



기후변화 대비 댐 유지관리 방향과 해외사례



심윤태 실장
국토안전관리원 기반안전시설실

“기후변화가 댐에 미치는 주요 영향”

기후변화로 인해 강우가 집중되거나 장기간 건조한 건기가 더 길어지는 경향이 나타나고 있다. 댐 유입량이 과거 설계치보다 10~20% 이상 커질 가능성이 있으므로 댐 설계 운영 당시의 가정이 향후 기후변화 상황에 유효하지 않음을 시사하고 있다. 댐 구조체의 재료적 특성을 보면 온도상승, 습도변화는 콘크리트 균열, 철근부식 가속, 팽창과 수축 반복 등의 열화 요인을 증가시키고 있으며, 30년 이상 노후화 댐의 경우 환경변화에 취약할 수 있다.

집중호우로 인한 유역 내 토사유출이 증가하면서 저수지 퇴적이 가속화되고 저수용량 감소 및 수리조건 변화 등이 발생한다. 반대로 건기가 길어지면 저수율 저하, 수질 악화 등 운영상 문제가 발생한다. 과거의 수문 운영기준이 기후변화로 바뀐 수문환경을 반영하지 못할 수 있고, 홍수 시 제방, 댐의 월류 위험이 증가하고 극심한 가뭄시 저수율 유지가 어려워질 수 있다.



[집중 호우시 충북 괴산댐 방류(25.7) 전경]

“이상기후 대비 댐 유지관리 기본방향”

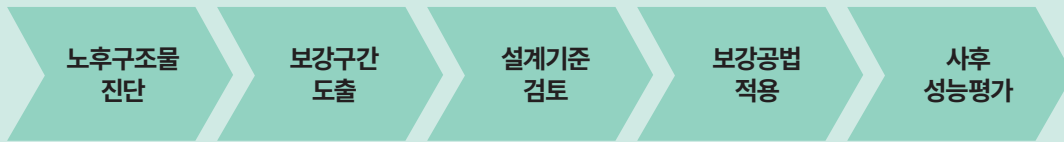
댐 유지관리 측면에서 구조안전성 모니터링(누수, 변위 등), 저수지 수위, 유입량 모니터링, 저수지 퇴적상태, 댐체 및 절토사면 활동 감시 등은 중요한 요소이다. 현재 대부분의 댐 모니터링은 수위, 누수 등 단일 센서 정보에 국한되어 있으며 개별 데이터를 통합적으로 분석하지 못하고 있는 실정이다.

IoT 센서망 확충으로 수위, 유입량, 변위, 누수, 온도, 진동 데이터를 수집하고 관리주체 중앙서버와 연동해 실시간 취약부 모니터링 전환이 필요하며, <그림1~2>는 이에 대한 모범사례로 볼 수 있고 디지털 트윈 플랫폼 운영으로 홍수, 지진, 기온변화에 따른 댐 거동 특성을 시뮬레이션하고 정상과 비정상 상태를 구분한 후 이상 패턴을 자동 탐지하는 AI 경보 알고리즘을 상용화할 시기이다. 또한, 기후변화로 비정형 유입 패턴이 증가하므로 수문예측, 산사태, 사면활동 예측모델 개발은 진행 중이며 관측데이터의 통합관리시스템 구축과 개선은 당연한 과제이다.

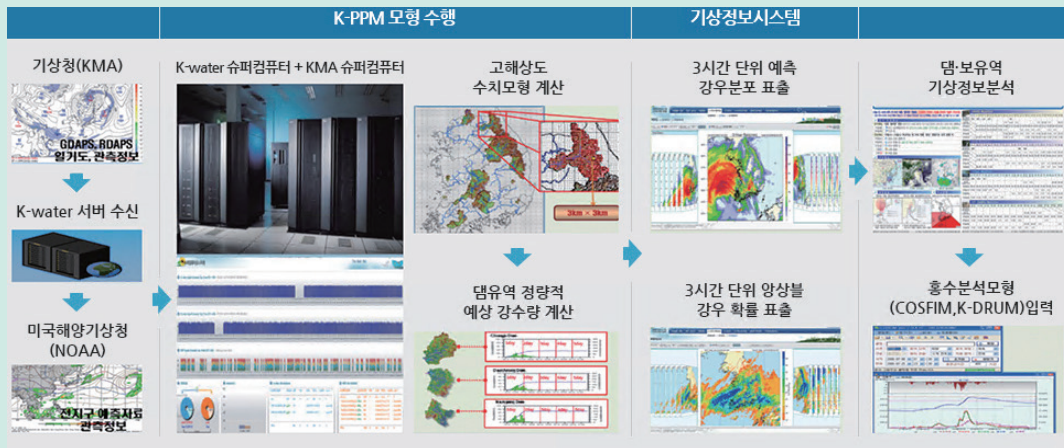
한편, 노후화 댐 또는 설계기준이 낮았던 댐의 경우 제체높이 증설, 여수로 확장, 콘크리트 표면처리강화, 사면 보호 등의 보강이 요구된다. 더불어, 고위험 댐에 대해 진단주기 단축(예:5년→3년)을 적극 검토하고 단순히 댐 구조물만 유지관리하는 것이 아닌 상류지역 유역관리(토사유출 저감, 사면안정화, 홍수피해 저감)도 병행해야 한다.

