한국의 댐 설계사

최병규

(주)이산 부회장
공학박사, 수자원개발기술사

1. 서언

물은 모든 생명의 원천으로 인류문명은 수자원의 적절하고도 효율적인 개발과 이용에 직접적인 연관을 갖고 개발되고 발전되어 왔다.

수자원은 대체가 불가능한 유일한 자원으로 양과 질에서 시간적 또는 공간적 분포에 한정을 받고 있으므로 자연 상태에서 시기적 또는 위치에 따라 필요로 하는 수량을 항상 확보할 수는 없다.

우리나라는 다행히 타 부존자원에 비해 수자원이 비교적 풍부하여 예로부터 물은 필요에 따라 언제든지 손쉽게 얻을 수 있는 자연재로 여겨왔으나 우리가 이용하는 물은 대부분이 지표수인 하천수로서 연강수량의 ⅔가 여름철 3개월 동안에 집중되고 연도별·지역별로 강수량 편차가 커서 하천의 유황이 매우 불안정한 상태이기 때문에 자연 상태에서는 물이 필요한 곳에서 필요한 만큼의 수량을 확보하기가 어려웠다. 인구의 급속한 증가와 도시집중으로 인한 생활용수의 증가, 산업 발전에 따라 공업용수 수요가 급증하며 갈수기에 하천에 흐르는 물만으로는 수요량을 감당할 수 없게 되었다. 이와 같은 수자원 환경에서 댐 건설은 수자원 관리의 핵심정책으로 채택되어 왔다. 댐 건설에 의해 풍수기에 하천유량을 저류함으로써 홍수량을 줄이고 이를 갈수시에 이용함으로써 부존수자원을 최대로 이용하는 방안이 가장 합리적인 방안이었던 것이다.

우리나라에서 수자원개발을 전제로 하여 본격적으로 하천조사가 시작된 것은 1910년대 초반 일제 강점기로 지금까지 약 110여 년간 수자원에 대한 조사 및 개발 사업은 끊임없이 계속되어 왔으며, 수자원 개발사업 변천의 특징을 살펴보면 1940년까지는 하천에 대한 조사를 실시하면서 이 성과를 토대로 하천개수 계획을 수립하였으며 이를 기초로 치수 위주의 하천개수사업이 수행되었다. 이후 1965년까지는 생·공용수, 관개용수 공급 및 수력발전 등 이수면의 수요가 증대되어 하천을 부분적으로 산업개발에 활용하게 되었으며 치수 위주에 이수 목적을 혼입한 단일목적으로 수자원개발 사업이 수행되었다.

1980년까지는 치·이수의 균형개발을 도모코자 유역개발의 기법이 도입된 시기로 유역 수자원종합개발의 핵심인 다목적댐 건설에 의해 치수와 이수를 동시에 해결하는 방향으로 한강, 낙동강, 금강, 영산강(섬진강) 등 4대강에 대하여 유역단위의 유역종합개발계획을 수립하고 종합적, 다목적적인 안목에서 수자원개발 정책을 수행하여 대규모의 다목적댐 건설

을 위시한 치수와 이수사업에 큰 성과를 거두었다.

그러나 1981년부터는 유역단위의 유역종합개발 개념이 희석되면서 다시 개별사업 계획에 따라 수자원개발을 추진해 왔으나 투자정도가 이수 및 치수 수요의 성장속도에 미치지 못해 물 문제가 점차 누적되었으며, 이 기간에는 80년대 이전 계획에서 추진한 다목적댐의 완공과 다목적댐을 수원으로 한 광역 상수도사업의 추진이 주요 성과라 할 수 있다.

한편 1990년대 들어와서는 용수수요의 대량화로 시간적, 공간적으로 물의 수요와 공급의 불균형을 가중시키고 도시지역에서의 생활하수, 공장에서의 공장폐수, 농촌지역에서의 축산폐수가 제대로 처리되지 못하고 하천 및 호소로 배출됨에 따라 우리나라의 하천 및 호소는 점점 더 오염이 심해지는 추세로 이러한 하천수질의 악화는 하천의 이용을 제한시키는 결과를 초래하여 근본적으로 물이용량의 증가를 가속화 시켰다.

또한 1995년부터 지방자치제의 실시에 따라 지역간 수량과 수질에 대한 분쟁이 여러 곳에서 발생하였으며, 기상이변으로 극심한 홍수와 이상 가뭄현상이 발생하고 있으며 이러한 이상 자연현상은 앞으로도 지속적으로 발생할 것으로 예상되었다.

2000년대의 수자원개발 방향은 지역과 환경을 배려하여 댐 정책 결정과정에서의 지역의견 수렴과 댐 건설 및 주변지역의 지원 확대는 물론 환경적으로 건전하고 지속 가능한 댐 건설 정착시기로서 수요관리 등 물 이용의 효율성과 연계된 댐 건설 정책으로 전환하고 기술적, 경제적 타당성측면에서의 의사결정체계에서 사회·환경적 타당성의 의사결정체계로의 전환을 도모하였다.

표 1. 우리나라의 수자원개발 추진 경위

구분	계획기간	수립년도	계획기조
수자원개발 10개년 계획(1차)	1966~1975	1965	다목적댐 개발
4대강유역 종합개발계획	1971~1981	1971	4대강유역 치산과 다목적댐 개발
수자원장기종합개발 계획(2차)	1981~2001	1980	댐 개발 및 치수사업
수자원장기종합계획(3차)	1991~2011	1990	수자원개발 및 수자원종합관리
수자원장기종합계획(3차-1차 수정)	1997~2011	1996	환경친화적 수자원 개발 및 관리
수자원장기종합계획(4차)	2001~2020	2001	건전한 물 활용과 안전하고 친근한 물 환경 조성
수자원장기종합계획(4차-1차 수정)	2006~2020	2006	사람과 자연이 바라는 지속가능한 물 관리
수자원장기종합계획(4차-2차 수정)	2011~2020	2011	녹색국토를 위한 물강국 실현

표 2. 댐건설 장기종합계획 추진 현황

구분	계획기간	기본목표
제1차 댐건설 장기종합계획	2001 ~ 2011	맑은 물의 안정적·균형적 공급, 홍수에 강한 국토 건설, 한정된 수자원의 효율적 이용 도모, 댐 상·하류 균형 발전 도모, 환경적으로 건전하고 지속가능한 댐 건설 추진
제1차 댐건설장기종합계획(변정)	2007 ~ 2011	홍수에 강한 국토 건설, 맑은 물의 안정적·균형적 공급, 한정된 수자원의 효율적 이용, 댐 상·하류지역의 상생발전 유도, 자연과 어우러지는 사랑받는 댐 건설
제2차 댐건설장 기종합계획	2012 ~ 2021	기후변화에 능동적으로 대응하고 수자원을 효율적으로 활용하며 지역사회 발전과 환경을 고려해 실현 가능한 댐 계획

물관리일원화 정부조직법(2018)이 공포·시행됨에 따라 하천관리를 제외한 수량, 수질, 재해예방 등 대부분의 물관리 기능이 환경부로 일원화 되었으며, 정부조직법 개정(2020)으로 남아있던 하천관리 기능까지 모두 2022년 환경부로 이관되어 물관리일원화가 완성되었다. 과거 분리된 수질 및 수량관리 업무가 환경부로 일원화됨으로써 물관리 정책이 하나의 일관된 체계에서 균형적으로 결정될 수 있도록 하고 이를 통해 물 관리의 효율성을 제고할 수 있게 되었다

물관리기본법(2019) 시행으로 지속가능한 물 관리 체계 확립을 위해 물 관리의 기본이념 및 원칙과 국가·유역물관리기본계획을 매 10년마다 수립하도록 하여 제1차 국가물관리기본계획(2021 ~ 2030)이 수립되었다.

댐건설법이 개정되어 안정적이고 효율적인 댐 관리 기본방향과 전략을 제시하기 위한 댐건설·관리 주변지역지원 등에 관한 법률(2022) 시행으로 댐건설 장기계획 대신 댐관리 기본계획을 수립하도록 되었다. 댐관리 기본계획 수립 대상인 댐은 환경부장관, 시도지사, 시장·군수, 한국수자원공사가 건설하는 댐과 전원개발촉진법 제4조에 따른 발전용 댐으로 규정했다. 댐관리 기본계획은 댐의 관리계획을 비롯해 댐 저수 운영, 물환경보전 및 주변지역 친환경 보전 방안 등을 10년마다 수립하되 5년마다 계획의 타당성을 검토·반영토록 하였다. 아울러 댐 건설을 계획하는 경우에는 사전검토협의회 등을 통해 댐 건설의 적정성을 검토하고, 지역의견 수렴을 거친 후 하천유역수자원 관리계획에 반영해 추진토록 하였다. 향후의 수자원개발은 물의 수급정책, 홍수 및 가뭄 관리, 기후변화 대응을 위한 국가적·지역적 이슈, 하천의 수질관리 및 친수공간 정책, 물 산업 등에 비중을 두고 개발계획과 정책을 실현할 필요가 있다.

표 3. 댐 관련 정책 변천 과정

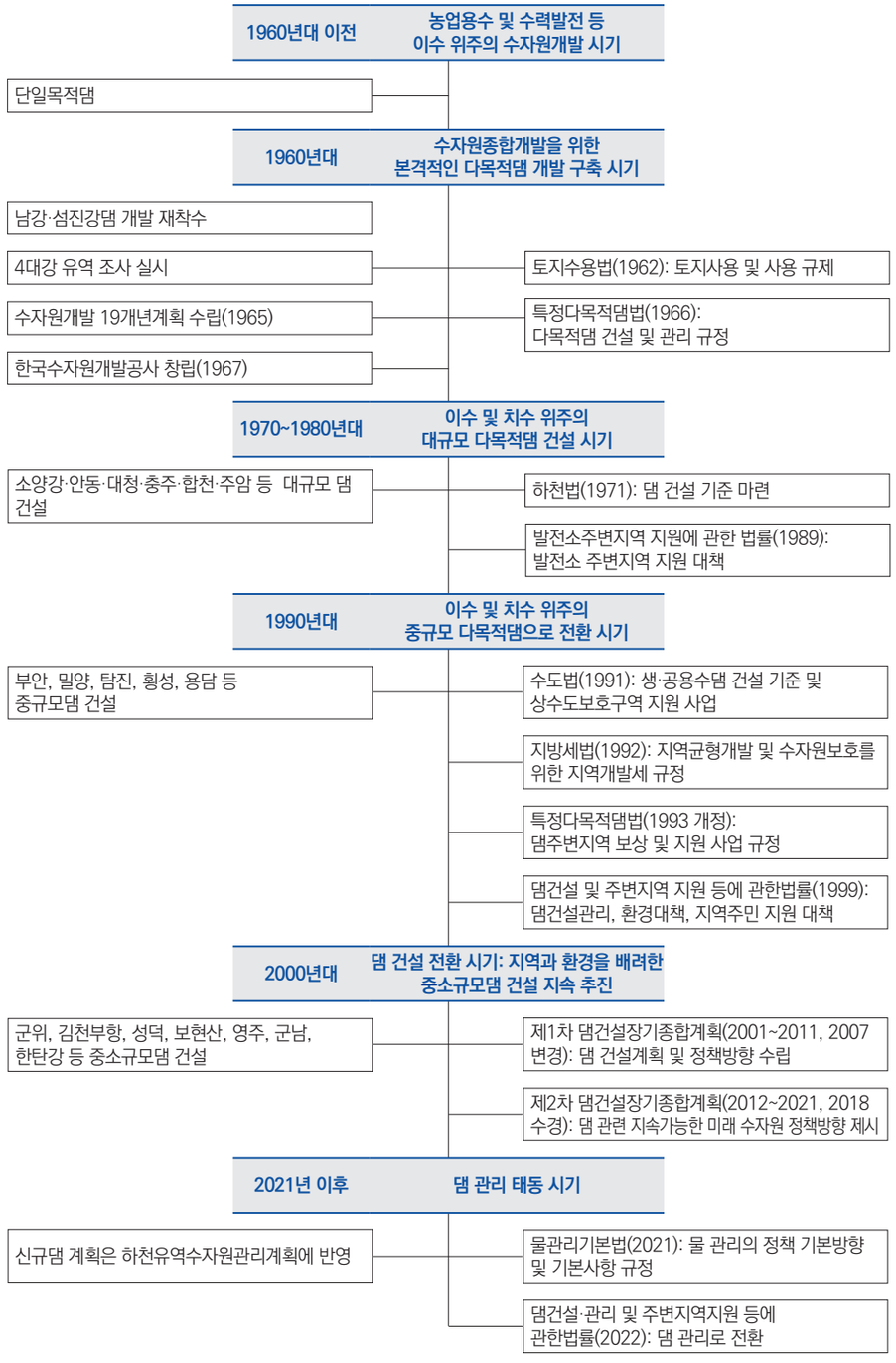


표 4. 수자원개발 현황 및 종합평가

구분	일제강점기 (1911~1945)	건국초기 (1946~1960)	경제개발기 (1961~1980)	경제성장기 (1981~1997)	선진국진입기 (1998~현재)
	근대적 하천조사 및 하천개수 사업 도입	군정 및 전후 복구기	유역종합개발 및 다목적 수자원개발 추진	4대강유역 종합개발 지속	환경 보전문제 대두
다목적댐		섬진강댐 남강(구)댐	소양강댐 안동댐 대청댐 충주댐	합천댐 낙동강하굿둑 주암댐 임하댐 횡성댐 부안댐 밀양댐 용담댐 보령댐 장흥댐	군위댐 김천부항댐 청송성덕댐 영주댐 보현산댐
생·공용수댐			선암댐 사연댐 대암댐 안계댐 수어댐 영천댐 연초댐	구천댐 광동댐 달방댐 운문댐	대곡댐 감포댐 평림댐
수력발전댐	보성강댐 화천댐 청평댐	괴산댐	춘천댐 의암댐 팔당댐 청평양수 삼랑진양수	도암댐 무주양수	산청양수 양양양수 청송양수 예천양수
농업용수댐	대아댐 운암제 주남댐	예당댐 서암댐 금광댐 고삼제 이동댐 기흥댐	덕동댐, 장성댐, 담양댐, 광주댐, 나주댐	백곡댐	저수지 저수용량 증대 • 농업용수댐 재개발
홍수조절댐				평화의 댐	군남댐 한탄강댐
지방상수도	법기댐 회동댐 제2,제4수원지	가창댐	공산댐 덕동댐 동복댐 어승생댐	오봉댐 회야댐	
종합평가	• 근대 댐 건설 기술 도입 • 수력에너지 개발 • 식민지 수탈 목적 개발	• 혼란기 • 전후시설 복구 노력 • 기술/재정능력 부족 • 수자원에 대한 인식 부족	• 대형 다목적댐 개발 • 용수공급능력 확충 • 개발 위주 정책 • 이주민 대책 경시 • 환경문제 대두	• 물 부족문제 해결 • 광역용수체계 전국 확대 • 개발 부작용 확산 • 환경 사회 갈등 심화 • 수도시설 과잉 대두	• 용수수급 안정 • 대형시설물 건설 마무리 • 하구/갯벌 환경가치 훼손 • 용수개발비급증

2. 댐 개발 현황

1) 일제강점기(1911~1945년)

우리나라는 일제강점기 식민정책에 따라 2차에 걸친 하천조사와 3차에 걸친 수력지점 조사를 통해 남한지역에서 식량 증산을 독려하기 위한 농업용 저수지를 개발하고 북한지역에서 광공업 개발에 필요한 전력 생산을 위한 수력개발을 하는 것이 주류를 이루었다. 이를 위해 근대적 저수지 및 댐 건설 기술을 도입한 결과, 최초의 콘크리트댐인 대아댐(1922년), 운암댐(1928년), 수풍댐(1943년), 화천댐(1944년), 청평댐(1944년) 등이 건설되었다.

