



# 기후위기에 적응하는 댐의 탄력적 유지관리 종합대책 제안



이승오 교수  
홍익대학교

## 1. 서론

기후위기의 영향이 본격화되면서 직면하고 있는 수자원환경은 과거와 비교할 수 없을 만큼 근본적인 층위에서 달라졌다. 과거 댐 설계와 운영의 기초가 되었던 '예측 가능한 강우'와 '일정한 범위 내의 유출'이라는 전제는 더 이상 유효하지 않다. 한 해 동안 강우가 거의 발생하지 않는 극심한 건조 기간과 몇 시간 이내 모든 것을 쏟아붓는 집중호우가 극단적으로 교차하는 현상이 반복되고 있다. 이로 인해 물이 자연계에서 이동하는 방식 자체가 기존의 통계적 경험법칙이나 예측가능한 확률분포로 설명하기 어려운 불확실성의 영역으로 진입했다고 할 수 있다. 이러한 급격한 수자원환경 변화는 댐이 최초 설계되거나 시공될 당시 가정했던 외력 조건과 크게 다를 수 있기 때문에 과거의 운영 방식을 답습하는 것만으로는 시설의 안전과 국민의 생명을 담보할 수 없다는 사실이 점점 명백해지고 있다.

국내외에서 발생한 최근의 재난 사례들은 이러한 변화가 단순한 이론적 예측이 아닌 현실적이고 물리적인 위협으로 가까이 다가왔음을 증명한다. 2023년 발생한 과산댐 월류 사고는 변화된 강우 패턴이 댐 운영에 어떤 치명적인 결과를 초래하는지 보여주는 대표적 사례다. 당시 단시간에 집중된 폭우로 유입량이 폭발적으로 증가하자 운영 주체는 모든 수문을 개방하여 대응했음에도 불구하고 예상을 초과하는 급격한 수위 상승을 제어할 수 없었다. 결국 댐 마루를 넘어서는 월류가 발생했다 ([그림 1] 참조).

반면 점진강댐에서는 정반대의 양상이 나타났다. 장기간 낮은 저수율이 지속되었는데 이는 단순히 비가 적게 와서가 아니라 강우가 내리는 방식이 저수지에 담기 어려운 형태로 변했기 때문이다. 비가 오더라도 단시간에 집중되거나 유출이 빠르게 진행되는 형태로 발생하여 댐 내 옥정호의 바닥이 드러나는 상황이 연출되었다 ([그림 2] 참조).

해외의 사례 또한 심각성을 더한다. 2024년 NASA에서 제공한 위성사진으로 스페인의 사우(Sau) 댐에서는 극단적인 가뭄으로 저수율이 엄청 낮아지면서 수십 년간 수몰되어 있던 옛 마을의 유적이 다시 수면 위로 드러나는 충격적인 모습이 관측되기도 했다 ([그림 3] 참조). 2018년 미국 캘리포니아주의 오로빌(Oroville) 댐은 반복된 집중호우를 견디지 못하고 여수로 하부 구조가 파손되는 사고를 겪었다. 이로 인해 댐 붕괴 우려가 제기되며 인근 주민 수십만 명이 긴급 대피하는 초유의 사태가 발생했다 ([그림 4] 참조).

이러한 사례들은 서로 다른 지역과 기후대에서 발생했음에도 불구하고 하나의 공통된 메시지를 던진다. 바로 기후위기가 불러온 새로운 수문 조건 속에서 기존의 시설 기준과 운영 매뉴얼은 더 이상 감당하지 쉽지 않다는 것이다. 기후위기는 단순히 홍수나 가뭄의 빈도를 높이는 수준을 넘어 댐 운영의 기반이 되는 모든 전제를 뒤흔들고 있다. 운영자는 "언제 비가 내릴 것인가", "얼마나 급격하게 유입량이 늘어날 것인가", "지금 물을 방류하면 다시 채울 기회가 있을 것인가"와 같은 질문 앞에서 과거보다 훨씬 더 높은 불확실성과 시간적 제약에 시달리며 어려운 결정을 내려야 하는 곤란한 상황에 내몰리고 있다.

결국 현재의 댐 운영 체계는 과거의 경험이나 단일한 안전율에 기대어서는 안정성을 보장할 수 없는 환경으로 이동하고 있다. 기후위기 시대에는 변화하는 외력을 능동적으로 수용하고 이에 맞춰 유연하게 대응할 수 있는 새로운 관리 철학이 필수적이다. 본 고

는 기후위기 시대에 댐 운영이 마주한 기술적 난제들을 구체적으로 해부하고 이에 대응하기 위한 '탄력적 유지관리 종합대책'의 방향을 제시하는 데 목적이 있다. 이어지는 내용으로는 기후위기로 인한 수자원의 환경의 변화를 기술적으로 분석하고 이를 극복하기 위한 구조적·비구조적 대책과 국제적 협력 방안을 상세히 논의하고자 한다.



[그림 1. 2023년 과산댐 월류]  
(출처: '23년 충북일보)



[그림 2. 섬진강댐 내 옥정호 모습]  
(출처: '18년 뉴스1)



[그림 3. 스페인 사우 댐 가뭄 후]  
(출처: '24년 NASA)



[그림 4. 미국 오로빌 댐 여수로 손상]  
(출처: '18년 NBC News)

## 2. 기후변화로 인한 수문환경 변화의 기술적 분석

### 2.1 강우의 시간구조 변화와 유입 반응의 비정상화

최근 관측되는 강우 패턴의 가장 두드러진 특징은 댐 유입의 반응 구조를 근본적으로 바꾸고 있다는 점이다. 과거의 강우 양상은 일정 시간 동안 비교적 완만하게 지속되는 형태가 주를 이루었다. 이러한 패턴 하에서는 빗물이 토양에 충분히 스며들고 서서히 하천으로 모여들면서 댐의 수문곡선(Hydrograph) 역시 점진적으로 상승하고 하강하는 안정적인 형태를 보였다.

### 2.2 유입 반응의 급변과 대응 시간의 축소

유입 반응의 비정상화는 댐 운영에서 가장 치명적인 변수가 될 수 있다. 유입이 상승하는 곡선의 기울기가 커지면 운영자가 방류량을 조절할 수 있는 시간적 여유가 줄어들고 그 결과 수위 상승을 억제하기 위한 조치가 제때 이루어지지 못할 가능성이 커지기 때문이다. 특히 다목적댐이나 발전용댐처럼 통상적으로 수위를 일정 범위 내에서 관리해야 하는 시설의 경우 급격히 증가하는 유입량은 방류 한계에 직결된다. 조기 방류를 실시하더라도 상류에서 도달하는 유출이 예상보다 빠르면 수위는 순식간에 위험 수위에 근접하게 된다. 결국 강우의 시간구조 변화는 댐 운영자가 가용할 수 있는 모든 예측·운영 기준의 재검토를 요구한다.

그러나 기후위기 이후 비가 내리는 방식은 '짧은 지속시간'과 '높은 강도'로 요약되는 형태로 급변하고 있다. 짧은 시간에 엄청난 양의 비가 집중되면서 댐으로 들어오는 유입곡선은 과거에 비해 훨씬 가파르게 수직 상승하는 특성을 보인다. 이러한 변화는 단순

히 총강우량이 많아졌다는 문제를 넘어선다. 강우 강도가 토양의 침투능을 순간적으로 초과하면서 빗물이 땅속으로 스며들 시간도 없이 표면 유출로 전환되고 이로 인해 강우가 유출로 바뀌어 댐에 도달하는 시간(Lag Time)이 대폭 단축되는 '급격한 유출 반응'이 발생하기 때문이다. 즉 동일한 양의 비가 내리더라도 시간적 집중도가 높아짐에 따라 댐이 받아내야 하는 순간적인 물의 부하는 기하급수적으로 증가하는 구조가 강화되고 있다.

