참고문헌

1. 기후위기 대응 댐 정책방향 심포지엄, 한국수자원학회, 2022
2. 국민 물 안심 통합물관리 미래과제, 한국수자원학회 / K-water, 2022
3. 물과 미래, 환경부 / K-water, 2022
4. 댐건설 및 주변지역 지원 등에 관한 법률 개정안 마련 연구, 환경부. 2022
5. 탄소중립 참여형 스마트댐 효용증진사업 마스터플랜, 환경부 / K-water, 2022
6. 대전환 시대 글로벌 물 관리 스탠더드 선점을 위한 정책 및 기술제안, 한국수자원학회, 2021
7. 해외수주 활력 제고 및 고도화방안, 기재부, 2021
8. 국내외 댐 및 제방의 건설 및 기술동향, 『한국지반환경공학회지』, 2021
9. 디지털트윈 기술 기반 스마트 물 관리 추진 로드맵, K-water, 2021
10. 공유하천 공동관리를 통한 남북협력방안 세미나, 국회 입법조사처 / 한국물학술단체연합회, 2021
11. 『대댐회지』 vol.44~45호, 한국대댐회, 2020 / 2021
12. 물 관리 실무편람, K-water, 2021
13. 한반도 기후변화 전망 보고서, 기상청, 2021
14. 제1차 국가물관리기본계획(2021~2030), 환경부, 2021
15. K-water 탄소중립 로드맵, K-water, 2021
16. 국가물관리기본계획 수립 연구 최종보고서, 환경부, 2020
17. 미래 핵심 댐 건설기술의 소개, 『유신기술회보』, 2018
18. Enhancing Water Use Efficiency in Korea, OECD, 2017
19. 미래 핵심 댐 건설기술 확보방안 수립, K-water, 2015

국내외 댐 정책과 기술동향 소개

염경택

성균관대학교
수자원전문대학원 교수
(전 ICOLD 부총재)

김봉상

K-water
수자원시설처 차장

1. 세계 댐 현황

국제대댐회(ICOLD)에서는 대댐을 가장 낮은 댐 기초부에서 댐 마루까지의 높이가 15m 이상이거나, 저수용량이 3백만$m^3$3이상이면서 높이가 5~15m인 댐으로 정의하고 있으며, 2020년 4월 기준으로 총 5만 8,713개의 대댐이 등록되어 있다.

국가별로 보면 중국이 23,841개로 가장 많으며, 미국(9,263개), 인도(4,407개), 일본(3,130개), 브라질(1,365개) 순이며, 우리나라는 1,338개로 댐 개수 기준 제6위에 해당한다. 국가별 댐 개수 상위 1위에서 10위(등록된 댐 1,000개 이상)까지의 합계(47,910개)가 등록된 전체 댐(58,713개)의 80% 이상을 차지하고 있으며, 1위에서 10위까지 현황은 표 1과 같으며, 500개 이상의 대형 댐을 보유한 국가와 ICOLD 회원국은 아니지만 10개 이상의 대형댐을 보유한 국가는 그림 1 및 그림 2와 같다.

댐의 목적별 분류(통계가 가능한 39,110개 댐 대상)를 보면 단일목적댐이 28,791개이며, 다목적댐은 10,319개이다. 댐의 목적별 세부 현황은 표 2와 같다.

댐의 형식별 분포를 보면 흙댐 65%, 록필댐 13%, 중력식댐 14%, 아치댐 4%, 기타 4% 등이며, 세부 현황은 그림 3과 같다.

가장 오래된 댐은 약 1,900년 전에 건설된 스페인의 Proserpina댐으로, 오래된 댐의 1~10위 현황은 표 3과 같다.

표 1. 회원국별 댐 등록수(1~10위)

국가	등록된 댐수
China	23,841
United States of America	9,263
India	4,407
Japan	3,130
Brazil	1,365
Korea(Rep. of)	1,338
South Africa	1,266
Canada	1,156
Mexico	1,080
Spain	1,064
합계	47,910

시기별 댐 건설현황(통계가 가능한 51,067개 댐 대상)을 보면, 1970년대까지 지속적으로 증가하였으나, 1970년대에 최대를 기록한 후 점차 축소하고 있는 경향을 보이고 있다. 시기별 댐 건설현황은 표 4와 같다.

가장 많은 수력발전용량을 보유한 댐은 중국의 Sanxia댐으로 설비용량은 22,500MW이며, 연간발전량은 98,100GWh이다. 발전용량 기준 1~10위 현황은 표 5와 같다.

가장 높은 댐은 타지키스탄의 Rogun댐으로 댐 높이는 335m이고, 저수용량이 가장 많은 댐은 짐바브웨의 Kariba댐으로 총 저수용량이 1,806억m^3이다. 댐 높이 및 저수용량 기준 1~10위 현황은 표 6 및 표 7과 같으며, 저수용량이 가장 많은 100개 댐의 분포도는 그림 4와 같다.

그림 1. 500개 이상의 대형 댐을 보유한 국가

그림 2. ICOLD 비회원국 중 10개 이상의 대형 댐을 보유한 국가

표 2. 댐의 목적별 분류

목적	단일목적댐	다목적댐
홍수조절	2,539	4,911
수력발전	6,115	4,135
농업	13,580	6,278
휴양 · 여가	1,361	3,035
용수공급	3,376	4,587
기타	1,820	3,463
합계	28,791	10,319*

* 다목적댐은 목적이 중복되므로 최종 합계에서 1개로 집계

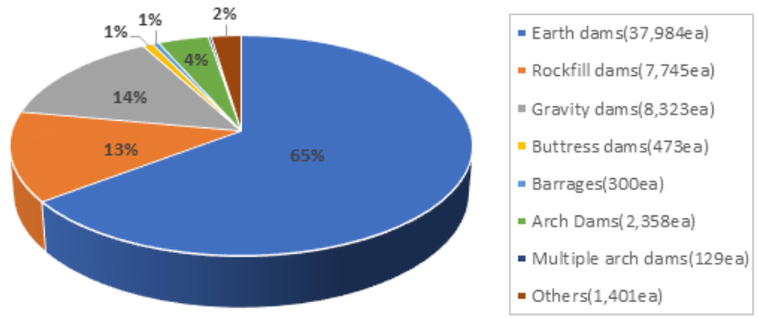


그림 3. 댐 형식별 분포

표 3. 가장 오래된 댐 현황(1~10위)

댐명	건설시기(A. D.)	국가
PROSERPINA	130	Spain
HARBAQA	150	Syria
SUMIYOSHIIKE	400	Japan
ICHIBANIKE	400	Japan
KAERUMATAIKE	607	Japan
SAYAMAIKE	616	Japan
MANNOIKE	700	Japan
KUMAMICHIIKE	900	Japan
FUROTANIIKE	900	Japan
MINENOIKE	900	Japan

표 4. 시기별 댐건설 현황

건설시기	댐수
1900년 이전	1,566
1900~1909년	640
1910~1919년	986
1920~1929년	1,238
1930~1939년	1,499
1940~1949년	1,316
1950~1959년	5,633
1960~1969년	9,244
1970~1979년	13,239
1980~1989년	6,873
1990~1999년	4,380
2000~2009년	2,983
2010~2019년	1,360
2020~	110
합계	51,067

표 5. 수력발전용량 순위(1~10위)

댐명	설비용량 (MW)	연간발전량 (GHw/year)	국가
SANXIA	22,500	98,100	China
BAIHETAN	16,000	51,500	China
ITAIPU	14,000	98,300	Paraguay/Brazil
XILUODU	13,860	57,120	China
BELO MONTE	11,234	–	Brazil
GURI	10,235	53,400	Venezuela
TUCURUI	8,370	41,400	Brazil
TA SANG	7,100	35,446	Myanmar
GRAND COULEE	6,809	–	United States of America
GRAND ETHIOPIAN RENAISSANCE	6,420	–	Ethiopia

표 6. 가장 높은 댐 현황(1~10위)

댐명	댐 높이(m)	목적*	국가
ROGUN	335	HI	Tajikistan
SHUANGJIANGKOU	312	H	China
JINPING 1	305	HC	China
NUREK	300	IH	Tajikistan
LIANGHEKOU	295	H	China
XIAOWAN	294	HCIN	China
XILUODU	286	HCN	China
GRANDE DIXENCE	285	H	Switzerland
BAIHETAN	277	H	China
BAKHTIYARI	275	HC	Iran

* 목적: C-홍수 조절, H-수력발전, I-관개용수, N-주운

표 7. 저수용량이 많은 댐 현황(1~10위)

댐명	저수용량(10^6m^3)	국가
KARIBA	180,600	Zambia/Zimbabwe
BRATSK	169,000	Russia
AKOSOMBO	150,000	Ghana
DANIEL JOHNSON, BARRAGE(MANIC 5)	141,851	Canada
GURI	135,000	Venezuela
HIGH ASWAN DAM	132,000	Egypt
BENNETT W.A.C.	74,300	Canada
GRAND ETHIOPIAN RENAISSANCE (C)	74,000	Ethiopia
KRASNOYARSK	73,300	Russia
ZEYA	68,400	Russia

그림 4. 저수용량이 가장 많은 100개 댐의 분포도

2. 최근의 댐 사고(Dam Failure) 원인과 사례

2. 1 댐 사고(Dam Failure) 원인

최근 지구온난화에 따른 기후변화로 세계 곳곳에서 집중호우 및 태풍 등에 따른 재난 발생빈도가 높아지고, 대규모 지진 등으로 인한 댐·저수지 붕괴 우려가 증가하고 있다. 20세기 들어 세계적으로 200여 건 이상의 댐 붕괴사고가 발생하여 하류지역에 많은 인명과 재산 피해가 발생하였다.

댐 붕괴(파괴)는 댐 기초 또는 제체의 일부가 무너져 담수 기능을 상실한 상태로 정의할 수 있으며, 시공 및 운영관리 부실 또는 다양하고 복잡한 과정에 의해 예기치 못한 원인으로 발생한다.

과거 미육군공병단(USACE)이 미국 내 8,639개 댐에 대하여 실시한 안전도 진단결과 약 1/30이 불안전한 것으로 판정되었고, 주된 결함원인은 85%가 여수로 단면 부족으로 나타났다. Gruner(1967년)의 조사에 의하면 1799~1944년의 기간에 308건의 댐 붕괴가 발생하였고, 주된 요인으로는 부등침하 및 지진에 의한 기초부 유실이 51%, 부적절한 여수로가 23%, 파이핑 및 침투가 7%, 부실시공 및 운영실수 등 기타 원인이 19%였다.

Biswas와 Chatterjee(1971년)는 300개 이상의 댐에 대하여 붕괴 원인을 검토하였으며, 조사결과, 35%가 여수로 통수능을 초과한 홍수로 인한 붕괴, 25%가 침투, 파이핑, 초과 간극수압, 부적절한 절토, 침하 및 활동 등의 기초부 문제였고, 40%가 부실시공 및 불량재료, 파랑, 전쟁 등으로 인한 붕괴였다.

ICOLD에서는 1900년과 1973년 사이에 붕괴된 높이 15m 이상의 댐에 대한 조사를 실시하였으며, 필댐의 주요한 붕괴요인은 월류 및 부적절한 여수로(34%), 기초부 결함(30%), 파이핑(28%) 등의 순으로 나타났다. 콘크리트댐의 주요 붕괴 원인은 기초부 결함(53%)이었으며, 토사 댐의 경우는 파이핑과 침투(38%) 및 월류(35%)에 의한 붕괴였다.

이러한 결과는 댐 붕괴의 주된 원인들이 댐 설계 시에 설계홍수량의 과소산정 또는 기초지질의 부적절한 처리에 있음을 보여준다. 또한 댐 건설 후 초기에는 기초부 결함에 의해 붕괴가 많이 발생하며, 월류와 파이핑 및 침투 등의 경우 댐의 내구연한에 걸쳐 지속적으로 발생하는 것으로 판단된다.
이는 댐의 내구연한을 고려한 홍수 소통능력 확보 및 적극적인 안전관리가 댐 안전과 직결됨을 의미하며, 우리나라 댐도 노후화가 진행되고 있음에 따라 월류, 파이핑 등에 의한 붕괴확률이 증가하고 있으므로, 이에 대해 적절한 대책이 수립되어야 할 것이다. 사고사례 등을 바탕으로 댐 사고의 주요요인을 표 8과 같이 정리하였다.

2. 2 국내외 댐 사고(Dam Failure) 사례

2. 2. 1 해외사례

Jansen(1980년)에 의해 조사된 자료에 의하면 12세기 이후 세계적으로 2,000여 개의 댐이 붕괴되었으며, 지난 1세기 동안 200여 개의 특이할 만한 인공댐들의 붕괴가 있었다. 이로 인하여 11,100명 이상의 인명이 희생되었다. 아래 표 9는 댐 붕괴사례 중 주요내용을 정리한 것으로 국내의 효기리댐이 명시되어 있다.

대표적인 국외 댐 붕괴사례는 2006년 브라질의

표 8. 댐 사고의 주요요인

구분	내용	설계 및 시공 공통사항
설계 관련	•가능최대홍수량(PMF) 산정오류 •여수로 방류능력 부적정 •부적절한 재료의 선정	•댐 기초 및 제체의 누수 / 파이핑 •댐체의 상하류 사면파괴 •월류(Overtopping) •저수지 양안의 활동 •변형에 따른 콘크리트댐의 균열 •변형에 따른 사력댐의 횡방향 균열 •터널 및 배수로 등의 변형 •방류관 및 배수시설의 파손 •댐체의 경사(Tilting)
시공 관련	•부적절한 건설 관행 •신구 구조물의 접합 불량	
운영 및 유지관리 관련	•여수로 문비 기능 장애 •여수로 문비의 폐색 •여수로 감세공의 파손 •콘크리트의 열화 •사면보호공의 풍화 / 손상	
자연현상 관련	•지진 •기상이변에 따른 대홍수	
기타	•테러리스트의 공격 또는 전쟁활동 •상류댐 붕괴에 따른 하류댐의 연쇄 붕괴	

표 9. 댐 붕괴사례 주요내용(1980년, Jansen)

댐명	국가	붕괴 일시	인명 피해(인)	재산 피해(백만$)
Puentes	Spain	April 30, 1802	600	1.0
Mill River	USA	1874	–	–
Lynde Brook	USA	1876	–	1.0
South Fork	USA	May 31, 1889	2,200	100.0
Saint Francis	USA	March 13, 1928	450	1.5
Brokaw 2	USA	1938	–	0.7
Veg de Tera	Spain	January 10, 1959	144	–
Malpasset	France	December, 1959	420	68.0
Oros	Brazil	March 25, 1960	50	–
Babii Yar	USSR	March, 1961	145	4.0
Hyokiri	Korea	July, 1961	155	–
Quebrada La Chapa	Columbia	April, 1963	250	–
Vaiont	Italy	October 9, 1963	3,000	–
Baldwin Hills	USA	December 14, 1963	3	50.0
Mayfield	USA	1965	–	2.5
Vratsa	Bulgaria	May 1, 1966	600	–
Nanak Sagar	India	September 8, 1967	100	–
Sempor	Inodnesia	December 1, 1967	200	–
Wyoming	USA	1969	–	1.5
Pardo	Argentina	1970	–	20.0
Buffalo Creek	USA	February 26, 1974	118	65.0
Teton	USA	June 5, 1976	6	70.0
Hirakund	India	September 20, 1980	118	–

Campos Novos댐, 미국의 South Fork댐, Sheffield 댐, Teton댐 등 다수의 댐 붕괴로 수백 명에 달하는 인명 피해와 수억 달러의 재산 피해가 발생하였으며, 1975년 일본의 Niteko댐, 2000년 스웨덴의 Aitik tailings댐, 1985년 이탈리아의 Stava tailings 댐, 1999년 대만의 Shih-Kang댐 등 전 세계적으로 최근까지 많은 댐 붕괴사례가 있다. 국외 댐의 주요 피해사례 및 원인은 표 10과 같다.

주요 국외 댐을 대상으로 붕괴 규모, 원인 및 댐 하류 피해상황 등에 대해 표 11과 같이 보다 세부적으로 정리하였다.

표 10. 국외 댐 주요 피해사례 및 원인

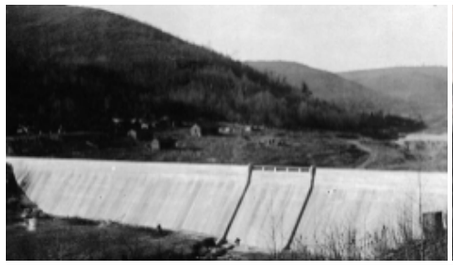
댐명	국가	발생 년도	댐 형식	높이 (m)	저수용량 (천m^3)	붕괴 원인
Bradfield	영국	1864	Rockfill / earthfill	29.0	3,200	• 댐 시공 결함과 채움 재료의 부적절한 다짐
South Fork	미국	1889	–	21.9	–	• 전례 없는 호우 • Johnstown Flood에 연관
Bouzey	프랑스	1895	수직형 중력식 석괴 댐	20.0	–	• Sand-stone의 기초부 균열과 댐 상류단의 차수벽의 불충분한 시공으로 인한 댐체내 및 하부 수압
Austin	미국	1911	Rolled earthfill / Cyclopen concrete	15.0	–	• 댐 콘크리트 완전한 응결 전 시작된 담수로 인해 발생한 크랙과 댐 하부에 과도한 수압
Gleno	이탈리아	1923	복합식 콘크리트댐	43.6	5,400	• 시공부실
Eigiau	영국	1925	중력식 석괴 댐	6.0	4,500	• 기초가 점토 표면 아래 1.8m 깊이까지 도달되어 이 지점에서 파괴가 발생
ST. Francis	미국	1928	아치형 중력식 콘크리트댐	62.5	46,900	• 댐 하류사면의 갑작스런 기울임으로 인한 붕괴
Alla Sella Zerbino	이탈리아	1935	곡선식 중력 댐	12.0	18,000	• 침식에 대한 저항력이 부족한 지반의 지질학적 특성
Sella Zerbino	이탈리아	1935	콘크리트 중력 댐	16.7	–	• 월류
Malpasset	프랑스	1959	아치형 콘크리트댐	61.0	22,000	• 댐 우안상의 주축점 부근에서 회전, 댐 좌안의 콘크리트 접합부에서 2m이상의 변위
Vega de Tera	스페인	1959	Slab-and-Buttress	34.0	7,800	• 동절기 공사 중지 후 공사 재착수 시 신구 석괴 사이의 부실한 결속으로 인한 붕괴
Oros	브라질	1960	Zoned earthfill and rockfill	35.4	650,000	• 가배수 터널의 제한된 방류용량으로 인한 붕괴

댐명	국가	발생 년도	댐 형식	높이 (m)	저수용량 (천m³)	붕괴 원인
Panshet	인도	1961	Zoned earthfill	51.0	2,700	• 시설물의 불완전한 상태와 시설물들의 비상시 운영에 대한 부적절한 방류시설 설계
Khadakwasla	인도	1961	석괴 댐	40.0	–	• 설계 홍수량을 초과한 홍수량의 유입으로 인한 월류로 붕괴
Smartt Syndicate	남아프리카 공화국	1961	흙댐	28.0	98,000	• 시공부실
Baldwin Hills	미국	1963	Homogeneous earthfill	71.0	1,100	• 기초부 취약면이 있는 결함 부위에 이동이 집중되어 발생
Vaiont	이탈리아	1963	아치형 콘크리트댐	265	150,000	• 댐 부근의 협곡 좌안 사면에서의 슬라이딩과 급경사 지역에서의 균열로 인한 대량의 슬라이드로 붕괴
Fontenelle	미국	1965	Earthfill	39.6	–	• 여러 개의 누수차단이 아닌 단일 누수차단에 의존하여 붕괴
Rutte	이탈리아	1965	복합식 아치댐	15.0	–	• 기초부실
Wolf Creek	미국	1967	콘크리트 중력식 및 흙댐	78.6	7,512,000	• 다짐불량에 의한 방수로의 심한 변동으로 급격한 침투 진행으로 제체의 파이핑 발생
Nanaksagar	인도	1967	–	15.9	210,000	• 구수로 하상지역에 위치한 기초부 파괴
Frias	아르헨티나	1970	Homogeneous rockfill	–	–	• 오랜 기간 저수지에 물이 저류되지 않아 댐 본체와 기초부가 건조된 상태에서 갑작스러운 홍수량 유입으로 붕괴
Sheep Creek	미국	1970	Earthfill	17.1	1,430	• 여수로 파이프 이음부의 부실에 의한 붕괴
Lower San Fernando	미국	1971	흙댐	43.0	25,000	• 지진에 의한 진동으로 제체 강도저하 및 액상화 상태에 도달하여 간극수압 증가
Xonxa	남아프리카 공화국	1972	Earth/rockfill	48.0	158,000	• 제체 내부와 우측에서 응력 손실이 있었고, 난류흐름에 의해 하류사면 끝단의 기초재료가 유실되었다. 이로 인해 앵커가 있는 하류 끝단의 큰 돌이 이동하여 붕괴
Buffalo Creek	미국	1972	coal waste fill	14.0	484	• 방류된 폐수의 제체 방수작용과 태풍으로 인한 유출로 저수위의 급상승 • 저수지에 여수로나 방류시설이 없음
Canyon Lake	미국	1972	–	6.1	985	• 갑작스러운 폭우
Banqiao	중국	1975	Earthfill	24.5	592,000	• 1,000년 빈도홍수로 설계되었으나 8월 태풍 니나 내습 시 2,000년 빈도 홍수 발생으로 댐 붕괴
Teton	미국	1976	Zoned earthfill	93.0	356,000	• 접합부에서 심하게 조인트된 암반부근에 풍화퇴적된 점토질 실트의 사용으로 인한 붕괴
Hans Strijdom	남아프리카 공화국	1977	Rockfill	57.0	1,538,000	• 설계홍수량을 초과하는 홍수량 발생으로 인한 붕괴
Kelly Barnes	미국	1977	Homogeneous earthfill	11.6	505	• 댐 마루부가 갈라지면서 파이핑 현상과 관련한 댐 하루사면 슬라이딩 발생으로 인한 연속적 침식으로 인한 붕괴
Wadi Qattarah	리비야	1977	Earthfill	28.0	223	• 파이핑
Machhu II	인도	1979	Earthfill	60.1	110,000	• 설계유입량의 약 2.5배에 해당하는 홍수량 유입
Dworshak	미국	1980	중력식 콘크리트댐	218.5	4,259,850	• 양생기간 동안 온도에 의한 응력으로 발생한 초기균열발생 후 물의 침투와 높은 수압으로 인한 추가균열로 붕괴
B.F. Sisk	미국	1981	Earthfill	117.0	–	• 사면세류에 저항하기 위해 설치된 사면 재료 강도 저하로 인한 붕괴
Lawn Lake	미국	1982	Homogeneous earthfill	7.9	–	• 상류 방류 파이프와 밸브 하우징 사이 납코킹의 노후로 인하여 제체에 물이 침투하여 붕괴
Glen Canyon	미국	1983	아치형 콘크리트댐	261.4	33,304,000	• 콜로라도강에 발생한 홍수로 인한 여수로의 과다한 방류
Brodhead Creek	미국	1984	Earthfill	32.9	1,360	• 세립자 침식작용으로 공동이 커지고, 입자들이 공동 바닥이 쌓이면서 붕괴
Gouhou	중국	1993	Sand-Graval with concrete face	71.0	3,300	• 저수지 수위가 댐마루 옹벽 하부 수평부 이상으로 되었을 때 파손된 콘크리트 슬라브 및 이음부를 통해 제채로 물이 침투하여 붕괴
Van Norman	미국	–	Hydraulic fill	43.0	25,300	• 리히터 6.4 강도 지진으로 인한 붕괴
Oroville	미국	2017	Earthfill	234.7	436,354	• 집중호우에 따라 비상여수로를 개방하였으나, 여수로 주변 사면붕괴에 따른 여수로 파손
Xe Namnoy (보조댐 D)	라오스	2018	중심차수벽형 석괴 댐 (Earthfill)	73.7 (16)	1,040,000	• 댐 누수에 따른 내부 침식으로 인한 기초 지반 약화로 보조댐 D 붕괴(라오스 국가조사위원회 발표)

표 11. 주요 국외 댐 피해 세부현황

1. Ausitn댐(미국)

- (제원) 높이 15m, 길이 166m, 저수용량 5,500천m³, 콘크리트댐
- (건설시기) 1909년 / (붕괴시기) 1911. 8월 붕괴
- (붕괴 원인 및 피해) 댐 기초부 및 기초부의 콘크리트 간 부착력 부족. 댐 콘크리트의 완전한 응결 전 담수 개시로 댐체의 과도한 균열 발생 및 수압작용으로 붕괴. 8명 사망 및 약 1,000만달러 재산 피해