수력개발은 압록강, 두만강 등 대하천 지류에 댐을 건설하고 동해안지역으로 유역변경하는 발전방식을 채택함으로써 큰 낙차를 얻을 수 있어 부전강수력, 장진강수력, 허천강수력 등을 1930년대에 건설하였고 압록강 중류에 수풍수력 등 많은 수력댐을 건설하였다. 당시의 댐 기술은 세계적 수준으로 수풍댐은 당시 동양 최대 규모였고, 이때 설치한 단위당 100,000kW 용량의 발전기는 세계 최대 규모였다. 그러나 이때 건설한 수력발전소는 대륙 침략을 위한 군수공업의 동력 공급을 목적으로 건설한 것으로 , 우리 기술자들이 선진기술을 전수받지는 못했다.

2) 건국 초기(1946~1960년)

광복 이후의 사회적 혼란과 무질서의 와중에 6·25동란이 일어났으며, 3년의 전쟁 중에 사회기반시설이 철저히 파괴되어 수자원 기술 부족 등으로 수자원 개발도 극심한 정체기를 맞이하였다. 농업용 시설은 외국의 원조자금과 농민 자력으로 소규모이지만 저류지를 건설하기도 하였으며, 이때 건설된 대표적인 농업용 시설이 예당저수지, 안성천 4대 저수지 등이다.

광복 초기에는 남한 총 수요전력의 60% 이상을 북한으로부터 수전했는데, 1948년 5월 북한의 일방적인 송전 중단으로 남한의 전력난이 극심해졌다. 더구나 6·25동란으로 발전설비의 40%가 파손되었다. 미국 원조로 파손된 청평댐과 화천댐의 수력시설 복구를 추진하고 괴산수력을 우리 기술로 완공하였다. 이때 심각한 전력난 해소를 위해 6·25동란 중 38도선 이북에 위치한 화천댐을 확보하기 위해 치열한 전투가 벌어졌다는 일화는 유명하다.

3) 경제개발기(1961~1980년)

이 시기는 수자원 개발 측면에서 보면 가히 르네상스기로서 우리나라 수자원 개발 방식을 획기적으로 전환시킨 시기라라 할 수 있다. 빈곤 타파라는 정부의 강력한 경제 정책의 틀 속에서 물을 수자원이라는 경제재로 인식하였으며, 수자원이라는 용어를 처음으로 사용한 시기였다. 물을 종합적이고 체계적으로 개발하기 위해 1965년 '수자원종합개발 10개년계획'을 수립하고 외국 선진기술에 의한 4대강 유역조사를 시행하였다.

한편 수자원 개발을 효율적으로 추진할 수 있도록 「특정다목적댐법」(1966년), 「한국수자원개발공사법」(1967년)을 제정해 법제와 조직을 만들고 수자원종합개발을 위한 유역조사가 발발하게 진행되었으며, 이 조사가 다목적댐 건설을 선도하였다. 1960년대 초에는 건설 중 중단된 섬진강다목적댐과 남강다목적댐을 재착공하여 정부가 우선 개발했다. 1960년대 후반부터 다목적댐 개발 계획은 유역의 종합개발 수단으로 인식하여 유역조사 결과를 토대로 개발 댐을 선정, 건설하여 왔다. 북한강 수계의 이수 및 치수사업을 위한 최초의 다목적댐인 소양강다목적댐 건설에 착수하였으며, 1973년 준공함으로써 한강의 기적을 가져오는 원동력이 되었다.

당시 정부의 큰 목표였던 중화학공업 육성을 뒷받침하기 위한 수자원 확보 방안으로 다목적댐 개발방식이 등장하였다. 국내에 대형댐 건설기술이 전무하고 재정형편도 대형댐 건설을 감당하기에 태부족인 상태에서 외국기술(일본, 미국, 호주, 네덜란드 등)과 해외차관을 도입해 4대강에 소양강댐, 안동댐, 대청댐, 충주댐 등 초대형 다목적댐을 과감히 착공한 것이었다. 이들 다목적댐이 완성됨에 따라 종래의 홍수 피해를 대폭 경감하고 우선 필요한 용수를 일거에 확보하며 상당한 수력에너지를 개발할 수 있어, 한강의 기적이라고 일컬어지는 경제개발에도 크게 기여하였다. 부수적으로 대형댐 설계 및 감리에 투입된 외국 기술진에게 우리 기술자들이 전수받은 기술은 후에 댐 관련 기술 자립의 기초가 되었다.

전국에 산재한 산업단지에 공업용수를 공급하고, 생활용수 급수 혜택이 돌아가도록 사연댐, 영천댐 등 용수전용댐도 본격적으로 건설하였다. 수력개발은 다목적댐 개발 원칙에 밀려 침체기에 들어섰다. 종래의 수력 단일목적의 댐 건설은 이미 계획되었던 춘천댐, 의암댐, 팔당댐 등 3개소에 그친 반면 청평양수, 삼랑진양수 등 양수발전소 건설이 국내 처음으로 시작되었다.

한편 농업용수댐 개발과 관련해 특기할 사항으로, 장성댐 등 영산강 4개 댐과 같은 대규모댐이 해외차관과 외국기술을 도입해 건설되었다.

4) 경제성장기(1981~1997년)

이 시기에는 합천댐, 주암댐 등 10개 댐이 착공되어 다목적댐 건설의 전성기를 맞이했으며 댐 건설 기술 자립이 이루어져 주암댐 이후 건설된 댐은 모두 우리 기술로 설계와 시공 감리가 가능하게 되었다. 아울러 환경영향평가 제도를 낙동강하굿둑에 처음으로 적용하기 시작하였다. 1990년대 문민정부 이후 국민들의 발언권이 신장되고 환경 인식이 제고되면서 다목적댐이나 방조제 등 대규모 수리시설물 건설에 대해 환경영향을 우려하는 여론이 확대되었다. 정부에서도 이와 같은 여론을 일정부분 수용해 수자원정책 방향을 환경친화적이고 규모가 작은 중소규모댐 건설로 전환하였으며 부안다목적댐, 밀양다목적댐, 용담다목적댐, 횡성다목적댐, 보령다목적댐, 장흥다목적댐 등이 건설되었다.

신규 용수댐으로 운문댐 등 4개의 댐이 건설되었고, 수력댐 건설은 다목적댐 건설에 밀려 강릉수력(도암댐)과 무주양수발전소 건설이 전부일 정도로 침체기에 들어섰다. 농업용수댐은 외국차관의 지원 확대로 미호천1지구 종합개발사업(백곡댐 등 9개 농업용수댐)과 같은 선진화 시대의 농업용수댐 개발과 다목적 이용이 시도되었다.

이 시기에 건설한 댐 중 특이한 사례로, 1986년 북한이 북한강 상류에 임남댐(당시 금강산댐)을 건설한다고 발표하자 이 댐의 붕괴에 대비한 대응 댐으로 1단계 평화의댐을 건설하였다.

5) 선진국 진입기(1998년~현재)

1998년이후 수자원 개발은 수력댐 부분의 양수발전소 건설을 제외하고는 댐 건설의 규모나 개소 수 면에서 퇴조하는 경향을 보이고 있다. 댐 건설 적지가 대부분 소진된 것도 이유이지만 보상 민원 해소를 위한 보상비의 급격한 상승, 환경친화적인 댐 건설을 위한 환경비용 증대 등으로 댐 건설비가 크게 증가함에 따라 용수개발 단가도 높아져 더 이상 댐 개발이 어려워졌기 때문이다.

이 기간 중 다목적댐으로 군위·부항댐 등 소규모 다목적댐 2개소가 완공되었고, 농업용수댐인 성덕댐은 재개발하여 청송성덕다목적댐으로 개발하였으며, 4대강살리기사업의 일환으로 영주다목적댐과 보현산다목적댐이 건설되었다. 한편 이 기간 중에 군남홍수댐, 한탄강홍수조절댐이 새로 건설되었으며, 기존의 1단계 평화의댐을 대폭 증고한 2단계 평화의댐이 건설되었다. 현재 건설 중인 댐은 원주천댐과 봉화댐이 있다.

표 5. 목적별 대댐 건설 현황

구분	다목적댐	생·공용수댐	발전용댐	관개용댐	홍수용댐	계
계	19	63	21	1,114	1	1,218
1910~1940	-	4	1	31	-	36
1941~1945	-	3	2	94	-	99
1946~1955	-	-	-	52	-	52
1956~1965	1	5	2	222	-	230
1966~1975	1	13	2	181	-	197
1976~1985	2	13	4	247	-	266
1986~1995	5	20	4	187	1	217
1996 이후	10	5	6	100	-	121

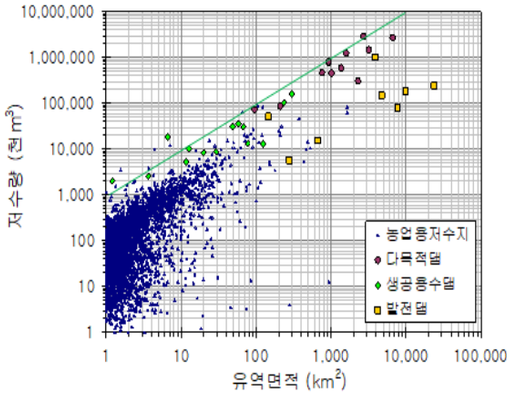


그림 1. 국내 주요 댐 및 저수지의 유역면적과 저수용량 관계

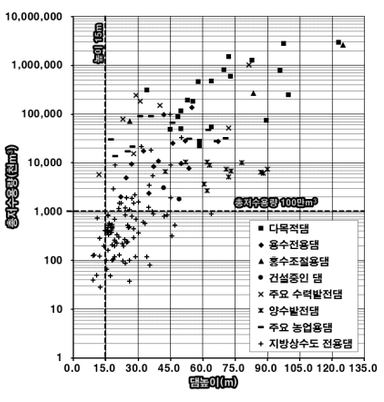


그림 2. 국내 주요 댐의 댐 높이와 총 저수용량 관계

「댐건설관리법」(2022년 6월 16일 시행)에 따라 댐 관리 여건 변화를 고려한 기존 댐 효율화 및 지속가능한 미래 댐 관리 정책방향 제시를 위하여 제1차 댐관리기본계획(2023~2032년)을 수립 중에 있으며, 신규댐 건설 계획은 하천유역수자원관리계획에 반영토록 하였다.

표 6. 다목적댐 개발 현황

수계명	댐명	제원		총 저수량 (백만m³)	유효 저수량 (백만m³)	발전 시설용량 (만kW)	사업효과		공사기간
		높이(m)	길이(m)				홍수조절 용량 (백만m³)	연간 용수공급 (백만m³)	
한 강	소양강	123	530	2,900	1,900	20	500	1,213	'67~'73
한 강	충 주	97.5	447	2,750	1,789	40	616	3,380	'78~'86
한 강	횡 성	48.5	205	86.9	73.4	0.13	9.5	119.5	'90~'02
낙동강	안 동	83	612	1,248	1,000	9	110	926	'71~'77
낙동강	임 하	73	515	595	424	5	80	591.6	'84~'93
낙동강	성 덕	58.5	274	27.9	24.8	0.02	4.2	20.6	'02~'15
낙동강	영 주	55.5	400	181.3	160.4	0.5	75	203.3	'09~'21
낙동강	군 위	45	390	48.7	40.1	0.05	3.1	383	'00~'12
낙동강	김천부항	64	472	54.3	42.6	0.06	12.3	36.3	'02~'16
낙동강	보현산	58.5	250	22.11	17.88	0.02	3.49	14.87	'10~'15
낙동강	합 천	96	472	790	560	10	80	599	'82~'89
낙동강	남 강	34	1,126	309.2	299.7	1.8	269.8	573.3	'89~'03
낙동강	밀 양	89.5	535	73.6	69.8	0.13	6	73	'90~'02
금 강	용 담	70	498	815	672	2.73	137	650.43	'90~'06
금 강	대 청	72	495	1,490	790	9	250	1.649	'75~'81
섬진강	섬진강	64	344.2	466	429	3.48	30.3	435	'61~'65
섬진강	주임(본)	58	330	457	352	0.144	60	270.1	'84~'92
	주임(조)	99.9	562.6	250	210	2.25	20	218.7	'84~'92
기 타	부 안	50	282	50.3	35.6	0.0193	9.3	35.1	'90~'96
	보 령	50	291	116.9	108.7	0.0655	10	106.6	'90~'00
	장 흥	53	403	191	171	0.08	8	127.8	'96~'07

표 7. 용수전용댐 개발 현황

구분	수계명	댐명	제원		총 저수량 (백만m³)	유효 저수량 (백만m³)	연간 용수공급 (천m³)	공사기간
			높이(m)	길이(m)				
태백권	골지천	광 동	39.5	292	11,100	8,000	26,360	'85~'89
	신흥천	달 방	53.5	326	7,717	7,487	14,601	'86~'90
포항권	자호천	영 천	42	300	96,400	81,400	107,300	'74~'80
	제2칠성천	안 계	32.5	223.5	17,650	13,000	조절지역할	'68~'70
	오류천	감 포	35	108	2,390	2,170	1,643	'02~'06
운문권	동창천	운 문	55	407	135,344	126,175	162,425	'85~'94
울산권	대곡천	대 곡	52	192	28,500	27,800	32,120	'99~'05
	대곡천	사 연	46	300	25,000	20,000	33,690	'62~'65
	둔기천	대 암	27	318	9,500	5,000	18,250	'68~'69
	여천천	선 암	22	331	2,021	1,500	조절지역할	'62~'64
거제권	연초천	연 초	24.5	120	4.960	4.590	6.260	'77~'79
	구천천	구 천	50	234	9.670	9.252	7.257.8	'84~'87
여수권	수어천	수 어	67	437	27.519	22.182	29.675	'74~'78
전남북부권	평림천	평 림	37.3	390.5	8.470	8.050	11.770	'01~'07