국내 다목적댐의 환경특성을 반영한 새로운 성능평가 모델이 필요한 시기이다. 기후변화에 대한 저항성을 고려한 우선정비대상을 선정하는 프레임워크(Framework) 마련을 위해 정비예산·유지보수계획 수립 시 기후변화 반영 개량비를 반영하고 댐의 수위 저수율, 유입량, 사면활동 등 핵심지표에 대해 실시간 모니터링이 가능하도록 계측(센서, IoT) 설치를 추진하고 시설물 평가에 적극 활용하고 아래와 같이 구조물 성능개선 및 보강절차를 수립한다.

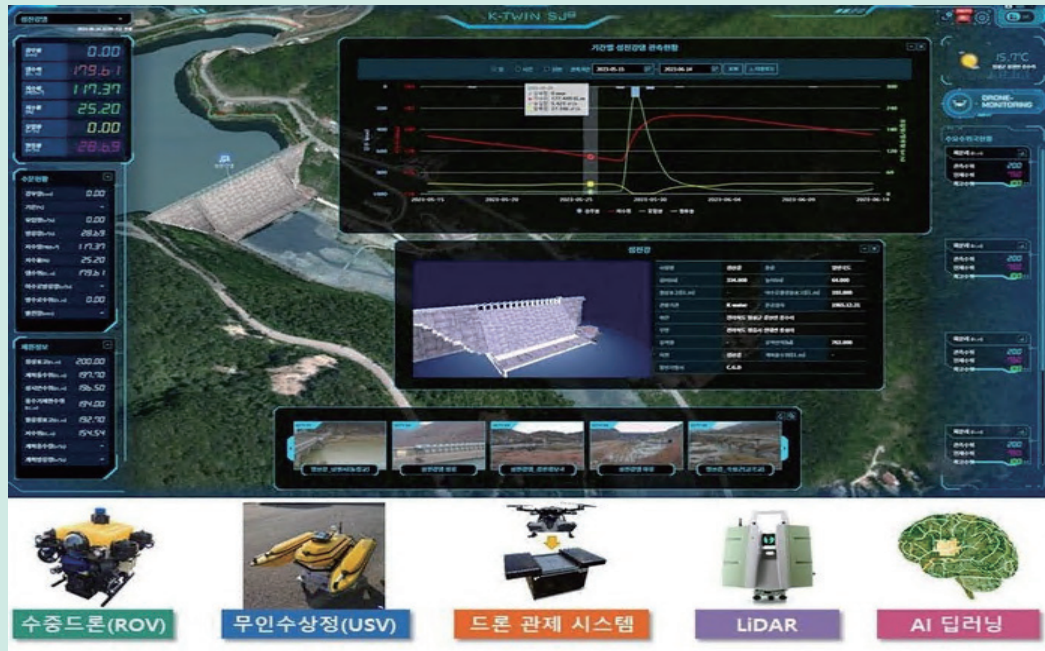
<구조물 성능개선 및 기후대응형 보강절차>



- 노후화 필댐의 여수로 확장, 제체높이 증고, 사면보호공법 적용
- 콘크리트 내구성 향상(방수층, 표면피복, 균열보수 등) 확대 적용
- 장기 가뭄 대응을 위한 저수를 확보 및 용수 운영 최적화



[그림 1. K-water 댐보유역 강우예측시스템 생산 및 운영체계]



[그림2. 첨단 스마트장비 활용한 댐 유지관리시스템]

'24년 국제 물 기후 변화 학회 GEWEX OSC에 참석

1. 저자 참여 논문 소개

- '24년 7월 일본(삿포로)
- 개최주관 : Hokkaido University and Science Council of Japan

저자는 지난해 세계 기후 연구 프로그램(WCRP)의 핵심으로, 연구, 관찰, 과학 활동을 통해 전 세계 물과 에너지 순환에 관한 연구 결과를 발표하고 기후, 인간 및 기반시설에 미치는 영향을 분석하고자 학회에 참석하였다.