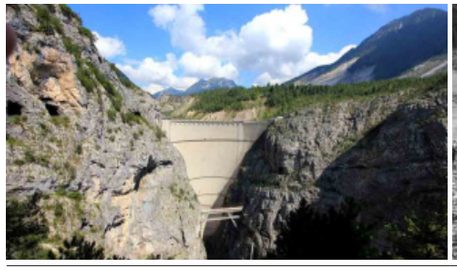


2. Malpasset댐(프랑스)

- (제원) 높이 61.0m, 저수용량 22,00000천m³, 아치형 콘트리트 댐
- (건설기간) 1952~1954년 / (붕괴시기) 1959. 12월 붕괴
- (붕괴 원인 및 피해) 1959. 11월의 집중호우 및 댐 건설당시 부적절한 지반조건에 설치. 421명 사망

3. Vaiont댐(이탈리아)

- (제원) 높이 265m, 길이 190m, 저수용량 150백만m³, 아치형 콘크리트댐
- (건설기간) 1957~1959년 / (붕괴시기) 1963. 10월
- (붕괴 원인 및 피해) 댐 부근의 협곡 좌안 사면에서의 슬라이딩과 급경사지역에서의 균열로 인한 대량의 슬라이드로 붕괴. 2,600여 명 사망



4. Banqiao댐(중국)

- (제원) 높이 24.5m, 저수용량 592백만m³, 흙댐
- (건설시기) 1952년 / (붕괴시기) 1975. 9월 붕괴
- (붕괴 원인 및 피해) 1975년 9월 태풍 니나 내습시(6시간 동안 830mm, 24시간 동안 1,631mm 강우) 설계빈도(1,000년) 이상의 홍수(2,000년빈도) 발생으로 댐 붕괴. 수만~24만명의 사망자 발생, 약 30개 도시 침수 및 1,000만명 이상 홍수 피해

5. Teton댐(미국)

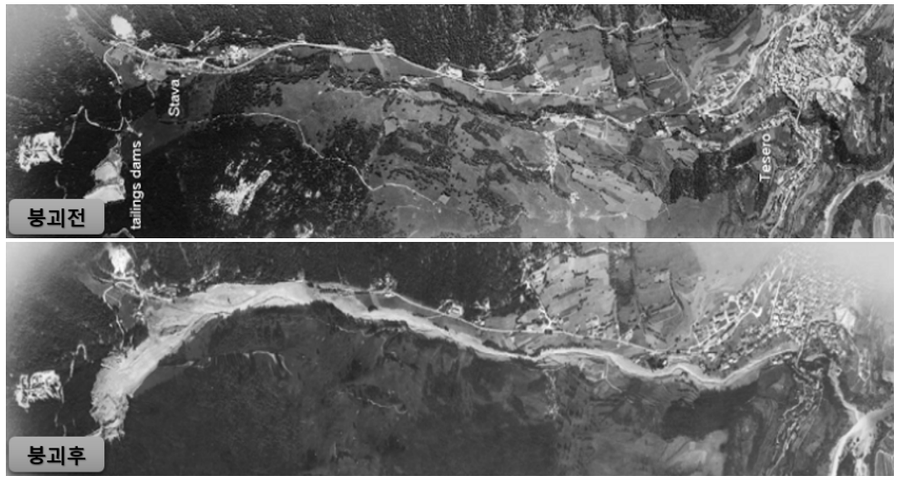
- (제원) 높이 93m, 중심코어형 흙댐
- (건설시기) 1975년 / (붕괴시기) 1976. 6월
- (붕괴 원인 및 피해) 댐 지점은 화산암반으로 투수성이 매우 강하여 심하게 조인트된 암반부근에 풍화퇴적된 점토질 실트의 사용으로 인한 잠재적 수로 형성으로 붕괴. 11~14명 사망 및 약 400만달러의 재산피해

6. Machhu Ⅱ댐(인도)

- (제원) 높이 60.1m, 폭 6.1m, 저수용량 110백만m³, 사력 및 흙댐
- (건설시기) 1972년 / (붕괴시기) 1979. 8월
- (붕괴 원인 및 피해) 설계유입량(5,660m³/s)의 약 2.5배를 초과하는 유입량 기록(최대유입량 14,160m³/s). 약 2,000명 사망(하류 도시인 Morvi시 약 1.8~6m 침수)

7. Stava Tailing댐(이탈리아)

- (제원) 광미댐으로 최초 30m인 댐 2개 건설, 20년간 25m 이상 증고(댐에 모인 폐석에서 형석 체굴 후 물만 분리하고, 흙과 모래로 댐을 견고하게 다짐)
- (건설시기) 1972년 / (붕괴시기) 1985. 7월
- (붕괴 원인 및 피해) 댐 유지관리 미흡(균열(누수) 미보수 및 배수관 불량 등). 268명 사망 및 건물 62채 파괴 등 약 1억 5,500만유로의 재산피해



8. Kantale댐(스리랑카)

- (제원) 높이 15m, 길이 4,267m, 저수용량 135백만m³, 흙댐
- (건설기간) 604~614년 / (붕괴시기) 1986. 4월
- (붕괴 원인 및 피해) 건설 이후 1,400년 이상된 댐으로 노후화 및 부실한 유지보수, 누수 등의 원인으로 붕괴. 사망자 약 120명 및 약 1,600채 이상 가옥 침수

9. Oroville댐(미국) * 여수로 붕괴

- (제원) 높이 235m, 길이 2,109m, 저수용량 43.6억m³, 경사코어형 흙댐
- (건설기간) 1961~1968년 / (붕괴시기) 2017. 2월
- (붕괴 원인 및 피해) 주 여수로가 설계와 달리 불량 기초암반 위에 시공, 배수시설 상부 균열 미보수 등 유지관리 미흡으로 파손. 주 여수로 방류량 축소에 따른 자연월류식 비상여수로 월류로 하부 침식 발생. 하류지역 주민 20만명 긴급대피

10. XeNamnoy댐(라오스) * 보조댐 D 붕괴

- (본댐 제원) 높이 73m, 길이 1,600m, 저수용량 10.4억m³, 중심차수벽형 석괴 댐
- (보조댐 D 제원) 높이 16m, 길이 773m, 흙댐
- (건설기간) 2013~2019년 / (붕괴시기) 2018. 7월
- (붕괴 원인 및 피해) 댐 누수에 따른 내부 침식으로 인한 기초 지반 약화로 붕괴(보조댐 D, 라오스 국가조사위원회), 71명 사망, 13개 마을 침수, 이재민 7,000여 명

11. Brumadinho댐(브라질)

- (제원) 높이 87m(3개), 흙댐
- (건설시기) 1977년 / (붕괴시기) 2019. 1월
- (붕괴 원인 및 피해) 댐 내부 침식과 액상화로 추정. 270명 사망, 광미 댐으로 식수오염 및 수생태계 훼손 등에 따른 비상사태 선포

2. 2. 2 국내사례

우리나라에서는 1961년 전북 남원시에 위치한 효기리댐 붕괴로 사망 57명 및 이재민 9,800여 명이 발생하였으며, 1999년에도 경기도 연천군의 연천댐이 붕괴되었다.

표 12. 국내 댐 주요 피해사례 및 원인

댐명	준공년도	관리자	피해일시	피해 원인	피해 상황
효기리	-	농어촌공사 (남원시)	'61. 7. 12.	• 집중호우 • 여수로 방류능력 부족	• 월류붕괴-사망 57명, • 실종 98명, 이재민 9,800명
구덕	-	부산광역시	'72. 9. 14.	• 집중호우	• 월류붕괴-사망 60명, • 실종 15명, 부상 48명
연천	1986	연천군	'96. 7. 27.	• 집중호우 • 단층대 분포로 인한 침투	• 월류붕괴-주택 및 농경지 침수
장현	1947	농어촌공사 (강릉시)	'02. 8. 31.	• 태풍 루사 • 설계홍수량 초과	• 제방유실-주택 13가구 유실, 농경지 침수
동막	1940	농어촌공사 (강릉시)	'02. 8. 31.	• 태풍 루사 • 설계홍수량 초과	• 제방유실-주택 및 농경지 침수, 교량파괴
송호	1947	원주시	'06. 1. 18.	• 누수 • 노후로 인한 내구성 저하	• 제방유실-주택 2동 및 농경지 침수
사곡	1945	청도군	'07. 7. 12.	• 누수 • 노후로 인한 내구성 저하	• 제방유실-주택 2동, 돈사 파손
춘정	1964	보성군	'07. 9. 15.	• 집중호우 • 설계홍수량 초과	• 제방유실-농경지 유실
대사	1945	농어촌공사 (고흥군)	'07. 9. 16.	• 집중호우 • 설계홍수량 초과	• 제방유실-농경지 매몰
양곡	1945	익산시	'10. 7. 23.	• 집중호우 • 설계홍수량 초과	• 제방유실-농경지 침수 및 유실
명곡	1945	완주시	'10. 7. 23.	• 집중호우 • 설계홍수량 초과	• 제방유실-농경지 침수 및 유실
척곡	1967	정읍시	'11. 8. 9.	• 집중호우 • 설계홍수량 초과	• 제방유실-면소재지 침수 및 농경지 유실
두야	1966	태안군	'12. 8. 12.	• 집중호우 • 설계홍수량 초과	• 제방유실 및 붕괴-농경지 침수
어은	1945	남원시	'12. 8. 28.	• 집중호우 • 설계홍수량 초과	• 제방유실 및 붕괴-도로 및 농경지 침수
죽림	1945	고창군	'12. 8. 30.	• 태풍 볼라벤 • 설계홍수량 초과	• 제방유실-여수토 유실, 농경지 침수
관춘	1945	해남군	'12. 8. 30.	• 태풍 볼라벤 • 설계홍수량 초과	• 제방유실 및 붕괴-농경지 침수
산대	1964	농어촌공사 (경주시)	'13. 4. 12.	• 누수 • 복통 주변 Piping 현상	• 제방유실-농경지 1.2ha, 주택 5동, 상가 6동 침수
괴연	1945	영천시	'14. 8. 21.	• 집중호우 • 노후로 인한 내구성 저하	• 제체붕괴-농경지 7ha, 주택 2동 반파, 9동 침수
모화	2014	경주시	'16. 6.	• 초기담수 시 제방일부 누수발생	• 제방유실-농경지 침수

1996년 이후로 지속적으로 발생하고 있는 이상홍수로 인해 1998년에는 40개, 1999년에는 5개의 소규모 저수지가 붕괴되었다. 특히 2002년 태풍 루사 발생 시에는 강릉의 장현댐(섬석천)과 동막댐(금광천)이 붕괴되어 하류 하천변 주거지역 등에 큰 홍수피해를 본 적이 있고, 강릉시 상류부의 오봉댐과 고령군 상류부 성주댐의 경우 댐 월류 직전까지 도달하여 댐 붕괴위험에 대비한 주민대피 등 큰 혼란이 야기된 바 있다.

또한 2003년 태풍 매미로 인하여 저수지 붕괴와 손상이 발생한 것으로 보고되고 있으며, 최근에는 경주의 산대저수지가 붕괴되어 저수지 안전에 대한 사회적 관심을 불러일으키는 계기가 되었다. 국내 댐의 주요 피해사례 및 원인은 표 12와 같다.

주요 국내 댐을 대상으로 붕괴 규모, 원인 및 댐 하류 피해상황 등에 대해 표 13과 같이 보다 세부적으로 정리하였다.

표 13. 주요 국내 댐 피해 세부현황

1. 효기리댐

- (제원) 높이 15m, 길이 115m, 저수용량 270천m^3, 흙댐
- (건설시기) 1961년 / (붕괴시기) 1961. 7월 붕괴
- (붕괴 원인 및 피해) 집중호우(2.5시간동안 150mm)에 따른 댐의 여수로 및 방수로 방류능력 부족으로 댐 월류. 57명 사망, 98명 실종, 9,800여 명의 이재민 발생

2. 연천댐

- (제원) 높이 22m, 길이 169.5m, 저수용량 13,000천m^3, 콘크리트 문비형 토사혼합식
- (건설기간) 1983~1986년 / (붕괴시기) 1996. 7월 붕괴
- (붕괴 원인 및 피해) 설계홍수량(5,230m^3/s) 이상의 홍수량(7,540m^3/s) 유입으로 댐 월류에 따른 붕괴. 인명피해는 없으며 재산피해 추정 곤란

3. 장현댐

- (제원) 높이 14.8m, 길이 170m, 저수용량 2,176천m³, 흙댐
- (건설시기) 1947년 / (붕괴시기) 2002. 8월
- (붕괴 원인 및 피해) 여수로 설계홍수량(190m³/s)을 초과하는 홍수량(313m³/s) 유입으로 여수로 및 댐 붕괴. 13가구 유실 및 농경지 침수

4. 산대댐

- (제원) 높이 12.2m, 길이 210m, 저수용량 2,450천m³, 흙댐
- (건설시기) 1964년 / (붕괴시기) 2013. 4월
- (붕괴 원인 및 피해) 개보수되지 않은 노후저수지(약 50년 경과)로 복통 주변 파이핑 현상 진행 및 당시 높은 저수율에 따른 파이핑 현상 확대에 따른 붕괴. 하류 농경지 1.2ha 매몰, 차량 13대 및 주택 5동, 상가 5동 침수

5. 괴연저수지

- (제원) 높이 5.5m, 길이 160m, 저수용량 61천m³, 흙댐
- (건설시기) 1945년 / (붕괴시기) 2014. 8월
- (붕괴 원인 및 피해) 노후저수지(약 70년 경과)로 집중호우에 따른 방수로 주변 월류 · 세굴현상 발생에 의한 성토재 유실 및 방수로 기초지반의 지속적인 누수에 따른 파이핑 영향에 의해 붕괴. 주택 2동 반파 및 9동 침수

3. 해외 댐 정책 및 기술동향

(ICOLD, WBG, ADB, AfdB, AIIB emd)

3. 1 정책 동향

3. 1. 1 ICOLD

시기별 댐 건설현황(표 4)에서 보듯이 ICOLD에 등록된 댐(통계가 가능한 51,607개 댐)의 대부분(39,369개, 약 80%)가 1950년에서 2000년 사이에 건설되었다. 대규모 댐 건설이 추진되는 과정에서 환경단체, NGO 등 비정부기관 주도로 생태계 파괴 등 환경훼손 및 지역주민 삶의 터전 상실 등의 문제점을 지적하며, 댐 건설에 대한 반대여론을 확산시켰다. 이에 국제대댐회에서는 환경문제 등을 최소화하고 지속가능 개발을 위한 공동 노력을 촉구하기 위해 제24차 회의('12. 6. 5., 일본 교토)에서 'World Declaration on water storage for Sustainable Development'를 발표하였다.

이 선언문에는 물, 식량 및 에너지에 대한 지속적인 수요 증가와 기후변화로 인한 물 분배의 불규칙성, 홍수 및 가뭄으로 인한 자연재난이 더욱 악화되는 실정으로 과거 어느 때보다 더 심각한 상황에 직면해 있다고 명시하고 있으며, 이러한 상황에 대응하기 위해 물 저장 인프라(Water Storage Infrastructure)는 반드시 필요한 시설이며, 기후변화를 완화하고 적용하는 데 중요한 시설임을 강조하였다.

특히 개발도상국에서 수자원의 더 나은 사용을 위한 해법을 개발함과 동시에 대형·중형·소형 댐을 결합한 균형 잡힌 접근방식이 필요하며, 부정적 영향을 최소화하기 위해 지속가능한 개발을 고려해야 한다고 선언하였다. 이러한 선언은 댐 건설 등 개발 위주의 정책에서 수자원의 효율적인 이용을 통해 기후변화에 대응하고, 생태계는 물론 지역사회와 상생할 수 있도록 댐 정책의 전환을 요구하는 것이라 해석할 수 있다.

또한 2000년대 이후 신규 댐 건설의 감소와 함께 안전에 대한 중요성이 증가함에 따라 국제대댐회는 2019년 10월 18일에 '더 나은 세상을 위한 더 나은 댐(Better Dams for a Better World)'이라는 슬로건으로 댐 안전이 우리의 최우선 과제라는 '댐 안전을 위한 세계선언문(World declaration on Dam Safety)'을 발표하였다.

이 선언문에서는 댐 안전을 위한 가장 중요한 사항들을 아래와 같이 명시하고 있다.

- 댐 안전의 핵심은 댐의 구조적 무결성임. 댐 구조는 안전한 조건에서 설계, 건설 및 운영되어야 함
- 위험 최소화와 장기적인 댐 안전을 보장하기 위해 풍부한 경험과 자격을 갖춘 엔지니어의 주기적인 안전성 검토와 일상적인 감시 및 유지관리 프로그램이 필요함
- 댐 운영 전 기간 동안 계측 및 모니터링 프로그램은 필수적임
- 댐 유형, 자재, 노후화, 기초 등에 기반한 설계의 내재적 위험을 적절히 처리해야함
- 홍수 및 지진 등 자연재해의 위험은 시간이 경과함에 따라 변하므로 정기적으로 검토하고 업데이트하여야 함
- 댐 붕괴로 인한 인명, 재산피해를 막기 위해 비상계획을 수립하여야 하며, 주기적인 검토 및 업데이트가 필요함
- 댐 운영자에 대한 적절한 교육이 필요함
- 댐 붕괴 등 사고로부터 배운 교훈을 공유하여야 함
- 댐 구조의 무결성과 안정성을 강화하기 위한 구조적 조치, 붕괴 시 피해 최소화를 위한 조치와 댐에 대한 교육 및 대중의 인식 등 댐 안전에 대해 포괄적으로 접근하여야 함

- 댐 소유자 및 운영자의 적절한 인력과 재원 등에 대한 책임이 있어야 함
- 지침 및 표준 마련, 품질, 적절한 부지조사 등 규제 당국의 역할이 필요함
- ICOLD와 같은 국제기구, 설계자, 정부당국이 댐에 대해 더 잘 이해할 수 있도록 중요한 지침을 제공하는 등 댐 안전에 대한 국제적 관점이 필요함

3. 1. 2 UN(UN-Water)

UN(국제연합)은 국제 평화와 안전을 보장하고, 국제협력 증진, 인권개선 등의 활동을 통해 세계의 번영을 추구하는 전 세계 거의 모든 국가를 아우르는 국제기구로, 제2차 세계대전 이후인 1945년 10월 24일에 출범했다. 국제법, 국제적 안보 공조, 경제개발 협력 증진, 인권개선으로 세계평화를 유지함을 목적으로 하며, 현재 유엔 가입국가 수는 총 193개국이다.

UN-Water는 2003년 설립되었으며, UN 조직이 물 관련 문제에 대해 통일된 의견을 전달하도록 조정하는 역할을 수행하고 있다. UN-Water는 물 및 위생 정책에 대한 홍보 및 진행상황 모니터링·보고, 세계 물의날과 세계 화장실의날 등 두 개의 연례 글로벌캠페인을 개최하고 있으며, 세계 물의날에 캠페인과 동일한 주제에 초점을 맞춘『세계 물 개발보고서』를 발표하고 있다.

2020년『세계 물 개발보고서(물과 기후변화)』에는 기후변화가 수자원 관련 사회기반시설에 대한 위험을 증가시켜, 이를 위한 지속적인 적응대책이 필요하다고 명시하고 있다. 기후변화 적응 및 재난위험 경감 전략으로 구조적 접근에는 저수용량 증가, 기후변화에 내후성이 있는 인프라 구축이 있으며 정책적 접근에는 홍수·가뭄 보험, 예·경보시스템, 토지이용계획 및 역량강화(교육 및 인식제고) 등이 있다. 특히 댐과 같은 물 저장 기반시설의 경우 사회·환경적 영향을 최소화하고, 공공 서비스를 최적화하기 위해 댐 안전성과 지속가능성을 재평가해야 하며, 잠재적인 기능조정까지를 고려한 평가가 이루어져야 한다고 보고 있다.

이 보고서에서는 기후변화에 따라 국지적 혹은 단기간의 영향을 예측하기에는 아직 불확실한 부분이 많이 남아있으므로, 이를 해소하기 위해 연구를 확대하고, 실용적인 분석도구와 혁신기술 개발 촉진, 후회없는 전략을 채택하여 정보와 과학기반 의사결정을 육성하는 데에 필요한 제도적, 인적역량 구축이 필요하다고 제언하고 있다.

2021년『세계 물 개발보고서(물의 가치평가)』는 물의 가치 평가에 대한 기존의 방법론과 접근법을 아래 다섯 개의 상호연관된 관점으로 구분하여, 다양한 글로벌 지역사례를 바탕으로 통합적이고 포괄적인 거버넌스를 통한 다양한 가치화합 방향, 재원조달 방법, 그리고 지식, 연구 및 역량강화 수요 대응에 대한 논의가 담겨있다.

① 현장 수자원 및 생태계로서 수원의 가치 평가
② 물 저장, 사용, 재사용 또는 공급 확대를 위한 물 기반시설의 가치 평가
③ 식수, 위생 및 보건 관점에서 물 서비스의 가치 평가
④ 식량 및 농업, 에너지 및 산업, 비즈니스 및 고용과 같은 생산 및 사회경제적 활동에 대한 물의 가치 평가
⑤ 위락, 문화 및 영적 속성을 포함한 물의 기타 사회문화적 가치 평가

특히 물 기반시설의 경우 물을 저장하거나 이동시키며 상당한 사회적, 경제적 혜택을 제공함으로써 물의 사회적 가치를 뒷받침해주기 때문에 더 많은 시설이 필요한 상황이지만, 과거 경험에서 보면 물 기반시설의 가치평가에는 심각한 결함이 있다고 명시하고 있다.

사회적 혜택은 보통 정량화되지 않고, 비용(특히 외부비용) 또한 정확히 고려되지 않으며, 다른 선택지에 대한 적절한 평가 또는 비교 절차가 부족하며, 주요 한계점은 재무비용(현금 흐름, 자본 및 운영지출)과 재무수익에 주로 초점을 맞추고 있다고 지적하고 있다.

아울러 기본적으로 물 기반시설의 가치 평가는 굿 거버넌스(Good governance)에 관한 것으로 적절한 평가 수행을 위해서는 굿 거버넌스를 위한 노력이 필요하다고 강조하고 있다.

이를 보면 ICOLD에서 2012년 6월 발표한 '지속가능한 개발을 위한 물 저장시설에 대한 세계선언(World Declaration on water storage for Sustainable Development)'과 2019년 10월에 발표한 '더 나은 세상을 위한 더 나은 댐(Better Dams for a Better World)'이라는 슬로건과 같이 수자원의 효율적인 이용과 생태계 보전, 지역사회와의 상생 등 통합적이고 포괄적인 거버넌스를 위한 댐 정책 실현이 필요하다고 판단된다.

3. 1. 3 WBG(세계은행그룹)

ICOLD와 파트너십을 맺은 세계은행그룹(World Bank Group, WBG)는 1944년 브레튼우즈 협정(Bretton Woods Agreements)에 근거해 설립된 UN 산하 국제기구로 빈곤해소 및 경제개발을 위하여 전 세계 개발도상국에 금융 및 기술을 지원하는 목적으로 설립된 국제금융기관으로 댐을 안전하게 건설 및 운영하고 경제적·환경적·사회적으로 바람직한 댐 개발을 지원하고 있다

WBG에서는 댐과 관련 프로젝트에 적용할 수 있는 운영 매뉴얼(Operational manual)인 Dam Safety(OP 4. 37)을 보유하고 있다. 운영 매뉴얼의 제목에서도 알 수 있듯이 자금 지원에 있어서 댐의 안전을 최우선으로 고려하고 있다.

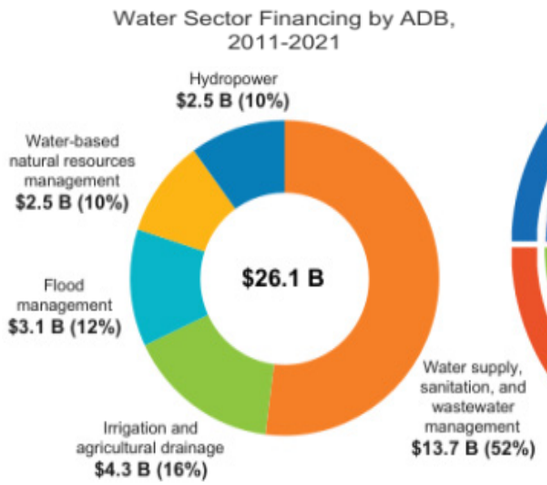
매뉴얼에는 댐 건설을 포함하는 프로젝트에 자금을 조달하는 경우 숙련되고 유능한 전문가로 하여금 댐 설계와 건설을 감독하도록 하고 있으며, 차용인(지원대상국)은 댐 및 관련 작업의 설계, 입찰, 건설, 운영 및 유지 관리를 위해 확실한 안전 조치를 적용하고 시행해야 한다고 명시하고 있다.

특히 대형 댐의 경우 조사, 설계 및 건설, 운영에 대한 독립적인 패널과 세부계획 작성·시행, 준공 후 댐의 정기 안전검사 등을 요구하고 있다. 독립적인 패널은 댐 안전과 관련된 다양한 기술분야의 전문지식을 보유한 전문가 3명으로 구성되며, 차용인(지원대상국)이 추천하고, WBG가 승인하는 형태이다.

