

기후변화 고려 댐 안전성 강화사업 사례분석

Case Analysis for Dam safety Improvement Project



곽상신 한국수력원자력
수력처 부장
kwakssgood@khnp.co.kr

요약 (Abstract)

최근 기후변화에 의한 기상이변으로 국지성 호우에 의한 홍수피해가 발생하는 등 댐 시설물에 대한 안전성과 유지관리가 중요해지고 있다. 하지만 국내 댐의 경우 2023년 통계기준으로 총 615개 댐의 30년 이상 노후화 비율이 63.4%로 국내 기반시설 중 가장 높은 상황으로 댐시설물의 안전성 강화가 중요해지고 있다. 이에 본 고에서는 댐의 안전성 강화를 위해 국내외 발생하였던 사고사례와 구조 개선사례를 조사 및 분석하고, 목적과 효과별로 댐의 구조적 개선대책 유형을 소개하고자 한다.

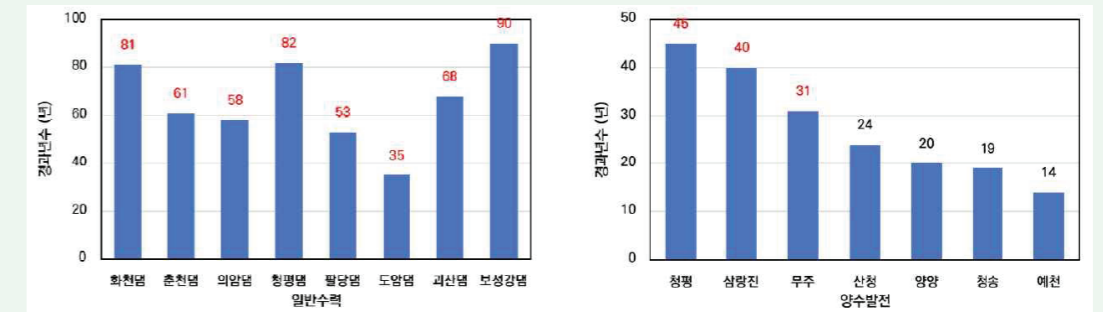
키워드: 댐, 노후화, 사고사례, 안전성 저하인자, 월류, 누수, 차수, 구조적 개선대책

Keywords: Dam, Aging, Failure Case, Safety Degradation Factors, Overtopping, Seepage, Seepage Cutoff, Structural Rehabilitation

1. 현황 및 배경

최근 기후변화의 영향으로 국지적인 기상이변이 속출하고 있다. 2023년 7월 국내 전역에서 발생한 호우로 인해 많은 피해가 발생하였다. 청주 오송지하차도 침수사고, 충북 괴산지역 달천강 하류 침수사고 및 경북 예천지역 대규모 산사태 등 전국적으로 수십명의 사상자와 재산피해가 발생하였다.

기상이변 현상 증가와 더불어 국내 인프라시설의 노후화도 증가하고 있다. 특히 국내 댐 시설물은 2023년 통계기준으로 총 615개 댐으로 30년 이상 노후화 비율이 63.4%로 국내 기반시설 중 가장 높은 상황이다. 이에 정부는 국내 댐시설의 유지관리정책을 기존의 사후보수 관점에서 성능 및 예방중심으로 패러다임을 전환하고 있다. 또한 2025.10부터 국내 발전용댐을 운영하고 있는 한국수력원자력(이하 한수원)도 수자원정책을 총괄하는 기후에너지환경부 산하기관으로 편입됨에 따라 정부의 댐관리기본계획의 적극 이행 등 정부정책에 따라 댐 안전성강화사업을 추진하고 있다.



[그림 1] 한수원 발전용댐 준공 후 경과년수

2. 국내외 댐 사고사례 분석

한수원 발전용댐의 장기적 사용을 위한 건전성 관리 대책을 마련하기 위한 일환으로 국내외 댐의 사고사례를 수집하고 댐의 부재별 안전성 저하원인을 분석하였다.

또한, 댐의 기본 시설물인 댐체, 여수로, 기초 및 양안부, 여수로 강재수문의 상태가 댐의 성능에 가장 중요한 부분이며, 부재별 안전성 저하원인으로는 사면 안전성, 침하, 균열, 그리고 수축 이음부의 상태가 가장 중요한 영향 인자임을 확인하였다.