표 8. 수력발전댐 개발 현황

댐명		하천명	형식[주1]	높이(m)	길이(m)	총저수용량 (백만m³)	발전용량 (㎿)	준공(년)[주2]
보성강수력		섬진강	TE-PG	21.7	273.8	5.7	4.5	1937
화천수력		북한강	PG	81.5	435	1,018	108	1944
청평수력		북한강	PG	31	407	185.5	140.1	1943
운암수력		섬진강	PG	26.1	318	69	5.12	1931 (1985 폐지)
섬진강수력(칠보수력)		섬진강	PG	64	344	438.6	34.8	1965
괴산수력		남한강	PG	28	171	15	2.8	1957
춘천수력		북한강	PG	40	453	150	62.2	1965
의암수력		북한강	PG	23	273	80	48	1967
팔당수력		한강	PG	29	574	244	120	1973
연천수력		임진강	TE-PG	22.6	243.5	13	6	1985 (2000 폐지)
강릉수력		남한강	ER	72	300	51.4	82	1991
청평양수	상부	북한강	ER	62	290	2.7	400	1980
삼랑진양수	상부	낙동강	ER	88	269	6.5	600	1985
	하부	낙동강	ER	78	529	10.0		
무주양수	상부	금강	ER	60.7	287	3.5	600	1994
	하부	금강	ER	42.6	234	6.4		
산청양수	상부	반천	CFRD	86.9	360	6.4	700	2001
	하부	내대천	CFRD	70.9	286.1	7.4		
양양양수	상부	후천	CFRD	72	347	5.2	1,000	2006
	하부	후천	PG	52	247	10.3		
청송양수	상부	길안천	CFRD	90	400	7.1	600	2006
	하부	용전천	CFRD	62	300	10.2		
예천양수	상부	금곡천	CFRD	73	620	6.9	800	2011
	하부	금곡천	CFRD	63	535	9.1		
시화조력		시화호	수차 10기, 수문 8문, 단류식/창조식 발전				254	2011

주1) TE: Earthfill Dam, ER: Rockfill Dam, PG: Concrete Gravity Dam, CFRD: Concrete Faced Rockfill Dam
주2) 발전소 준공 기준

표 9. 홍수조절댐 및 조절지 개발 현황

구분	수계명	댐명	제원		총 저수량 (백만m³)	유효 저수량 (백만m³)	홍수 조절용량 (백만m³)	공사기간
			높이(m)	길이(m)				
홍수 조절용댐	북한강	평화 3단계	125	601	2,630	-	2.630	'12~'18
		평화 2단계	125	601	2,630	-	2.630	'02~'06
		평화 1단계	80	410	590	-	590	'87~'89
	임진강	군 남	26	658	71.6	13.3	70.6	'05~'13
	한탄강	한탄강	83.5	690	270	-	270	'06~'21
홍수조절지	용 천	담 양	19.05	130	2.9	-	2.9	'10~'14
	지석천	화 순	18.3	142	6.1	-	6.1	'10~'14

표 10. 주요 기타 댐 개발 현황

구분	수계명	댐명	제원		총 저수량 (백만m³)	사업효과		공사기간
			높이(m)	길이(m)		홍수 조절용량 (백만m³)	연간 용수공급 (백만m³)	
하굿둑	낙동강	낙동강	18.7	2,230	-	-	750	'83~'90
	영산강	영산강	19.5	4,350	253	-	258	'78~'81
	금 강	금 강	16.6	1,841	139	-	365	'83~'90
지방상수도	낙동강	가 창	45	260	9.1	-	17.5	'83~'86
	낙동강	공 산	36.8	239	5.5	-	18.3	'79~'82
	섬진강	동 북	44.7	188.1	99.5	-	116.8	'83~'85
	회야강	회 야	31.5	424	21.5	-	90	'82~'86
농업용댐	영산강	장 성	36	603	89.8	-	-	'73~'76
	영산강	담 양	46	305.5	66.7	-	-	'73~'76
	영산강	광 주	25	505	17.4	-	-	'74~'76
	영산강	나 주	31	496	91.2	-	-	'73~'76
	낙동강	경 천	66.4	380	28.2	-	-	'83~'90
	낙동강	성 주	62.6	430	47.5	15.6	-	'87~'00
	금 강	백 곡	27.2	410	21.8	-	-	'81~'84
	금 강	미 호	19.4	174	13.9	-	-	'83~'85
	금 강	탑 정	17.8	573	30.7	-	-	'61~'65
	섬진강	동 화	70.6	474	32.3	-	-	'87~'97
	섬진강	하 동	58.6	486	31.5	-	-	'85~'93

표 11. 건설 중인 댐 현황

수계명	댐명	제원		총 저수량 (백만m³)	유효 저수량 (백만m³)	사업효과		공사기간
		높이(m)	길이(m)			홍수 조절용량 (백만m³)	연간 용수공급 (백만m³)	
낙동강	봉 화	41.5	266	3.1	-	2.08	1.26	'14~'24
섬 강	원주천	49	210	1.8	-	1.74	-	'14~'23

3. 댐 설계기술 발전

우리나라의 댐 설계는 일제강점기를 거쳐 우리가 댐을 직접 건설하기 시작한 1960년대 초반까지는 대부분 선진 외국 기술자들에 의해서 이루어졌다. 1960년대 후반부터 정부에서 선진 기술력이라고 여겨졌던 댐 설계기술에 대하여 설계 및 시공 기술자 양성에 뜻을 두어 국내 기술진이 전수받을 수 있도록 방침을 수립함으로써 외국 엔지니어링사의 협력업체로 국내 기술 인력이 참여하게 되었으며, 점차 국내 기술력이 향상되어 지금은 대부분의 설계를 국내 엔지니어링사가 주도적으로 실시하게 되었다. 최근에는 신기술·신공법에 관한 기술자문을 위한 외국 기술자의 참여가 부분적으로 수행되고 있는 실정이다.

다목적댐사업은 건설부(국토교통부)에서 기획하였으며 조사, 설계는 건설부에서 주관하다가 수공으로 업무가 이관된 유역조사단 또는 수공이 직접 수행한 사업도 있으나 주로 외주 용역으로 수행하였고 수공은 그 감독업무를 맡았다. 시공감리는 세부설계를 담당했던 엔지니어링사가 주요 시공도면을 제공하는 체제로 운영하되 시공감독은 수공 자체적으로 시행한 것이 대부분이었으며, 최근에는 전면책임감리(건설사업관리)를 수공의 인력으로 담당하고 있다.

농업용댐사업은 도상 검토와 현지답사를 통해 대상지점을 선정하고 기본조사는 개발 대상지의 적정한 개발순위를 합리적으로 판단할 수 있게 하여 효율적인 실시설계에 대비하는 정도로 사업비의 적정한 판단과 경제성 등을 고려한다. 세부설계는 기본조사의 결과를 검토하여 합리적인 사업계획을 수립하고 현행 여건에 부합되는 적정한 기술수준, 공법개선, 유지관리 등을 고려한 경제적이고 합리적인 설계로서 농어촌공사의 자체 인력으로 조사, 설계 및 감리업무를 수행하였으나 최근에 일부 사업의 설계에 대하여 국내 엔지니어링사가 수행하고 있는 실정이다.

발전용댐사업은 전원개발 사업자에 의해서 지점 예비/세부조사, 타당성조사를 거쳐 건설 기본계획이 확정되면 세부 추진계획을 수립하여 설계·시공을 병행하는 Fast-Track으로 설계기술 용역을 시행한다. 설계

표 12. 다목적댐과 시공감리

댐명	시공감리회사		발주자 감리	비고	댐명	시공감리회사		발주자 감리	비고
	국외	국내				국외	국내		
섬진강	NK	-	한전		충주*	NK	(삼안)	수공	NK 채용
남강(구댐)	NK	-	건설부		합천	NK	삼안	수공	공동 수급
남강(보강)	-	도화	수공		낙동강 하굿둑*	NEDECO	-	〃	환경관리 포함
소양강	NK	-	〃		주암	NK	삼안	〃	공동 수급
안동	NK	(삼안)	〃	NK채용	임하	NK	삼안	〃	〃
대청	NK	(삼안)	〃	〃	여타 댐	-	-	수공	

주) NK: Nippon Koei(日本工營株式會社). NEDECO: Netherlands의 엔지니어링사.
한전: 한국전력주식회사. 수공:한국수자원공사. 삼안: ㈜삼안. 도화: ㈜도화엔지니어링.
*Consulting Panel 운영(IBRD 차관 조건)

와 시공감리를 국내 엔지니어링사가 수행하고 필요시 외국 기술자의 기술업무 지원을 받으며, 감리와 감독 업무는 발전사업자가 자체 인력으로 수행한다.

댐건설사업은 대부분 예비타당성조사, 타당성조사, 기본계획, 기본설계, 실시설계를 거쳐 건설의 단계로 추진되었으며, 댐 지점과 개략적인 개발계획이 수립되어 댐이 준공될 때까지는 최소한 10년 이상이 소요되는 장기사업으로 국가의 중요 기간시설이다.

1960년대 말부터 본격적으로 시작된 다목적댐 건설을 통해 그동안 이루어진 댐 건설기술 발전을 약술하면 다음과 같다.

첫째, 댐 형식 및 설계기술의 발전을 가져왔다. 세계적으로 19세기 말엽에 개발, 정착된 콘크리트댐 기술과 건설장비의 개발은 물론 토질역학 및 수문학(水文學) 분야의 기술 발전에 힘입어 20세기 초·중반에 개발, 정착된 록필댐 기술 도입으로 댐 건설을 주도해왔다. 최근에는 20세기 후반에 기술이 정착된 콘크리트표면차수벽형석괴댐(CFRD)이 주류를 이루고 있다.

소양강다목적댐(사력댐)은 대형 굴착 및 운반 장비의 기계화 시공으로 건설된 우리나라 근대 필댐의 상징이라고 할 수 있다. 또한 설계, 시공, 현장시험, 계기 매설 등 댐 기술 발전에 크게 공헌한 댐이다. 안동다목적댐(록필댐)은 중앙차수벽 재료로 당초 점토로 설계된 것을 화강토(花崗土)로 변경함으로써 댐 차수재료의 영역 확대를 가져왔다. 또한 우리나라 최초로 유하식 및 양수식을 겸비한 양수 겸용 수력발전소를 건설하였다. 콘크리트표면차수벽형석괴댐은 국내 최초로 1982년 11월부터 1985년 7월 동복댐(높이 44.7m, 길이 188m, 체적 42만m³, 생활용수댐) 증고에 적용되었으며, 1988년 1단계 공사를 완료한 평화의댐(높이 80m)에서 그 경제성과 시공성이 입증되어 그 후 건설되는 댐의 형식 결정에 지대한 영향을 미쳤다. 또한 낙동강하굿둑의 축조재료(필댐 부분) 중 90%를 준설 해사로 충당했다는 점도 특기할 만하다.

충주다목적댐은 콘크리트중력식댐으로서 최초로 II종 시멘트(중용열포틀랜드시멘트)를 사용하고 콘크리트혼합설비(Batcher plant, 120m³/hr)에 자동계량장치를 설치해 콘크리트를 제조하였다. 또한 강재거푸집 사용, 케이블 크레인(20톤 6m³) 타설, 파이프쿨링(Pipe cooling), 골재 냉각 등 선진화된 기술로 우리나라 매스콘크리트 시공기술의 신기원을 이룩하였다. 그러나 매스콘크리트용 II종 시멘트를 처음 생산해 사용함에 따라 갑자기 폴리백(Poly bag, 1톤)을 개발하는 등 이용에 불비(不備)한 점이 있었다. 더욱이 충주에 앞서 대청다목적댐의 콘크리트중력식댐에 I종 시멘트(보통포틀랜드시멘트)를 사용해야 했던 점 등 여러 가지 면에서 국가적으로 콘크리트댐 건설을 위한 산업 여건이 불비했던 시기라고 볼 수 있다.

대청다목적댐은 특히 전형적인 복합댐으로서 콘크리트댐과 록필댐 접합부의 심벽재료 선정 및 시공법을 고심해 개발하였다. 대청다목적댐 접합부 시공의 기술 개발은 그 후 토질차수벽형 필댐의 기초암반과 차수 존(Zone) 간 접합부(Interface) 시공의 시범이 되고 있다. 또한 한탄강홍수조절댐에는 최근 콘크리트댐의 공기 단축 및 경제적 시공에 적합한 RCCD(Roller compacted concrete dam) 공법을 도입해 기존 블록(Block) 타설 공법을 댐축 방향으로 수평 타설하는 방법을 적용하였다. 보현산다목적댐에는 여러 개의 블록을 한 번에 타설하고 횡이음을 설치하는 ELCM(Extended layer construction method) 공법을 최초로 적용하였다.

둘째, 여수로 수공구조물 설계 시에 충주다목적댐을 시작으로 합천 등 대규모 다목적댐 여수로에 공

기흡입장치를 설치해 고속류의 흐름에 기술적으로 대비하였다. 또한 최근 이상강우의 영향으로 홍수량이 크게 증대됨에 따라 기존 댐의 여수로 방류능력이 부족해지자 증가된 가능최대홍수량(PMF)을 대상으로 기존 댐 방류능력을 증대하기 위해 비상여수로 및 보조여수로를 건설하고 있다. 방류능력 증대를 위한 여수로 형식에서도 종래 채택하지 않았던 터널식 여수로를 소양강 및 임하 다목적댐에 처음으로 적용하고 환경친화적으로 건설해 자연경관 훼손을 최소화하였다.

셋째, 어려운 지반 조건을 극복하였다. 대표적으로 남강다목적댐(구댐: 록필댐)은 댐기초 차수공법으로 하상부 8~9m 심도의 사력층에 우물통공법(Well foundation method)으로 콘크리트심벽을 설치하였다. 1999년에 준공한 남강다목적댐(보강: 구댐 직 하류에 건설)은 하상부 사력층 차수를 위해 콘크리트 지하연속벽공법(Concrete diaphragm wall method)을 시도해 무난히 난관을 극복하고 성공하였다.

또한 낙동강하굿둑은 대하천 하구부 심도가 50~60m에 이르는 퇴적층 위에 건설한 가물막이의 사면 안정을 위해 딥웰(Deep well)공법에 의한 지하수위 저하와 함께 장대강관파일을 기초로 한 콘크리트댐에 대규모 수문을 설치하는 새로운 공법을 시도하였다. 장대강관파일 시공, 50m급 경간의 PC 박스거더형 교량, 레이디얼 게이트(Radial gate)를 박스거더형 보에 힌지를 정착하여 설치하였다. 4대강사업의 일환인 하굿둑 증설 구간은 레이디 얼 게이트 폭이 95m로 우리나라에서 가장 크다. 하굿둑 본체를 지지하는 기초인 장대강관파일로 직경 608mm, 두께 18mm, 평균길이 약 40m 규격인 강관 882본을 시공하였다.