논문은 "2022년 한반도 태풍을 사례로 한 포항지역 수공구조물 설계기준에 미치는 초극한강우의 영향(국민대 신주영, 국토안전관리원 심윤태)"에 대하여 발표하였고 주요 내용은 다음과 같다.

홍수의 주요 원인은 극한 강우 이벤트에서 발생되며, 기록에 따르면 전례없는 극심한 강우량이 발생하고 있으며 최근의 추세를 살펴보면 과거 기록을 상회하는 이벤트들을 보여준다. 이와 같은 빈도의 증가는 여러 요인들의 복잡한 상호작용에서 비롯하였고, 극한강우의 증가 원인에 대해 지속적인 연구가 필요하다. 그러나 실제 상황에서는 이와 같은 이벤트들의 근본 원인과 메커니즘을 분석하는 것보다 사고 대응에 더욱 비중을 두고 있는 실정이다.

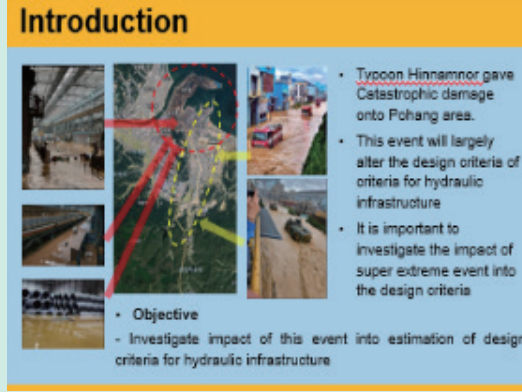
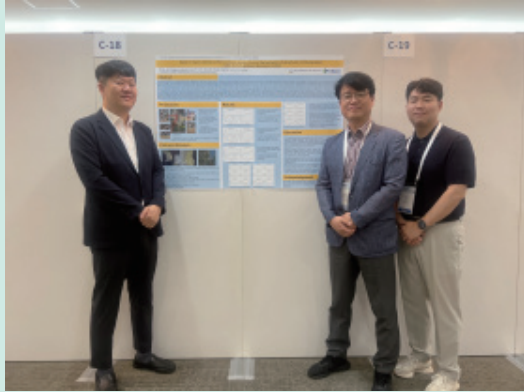
수자원 기반 구조물의 설계기준은 일반적으로 연간 최대 수문량 시리즈의 빈도분석에 기반을 두고 있으며, 빈도분석에는 연간 최대 강수량, 최대 유량, 최대 유입량과 같은 지표가 포함된다. 그러나 Dataset이 매우 제한적이므로 재현기간이 큰 확률 강우량에 대하여 신뢰할 수 있는 추정치를 제공하기 어렵고, 매우 드문 극단적인 이벤트들을 포함하면 빈도 해석결과가 왜곡될 수 있다.

결과적으로, 이상기후 현상으로 인해 수자원 기반 구조물의 설계기준은 부정확해질 수 있고, 기반 구조물을 건설하거나 보강과 정은 큰 비용과 진행상 어려움이 예상된다.

초극한 강우들이 빈도해석 결과를 어떻게 바꿀 수 있는지 이해하는 것이 중요하다. 이 연구는 '22년 힌남노 태풍 사례를 활용하여, 포항의 산업지역에 홍수로 인해 중대한 경제적 손해를 끼친 강우 이벤트가 연 최대 강수량의 빈도해석에 미치는 영향을 조사하였다.

해석은 사례별로 힌남노 극한 호우를 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우로 구분하였고 지점 및 지역 빈도 해석을 병행하였다. 힌남노 태풍의 영향을 평가한 결과, 지역 빈도분석이 더 일관된 결과를 보여주고 있으나 도출된 확률강우량은 지점 빈도해석의 확률강우량보다 작은 값을 보였다.

따라서, 홍수 방어 메커니즘을 강화하기 위해 추정된 확률강우량을 증가해야 한다는 결론을 얻을 수 있었다.



[GEWEX 참여논문 저자 및 발표 포스터]

2. 국제 물 기후변화 학회 GEWEX OSC 기초 연설

NASA와 GEWEX는 대기권 상단에서 방출되는 방사선을 모니터링하고 지구 표면에서 우주로 에너지가 어떻게 흐르는지 모델링을 실시한다. 태양에서 나오는 에너지는 대기를 만나 분산, 반사되고 열과 빛을 통해 순환된다. 물이 증발하여 구름을 형성하고 비를 통해 에너지를 다시 우주로 운반할 수 있다. 단파와 장파의 복사를 사용하여 지표 표면, 대기 상단의 플럭스를 측정하였다.