또한 기존 댐의 용량 증대, 댐 사고 시 대체 공급원이 없는 경우 등에 한해 기존 댐 및 건설 중인 댐에도 자금을 지원할 수 있도록 하고 있다. 이러한 경우에는 한 명 이상의 독립적인 전문가를 배치하여 댐 및 부속시설물에 대한 성능검사 및 평가를 시행할 것을 요구하고 있다.

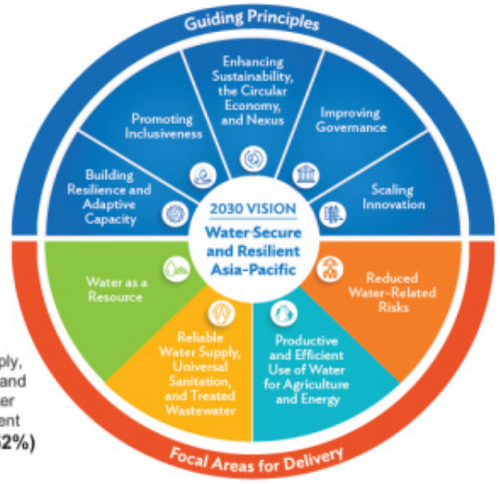
3. 1. 4 ADB(아시아개발은행)

아시아개발은행(ADB, Asian Development Bank)은 아시아와 태평양 인근의 개발도상국의 경제발전과 협력을 촉진한다는 목적으로 1966년 8월 22일 필리핀의 메트로 마닐라에서 창립했다. ADB에는 아시아태평양 경제사회위원회의 회원국들이 참여하고 있으며, 그 외의 선진국들이 동참하고 있다. 창립 당시에 31개국이 참여했으며, 아시아개발은행에는 현재 67개 회원국이 참여하고 있다.



– 아시아개발은행 홈페이지

그림 5. 아시아개발은행의 물분야 금융지원 현황(2011~2021)



– Asian Water Develop Outlook 2020, ADB

그림 6. 아시아개발은행의 물분야 2030 전략 방향

아시아개발은행은 1970년 우리나라의 안동다목적댐 건설 타당성 조사를 위해 장기차관 50만불과 무상원조 15만불을 제공한 바 있으며, 2016년에는 인도네시아에 신규 댐 49개 건설을 포함하는 국가 물 시스템 개선사업에 총 20억달러를 지원하였으며, 2019년에는 Arghandab 통합 수자원 개발 프로젝트(Arghandab Integrated Water Resources Development Project)에 3.5억달러를 지원하는 등 개발도상국의 물 관련 인프라 개선을 위해 최근 10년간 약 261억달러를 지원하고 있다.

2020년 ADB에서 발간한 'Asian Water Develop Outlook 2020'의 2030년 물분야 전략방향에는 구체적으로 댐 건설이나 댐 안전, 노후 댐의 개선(복원)에 관한 내용에 대해서는 별도 언급은 없다.

보고서에는 ADB의 물분야 주요 전략방향을 그림 6과 같이 명시하고 있으며, 지침(Guiding Principle)의 주요 키워드는 회복(Resilience)과 적응력(Adaptive Capacity), 지속가능성(Sustainability) 등이며, 공급을 위한 집중분야(Focal Areas for Delivery)의 구체적 내용은 자원으로서 물(Water as a Resource), 위생시설(Sanitaion), 하수 재이용(Treated Wastewater), 에너지와 농업을 위한 효율적 물 사용, 물 재해 위험감소 등 수자원의 역할을 포괄적으로 담고 있다.

이것으로 보아 ADB의 물분야 전략적 방향은 단편적인 개발보다는 다양한 분야(농업, 에너지, 하수 재이용 등)에 대한 효율적인 물의 이용과 신뢰성이 담보된 용수공급이라고 판단되며, ADB의 설립목적에 맞는 개발도상국의 물 안보 확보 및 최근 전 세계적 이슈인 기후변화에 대한 적응력 강화, 지속가능한 개발 등에 초점이 맞추어져 있는 것을 알 수 있다.

3. 1. 5 AfDB(아프리카개발은행그룹)

아프리카개발은행(AfDB) 그룹은 전 세계 다자간 개발은행(Multilateral Development Bank, MDB) 중 하나로, 투자 재원 조달 및 기술지원 제공을 통해 아프리카의 지속가능한 경제발전과 사회적 진보를 이룰 수 있도록 1964년에 설립된 국제금융기구이며, 설립 이후 50년 넘게 아프리카 발전에 커다란 영향력을 발휘하고 있다.

2021년 5월 AfDB에서 발간한 『물분야 정책보고서(Policy on Water)』를 보면 2013~2022년 전략(10개년 전략) 및 아프리카 워터비전 2025 방침에 따라 아프리카의 빈곤 완화, 사회·경제적 개발, 지역협력 및 환경, 지속가능한 성장을 위해 수자원의 평등하고, 지속가능한 사용과 관리를 AfDB의 물 안보 비전으로 명시하고 있다.

이러한 전략의 실행을 촉진하기 위해 아프리카지역에 ① 전력공급, ② 식량공급, ③ 통합, ④ 산업화, ⑤ 삶의 질 개선 등 5가지의 우선순위(High 5s)를 선정하였으며, 물분야 비전 추구를 위해 아래와 같이 4가치 원칙과 새로운 정책 구현을 위한 7개의 운영요소(Operational Elements)을 선정하였다.

· (4가지 원칙)

① 포괄적 성장을 위한 핵심은 가정, 국가 및 지역에서 물 안보의 달성

② 평등한 사회복지와 경제성장을 위한 IWRM 접근방식 적용

③ 물 서비스에 대한 지속 가능하고 평등한 접근의 증진

④ 원활한 지역경제 통합 달성을 위한 접경지역 수자원 관리 및 개발

· (7개 운영요소) ① 수자원의 경제적 가치 평가, 물 서비스 가격 책정 및 비용회수, ② 지속가능하고 스마트하며 탄력적인 기반시설, ③ 거버넌스 및 사용가능한 환경, ④ 자금조달 및 투자, ⑤ 물과 생태계 접근의 다목적 활용, ⑥ 지식, 관리, 혁신, 기술 및 연구, ⑦ 참여와 포용

7가지 운영요소 중 댐과 관련된 분야(② 지속가능하고 스마트하며 탄력적인 기반시설)에 대한 세부적인 내용을 살펴보면 AfDB그룹은 기후 회복력이 있는 기반시설 개발과 지속가능한 수자원 및 폐기물 관리 시스템에 중점을 두고 있는 것을 알 수 있다.

아프리카의 연간 재생가능한 자원비율은 5%이며, 인구의 68%만 정수된 물을 공급받고 있어, 이러한 수치 개선과 물 재해 관리 및 물 안보 강화, 아프리카 블루 이코노미의 지속가능한 활용을 위해 기반시설 및 서비스 제공 시스템에 대한 상당한 투자가 필요한 것으로 인식하고 있다. 또한 가용 수자원의 80% 이상이 이미 활용되고 있는 북부 아프리카와 같이 수자원의 가용성 문제에 직면한 국가의 경우 수자원의 지속가능한 사용과 고품질의 수자원을 유지하는데 인프라 개발이 필요하다고 명시하고 있다.

이러한 문제를 해소하기 위해 AfDB는 보다 지속가능하고, 물을 더 잘 사용하고, 수자원의 품질을 보호하고, 물 관련 재해를 줄이는 스마트하고 혁신적이며 친환경적인 기술을 사용하는 기후회복력이 있는 물 인프라 프로젝트 및 운영을 지원할 계획이다.

다만 AfDB는 일자리 창출 및 물 비용을 지불할 수 있는 자원 생성을 위해 다중 사용 수도 시스템(multi-use water system) 개발에 더 집중할 계획이며, 복잡함과 대규모 재원이 소요되는 대형 다목적댐 사업에는 단독으로 재정지원을 하지 않겠다는 입장을 밝히고 있다.

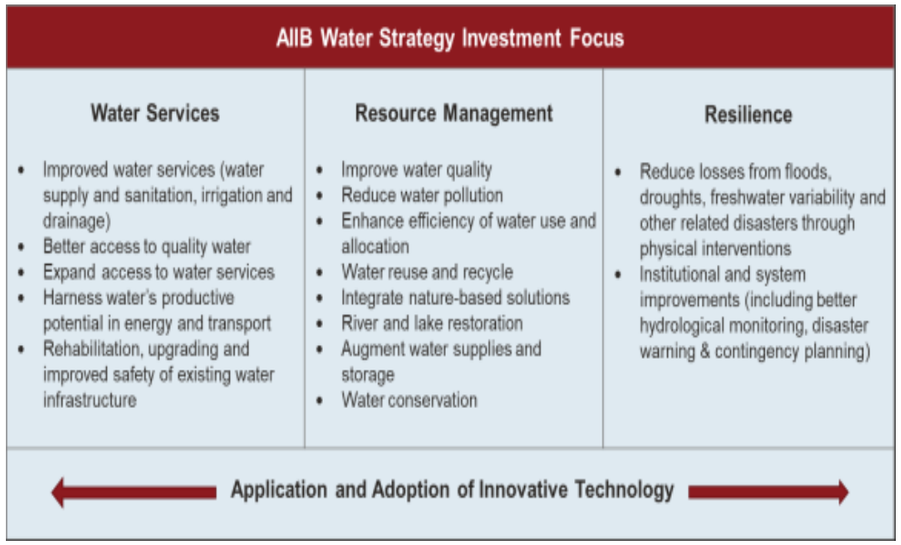


그림 7. AIIB Water Strategy Investment Focus

3. 1. 6 AIIB(아시아인프라투자은행)

중국 시진핑 국가주석이 2013년 인도네시아에서 제시한 국제금융기구로 아시아-태평양지역의 대규모 인프라 투자를 위한 은행이다. 2021년 기준 AIIB에 가입한 나라는 103개국이며, 출범 당시보다 2배 가까이 늘었다. 경쟁 상대인 아시아개발은행(ADB)의 회원국(68개국) 수를 이미 넘어섰고, 5년 동안 투자한 프로젝트 수는 100개 이상이다.

2020년 5월 AIIB에서 발간한 물 부문 전략(Water Sector Strategy)을 보면 SDGs(Sustainable Development Goals, 지속가능한 발전 목표)에 따라 모두를 위한 물의 지속가능한 관리와 위생, 이용가능성을 보장하기 위해 노력한다는 점을 밝히고 있다. AIIB의 물 분야 전략적 투자 중점은 아래 그림 7과 같이 세 가지 범주로 구분하고 있으며, AIIB의 전략에서도 댐 건설보다는 수자원 인프라에 대한 안전성 개선과 업그레이드, 복원 등을 주요항목으로 하고 있는 것을 알 수 있다.

물 서비스에 대한 접근성 개선, 개선된 자원 관리를 통한 물의 가용성 및 품질향상, 물 관련 재난의 영향에 대한 회복력 개선 등 3가지 핵심영역에 대한 AIIB의 4가지 투자원칙은 아래와 같다.

· (원칙 1, 지속가능한 인프라 증진) 물 기반시설 설치 자체가 끝이 아니라 지속가능성에 긍정적인 영향을 미치는 프로젝트에 자금을 지원하고, 기후변화 적응 및 완화를 다루며, SDGs의 목표에 따라 환경 및 사회적 결과 극대화

· (원칙 2, 통합 자원 관리) 물은 적절히 관리되어야만 재생가능한 유한한 자원임. 국경을 초월한 물의 특성 및 운송, 에너지, 지속가능한 도시 개발과 같은 AIIB의 다른 우선순위와 필수적인 연결성을 고려하는 통합 자원관리 접근방식

· (원칙 3, 민간 자본의 동원과 효율성) 민간 펀드의 가용성을 높이는 것과 함께 민간부문 혁신과 전문성, 관리 및 효율성 활용 증진

· (원칙 4, 혁신적인 기술 채택) 혁신과 기술의 영향을 극대화하는 투자 우선순위를 정함으로써 혁신기술 도입과 보급 증진 및 경제성 향상을 위한 중추적인 역할 수행

ICOLD 및 WBG, ADB, AfDB, AIIB의 지침 및 물 분야 전략 등을 검토해본 결과 과거 댐 등 물 인프라 개발 위주의 사업에서 전 세계적 추세에 따라 시설물의 안전성 확보와 기후변화에 대응한 적응력 강화, 지속가능한 개발에 대해 초점이 맞춰져 있는 것을 알 수 있으며, 우리나라의 댐을 포함한 물 분야 정책 또한 이러한 방향으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3. 2 건설(설계) 기술 동향

앞서 기술한 바와 같이 ICOLD에서는 3~4개의 기술 현안을 선정하여 학술발표 및 토론 등을 위한 회의(Congress Question)를 3년 주기로 개최하고 있으며, 1933년 스웨덴 스톡홀름에서 1차를 시작으로 2021년 프랑스 마르세유까지 총 제27차에 걸쳐 109개 의제에 대한 회의(Congress Question)를 개최하였다.

그간 의제들을 살펴보면 1930년과 40년대(제1~3차)에는 댐 축조재료(Material)에 대한 특성 및 댐에 가해지는 다양한 힘(Stress, Strain, Uplift 등)과 침투예방(Avoid piping, Governing infiltration of water through the subjacent soil 등) 등 댐 건설과 관련된 기초적인 주제가 주를 이루었다.

1950~1960년대(제4~9차)에도 댐 축조재료에 대한 주제가 지속적으로 포함되었으나, 과거에는 단순한 재료특성 등에 대해 주로 논의되었다면, 1950~1960년대에는 댐 수명연장과 성능개선보다 발전된 주제가 포함되었다. 또한 댐 증고 및 지진, 홍수량과 여수로 형식·용량 선정에 관한 주제가 최초로 포함되었으며, 전반적으로 댐의 설계와 시공, 댐의 거동(침하, 변형 등) 등에 관한 내용이 주를 이루었다.

1970년대(제10~13차)에는 과거에 비해 다양한 기술들이 개발·적용됨에 따라 댐 설계 및 시공 기술발전과 내진설계 등에 대해 주요하게 논의되었으며, 최초로 댐 건설에 따른 환경적 영향 및 댐 붕괴에 대한 논의가 이루어졌다.

1980~1990년대(제14~19차)에는 환경적인 영향과 동시에 침투수 처리, 댐 사고와 붕괴, 기존 댐 안전성 평가 등 댐 안전관리를 위한 보다 구체적인 주제들이 중점적으로 부각되었다. 특히 1985년 제15차 회의에서 안전 확보를 위한 댐 복원(Rehabilitation of dam to ensure safety), 1991년 제17차 회의에서는 댐 노후화와 개선방안(Ageing of dams and remedial measures) 등이 처음으로 주제로 선정되는 등 댐 안전성 확보를 위한 새로운 방안들이 제시되었다.

2000년대(제20~23차)에 들어서는 지진, 댐 및 기초 모니터링, 리스크 분석, 기존 댐 성능개선, 댐 안전관리(Dam Safety management) 등 주제들의 대부분이 댐 안전과 관련된 내용들이었으며, 2010년(제24~27차) 이후에는 기후변화, 노후화, 소규모 댐, 감시·계측 등 댐 안전과 더불어 지속가능한 개발과 관련한 최근의 주요 이슈들이 주를 이루었다.

ICOLD의 총 107개의 Congress Question을 아래 표 14와 같이 정리하였으며, 주요 주제들의 경향을 요약해보면 댐 건설재료→ 설계와 시공→ 환경영향과 안전관리→ 기후변화 대응 및 지속가능한 개발 등의 순으로 이슈가 변화해오고 있음을 알 수 있다.

표 14. ICOLD Congress Question(제1~제27차)

차수	No.	의제명
제1차 (1933년, 스웨덴 스톡홀름)	1a	Deterioration by ageing of the concrete of weight dams
	1b	Influence of internal temperature and distorsion of weight dams
	2a	Research methods so as to ascertain whether a given materials is suitable for being used in the construction of an earthdam
	2b	Study of physical laws governing infiltration of water through the dam and the subjacent soil
제2차 (1936년, 미국 워싱턴)	3	Special cements
	4	Design and waterproofing of shrinkage, contraction and expansion joints
	5	Study of facing of masonry and concrete dams
	6	Geotechnical studies of foundations materials
	7	Calculation of the stability of earth dams
제3차 (1948년, 스웨덴 스톡홀름)	8	Uplift and resulting stresses in dams
	9	Methods and instruments for measuring stresses and strains in earth and concrete dams
	10	Most recent dispositions to avoid piping
	11	Information obtained from the use of testing methods and of special cements in large dams
제4차 (1951년, 인도 뉴델리)	12	Methods for determining the maximum flood discharge that may be expected at a dam and for which it should be designed Selection of type, capacity and general arrangements of temporary or permanent outlets and spill ways
	13	Design and construction of earth and rockfill dams with their core walls and diaphragms
	14	Sedimentation in reservoirs and related problems
	15	Concrete for large dams
제5차 (1955년, 프랑스 파리)	16	Design and construction of dams on permeable soils and methods of foundation treatment
	17	Economics and safety of different types of concrete dams
	18	Settlement of dams due to compressibility of the dams materials or of the foundations soil, including earthquake problems
	19	The relation of the cements content of the concrete to performance in practice
제6차 (1958년, 미국 뉴욕)	20	Heightening of existing dams including methods of constructing new dams in successive stages
	21	Observation of stresses and deformations in dams and in their foundations and abutments
제6차 (1958년, 미국 뉴욕)	22	Compaction methods and moisture content for materials used in the construction of earth core and supporting fill for earth and rockfill dams
	23	Use of admixture and pozzolanic materials in concrete for dams and the influence of the finer sand particles
제7차 (1961년, 이탈리아 로마)	24	The selection, processing and specification of aggregates or concrete for large dams
	25	Underground work in connection with large dams
	26	Modern techniques of concrete dams for wide valleys and ancillary works
	27	Sealing of earth and rockfill dams with bitumen and other materials
제8차 (1964년, 영국 에든버러)	28	Physical and mechanical properties of rock in situ, means of determining these properties and improving them, with special reference to the design and construction, flarge dams
	29	Results and interpretation measurements made on large dams of all types, including earthquake observations
	30	Design of concrete for large dams of all types and influence of age on concrete properties
	31	Design, methods of construction and performance of high rockfill dams
제9차 (1967년, 터키 이스탄불)	32	The safety of dams from the point of view of the foundations and the safety of reservoir banks
	33	Temporary and permanent provisions for the control of flows
	34	The behaviour and deterioration of dams
	35	Dams in earthquake zones or other unfavourable situations
제10차 (1970년, 캐나다 몬트리올)	36	Recent developments in the design and construction of earth and rockfill dams
	37	Recent developments in design and construction of dams and reservoirs on deep alluvial, karstic, or other unfavourable formations
	38	Supervision of dams and reservoirs in operation
	39	Recent developments in the design and construction of concerte dams
제11차 (1973년, 스페인 마드리드)	40	The consequences on the environments of buliding dams
	41	Flow control and energy control during construction and after completion
	42	Impervious elements and slope protection on earth and rockfill dams
	43	New ideas for more rapid and economic construction of concrete dams
제12차 (1976년, 멕시코 멕시코시티)	44	Problems associated with special types of fill dams
	45	Leakage investigations and drainage of dams and their foundations
	46	Preliminary planning of dam developments
	47	The effects on dams and reservoirs of some environmental factors

차수	No.	의제명
제13차 (1979년, 인도 뉴델리)	48	Interface problems of dams
	49	Deterioration or failures of dams
	50	Large capacity outlets and spillways
	51	Seismicity and aseismic design of dams
제14차 (1982년 브라질, 리우데자네이루)	52	Safety of dams in operation
	53	Influence of geology and geotechnics on the design of dams
	54	Reservoir sedimentation and slope stability. Technical and environmental effects
	55	Materials and construction methods for embankment dams and cofferdams
제15차 (1985년, 스위스 로잔)	56	Dam and foundation monitoring
	57	Concrete dams – an old problem always present: cracking ; a new technology: rolled concrete
	58	Foundation treatment of seepage
	59	Rehabilitation of dam to ensure safety
제16차 (1988년, 미국 샌프란시스코)	60	Reservoirs and the environment – Experience in management and monitoring
	61	Embankment dams : impervious elements other than clay cores
	62	New developments in the construction of concrete dams
	63	Design flood and operational flood control
제17차 (1991년, 오스트리아 빈)	64	Environmental issues in dam projects
	65	Ageing of dams and remedial measures
	66	Dams on difficult foundations
	67	New developments for fill dams and fill cofferdams
제18차 (1994년, 남아공 더반)	68	Safety assessment and improvement of existing dams
	69	Environmental experience gained from reservoirs in operation
	70	Staged construction, raising or modification of dams
	71	Deterioration of spillways and outlets works
19차 (1997년, 이탈리아 피렌체)	72	Innovative financing of projects involving dams
	73	Special problems with earthfill dams
	74	Performance of reservoirs
	75	Incidents and failures of dams
제20차 (2000년, 중국 베이징)	76	The use of risk analysis to support dams safety decisions and management
	77	Benefits and concerns about dams

차수	No.	의제명
제20차 (2000년, 중국 베이징)	78	Monitoring of dams and their foundation
	79	Gated spillways and other controlled release facilities and dam safety
제21차 (2003년, 캐나다 몬트리올)	80	Financing hydraulic projects including dams
	81	Economics evaluation of hydraulic projects including dams
	82	Ageing and rehabilitation of concrete and masonry dams and appurtenant works
	83	Seismic aspects of dams
제22차 (2006년, 스페인 바르셀로나)	84	Technical solutions to reduce time and costs in dam design and construction
	85	Management of the downstream impacts of dam operation
	86	Safety of earth – and rockfill dams
	87	Flood and drought evaluation and management
제23차 (2009년, 브라질 브라질리아)	88	Dams and hydropower
	89	Management of siltation in existing and new reservoirs
	90	Upgrading of existing dams
	91	Dam safety management
제24차 (2012년, 일본 교토)	92	Environmental friendly techniques for dams and reservoirs
	93	Safety
	94	Flood discharge
	95	Ageing and upgrading
제25차 (2015년, 노르웨이 스타방거)	96	Innovation in utilisation of dams and reservoirs
	97	Spillways
	98	Embankments and tailing dams
	99	Upgrading and re-engineering of existing dams
제26차 (2018년, 오스트리아 빈)	100	Reservoirs sedimentation, sustainable development
	101	Safety and risk analysis
	102	Geology and dams
	103	Small dams and levees
제27차 (2022년, 프랑스 마르세유)	104	Concrete Dams Design Innovation and Performance
	105	Incidents and Accidents concerning Dams
	106	Surveillance, Instrumentation, Monitoring and Data Acquisition and Processing
	107	Dams and Climate Change

4. 국내 댐 정책 및 기술 동향

4. 1 「물관리기본법」의 제정

우리나라 물 관리 관련 주요 법령들을 살펴보면, 1961년 「하천법」, 「수도법」이 제정된 이래 1966년 「댐건설법」과 「하수도법」, 1974년 「환경보전법」, 1991년 「환경정책기본법」, 1994년 「지하수법」, 1995년 「소하천정비법」, 「농어촌정비법」, 2007년 「수질 및 수생태보전법」, 2011년 「물재이용법」, 2017년 「수자원조사법」 등 1985년까지는 이·치수 및 물 공급 정책, 1985~2000년에는 수질 및 수처리 정책, 2000년 이후는 유역관리 정책을 위한 흐름으로 관련법들이 제정되었다.

2018년에는 물 관리의 기본원칙, 국가 및 유역물관리위원회, 국가물관리기본계획, 물 분쟁, 물 문화 육성 및 국제협력 등의 세부 내용을 담고 있는 「물관리기본법」이 제정되었다.

국가물관리위원회는 대통령 소속으로 국무총리와 민간 1인이 위원장을 맡고 있으며, 국가기본계획과 유역종합계획 심의, 관련 부처 물관리계획과 국가기본계획 간 부합여부의 심의, 유역 간의 물 분쟁 조정 등 물 관련 최상위기구이다.

유역물관리위원회는 환경부장관과 민간 1인을 위원장으로 하여 유역종합계획과 지방자치단체의 장이 수립하는 물 관리 관련 계획과의 부합여부 심의, 유역 내의 물 분쟁조정 등의 역할을 수행하며 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강으로 총 4개로 구성되어 있다.

또한 국가 및 유역물관리위원회에는 물 관련 부처들인 환경부, 국토교통부, 농림축산식품부, 행정안전부, 산업통상자원부, 해양수산부, 국무조정실, 기획재정부, 기상청, 산림청 등이 당연직으로 참여하고 있다.

