색하고자 한다.

5. 맺음말

디지털 트윈 기반의 스마트 댐 안전관리 플랫폼은 단순히 새로운 시스템을 도입하는 것을 넘어, 기후위기 시대에 댐 시설을 보다 안전하고 체계적으로 관리할 수 있는 새로운 패러다임 전환을 의미한다. 그동안 축적해 온 경험과 성과를 토대로 과학적 근거와 첨단기술을 융합함으로써, 한 단계 더 진화한 선진형 스마트 안전관리 체계로 도약하는 의미있고 뜻깊은 출발점이 될 것이다. 앞으로도 스마트 댐 안전관리 플랫폼을 지속적으로 고도화해 나갈 것이며, 이를 통해 K-water가 국민으로부터 신뢰받는 기관으로 자리매김하고, 나아가 안전한 대한민국 실현에 기여할 수 있기를 기대한다.