수집된 정보는 스위스 취리히 세계 방사선 모니터링 센터(WRMC)에 저장된다.

대기경계층 연구, 구름시스템 연구, 지구지반대기 시스템연구를 감독하고 있으며 화산폭발, 온실효과(온난화), 태양변화, 지구궤도의 변동, 해양순환의 장기적인 변동과 같은 불규칙한 사건을 관찰하는 연구를 지속적으로 하고 있다.



[NASA's Earth Science Program, KAYE, Jack A]

3. 기후변화에 의한 홍수해 평가 및 분석 모델링 개발

- 일본의 재해 관련 기후변화 영향평가 및 대응(교토대학, 나카키타 에이이치)
- 최근 일본 홍수해 문제 및 대응

대다수 일본인들은 홍수해 발생은 지구 온난화 영향이라고 인식하고 있으며 호우의 발생빈도, 강우강도, 총강수량 및 위치 등 경험하지 못했던 위협 및 재해에 대해 지구온난화에 대한 적절한 대응을 정부에게 요구하고 있다. 주요 인프라 개선, 위기관리, 지역 사회의 취약성 감소 등은 온난화 속도에 비해 오랜 시간이 걸린다. 2017년 7월 국지성 호우피해, 2018년 7월 장기간 지속된 강우 피해는 과학에 기반한 미래 예측이 필수 불가결이다.

재난위험대비 도시계획(일본국토교통성)

침수빈도가 높은지역, 침수 고위험도 지역을 공개 ⇒ 개선방식 결정

- ①시설투자(재난 전 가속화) : 거주지에 하천과 하수도개발, 제방건설, 빗물저장 및 침투시설 개발주력
- ②주택개선 : 재난위험이 큰 지역은 건축물 구조개선(해당부서협조)하고 필요에 따라 재난위험구역 지정하고 제방, 긴급수송로 등을 신설하여 주민대비 및 긴급복구 지원
- ③재난위험알림 : 다양한 재난유형, 발생확률 등을 고려한 지역재난위험의 제시, 상세한 방재정보 제공

기후연구공동체, 재해예방공동체, 실무자간 협업의 중요성

- **기후연구공동체**: 미래의 기상.기후변화에 대한 과학적 기반을 둔 예측
- **재해예방공동체**: 구조설계시 새로운 외력에 대한 과학적 근거(수리학) 마련
 - * 재해대응에 대한 기본개념 수립
 - 불확실 과정에서 의사결정 접근방법 수립
 - 평가기법 개발
- **실무자**: 영향평가, 계획이론 검토, 대책마련

Importance of collaboration between the climate research community, disaster prevention/mitigation research community, and practitioners.

“전 세계 댐 저수용량 감소로 물부족” 심각

물을 관리하고 저장하는 댐들이 기후변화로 빈번해진 가뭄과 홍수로 퇴적물이 많이 쌓이면서 2050년에 이르면 저수용량이 1/4로 줄어 전 세계가 심각한 물부족 사태를 겪을 것으로 전망했다.

유엔대학 물 환경 보건연구소는 전 세계 150개국 대형댐 6만개 가운데 건설연도와 설계용량이 정확히 확인된 4만7403개를 분석한 결과, 전 세계 대형댐(높이 15m이상, 저수용량 300만톤이상, 초당방류량 2천톤) 저수용량은 이미 평균 15% 줄어 들었다.

댐의 저수용량이 줄어드는 주요 원인은 퇴적물로 지목되고 있다. 하천은 자연적으로 퇴적물을 습지와 해안으로 씻어내지만, 댐은 이같은 자연 기능이 작용하지 않기 때문에 시간이 흐를수록 퇴적물이 쌓일 수 밖에 없다.

퇴적물이 많아지면 저수용량은 그만큼 줄어든다. 대형댐들은 홍수 피해를 방지하고 생활용수와 공업용수 등 물을 안정적으로 공급하는 역할을 한다. 이 때문에 저수용량 감소는 심각한 물관리 및 공급 위기를 초래할 수 있다.

유엔대학 연구소장 블라디미르 박사는 “전 세계적으로 댐의 저수용량 감소는 심각하게 받아들여야 할 일”이라며 “퇴적물 증가가 하천 상류지역의 홍수위험을 높이고 야생동물 서식지를 위협할 뿐만 아니라 하류지역 주민들에게도 충격을 가할 것”이라고 경고했다. 댐의 저수용량 감소는 수력발전을 통한 에너지 생산을 감소시켜 재생에너지 공급에도 타격을 입힌다. 댐의 높이를 높이거나 퇴적물이 많이 늘어나는 홍수철에 대비한 우회수로 설치 등의 대응책을 마련할 것을 권고했다.