국가물관리기본계획은 물 관련 모든 법정 계획과 유역물관리종합계획의 근간이 되는 최상위 국가물

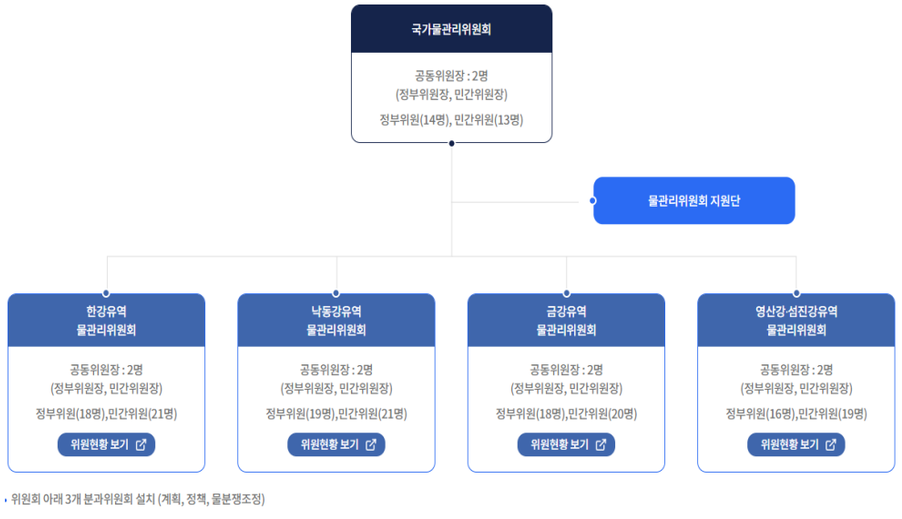


그림 8. 국가 및 유역물관리위원회 구성

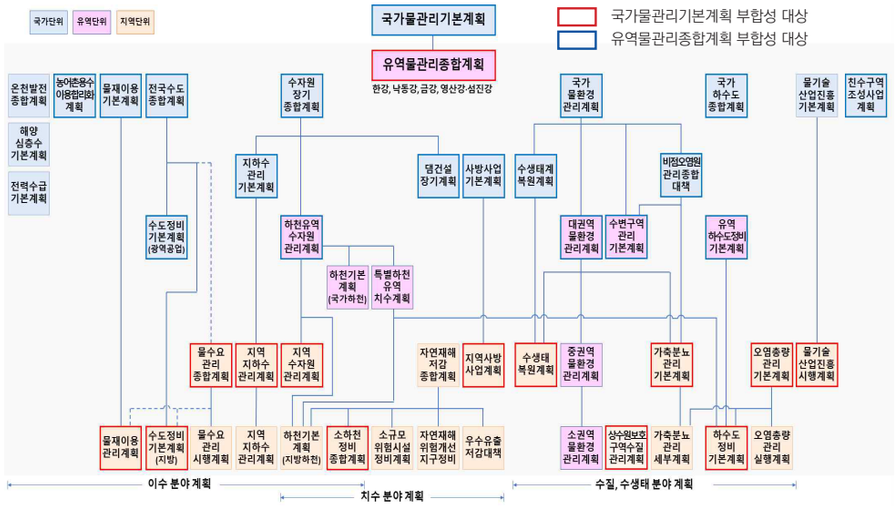


그림 9. 「물관리기본법」 제정 이후 물 관련 주요계획의 현행 체계

관리계획으로, 환경부장관은 10년 단위로 수립 및 여건변화 등을 고려하여 5년마다 타당성 검토를 바탕으로 변경토록 하고 있다. 국가물관리기본계획 수립 시 관계 중앙행정기관의 장 및 유역물관리위원회의 위원장과 협의하고 국가물관리위원회의 심의를 거치도록 하고 있다.

2021년 6월 제1차 국가물관리기본계획이 수립되었으며, 시간적 범위는 2021~2030년, 공간적 범위는 4개 유역(17개 시·도) 및 하구·연안을 포함한 대한민국 국토전역이다. 포함내용은 「물관리기본법」 제27조 제1항 및 동법 시행령 제13조 제1항에 따라 아래와 같다.

① 국가물관리 정책의 기본목표 및 추진방향
② 국가물관리 정책의 성과평가 및 물 관리 여건의 변화 및 전망
③ 물 환경보전 및 관리, 복원에 관한 사항
④ 물의 공급·이용·배분과 수자원의 개발·보전 및 중장기 수급 전망
⑤ 가뭄·홍수 등으로 인하여 발생하는 재해의 경감 및 예방에 관한 사항
⑥ 기후변화에 따른 물 관리 취약성 대응 방안
⑦ 물 분쟁 조정 및 수자원 사용의 합리적 비용 분담 원칙·기준
⑧ 물 관리 예산의 중장기 투자 방향에 관한 사항
⑨ 물산업의 육성과 경쟁력 강화
⑩ 유역물관리종합계획의 기본 방침
⑪ 물 관리 국제협력에 관한 사항
⑫ 남북한 간 물 관리 협력에 관한 사항
⑬ 물 관리 관련 조사연구 및 기술개발 지원에 관한 사항
⑭ 국가물관리기본계획의 연도별 이행상황 평가에 관한 사항

4. 2 댐 건설·관리 및 주변지역 지원 등에 관한 법률 개정

우리나라의 종합적인 물 관리 여건과 패러다임의 변화를 고려하여 신규 댐 건설 위주의 댐건설장기계획을 기존 댐의 효율적인 관리와 안정적 운영

을 위한 댐관리계획 체제로 개편하는 한편, 물관리 일원화에 따른 효율적·지속가능한 물 관리 및 수량·수질·수생태를 포괄하는 댐 관리를 통하여 지속가능한 통합물관리 체계를 구현하기 위해 2021년 6월에 「기존 댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률」을 「댐건설·관리 및 주변지역지원 등에 관한 법률」로 개정(2022. 6. 16. 시행)하였다.

법률 개정에 따라 댐 건설 장기계획을 기존 댐 운영·관리 중심의 실천계획으로 개편하기 위한 댐관리기본계획 수립대상 댐 기준 등을 신설하고, 댐 관리의 기본원칙에 홍수·가뭄의 예방에 관한 사항을 추가하였다. 아울러 기존의 댐 건설계획은 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」 제18조에 따른 하천유역수자원관리계획에 반영하여 추진하도록 하였다.

댐관리기본계획은 환경부장관이 10년 단위로 수립하며, 필요시 5년마다 타당성을 검토 후 변경하도록 하고 있으며, 관계부처 및 지자체 의견수렴, 국가물관리계획과의 부합성 심의, 국가수자원관리위원회 심의를 거쳐 확정된다.

수립 대상은 환경부 소관(K-water 관리) 37개 댐(다목적 20개, 홍수조절 3개, 생공용수 14개) 및 지자체에서 관리 중인 82개의 생공용수댐, 산업통상자원부 소관(한국수력원자력관리) 발전용댐 16개 등 총 135개 댐이며, 제1차 댐관리기본계획(2022~2031)은 환경부(119개) 및 산업통상자원부(16개)에서 각 소관 댐에 대한 기본계획을 수립하고, 환경부에서 댐관리기본계획(총괄조정(안))을 수립하는 것으로 추진 중에 있다.
댐관리기본계획의 주요내용은 아래와 같다.

① 댐 관리의 기본방침: 댐 관리 비전 및 목표, 핵심전략··핵심가치·추진과제 등 기본계획 체계 정립
② 댐 시설의 관리계획: 안전확보를 위한 댐 성능평가 및 재난대응 안정성 확보 방안, 노후화를 고려한 효과적인 유지관리와 점검·보강 체계 고도화 등 방안 수립
③ 댐 저수 운영계획: 이·치수, 하천환경, 기후변화 측면의 댐 운영 여건변화 검토 및 홍수·가뭄 피해 최소화를 위한 선제적 대처방안 검토·제시, 기존 시설물의 다목적 활용을 위한 연계 운영방안 마련
④ 물 환경 보전 계획: 수질·수생태·친수환경 등을 종합적으로 고려한 댐 물 환경 관리목표 제시 및 댐 유역 생태계 보전·복원방안 제시
⑤ 댐 주변지역 보전방안: 댐 주변지역을 지역상생공간으로 창출하기 위한 탄소중립 실현, 댐 가치 향상 및 지역상생 방안, 댐 효용가치 증진을 위한 관련 규제 합리화 전략 마련
⑥ 기타 사항: 스마트 유지관리 신기술 활용방안 및 친환경 재생에너지 확대방안 등

4. 3 기후변화와 댐 안전 확보

최근 기후변화 관련해서 깜작 놀랄만한 기사들이 많이 보도되고 있는데, 아프리카 사하라 사막에 견

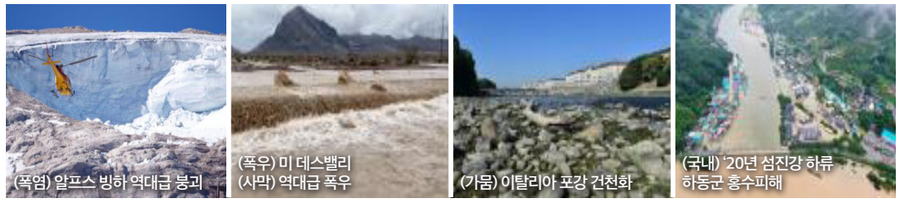


그림 10. 최근 이상기후 영향에 따른 다양한 피해사례

그림 11. 2022년 수도권 폭우피해 현황

표 15. 기후변화 현상이 국내 홍수·가뭄 등에 미치는 영향

폭염, 가뭄, 홍수 등의 이상기후의 경우	
폭염	2036~2040년 서울인구 10만명당 폭염으로 인한 사망자수 21세기 초 보다 2배 이상 증가
가뭄	21세기 말 한강유역 물 부족량이 2010년 대비 최대 3.3배 증가 우려
홍수	여름철 집중호우로 인해 2100년 홍수위험도가 2010년 대비 최대 1.7배 증가

- 극한 기상현상의 지속적 발생: 기후변화, 국가기후변화적응센터, 2016

줄만해 지구에서 가장 덥고 건조하다는 미국 캘리포니아 데스밸리지역에 유례없는 폭우가 쏟아져 범람했다고 한다. 연평균 강우량이 49.7mm 밖에 안되는 사막지역에 단 3시간 만에 약 37.1mm가 내려 연간 강우량의 75%에 달하는 강우가 내려 1,000년에 한 번 올 폭우라고 미국 기상학자들이 이야기하고 있다. 반대편에서는 폭염으로 알프스 빙하의 역대급 붕괴가 계속 일어나고 있어 빙하에 흰색천막을 씌워놓은 웃지 못할 사진들이 신문지상에 오르내리고 있다. 뿐만 아니라 유럽과 중국에서는 역대급 가뭄으로 그동안 물속에 잠겨있던 고대의 유물들이 모습을 드러내고, 다뉴브강에서는 2차세계대전에 침몰된 것으로 보이는 독일군함이 20여 척이 나타났다고 한다.
기후변화를 먼 나라 이야기로만 듣던 우리 국민들도 이제는 뜨거워지는 지구로 인해 전 세계 곳곳에서 폭염, 폭우, 가뭄, 이상 고온, 슈퍼태풍 등 혹독한 기상이변이 발생하고 있고, 우리나라도 기존과는 다른 강우패턴으로 '20년 섬진강, 용담댐 하류의 홍수피해와 금년 남부지방의 극심한 가뭄 등 물 재해로 직접적인 고통을 거의 매년 받고 있는 중이다.

'22년 8월에도 기본적인 인프라가 잘 갖춰졌다고 평가받는 서울 등 수도권에 115년만의 물폭탄으로 많은 인명 및 재산피해가 발생했다. 그동안 도심지 배수 인프라를 위해 나름 예산투자와 체계를 잘 갖추었다고 자평하였지만, 이젠 30년빈도 강우 수준의 배수 인프라시설로는 부족해 대심도 지하방수로를 건설해야 한다고 주장하는 전문가들이 여기저기 나오고있는 형국이다.

국내에도 최근 대부분의 학자들이 극한기상(Extreme Weather)의 출현빈도가 높아지고 있는 이유를 기후변화에 무게를 두고 있고, 점진적으로 이러한 극한기상의 규모와 빈도가 증가될 것이라고 전망하고 있다. 이러한 기상여건 속에서 가장 효과적으로 대처할 수 있는 수공시설물은 뭐니 뭐니 해도 이·치수를 모두 아우르는 댐이 거의 유일하다고 판

그림 12. 2002~2003년 태풍 루사 및 매미에 의한 국내 피해사례

단되며, 국내에서도 극한으로 치닫는 물 재해 예방을 위해 최일선에서 20개의 다목적댐들이 선봉장 노릇을 하고 있다.

하지만 그런 중요한 역할을 책임지고 있는 댐들도 여러 가지 안전을 위협하는 요인들이 증가하고 있어 세계 곳곳에서는 주기적으로 댐 붕괴로 인한 각종 재난이 실제로 발생하고 있으며, 댐 붕괴 핵심원인은 대부분 이상홍수, 지진, 노후화 등이라고 알려져 있다.
댐 계획·설계 시 설계수문량(홍수·가뭄 등)을 산정하기 위해서는 불확실성에 기반한 통계적 기법이 반영된 극한홍수나 극한가뭄 등의 수문조건이 적용되고 있다. 우리나라는 2002년 태풍 루사 때 강릉지역에 1일 870.5mm의 기록적인 폭우가 내렸으며, 2003년 연이어 발생한 태풍 매미로 인해 2년간 역대 최악의 홍수 피해를 경험하였다.

이에 정부에서는 기존에 댐 설계에 적용되던 100년빈도 혹은 200년빈도 홍수량은 댐의 사용기간 동안 초과될 확률이 커짐에 따라 가능최대강우량(Probable Maximum Precipitation, 이하 PMP)으로 인한 가능최대홍수량(Probable Maximum Flood, 이하 PMF)을 기준으로 검토하도록 댐 설계기준을 상향하여 개정하고, 후속대책으로 2004년 '댐 수문학적 안정성 검토 및 치수 능력증대 기본계획'을 수립하였다.

이에 따라 댐 설계 시 사용되는 PMP가 크게 증가(소양강댐: 632mm→ 810mm, 132%↑, 운문댐 444mm→ 602mm, 135%↑)되어 운영 중인 댐 중 증가된 PMP에 대응할 수 없는 댐의 붕괴방지와 치수 능력 확보를 위해 범정부차원의 사업을 착수하였다. 대부분의 하천구조물은 50년 혹은 100년빈도 설계홍수량으로 계획되고 있지만, 국가 댐의 경우는 붕괴가 발생할 경우에 엄청난 댐 하류 홍수 피해와 함께 장기간의 단수 등의 심각한 국가적 재난 상황이 발생하기 때문에 강화된 PMF를 적용해서 댐 안전 확보를 위한 치수 능력 증대사업을 추진하고 있다.

따라서 치수 능력증대사업은 댐의 설계홍수량을 초과하는 PMP 발생 시 댐의 수문학적 안정성을 검토

그림 13. 댐 치수 능력증대사업 대책방안

하여 댐체 월류를 방지하기 위해 보조여수로나 파라펫월 등을 설치하는 구조적 대책을 시행하거나, 댐의 홍수기 제한수위를 낮추거나 댐 운영방법을 변경하는 등의 비구조적 대책을 추진하는 사업을 소양강댐 등을 포함한 24개 댐에 대해서 추진하고 있다. 일반적으로 댐 상태가 양호한 경우 PMF 조건에서 여유고가 부족하면 비구조적 대책이나 파라펫월(댐체 증고) 설치 등의 경제적인 대책을 시행하고, 댐체 월류가 발생하는 경우에는 이상홍수 시 직접적인 댐 붕괴로 이어질 위험이 높기 때문에 기존 여수로를 확장하거나 보조여수로 신설 등의 댐 방류를 증가시키는 구조적 대책을 적용하는 것이 일반적이다.

이상홍수에 대응하기 위한 치수대책은 해외에서도 과거에 건설된 댐들에 대해 현지여건에 맞는 방법으로 댐 시설 개선을 추진하고 있으며, 댐 증고, 보조여수로 신설, 수문 추가 설치, Fuse plug, Fuse Gate, 파라펫월 등 다양한 구조물 설치를 하고 있다.

최근 국내에서는 치수 능력증대사업으로 준공된 보조여수로를 최근 빈번한 집중호우 시 노후화된 기존 여수로와 연계하거나 대신하여 원활한 댐 운

표 16. 24개 댐에 대한 치수 능력증대 추진현황 및 주요내용

구분	완료(19)	추진 중(4)	미착수(1)
월류 (14개)	광동, 영천, 수어, 연초, 소양강, 대암, 임하, 대청, 안동, 섬진강, 운문, 평화	충주(공사), 남강(기본계획)	-
여유고 부족 (10개)	달방, 구천, 합천, 보령, 밀양, 부안, 주암	안계(공사), 선암(설계)	사연

구분	댐명	사업기간	PMF (m³/s) / 금회	치수 능력 증대방안	규모			
					수문(m) (수문식: B×H×EA 무문식: B×EA)	수로(m) (터널식: D×L×EA 개거식: B×H×L)	첨두방류량 (m³/s)	형식
준공 (19개 댐)	달방댐	'04~'06	1,140	여수로 구조개선	3.5×3.5×2	웨어를 7m 낮게 설치	1,084.8 (기존여수로 확장)	개거식
	영천댐	'03~'07	3,700	보조여수로 신설	10.0×9.75×3	B30×L504	3,263 (기존 1,684, 보조 1,579)	개거식
	광동댐	'04~'07	2,190	여수로 구조개선	8.5×9.5×4	여수로 바닥굴착: 5.3m	2,140 (기존여수로 확장)	개거식
	구천댐	'05~'07	520	기존여수로 확장 + 파라펫월	웨어부 50→ 60m, 여수로 바닥굴착 5m 파라펫월 H=1m 설치		510 (기존여수로 확장)	개거식
	수어댐	'04~'07	1,652	보조여수로 신설	3.0×3.0×1	D12~8×L703	1,525 (기존 653, 보조 872)	터널식

구분	댐명	사업 기간	PMF (m³/s) / 금회	치수 능력 증대방안	규모 수문(m) (수문식: B×H×EA 무문식: B×EA)	규모 수로(m) (터널식: D×L×EA 개거식: B×H×L)	규모 첨두방류량 (m³/s)	규모 형식
준공 (19개 댐)	연초댐	'05~'08	500	기존여수로 확장	웨어부 25→ 52m, 여수로 바닥굴착 5.9m		482 (기존여수로 확장)	개거식
	소양강	'03~'10	20,715	보조여수로 신설	14.7×14.0×4	D14×2련 (L1=1,280.2, L2=1,200.4)	14,200 (기존 7,500, 보조 6,700)	터널식
	대암댐	'04~'10	2,269	보조여수로 신설	Shaft(반원통) D70×H14.4	D10×2련 (L1=427,L2=428)	2,195 (기존 562, 보조 1,633)	터널식
	보령댐	'08~'10	3,424	파라펫월 설치	파라펫월 H=0.5m		2,478	파라펫월
	합천댐	–	10,610	비구조적 대책	홍수조절방식 변경			
	밀양댐	'09~'11	2,509	파라펫월 설치	파라펫월 H=2.5m		2,188	파라펫월
	부안댐	'09~'11	1,388	파라펫월 설치	파라펫월 H=2.0m		808	파라펫월
	임하댐	'04~'12	14,800	보조여수로 신설	11.8×14.65×6	D15×3련 (L1=379, L2=421, L3=462)	13,350 (기존 5,135, 비상 8,215)	터널식
	대청댐	'04~'14	21,742	보조여수로 신설	12.0×17.18×5	B60.0×L1,145	18,036 (기존 10,452, 비상 7,584)	개거식
	안동댐	'05~'14	15,094	보조여수로 신설	16.8×12.5×4	B67.2~40×L385	11,155 (기존 5,024, 비상 6,131)	개거식
	섬진강	'03~'16	8,601	보조여수로 신설	11.5×12.13×4	D13.5×2련 (L1=674,L2=624)	7,758 (기존 3,742, 비상 4,016)	터널식
	주암 (본,조)	'06~'15	12,292	보조여수로 신설	17.2×13.5×2	12.0×537×2	10,191 (기존 6,928, 비상 3,263)	터널식
			2,711	측수로 개선 및 파라펫월 설치	파라펫월 H=0.65m		파라펫월	
	운문댐	'09~'17	7,427	보조여수로 신설	13.1×12.5×4	14.4×573×2	6,910 (기존 2,410, 비상 4,500)	터널식
	평화의댐	'12~'18	23,622	댐 하류사면 콘크리트 보강	댐하류사면 콘크리트(t=1.5m) 보강		16,596 (기존 10,559 보조 6,037)	사면 보강
공사 중 (2개 댐)	충주댐	'13~'24	32,800	보조여수로 신설	9.5×20.0×6	15.8×473×3	28,500 (기존 17,500, 보조 11,000)	터널식
	안계댐	'18~'24 (안정성 강화)	122	파라펫월 설치안	파라펫월 H=1.7m	512 (기존 232, 보조 280)	파라펫월	개거식
설계 중 (2개 댐)	남강댐	'18~'25	20,269	제수문증설+ 보조여수로 신설(안)	(제수문) 8.0×16.3×4	11.0×771×1	14,073 (남강 2,010, 가화천 12,063)	터널식
	선암댐	'20~'24 (안정성 강화)	34	파라펫월 설치안	파라펫월 H=1.2m	340 (보조 340)	파라펫월	개거식
미착수 (1개 댐)	사연댐	–	2,290	기존 보조여수로 확장안	9.0×8.7×2	21.0×8×220	2,120 (기존 1,130, 보조 990)	개거식

표 17. 해외 댐 치수 능력증대 사례

댐명	준공연도	보강연도	보강 사유	보강 방법
Bartlett Dam	1939	1996	홍수배제능력 부족	댐 증고 및 Fuse Plug 설치(175,000ft3/s→ 546,000ft3/s)
Horseshoe Dam	1946	1994	PMF배제능력 부족	댐 증고 및 Fuse Plug 설치(250,000ft3/s→ 553,000ft3/s)
Theodore Roosevelt Dam	1911	1996	PMF배제능력 부족	댐 증고 및 여수로 신설
Fish Lake Dam	1909	1997	추가 용수 확보 등	파라펫월 설치 및 여수로 개축(방류능력 500 ft3/s 증가)
Fourmile Lake Dam	1922	1956	홍수배제능력 부족	기존여수로 수문설치(475ft3/s→ 5,600ft3/s)
Stewart Mountain Dam	1930	1992	PMF배제능력 부족	보조여수로 신설(87,000ft3/s)
El Vado Dam	1935	1966	홍수조절용량 확보 등	방류구 신설(6,850ft3/s)
Ochoco Dam	1920	1998	홍수조절용량 확보 등	댐 증축 및 여수로 신설(11,200ft3/s)
Horse Mesa Dam	1927	1937	홍수배제능력 부족	보조터널 설치(직경 30ft, 길이 400ft)
Buffaio Bill Dam	1910	1980	PMF배제능력 부족	댐 증고 및 여수로 수문설치
Loerie Dam	1971	1981	PMF배제능력 부족	보조여수로 설치(방류량 900ft3/s 증가)
Terminus Dam	1962	2003	추가 용수 확보 등	Fuse Gate(6련) 설치
Warragamba Dam	1960	2002	PMF배제능력 부족	보조여수로 설치

그림 14. '20년 홍수 시 기존 여수로 방류손상 및 보조여수로 활용현황

영의 일환으로 활용방안을 모색하고 있으며, 실제로 '20년 홍수 시 소양강 및 섬진강댐의 보조여수로 방류를 통해 댐 홍수방류능력의 안정성을 입증하는 계기가 되기도 하였다. 아울러 당시 소양강댐 기존 여수로에 홍수방류로 인한 많은 손상들이 발생되어 유사시 보조여수로도 적극적으로 활용할 수 있는 다각적인 제도개선과 연구 등이 필요할 것으로 판단된다.

그러나 현재까지 추진되고 있는 치수 능력증대사업은 2000년대 초반에 산정된 전국 PMP 산정결과를 준용하였으나, 거의 20년 남짓 경과해 현재 이상홍수에 대한 리스크가 점차 심화되고 있으며, 강우사상의 변화나 슈퍼태풍의 영향 등으로 국내 실정에 적합한 보완된 PMP도 산정이 필요한 시점이다. 지난 2016년 10월 5일 제18호 태풍 차바(CHABA)로 인하여 울산지역에 계획빈도를 초과하는 기록적인 강우가 발생하였고, 특히 삼동지역은 1시간 최대 강우량이 131.5mm로 울산지역에서 가장 높은 강우량을 기록하기도 하였다. 강우는 오전 9시 이후에 3~4시간 집중적으로 발생하여 울산광역시 중구 태화·우정시장, 중구 학삭동, 중구 반구동 및 울주군 반천현대아파트 일원을 비롯한 13개소에 침수로 인한 인명, 건물, 차량침수, 교통두절 등 대규모 피해가 발생하였다. 과거의 일반적인 강우패턴에 비해 강우지속시간은 짧아지고, 국지적으로 설계빈도에 육박하는 많은 양의 강우를 동반하면서 최근 국내에서 기후변화 영향에 가장 가까운 집중호우 피해사례라고 볼 수 있겠다.