이러한 유입 반응의 비정상화는 댐 운영에서 운영자를 시간에 쫓기게 만든다. 유입량이 서서히 늘어날 때는 운영자가 방류량을 조절하고 하류 상황을 살피며 대응할 수 있는 시간적 여유가 있었다. 하지만 유입곡선의 기울기가 급격해지면 운영자가 상황을 판단하고 수문을 조작할 수 있는 골든타임이 현저히 줄어든다. 그 결과 수위 상승을 억제하기 위한 조치가 제때 이루어지지 못할 가능성 또한 커진다. 특히 다목적댐이나 발전용 댐처럼 평상시 일정 수위를 유지하며 용수 공급과 발전 기능을 수행해야 하는 시설의 경우 급증하는 유입량은 즉각적인 방류 한계 상황으로 직결된다. 설령 조기 방류를 실시하더라도 상류 유역에서 도달하는 유출 속도가 예상보다 빠르면 댐 수위는 순식간에 계획홍수위나 위험 수위에 근접하게 된다. 결론적으로 강우의 시간구조 변화는 댐 운영자가 의존해 왔던 기존 예측 모델과 운영 기준에 대한 전면적인 재검토를 요구하고 있다.

### 2.3 저수율 회복 기회의 구조적 감소

댐의 지속 가능한 운영을 위해서는 홍수기 이후나 강우 시 저수율을 회복하는 '충수(Filling)' 과정이 필수적이다. 하지만 기후위기 이후 이 충수 기회는 눈에 띄게 감소하고 있다. 안정적인 저수율 회복을 위해서는 일정 기간 강우가 꾸준히 누적되어야 하지만 최근의 강우는 매우 불규칙한 간격으로 발생하며 지속시간 또한 짧아지는 경향을 보인다.

장마철이라 하더라도 과거처럼 며칠 혹은 몇 주간 이어지는 연속적인 강우를 기대하기 어렵다. 비가 오더라도 저수지에 안정적으로 가두기 어려운 형태, 즉 단시간 폭우로 쏟아져 대부분을 방류해야 하는 상황이 빈번하다. 이러한 변화는 댐이 저수율을 회복하는 데 필요한 자연적 전제 조건인 '충수 조건' 자체를 약화시키며 저수지가 스스로 회복할 수 있는 메커니즘을 사실상 붕괴시키는 방향으로 작용한다.

충수 기회의 감소는 댐 운영자에게 홍수 대응과 이수(물 이용) 관리 사이의 딜레마를 더욱 심화시킨다. 집중호우 예보 시 홍수 방어를 위해 댐 수위를 미리 낮추고 방류량을 늘리면 실제 강우가 단발성으로 그치거나 예상보다 적게 올 경우 저수 기회를 영영 잃게 된다. 반대로 가뭄을 우려해 수위를 높게 유지하면 갑작스러운 폭우가 쏟아질 때 홍수 조절 용량이 부족해져 댐과 하류 지역의 안전이 위협받는다. 이처럼 상반된 요구가 동시에 강화되면서 충수는 과거보다 훨씬 고난도의 운영 과제가 되고 있다. 실제로 최근 여러 댐에서 여름철 상당량의 강우가 기록되었음에도 불구하고 유효한 충수로 이어지지 않아 연중 낮은 저수율 상태가 장기화되는 사례가 증가하고 있다.

충수 메커니즘의 붕괴는 단기적인 운영 실패를 넘어 장기적인 물 관리의 안정성을 저하시키는 요인이 된다. 저수율이 일정 기준 이하로 장기간 유지되면 용수 공급, 수력 발전, 하천 생태계 유지를 위한 방류 등 댐의 필수 기능 수행에 어려움을 초래하게 된다. 이는 가뭄의 영향이 기상 조건을 넘어 사회·경제적 피해로 확대되는 결과를 야기한다. 충수가 원활히 이루어지지 않는 한 기상학적 가뭄이 해소되어도 댐의 기능적 가뭄은 지속되는 악순환이 반복될 수 있다.

### 2.4 집수유역의 지형 변화와 퇴적의 가속화

집중호우의 빈발은 댐 상류 유역의 지형적 특성까지 변화시키고 있다. 강우의 세기가 강해지면 지표면을 때리는 빗방울의 에너지가 증가하여 유역의 표층 토양이 쉽게 떨어져 나간다. 이렇게 발생한 다량의 토사는 강한 유출수에 실려 하천을 타고 댐 저수지로 빠르게 유입된다. 특히 산지 면적이 넓고 경사가 급한 우리나라의 지형 특성상 이러한 토사 유입과 침식 현상은 더욱 심각하게 나타나며 폭우가 반복될수록 저수지 바닥의 지형은 빠르게 변형된다.

퇴적물의 누적은 저수지가 물을 담을 수 있는 그릇의 크기, 즉 유효저수용량을 지속적으로 감소시킨다. 이는 곧 홍수기에는 물이 가둘 공간이 부족해 홍수 조절 능력이 떨어지고 가뭄기에는 공급할 물이 부족해지는 이수 능력의 약화로 이어진다. 수위계 상에 표시된 저수율이 충분해 보이더라도 바닥에 쌓인 퇴적층으로 인해 실제 활용 가능한 물의 양은 훨씬 적은 '허수' 저수량이 발생할 수 있다. 또한 퇴적층이 저수지 바닥에 불균등하게 쌓이면 취수구나 방류 수문 근처의 물 흐름을 왜곡시켜 방류 효율을 저해하거나 시설물에 물리적 손상을 입힐 수도 있다.

이처럼 퇴적 증가 문제는 단순한 유지관리의 대상을 넘어 저수지의 기본 기능을 마비시키는 구조적 위협 요인으로 인식되어야 한다. 기후위기 시대의 댐 저수지 상부 퇴적 문제는 향후 더 빠른 속도로 악화될 가능성이 높다. 과거에는 수십 년에 걸쳐 서서히 진행되던 퇴적이 최근에는 몇 차례의 강력한 집중호우만으로도 급격히 진행되는 경우가 보고되고 있으며 기존의 기계적인 준설 방식만으로는 이러한 퇴적 속도를 따라잡기 어려운 한계 상황을 직면하고 있다. 따라서 저수지 기능의 전반적인 재점검과 장기적인 관점에서의 근본적인 퇴적 관리 전략이 시급하다.

## 2.5 저수지 기반 가뭄의 구조적 확대

앞서 언급한 충수 기회의 감소와 퇴적의 증가는 '저수지 기반 가뭄(Reservoir-based Drought)'이라는 새로운 형태의 재난을 구조화하고 있다. 저수지 기반 가뭄이란 기상학적 가뭄이 종료되어 비가 오기 시작했음에도 불구하고 댐의 저수율이 회복되지 않는 현상을 의미한다. 이는 최근 그 발생 빈도와 지속 기간이 빠르게 늘어나고 있는 추세다.

충수 기회가 줄어들고 퇴적으로 인해 유효 저수 용량이 감소하면서 유입수가 있어도 수위가 쉽게 오르지 않는 구조적 환경이 만들어졌다. 이러한 변화는 가뭄이 기상 요인이 아닌 댐 관리의 내부 요인, 즉 저장 및 운영 조건에 의해 더 오래 지속되도록 만든다.