아울러 충주다목적댐의 우안 부위 553만m³의 랜드슬라이딩 예상 토석 제거와 그 처리공법(저수지 측 댐 우안 사면 안정화공법 등)은 새로운 성공사례로 이후 보령다목적댐에서 그 기술을 활용하였다.

넷째, 대형장비에 의한 기계화시공이다. 소양강다목적댐은 우리나라 최초의 대규모 사력댐으로 축조재료의 선정 및 다짐이 핵심 사안이었다. 27톤급 자주식 탬핑 콤팩터(Tamping compactor)를 도입해 좋은 다짐 성과와 공기 단축을 가져왔다. 이 댐은 당시 국내 최대의 토목공사로서 3m³ 용량의 스쿠퍼(Scooper), 32톤 덤프트럭, 760m³/hr 버킷 굴착기(Bucket wheel excavator), 22톤 타이어 롤러(Tire roller) 등 대형장비를 도입해 기계화시공의 신기원을 이루었다. 또한 대청과 충주다목적댐 콘크리트는 케이블크레인(용량 20톤, 6m³)으로 타설했으며, 합천다목적댐에서는 대용량 지브크레인(Jib crane, 용량 13.5톤)으로 약 90만m³의 댐 콘크리트를 타설하였다. 이는 용량 13.5톤, 붐 길이 75m의 정치식 지브크레인 3대를 댐축과 나란히 설치하는 방식이었다. 이와 함께 주암다목적댐에서는 최신 터널굴착공법인 TBM공법을 본댐과 조절지댐을 연결하는 도수터널 건설에 처음 도입했으며 이후 영천댐 도수로, 용담다목적댐 발전소 도수터널 등에 활용하였다.

다섯째, 수차발전기 조립 및 설치기술의 자립이다. 1980년대 전반기까지 수차와 발전기 조립 설치를 외국 기술자에게 의존했는데, 그 과정에서 기술을 습득해 이후부터 우리 기술자가 직접 조립, 설치하였다. 또한 1986년 (주)수자원기술공단을 창립(산업기지개발공사 출자)해 모든 기존 발전소의 수차발전기를 5년마다 정기점검·보수 시 완전히 분해조립(Overhaul)하고 있다. 이 회사는 2001년 수자원기술(주)로 개명해 민영화되었다.

한편 중량물인 수차발전기를 트레일러에 싣고 곡선도로 구간이나 교량(설계하중 DB-18: 당시 1등교)을 통과하기에 문제가 있어 임시교량을 가설해야만 했

다. 그와 같은 어려움을 극복한 경험은 여수로 수문의 게이트 리프(Gate leaf), 변전소 변압기 등의 운반에 도움이 되었다.

여섯째, 환경친화 대책의 도입이다. 1990년대 말부터 하천의 공학적 기능(이수, 치수) 못지않게 자연적 기능 즉, 환경기능을 중요시하기 시작하였다. 저수지 수질관리, 생태환경 조성, 국민의 사색공간 및 쉼터 제공 등은 물론 댐 건설 홍보에도 중점을 두었다. 사회문화적으로 댐 및 저수지와 연관한 국민정서 함양의 장이 마련됨에 따라 댐 주변 환경이 세계 어느 나라에 못지않게 발전하였다.

낙동강하굿둑 설치 지점 일대는 우리나라 최대의 철새도래지로 국가가 지정한 철새보호구역인데, 「환경보전법」에 의해 1982년 3월부터 국내 토목공사로는 최초로 환경영향평가를 실시하였다. 그 결과 자연생태계를 보전하기 위해 수문(水門)을 월류 및 저류 병행 작동식으로 했고, 철새 먹이 공급용으로 토언제 부위에 조절수문 1개소를 추가 설치했으며 어족 보호를 위해 어도 2개소를 설치하였다.

아울러 소양강 및 충주 다목적댐과 주암조절지댐 하류에는 농업용수 공급을 위해 온수지(溫水池)를 설치했는데, 소양강다목적댐 하류(우두보)에 최초로 설치하였다. 임하다목적댐은 다목적댐으로는 처음으로 다단식 표면취수설비를 갖추어 방류수의 수온이 하천수온을 유지할 수 있도록 하였다. 또한 탁수 저감을 위한 기존 댐 상류에 탁수 저감댐 및 유사조절시설 설치를 위해 총 41개소를 대상으로 조사·검토하고 있다.

일곱째, 수자원 통합관리이다. 수계 내 댐 간 연계운영으로 각종 용수 공급(발전) 및 홍수 조절 효과를 극대화할 수 있는 수자원의 효율적 통합관리를 도모하고 있다. 그 일환으로 한국수자원공사에 '물관리센터'를 설립(2002년)해 운영하고, 최근 준공한 4대강 살리기 사업의 16개 다기능보를 포함한 수계별 통합 운영을 위해 '통합물관리센터'를 구축(2010년)해 운영하고 있다. 또한 과학적 운영을 위해 개별 운영 중이던 물관리시스템을 최신 ICT 기반으로 개선하는 한편 수문, 기상, 용수 공급, 홍수 분석 등 기능별 시스템을 통합해 '지능형 통합 물관리 의사결정 지원 툴킷(K-HT)'을 출시(2011년)해 활용하고 있다.

대표적 댐 건설 사업을 중심으로 각 사업별로 조사, 설계 및 시공감리를 통하여 사업의 배경 또는 추진과정, 규모, 기술적·공학적 의의와 특징 등을 중심으로 하여 간략히 기술코자 한다.

4. 다목적댐

1) 섬진강다목적댐

전라북도 임실군 강진면 옥정리에 높이 40m의 댐을 건설하고 임실군 운암면 운정리에 취수구를 설치함과 아울러 2,716.54m의 도수로를 건설한 이 사업은 1925년 11월에 착공하여 1929년에 완공하였다. 이로 인하여 동진강 유역의 농지 중 22,100정보의 농지가 관개용수를 이용하게 되었고 유로 변경시의 낙차를 이용하여 5,000kW의 발전도 하게 되었으므로 국내 최초로 시도된 다목적댐 개발사업이라고 할 수 있다.

그 후 1940년 4월 남선전력회사는 전력자원이 빈약한 남한지역에서 수력자원을 개발하여 산업 및 중요 지하자원 개발을 위한 동력원으로 이용하고 발전 방류수를 동진강 및 만경강 평야에 공급하여 관개를 개선할 목적으로 기존 댐 하류 2km지점에 새로운 댐 건설공사를 착수하였으며 1940년, 1948, 1961년 3차례에 거쳐 착공과 중단을 되풀이하여 1965년 12월에 준공하였다.

섬진강댐은 10여 년간이나 방치되었던 기설 콘크리트 위에 새로 콘크리트를 덮어씌워 완성시킨 것으로, 신구 콘크리트의 일체화를 도모하는 노력이 경주되었다. 신구 콘크리트의 탄성계수 차이를 극복하기 위한 노력은 응력해석법 검토, 접합면의 열응력에 대한 대책검토, 접합면 일체화를 위한 컨텍트그라우트 시공 및 각종 계기의 매설 등이다.

2) 남강다목적댐 및 보강

남강의 홍수를 사천만으로 방류하여 낙동강 본류와 남강의 합류점인 남지에서의 홍수위를 0.7m 저하시키기 위하여 계획되었으며, 남강 방수로의 미완성으로 개수공사가 완료된 직후인 1934년과 1936년의 홍수에 의해 기성제방이 파괴되어 인명과 재산에 막대한 피해를 입게 되었다. 남강 방수로 계획은 이와 같은 홍수 피해에 따라 적극 추진되어 1939년 공사를 착수하여 1944년 중단되었다가, 1949년 국제연합민사처(ECA)의 지원 사업으로 재착공하여 댐의 콘크리트 기초심벽 200m를 준공하였으나 6·25동란으로 인하여 다시 중단되었다. 이후, 치수와 이수의 목적에 다 같이 기여할 수 있는 다목적댐 사업으로 개발함이 보다 효율적이라는 판단 아래 남강다목적댐 기본계획을 확정하고 댐 공사를 재착공하여 1970년에 사업을 완료하였다.

남강댐 건설로 대부분의 홍수는 방수로를 통하여 직접 사천만으로 방류함으로써 남강 연안의 상습적인 홍수 피해를 경감하게 되었다. 또한 진주시, 삼천포시 및 충무시 등 경남 서부 일원에 충분한 생공용수와 관개용수를 적기에 공급할 수 있게 되었으며 무공해 수력에너지를 생산하는 등 경남 서부권 경제발전의 원동력이 되어왔다.

그 후 20여 년이 지나 토지이용의 증가와 인구의 도시집중화 등에 따라 각종 용수 수요가 증가하였고 홍수는 빈발하여, 안전 면에서도 기존 댐의 기능 증대 필요성이 대두되었다. 기존 댐의 홍수조절용량은 남강 본류로 2,000m³/s, 사천만으로 5,460m³/s를 방류하며 저수지에 총 19억m³를 저류하도록 계획되어 있으나, 남강 본류 진주시 지역의 홍수피해를 막기 위해서는 800m³/s 방류를 초과할 수 없다. 사천만 지역 또한 방류수로 인한 사천만 내 수위 상승으로 연안 농경지의 침수 피해 발생이 잦아 방류량의 축소가 요구되었다.

한편 홍수조절용량은 유입농경지에 비해 아주 적어 댐의 안전을 위하여 수위를 만수위 이하로 유지하지 않을 수 없어 진주시와 삼천포시의 생공용수로 계획된 210천m³/일 용수공급능력이 부족하게 되고, 신규용수 수요의 증가로 공급능력의 한계에 도달하여 하천유지용수는 전혀 고려하지 못하고 있는 실정이었다. 이에 1987년부터 기존 댐 하류에 남강댐 보강공사를 착수하여 1999년에 저수용량 309백만m³의 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐을 건설하였으며, 차수공법으로 하상부 8~9m 심도의 사력층에 우물통 공법에 의한 콘크리트 심벽을 설치한 점이 특이하다.

3) 소양강다목적댐

정부 시책에 따라 경제개발 5개년계획의 수립과 함께 국토건설종합계획이 수립되었고 1966년 한강 유역 합동조사반을 구성하여 당시까지 고려되어온 발전 단일 목적 개발을 치수와 이수를 겸한 다목적 개

발방식으로 전환하였다. 1967년 4월 준비공사를 착공해 1968년 3월 제1호 가배수로 터널공사를 시작함으로써 본격적인 공사에 착수한 이래 만 5년 반만인 1973년 10월 준공하였다.

소양강댐은 당초에는 콘크리트중력식으로 설계하였으나 당시 우리나라의 철근, 시멘트 등 건설자재 생산능력으로서는 그와 같은 대규모의 토목공사를 감당하기에 역부족이었으며, 시공 지점이 산간벽지인 관계로 막대한 수송비가 소요되어 댐 주변에서 쉽게 구할 수 있는 재료를 이용한 록필댐(Rock fill dam)으로 설계를 변경하였다. 굴착장비, 운반장비의 대형 기계화 시공에 의한 우리나라 근대 필댐의 상징이라고 할 수 있으며 설계, 시공, 현장시험 및 계기매설 등 댐 기술 발전에 이바지하였다.

발전효율 증대를 위해 댐 하류 농경지에 관개하는 취수보를 철거하였고, 발전수로 입구 표고가 EL.130.0m로 심층수이기 때문에 냉수에 대한 대책이 필요했지만 당초 계획에 미반영되었는데 검토결과 온수지(溫水池)를 설치하였다. 우리나라에서 전례가 없던 일로 그 규모가 12ha이었다. 준공 후 현재에도 이 시설을 이용해 아무런 문제없이 경작하고 있으며, 소양강 이후 충주 및 주암 등 3곳의 댐에 온수지를 만들어 농업용수를 공급하고 있다. 지금은 댐 설계 단계에서 저수지의 표면수를 방류하는 방식으로 냉해문제를 원천적으로 해소하고 있다.

4) 충주다목적댐

한강 수계가 보유하고 있는 수자원을 고도로 개발하여 수도권을 비롯한 댐 하류지역에 관개, 생활 및 공업용수를 공급하는 동시에 발전 및 홍수 조절을 목적으로 하는 다목적댐 개발사업이다. 1966년 4월부터 1971년 12월까지 미개척국(USBR)과 건설부/산공이 공동으로 수행한 한강 유역조사 결과 동 유역 개발사업의 일환으로 충주다목적댐 건설이 제안되었다.

1968~1971년까지의 기본계획조사와 예비타당성조사는 미국의 벡텔(Bechtel)사, 1975년에 착수한 타당성조사는 미국의 Engineering Consultant Inc.(ECI), 1977~1985년의 실시설계 및 시공감리 과업은 일본의 일본공영(Nippon Koei Co.)이 수행하였으며 국내 엔지니어링사와 각각 제휴하여 외국업체 주도의 협력체제로 과업을 수행하였다. 특히 실시설계와 시공감리 업무는 당시 발주처에서 국내 설계 및 시공 기술의 양성에 뜻을 두어 총 소요 인력의 1/3정도는 국내 기술자로 충원되어야 한다는 발주방침에 따라 주계약자인 NK에서는 주요 간부요원만 참여하고 나머지 기술인력은 전원 국내 인력으로 충원되었으며, 댐 설계 및 시공 기술의 국산화를 위한 초석이 되었다.

충주댐은 수자원 개발에 있어 가장 중요한 전략적 지점으로 유역면적 6,648km²의 수자원 개발 잠재력(Potentiality)이 매우 큰 지점이나 저수지 내의 도시, 산업시설, 도로, 철도 등 수몰 등과 관련해 댐 높이에 제한을 받지 않을 수 없게 됨에 따라, 한강 유역 합동조사단에서 검토된 대댐(High dam) 건의안과 타당성 조사 과정에서 검토된 대댐 건의안 등이 채택되지 못하고 축소된 현재의 규모에 그치게 된 것이다. 그럼에도 불구하고 충주댐은 총저수량 27.5억m³, 홍수조절용량 5억m³, 용수공급량 9.26백만m³/일, 발전시설용량 41.2만kw(본댐 40만kw, 역조정지댐 1.2만kw), 댐 높이 97.5m, 댐 체적 90.2만m³로 콘크리트댐으로서는 국내 최대 규모의 댐이다.

발전소 시설용량 규모는 타당성 조사 결과 210MW(70MW×3)로 건의되었으나 나중에 270MW(90MW×3)로 조정되었다. 그러나 세계은행(IBRD)은 차관 평가단의 기술검토를 통해 한국의 경제성장 전망에 비추어 대용량의 첨두 수력발전설비가 필요할 것이며 설비이용율(Plant factor)은 10%선까지 낮출 수 있다는 관점에서 270MW대신 400MW(100MW×4)가 보다 바람직한 결정이 될 것이라고 건의하여 결국 400MW로 결정되기에 이르렀다.