따라서 최근 환경부에서는 'PMP 산정절차 재평가에 대한 보완연구(2021. 12.)'를 추진하였으며, 과거 PMP에 비해 지속시간이 짧은 호우가 현재보다 증가하고 강우의 공간분포가 다양해지면 연안지역의 호우가 지금보다 더 심화될 것으로 분석하고 있다. 또한 기후변화, 여름장마 및 빈번한 태풍영향 등이 집중되는 우리나라 강우특성상 수공시설물에 대한 위험성은 훨씬 더 가중될 전망으로 기존의 수문

그림 15. '16년 태풍 차바 피해사례

기상학적 방법이 아닌 다양한 방법을 적용한 기후변화 적응검토가 세분화되어 좀더 과학적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

향후 댐의 치수대책은 기후변화에 대비해 과거 댐체 월류방지나 여수로 등의 방류시설 확충 방안만을 탈피하여 좀더 과학적인 PMP 산정방법과 댐 중심으로 하천 등의 다양한 수리시설물과 연계한 유역단위 종합 치수대책 형태로 추진되어야 이상홍수 피해를 가장 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 실제 '20년 홍수 시 대규모 여수로 방류에 따른 노후시설물 손상피해와 하천정비가 미비한 일부 제방의 붕괴, 배수시설 관리 소홀 등의 복합적인 원인들로 전국 각지의 홍수 피해를 증가시키는 계기가 되었다.

그동안 인간이 건설한 다양한 수공구조물은 기후변화라는 자연의 심판 앞에는 한없이 나약함을 보인 것처럼 보이지만, 아직까지 최후의 보루는 그래도 수십 년을 그 자리에서 묵묵히 역할을 다해온 댐이라는 사실에는 아무도 이의가 없을 것이다. 하지만 이제 댐에만 한정한 추가적인 치수대책만으로는 단기간의 국지적 집중호우에 의한 빈번한 홍수피해를 피하기는 어려운 실정이므로 노후 댐에 대한 확실한 치수 능력증대, 하천시설의 설계홍수량 빈도 상향, 도심지 대규모 배수체계 정비 등 종합적인 대책 검토가 시급할 것으로 판단된다.

최근 댐 붕괴 사례들을 보면 이상홍수 다음으로 댐 안전을 심각하게 위협하는 요인은 바로 지진과 시설노후화이며, 앞서 기술한 댐 붕괴 사고요인들을 보면 대부분 월류, 기초결함, 누수 및 파이핑 등을 제시하고 있다. 가장 첫 번째로 지진에 의한 피해는 주기적으로 발생하고 있다. 최근 중국, 일본 등 우리나라와 이웃하여 있는 두 나라에서 강진이 발생하여 큰 피해를 입었다. 특히 2008년 규모 7.9의 강진으로 약 44만명의 사상자가 발생한 중국 쓰촨성에서는 2019년에도 규모 6.0의 강진이 발생하여 220여 명의 사상자가 발생했다는 보도가 있었다.

지진피해와 함께 강진에 의한 댐 붕괴도 주기적으로 발생하여 추가적인 대규모 국가재난 상황을 발생시키고 있는데, 1999년 대만의 치치지진(규모 7.3) 시 싱가잉댐(Shinhgaing Dam) 붕괴로 수천 명이 사망하였으며, 2011년 일본 토호쿠지진(규모 9.0)시 후지누마댐(Fujinuma Dam)이 붕괴하여 2만명 이상의 인명피해가 발생하였다. 지진에 의한 직접적인 피해와 댐 붕괴로 인한 2차 수해 피해까지 겹치면 이는 영화에서나 볼만한 엄청난 재난상황

그림 16. 최근 강진에 의한 해외 댐 붕괴 사례

그림 17. 최근 경주·포항지진 피해사례

으로 본래의 상태로 돌아가기에는 장기간의 고통과 엄청난 복구비용 등으로 국가경제의 근간을 흔들 수도 있다.

우리나라는 주변국가에 비해 이러한 지진에 비교적 안전한 나라로 인식하고 있었지만, 2016년과 2017년에 국내에서 기상관측을 시작한 1978년 이래 최대 규모의 지진이 경주와 포항에서 연이어 발생하여 건물에 금이 가거나 담장이 무너지고, 부상자가 발생하는 등의 피해가 발생하였다. 우리 국민들을 공포에 몰아넣은 경주와 포항 강진은 한반도가 지진 안전지대라는 오랜 믿음을 무너뜨리면서 지진에 대한 두려움과 공포를 삶의 영역에서 절실히 느끼게 되었다. 다행히 지진에 의한 댐 붕괴 사고는 없었지만, 이를 계기로 국가 인프라시설 중에서 중요도가 높은 댐의 경우에 댐 내진설계 기준을 강화해 국가 정책적으로 댐 내진보강을 본격적으로 검토하는 계기가 되었다.

게다가 우리나라 대부분의 사회기반시설은 급속도로 경제발전이 이뤄진 70~80년도에 집중 건설되어 노후도가 높은 상태이며, 그중 댐은 타 사회기반시설에 비해 노후도가 매우 심각한 수준이다. 2019년 정부가 발표한 자료에 따르면 준공 후 30년 이상 경과한 노후화 비율 대형 SOC시설물 중에서 댐이 가장 높은 수준이라고 발표하였다. K-water에서 관리 중인 37개 댐 중에서도 준공 후 30년 이상 경과된 댐이 총 19개소로 약 51%에 이르고 있으며, 특히 용수전용댐은 14개 중 30년 이상 경과된 댐이 10개소로 약 71%에 이르고 있다.

노후화에 따른 댐 붕괴는 필댐에서 누수 및 파이핑,

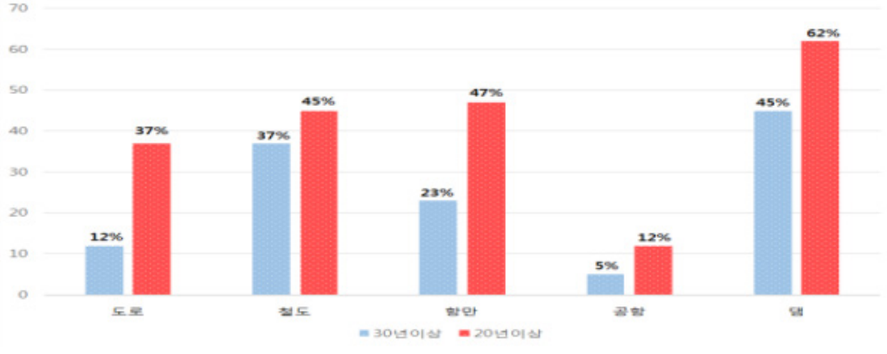


그림 18. SOC시설물 노후화 현황(지속가능한 기반시설 안전강화 종합대책, 국토교통부, 2019. 6.)

다목적댐(총 23개소, 홍수조절댐 포함) 용수댐(총 14개소)

그림 19. K-water 관리 댐 노후도 현황

씽크홀 등의 형태로 주로 관리소홀과 함께 발생하는 사고 중 하나이며, 보통은 홍수철 집중호우에 따른 고수위 시 갑자기 발생해 하류에 큰 피해를 입히는 사례가 많았으며, 미국의 볼드윈힐스댐과 Upler Clear Boggy Watershed댐 붕괴 등이 대표적인 사례라고 볼 수 있다. 국내 1만 7,000여 개에 이르는 농업용 저수지들도 30년 이상 경과한 시설이 약 95% 이상으로 노후화가 심각해 2011년부터 2018년까지 거의 매년 붕괴사고가 발생하였는데, 대부분 복통 주변 댐체 누수나 파이핑 등 노후화와 관리부실 등의 원인들이 복합적으로 작용했다고 지적되고 있다.

국내에서는 이러한 다양한 댐 안전 위협요인 증가에 대비해 국가차원의 댐 안전 강화를 위해 2000년대 들어 총 5번의 댐 설계기준을 개정하였으며, 2000년대 초반에는 이상홍수, 2000년 중반 이후는 지진 등에 따른 댐 내진설계기준 상향과 댐 붕괴 대비 선제적대응을 위한 비상방류시설 설치 등의 댐 안전관리 강화가 그 주요 골자이다.

댐 비상방류시설은 댐체 붕괴징후, 수질오염, 운영 및 유지관리 시 등 비상상황 시 여수로 월류웨어 이하의 저류수를 배제하기 위한 시설로 댐·저수지 안전측면에서 반드시 설치되어야 하며, 충분한 방류능

표 18. 댐 설계기준 주요개정 이력

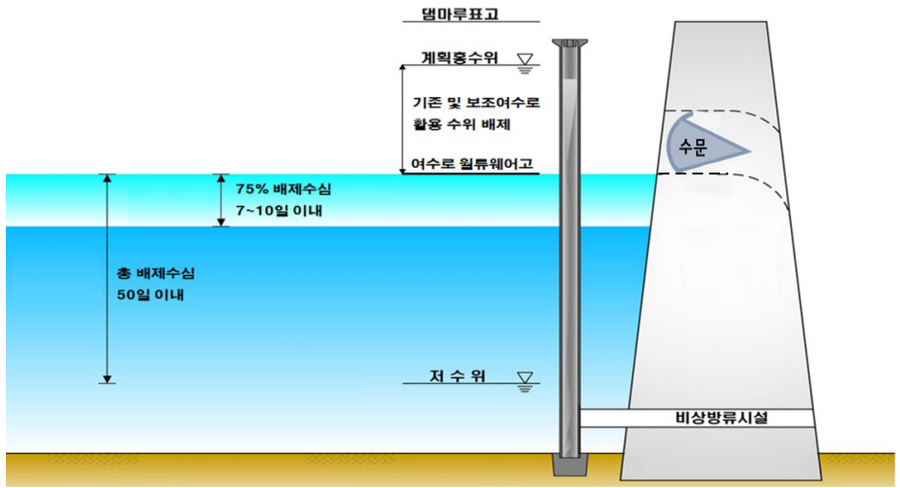
구분	주요내용
2001년	· 이상홍수 대비–가능최대강수량(PMP) 고려 · 내진설계 도입
2005년	· 이상홍수대응력 강화–가능최대홍수량(PMF) 및 필댐 여유고 산정방법
2011년	· 비상상황 대응력 강화–비상방류설비 설치의무 · 내진설계 추가–부대시설물(수문, 관리교, 취수탑 등)
2019년	· 댐 내진설계기준 강화 및 동역학적 해석기법 기본 채택 –재현주기 상향(특등급 0.154g→ 0.22g, 1등급 0.11g→ 0.154g)
2020년	· 비상방류설비 규모결정 세부기준 등 개정(해설서)

력을 가지고 있어야 한다. 현재 댐 설계기준에 명시된 비상방류시설은 홍수기(6~9월) 평균유입량 유입 시 배제수심(여수로 웨어마루고~저수위)의 75% 수위까지는 7~10일 이내, 배제수심 전체는 40~50일 이내 배제를 기준으로 제시하고 있다. 최근 연구결과에 따르면 댐 붕괴 징후발생 시 초기수위를 배제수심의 75% 수위까지 낮추었을 경우, 댐체에 작용하는 하중의 50% 이상을 경감시켜 급격한 댐 붕괴를 방지하는 데 효과가 크다고 분석된 바 있다.

K-water는 2013년부터 댐 시설노후화에 대비한 성능개선 사업을 구상하여 상대적으로 노후화가 심각한 용수댐을 우선적으로 마스터플랜을 수립하여 수도정비기본계획 등 상위계획에 반영하고, 예타면제 등 사전절차를 완료하고, '18년부터 본격적으로 댐 안전성 강화(1단계, 용수댐) 사업을 추진 중에 있다. 1단계 용수댐사업을 우선적으로 추진하게 된 결정적인 계기는 '16, '17년 연이어 발생한 경주, 포항지진으로 국가재난 위험성에 대한 우려가 컸으며, 노후화된 용수댐들의 대부분이 진앙지 인근에 분포하고 있어 사업추진에 대한 시급성과 공감대가 이루어졌다.

댐 안전성 강화 주요사업 내용은 강화된 댐 설계기

표 19. 비상방류시설 개념도 및 설계기준



배제수심	• 여수로 웨어 마루고~저수위
유 입 량	• 홍수기(6~9월) 평균 유입량
배제기간	• 배제수심 75% 수위까지: 7~10일 이내 • 배제수심 전체: 40~50일 이내
시설계획	• 사수위 이상, 생공용수 관로와 별도 구축
배제속도	• 사면 슬라이딩 방지를 위해 수위저하 속도를 측정하여 방류밸브 개도 조정 실시

운문댐 공사추진 현황 영천댐 공사추진 현황

그림 20. 댐 안전성 강화(1단계, 용수댐) 사업 공사추진 현황

그림 21. 다목적댐 비상방류시설 신설·확충 계획안

준에 따라 14개 용수댐을 대상으로 비상방류시설 확충·신설, 부대시설물(취수탑, 공도교 등) 내진보강, 댐체 심벽보강 등 댐 붕괴 방지 및 노후화가 심각한 댐 및 부속시설물에 대한 선제적 보강 등을 '24년까지 국고 약 3,188억원을 투입하여 추진하고 있다. 대암·수어댐은 '20년 말 취수탑 등 시설보강을 완료하였고, 운문·영천·안계·연초·달방·감포·광동·평림댐 등 8개 댐에 대한 공사와 선암·구천·대곡·사연댐 등 4개 댐은 설계를 추진 중에 있다.

댐 안전성 강화(2단계, 다목적댐)사업은 국고를 투입하여 '15년부터 '19년까지 통합 마스터플랜 수립을 완료하였고, '20년 예비타당성조사 면제와 '21년 사업계획 적정성 검토(KDI)를 거쳐 '22년부터 본격적으로 사업이 추진되고 있다. 사업계획 적정성 검토 결과, 10개 댐(주암·안동·횡성·소양강·용담·보령·임하·합천·섬진강·충주) 대상으로 용수댐 사업내용과 거의 동일한 사업내용으로 '27년까지 국고 4,718억원 규모의 총사업비가 확정되었다. 또한 제4차 국가안전관리기본계획(행안부, '19. 8.), 공공시설물 내진보강대책(정부합동, '19. 12.), 국가물관리기본계획(환경부, '21. 6.) 등 주요 국가 상위계획에 반영된 미래재난 대응역량 강화에 일조할 국가 정책사업으로 우선순위에 따라 '21년 3개 댐(주암, 안동, 횡성) 기본계획을 수립하였다.

다목적댐 10개소 중 비상방류능력이 크게 부족한 2개 댐(용담, 주암(본))은 신설, 6개 댐(소양강, 안동, 합천, 주암(조), 섬진강, 횡성)은 기존 도수터널 분기 등 기존시설을 활용하는 방안으로 계획하였으며, 다목적댐 부속시설물에 대한 내진성능평가 결과에 따라 4개 취수탑(안동, 임하, 주암(본), 보령)과 3개 댐 공도교 교좌받침에서 내진안전성이 미확보되어 내진보강을 추진할 계획이다.

최근 주암도수터널 이원화 공사 시 적용한 매립식 가물막이(매립식+차수벽 형식)가 육상굴착위주공법으로 기존 축도식 가물막이 대비 경제적인 공법

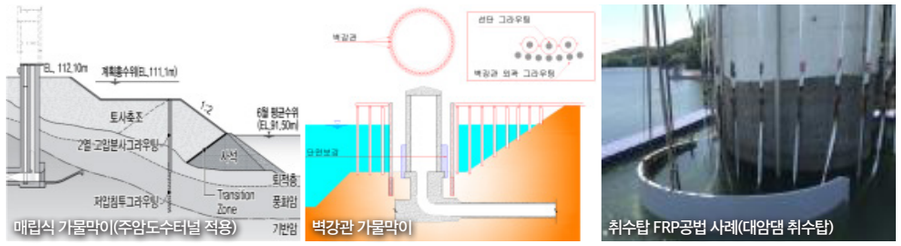


그림 22. 최근 가물막이 형식

으로 주로 검토되었으나, 운문·영천댐 안전성 강화 사업 시 적용된 벽강관 가물막이공법은 토석 가물막이가 불필요해 환경성·시공성 측면에서 유리해 최근 많이 적용되고 있다. 벽강관 가물막이공법은 일본 신 카츠라자와댐과 카노가와댐 취수탑 신설·보강 시 적용되었던 공법으로 공사기간 동안의 원활한 용수공급 방안과 다소 증가하는 공사비 최적화 계획이 수반된다면 가장 바람직한 공법으로 평가되고 있어 댐·저수지 등 수중상태 구조물 신설·보강과 비상방류시설 신설 시 가물막이 등으로 광범위하게 적용되고 있다. 또한 기존 취수탑 보강에 과거 교각의 우물통 기초보강에 활용되고 있는 FRP공법이 많이 적용되고 있는데, 공사비가 매우 저렴하여 용수공급에 지장을 받지 않고 수중공사를 할 수 있어 최근 많이 적용되고 있으나, 수중굴착이나 잠수작업의 안전사고 우려로 신개념 Pile Support공법 등의 신공법이 제안되고 있는 추세이다.

비상방류시설과 취수탑 내진보강 외에 취약한 댐체·여수로 보강도 추진될 예정이다. 특히 소양강댐의 경우 여수로 급경사수로부 Cavitation에 의한 손상위험으로 공기혼입장치 설치와 함께 전면보강이 필요한 상태로 '20년 홍수방류 시 여수로에 많은 손상이 발생하여 긴급복구를 수행하는 등 방류 안전성에 일부 문제가 발생하였다.

또한 접근수로 옹벽 와류발생에 따른 급경사수로 측벽 월파발생과 미 Willostick사 전자기장탐사 결과에 따른 심벽부 유로발생 의심으로 그라우팅 시행 등의 여수로 전면개선을 세부적으로 검토할 예정이다. 이는 상세 수리해석기법 및 체계적인 설계기준이 정립되기 이전 설계·시공과정에서의 일부 취약사항 발생과 시설노후화 등의 복합적인 요인 때문으로 추정된다. 국내 최고규모의 다목적댐으로 우리나라 경제발전의 주축을 담당해온 소양강댐도 '23년에는 준공 50주년을 맞이할 예정인데, 준공당시보다는 훨씬 더 안전한 모습으로 탈바꿈할 수 있기를 기대해본다.

최근 댐 정책 패러다임은 건설에서 관리로 완전히

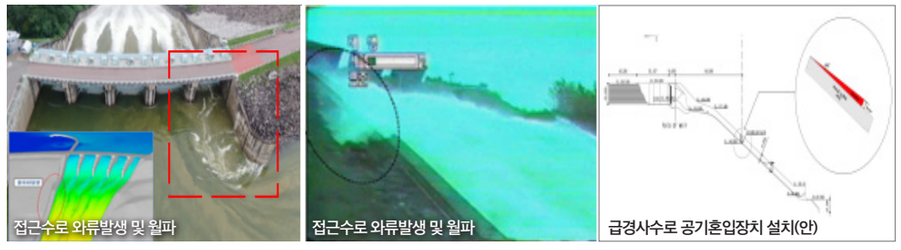


그림 23. 소양강댐 여수로 취약부 현황

전환된 상태로 국가 중요시설은 점점 노후화되고 있는 반면, SOC 관련 예산은 점차적으로 줄어들고 있는 추세이다. 앞에서 언급한 이상기후, 지진, 시설노후화 등 댐 안전을 심각하게 위협하는 요인들로부터 완벽하게 안전을 보장받을 수 있도록 기존 댐에 대한 장수명화와 다양한 댐 안전사업들을 적극적으로 추진해야 소중한 수자원의 핵심자산을 후세에도 계속 물려줄 수 있을 것이다.

4. 4 댐의 노후도 실태 및 개선방향

어느 시대를 막론하고 우위를 차지하고 있는 사회는 적응이 느린 사회에 비해 더 생산적이고 더 큰 규모로 수자원을 이용한다. 물 사용량의 증가 속도는 세계인구 증가보다 두 배 이상 빠르며, 20세기에 물 사용량이 9배 늘어난 것은 에너지 사용량이 열세 배 늘어난 것에 필적할 만한 일이다. 이와 반대로 수자원 기반시설을 유지하는데 실패하거나 물 관련 장애를 극복하고 잠재적 이용가능성이 있는 물을 끌어다 쓰는 데 실패한다는 것은 쇠퇴와 정체의 표시였다(스티븐 솔로몬, 2013).

세계인구 증가, 물 사용량 증가, 경제발전 등은 전 세계 공통적으로 1950년 이후에 가히 폭발적으로 증가하고 있으며, 우리나라도 예외가 아니다. 특히 우리나라는 1970~1990년대에 댐과 수도 등 국가사회기반시설이 구축되면서 급속한 경제성장을 이루었고, 최근에는 K-팝, K-드라마, K-영화 등으로 일컬어지고 있는 K-컬처의 융성을 목도하고 있다.

그런데 최근에는 이러한 경제, 사회 및 문화의 발전에 적신호가 켜지고 있어 이에 대한 대비와 대응이 시급한 실정이다. 즉, 우리나라의 경우 고령화와 저출산, 사회기반시설의 고령화 및 노후화, 기후변화, 글로벌 경제 및 정치 변동 등 복합적 요인으로 지금까지의 경제와 문화적 번영의 지속가능성이 위협을 받고 있는 것이다.

수자원의 개발·운영뿐만 아니라 우리 후손들의 번영까지 보장할 수 있는 발전 즉, 지속가능발전을 위해 노력하는 것은 현시대 댐 기술자들의 막중한 책임이라고 할 수 있다. 이에 본고에서는 최근의 댐 기술 정책과 동향을 살펴보고 앞으로 향후 우리 댐 기술자들이 구현해나가야 할 방향에 대하여 논해보고자 한다.

표 20. 국내 댐 및 저수지 현황(2016년 기준)

구분	전국	다목적댐	발전 전용댐	생공용수 전용댐	홍수 조절댐	하굿둑 및 담수호	농업용 저수지	다기능보
개소	17,518	20	15	54	12	12	17,401	16
총저수용량 (억m^3)	231.1	129.2	15.4	6.09	27.1	12.6	31.4	6.26
유효저수용량 (백만m^3)	146.3	91.1	9.9	5.4	-	8.1	30.0	1.7
용수공급 (억m^3/년)	209.2	112.2	13.3	8.8	-	29.3	40.1	4.6

- 제4차 수자원장기종합계획(2016~2020) 제3차 수정계획, 국토교통부, 2016

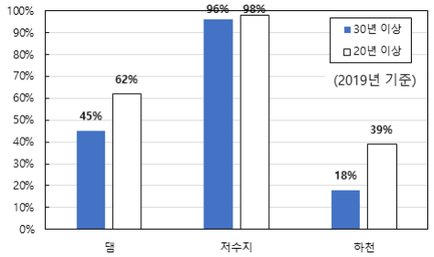


그림 24. 전국의 노후 댐과 저수지 현황

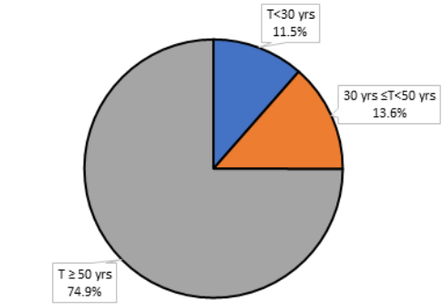


그림 25. 한국농어촌공사의 저수지 경과연수 현황 (2021년 기준, 총 3,400개소)

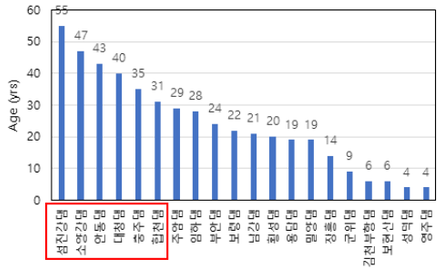


그림 26. K-water 다목적댐의 준공 후 경과연수 현황(2020년 기준)

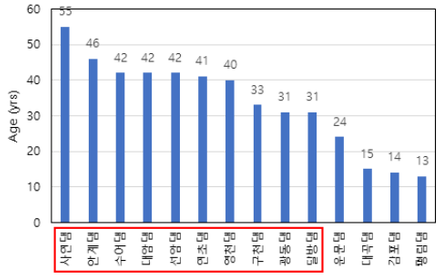


그림 27. K-water 용수전용댐의 준공 후 경과연수 현황(2020년 기준)

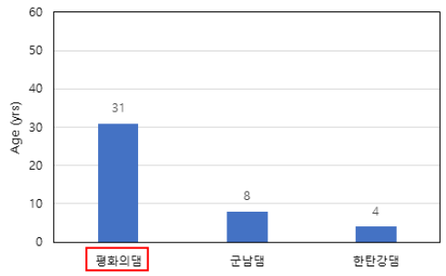


그림 28. K-water 홍수조절댐의 준공 후 경과연수 현황(2020년 기준)

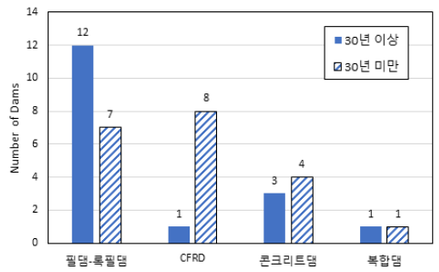


그림 29. K-water의 댐 형식별 경과연수 현황 (2020년 기준)

표 21. K-water 댐의 형식별 경과연수 현황(2020년 기준)

구분	필댐-록필댐	CFRD	콘크리트댐	복합 댐
30년 이상	12	1	3	1
30년 미만	7	8	4	1
계	19	9	7	2

4. 4. 1 국내 댐 노후화 현황

4. 4. 1. 1 경과연수

우리나라의 댐과 저수지 등의 수자원시설은 표 20과 같다. 이들 수자원시설을 통한 용수공급량은 총 209억m³/년이며, 이는 우리나라의 연간 총수자원량 1,323억m³의(북한에서의 유입량 23억m³ 포함) 약 16%, 총 실제이용량 372억m³의 56%에 해당한다. K-water는 국내 홍수조절의 95%, 생·공용수 공급의 약 65%를 담당하고 있다.