저수지 기반 가뭄이 장기화되면 국가 전체의 물 관리 체계에 부담이 가중된다. 댐은 발전, 생활공업용수 공급, 홍수조절, 하천 환경 유지 등 복합적인 기능을 수행하는데 저수율 저하가 고착화되면 이들 기능을 균형 있게 운영하기 어렵다. 운영자는 용수 공급량을 줄이거나 발전을 축소하고 생태 유지를 위한 방류를 제한하는 등 비상 운영을 상시화해야 하며 이는 사회와 산업, 그리고 생태계 전반에 부정적인 영향을 미친다. 결국 '저수지 기반 가뭄'은 기후변화가 단순히 강우량을 변화시키는 수준을 넘어 댐 저수지 운영관리와 전반적인 물 관리 시스템의 구조적 불안정을 초래하는 핵심 요인이 되고 있다.

## 2.6 사례 분석을 통해 나타난 공통된 변화 양상

괴산댐의 월류, 섬진강댐의 저수율 붕괴, 미국 오로빌 댐의 여수로 손상, 스페인 사우 댐의 고갈 등을 포함하여 최근 급증하고 있는 국내외에서 발생한 여러 사례는 각기 다른 지리적 조건과 운영 환경에도 불구하고 놀라울 정도로 일관된 변화의 흐름을 보여준다. 첫째, 강우패턴이 과거와는 확연히 다른 방식, 즉 예측 범위를 벗어난 강도와 형태를 나타내면서 위기가 시작된다. 둘째, 강우의 시간적 구조 변화는 유역 내 유출 반응을 변화시켜 댐으로 들어오는 유입의 형태를 불규칙하고 폭발적인 양상으로 변모시킨다. 셋째, 이렇게 변동성이 커진 유입은 안정적인 충수를 방해하거나 반대로 방류 부담을 급격히 증가시키며 운영자가 대응할 수 있는 시간적 여유(Lead Time)를 지속적으로 잠식한다. 마지막으로 이러한 일련의 과정이 누적되면 결국 기존 시설의 취약 부위가 드러나거나 운영 규칙이 감당할 수 있는 한계치를 초과하게 되어 대형 사고나 운영 실패로 이어질 위험이 극도로 높아진다. 이들 사례가 보여주는 공통점은 기후위기 시대의 댐들이 겪고 있는 위험이 개별적인 특수성이 아니라 전 지구적으로 동일하게 나타나는 '일반화될 댐 구조적 위험'이라는 사실이다.

# 3. 댐의 탄력적 유지관리를 위한 종합대책

## 3.1 최종목표: 동적 수문 안정성 확보

기후위기 이후 급변하는 수문환경 속에서 댐 운영이 지향해야 할 최종 목표는 명확하다. 과거의 운영체계가 외력의 변동폭이 좁은 상태에서의 '정적인 안정성'을 추구했다면 미래의 댐은 극한의 변동성과 불확실성 속에서도 기능을 잃지 않는 '동적 수문 안정성(Dynamic Hydrologic Stability)'을 확보해야 한다. 동적 수문 안정성이란 댐이 감당하기 어려운 폭우나 가뭄 등 극단적인 외력이 발생했을 때 시설물이 이를 유연하게 흡수하고 견뎌내며, 상황 변화에 따라 운영 기준을 능동적으로 변경하여 파국적인 실패를 방지하는 종합적인 능력을 의미한다.

이는 단순히 댐 콘크리트를 더 두껍게 만드는 차원의 문제가 아니다. 구조적인 견고함과 운영적인 유연함이 결합될 때 비로소 달성될 수 있다. 이를 위해 본 제언에서는 댐의 물리적 기초체력을 강화하는 '구조적 대책'과 판단 및 대응 체계의 회복탄력을 고도화하는 '비구조적 대책'의 두 가지 축을 제시한다. 구조적 대책이 거대해진 외력을 물리적으로 받아내는 '방패'라면 비구조적 대책은 그 방패를 가장 효율적으로 움직이는 '전술'이라 할 수 있다. 두 축이 유기적으로 작동할 때 댐은 기후위기라는 거대한 파도 속에서도 중심을 잃지 않고 본연의 기능을 수행할 수 있게 된다.

[표 1. 동적 수문 안정성 핵심 요소]

동적 수문 안정성의 핵심 요소	
구조적 대책 (기초체력)	비구조적대책 (회복탄력)
- 방류능력 확충 - 여수로 강화 - 퇴적관리 및 저수지 지형 유지	- 강우-유입 예측체계 개선 - 운영규칙 및 지침수위 개편 - 유역 단위 연계운영 체계구축

### 3.2 구조적 대책: 물리적 기반을 통한 외력 대응

구조적 대책의 핵심은 과거의 설계 빈도를 초과하는 강우와 유입량에 대해 댐이 물리적으로 버틸 수 있는 여력을 확보하는 것이다. 이는 방류 능력의 확충, 여수로의 내구성 강화, 그리고 저수지 지형의 보존이라는 세 가지 구체적인 전략으로 구현된다.

#### 3.2.1 방류능력 확충

기후위기로 인해 댐 유입량이 폭발적으로 증가하는 패턴이 고착화되면서 댐 방류능력 확충은 선택이 아닌 필수가 되었다. 유입량이 예측가능한 범위에서 완만하게 증가하던 시절에는 기존 수문으로도 수위 조절이 가능했지만, 단시간에 유역 전체가 포화되어 댐으로 물이 급격하게 쏟아져 들어오는 현재의 상황에서는 기존 시설만으로 대응하는 데 분명한 한계가 있다. 유입 속도가 방류 속도를 압도하면 수위는 순식간에 위험 수위에 도달하게 되고 운영자는 방류 여부를 고민할 시간조차 갖지 못한 채 위기 상황에 직면하게 된다. 따라서 방류능력을 물리적으로 늘리는 것은 단순히 물을 더 많이 빼내기 위함이 아니라 불확실한 상황에서 운영자가 올바른 의사결정을 내릴 수 있는 시간적 여유(Lead Time)를 벌어주는 가장 확실한 안전장치다.

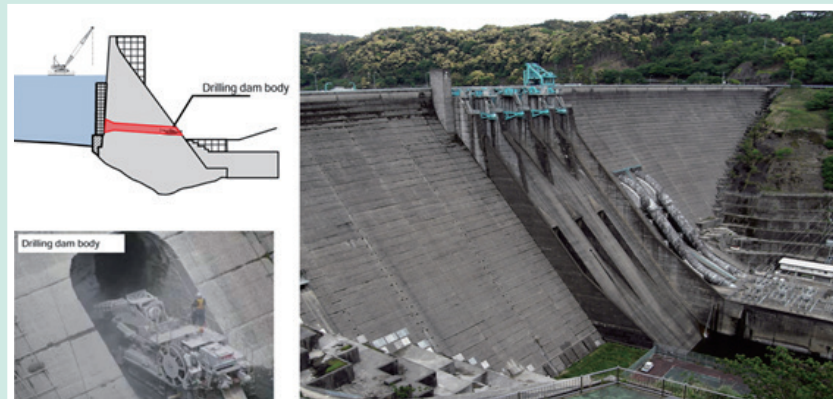
방류능력을 확충하는 방식은 댐의 지형적 조건과 구조적 특성에 따라 다양하게 적용된다. 최근 국제적으로 주목받는 사례들은 기존 댐의 운영을 방해하지 않으면서 획기적으로 용량을 늘리는 혁신적인 공법들을 보여준다.