2.1 댐 사고사례

한수원 발전용댐의 경우 괴산댐에서 2차례(1980년, 2023년) 사고가 발생하였다. 1980년 괴산댐 월류 사고는 당시 기록적인 폭우에 영향을 받았으며, 2023년 월류는 한강홍수통제소의 지령에 따라 홍수조절기능을 수행하였음에도 예상을 초과하는 강우량으로 인해 월류가 발생하였다.

가. 괴산댐 월류('23.7.15)

남한강 지류인 달천에 위치한 괴산댐은 한수원이 관리하는 콘크리트 중력식 발전용 댐으로 1957년에 준공되었다. 댐제원은 댐 마루 표고 137.65 m, 총 저수용량 1,533만 톤으로서 지난 1980년 7월 22일 집중호우로 월류(댐마루로부터 2.5 m)가 발생하였고, 2023년 7월 15일 집중호우시에도 월류(댐마루로부터 0.53 m)가 발생하였다.

괴산댐은 유역면적(671 km², 소양강 대비 1/4수준) 대비 댐 저수용량(1,530만톤, 소양강 대비 1/190수준)이 적어 호우 발생시 급격히 수위가 증가하는 특성을 갖고 있다. 이는 한국전쟁 당시 파괴된 전력설비의 긴급한 복구와 신규 개발이 절실함에 따라 단시일 내에 완공이 가능한 소계곡에 댐을 건설하였기 때문이다.

괴산댐은 월류시에도 댐설계기준에서 정한 전도, 활동, 지지력에 대한 안정조건을 만족하는 것으로 평가되었다.(제6차 정밀안전진단, 2023)



[그림 2] 괴산댐 월류 당시 전경

'23년 7월 홍수기간동안 괴산댐 월류 외에도 달천 하류지역인 괴산군, 충주시에 많은 침수피해가 발생하였다. 침수피해가 컸던 괴산군 불정면 지역의 경우 집중호우에 따른 하천유입량 증가로 괴산댐 월류가 발생(2023.07.15. 06:30)하기 전(2023.07.15. 04:00)부터 하천수위가 제방고(해발표고 94.05 m)를 월류하기 시작하였으며, 불정면 목도교 지역은 괴산댐을 월류한 물이 도착(당시 유속 약 3 m/s 추정)할 때까지 이미 약4시간 동안 지속적으로 침수가 일어났을 것으로 추정된다.

나. 해외사례

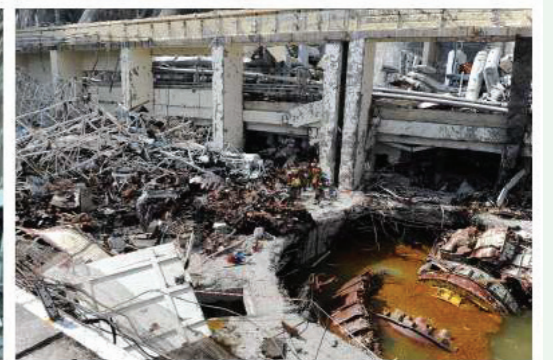
해외의 댐 사고는 월류로 인한 사고가 8건, 부실시공 및 설계 결함으로 인한 사고가 5건, 외부의 공격으로 인한 사고가 4건, 화재 및 산사태 등으로 인한 사고가 4건, 그리고 관리 미흡으로 인한 사고가 2건으로 총 23건의 사고사례가 1928년에서부터 2023년까지 발생하였다. 아래는 국외 발전용댐의 사고 전경을 보여주고, [표 1]에 사고사례에 대한 세부내용을 정리하였다(Wikipedia, 2024a).