한편 30년 이상 경과한 댐과 저수지는 그림 24에 나타낸 바와 같이 각각 45%와 96%에 이른다. 이중 한국농어촌공사는 관리 중인 저수지 3,400여 개소 중 88.5%가 30년 이상 경과한 상태이다(2021년 기준). K-water는 20개의 다목적댐, 14개의 용수전용댐, 3개의 홍수조절댐과 1개의 하굿둑 등 총 38개의 댐 시설을 운영관리하고 있으며, 2020년 현재 30년 이상 경과한 댐은 37개 댐 중 46%에 이르고, 2030년에는 약 65%에 이를 것으로 전망된다.

표 22. 흙댐 및 록필댐의 주요 노후화 증상(ICOLD, 1994)

댐의 구성요소	노후도 증상
기초 (토질 또는 암반)	– 변형 – 강도 손실, 양압력 증가, 응력상태의 변화 – 내부 침식 – 기초부의 성능저하(그라우트 커튼 및 배수 시스템의 노후화 등)
댐체 (제체 재료)	– 변형, 강도저하, 간극수압 증가, 내부 침식 – 누수, 제체의 붕괴, 표면 침식
기타	– CFRD의 차수벽을 통한 누수 – 투수계수의 변화 – 콘크리트 구조물과 댐체 사이의 부착력 상실 – 토목섬유의 노후화

표 23. 콘크리트댐 또는 조적식 댐의 주요 노후화 증상(ICOLD, 1994)

댐의 구성요소	노후도 증상
기초 (암반)	– 영구적 또는 반복적인 하중으로 인한 강도 저하 – 침식 및 용해 – 그라우트 커튼 및 배수 시스템 노화
댐체 (콘크리트 또는 모르타르 및 석조)	– 화학반응에 의한 팽창 – 수축을 일으키는 수축, 크리프 및 반응 – 환경에 따른 물질의 화학 반응으로 인한 열화 – 영구적이고 반복적인 하중으로 인한 강도저하 – 동결융해에 의한 내구성 저하
기타	– 시공이음부의 열화 – 상류 측 표면의 열화 – 프리스트레스 긴장재의 열화

4. 4. 1. 2 노후화의 증상

(1) 노후화(Aging)의 정의

ICOLD(1994년)에서는 노후화를 '운영 개시 이후 5년 이상 경과되어 나타나는 열화현상'으로 정의하고, 이 시기 이전에 발생하는 것은 설계, 시공 또는 운영의 부적절함 때문으로 규정하고 있다. ICOLD의 노후화의 정의는 단순히 경과연수만으로 노후화를 논하고 있는 우리나라와 달리 과학적이고 합리적인 것으로 판단된다.

(2) 노후화 증상

노후화는 재료 특성, 환경 특성(한랭지역, 열대지역 또는 온대지역 / 강진대, 약진대 / 화산지대, 빙적토지대, 퇴적토지대 등), 수문 및 지진 특성, 운영 및 관리 특성, 사용된 기술의 수준 및 특성 등 다양한 조건에 의해 영향을 받는다. ICOLD(1994년)에서는 댐 형식별로 노후화 증상을 표 22 및 표 23과 같이 기술하고 있다.

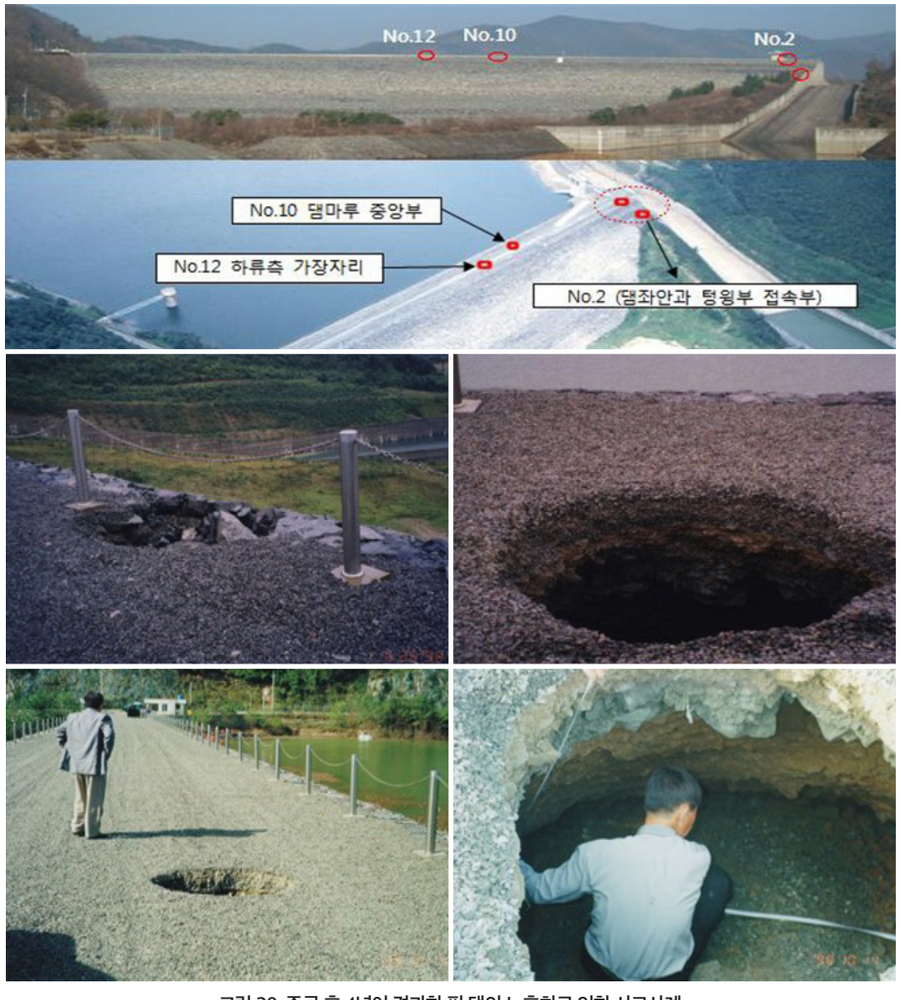


그림 30. 준공 후 4년이 경과한 필 댐의 노후화로 인한 사고사례

(3) 노후화 사례

① 필 댐

운문댐은 준공 후 4년만인 '98. 4월부터 정상부 싱크홀을 시작으로 추가적인 싱크홀('98. 6., '98. 10.)이 발생하는 사고가 발생했으며, 정밀한 조사결과 코어재료의 일부층이 불량입도(Gap-graded) 상태로 시공되었고, 담수 후 침투수에 의해 입자가 유실되는 열화현상이 심화되어 댐마루에 싱크홀이 발생한 것으로 분석되었다.

② 콘크리트댐

합천댐에서 갤러리 내에 있는 2번 누수량계(LW2)의 누수량이 동절기 관리기준치인(300L/개소) 초과하는 일이 발생하였으며, 상류측 시공이음부에 누수가능성 조사결과 그림 31과 같이 누수구간이 존재하는 것이 확인되었다.

그림 31. 콘크리트댐 상류 시공이음부를 통한 누수경로 발생 확인

준공 후 33년이 경과한 대청댐 정밀점검('13년) 결과, 댐체 콘크리트의 균열, 탈락 및 백태 등의 콘크리트 열화가 진행 중인 것을 확인하였으며, 갤러리 내 감압공이 폐색되어 양압력 저감기능이 저하되는 등의 노후화가 확인되었다(그림 32 참조).

그림 32. 콘크리트댐의 노후화 사례

그림 33. 모닝글로리 타입 콘크리트 여수로의 노후화 사례

1980년 준공 후 31년이 경과한 영천댐의 주여수로(모닝글로리) 콘크리트에 대한 조사결과, 그림 33과 같이 누수, 백태, 탈락, 단면손실 등의 노후화가 진행중인 것이 확인되어 습윤에폭시 주입, 몰탈뿜칠 및 메쉬 설치 후 몰탈 등을 이용한 복구를 실시하였다.

4. 4. 2 댐의 노후화 관리 현황 및 개선 방향

4. 4. 2. 1 K-water의 관련 사업

K-water는 기후변화, 시설노후화 등에 대비하여 시설물의 안전성을 확보하는 데 있어서 선진국형 안

분야	AS-IS	TO-BE
① 시설 안전성	사후대응, 상태유지	선제적 대응, 안전성 강화
② 기술·시스템	분절된 관리 시스템	통합적 스마트 관리 시스템
③ 원천기술	국외 등 외부 의존적	원천기술 확보
④ 관리체계	시설별 사후위주 관리	총체적·선제적 관리

그림 34. K-water의 물 인프라 안전 및 유지관리 마스터플랜 4대 중점분야

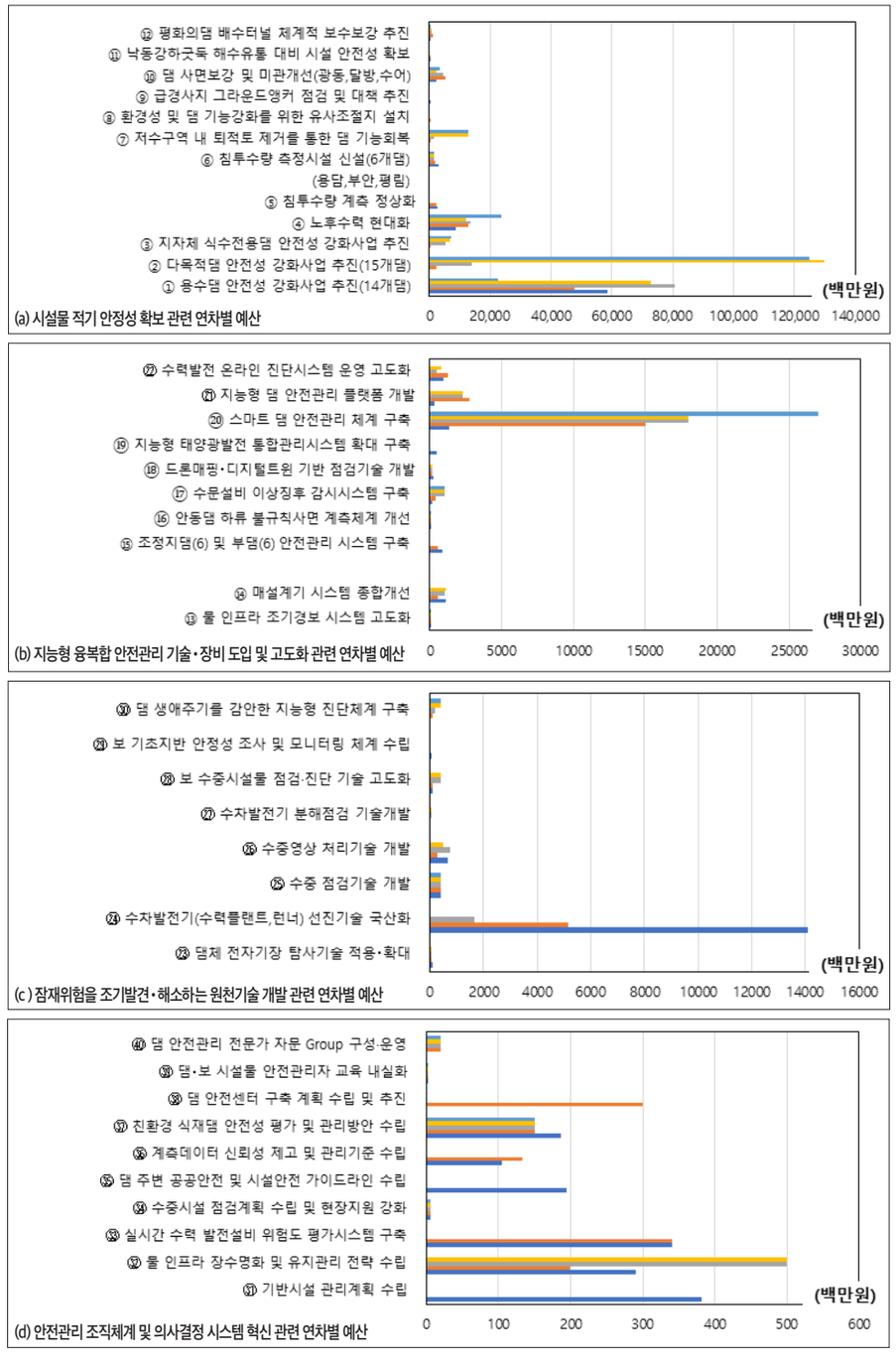


그림 35. K-water의 물 인프라 안전 및 유지관리 예산투자계획(안)(신동훈, 2021)

그림 36. 댐 시설물 평가 단계별 절차(국토교통부, 2018)

전관리 체계를 구축하고 4차산업혁명 기술을 접목하여 물 인프라시설의 안전관리 기술을 고도화하기 위해 '물 인프라 안전 및 유지관리 마스터플랜(이하 마스터플랜)'을 마련하여 추진하고 있다. 이 마스터플랜은 K-water가 유지관리하고 있는 56개 댐과 보 시설물을 대상으로 5개년간(2020~2024년) 추진할 예정이며, 정부 정책 및 환경변화와 연계하여 매 2년마다 보완해가며 추진하고 있다.

마스터플랜의 중점분야는 내외부의 환경분석을 통해 물 인프라의 유지관리 여건 변화에 적응 및 선제적으로 주도하기 위해 그림 34와 같이 4개 중점분야를 선정하여 추진하고 있다.

마스터플랜의 4대 중점분야별 세부 추진과업에는 댐 시설물(14개 용수전용댐 및 15개 다목적댐)의 안전성 강화사업, 노후 수력발전설비의 현대화사업, 저수구역 내 퇴적토 제거사업 등의 '시설물 안정성을 강화하고 기능을 강화하는 사업', 4차산업기술(드론매핑, 디지털트윈, 지능형 댐 안전관리 플랫폼 기술 등)을 활용한 '스마트 안전관리 시스템 구축사업', 안전관리 조직체계 및 의사결정 시스템을 혁신

하기 위한 '제도 및 체계개선 과업' 등이 포함되어 있으며, 이전보다 댐 시설물 안전 및 유지관리에 있어 혁신적인 발전을 기대하고 있다.

각 분야별 세부추진과제와 예산은 그림 35와 같으며, 2024년까지 투입예정인 예산총액은 약 8,400억원(국고 포함)이며, 이중 다목적댐과 용수전용댐의 안정성 강화사업비가 총예산의 66% 정도이다.

4. 4. 2. 2 문제점 및 개선방향

(1) 문제점

현재 국가 주요시설물의 안전점검이나 안전진단은 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(이하 시설물안전법)」제21조 및 같은 법 시행령 제17조에 따라 제정된 '시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침(국토교통부 고시, 제2018-45호, '18. 1. 18., 이하 지침)'의 시행을 위하여 국가가 정한 세부지침인 '시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단 편)(이하 세부지침)'에 따라서 실시하도록 규정되어 있다.

세부지침의 목적은 지침에서 정하는 안전점검 및 정밀안전진단의 실시방법·절차 등에 관한 필요사항을 시설물별로 보다 상세히 제시하고 그 실시요령을 정하여 시설물에 내재되어 있는 위험요인이나 시설물 기능 및 성능저하, 상태 등을 신속·정확하게 조사·평가하고, 그에 대한 적절한 안전조치를 취하여 재해 및 재난을 예방하며, 시설물의 안전성 및 기능성을 보완·보전케 함으로써 시설물의 효용성을 증진시킴과 더불어 과학적 유지관리를 체계화하는 데 있다.

댐 시설물의 노후도 평가와 관련하여 짚고 넘어가야 하는 부분들을 세부지침 및 세부지침의 해설서(댐 편)의 내용과 실제의 안전진단 결과를 토대로 정리하면 다음과 같다.

① (현재의 세부지침은 시설물의 상태가 어떻게 변화할지에 대한 예측 방안 미제시) 현재의 세부지침은 대상시설별 점검 및 진단의 실시범위, 대상시설별로 점검, 기초자료조사, 현장조사, 거동해석, 수리·수문분석, 계측자료분석, 시험항목, 외관상태 점검항목, 절차 및 기준 수량, 상태평가 기준과 방법 등을 규정하고 있다.

그러나 이 세부지침에 따라서 점검 또는 진단한 결과는 시설물의 현재상태에 대한 판단은 가능하나 미래에 대한 예측을 할 수 있는 방안을 제시하고 있지 않다.

즉, 그림 36에 나타낸 댐 시설의 평가단계별 절차를

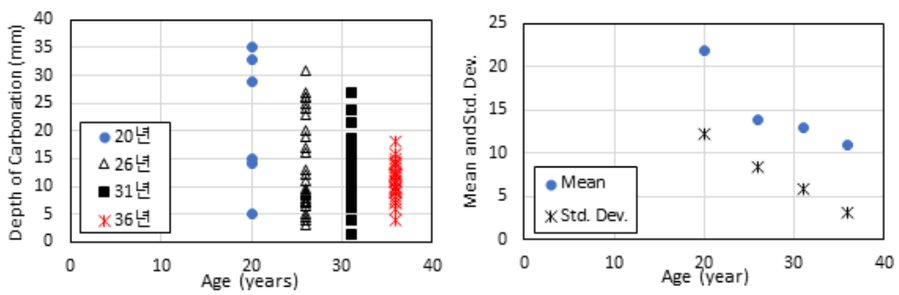


그림 37. 시간경과에 따른 철근콘크리트의 탄산화깊이 측정결과의 통계적 신뢰성 검토

보면 '개별부재 평가→ 복합부재 평가→ 개별시설 평가→ 복합시설 평가→ 통합시설 평가→ 종합시설 평가'의 총 7단계를 거쳐 평가를 하나 7단계를 거치는 동안에 시간경과에 따른 노후화의 추세에 대한 분석은 이루어지지 않는다.

② (현재의 세부지침은 잔존수명에 대한 정보 미제공) 현재의 세부지침은 시설물의 상태가 어떻게 변화할지 또는 열화될 지에 대한 예측결과를 제시하지 못함에 따라서 잔존수명에 대한 분석 또는 정보를 제공해주지 못한다.

③ (기존 안전진단 결과의 분산이 큼) 주요시설물에 대한 정밀안전진단은 1995년 「시설물 안전관리에 관한 특별법(현 시특법)」이 제정되고, 법정기관인 시설안전기술공단(현 국토안전관리원)이 설립되면서 시작되었다.

댐 시설의 경우 1998년에 소양강댐, 안동댐 및 대청댐을 시작으로 정밀안전진단이 시작된 이래로 진단장비 및 기술이 발전하고, 진단인력의 경험과 데이터가 축적되었으며, '시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단)'의 내용도 개선이 되어 왔다. 이러한 발전 과정에 필연적으로 발생된 것이 안타깝게도 점검 및 진단의 항목 및 데이터의 일관성과 품질의 분산성이 크다는 점이다.

예를 들면 철근콘크리트 구조물의 내구성을 평가하기 위해 탄산화깊이(Carbonization depth)를 측정한다. 이 경우 탄산화깊이는 시간이 경과함에 따라서 증가하는 것이 일반적이며, 탄산화속도계수를 이용하여 철근까지의 잔여깊이를 추정하여 잔존수명을 평가하기도 한다. 그러나 실제 어느 댐의 1~5차에 걸친 정밀안전진단 보고서를 검토하여 콘크리트 구조물의 탄산화깊이 측정데이터에 대한 간단한 통계분석 결과는 그림 37과 같이 측정결과가 철근콘크리트의 일반적 탄산화 거동과 상이한 경향을 보여 측정데이터의 품질이 낮다는 것을 보여준다.

④ (점검 및 진단 데이터 관리 체계의 미흡) 국가 주요시설물은 「시설물안전법」에 따라 정밀점검과 정밀안전진단이 이루어지고, 진단결과는 국토안전관리원이 운영하는 시설물통합정보관리시스템(이하 FMS)에 등록하여 관리되고 있다.

그러나 FMS에 등록된 수많은 자료들이 대부분 보고서 파일, 이미지 파일, 도면 파일 등의 형태로 등록되어 개별 구조물 또는 전체 구조물의 상태에 대한 종합적인 분석이 거의 불가능한 상태에 있다.

(2) 개선방향

댐 시설과 같은 국가 주요시설물의 노후화 문제는 기후변화라는 불가항력적 자연환경 영향의 심화에 국가적으로 저출산·고령화 현상이 더해지면서 댐 관리자가 풀어야 할 최우선의 과제가 되었다.

따라서 댐 시설의 노후화 문제를 해결하기 위해서는 앞에서 다음과 같은 점에 착안하여 과학적이면서 경제적으로 효율성 높은 유지관리 전략을 마련하여 추진해나가야 할 것이다.

① (점검 및 진단 데이터 관리체계의 개선) 기존의 점검 및 진단자료를 분석이 가능한 형태로 변환하는 과정이 필요하며, 신규로 수행되는 점검이나 진단은 처음부터 분석이 가능한 형태의 데이터로 만들기 위한 새로운 데이터 관리체계를 개발할 필요가 있다.

이와 관련하여 국토교통부에서 추진하고 있는 '인프라 총조사 및 기반시설 통합관리 시스템 구축사업('20~'24, 150억원)'을 추진하고 있는 것은 매우

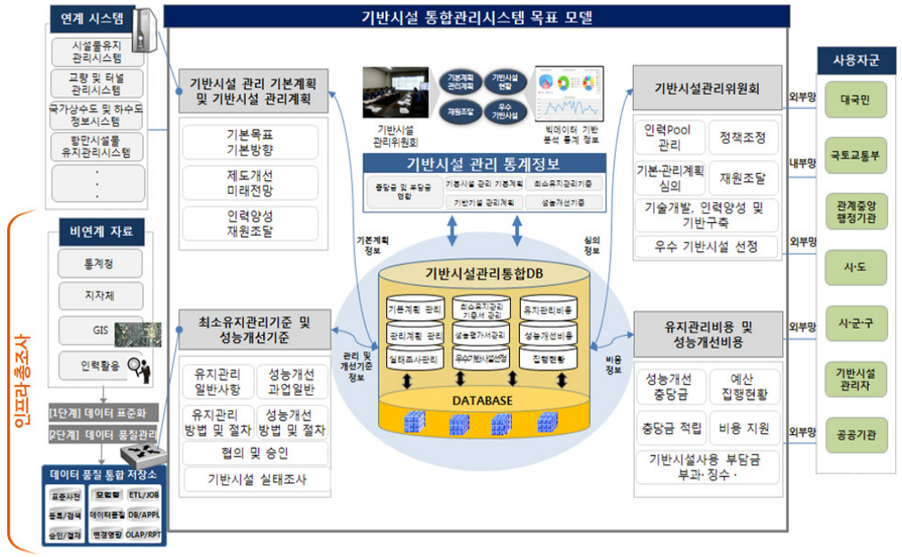


그림 38. 인프라 총조사 및 기반시설통합관리 시스템 개요도(국토교통부, 2020)

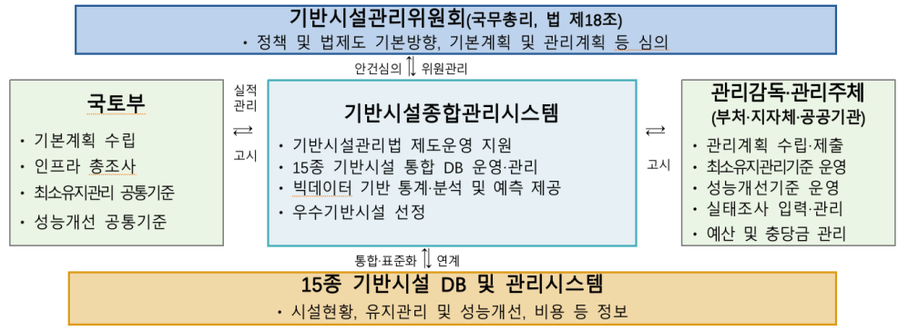


그림 39. 기반시설통합관리 시스템의 주요 기능(국토교통부, 2020)

필요한 과업이며,「기반시설관리법」시행('20. 1월)에 따라 도로·철도·댐 등 기반시설(15종)의 노후화에 대비한 전략적 투자 및 관리방식 도입 기반 마련을 목적으로 추진되고 있다(그림 38~39 참조).