· **일본 카노가와(Kanogawa) 댐의 터널식 방수로:** 카노가와 댐은 댐 양안이 가파른 급경사 지형으로 이루어져 있어 기존 여수로의 폭을 넓히거나 댐체를 증축하는 방식의 확장이 불가능한 조건이었다. 이러한 지형적 한계를 극복하기 위해 일본 기술진은 댐 본체와는 완전히 분리된 별도의 터널을 인근 산지 암반에 뚫어 새로운 물길을 만드는 '터널식 방수로' 방식을 채택했다. 이 공사의 핵심은 댐 운영에 영향을 주지 않으면서 산지 내부를 관통하여 하류 하천과 자연스럽게 연결되는 4.3km 길이의 터널을 굴착하는 것이었다. 터널 내부는 고속으로 흐르는 물의 압력을 견딜 수 있도록 특수 내마모성 콘크리트 라이닝으로 마감되었으며 유입부와 유출부의 형상은 수리적 충격을 최소화하도록 정밀하게 설계되었다. 평상시에는 기존 여수로를 통해 수위를 조절하다가 극한 홍수가 발생하면 이 터널을 개방하여 막대한 양의 물을 우회 배출함으로써 댐 수위 상승을 억제한다. 카노가와 댐 사례는 댐의 외형적 확장이 어려운 산악 지형에서 '제2의 안전로'를 확보하여 구조적 부하를 분산시키고 동적 안정성을 확보한 대표적인 성공 사례로 평가받는다. [그림 5]는 산지를 관통하여 신설된 터널 방수로의 웅장한 위용과 기존 댐과의 배치 관계를 잘 보여준다.



[그림 5. 일본의 카노가와(Kanogawa) 댐]  
(출처: '19년 SHIMIZU)

· **일본 츠루다(Tsuruda) 댐의 댐체 천공 방수로:** 츠루다 댐은 더욱 과감하고 고난도의 기술적 도전을 통해 방류능력을 확충했다. 여유 부지가 전혀 없는 협곡에 위치하여 외부 터널 굴착조차 어려운 상황에서, 기술진은 댐 본체인 콘크리트 구조물을 직접 뚫어 그 내부에 새로운 방류관을 설치하는 공법을 적용했다. 이미 엄청난 수압과 자중을 버티고 있는 거대 콘크리트 댐의 허리를 뚫는 것은 구조적 안정성을 해칠 수 있는 매우 위험한 작업이다. 이를 위해 정밀한 응력 해석을 바탕으로 댐체의 하중을 재분배하는 보강 작업이 선행되었으며, 특수 제작된 대형 굴착 장비가 콘크리트 내부를 밀리미터 단위로 절삭하며 터널을 형성했다. [그림 6]의 시공 장면에서는 굴착 장비가 댐체 내부를 파고드는 모습과 완성된 내부 방수로의 단면을 확인할 수 있다. 이렇게 만들어진 내부 방수로는 기존 상부 여수로와 별개로 댐 중하부에서 물을 뱉어낼 수 있어 홍수 조절 뿐만 아니라 퇴적물 배출 등 다목적으로 활용되며 댐의 홍수 대응 능력을 획기적으로 끌어올렸다. 이는 기존 시설물의 외형적 변화를 최소화하면서도 내부의 잠재력을 극대화하여 기후위기에 대응한 고도의 엔지니어링 성과다.



[그림 . 일본의 츠루다(Tsuruda) 댐의 방수로 시공]  
(출처: '13년 MLIT)

· **미국 오로빌(Oroville) 댐의 여수로 재건축:** 2017년 발생한 오로빌 댐 여수로 파손 사고는 방류 시설의 미세한 결함이 어떻게 댐 전체의 위기로 번질 수 있는지를 보여준 반면교사다. 당시 여수로 바닥 슬래브의 작은 균열로 고속의 물이 침투하여 휨과 들뜸 현상(Uplift)을 유발했고 순식간에 콘크리트 바닥이 뜰려나가며 댐 하부 사면이 붕괴 직전까지 몰렸다. 사고 이후 진행된 복구공사는 단순한 수리가 아닌 완벽한 재건설(개축)이었다. 기존의 얇은 슬래브를 모두 걷어내고 두께를 대폭 보강한 고강도 철근 콘크리트 슬래브를 재시공했다. 특히 슬래브 하부의 배수 시스템을 전면 재설계하여 침투수가 원활히 빠져나가도록 함으로써 양압력(Uplift Pressure) 발생을 원천 차단하였고 하류부의 감세공(Energy Dissipator) 구간에는 롤러 다짐 콘크리트(RCC)를 대규모로 적용하여 고속 방류 시 발생하는 엄청난 에너지를 안전하게 흡수하도록 했다. [그림 7]은 붕괴된 여수로와 이를 완벽하게 재건한 후의 모습을 비교하여 보여주며, 이는 여수호가 댐의 부속물이 아니라 댐 안전의 핵심 축임을 증명한다.



[그림 . 미국 오로빌(Oroville) 댐체 개선 사례]  
(출처: '18년 NBC News, '19년 Kiewit)

### 3.2.2 여수로 강화

여수로는 홍수 시 댐의 안전을 지키는 최후의 보루이지만, 동시에 가장 가혹한 물리적 환경에 노출되는 구조물이다. 최근의 집중 호우는 여수로가 감당해야 할 유속과 유량을 설계 한계치까지 밀어붙인다. 고속으로 흐르는 물은 콘크리트 표면을 깎아내는 마모 작용과 압력 강하로 인한 공기방울의 폭발에 의한 캐비테이션(Cavitation) 손상을 유발하여 구조물의 수명을 급격히 단축시킨다.

· **일본 후쿠지(Fukuji) 댐의 단계적 개량:** 후쿠지 댐은 노후화된 여수로가 기후위기형 홍수를 감당하기 어렵다고 판단하고 대대적인 개량 공사를 단행했다. 기존의 하류 측 여수로로는 좁은 암반 사면을 따라 설치된 단순 슬래브 형태였는데 반복적인 방류로 인해 표면 박리와 기초부 세굴 위험이 높았다. 이에 대한 해법으로 댐 운영을 중단하지 않은 채 기존 여수로를 구간별로 절단하고 철거한 뒤 고강도 내마모 콘크리트로 재시공하는 단계적 보강 방식을 택했다. 더불어 댐 상류 측에는 유량 조절이 정밀하게 가능한 다문식 여수로(spillway)를 신설하여 방류 경로를 이중화했다. [그림 8]은 기존의 낡은 여수로가 현대적인 구조물로 대체되고 신규 수문이 추가된 모습을 보여준다. 이러한 이원화 전략은 한쪽 여수로에 문제가 생기더라도 다른 쪽으로 방류를 지속할 수 있는 예비력을 확보해 주며(Redundancy), 홍수 규모에 따라 탄력적인 운영을 가능하게 한다. 후쿠지 댐의 사례는 여수로 강화가 단순한 보수가 아니라 변화된 수자원 환경에 맞춰 구조물의 성능 등급 자체를 상향시키는 과정임을 잘 보여준다.