한편 ECI와의 타당성 조사 과정에서 발견된 댐 지점 우안의 활동성(滑動性) 파쇄대에 대한 대책은 실시설계 과정에서 댐 건설 후의 활동 또는 붕락(Land slide) 가능성을 배제하기 위해 완전히 굴착 제거하는 방안으로 결정됨에 따라 시공 중에 약 300만m³의 토사를 굴착 제거한 것도 특기할 만한 사항이 아닐 수 없다.

세계은행(IBRD)과 일본 해외경제협력기금(OECF)의 공동차관자금을 포함하여 총 5,550억 원의 사업비가 투입되었고 세계은행의 요청에 따라 댐 설계 자문 외에도 댐 계획 및 설계 전문가, 콘크리트 전문가, 지질 전문가 들이 설계, 시공감리 기간 중 수시로 내한하여 설계, 시공 문제에 관해 엔지니어링사의 설계 내용을 검토하고 발주처와 차관선의 기술적 자문에 응한 것도 특기할 만한 사항이다.

충주다목적댐은 콘크리트댐으로서 II종시멘트의 사용, 자동계량장치에 의한 콘크리트제조, 파이프 쿨링 등 선진화된 기술로 우리나라 매스 콘크리트 댐 건설기술의 신기원을 이룩하였다. 품질관리, 공사비 절감, 공기 단축을 위하여 II종(중용열) 시멘트를 150mm 골재에 사용하여 수화열 저감과 균열 방지에 기여함은 물론, 단위 시멘트량이 140㎏/m³ 정도로서 대청댐의 1종시멘트 댐 콘크리트보다 약 20%나 절약되어 공사비 절감과 국내 콘크리트 공학 발전에도 크게 기여하였다.

5) 합천다목적댐

1966년 11월부터 1972년 3월까지 UNDP와 FAO합동조사단이 실시한 낙동강 유역조사에서 합천다목적댐 건설을 낙동강 유역 개발사업의 일환으로 추진할 것을 정부에 건의함으로써 1973년 10월부터 12월까지 합천다목적댐 기본계획을 수립하였으며, 1974년 6월 타당성조사를 서둘렀다. 그러나 이 사업은 낙동강하굿둑 건설사업과의 병행이라는 현실적인 문제로 인한 차관 교섭과 정부의 재정 형편 등의 이유로 개발사업 착수가 지연되고 있었다. 이에 따라 1974년 10월부터 1977년 12월까지 실시한 하굿둑 타당성 조사 결과 합천댐 건설을 하굿둑과 병행해서 실시함이 바람직하나, 정부재정 형편에 맞춰 하굿둑과 별도로 1983년 12월에 착공하여 1989년 5월 준공되었다.

1982년 7월에 발주한 합천다목적댐 실시설계 과업은 종전까지의 외국회사 주도 설계를 지양하고 국내 엔지니어링사가 주계약자가 되어 댐 설계를 수행토록 하는 방침 변경에 따라 정부에서 첫 번째로 발주한 다목적댐 건설 사업이다. 댐 설계는 국내 엔지니어링사(삼안) 주도하에 시행하되 외국 엔지니어링사의 지원이 필요한 부분에는 최소한의 지원을 받는 체제로 수행되었으며, 외국 엔지니어링사로 일본 공영(NK)이 총 25인/월(Man/Month)의 인력 지원을 하게 되었다. 그러나 설계 후에 시행된 시공감리 업무는 일본의 OECF 차관에 의해 수행하게 됨에 따라, 차관공여 조건에 의해 차관제공국의 엔지니어링사인 NK를 주계약자로 하는 NK-삼안의 공동계약(Joint venture) 체제로 바뀌게 되었다.

댐 형식은 콘크리트 중력식으로 결정되었으며 콘크리트 타설 장비로는 우안부의 암반 심도가 깊어 케이블크레인(Cable crane)에 의한 콘크리트 타설은 부적절한 것으로 판명되어 집크레인(Jeep crane)에 의한 타설을 검토, 결정하게 된 것도 특기할 만한 사항이었다. 댐 저수용량 7.9억m³, 10만kW의 발전시설용량은 황강 연안 및 하류지역의 용수난 해결과 홍수 피해 경감에 기여하고 수력에너지 생산에 이바지하여, 우리나라 수자원 개발을 위한 또 하나의 이정표적 사업이 아닐 수 없었다.

6) 주암다목적댐

정부에서는 1977년부터 1979년까지 댐 개발 예정지점 조사를 실시한 바 주암댐 지점을 개발 적지로 선정, 1979년 9월부터 1980년 12월까지 타당성조사를 거쳐 1984년 기본계획을 수립하였다.

주암댐 실시설계는 합천댐의 경우와 마찬가지로 국내 엔지니어링사가 주계약자가 되고 필요 부분에 대해선 주계약자 책임하에 외국기술 지원을 받도록 하는 체제로 발주되었다. 이에 따라 주계약자로 선정된 삼안은 일본공영(NK) 인력 약 20인/월을 참여하게 하였다. 그러나 시공감리 계약에 있어서는 합천댐의 경우와 똑같은 사유에 의해 차관공여국의 엔지니어링사인 NK의 참여가 요구되면서 삼안 주도하의 삼안-NK 공동계약 체제로 계약형식이 바뀌게 되었다. 이로써 다목적댐 설계와 시공 기술을 국산화하는 데 성공하였고 이는 한국 댐 건설사에 길이 남을 것이다.

주암댐은 설계 초기에는 본댐에 발전소를 설치하는 안으로 계획하였으나 그렇게 될 경우 광주지역 용수 수요의 점차적 증가에 따라 발전용수가 결국 고갈될 것이라는 사유로 차관 선에서 발전소의 본댐 설치안에 이의를 제기하였다. 이에 따라 인근 유역인 이사천에 조절지댐을 건설하여 발전소를 조절지댐에 설치하고 본댐과 조절지댐은 도수터널에 의해 연결, 두 저수지를 연계 운영함으로써 광주, 광양지역의 용수 문제와 발전용수 확보 문제를 동시에 해결하는 계획안으로 수정되었다. 이로 인해 도수터널과 조절지댐이 추가되어 실시설계용역 2차 과업을 수주하게 됨으로써 사업 규모가 방대해진 것도 특기할 만한 사항이다.

이와 같이 주암다목적댐 사업은 본댐과 조절지댐으로 구성되며 각 댐의 총 저수용량은 본댐 4.57억m^3, 조절지댐 2.5억m^3, 합계 7.07억m^3이며 연간 용수공급량은 본댐 2.69억m^3, 조절지댐 2.19억m^3, 합계 488억m^3에 이른다. 본댐 및 조절지댐 모두 심벽형 사력댐으로서 높이는 각각 57m 및 100m이며 체적은 각각 1.6백만m^3 및 3.55백만m^3이다. 두 저수지를 연결하는 도수터널은 내경 3.9m, 연장 11.5km에 이른다.

발전시설용량은 22.5MW로 연간 발전량은 51.300MWh에 이르며, 발전소 하류엔 하류지역의 용수 이용 편의를 위해 역조정지가 설치되어 발전방류수를 조절하고 있다. 도수터널은 최신 터널 굴착공법인 TBM 공법을 도입하여 재래식의 발파공법과 병행 시공함으로써 시공의 효율성과 품질향상을 도모한 것을 특징으로 들 수 있다.

7) 낙동강하굿둑

낙동강 유역조사 착수 당시에는 예기치 못한 하구지역 염수침해 문제가 조사기간 중에 노출됨에 따라 하구지역의 염해를 방지하고 안정적인 용수공급을 보장하기 위해 제2댐의 우선순위 결정을 위한 세부적 조사를 후속사업으로 건의하였다. 이에 따라 다시 UNDP / FAO 지원하에 1974년 낙동강 하구 조사를 착수하여 1977년 완료하였다.

이 조사에서는 낙동강 하구지역의 염수침입 특성과 영구적인 방지대책이 철저히 검토되었으며, 안동댐 다음의 제2댐으로 합천댐과 하굿둑이 고려되었다. 두 대안에 대한 비교 검토를 위하여 각 댐군의 공동조작에 따른 효과에 대한 컴퓨터 시뮬레이션(Computer simulation)과 면밀한 경제 분석을 통해 낙동강 유역권의 안정적 용수공급을 위해서는 하굿둑이 보다 경제적이고 효율적이라는 결론에 이르게 되어 낙동강하굿둑 사업을 제5차 경제발전5개년계획에 포함시켜 조속한 착공이 건의되었으며, 1983년 11월에 착수하여 1987년 5월에 완료하였다.

하굿둑의 축조 재료 90%를 준설 해사로 충당했다는 점과 대하천 하구부 연약지반 위의 댐 구조물 건설로서 심도 50~60m에 이르는 퇴적층 위의 대규모 수문설치라는 점에서 새로운 경험이었다.

낙동강하굿둑은 가물막이 내에 설치된 수문부는 11개의 교각으로 지지하고 있으며, 설계홍수량 18,300m^3/s(500년빈도)의 소통과 염수차단의 양기능을 충족시켜주는 순경간 47.5m, 중량 약 245톤의 레이디얼 게이트(Radial gate) 10문을 P.C Box Girder Bridge Type에 부착시킨 국내 최대연장의 수공 구조물이다. 교각의 순경간은 51.5m, 높이는 1115m이며 기초는 강말뚝 독립기초로 시공하였다.

낙동강 하구 유역의 하상은 깊은 충적층으로 모래, 실트(Silt), 실트질 점토 및 사질점토 등 7종류 이상의 층이 번갈아 나타나며, 일반적으로 상부층은 연약하며 하부층은 모밀하다 할 수 있으나, 하굿둑이 설치될 하부에는 사력층 사이에 견점토(Stiff clay)가 약 20m의 두께로 불규칙한 형상을 이루고 있었다. 연약지반 심도가 50~60m에 달하고 70~100m 정도에서 지지층이 나타날 정도로 두터운 연약 퇴적층으로 지반이 형성되어 있어 기초설계는 경제적이면서도 시공이 용이한 스틸파이프(Steel pipe) 공법을 채택하였다.

8) 임하다목적댐 및 영천도수로

임하댐을 다목적으로 개발하기 위한 조사는 1966년부터 수차에 걸쳐 댐 하류지점과 상류지점에서 시행되었다. 즉 당시 안동다목적댐의 타당성조사에서는 임하 하류지점의 댐을 안동댐과 동시에 개발할 것을 제안한 바 있고 UNDP/FAO Team도 긍정적으로 검토한 바 있으며, 1979년 일본 해외경제협력단은 다목적댐으로 개발하되 안동댐과 종합 운영하도록 제안한 바도 있다.

상류지점의 다목적댐에 대하여 UNDP / FAO Team에서는 상류지점과 하류지점의 단독 및 종합개발 가능성만을 검토한 바 있다. 또한 1982년 제1차 임하다목적댐 타당성조사에서도 상류지점의 댐을 개발하여 안동댐에 연결시키는 방안을 검토하였다. 그러나 상류 수몰지 보상조사 과정에서 상류댐 지점으로부터 25km 상류에 있는 공공시설을 이설하는 경우의 사업성을 검토한 결과 하류댐 지점을 개발하는 것이 타당하다는 결론을 얻고 1983년 하류댐 지점을 단독으로 하는 개발하는 데 대한 2차 타당성조사를 실시하여 1983년 10월부터 1984년 12월까지 기본계획 및 실시설계로 최종 확정하였다.

임하댐에서는 국내 처음으로 다단식 표면취수설비를 갖추었다는 점이 특이할 만하다. 댐 직하류부와 낙동강 본류에는 수많은 관개용수 양수장과 농경지가 산재하고 있으며 관개기간 동안의 하류용수 공급은 취수구를 통한 발전방류에 의존하게 된다. 발전 방류수는 심층수인 저온수로서 수도작에 대한 냉해 피해가 불가피한 실정이므로 발전용수 취수시설에 국내 최초로 대용량 표면수 취수방식을 적용하여 방류수의 수온이 최소한 댐 건설 전 댐 지점에서의 수온을 유지하도록 하였다.

영천도수로 건설은 약 33km의 수로터널을 통해 금호강의 정상적인 하천기능 회복과 유지 등의 목적을 위한 용수 확보를 감안한 것이다. 아울러 수질개선도모 등 종합적인 관점에서 금호강 유지용수와 장기적인 수자원 개발 및 이용 측면에서 신규 수원개발이 어려운 금호강 상류 및 경주, 포항지역의 장래 생·공용수 수요를 포함한 용수 공급시설로 건설되었다

9) 보령다목적댐

정부에서는 그동안 하천 본류의 대용량댐 건설에 치중해 왔으나 대하천의 지류 또는 소하천에 중규

모댐을 건설함으로써 지류하천 또는 소하천 유역의 홍수 피해 경감과 용수난을 해결하면서 대규모 저수지 건설에 수반되는 수몰문제를 완화한다는 정책적 배려에서 중규모댐 건설에 치중하기 시작하였고, 그 일환으로 보령댐(중규모댐 7개 지점 중 용수댐)을 건설하게 된 것이다.

한편 충청남도와 한국전력공사 간에는 보령 화력발전소, 당진 화력발전소 건설의 인허가 과정에서 공해시설의 허가 조건으로 보령댐 건설비의 한전 부담 협약이 진전됨에 따라 충남도에서는 건설부에 보령댐 건설사업을 충남도에 위임해줄 것을 요청하였다. 이 요청이 수락되어 보령댐 건설사업은 충남도에 위임되었으며 건설부에서 수행 중에 있었던 타당성조사 업무도 충남도에 이관되었다. 다목적댐 건설사업이 지방자치단체에 이관된 것은 처음 있는 일이었다.

따라서 댐 실시설계는 충남도에서 발주하였으며 공사착공에 따른 시공감리 용역도 충남도에서 발주하게 되었다. 그러나 의문시되었던 전문성 문제가 대두되어 댐 건설 업무는 결국 댐 건설 전문기관인 한국수자원공사에 다시 이관되었으며, 그에 따라 댐 시공감리 용역 3차 이후부터는 한국수자원공사 주관하에 진행하게 되었다.

댐 건설 중 한 가지 문제는 댐 좌안 여수로 상부의 지질 상태였다. 타당성조사 기간 중에도 좌안의 지질 상태가 사암질 파쇄대가 지층에 존재하는 것으로 추정되었으나 제한된 시추조사만으로 명확한 규명이 어려워 실제의 굴착 시공 시까지 그 규명을 보류한 바 있었다. 실제 안부(Abutment)의 굴착 시공과정에서 사암파쇄대는 일종의 쐐기(Wedge) 형태로 크게 분포되어 있었고, 취약지질과 함께 굴착에 따른 응력이완현상(Stress relief) 때문에 굴착사면의 안정에 심대한 문제가 생겼다. 발주처는 처음부터 불안요소를 제거하기 위해 충주댐 우안의 사면처럼 취약지층의 굴착 제거를 주장하였으나 엔지니어링사는 굴착에 따른 방대한 공사비 증가를 염려하여 굴착에 대한 대안 강구에 부심한 끝에 일본공영(NK)의 자문을 받아 쐐기층의 안전, 보강방안을 건의하게 되었다. 발주처에서는 세계은행의 자문역(IBRD panel)으로 충주댐에 참여하였던 지질전문가 Mr. Dodd를 수차례 초빙해 그의 건의안도 검토하였으나, 결국은 처음 주장했던 대로 굴착 제거 안을 관철하게 되었다.