[그림 3] 1956년 미국 Schoellkopf Power Station 붕괴사고
*출처: Smithsonian Magazine, 2017



[그림 4] 1957년 중국 Banqiao Dam 붕괴사고
*출처: 나무위키, 2024



[그림 5] 2009년 러시아 Sayano-Shushenskaya Dam 사고
*출처: The Guardian, 2009

[표 1] 국외 댐 사고사례

국가명	댐명	발생년도	댐 형식	사고내용	피해원인	사고규모
이탈리아	Sella Zerbino Dam	1935	콘크리트 중력댐	월류 및 붕괴	지반불량 시공오류	인명 피해 111명
미국	Schoellkopf Power Station	1956	콘크리트 중력댐	발전소 붕괴	발전소 후면누수 및 암벽 붕괴	인명 피해 8명
프랑스	Malpasset Dam	1959	콘크리트 중력댐	댐 붕괴	지반조사 (단층대) 부실	인명 피해 423명
이탈리아	Vajont Dam	1963	콘크리트 중력댐	하류 산사태	부적절한 댐 운영	인명 피해 2,000명
중국	Banqiao Dam	1975	필댐	댐군 연쇄붕괴	설계 및 시공오류	인명 피해 170,000명
미국	Teton Dam	1976	필댐	댐 붕괴	수압 할렬 Piping	인명 피해 11명
인도	Machchhu Dam	1979	콘크리트 중력댐	월류 제방붕괴	설계오류 수문결함	인명 피해 25,000명
미국	Lake Dam	1982	콘크리트 중력댐	흙댐 붕괴	유지관리 미흡	인명 피해 3명
오스트레일리아	Dartmouth Dam	1990	필댐	제어시스템 파괴	penstock 점검 후 작업장비 무단방치	-
스위스	Grande Dixence Dam	2000	콘크리트 중력댐	하류 산사태	penstock 용접부 결함	인명 피해 3명
미국	Taum Sauk	2005	콘크리트 중력댐	월류 댐 파손	수위센서 결함	인명 피해 5명
러시아	Sayano-Shushenskaya Dam	2009	콘크리트 중력댐	발전소 침수	터빈 불량(진동)	인명 피해 75명
인도	Srisaïlam Dam	2009	콘크리트 중력댐	발전소 침수	설계초과 홍수량	피해면적 1,500 km ²
인도	Vishnuprayag hydro electric station	2013	콘크리트 중력댐	댐 붕괴	부적절한 댐 운영	피해 면적 20 km ²
인도	Dhauligang a hydro electric station	2013	콘크리트 중력댐	댐 붕괴	상류 산사태	인명 피해 60명
인도	Uri-II Power Station	2014	콘크리트 중력댐	주변암기 화재	기술적결함	-
미국	Oroville Dam	2017	콘크리트 중력댐	여수로 붕괴	구조결함 관리부실	피해 면적 2,500 km ²

상기 사고 중 Oroville Dam의 경우 2018년 미국 주립 댐 안전 관리 협회의 보고서에 따르면 가장 큰 원인은 구조적 결함 및 유지관리 부실에 있었다. 여수로의 콘크리트 슬래브가 얇고, 보강이 불충분하며 배수층이 불량하여 물이 아래로 침투함으로써 콘크리트가 이탈하거나 침식되는 사고가 발생하였다. 또한, 사고 발생 이전에도 여수로 균열과 누수가 반복적으로 보고되었으나, 근본적인 보수 없이 임시 수리만 반복함으로써 유지관리 부실의 모습을 보였다. 이후 전체 여수로를 재설계하였으며, 보강용 철근량을 증가시키고 여수로의 최소 두께를 증가시키는 후속 조치가 이루어졌다 (TEAM, 2018).

2.2 댐 안전성 저하 주요인자 분석

가. 필댐 : 제체 및 사면 누수, 침하

정밀안전진단성능평가 세부지침에 따르면, 필댐의 댐마루, 상류사면, 그리고 하류사면의 평가 기준에서 누수, 균열, 침하, 변형, 사면 불안정 등의 평가지표가 성능평가 항목으로 규정되어있다 (국토안전관리원, 2021). 그 중에서도 부재별 평가 유형이 중요 결함에 해당하는 것은 아래와 같다.

- 댐마루 평가지표 : 균열, 침하, 변위, 제체유실, 사면 불안정
- 상류사면 평가지표 : 누수, 침하, 차수벽 노후화, 사면 불안정, 사면 보호상태, 사면침식
- 하류사면 평가지표 : 누수, 사면 불안정, 사면 보호상태, 침하

따라서, 필댐의 부재별 안전성에 직접적인 영향을 미치는 인자 중 가장 큰 영향을 미치는 인자는 제체 및 사면에 대한 누수와 침하이다.