<a. 하류측 기존 여수로>



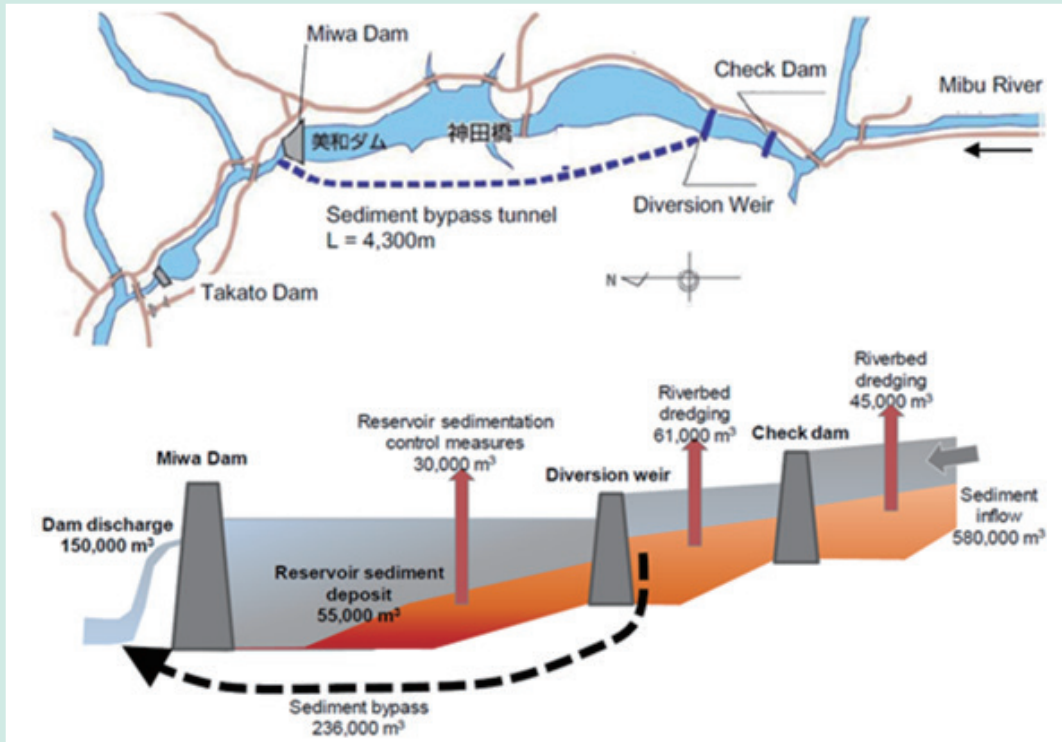
<b. 상류측 증설 여수로>

[그림 8. 일본 후쿠지(Fukuji) 댐 여수로]  
(출처: '09년 위키미디어)

### 3.2.3 퇴적관리 및 저수지 지형 유지 전략

기후위기로 인한 집중호우는 댐 상류 유역을 침식시켜 막대한 양의 토사를 저수지로 쏟아붓는다. 이렇게 유입된 토사는 댐의 유효저수용량을 잠식할 뿐만 아니라 저수지 바닥 지형을 변형시켜 취수와 방류의 흐름을 방해한다. 과거에는 퇴적을 댐의 수명이 다할 때까지 서서히 일어나는 현상으로 보았으나, 이제는 몇 번의 돌발 홍수만으로도 기능이 마비될 수 있는 급성 위험 요인이 되었다. 따라서 준설과 같은 사후적 조치를 넘어 토사 유입 자체를 차단하는 근본적인 구조적 대책이 요구된다.

· **일본 미와(Miwa) 댐의 퇴적 우회 터널(Sediment Bypass Tunnel):** 미와 댐은 퇴적 문제 해결을 위해 전 세계적으로도 가장 선진적인 방식인 '퇴적 우회 터널'을 도입했다. 이 시스템의 원리는 홍수 시 상류에서 밀려오는 고농도 흙탕물이 저수지로 들어오기 전에 이를 가로채 댐 하류로 바로 배출하는 것이다. 이를 위해 댐 상류 하천에 분기 위어(Diversion Weir)를 설치하여 맑은 물은 저수지로 보내고, 토사가 섞인 흐름은 별도로 건설된 4.3km 길이의 터널로 유도한다. 이 터널을 통해 연간 유입되는 토사의 약 절반 이상이 저수지를 거치지 않고 하류로 빠져나간다. [그림 9]의 모식도는 이러한 우회 시스템이 어떻게 저수지의 퇴적을 방지하고 바닥 지형을 보존하는지 직관적으로 보여준다. 이 방식은 댐의 저수 용량을 반영구적으로 보존할 수 있게 할 뿐만 아니라 저수지 내 수질 악화를 방지하고 하류 하천에 필요한 토사를 공급하여 생태계 균형을 맞추는 부수적인 효과까지 얻을 수 있다. 미와 댐의 사례는 퇴적을 '치워야 할 쓰레기'가 아니라 '흐름을 제어해야 할 유체'로 바라보는 공학적 패러다임의 전환을 보여주는 구조적 대책의 우수한 사례라 할 수 있다.



[그림 9. 일본 미와(Miwa) 댐 퇴적우회 터널]  
(출처: '22년 international hydropower association)

### 3.3 비구조적 대책

구조적 대책이 물리적인 방패라면 비구조적 대책은 그 방패를 언제, 어떻게 사용할지 결정하는 정교한 전술이다. 기후위기 시대의 댐 운영은 더 이상 과거의 고정된 매뉴얼에 의존할 수 없다. 예측의 정확도를 높이고 운영 규칙을 상황에 맞게 변경하며 유역 전체를 하나의 시스템으로 묶어 대응하는 유연함이 필수적이다. 비구조적 대책은 '예측-판단-연계'라는 세 가지 축을 중심으로 댐의 지능(Intelligence)을 고도화하는 과정이다.

#### 3.3.1 강우-유입 예측체계 개선

기후위기 이후 강우의 시공간적 변동성이 커지면서 전통적인 통계 기반의 예측은 한계에 봉착했다. 동일한 100 mm의 비가 예보 되더라도 그것이 1시간 만에 쏟아지는지 24시간에 걸쳐 내리는지, 혹은 댐 바로 위로 떨어지는지 유역 가장자리에 내리는지에 따라 댐으로 들어오는 유입량은 매우 달라진다. 이러한 변동성 큰 변수는 운영자가 실시간으로 내려야 하는 의사결정의 불확실성을 심각한 수준으로 증폭시킨다.

따라서 예측체계의 개선은 단순한 수치적 정확도(Accuracy)를 높이는 것을 넘어 운영자가 감당해야 할 불확실성(Uncertainty)을 관리 가능한 범위로 좁히는 데 초점을 맞춰야 한다. 레이더 강우 데이터, 초단기 기상 예측 모델, 인공지능(AI) 기반 유입량 분석 등 첨단 기술을 융합하는 것은 기본이다.

여기서 한 걸음 더 나아가 예측 정보를 운영자가 즉각 활용할 수 있는 '의사결정 지원 정보'로 가공하는 과정이 중요하다. 예컨대 "내일 유입량이 500 일 것이다"라는 단정적 예측 대신 기상 변동성을 고려하여 "최소 300 에서 최대 800 사이의 유입이 예상되며, 800 시나리오 발생 확률은 30 %이다"와 같은 '범위(Range)' 기반의 정보를 제공해야 한다. 이를 통해 운영자는 최악의 시나리오를 사전에 가정하여 방류 시점을 앞당기거나 사전 수위 조절 폭을 결정하는 등 선제적이고 탄력적인 대응 전략을 수립할 수 있게 된다.