② (노후화 메커니즘 규명을 위한 연구개발 활성화) 시설물의 열화메커니즘의 이해는 댐 시설물의 유지관리를 과학적이고 효율적으로 하는 데 필수요소이다. 대개의 경우 시설물은 단위시설물들의 집합체로 구성된다. 단위시설물은 다시 개별부재 또는 복합부재의 집합체로 구성된다. 따라서 개별부재의 열화메커니즘의 이해는 곧 시설물의 열화메커니즘을 이해하는 시작점이다.

댐 시설의 경우 표 24와 같이 다양한 시설들로 구성되어 있으며, 각 시설들은 다양한 부재들로 구성되어 있으며, 각 부재에 대한 열화메커니즘에 대한 연구개발이 필요하다.

표 24. 댐 시설물의 구성요소

구분	시설물명	비고
기본 시설물	• 댐체(필 댐/ 콘크리트댐/ 복합 댐/ CFRD)	
	• 여수로(상용여수로/ 보조여수로)	
	• 기초 및 양안부	
	• 여수로 수문	
부대 시설물	• 부댐, 취수시설	
	• 수압터널 및 도수터널	
	• 발전소 구조물, 스톱로그	
	• 공도교	
기타 시설물	• 관리동 등 건축물	
	• 옹벽 및 절토사면	

표 25. 한국 물 인프라의 노후화율 전망(Kang, 2019)

Infrastructure		2014			2025			2035		
Categories	Facility	Rate(%)	Average (%)		Rate(%)	Average(%)		Rate(%)	Average(%)	
Sewage arrangement	Pipe	14.1	10.5		38.1	45.3		51.5	67.6	
	Sewage treatment equipment	6.8			52.5			83.6		
River facility	River bank	4.3	10.8		8.1	20.8		12.4	36.3	
	Water gate	17.2			33.4			60.1		
Water supply	Pipe	9.6	20.6	27.8	35.9	50.3	50.4	65.4	84.1	72.3
	Filtration	18.8			50			93.8		
	Intake station	33.4			65.1			93.2		
Agricultural facility	Reservoir	95.9	70.0		97.7	80.7		99.2	94.0	
	Pumping station	44			63.6	80.7		88.8		
Dam	Dam	34.4	34.4		59.4	59.4		75.0	75.0	

– Challenges for water infrastructure asset management in South Korea, Weter Policy 21, Kang, H., 2019

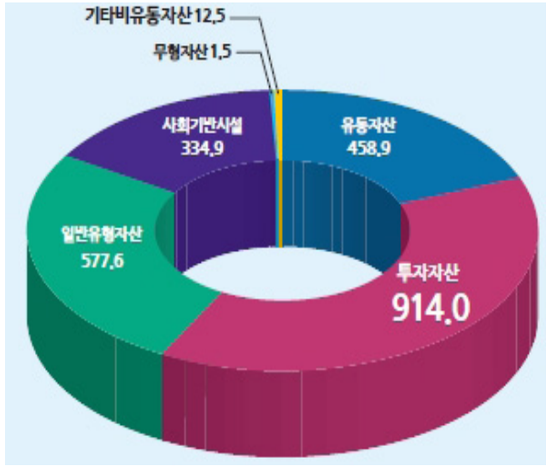


그림 40. 2019회계연도 우리나라의 자산(총2299.4조원)의 구성

③ (자산관리 시스템의 구축 및 활용) 한국환경정책경가연구원(KEI)의 Kang(2019년)에 따르면 2035년이 되면 물 인프라의 30년 이상 노후화율은 평균 72.3%에 이를 것으로 예측되고 있어 노후화에 따른 시설물 유지관리 비용의 급상승과 그에 따른 시장의 확대가 예상되고 있다(표 25 참조).

2019회계연도 기준으로 우리나라의 자산 총규모는 그림 40에 나타낸 바와 같이 2,299.4조원이며, 이 중 사회기반시설은 334.9조원(14.6%)에 달한다. 한편 K-water의 자산은 22.3조원이며, 재무·회계 관련 자산관리규정을 갖추고 있으나 댐 시설의 자산관리 체계는 아직 갖춰지지 않은 상태로서 향후 효율적인 자산관리를 위한 시스템의 구축 및 활용이 시급한 실정이다.

4. 5 생태환경

댐(호소) 및 하천의 수질은 매우 다양하고 복잡한 요인에 의해 변화한다. 특히 강우, 체류시간, 일사량 등의 기상조건 및 상류에서 유입되는 점·비점오염원 등이 큰 영향을 미치며, 기상조건은 통제하기 어렵기 때문에 상류에서 발생·유입되는 오염원을 저감하고 차단하여야만 궁극적인 수질개선이 가능하다. 한편 물관리일원화에 따라 환경부로 수자원관리 주관부처가 이관되고 수량과 수질을 연계한 통합물관리가 중요한 이슈로 부각되고 있어, 수질과 수량을 통합적으로 관리해야 할 필요성이 증대되고 있는 상황이다.

수량과 수질을 연계한 통합운영 최적화를 통한 녹조·수질 등 물 관리 현안의 해결과 적극적인 연계 운영방안의 발굴과 추진을 위해 댐-보 연계운영 최적화 및 환경대응용수 확보에 관한 연구를 수행 중에 있다. 우선 보의 녹조·수질 관리를 위하여 부유성의 남조류가 우점하는 시기에는 표층 위주의 방류로 표층에 집적된 조류의 우선 배제를 실시하고, 전체 수심에 걸쳐 성장하는 규조류는 중-저층(발전방류 병행)으로 방류하여 조류의 침강을 유도하여 녹조를 저감시키는 탄력운영 방식을 사용하는 보 운영 최적화기법을 적용하고 있다.

또한 환경대응용수는 댐-보-저수지에 확보된 이수용량 중 특정시점의 수질개선에 활용 가능한 용수를 말하며, 댐 하류 하천유량이 기준유량을 초과할

그림 41. 녹조저감설비 사진

경우 댐에서 공급하는 하천유지·농업용수를 비축하는 댐 부족분 공급방식을 이용하여 확보하고 있다. 이렇게 확보된 수량은 수질 악화·오염사고 발생 시 신속한 대응을 위해 사용하고 있다.

최근 녹조문제로 이슈가 된 보현산댐, 영주댐 등을 대상으로 유역 내 가축분뇨 관리방안, 하천 수질개선, 농업 비점오염원 관리, 하수처리시설 확충 등을 포함한 유역 통합물관리계획을 시범적으로 수립하여 추진 중에 있으며, 상수원 상류 오염저감사업 및 지자체가 추진하는 비점오염저감사업 등으로 오염원 저감을 위해 노력하고 있다.

대부분 농업지역인 댐 상류유역의 오염원 저감을 위해서는 농업분야와의 협력이 필수적이나 축산분뇨의 90% 이상이 퇴비로 만들어져 농경지에 뿌려지고 있기 때문에 강우 시 농경지로부터의 비점오염원 발생이 댐과 하천의 수질관리에 있어서 큰 문

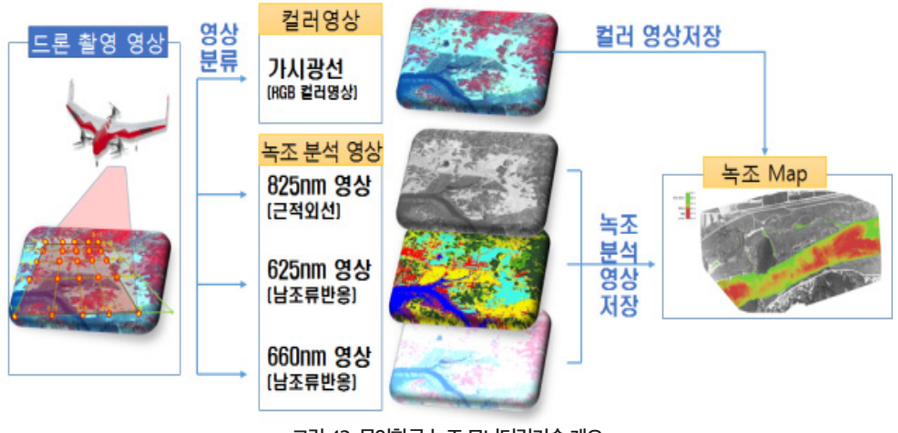


그림 42. 무인항공 녹조 모니터링기술 개요

표 26. 부유물 차단막 설치 효과

구분	설치 전	설치 후	비고
장비	부유물 수거선 1, 푼톤 1, 선박 3	부유물 수거선 1, 푼톤 1, 선박 2, 포크레인 1, 지게차 1, 덤프트럭 1	
동원인원	25인/일	10인/일	60% 감축
수거기간	8주	2주	75% 단축
수거비용	63,600천원	19,800천원	69% 절감

* 1998년 홍수 시 대청댐에 설치한 차단망에서 차단한 부유물량(1,200m³)을 기준으로 비교

제로 대두되고 있다. 방치된 축분이 댐으로 유입되지 않도록 비가림막 등을 제작하여 배포하고, 직접 수거하여 처리하는 등 다양한 노력을 진행하고 있다. 장기적으로 댐 유역에 양분관리제 도입을 통해 비료나 퇴비 등 농경지로 유입되는 오염원의 총량을 적정하게 관리할 필요성이 있다.

K-water에서는 댐관리규정 제36조에 의거 댐과 하천의 녹조저감을 위해 그림 41과 같이 다양한 설비를 도입하여 운영 중이다.

최근 각광받고 있는 무인항공(드론)을 활용한 무인항공 녹조 모니터링기술은 녹조를 탐지할 수 있는 특수카메라인 다중분광센서를 무인비행체에 탑재하여 촬영하고, 촬영 영상을 가공하여 녹조 농도를 분석하는 최신기술이다. 여기에서 활용되는 다중분광센서는 영상 촬영 시 5개의 파장으로 나누어 촬영하는 특수센서로 무인항공과의 호환성을 고려하여 선정하여 이용하고 있다.

K-water에서는 2017년 낙동강 5개 녹조 우심지역 시범사업을 시작으로 2018년 수계 확대(금강 7개 우심지역), 2019년, 2020년 주요 댐까지 확대·운영하여 무인항공 녹조 모니터링기술을 연구하여 개발하고 있으며, 2021년에는 14개 댐-보 22개소에 대해 영상기반 녹조 모니터링 서비스를 시행하고 있다. 또한 댐의 수질개선을 위해 부유물 차단막 및 물 순환시스템, 인공습지 등 다양한 시설물을 설치·운영하고 있다. 우선 부유물 차단막은 댐 상류지역의 부유물이 저수지 전역으로 확산되는 것을 막고, 효율적인 부유물 수거를 위해 주요 다목적댐에 설치하고 있다. 부유물 차단망 설치 후 수거에 동원된 인원과 수거시간 단축은 물론 예산절감에도 크게 기여하는 것으로 나타났다.

물순환시스템(수중폭기설비)인 부유는 저층 산소공급으로 철, 망간 등에 의한 흑수현상 제어, 저수지 수층 간 순환에 의한 성층파괴를 통한 수질개선 도모, 조류증식 억제 등을 위해 운영 중으로 설비 종류는 표 27과 같다.

인공습지(수생식물 재배지)는 댐 상류의 마을하수도 방류수 또는 미처리 생활오수 등 비점오염원이 저수지 내로 유입되는 것을 최소화하여 부영양화 및 조류 번식 방지 등 댐 수질을 개선하고자 설치·운영 중에 있다.

인공습지를 구성하고 있는 다양한 식생은 습지로 유입되는 물의 유속을 감소시켜 토사·부유물 등의 침전을 유도하며, 식물이 오염물질을 직접 흡수하

표 27. 물순환시스템 설비종류

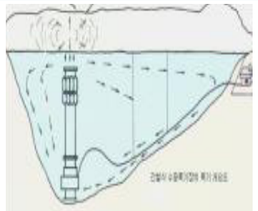
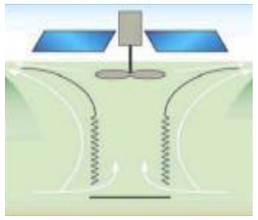
구분	산기식	간헐식(양수통형)	대류식
개념도			
원리	다공산소전이기를 심층부에 설치 외부의 공기압축기에서 다량의 공기를 연속적으로 공급하여 상승류를 만들고 산소를 용해	하부에 공기실을 두고 상부에 양수관을 두어 간헐적으로 공기를 방출. 공기는 관내를 상승하므로 관내의 물을 밀어올림과 동시에 하부로부터 심층부 물을 흡입	수표면에 임펠러를 설치하고, 임펠러가 회전하면 주름관 내부의 물이 수표면 상부로 유출되고 심층수가 올라와 보충하는 대류현상을 이용하여 호소수 순환
장점	– 수심이 낮은지역에서도 적용 – 저층부 산소공급률 양호 – 다공기 설치면적에 비해 저층의 표층 확산 범위 양호	– 수체 혼합비율이 양호 – 수심이 깊은 지역에 수질개선 효과 기대(10m 이상) – 조류 및 이·취미 발생 소규모 댐 설치 시 효과	– 주름관 조절로 순환수층의 수심 조정이 가능 – 태양전지 이용 시 운영비 절감가능 – 임펠러가 수표면에서 회전, 에너지 절감
설치 사례	– 연초, 선암댐 등 – 서춘호수, 광주석곡 상수원지 등 – 주로 유럽 및 미국에 설치	– 대청,달방, 광동, 사연, 회야댐 등 – 일본 백석상수원지외 300여 개소	– 미국 160개 댐, 중국 등에 설치

그림 43. 인공습지 설치사례

그림 44. 상수원 상류유역 거점형 오염저감 개념도

거나 식물 표면이나 기질로 사용된 여재에 서식하는 미생물이 오염물질을 분해하고, 토양이나 여재는 질소나 인 등의 영양염류를 흡착함으로써 수질을 개선시킨다.

강우유출 오염은 광범위한 오염원에서 물 흐름에 따른 복잡한 유출과정을 거치므로, 행정구역 단위보다 물 흐름(유역) 관점의 관리와 함께 물 관리 전문성 토대로 선제적·장기적 대책 추진이 필요하므로 지속가능한 유역 물 환경관리를 위해 상수원 수질안전 요구, 개별 지자체 단위 관리의 한계 등을 고려해 주요 녹조 우심 상수원을 대상으로 국가주도 오염원 관리 시범을 추진 중이다.

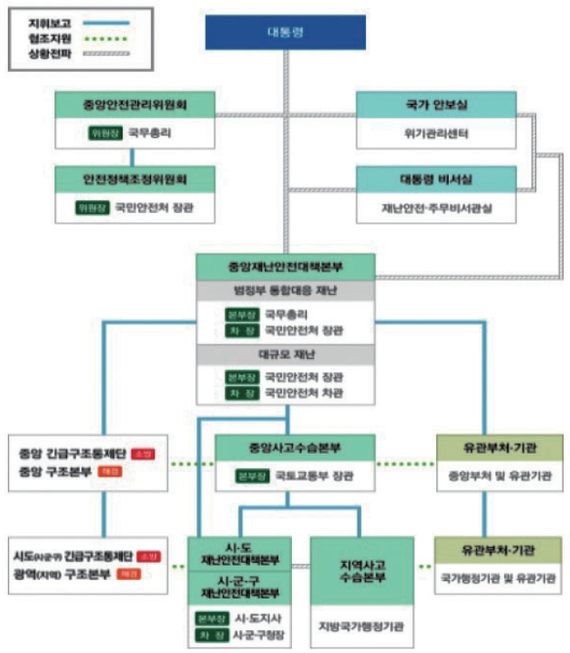
상수원 상류유역 거점형 오염저감 시범사업은 농촌지역의 강우 시 오염유출 특성을 고려하여 오염 발생원 제어부터 하천 유입 전 유출수 저감까지 마을 소유역 단위 비점 관리를 추진하는 사업이다. 체계적인 오염원 조사 및 수질 모니터링을 통해 오염저감계획을 수립하고, 지역주민이 참여하는 거버넌스를 구축하여 농업 오염원 최적관리기법(BMP)을 보급하며, 주민 동참을 통하여 마을환경에 대한 인식 개선 및 공감대 확보를 도모하여, 그 지역주민들이 직접 발생원 관리를 주도할 수 있도록 운영·관리하는 것이다. 그럼에도 불구하고 농촌지역은 적정처리시설을 갖춘 지역을 제외하고는 대부분 강우 유출의 형태로 인근 소하천으로 배출되어 마을 소하천 말단부에 지역별 특성에 맞는 강우 유출 비점 저감시설 설치가 불가피하다.

현재 시범사업은 5년(2020~2024년)간 내성천 상류, 대청호 상류, 보현호 상류를 대상으로 진행하고 있으며, 개념도는 그림 44와 같다.

본 시범사업은 관계기관과의 협의 및 주민 참여에 기반을 둔 거버넌스를 구성·운영하여 Bottom-up 방식의 의사결정체계로 추진하고 있으며, 수질 및 수생태 건강성 확보 등 광역상수원 및 그 상류유역의 물의 가치를 향상시키고, 소유역 단위부터의 친수환경 조성으로 국민이 체감하는 물 복지를 실천한다. 시범사업이 성공적인 유역 물 환경 개선모델로 정착하여 지속가능한 물 관리체계 확립과 건강하고 안전한 물 환경조성에 기여할 수 있기를 기대해본다.

그림 45. 우리나라 주요 재난발생 현황

표 28. 국가안전관리기본계획 추진전략 및 체계

비전	안전한 나라, 행복한 국민
목표	안전이 생활화된 국민, 안전이 체질화된 사회, 안전이 우선시되는 국가정책
근거	헌법 제34조 제6항, 재난 및 안전관리기본법 제22조 및 시행령 제26조
5대전략	① 재난안전 컨트롤타워 기능 강화 ② 현장의 재난대응 역량 강화 ③ 생활 속 안전문화 확산 ④ 재난안전 예방 인프라 확충 ⑤ 분야별 창조적 안전관리
5대전략	

4. 6 댐 안전관리 제도 및 정책

우리나라의 주요 재해·재난은 주로 홍수, 가뭄, 지진, 태풍 등 자연재난이 주를 이루고 있지만, 1970~1980년대 급격화된 산업화·도시화를 거치면서 각종 시설물이 대형화·복잡화되면서 시설물에 대한 부실공사, 관리소홀 등으로 빚어진 건물붕괴, 위험가스 누출, 대형화재 등 자연재난과 맞먹는 파급력을 가진 사회재난도 점차적으로 높아지고 있다. 이러한 사회재난은 주로 인재(人災)로서 국내에도 대규모 사회재난 발생을 계기로 다양한 안전제도와 정책들이 정비되어 왔다.

1986년 독립기념관 화재, 1994년 성수대교 붕괴, 1995년 삼풍백화점 붕괴, 2003년 대구지하철 참사 등이 있었고, 이런 대형 참사 이후에 「건설기술관리법(1988 제정)」, 「시설물의 안전관리에 관한 특별법(1995 제정)」, 「재난 및 안전관리 기본법(2004 제정)」 등 우리나라 재난 및 안전관리의 근간을 이루는 법들이 제정되었다. '20년 1월에 기반시설의 체계적인 유지관리와 성능개선을 통해 국민의 안전과 국가 경제발전에 기여하고자 「기반시설관리법」이 제정되었고, '20년 4월 발생한 이천물류센터 공사장 화재로 인해 38명의 인명사고가 발생한 이후에 '22. 1월부터 「중대재해처벌법」이 제정·시행되어 중대산업재해 및 중대시민재해에 대한 처벌 및 안전조치가 강화되는 등 국가차원의 안전정책 강화는 지속되고 있는 실정이다.

최근 국가 안전관리 정책은 안전조치 강화, 선제적 투자·관리, 체계적 관리시스템을 통한 사고예방 등이 핵심내용이라고 할 수 있겠다.

2019년 3월에 기재부에서 발표한 '공공기관 안전강화 종합대책'에는 공공기관이 국민의 생명과 안전을 보호하기 위해 안전중심 경영원칙 확립, 안전기본계획 수립 및 안전조치 등의 적극 추진을 발표하였으며, 그해 9월에는 '지속가능한 기반시설 안전강화 종합대책'을 확정하여 국가중요 기반시설물의 수명연장과 안전확보를 위한 선제적 투자확대를 정책화하였다.

표 29. K-water 재난안전관리 주요업무 체계

업무 분류	시설물 안전	건설 안전	산업 안전	국가 재난 관리
관련 법령	시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 (국토교통부)	건설기술진흥법 (국토교통부)	산업안전기본법 (고용노동부)	재난및안전관리기본법 (행정안전부)
주요 업무	▶ 1·2·3종 시설 지정 ▶ 안전점검, 정밀진단 ▶ 보수보강	▶ 안전, 품질, 하도급 관리 ▶ 취약시기 특별점검 ▶ 구조물 안전/품질 확보	▶ 유해·위험 예방 ▶ 설비점검 ▶ 교육 및 지도	▶ 국가기반시설 지정관리 ▶ 유형별 위기관리 매뉴얼 (풍수해, 지진 등 25개)
Action Plan	▶ **시설물 안전 기본계획** - 242개 시설물 (1종 : 140, 2종 : 40, 3종 : 62)	▶ **건설공사 안전, 품질 및 하도급관리 기본계획** ▶ **KOSHA 18001 운영**	▶ **산업안전 기본계획** - 5천여 임직원 (비정규직 포함)	▶ **국가안전관리 세부집행계획** - 54개 국가기반시설 - 2개 국가 매뉴얼 (댐붕괴, 식용수)
	(예방위주)			(대응위주)

표 30. 댐 종류별 소관부처 및 관련법령

구분	소관부처		관련 법령	
	건설 및 운영	안전	건설 및 운영	안전
다목적댐 홍수조절용댐	환경부 (한국수자원공사)	행정안전부	「댐건설법」, 「하천법」, 「시설물안전법」	「저수지댐법」
용수전용댐	환경부 (한국수자원공사), 농림축산식품부 (한국농어촌공사), 지방자치단체			
발전전용댐	산업통상자원부 (한국수력원자력)		「전원개발촉진법」, 「전기사업법」	

표 31. 댐 안전관리 관련 주요법령 개요

법령	관련 부처	시행일	목적
「재난 및 안전관리기본법」 (재난안전법)	행정안전부	2019. 3. 26.	• 각종 재난으로부터 국토를 보존하고 국민의 생명·신체 및 재산을 보호하기 위하여 국가와 지방자치단체의 재난 및 안전관리체제를 확립하고, 재난의 예방·대비·대응·복구와 안전 문화활동, 그 밖에 재난 및 안전관리에 필요한 사항을 규정함을 목적으로 함
「지속가능한 기반시설관리 기본법」 (기반시설관리법)	국토교통부	2020. 1. 1.	• 기반시설의 체계적인 유지관리와 성능개선을 통하여 국민이 보다 안전하고 편리하게 기반시설을 활용할 수 있도록 하고, 나아가 국가경제발전에 기여함을 목적으로 함
「저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률」 (저수지댐법)	행정안전부	2017. 7. 26.	• 법은 저수지·댐의 붕괴 등으로 인한 재해로부터 국민의 생명·신체 및 농경지 등 재산을 보호하기 위하여 저수지·댐의 안전관리와 재해예방을 위한 사전점검·정비 및 재해발생 시 대응 등에 관하여 필요한 사항을 규정함으로써 저수지·댐의 효과적인 안전관리 체계를 확립하고 공공의 안전에 이바지함을 목적으로 함
「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」 (시설물안전법)	국토교통부	2019. 2. 15.	• 시설물 안전점검과 적정한 유지관리를 통해 재해와 재난을 예방하고 시설물의 효용을 증진시킴으로써 공중(公衆)의 안전을 확보하고 나아가 국민의 복리증진에 기여함을 목적으로 함

표 32. 댐 법정점검·진단 시행개요

점검명	점검시기		점검주체	비고
정기안전점검	반기에 1회 이상		자 체	
정밀안전점검	정기	안전등급에 따라 1~3년	자체 또는 외부	최초: 준공 후 3년 내
	하자 만료 전	하자담보 책임기간 만료시기 바로 전에 실시하는 점검	외부 진단기관	
긴급안전점검 (정밀안전점검 수준)	• 관리주체가 필요하다고 판단한 때 • 관계행정기관의 장이 필요하다고 판단하여 긴급점검 요청한 때 * 목적에 따라 손상 / 특별점검으로 구분		자체 또는 외부	• 손상점검: 재해, 사고발생에 의한 시설물의 손상정도 파악 • 특별점검: 결함이 의심되는 경우, 사용제한 중인 시설 사용여부 판단
정밀안전진단	· 안전등급에 따라 4~6년		외부 진단기관	최초: 준공 10년 후 1년 이내
성능평가	· 5년에 1회 이상		외부 진단기관	

아울러 국민안전처에서 국가 최상위계획인 '국가안전관리기본계획(2015~2019)'을 수립하여 5년간 국가 재난 및 안전관리 정책을 통합적으로 운영할 수 있는 방안과 중점추진과제를 제시하여 재난관리책임기관들이 운영할 수 있도록 고시하였다.