나. 콘크리트 댐 : 균열, 수축 이음부(Joint)

콘크리트 댐의 경우, 부재는 댐마루, 상류면, 그리고 하류면으로 구분하여 평가 기준을 제시하고 있고, 균열, 수축이음부, 박락, 단차, 그리고 누수가 성능평가 항목으로 규정되어있다 (국토안전관리원, 2021). 그 중에서도 부재별 평가 유형 중 중요 결함에 해당하는 것은 아래와 같다.

- 댐마루 평가지표 : 균열 및 단차, 수축 이음부의 열림
- 상류면 평가지표 : 균열, 수축 이음부의 열림
- 하류면 평가지표 : 균열 및 단차, 수축 이음부 누수, 시공 이음부 누수

따라서, 콘크리트 댐의 부재별 안전성에 직접적인 영향을 미치는 인자 중 가장 큰 영향을 미치는 인자는 균열과 수축 이음부의 상태이다.

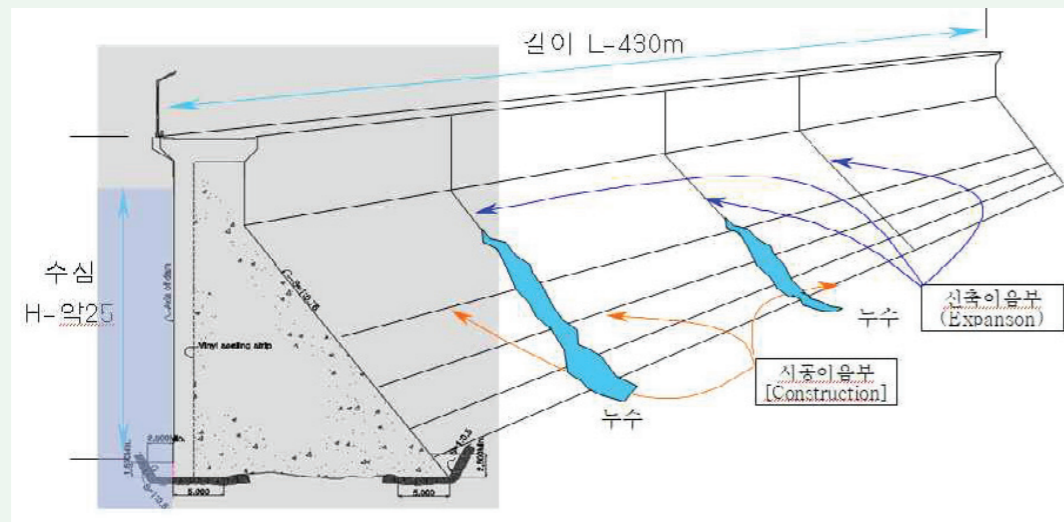
3. 댐 안전성강화사례 분석

3.1 춘천댐

가. 현황 및 배경

춘천댐은 중력식콘크리트댐(CGD)으로 준공(1965년 2월) 후 댐체 누수가 발생되었으나 마땅한 대책이 없어 댐체누수가 지속되었고 정밀안전진단에서 안전등급 저하의 원인이 되었다.

☞ 누수량 : 약 356 ton/day / 시설물 안전등급 “C”