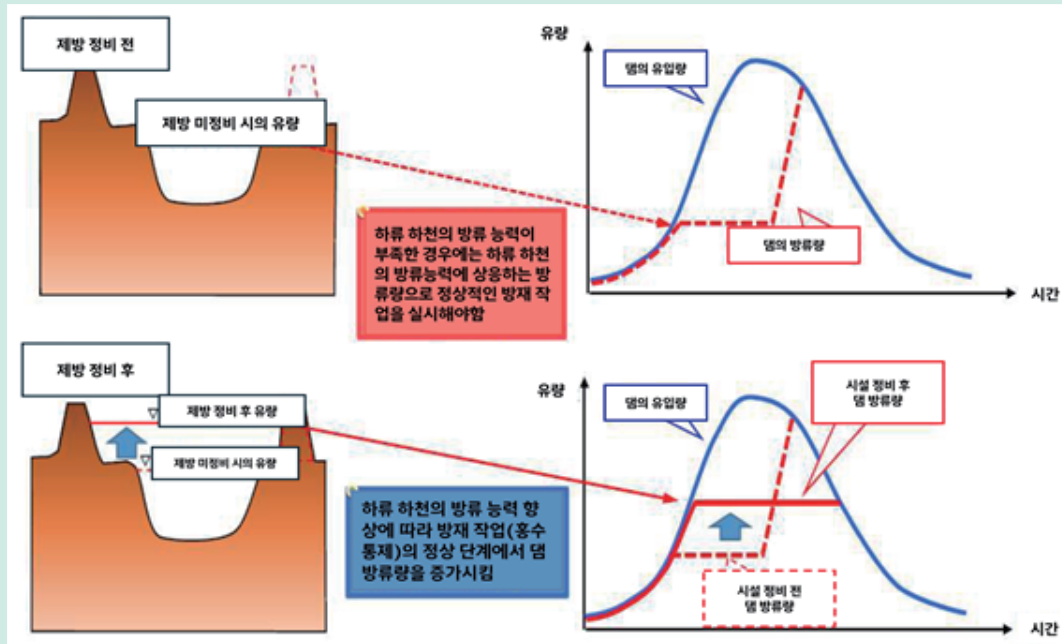
### 3.3.2 운영규칙 및 운영수위 변화

기존의 댐 운영규칙은 과거의 기후 데이터를 바탕으로 설정된 '고정된 제한수위'를 절대적인 기준으로 삼았다. 그러나 극단적인 폭우가 빈발하는 현재 환경에서 이러한 경직성은 오히려 독이 될 수 있다. 비가 오지 않아도 제한수위를 지키기 위해 물을 비워야 하거나 반대로 홍수 위험이 임박했음에도 날짜가 되지 않았다는 이유로 방류를 주저하게 만들기 때문이다.

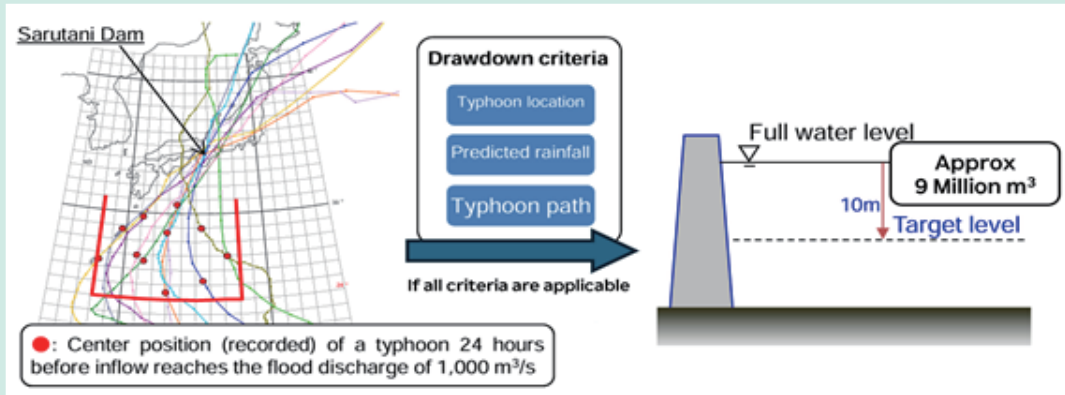
댐 운영규칙 변화의 핵심은 '조건 기반(Condition-based) 운영'으로의 전환이다. 이는 날짜나 계절 같은 고정된 기준이 아니라 실시간 기상 상황과 하류 하천의 상태를 종합적으로 고려하여 운영 기준을 탄력적으로 적용하는 방식이다.

· **하류 하천 정비 연계 운영:** 댐 방류량 결정의 가장 큰 제약 조건은 하류 하천이 감당할 수 있는 능력, 즉 통수능이다. [그림 10]은 하류 하천의 제방 정비 전후에 따라 댐 운영이 어떻게 달라져야 하는지를 명확히 보여준다. 제방이 정비되어 하류가 더 많은 물을 흘려보낼 수 있게 되면 댐은 홍수 시 더 과감하게 방류량을 늘릴 수 있다. 이는 댐 수위가 위험 수준까지 차오르는 것을 방지하고 결과적으로 댐 자체의 홍수 조절 용량을 더 확보하는 효과를 가져온다. 즉 댐과 하천을 별개의 시설이 아닌 유기적으로 연결된 하나의 시스템으로 보고 하류 상황이 개선되면 댐 운영 규칙도 이에 맞춰 능동적으로 변경해야 한다.

· **일본 사루타니(Sarutani) 댐의 사전방류 규칙:** 일본 사루타니 댐은 태풍 대응에 있어 혁신적인 운영 규칙을 도입했다. 과거처럼 막연히 태풍이 온다고 수위를 낮추는 것이 아니라 태풍의 위치, 예상 강우량, 이동 경로 등 구체적인 조건들이 설정된 기준값(Criteria)을 충족하면 즉시 목표 수위까지 사전 방류를 시행하도록 규칙을 명문화했다. [그림 11]은 이러한 조건부 운영의 개념을 시각화하고 있다. 태풍 중심이 특정 구역에 진입하고 예측 강우량이 홍수 유발 수준에 도달하면 댐 관리자는 복잡한 행정 절차나 주관적 고민 없이 즉각적으로 수위를 낮추는 조치에 돌입한다. 이는 급변하는 기상 상황에서 운영자가 머뭇거리지 않고 골든타임을 확보하게 해주는 강력한 비구조적 안전장치다.



[그림 10. 하류하천 정비에 따른 운영규칙 변경 개념도]  
(출처: '13년 MILT)



[그림 11. 하류하천 정비에 따른 운영규칙 변경 개념도]  
(출처: '13년 MILT)

### 3.3.3 유역 단위 연계운영 체계 구축

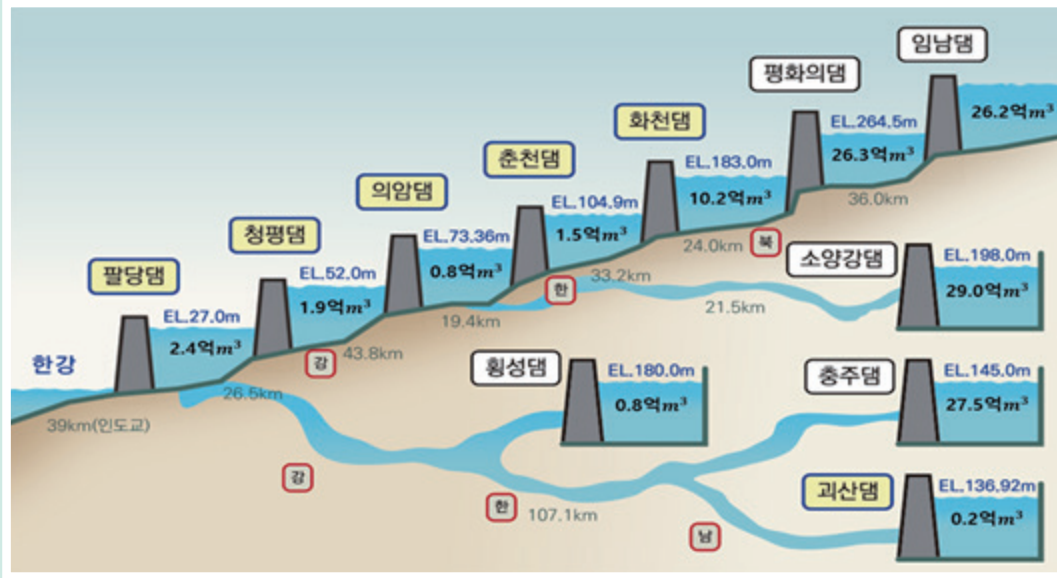
기후위기로 인한 홍수는 국지적이고 동시다발적으로 발생한다. 단일 댐 하나가 자신의 유역만 책임지는 '점(Point)' 단위의 대응으로는 한계가 명확하다. 상류 댐이 방류한 물이 하류 댐의 홍수 부담을 가중시키거나 지천에서 불어난 물이 분류의 수위를 예상치 못하게 상승시키는 등 복잡한 상호작용이 일어나기 때문이다. 따라서 유역 내 모든 수리 시설을 하나로 묶어 통합적으로 조절하는 '유역 단위 연계운영'이 필수적이다.