보령다목적댐은 총 저수용량 1.16억m^3, 댐 높이 50m의 중앙심벽형 사력댐으로 중규모댐이며 용수공급능력은 292,000m^3/일(=3.38cms)에 지나지 않는다. 보령댐의 용수 수요지는 댐과의 거리가 멀고 또 댐 방류 후 하천과의 거리가 멀어, 댐 방류수를 취수하여 용수 수요지에 송수하기 위해서는 취수 펌프장 외에 중간 가압 펌프장 건설이 불가피하고 댐 저수지에서 직접 취수하여 송수하는 것이 보다 경제적이기 때문에 수력발전소 건설 안은 채택되지 못하고 하천유지용수를 이용한 120kW의 소수력발전 시설을 갖추게 되었다.

10) 부안다목적댐 및 횡성다목적댐

정부가 지금까지 추진해온 수자원 개발 정책은 주로 대하천의 본류에 대규모의 다목적댐을 건설함으로써 중소규모지역에 위치하는 많은 지역사회는 혜택을 받지 못하는 실정이어서 유역면적 50~100km^2, 총저수량 2백만m^3~110백만m^3 규모의 중규모 다목적댐건설을 계획하였다.

1985년 12월부터 1986년 9월까지 전국에 걸친 15개 중규모 다목적댐 개발 후보지점에 대한 예비타당성조사를 시행하였고 1987년 12월부터 약 1년간 부안댐 타당성조사를 실시하였다. 1990년 2월 수자원공사와 건설부는 부안다목적댐 건설을 위한 실시설계 대행역무계약을 체결하여 최초로 국내 엔지니어링사가 아닌 수자원공사 자체 기술진으로 현지조사 및 설계를 직접 시행하였고 지질 및 재료원 조사, 환경영향평가 등은 외주하여 1990년 12월까지 실시한 바 있으며 1996년에 사업을 완료하였다.

남한강 지류 섬강에 횡성다목적댐 건설의 타당성이 인정되어 1987년 12월부터 1988년 10월까지 보다 정밀한 타당성 조사를 실시하였고 1990년 1월부터 10월까지 수자원공사 설계처에서 직접 기본계획 및 실시설계를 완료하여 사업을 실시하였다.

11) 용담다목적댐

일제강점기에 3차례에 걸쳐 용담댐 지점이 포함된 수력지점조사를 실시하였으며, 1937년 현 댐의 하류 약 2km 지점 협착 부위에 유역변경개발로 콘크리트중력식댐을 건설할 계획이었다가 제2차 세계대전으로 중단되어 사업을 취소한 바 있다.

1980년대 들어 전주, 익산, 군산을 중심으로 하는 전주권을 포함한 서해안지역의 신규 공업단지가 조성되었고 그에 따른 배후도시 유발인구 증가 등으로 생·공용수 수요가 급격히 늘어날 것으로 예상되었다. 그러나 유역면적이 작은 만경강 자체 유역은 수원이 부족해 금강에 의존하는데, 금강 본류의 수질오염 때문에 취수원으로서의 적정성 문제가 제기되었다. 이에 따라 정부에서는 안정적인 용수 공급과 수자원 부존량 및 공급능력, 유역 간의 물 분배계획 및 개발방안 등을 다각적으로 고려할 때 유역변경식 댐 건설이 기술 및 경제적으로 타당성이 입증됨에 따라 용담다목적댐 건설을 추진하게 되었다.

건설부는 1988년 8월부터 1년에 걸쳐 전주권 2단계 지역개발사업 타당성조사를 실시한 바 용담수원을 개발하기 위해서는 다목적댐으로 건설되어야 하며 댐 건설에는 6년이 소요되는데 전주권의 물 문제는 그 이전에 발생할 수도 있기 때문에 이 사업의 조속한 추진이 필요한 것으로 판단되었다. 1989년 12월부터1990년 8월까지 전주권의 2021년도 용수공급, 홍수 조절, 발전, 하천유지용수 공급사업의 타당성조사를 수행하였으며 1990년 11월부터1991년 12월까지 본댐, 발전소 및 부대시설 공사의 실시설계와 환경영향평가를 수행하였다.

1992년 2월 대형공사 집행 기본계획 심의에서 기타 공사로 분류되었는데, 도수터널 입찰공고문에 TBM 3대를 계획공정에 맞춰 반입할 수 있는 업체로 한다는 특기사항을 두었다. 도수터널은 전주권의 용수 공급과 발전을 위한 유역변경식 수로터널로 취수탑은 표면수 취수를 위한 조절문비와 취수문비가 있고 조압수조는 수실식이다. 장대터널이므로 3개 구간으로 나누어 굴진하는 것으로 계획하였으며, 터널은 원형으로 TBM 굴착 21.26km, NATM 굴착 0.64km 등 총 21.90km(D=라이닝 후 3.2m)이고 라이닝 두께는 30cm이다.

1996년 2월 유수전환을 하면서 본격적으로 댐 기초굴착에 돌입해 같은 해 10월 댐 정초식을 가졌다. 1997년 12월 용담호 저수지(진안군 용담면 수천리)에서 전라북도 완주군 고산면 소향리까지 길이 21.9km의 도수터널을 뚫었다. 1998년 10월 본댐 축조를 완료했지만, 대전·충청권과 전라북도 간 용담호의 물 배분 분쟁으로 담수는 2000년 11월에 개시하였다. 용수 공급은 2001년 9월에 개시하였으며 이 분쟁은 2002년 7월에야 해소되었다.

12) 군위다목적댐

경상북도 중부지역(군위군, 의성군, 칠곡군)에 생·공·농업용수 공급, 댐 하류 위천(渭川, 지방2급 하천)의 홍수 조절 및 수력발전 등을 목적으로 한 사업이다. 군위다목적댐은 시험담수를 비롯해 댐 좌안 상류 저

수지에 선택취수형 다단식 문비를 설치한 경사형 취수탑, 누수집수벽 댐체 내 설치(댐 중심선), 암거형 가배수로 댐체 통과, 여수로 횡단 생태이동통로 설치 등 우리나라에서 처음 적용한 사례가 많다. 이 중 시험담수는 댐을 본격적으로 운영하기 전에 저수지의 수위를 최고수위까지 상승시킨 후 최저수위까지 저하시켜 댐 본체, 기초지반, 저수지 주변 사면 등의 안정성을 확인하기 위한 것이다. 1976년 미국 테톤(Teton) 댐이 파이핑(Piping) 현상으로 붕괴된 후 시험담수의 필요성을 인식하고 일본, 프랑스 등에서 이미 댐 축조 완료 2년 전부터 시험담수를 준비해 시행하고 있다.

시험담수 기간 동안 각종 댐 거동상태를 설계값과 비교하고 그 경시(經時) 변화를 분석한 결과 안전성을 확인할 수 있었다. 누수량의 경우 240ℓ/min을 관리기준치로 설정했는데 측정치는 119.97ℓ/min이었다. 시험담수 중 댐체 외의 지하수 및 저수지 주변에도이상이 없었다. 한편 담수 초기에 유입되는 오염물질을 배제할 수 있어 저수지 수질개선 효과도 얻을 수 있었다.

국내 최초로 시행한 시험담수를 통하여 본 담수 전 댐 및 이설도로 사면의 안정성을 확인하고 댐 운영 시 이상거동을 사전 예측할 수 있는 매설계기 관리기준치를 설정할 수 있었다. 댐은 생애주기 내에서 지속적으로 거동하며, 수위 변동에 따라 물과 함께 점차적으로 안정을 찾아가는 대규모의 시설물로서 초기 담수 시 가장 위험한 바, 댐 운영 전 단계에서의 안정성에 대한 여러 단계의 시험과 검증의 반복은 아무리 강조하여도 지나치지 않는다.

여수로 도류부에 가공(架空) 생태이동통로를 설치한 것도 우리나라 최초이다. 통로는 양측 도류벽을 교대로 해 주변과의 조화를 도모하고, 얇은 단면적에 비해 구조적으로 우수한 충복식(充腹式) 아치교(도류벽과는 독립구조)로 하였다. 폭은 동물이동통로 기준에 따라 30m이다. 댐 우안도로 위를 건너다니도록 설치한 동물이동통로와 댐 배면 부위를 친환경적으로 녹화해 댐 좌·우안 생태축을 연결시켰다.

13) 김천부항다목적댐

2002년 8월 태풍 '루사' 때 김천지역의 대홍수로 제방 붕괴와 시설물 유실, 인명피해 32명, 이재민 2,088명, 재산피해 3,518억 원 등 지역사상 초유의 수해가 발생했다. 이듬해인 2003년 9월에도 태풍 '매미'가 내습해 이재민 104세대 218명, 재산피해 545억 원을 기록해 항구적인 홍수 방어대책이 절실하였다. 이에 따라 2004년 2월 환경영향평가 중 주민의견 수렴 및 관계기관과의 협의를 거쳐 댐 건설을 추진하게 되었다.

김천부항다목적댐은 다목적댐 건설 사상 우리나라 최초로 설계시공일괄입찰로 발주하였다. 2002년 지금의 한탄강홍수조절댐을 다목적댐으로 계획해 설계시공일괄입찰공사로 발주한 사례가 있었지만 그대로 추진되지는 않았다. 건설사와 설계사가 보유한 신기술, 신공법, 창의성 등을 적극 활용한 것이다.

배수층(Zone ③Bs)에 최초로 원심모형실험과 수치해석기법을 이용해 배수효과를 확인하고 차수벽 균열 시 침투특성 분석, 담수 시 차수벽과 댐체의 거동특성 분석, 댐 대표단면 변형특성에 대한 안전성을 확인하였다. 또한 최초로 댐 다짐장비인 진동롤러에 GPS 수신 장치를 장착해 다짐 횟수, 다짐도 등을 실시간으로 확인하면서 과학적인 댐 축조 및 품질관리를 하였다. 측벽부 원형다단식 실린더게이트(임의 층의 원수 취수 기능) 설치는 우리나라 최초의 사례였다. 아울러 최초의 기록으로 콘크리트 계량오차 발생 시 자동으로 프로그램이 구동해 SMS서비스를 실행하는 한편, 믹서 내에 내시경 카메라를 설치해 품질 및 설비 모니터링을 하였다.
지역주민과 함께하는 명품 댐 건설을 위해 한국수자원공사, 지방자치단체, 지역주민이 참여한 위원회를 구성해 운영하였다. 댐 좌안의 물문화관에서부터 구진들교까지 약 1km 구간에 꽃길을 조성하고 옛길 걷기 행사 등을 했으며 '부항6경', '굽이굽이 부항30리' 등 경관특화로 지역 대표공간을 조성해 수자원사업에 대한 인식을 새롭게 하였다.

또한 자연친화적인 댐을 위해 교란된 에코시스템 복원, 이설도로 동물이동통로 설치, 댐 배면 녹화, 여수로 횡단 생태이동통로와 그린네트 설치, 로드킬(Road kill) 방지용 차단시설 등 댐 여수로 및 이설도로를 연계해 생태계 단절이 없도록 복원하였다. 댐 상류 유입수에는 친환경시설인 인공습지 및 비오톱을 조성하였다. 관광객들에게 감동을 줄 수 있도록 수몰지역 주민들의 얼이 밴 유·무형의 물품 등을 기증받아 전시하고, 일주문과 전통 담장을 포함한 '이영보 효자각'을 이전·복원해 이 지역의 랜드마크로 자리매김하게 하였다.

14) 청송성덕다목적댐

이 댐은 댐건설장기계획(2001년 12월, 건설교통부), 댐 재개발 예비타당성조사(2002년 8월, 기획예산처/한국개발연구원), 댐 재개발 타당성조사(2002년 12월, 건설교통부/한국수자원공사) 등에서 댐 하류 홍수 피해 경감 및 경상북도 내륙지역의 용수 공급을 위해 검토되었다. 이 댐은 기존의 농업용 댐인 성덕댐(한국농촌공사 관리) 하류 약 1.2km 지점에 다목적댐으로 재개발하였다.

2003년 실시설계에 이어 2006년 3월부터 기존 댐 재개발을 위한 관계기관 실무협의를 거쳐 같은 해 12월 한국수자원공사와 한국농촌공사가 댐 재개발협약을 체결하였다. 사업 추진은 건설교통부가 실시계획 승인과 고시 등 행정업무를 지원하는 가운데 한국수자원공사와 한국농어촌공사가 일괄 수행하였다.

청송성덕다목적댐은 높이 58.5m, 길이 274m 규모의 콘크리트중력식댐(CGD)이며 댐 마루 표고가 EL.368.5m로 우리나라 다목적댐 중에서 가장 높은 위치에 있다. 여수로는 댐 중앙부위에 레이디얼게이트(Radial gate) 2문을 갖는 상용의 문비 조절 월류형식 수문과 양측에 문비가 없는 비상용도의 비조절 일류형식 여수로가 2문씩 있다. 댐 좌안에는 측벽 다단식 원형실린더를 갖춘 취수탑이 댐과 일체로 설치되어 있다. 또한 댐 직 하류 좌안에 시설용량 230kW의 상시발전용 소수력발전소가 있다.

사업효과로 경산시, 영천시, 청송군 등 경상북도 내륙지역에 생·공용수 1일 42,300m³를 공급하게 되었는데, 이 중 경산시와 영천시에는 댐에서 길안천으로 방류한 물을 영천댐 도수터널 입구(위치: 댐 하류 약 30km)로 유입시켜 공급한다. 또한 댐 하류에 농업용수 8,400m³/일와 하천유지용수 5,800m³/일 등 56,500m³/일(연간 20,600천m³)를 공급하고, 홍수조절용량 4.2백만m³로 댐 하류의 보현천 및 길안천의 홍수 피해를 크게 경감시킨다.

15) 영주다목적댐

이 댐은 1971년 낙동강 유역조사 보고서에서 최초로 댐 개발 가능지점으로 검토되었다. 이후 1996년 4월 기본조사, 1999년 8월 예비타당성조사를 실시했으며 같은 해 12월 낙동강물관리종합대책에 포함되었다. 또한 2001년 12월 댐건설장기계획(2001~2011년) 및 수자원장기종합계획(2006~2020년) 등에서도 댐 개발 후보지로 지속적으로 거론되었다. 2004년과 2009년 2차에 걸친 타당성조사를 거쳐 2009년 6월 기본계획 고시 후 설계시공일괄입찰방식(Turn key)으로 발주해 같은 해 12월 실시계획 고시 및 착공을 하였다. 사업 추진은 국토교통부가 실시계획 승인, 고시 등 행정업무를 지원하는 가운데 한국수자원공사가 일괄 수행하고 이설철도는 한국철

도공사에 위탁하여 시공하였다.