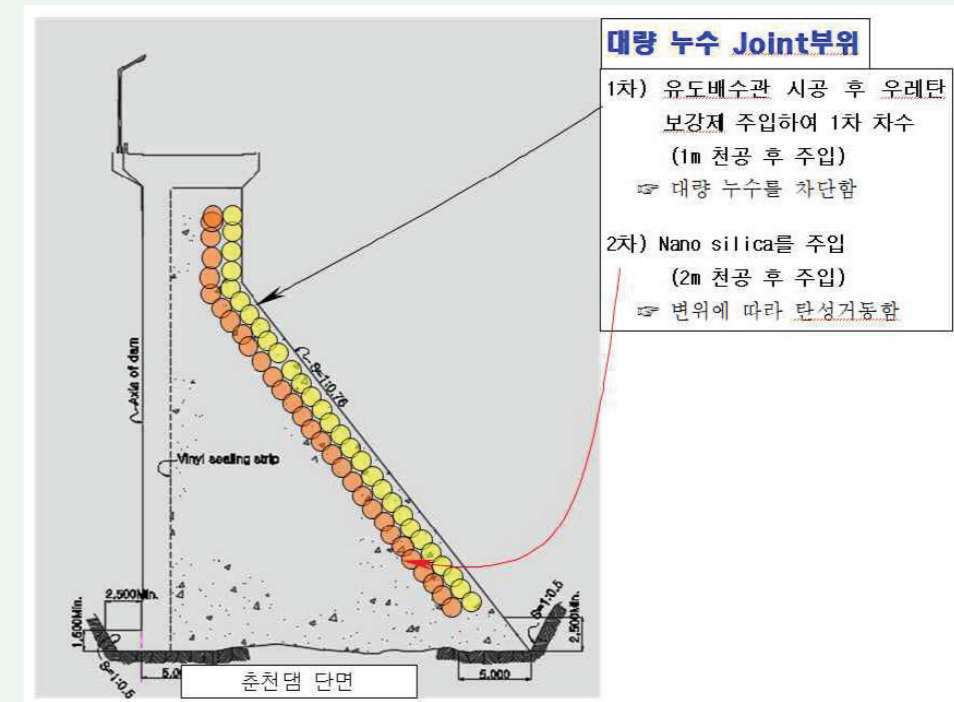
[그림 6] 댐체 누수 모식도

일반적인 그라우트(Injection)공법으로는 장경간(L=435 m) 댐체의 연중 수온변화에 따른 수축·팽창 응력을 지지하지 못해 재균열 및 누수가 지속 발생하였다. 누수의 발생원 인으로는 건설 당시 콘크리트 댐체 신축이음부(Expansion Joint)에 설치된 PVC지수판의 경년열화에 의한 부식과 콘크리트 이어치기 부분(Construction Joint)의 결함으로 이음부 간극(間隙=Gap)을 통해 누수가 발생된 것으로 추정되었다.

나. 차수공법 적용

1차로 Joint에 유도배수관을 매설하고 Joint철링 후 Joint 주변 표면부에 1m 천공 후 그라우트 주입관 설치하였다. 유도배수관 폐쇄(Close)과 동시에 급결형 무발포 우레탄보강제를 주입하면 주입제가 유실되지 않고 1차 차수층이 두껍게 형성하여 대량 유출되는 물을 차단하였다.

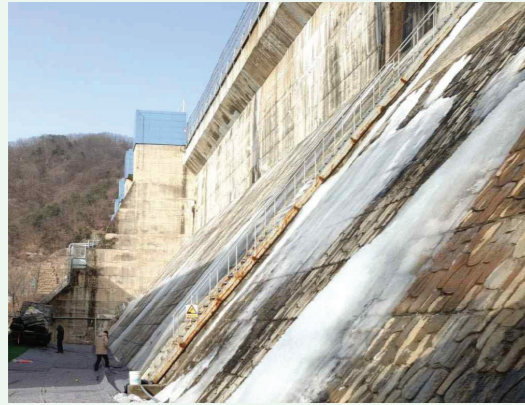
2차로 탄성거동형 Nano silica(나노실)를 1차 차수층 보다 더 깊이 천공(2 m) 후 주입하여 내부에 2차 차수층 형성하여 차수성능을 보완하였다. 1차 차수층은 표면부를 강성으로 지지하고, 2차 차수층은 변형이 발생하여도 탄성거동하여 차수효과를 지속 발휘하는 원리이다.



[그림 7] 댐체 차수그라우팅 모식도

다. 차수공법 효과

2022년 차수공사를 완료하고, 춘천댐의 누수문제는 해결되었으며 이에 따라 춘천댐의 안전등급도 C→B로 상향되어 안전성강화 사업의 효과를 객관적으로 증명하였다.



[그림 8] 차수공법 적용 전



[그림 9] 차수공법 적용 후

3.2 해외사례 (일본)

미국, 일본, 중국, 스위스, 러시아, 호주 등에서 대체로 아래의 3가지 방법들로 댐의 성능을 개선하기 위한 사업이 시행되었거나 진행중에 있다.

(1) 방류설비 증설, (2) 댐의 증축 (3) 댐체 개선이다. 이를 통해 기록적인 폭우에 대한 방류량, 최대 저수용량, 그리고 구조적 안전성을 증가시켜 월류 등과 같은 수문학적 재해를 예방하는데 노력하고 있다.