국가 댐 관리를 책임지고 있는 K-water의 재난안전관리체계를 살펴보면 국가안전관리 업무체계와 동일한 형태로 운영되고 있으며, 예방위주와 대응위주로 구분하여 관련법령과 주요업무들이 구분되어 있다. 시설물 안전은 「시설물안전법」, 건설안전은 「건설기술진흥법」, 산업안전은 「산업안전기본법」, 재난관리는 「재난 및 안전관리기본법」 등으로 체계화되어 운영되고 있다.

댐 안전관리도 이러한 국가재난안전관리 관련법령에 의거하여 이루어지고 있으며, 안전관리(점검·진단·평가), 유지관리(시설물 보수·보강 등), 계측관리, 위기대응 등으로 예방 및 대응을 체계적으로 추진하고 있다. 안전관리 및 유지관리는 댐 소관부처별 건설·운영 관련법과 「시설물안전법」, 「저수지댐법」, 「기반시설관리법, 위기대응은 「재난안전법」 등이 근거법이라고 할 수 있겠다.

댐 안전관리는 「시설물안전법」에 따라 시행하는 안전점검, 정밀안전진단 및 성능평가 등이 있으며, 최근에 예방적 유지관리를 위해 성능평가를 도입하여 정밀안전진단과 동일한 주기로 시행하고 있다. 법정점검, 진단과 관련 안전점검은 반기 1회 시행하는 정기안전점검과 안전등급에 따라 1~3년 주기로 시행하는 정밀안전점검, 그리고 관리주체가 필요하다고 판단하는 경우 시행할 수 있는 긴급안전점검으로 구분된다.

표 33. 댐 안전관리 업무 흐름도

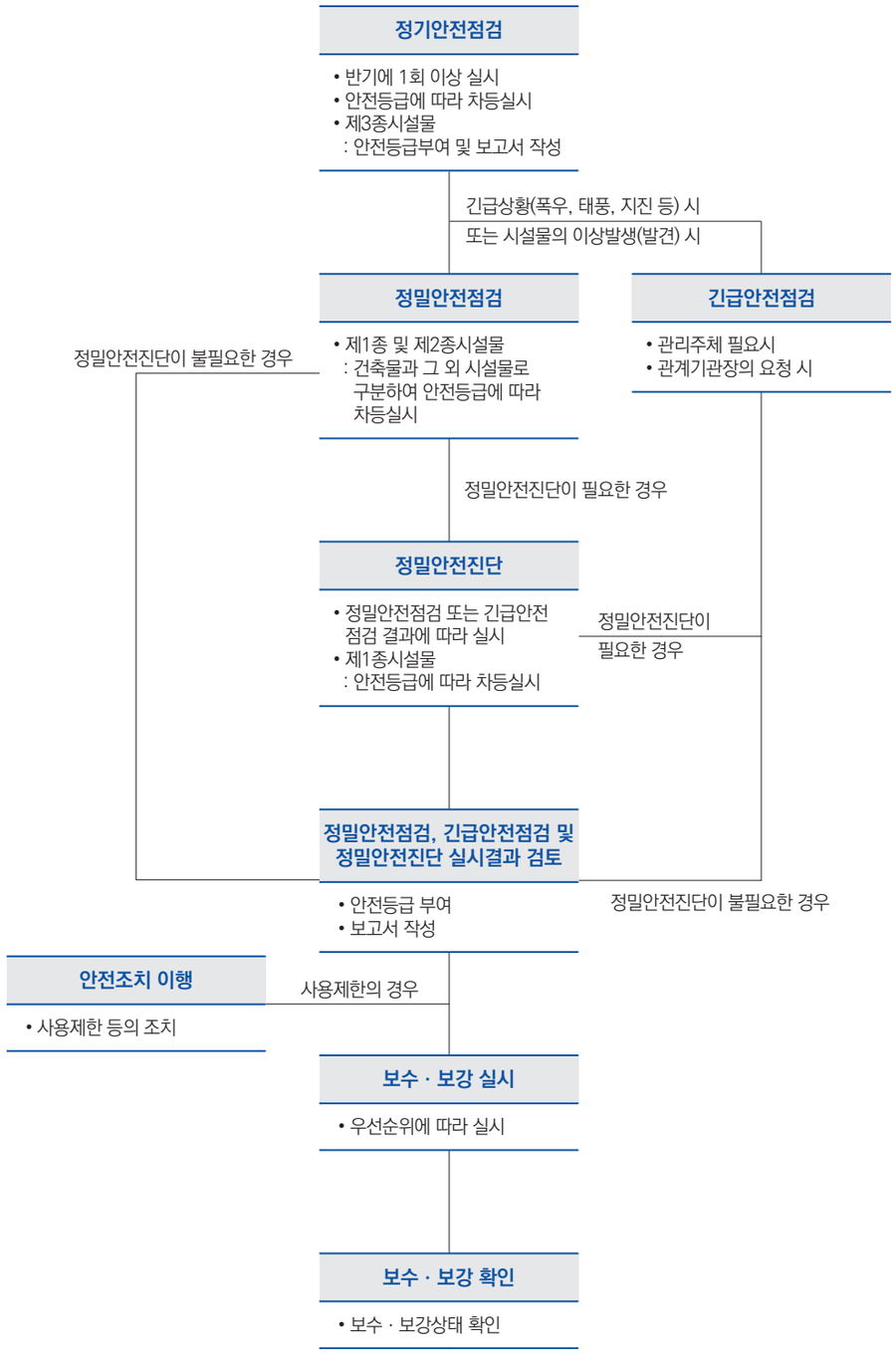


표 34. 성능평가 업무 흐름도

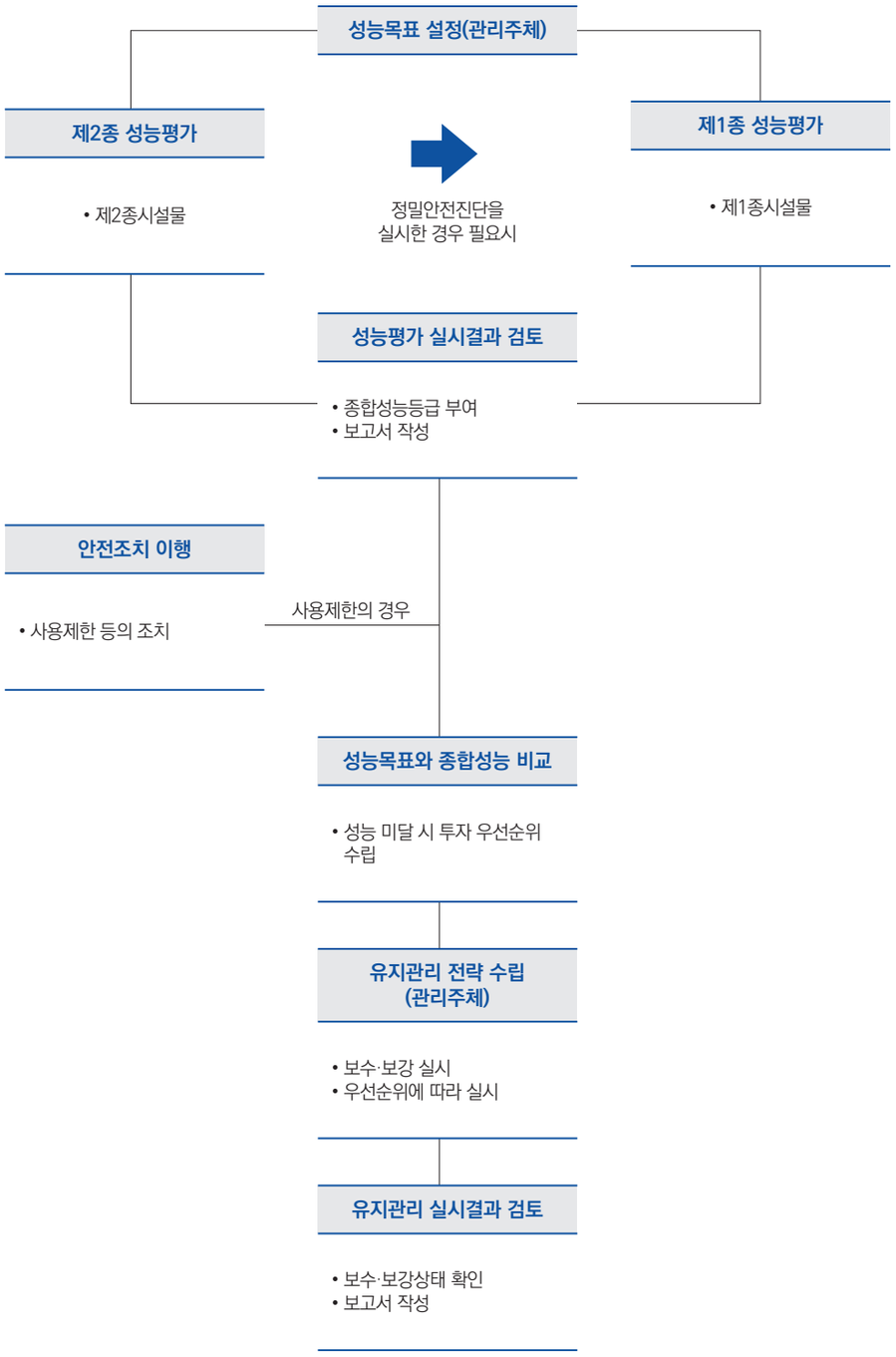
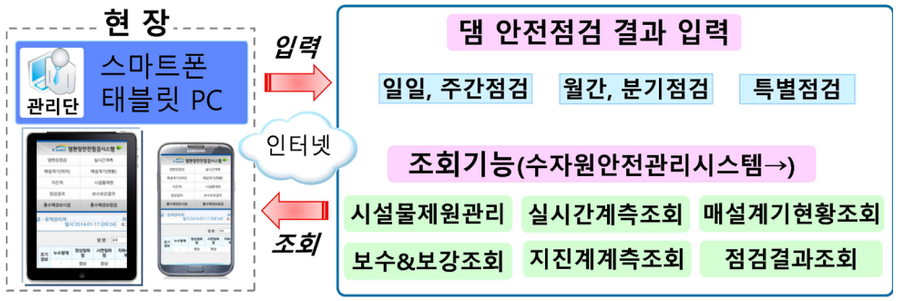


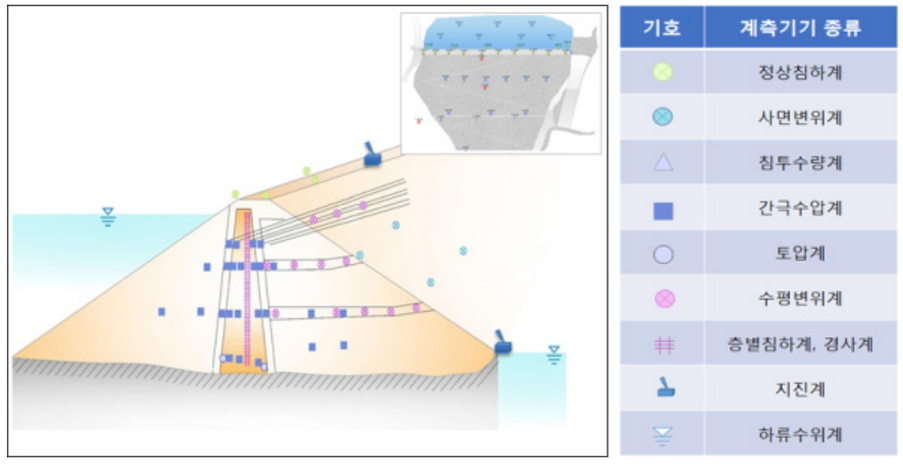
표 35. 댐 현장안전점검시스템 현황



안전점검은 주로 외관조사 위주로 진행되며, 점검결과 안전에 심각한 문제가 발생하는 경우에 추가로 상세 단 등을 시행할 수 있다. 정밀안전진단은 안전등급에 따라 4~6년 주기로 전문기관에서 상세조사와 안정성 평가 등 세부적인 진단과 평가가 함께 이루어진다.

「시설물안전법」 전부개정(17. 1. 17.)에 따른 성능평가 도입을 통해 정밀안전진단과 같은 주기로 안전·내구·사용성능 등을 평가함으로써 사후 대처방식의 안전관리에서 선제적 조치로 변화하고 있다. 이러한 점검·진단결과로 A(우수)~E등급(불량)까지 5개 안전등급으로 상태평가를 하고 있으며, 국가가 관리하는 댐들은 대부분 'B등급(양호)'을 유지하고 있으며, 이는 주기적·체계적인 보수·보강 등을 통해 잘 관리하고 있다고 보아야 한다.

해외 댐 전문가인 일본 댐기술센터의 류우이치(2006년)에 의하면 제3기 댐의 안전관리 착안점은 현장점검을 통한 노후화나 열화의 감시가 중요하다고 지적하고 있으며, 이를 위해 K-water에서는 법정점검 이외에 일상 및 특별점검, 수자원안전패트롤 등 다각적인 상시점검을 강화하고 있으며, 일상점검은 일일, 주간, 월간, 분기별 점검을 수행하여 현



기호	계측기기 종류
	정상침하계
	사면변위계
	침투수량계
	간극수압계
	토압계
	수평변위계
	층별침하계, 경사계
	지진계
	하류수위계

그림 46. 댐 계측기기 종류 및 설치 개념도

그림 47. 지진 발생 시 KRM 대응현황

장중심의 노후 댐 시설물 안전관리체계를 강화하고 있다.

육안점검에 의한 시설물 손상도 확인과 점검이력을 DB화하여 활용하는 것도 중요한 부분이기 때문에 현장안전점검시스템을 도입하여 운영 중이다. 과거 일상적인 현장점검 수행 시 점검 전에 시설물의 제원, 점검 및 보강이력 등을 검토한 후 점검을 수행하고, 그 결과는 문서에 의해 정리하였다. 이러한 점검형식 및 자료관리를 개선하기 위해 최근에는 스마트폰, 태블릿 PC 등을 활용하여 현장에서 시스템 제원, 과거 점검이력, 보수·보강 이력, 계측정보 등을 조회하면서 점검을 수행하며, 그 결과를 현장에서 직접 스마트폰 등에 입력하면 본사시스템에 등록되어 본사-현장 간 실시간 피드백이 이뤄질 수 있게 되었다.

그림 48. K-water 댐 통합안전관리시스템 개요

중점추진분야	단계별 목표		
	단기(S) (상용화된 기술의 현업화, ~2023)	중기(M) (원천기술개발, ~2025)	장기 (융합 및 고도화, 2025~)
1 스마트센싱 기반 물인프라 모니터링 기술 (스마트센서 장비분야)	- 무인이동체*를 활용한 광학영상기반 물인프라 점검기술 도입 * 무인이동체: Drone, Robot, 수중 ROV 등	- 물인프라 안전진단을 위한 진단항목별 센서 및 무인이동체 최적운영기술 개발	- AI기반 물인프라 자율 모니터링 및 진단 체계 개발
2 초연결 Big Data 기반 AI 분석기술 (초지능 기술분야)	- 전자/비전자정보(도면, 건설, 물성, 계측) 표준화/DB 구축 - 주요 계측 데이터기반의 경험적 상관 모형 개발(침투수량, 수두, 변형 등)	- 초연결 AI/Big data 기반 물인프라 상태평가기술 개발	- 초연결 AI/Big data 기반 물인프라 중장기 거동예측기술 개발
3 초융합 CPS 기반 물인프라 유지관리 통합기술 (초융합 기술분야)	- 물인프라 3차원 맵핑 및 디지털모형 구축기술 도입 - 물인프라 빅데이터 구축을 위한 BIM 프로토콜 개발	- 유지관리분야 개방형 3D DB 구축 및 AR/VR/MR 시각화 정보제공 기술 개발 - 기존 물인프라 구조물의 유지관리 3D BIM & CPS 구축	- 초연결/초지능기반의 물인프라 유지관리 CPS 및 개방형 통합플랫폼 고도화
4 물인프라 안전진단/ 유지관리 통합플랫폼 구축기술 (통합플랫폼 기술분야)	- 구조물 유지관리 통합스마트모니터링 시스템 구축 - 물인프라 시설물 3D 통합 유지/안전 관리 플랫폼 구축	- 재난시 시설물 안전관리 스마트 예경보 시스템 구축 - 디지털트윈 기반 물인프라 안전 및 유지관리 스마트 통합플랫폼 구축	- 물인프라 안전/유지관리 AI기반 스마트 통합플랫폼 고도화

그림 49. 물 인프라 안전진단·유지관리 서비스 플랫폼 로드맵 중점분야

수자원 시설물의 유지관리에 있어 가장 중요한 요소인 "안전"을 확인하는 작업은 점검·진단 이외에도 시설물에 대한 세심한 관측과 지속적인 계측관리를 통해서 실현된다. 이러한 계측관리를 통해 수자원 시설물 손상에 대한 사전 감지, 시설물의 운용에 필요한 시간 및 경비절약, 운용방식 선택, 댐체 및 부속시설물의 최신 신기술의 개발 등 잠재적으로 많은 성과를 이루고 있다. 계측업무는 계측계획 수립과 계측데이터 측정 및 분석, 계측기 유지관리로 구성되며, 2000년대 이후로 대부분의 계측기가 자동측정으로 변환하여 현재 22종 2,000여 개 이상이 자동으로 계측되어 수집되고 있다. 계측업무의 기본 개념은 이상계측에 대한 조기감지로 신속한 대응, 계측치의 경시변화 분석을 통한 안전관리, 안전점검 및 보수보강 이력을 통한 안정성 확보 및 성능개선으로 정의할 수 있다.

계측관리를 통해 취측한 다양한 실시간 계측값들을 활용하여 댐 안전에 영향을 미치는 주요 계측치(누수량, 변위, 지진 등)에 대해 조기경보시스템을 구축하여 이상발생 시 신속하게 조기경보 발령으로 선제적인 대응이 가능하도록 안전감시시스템도 구축·운영 중에 있다.

위기대응 관련으로 K-water에서는 전사적 리스크 관리 KRM시스템(K-water Risk Management)을 2008년부터 구축하여 운영하고 있으며, 260여 개의 취약시설물을 관리하고 있다. 리스크 관리규정에 의하여 사고발생 개연성이 높고 발생 시 인명피해 및 사회적 이슈가 될 수 있어 특별한 관심을 가지고 관리가 필요한 시설물을 취약시설물로 정의하고 있다. 아울러 지진, 수질사고, 건설사고, 단수 등 비상상황 발생 시 위기상황 전파 및 관리가 시스템으로 이루어지도록 관리하고 있다.

앞에서 언급한 계측 및 지진감시, 현장점검시스템, 안전감시시스템, 위기관리시스템 등을 다목적댐 및 용수댐 등 모든 댐에 대한 실시간 계측현황 등 계측기기 통합관리, 점검계획 및 점검결과, 유지보수이력자료, 안전감시시스템 등을 모두 종합하여 '통합안전관리시스템'으로 통합운영 중에 있으며, 사용자(실무자, 일반, 경영진)에게 쉽고 편리한 방식으로 제공함으로써 업무효율성을 높이고 신속한 의사결정을 지원하는 체계를 갖추고 있다. 해외에서도 보기 힘든 안전관리, 계측관리, 위기대응 통합체계는 후속조치에서 선제적 감시·대응으로 댐 안전관리를 더 발전시키는 정책방향으로 변모하고 있다.

그림 50. 댐 스마트 안전관리 플랫폼

최근 「기반시설관리법」 시행과 함께 노후기반시설의 선제적·전주기적 관리체계로의 전환이 필요하며, 물인프라 시설물의 '건설'에서 '관리'로 패러다임이 전환됨에 따라 효율적 활용과 안전진단·유지관리에 중점을 둔 시설물 장수명화를 추진하기 위하여 K-water에서는 '물 인프라 안전진단·유지관리 서비스 플랫폼 로드맵('19. 12.)'을 수립하였다. 이 로드맵에서는 스마트센싱 기반 물 인프라 모니터링기술, 초연결 빅데이터 기반 AI분석기술, 초융합 CPS 기반 물 인프라 유지관리 통합기술, 물 인프라 안전진단·유지관리 통합플랫폼 구축기술 등 4개 중점분야로 구성된다.

이러한 여건 속에서 코로나19가 불러온 경제위기와 대한민국의 새로운 미래를 설계하기 위한 '한국판 뉴딜 종합계획'을 '21년 7월 발표하였고, 환경부와 K-water는 4차산업 기반의 인공지능(AI), 빅데이터 분석시스템 등 스마트기술을 도입하는 스마트댐 안전관리체계 구축사업을 통해 선제적 댐 안전 확보와 일자리 창출에 기여하는 새로운 정부사업을 추진 중에 있다. 드론 기반 안전점검(항공·수중)으로 촬영한 비대면 3차원 영상을 전문가들이 분석하여 댐 손상 여부를 정밀하게 분석, 사각지대를 해소하고 실시간으로 정밀한 관측이 가능하도록 구현하고, 기존에 사람이 직접 수행하던 점검에 대한 각종 안전사고도 미연에 방지할 수 있다. 계측관리도 첨단장비(GPS 등)를 도입하여 기상이나 수목 등의 제약사항 없이 실시간으로 댐체 변위 등을 측량할 수 있게 되었다.

아울러 빅데이터, 인공지능(AI) 등을 활용한 디지털 트윈(Digital Twin) 체계의 안전관리 플랫폼을 구축하여 전 세계적으로 댐 안전을 선도하는 댐 안전관리센터를 '21년부터 개소하여 운영 중에 있다. 앞으로의 댐 안전 정책은 4차산업 기술도입으로 현실과 가상세계를 기계, 장비 등을 활용해 넘나들며 완벽한 안전관리와 대국민 정보 서비스 제공이 동시에 이루어지는 댐 안전 플랫폼 시대가 열릴 것으로 기대하고 있다.

5. 제언

최근 기후변화에 따른 극한 홍수, 극한 가뭄에 대응하기 위한 물그릇의 역할은 절대적으로 중요해지고 있다. 이상홍수에 대비한 빈 물그릇, 이상가뭄에 대비한 가득찬 물그릇. 그리고 둘 다를 지키기 위한 단단한 물그릇은 언제나 큰 숙제다.

세계 여러 나라들은 기후변화에 따른 이상홍수와 가뭄 등의 재난에 대비하기 위해 여러 노력을 하고 있다.

앞장에서 소개한 국제적인 댐 건설 정책과 기술을 요약하면 다음과 같다.

(정책) 최근 국제기구(ICOLD, UN(UN-water), WB, ADB 등)의 물 정책(Water Strategy, policy)은 신규 개발(댐 건설 등)보다 기후변화 노후화에 따른 댐의 안전관리를 보다 더 중요하게 인식하는 추세며, 수자원시설의 사회·환경적 영향을 고려한 개발·관리 및 공공 서비스 증진을 위한 거버넌스 강화 등에 대한 정책 논의가 증가하고 있는 추세

(기술) 과거에는 댐 축조재료, 거동(침하, 변형 등), 경제적 건설 기술 위주에서 최근에는 지진, 모니터링(감시·계측), 노후화 대응 등 ICT 기반의 지능화 댐 안전관리와 기후변화 취약성(Vulnerablity)과 회복 탄력성(Resilienec) 증대 등 지속가능한 개발기술에 대한 논의가 증가하고 있는 추세

그리고 국내의 댐 건설 정책과 기술(사업)을 요약하면 다음과 같다.

(정책) 「물관리기본법」 제정('18)을 및 국가 물관리 기본계획 수립('21) 등 통합물관리를 위한 법·제도 개선 및 「댐건설·관리 및 주변지역지원 등에 관한 법률」 개정('21) 등을 통한 댐관리기본계획 수립, 스마트 유지관리 방안 포함 등 댐 관리제도 강화

(기술) 기후변화(이상홍수)에 대비한 치수 능력증대 사업, 지진·노후화 대응을 위한 댐 안전성 강화사업, 댐 안전 모니터링 고도화를 위한 스마트 댐 안전관리(실시간 계측, 드론 및 디지털트윈 활용 등) 추진

2021년 'IPCC AR6 보고서'에 따르면 RCP(대표농도경로)에서 SSP(공통사회경제경로) 시나리오로 변화하고 있다. 사회경제적 영향을 고려한 재난시설의 방재성능목표 설정 기준은 물론, 2050 탄소중립 신기후협약(파리기후협약, Cop 21. 2015.)에 따른 댐의 순기능과 역기능에 대한 선제적 대응도 필요할 것이다.

댐의 가치와 운영 고도화의 필요성이 절대적으로 강조되는 때이다. 그래서 한국대댐회의 역할이 더욱 기대된다.