· **일본 요도강(Yodo River) 유역의 통합 관제:** 일본 요도강 유역은 선진적인 연계운영의 모범을 보여준다. [그림 12]에서 볼 수 있듯이 유역 곳곳에 설치된 강우 레이더와 수위 계측기에서 수집된 정보가 중앙 통합 운영센터로 실시간 전송된다. 센터는 이 정보를 분석하여 각 댐에 최적의 방류량과 목표 수위를 지시한다. 예컨대 특정 댐 유역에 폭우가 집중되면 인근 댐의 방류를 일시적으로 줄여 하류 하천의 수위 상승을 억제하거나 가뭄 시에는 여유가 있는 댐의 물을 우선 공급하여 전체적인 물 안보를 지켜낸다.

· **국내 한강 수계의 연계 잠재력:** 우리나라 한강 수계 역시 소양강댐, 충주댐과 같은 거대 다목적댐부터 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐으로 이어지는 발전용 댐들이 연속적으로 배치된 독특한 구조를 가지고 있다. [그림 13]의 계통도는 이러한 상·하류 댐들의 유기적인 연결성을 잘 보여준다. 이들 댐이 개별적인 목적(발전 혹은 용수 공급)에만 매몰되지 않고 홍수 조절이라는 공동의 목표 아래 통합 운영된다면 그 효과는 댐을 몇 개 더 건설하는 것 이상의 가치를 창출할 수 있다. 정보 공유 플랫폼을 구축하고 운영 주체 간의 협력 거버넌스를 강화함으로써 댐 운영은 개별 시설의 방어를 넘어 유역 전체의 안전을 도모하는 '면(Area)' 단위의 대응으로 진화해야 한다.



[그림 12. 일본 YODO 강 댐 연계운영]  
(출처: '13년 MILT)



[그림 13. 한강수계 주요 다목적댐의 계통도]

## 4. 국제적 관점에서 본 탄력적 유지관리의 확장

### 4.1 기후위기형 수문환경

기후위기는 특정 국가나 특정 유역에 국한된 지엽적인 문제가 아니다. 최근 수십 년간 전 세계 주요 댐 보유국에서 관측되는 수자원 이상현상의 변화를 추적해 보면, 마치 약속이나 한 듯 유사한 패턴의 위기가 동시다발적으로 전개되고 있음을 알 수 있다. 강우량의 절대적 증가, 강우 집중도의 극단적 심화, 이로 인한 충수 실패와 가뭄의 장기화, 그리고 퇴적 속도의 가속화 등은 이제 전 지구적인 '공통 분모'가 되었다.

미국 서부의 대형 댐들이 겪고 있는 여수로의 구조적 피로 문제는 한국의 노후 댐이 직면한 문제와 다르지 않으며, 일본의 산악 지형 댐들이 겪고 있는 급격한 유입량 변동은 한국의 소양강댐이나 충주댐이 마주한 현실과 정확히 맞닿아 있다. 유럽과 아시아를 막론하고 퇴적물 증가로 인한 저수 용량 감소가 댐의 수명을 위협하고 있다는 많은 보고도 역시 끊이지 않는다.

이러한 현상은 기후위기가 만들어낸 '변화된 외력'이 지리적 경계를 넘어 보편적인 구조적 위협으로 작용하고 있음을 시사한다. 따라서 우리가 구축해야 할 탄력적 유지관리 체계는 국내의 경험과 데이터에만 갇혀 있어서는 안 된다. 국경을 초월하여 발생하는 수자원의 동조화(Synchronization) 현상을 이해하고, 이를 바탕으로 국제적 표준과 협력 구조 속에서 대응 전략을 모색해야 한다. 이제 댐 안전 관리는 개별 국가의 '독자 생존' 전략이 아닌, 글로벌 차원의 '집단 지성'을 활용한 전략으로 확장되어야 할 시점이다.

### 4.2 국가별 대응 전략의 차이와 상호 학습

비록 직면한 문제는 유사할지라도, 각국은 고유한 지형적 특성과 사회·법적 환경에 따라 서로 다른 방식의 해법을 발전시켜 왔다. 이러한 국가별 대응 전략의 차이는 한국이 독자적인 'K-댐 유지관리 모델'을 정립하는 데 있어 매우 중요한 벤치마킹 대상이자 자산이 된다.

- **일본:** 정밀 예측과 연계 운영의 고도화 일본은 하드웨어적 한계를 소프트웨어로 극복하는 데 탁월한 역량을 보여준다. 일본은 세계 최고 수준의 기상 레이더망과 수문 관측소 데이터를 통합하여 단일 플랫폼에서 강우와 유입량을 실시간으로 예측·분석하는 체계를 갖추고 있다. 특히 주목할 점은 이러한 예측 정보가 단순히 '정보'에 머물지 않고 댐 수문 조작과 즉각적으로 연동된다는 것

이다. 예측된 강우량에 따라 사전 방류가 자동으로 검토되고, 유역 내 다수의 댐이 유기적으로 협력하여 홍수량을 분담하는 '다댐 연계 시스템'은 전 세계에서 가장 앞서 있다. 이는 국토가 좁고 하천 경사가 급하여 홍수 도달 시간이 극히 짧은 일본의 지리적 불리함을 극복하기 위한 필연적 선택이었으나, 기후위기로 유입 변동성이 커진 현재에는 가장 강력한 대응 무기가 되고 있다.

- **미국:** 대규모 구조적 보강과 안전 기준의 재정립 반면 미국은 압도적인 자본과 기술력을 바탕으로 댐의 물리적 성능 자체를 업그레이드하는 데 집중하고 있다. 2017년 오로빌 댐 사고는 미국 댐 안전 관리의 분수령이 되었다. 사고 이후 미국은 여수로 설계 기준을 대폭 강화하고, 노후화된 대형 댐들의 콘크리트 구조와 기초부 안정성을 전면 재검토하여 대규모 보강 공사를 진행하고 있다. 특히 극한 홍수(PMF)에 대비해 기존 시설의 용량을 초과하는 비상 방류 시설을 신설하거나, 에너지 감쇄 구조물의 성능을 획기적으로 개선하는 등 기초체력 확보를 위한 하드웨어 중심의 '장기적 구조물 안정성 확보'에 주력한다.