국외의 댐 사고사례 및 원인 분석을 통해 댐의 구조적 안전성은 다음과 같은 요인에 의하여 감소함을 확인할 수 있다: (1) 물, 퇴적물, 양압력 등에 의해 발생하는 전도; (2) 홍수 또는 저수지 경사로 파괴로 인해 발생하는 월류; (3) 하류부 구조체의 활동; (4) 교대부 약화; (5) 기초부의 누수 및 침식; (6) 과도한 응력으로 인한 콘크리트 균열 및 파괴이다.

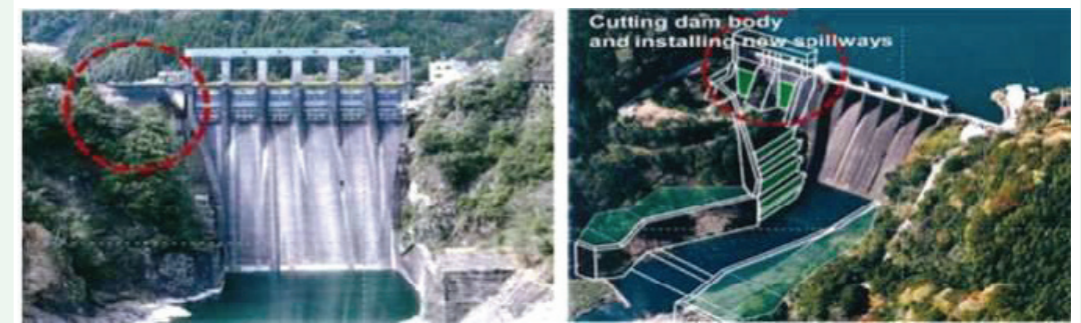
아래 그림은 여유고나 방류량이 부족한 댐의 구조적 개선사례를 보여준다. 첫 번째 성능 개선을 위한 방류설비 증설 유형으로 일본의 Mimikawa 수계 내에 위치한 Yamasubaru 댐, Saigou 댐, Nagayasuguchi 댐, Amagase 댐, Tsuruda 댐의 증설 사례를 보여준다. 방류설비 증설에 대한 핵심은 대형 방류 수문 설치를 통한 댐 구조 개선이며, 효과로는 사전방류를 통한 홍수기 댐의 월류방지 및 저류능력을 제고하는 것이다.