장기적으로 댐도 하천처럼 자연적 흐름을 회복시키는 방안 생각해야 한다는 지적도 나온다. 노르웨이 포방에서는 하천 건강과

수자원 회복을 위해 수력발전댐을 폭파시키기도 했다. 중국이 메콩강에 건설한 댐도 하류 국가로 유입되는 침전물의 흐름을 방해해 경관을 변화시키고 수백만 농민의 생계를 위협하고 있다.



[저수지 바닥 드러난 스페인판 스톤헨지 '과다페랄의 고인돌']

“기후변화 대비 해외 수력발전댐의 다목적 활용 사례”

오스트리아의 비엔나를 통과하는 도나우강은 과거 다지형의 하천이었으나 1870년대 하천정비를 통해 직선화되었다. 하천의 상하류로 나누어 상류에 4개댐, 하류에 5개 댐이 통합운영 중이며, 통합운영센터는 상하류 최하단 댐에 위치한다.

수문조작은 통합운영센터에서 관리자를 통해 모니터링 및 운전하게 되어 있다. 또한 오스트리아의 여러 댐 중 Freudenu 댐은 지역의 요구에 따라 기존 수력발전댐을 용수공급, 레저공간 활용 및 홍수조절 등 다목적으로 활용하고 있다.

독일의 경우 1957년 물관리 기본법을 제정하였고, 주정부에서 물관리 권한을 부여하여 주정부별로 “수법”을 제정하고 독자적으로 물관리 정책을 추진하고 있다. 루르강 유역의 8개 다목적댐을 건설 및 운영 중인 루르협회는 용수공급 및 홍수방지를 목적으로 댐을 건설하였고, 이후 친수공간, 수력발전 등 다목적으로 활용하고 있다.



[루르강 상류 뉘네제 댐 전경]
(자료 : 국회입법조사처(2024))

“환경변화를 고려한 시설물 안전 및 유지관리 세부지침”

집중호우가 산사태 등으로 적잖은 인명피해를 낳은 가운데, 기후변화는 기온과 강우 두가지 측면에서 댐 구조물 안전에도 영향을 미친다. 기온은 재료의 수축 및 팽창, 접합부 취약 등으로 시설물의 내구성을 저하시킨다. 강우는 시설물에 미치는 외력을 증가시키면서 기온보다 더 두드러진 영향을 주는데 집중호우 때 자주 발생하는 댐, 교량, 옹벽, 절토사면 등의 붕괴사고가 대표적이다.

기후변화 대비 시설물 안전 및 유지관리 세부지침은 현재 개정이 진행 중이며 여수로 도류벽 월류 안전성을 추가 검토하는 방안은 댐 본체나 여수로의 안전에 지장을 주는 월류를 방지한다는 취지이다. 따라서, 급경사수로에는 많은 여유고를 주어 구조물의 안전을 도모한다는 평가가 추가될 예정이다. 또한, 댐 하류지역의 교량은 기후변화에 가장 취약한 시설물로 방류에 의한 교각 바닥 부분의 지반이 세굴 발생과 하상의 변화를 가속화 시킨다.

따라서, 소규모 하천 교량에서 발생하는 사고를 예방하기 위해 점검·진단 때 세굴 조사를 의무화하는 내용을 담고 있다. 새 지침에는 기후변화로 인한 시설물 사고를 예방하기 위해 점검·진단 대상 시설물을 확대하는 방안도 포함될 전망이다.

“결론”

기후변화 대비 댐 유지관리 방안은 신뢰성 있는 정보시스템 구축을 위해 IoT 센서망, 드론, 모니터링 설비를 확대하고 AI 예측 디지털 트윈개발, 시설물 점검·진단 지침을 환경변화에 맞게 신설하면서 빅데이터와 AI 분석 전문교육을 활성화할 필요가 있다.

또한, 극한 폭염과 폭우가 댐을 포함한 수리, 교량 등 기반 시설에 미치는 영향을 분석하고 대처할 수 있는 첨단 신기술 개발을 서둘러야 한다.

이상기후를 반영하여 위험 시설물을 새롭게 분류하고 인명과 재산 피해의 우려가 큰 시설물에 대한 개축 또는 철거 교체 등의 기준도 정비할 시간이다.