- **유럽:** 유역 생태와 공존하는 통합 물관리 유럽, 특히 스위스와 독일 등은 댐을 단순한 치수·이수 시설이 아닌 유역 생태계의 일부로 바라보는 통합적 접근을 취한다. 노후 댐을 재건축하거나 신규 댐을 건설할 때 홍수 조절 능력뿐만 아니라 하천의 생태적 연속성, 토사 이동의 자연스러운 흐름 등을 종합적으로 고려한다. 이는 댐 운영의 지속가능성을 높이고, 환경적 가치를 중시하는 미래 사회의 요구에 부합하는 모델을 제시한다.

한국은 이러한 각국의 강점을 전략적으로 융합할 수 있는 최적의 위치에 있다. 일본의 정밀한 예측·연계 운영 기술, 미국의 과감한 구조적 보강 기준, 그리고 유럽의 생태·환경적 관리 철학을 우리 실정에 맞게 재해석하고 통합한다면, 그 어느 나라보다 완성도 높은 탄력적 유지관리 체계를 구축할 수 있을 것이다.

### 4.3 글로벌 유지관리 네트워크 구축

기후위기 대응에 있어 국제 교류는 선택 사항이 아닌 필수 생존 전략이다. 기상 이변은 대륙 단위의 광역적인 시스템에 의해 발생하므로, 한반도 주변의 데이터만으로는 다가올 위험을 온전히 예측하기 어렵다. 따라서 국제대담회(ICOLD)와 같은 국제기구를 중심으로 전 세계 댐 전문가들이 연결된 '글로벌 유지관리 네트워크'를 구축하고, 이를 실질적인 정보 공유의 장으로 활용해야 한다.

이 네트워크의 핵심 기능은 '위험의 조기 경보(Early Warning)와 상호 학습'이다. 특정 국가에서 기후변화로 인해 발생한 새로운 유형의 댐 사고나 운영 실패 사례는, 유사한 환경에 처한 다른 국가들에게는 미래의 재난을 막을 수 있는 가장 확실한 경고 신호가 된다. 예를 들어, 해외의 한 댐에서 집중호우 시 퇴적물로 인해 취수구가 막히는 사고가 발생했다면, 우리는 이를 교훈 삼아 국내 댐들의 취수구 구조와 퇴적 상태를 선제적으로 점검할 수 있다.

또한, 데이터의 표준화와 공유는 기술적 불확실성을 줄이는 데 크게 기여한다. 댐의 유입량, 저수지 지형 변화, 구조물 열화 데이터 등을 국가 간에 교차 분석하면, 특정 기술이나 공법의 효과를 실증적으로 검증할 수 있다. 이는 개별 국가가 독자적으로 연구를 수행할 때 발생하는 비용과 시간을 획기적으로 단축시키고, 검증된 기술을 빠르게 현장에 적용할 수 있게 해 준다. 결국, 국제 네트워크는 각국의 다양한 경험과 지식이 모여 '집단 면역'을 형성을 위한 거버넌스를 구축하는 과정이며, 이를 통해 우리는 전 지구적 기후위기라는 거대한 파고를 함께 넘을 수 있는 댐 운영 및 유지관리의 회복력을 갖게 된다.

## 5. 맺음말

기후위기로 인한 수문환경의 변화는 이제 일시적인 이상 징후가 아니다. 이는 댐 운영자가 매일 마주해야 할 새로운 '상수(Constant)'이자, 모든 의사결정의 출발점이 되는 '기본 조건'으로 자리 잡았다. 집중호우의 시간적 편중, 유입 반응의 비선형성, 충수 기회의 실종, 그리고 퇴적의 가속화는 과거 우리가 신뢰했던 통계적 안정성을 송두리째 무너뜨리고 있다. 설계 당시의 가정과 기준이 급변하는 현실과 괴리되는 이 시점에서, 과거의 정답을 고수하는 것은 더 이상 안전을 보장하지 못한다.

따라서 우리는 댐 운영의 최종 목표를 재설정해야 한다. 그것은 바로 '동적 수자원 안정성(Dynamic Hydro Stability)'의 확보다. 이는 고정된 수위나 규칙을 지키는 것에 매몰되지 않고, 예측 불가능하게 변동하는 외력을 실시간으로 흡수하고 유연하게 적응하여 댐의 본질적 기능을 유지하는 능력이다. 미래의 댐은 강해져야 할 뿐만 아니라, 영리하고 유연해져야 한다.

당연하게도 동적 수자원 안정성은 단일 대책으로 달성될 수 없다. 댐의 물리적 한계를 극복하는 '구조적 대책'과 운영의 지능을 높이는 '비구조적 대책'이 완벽하게 결합될 때 비로소 완성된다. 방류능력을 확충하고 여수로를 보강하며 퇴적을 근본적으로 차단

하는 구조적 대책은 거대해진 외력에 맞서는 튼튼한 '방패'가 되어줄 것이다. 동시에, AI 기반의 예측 시스템을 도입하고 운영 규칙을 유연화하며 유역 전체를 연계하는 비구조적 대책은 그 방패를 가장 적절한 시점에 사용하는 정교한 '전술'이 될 것이다. 두 축은 상호 보완적이며, 어느 하나라도 결여된다면 기후위기형 변동성을 감당할 수 없다.

마지막으로, 댐 유지관리에 임하는 우리의 태도 또한 변화해야 한다. 과거의 댐 관리가 정해진 매뉴얼을 준수하는 '관리(Administration)'의 영역이었다면, 미래의 댐 관리는 끊임없이 변화하는 상황에 맞춰 최적의 해법을 찾아가는 '경영(Management)'과 '대응(Response)'의 영역이다. 기후위기 시대의 유지관리는 한 번 정해진 정답을 영원히 고수하는 것이 아니라, 변화하는 환경에 맞춰 '최적해'를 지속적으로 갱신해 나가는 과정'이어야 한다. 어제의 안전 기준이 오늘 위험할 수 있음을 인정하고, 끊임없이 시설을 보강하고 규칙을 다듬어야 한다.

이러한 혁신은 국내의 치열한 노력과 국제적인 연대가 결합될 때 더욱 견고해진다. 한국이 축적한 경험을 세계와 나누고, 세계의 실패와 성공을 우리의 교훈으로 삼는 개방적인 태도가 필요하다. 탄력적 댐 유지관리 종합대책은 단순히 기술적인 제안서가 아니다. 이것은 불확실성이 지배하는 미래 속에서도 국민의 생명과 안전을 지켜내겠다는 우리 세대의 다짐이자, 지속 가능한 물 안보를 향한 구체적인 청사진이다. 동적 수자원 안정성을 중심에 두고, 구조적·비구조적 혁신과 국제적 협력을 아우르는 통합적 사고가 현장에 뿌리내릴 때, 우리 댐은 기후위기라는 거대한 도전 앞에서도 굳건히 그 역할을 다할 것이다.

### 참고문헌

- MLIT (Japan). (2013). Advanced technologies to upgrade dams under operation. Japan Commission on Large Dams (JCOLD).
- International Commission on Large Dams. (2009). Bulletin 147: Sedimentation and sustainable use of reservoirs in river systems. Paris, France: Author.
- International Commission on Large Dams. (2012). Bulletin 142: Safe passage of extreme floods. Paris, France: Author.
- International Commission on Large Dams. (2017). Bulletin 154: Dam safety management: Operational phase. Paris, France: Author.
- Independent Forensic Team. (2018). Independent forensic team report: Oroville Dam spillway incident. California Department of Water Resources.
- IPCC. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). (2018). Guidelines for upgrading of existing dams. Water and Disaster Management Bureau, Japan.
- NASA Earth Observatory. (2024). Sau reservoir drying event. NASA.
- World Meteorological Organization. (2023). State of global water resources 2022. Geneva, Switzerland: WMO.