댐 형식은 좌안이 콘크리트중력댐, 우안이 콘크리트 표면차수벽형석괴댐(CFRD)인 복합댐이다. 여수로는 콘크리트댐 중앙에 레이디얼 게이트(Radial gate) 4문을 설치했고, 취수탑에 다단식 실린더게이트를 두었으며 발전시설용량은 5,000kW로 댐 직하류 좌안에 있다. 특히 유사량(流砂量)이 많은 내성천의 모래를 차단 및 배제하기 위해 댐 상류에 유사조절지를 건설하고 댐체에 배사문을 설치하였는데, 유사조절지 보는 우리나라에서 첫 사례이다.

사업효과는 영주시와 상주시 등 경상북도 북부지역의 생·공·농업용수와 낙동강 중·하류지역의 수질개선을 위한 하천유지용수로 연간 203.3백만m³를 공급하고 홍수조절용량 75백만m³ 확보, 연간발전량 15.75백만kWh 등이다.

16) 보현산다목적댐

이 댐은 수자원장기종합계획(2006~2020년)과 댐건설장기계획(2007~2011년)에 포함된 사업으로, 2008년 예비타당성조사에서 사업의 타당성이 확인되었다. 2009년 12월 타당성조사를 완료하고 2009년 12월 8일 기본계획 고시를 했으며, 2010년 5월 설계시공일괄입찰방식(Turn key)으로 발주해 같은 해 7월에 착공하였다. 댐 축조 등 구조물은 2013년 12월에 완료하고 2014년 5월부터 담수를 시작해 같은 해 11월에 준공행사를 가졌다. 사업 추진은 국토교통부가 실시계획 승인, 고시 등 행정업무를 지원하는 가운데 한국수자원공사가 일괄 수행하였다.

댐 형식은 경관성이 뛰어나고 구조적으로 가장 안전한 아치형콘크리트중력댐(곡선반경 300m)으로 높이 58.5m, 길이 250.0m, 부피 230천m³이다. 여수로는 댐 중앙에 설치했으며 레이디얼 게이트(Radial gate) 2문과 그 양측에 무문식 월류부로 구성되어 있다. 댐 중앙 좌측 상류에 취수시설이 있으며 댐 하류 여수로 감세공의 좌안 측에 시설용량 170kW의 소수력발전소가 있다.

사업효과는 영천시, 경산시 등 금호강 유역에 연간 용수공급량 14.87백만m³(생·공용수 13.24백만m³, 농업용수 0.68백만m³, 유지용수 0.95백만m³), 홍수조절용량 3.49백만m³ 확보, 연간발전량 1.39백만kWh 등이다. 댐 콘크리트 타설 공법은 공기, 경제성, 시공성 등을 고려해 수평레이어타설공법인 ELCM(Extended layer construction method) 공법을 처음으로 채택하였다.

17) 다목적댐 여수로 및 수공구조물 설계

우리나라 다목적댐의 여수로 설계는 구조물의 안정성과 경제성에 바탕을 두고 계획하여 수리모형실험을 통하여 확정하였다.

외형적인 측면에서 과거 외국 엔지니어링사에 의해 수행된 설계홍수량 선정 기준 등은 그들 자국의 자체 판단기준에 따라 결정된 것으로 명확한 기준은 없는 실정이다. 그러나 최근에 국내기술에 의해서 수행된 중규모댐들은 경제개발에 따른 하류피해 증가와 현재 미국 등 선진국에서 권장하는 가능최대홍수량(P.M.F)을 선정하여, 여수로의 규모 산정 시 빈도에 결정된 설계홍수위 상부에 가능최대홍수량에 의한 가능최대수위를 고려하고 있다.

한편 다목적댐 여수로 구조물의 일반적인 특성은 콘크리트댐의 경우 월류형 여수로와 턱이 있는 정수지형 감세공으로 설계되어 있으며, 필댐의 경우는 개거식 여수로와 공사비 면에서 경제적이나 감세효과가 비교적 적은 플립버켓(Flip bucket) 감세공으로 설계되어 있다. 주암댐조절지(이사천댐)는 대규모

표 13. 다목적댐 여수로 설계 (단위:m³/sec)

댐명	여수로 설계 및 홍수조절계획			댐의 수문학적 안정성	여수로 형식	감세공 형식	홍수유출 분석	비고
	빈도(연)	유입량	방류량					
소양강	200	10,500	5,500	1,000년	개거식	F/P	단위도법	
충주	500	18,000	16,200	PMF	월류형	S/B	합성단위 유량도법	
안동	100*1.2	6,480	4,500	PMF	개거식	F/P	단위 유량도법	
남강	200	10,570	7,460	800년	개거식	S/B	Nakayasu 단위 유량도법	방류량은 사천만으로의 5,460m³/s 포함
합천	200	8,900	6,500	PMF	월류형	S/B	Clark법	
임하	200*1.2	4,600	2,500	PMF	개거식	F/P	단위도법	
대청	500	9,500	6,000	PMF	월류형	S/B	TANK모형	
섬진강	100	3,268	1,860	PMF	월류형	-	Kajiyama 공식	
주암	200*1.2	5,969	4,154	PMF	개거식	F/P	Clark법	
주암조절	200	1,910	685	PMF	측구식	F/P	Clark법	
부안	-	1,674	664	PMF	개거식	F/P	SCS법	
남강보강				PMF			Clark법	
용담	200*1.2	6,600		PMF	월류형	F/P	대표단위도법	
횡성	PMP 조절방류량	3,658	2,505	PMF	월류형	F/P	SCS법	
밀양	200*1.2	1,616	1,615	PMF	개거식	S/B	단위도법	
장흥	200	3,660	2,380	PMF	월류형	S/B	Clark법	

주) S/B: Stilling basin, F/P: Flip bucket

표 14. 다목적댐 저수지 계획

댐명	이용 수문연도	강우·유출 해석 (장기유출)	저수지운영 분석	이수안전도	첨두발전 시간(hr)
소양강	1915~1939	천전수위관측소의 실측강우-유하량관계식 적용	모의운영		5
충주	1966~1983	실측자료를 보완하여 Tank 모형으로 산정	모의운영		2.6
안동	1958~1969	Kajiyama 공식 적용	모의운영	(1967~1968갈수조건) +(예비저류량25%)	4
남강	1915~1939	Kajiyama 공식 적용		6.21~7.20(30일간)까지 유입량의 20%	관개용수공급에 지장 없는 범위
함천	1969~1981	창리 수위표의 수위-유량 관계식 적용	모의운영		
임하	1963~1983	임하 수위표의 수위-유량 관계식 적용	모의운영		
대청	1958~1970	송포 수위표의 수위-유량 관계식 적용	유가누가곡선		5
섬진강	1923~1942	강우-유출 관계식 적용	모의운영		
주암	1953~1982	보성강댐 실측유하량에 유역면적비 적용	모의운영 (보성강댐+동복댐)		4
부안	1963~1988	섬진강댐 유입량에 면적비와 월강우량 비율 적용	모의운영		
낙동강 하굿둑	1958~1975	수위-유량 관계식 적용	-		
남강 보강	1976~1987	실측 유입량	모의운영 (Mass Curve)		24
용담	1963~1990	수위-유량관계식과 비유량방법 적용	최적화기법 (DP)		24
횡성	1963~1988	Kajiyama 공식 적용	모의운영		24
밀양	1973~1987	예림교 수위표의 수위-유량관계식과 비유량방법 적용	모의운영		24
장흥	1966~1993	Tank모형	모의운영		24

댐으로서는 유일하게 유역면적이 작아 문비가 없는 측구식 여수로이다.

최근의 여수로 시공 시 가장 고려되고 있는 것은 공기흡입장치(Air entrainment device)의 설치이다. 우리나라에서도 1985년 준공된 충주댐을 시발로 합천댐 등 대규모 댐 여수로에 이러한 시설을 설치하고 있으며 모양에 따라 홈형(Groove), 벽단형(Offset) 및 전향장치형(Deflector)으로 나누어진다.

18) 다목적댐 저수지 계획

저수지 계획 수립 시 댐별로 고려한 강우-유출해석 방법, 저수지 운영기법을 위한 운영분석방법 등은 표 14와 같다.

19) 댐 설계기준의 변천

댐 설계기준은 1979년 하천시설기준(댐편)으로 처음 제정된 이후 1983년, 1993년, 2001년, 2005년 그리고 2011년까지 여러 차례 개정을 통하여 재해, 이상기후 등의 대비와 환경보전을 위한 항목들이 수정·보완되어 왔다. 특히 2011년 개정은 기준이 현행 각종 법령 및 지침과 부합되도록 하면서 최근 진보된 댐 설계기술을 반영하여 선진 외국기술과 어깨를 나란히 하고 시설물 생애주기 고려, 환경적으로 건전한 댐 공사를 위한 재료와 장비 등에 대한 기술사항 정리, 내진 설계기준 강화 등의 기술수준 및 안전성 향상을 도모하였다.

하지만 국내·외 관련 기준이나 지침을 충분하게 검토·분석하고 비교하여 국내·외적으로 통용이 되는 개정이 아쉬운 실정으로 '댐 시설 설계기준 최적화 마스터플랜 수립'(한국수자원공사, 2014년 11월)의 연구를 통하여 현행 댐 설계기준을 분석하고 국내·외 설계기준과 비교 검토하여 국내·외적으로 최신 기술과 표준기술을 적용한 댐 설계기준 개정을 위한 방향을 제시하였다.

댐 설계기준은 2011년 5차 개정 이후 2016년 6월 국가건설기준 코드체계화를 통하여 각각 운영되던 건설기술기준들을 통폐합하여 기준 간 중복·상충 부분을 정비하고 개정이 용이하도록 단일 코드체계로 전면 통합 전환 개편하였다. 2019년에는 신기술 도입과 기술융합 축조기술 개발공법 추가 등으로 하드필(Hardfill)댐 설계기준 제정과 댐 유수전환 및 필댐 설계기준의 개정, 「지진·화산재해대책법」에 따른 '시설별 내진설계기준'의 일관성 유지를 위하여 행정안전부 지침에 따라 댐 내진설계 기준의 부분 개정이 이루어졌다.

물관리일원화(2018년) 이후 기존 환경부 소관 댐과 국토교통부 소관 댐의 관리주체가 환경부로 통합되었다. 그동안 환경부에서 「수도법」에 근거하여 농어촌 및 도서지역의 상습적인 용수공급 제한지역의 식수공급을 위해 건설하고 지자체가 관리하는 지방상수도 전용댐의 경우 별도의 설계기준이 없어 '댐 설계기준' 또는 '농업생산기반시설 설계기준'을 준용하여 설계하는 등 일관성이 낮으므로 불명확한 기준 적용에 따른 건설 및 운영관리의 혼란을 예방하기 위하여 국내 여건을 고려하여 '댐 설계기준 일원화'를 추진하였다.

2022년 댐 설계기준 제·개정은 변화된 수자원계획 및 관리환경에 부합하는 설계기준 제시를 위하여 효율성과 합리성을 제고하여 댐의 안정성과 관련된 기준들을 과학화, 정밀화하여 정량적으로 현 댐 코드 및 댐 설계기준 보완이 필요하며, 댐 패러다임이 건설에서 유지관리로 변화함에 따라 기존 댐의 효율적인 유지관리 및 안정적인 운영을 위한 댐 설계기준을 보완하였다.

표 15. 댐 설계기준 변천

제·개정 년도	주요내용	비고
1979	• 댐 설계기준 제정	하천시설기준 댐편 제정
1982	• 내용 대폭 보완 • 하천관리상 필요한 원칙과 댐의 구조기준 마련	하천시설기준 댐편 1차 개정
1993	• 조사 분석한 사항들을 추가 보완하여 '댐 설계기준'으로 대폭적인 개정 • 발전된 댐 설계기법 및 기술과 우리나라의 수문 특성을 고려	댐 설계기준 2차 개정
2001	• 많은 댐 설계기술을 대폭 반영한 설계편을 중점적으로 보강 • 설계기준의 취지에 맞지 않는 내용을 과감히 정비 • 환경문제에 대응할 수 있도록 환경친화적인 개념을 추가 • 댐과 관련된 내진설계를 별도의 장으로 구성	댐 설계기준 3차 개정
2005	• 2000년 이후 발생한 태풍 및 집중호우의 피해를 감안한 댐 설계기준 강화 • 필댐의 여유고 산정과 관련된 부분을 세심하게 수정하여 이상홍수 시에도 충분한 여유를 확보 • 실제 설계 시에 최대한의 안정성을 도모	댐 설계기준 4차 개정
2011	• 최근 건설기술 반영과 기후변화 및 녹색성장 대비 설계기준 제시 • 신기술·신공법, 건설 시 단계별 환경 배려사항, 부속수리 구조물 추가 • 댐 설계기준과 해설이 혼용되어 있어 기준서와 해설서 분리 작성	댐 설계기준 5차 개정
2016	• 국가 건설기준 코드체계 전환에 따라 코드화로 통합 정비함(KDS 54 00 00)	댐설 계기준 6차 전면개정
2019	• 내진설계기준 공통적용사항 제정에 따른 개정 • 기술융합 축조기술 개발공법 추가 • 선진기술 도입과 기술융합 축조기술 개발공법 추가 • 하드필댐 설계기준 제정	댐 설계기준 7차 개정
2022	• 댐 패러다임 변화를 고려한 체계적인 댐 설계기준 제시 • 기 수행된 연구 성과를 반영한 설계기준 개정 • 지방상수도 전용댐 설계기준을 반영한 댐 설계기준 일원화 방안 수립 → 소규모댐 설계기준 제정 • 댐 시설물의 장수명화를 위한 설계기준 반영→ 댐 유지관리 설계기준 제정	댐 설계기준 8차 개정

5. 용수전용댐

1) 운문댐

댐 형식은 지형 및 기초지질 조건과 부근에서 구하기 용이한 재료를 이용해 중심코어형석괴댐으로, 여수로 형식은 본댐 형식과 지형 및 지질 조건을 고려해 유지관리나 경제성 측면에서 유리한 측구식 여수로로 계획하였다.

이 사업은 1985년 12월 착공되었으나 댐 수몰지의 용지보상 문제로 민원이 발생하여 일관성 있는 시공을 할 수 없었을 뿐만 아니라 민원 관철을 위해 주민들이 공사를 저지하는 바람에 공사가 중단되는 경우가 많았다. 가배수터널을 1989년 8월에 완공하였으나, 가물막이는 1990년 11월에서야 기초굴착과 축조를 시작했으며 그나마도 수몰민의 작업 방해로 중단되는 우여곡절을 겪었다. 결국 1991년 4월에 재착공했지만 우기와 겹쳐 1991년 12월에 축조를 완료하였다. 본댐 기초굴착은 1990년 11월에 착수해 하상부 기초굴착을 1991년 11월에 완료하고, 기초처리를 1992년 6월에 완료함과 동시에 본댐 축조에 착수해 1993년 6월에 완공하였다.