[그림 10] Yamasubaru 댐 개선 전 후



[그림 11] Saigou 댐 개선 전 후

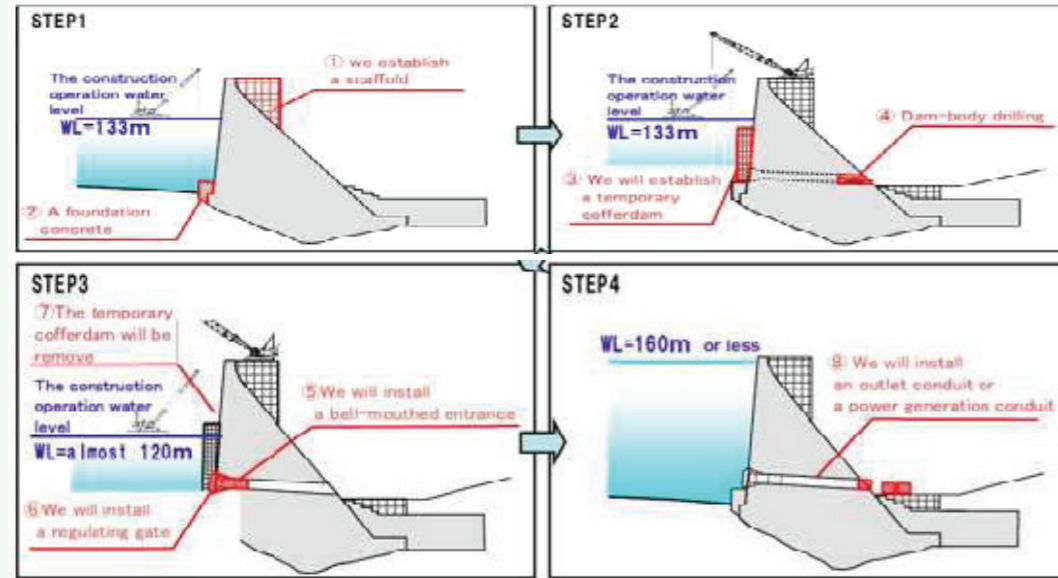


[그림 12] Nagayasuguchi 댐 개선 전 후



[그림 13] Amagase 댐 개선 전 후

특히 Tsuruda 댐의 경우는 구조성능개선방법으로 홍수기 사전방류량 증가를 위한 댐 하부 방류터널을 증설하였는데 공사중 안전성 확보를 위해 임시 Cofferdam방식을 적용함에 따라 댐 운영의 중단없이 개선공사를 추진하였다.



[그림 14] Tsuruda 댐 사전방류터널 조성을 위한 Cofferdam공법

일본을 포함한 국외 댐의 안전성 향상을 위한 구조적 대책유형과 목적 및 효과를 요약하면 아래 표와 같다.

[표 2] 해외 댐의 구조적 대책유형과 목적 및 효과

국가	댐 명/프로젝트	구조적 대책 유형	목적 및 효과
일본	Tsuruda 댐	방류설비 증설, 수문 및 감세공 추가 시공	월류 방지, 홍수 조절 용량 확대
	Shin Maruyama 댐	댐 증축, 복합 운용 중력식 콘크리트 댐 신설	홍수 피해 감소, 발전용량 증가
	Sagami 댐	기존 방류설비 철거 및 신설, 감세공 보강	사전방류 기능 향상, 하류 홍수 경감
	Kumagai Gumi Coporation	방류시설 증설, 콘크리트 보강, 침식완화	노후화 대응, 월류 방지, 내진 강화
	Kajima Corporation	댐 높이 증축, 일체화 시공, 온도응력관리	저수용량 증가, 수밀성·내구성 향상
미국	Oroville 댐	여수로 철거 및 재시공, 콘크리트 두께 증가, RCC 기법	극한 홍수 대응력 확보, 구조 안정성 강화
	San Vincente 댐	댐 증축 (67 m → 102.7 m)	저수용량 확대, 기후변화 대응 성공 사례

러시아	Sayano-Shushenskaya 댐	발전설비 교체, 구조 복구, SHM 시스템 도입	사고 복구, 진동감지 통한 상태 모니터링
스위스	Spitallamm 댐	이중 곡률 아치형 신규댐 건설	내진성 강화, 노후 콘크리트 대체
호주	Warragamba 댐	댐 벽 증축 (142 m → 156 m), 중력식 구조 보강	홍수피해 감소, 임시 저수공간 확보

4. 맺음말

댐의 안전성 강화를 위한 사례에서도 확인했듯이, 댐 사고는 단순한 시설결함이 아닌 운영체계, 설계기준, 재정보담 등 복합적 요인에 의해 발생하며, 이를 예방하기 위한 관리 주체의 총체적 접근이 요구된다. 한수원의 일부 발전용댐의 경우도 방류능력 및 여유고의 부족, 시설의 노후화 및 댐관리의 제도적 장애요인 등 복합적인 리스크에 노출되어 있다. 이에 따라 한수원은 정부에서 수립한 10년 계획인 댐관리기본계획(댐건설관리법)에 따라 수립한 댐관리세부시행계획에 따라 단계적으로 댐 안전성강화사업을 추진할 예정이다.

구조적개선 측면으로는 여수로 및 수문 증설 등 사전 방류설비의 확대, 장기적으로 수명주기 기반의 재개발 전략을 마련할 예정이며, 비구조적 측면에서는 각종 스마트 계측기의 도입 및 계측기의 다중화와 실시간 유입량 예측을 기반으로 한 유연한 수위 운영체계 구축, 댐군 간 연계운영을 통한 안전성확보 체계를 정비할 예정이다. 특히 디지털트윈 등 스마트기술을 활용한 스마트 댐관리플랫폼을 시범구축사업을 추진할 예정으로 한국 대담회(KNCOLD)와의 기술교류나 전문가 자문 등을 통해 국내 댐관리기관과 함께 댐의 안전성강화를 추진할 예정이다.