운문댐은 1993년 10월 20일에 담수를 시작해 1998년 4월 3일에 최초로 상시만수위(EL.150.0m)에 도달한 이후 댐마루 3개소에서 함몰과 많은 누수량이 발생하였다. 기록에 의하면 1998년 4월 22일에 여수로 텅윙(Tongue wing)부 Sta. No.2 지점에서 함몰이 발견되었고, 여수로 접합부 하류 사면 립랩 존(Riprap zone) 지반의 침하가 관찰되었다. 1998년 6월 26일에는 댐마루 Sta. No.12 지점 하류 어깨부에 직경 1.7m, 깊이 0.7m의 함몰이 발생하였으며, 1998년 10월 15일에는 댐마루 Sta. No.10 지점 중앙부에 직경 1.2m, 깊이 2.5m의 원형 함몰이 발생하였다. 그러나 누수량 증가는 관찰되지 않았으며 누수되는 물도 흙탕물이 아닌 맑은 물 상태였다.

1999년 7월부터 2000년 4월까지 정밀안전진단을 실시한 결과, 댐체 안전성을 저해하는 가장 큰 요인은 부적절한 코어재료로 인한 코어재의 손상 등인 것으로 분석되었다. 후속조치로 함몰 부위를 포함해 취약구간으로 추정되는 댐 중앙 80m 구간에 컴팩션그라우팅공법에 의한 1차 보수공사를 시행하니 보수 이전에 비해 침투수량이 다량 감소해 차수효과를 발휘하는 것으로 평가받았다.

그러나 2003년 4월에 한국대댐회의 '용수댐 정밀조사 및 진단·평가 연구보고서'에서 보수·보강이 필요한 것으로 검토되었다. 이에 미국대댐회의 댐 전문가 왈츠(Walz)를 비롯해 국내 댐 전문가들의 자문을 받아 다이어프램 월(Diaphragm wall)과 상류 사면 라이너(Liner)공법 등 보수·보강공법을 검토했는데, 문제구간에서 공벽 유지가 어렵고 제체 내부의 침식 가능성 등이 있어 침투그라우팅이 추천되었다. 이에 따라 댐체의 영구적인 안정성 확보를 위해 댐 심벽의 전 구간에 걸쳐 2열로 총 404공을 시공하였다.

이후 충남대학교에 의뢰해 '운문댐 보수공사 시공기술 및 시공성 연구(2004년 4월)'를 시행하여 보수효과를 분석하였다. 전기비저항탐사 결과, 전반적으로 보수 전과 비교했을 때 댐마루 하류에서 수평변화가 적을 뿐만 아니라 하류 방향으로 갈수록 전기비저항값이 상대적으로 높게 나타나 댐의 안전성이 증가한 것으로 나타났다. 또한 저수지 수위 EL.147.0m의 경우 1차 보수 후 침투수량이 640m³/일이던 것이 2차 보수 후에는 4.1m³/일로 감소해 98% 이상 감소한 것으로 나타났다. 이는 침투그라우팅에 의한 차수효과가 우수한 것을 입증하는 것으로, 장기적인 댐의 유지관리를 위하여 지속적인 측정과 분석이 필요하다는 제안이 제기되었다.

2) 사연댐

댐 형식은 콘크리트댐, 흙댐, 토석댐의 세 종류를 비교 검토한 결과 댐 축조용 자원(사력, 토석)이 풍부하고 공사로 인한 발생 자재(여수로 굴착암) 유용이 가능해 공사비 절감을 기대할 수 있는 점을 고려하여 우리나라에서 최초로 토석댐을 시도하기로 결정하였다. 설계 당시 구조물의 안전성과 경제성을 감안해 댐 지점 부근의 지질조사와 가용 토석재료의 기술적인 판단 및 필댐 축조 가능성의 검토를 위해 미국의 데임즈 앤 무어(Dames & Moore)사와 공동조사를 수행하였다. 그 결과 댐 기초 및 부근의 토석재료로 필댐의 축조가 가능하다는 결론을 얻었다.

여수로는 문비가 없는 폭 60m의 자연월류식으로 댐 중심선에서 상류측 130m 거리의 좌안측 산정을 굴착해 축조하는 것으로 하였다. 유입부는 하천의 유심 방향과 대략 직각을 이루고 방류부는 기존 하천과 50°의 방향으로 만나 하류 1,100m 거리의 대곡천 본류와 합류하게 하였다. 일류부는 계획만수위에서 홍수조절능력을 감안한 200년빈도 확률홍수량을 배제할 수 있도록 설치하였다.

또 하나의 특기사항은 당시로서는 생각하기 어려웠던 비상여수로를 설치했다는 점이다. 최근의 치수능력증대사업과는 달리 이상홍수 유입 시 퓨즈플러그(Fuge plug)형식의 비상여수로로 월류시키는 시설을 염두에 둔 것이다. 이 비상여수로는 1,000년빈도 확률홍수량에 대비해 본 여수로 유입부 좌안에 별도로 설치하였다. 또한 직경 6m, 길이 269.5m의 배수터널과 직경 3m, 길이 51.1m의 취수터널을 설치하였으며 가물막이의 높이는 10년빈도 확률홍수량에도 안전하도록 결정하였다.

토석댐 공사는 국내 최초로 시도하여 성공적으로 완성되었다. 아울러 장차 소양강댐 등 기타 수자원 개발 사업에 기술 이전을 하기 위해 1963년 8월 일본공영주식회사(NK)와 용역계약을 체결해 각 분야 전문기술자 30명이 내한하여 공사를 담당하게 하였으며 토석제 시공에 필요한 시험기구를 구입, 정비하였다. 이로써 사연댐은 100천m³/일의 공업용수를 공장지대로 공급하며 태화강 하류의 홍수조절효과에 지대한 영향을 끼치게 되었다.

사연댐 건설(1965년 12월) 이후 1971년 12월 청동기시대 작품으로 추정되는 반구대 암각화(국보 제285호, 1995년 6월)가 발견되었다. 반구대 암각화에는 암벽에 고래 등 288개의 동물그림 등이 각인되어 있었는데, 댐 수위에 따라 노출과 침수가 반복되어 훼손이 가속화되자 보존방안 마련이 시급해졌다.

울산시는 2010년 6월 대체수원 확보를 전제로 사연댐 수문 설치에 동의하면서, 댐 수위 조절 시 생활용수 감소량(30천m³/일)과 2020년 기준 부족량(90천m³/일)의 확보를 요구하였다. 이에 국토부에서는 대암댐을 생활용수 전용댐으로 전환(50천m³/일)하고 나머지 부족량은 대구시 취수원인 운문댐을 활용하는 방안을 마련하였다. 그러나 선행사업인 경북·대구권사업 예비타당성조사 결과, 사업타당성을 확보하지 못한 것으로 결론이 나며 운문댐 물의 울산지역 공급을 추진할 수 없게 되었다. 이에 따라 문화재청은 세계문화유산 등재 및 시급한 보존을 위해 우선 댐 운영수위를 낮추고 대체수원은 후에 별도 대안을 마련하자고 제의하였다. 현재도 이에 대한 방안은 관계기관의 협의가 진행 중에 있다.

3) 어승생댐

제주도 지역주민들은 근대적인 상수도시설이 보급되기 이전에는 마을 대부분이 용천수가 솟아나는 해안가를 따라 부녀자들이 물허벅으로 물을 길어와 사용했고, 용천수가 없는 중산간 지역에서는 냇가의 물이나 들판에 고여 있는 물, 혹은 처마 밑에 받쳐둔 항아리의 빗물을 이용하였다.

1964년 제주도의 심한 가뭄으로 제주시도 격일제 급수를 실시했고 급수시간도 하루 2~3시간으로 제한하였다. 이에 따라 건설부는 1965년 제주도의 심각한 급수난을 해결하기 위해 고지대의 이용 가능한 산정부(山頂部) 용천수원을 조사, 파악해 개발·이용계획을 수립하는 '제주도 고산지대 수원 이용계획 조사' 용역을 통해 어승생 및 99곡 수원을 이용해 해안 저지대의 상수도와 농업용수를 공급하고 수력발전을 통해 전력생산을 하는 방안으로 댐수로식과 유입식 2가지 방안을 제시하였다.

어승생수원 개발사업은 1967년 4월에 착공되었으며 2차례에 걸친 저수지 바닥 함몰사고로 공사가 지연되어 1971년 12월에 준공해 총 공사기간 5년이 소요되었다.

저수지 누수 방지에 대한 설계 보완도 2차례나 진행되었다. 한국과학기술연구소는 1968년 저수지 누수방지공법에 관한 기술연구를 수행해 댐 차수는 아스팔트판넬로 처리하고 바닥은 점토로 차수하며 사면차수는 아스팔트판넬로 차수하는 방법을 제시하였다. 또한 국립건설연구소에서는 1969년 저수지 누수방지공법 연구를 진행하여 저수지 내 원지반 25개소 오거보링(Auger boring)을 통해 투수시험, 지내력조사를 실시하고 바닥에 1.5m 이상 점토처리하기로 결정하였다.

모든 공사가 예정대로 진행되어 1970년 8월 23일부터 저수지에 물을 채우기 시작해 8월 29일 저수지에 물이 가득 채워졌으나 다음날인 8월 30일 저수지에 채웠던 물이 새는 누수사고가 발생하였다. 8월 31일에 저수지 물을 완전히 빼낸 후 확인해보니 저수지 댐 우안 쪽 바닥에 구경 3.8m, 깊이 3.5m 크기의 함몰이 생겨있었다. 현지조사를 실시한 결과, 저수지 바닥의 지하수 유입에 따른 용출로 점토층 하류 소류 때문에 유하 함몰이 생긴 것으로 밝혀졌다.

이에 따라 함몰지점에 맹암거를 설치하는 등의 복구를 1970년 10월 27일에 완료하고 저수지에 다시 물을 채우기 시작해 11월 5일까지 저수하였다. 그러나 다음날인 11월 6일 저수지 물이 또다시 새는 2차 누수사고가 발생하였다. 저수지의 물을 완전히 배수시켜 확인한 결과, 또다시 저수지 서측에 직경 2.5~3.5m, 깊이 1.4m의 타원형 함몰이 생겼으며, 함몰지점을 통해 누수된 물은 저수지 하류 270m 떨어진 지점의 화산암층 틈을 통해 1일 3만m³ 이상 용출되었다.

이에 따라 국내 전문가와 일본, 미국 등 해외 전문가의 의견 청취 및 현지답사 후 그라우팅공법으로는 어렵다는 의견을 제시하였다. 대책위원회에서는 지질조사(13개소, 288m 시추) 결과에 따라 다음과 같은 4가지 복구방안을 제시하였다.

- 제1안: 현지 저수지 표면에 부틸 고무 (Butyl rubber) 및 PVC 시트(Sheet)로 표면차수
- 제2안: 댐 전면의 기반까지 차수막 (Curtain grouting) 설치
- 제3안: 제1안 + 제2안
- 제4안: 댐 전면과 저수지 주변에 차수막

대책반은 어승생 저수지 건설현장에 상주하면서 위의 4가지 복구방안에 대한 검토를 실시해 그라우팅공법은 사실상 어렵다는 결론을 내리고, 차수벽(Cut-off wall)을 설치하거나 비닐 등으로 차수하는 방안으로 압축시켰다.

1971년 5월 저수지 복구공사 계약을 체결하고, 공사

감독으로 건설부는 기술지도를, 일본공영(Nippon Koei)은 기술지원을, 제주도는 현지감독을 각각 맡았다. 지반 보강을 위해 옥석콘크리트 및 그라우팅을 추가로 실시하고 지하수 처리용 유공관을 설치했으며, 차수용 부틸 고무(Butyl rubble)를 걸프씰(Gulf-seal)로 바꾸도록 설계를 변경하여 복구공사를 마무리하였다. 1971년 12월 13일 10만m³의 물을 저수지에 채워 3일간의 누수시험을 통해 더 이상 누수가 발생하지 않자, 1971년 12월 17일 5년에 걸친 어승생저수지 건설공사를 마무리하였다.

6. 수력발전댐

1) 화천수력(화천댐)

일제강점기 조선총독부의 수력조사 결과 북한강수계에는 화천, 금화, 춘천, 청평 등 4개의 수력지점에 예상 발전출력은 197,920kW로 추정되었다. 이는 당시 남한지역에서 유일한 대전원(大電源)이었으며 이 가운데 제1기 계획으로 1939년 1월 화천(81,000kW), 청평(39,600kW) 등 2개 지점에 댐 건설을 동시 착공해 축조를 시작하였다. 화천에는 높이 82m, 부피 817,000m³의 콘크리트중력댐을 축조해 출력 81,000kW의 발전소를 건설하고, 청평에는 높이 30m, 부피 234,000m³의 콘크리트중력댐을 축조해 출력 39,000kW의 발전소를 건설한다는 계획이었다.

그러나 공사 진행 중 중일전쟁의 심화와 뒤따라 터진 태평양전쟁으로 기자재난이 극심해지고 건설단가가 오르면서 공기가 지연되는 어려움을 겪었으며 1945년 광복을 맞았다. 당시의 화천발전소 출력은 1, 2호기 준공으로 54,000kW에 그쳤고 3호기는 약 30% 정도 자재가 반입되어 설치공사를 하는 도중에, 4호기는 기초공사만 완료하고 미착수된 상태였다.

1950년 6·25동란으로 국내 전역에 걸쳐 발전시설 약 40%, 송전시설 약 20%, 배전시설 약 60%가 피해를 입었다. 1950년 8월 남한 전체의 평균출력은 11,333kW로 6·25전쟁 전에 비해 15%에 불과해 전력사상 최악의 전력난을 겪었다. 1951년 8월 미8군의 원조와 국군의 협조로 1호기 발전기 복구공사를 시작한 뒤 1952년 11월 공사를 무사히 마쳤다. 2호기 복구공사는 1953년 5월부터 본격화되었으나 휴전 직전 2차례에 걸친 공산군의 대공세로 공사가 일시 중단되기도 하였다. 1954년 7월 시운전에 성공했으며 6·25동란 이후 수많은 인명을 희생한 끝에 수복한 54,000kW의 화천수력을 통해 남한 평균발전량의 50%를 공급했다는 사실을 볼 때 화천수력이 지니는 가치를 짐작할 수 있다.

화천 3호기 증설공사는 1955년 7월 FOA 원조자금으로 착공해 같은 해 11월에 준공하였으며 화천 4호기 증설공사는 1966년 긴급전력대책의 일환으로 7월에 착수해 1968년 6월 상업운전을 시작했다. 4호기 준공과 함께 발전소의 가능출력은 108,000kW, 연발전량은 32GWh로 증가되었다.

화천댐 비상방류구 설치공사는 1987년 2월 28일 북한의 금강산댐 건설에 대응하기 위한 평화의댐 건설공사가 화천댐 상류에서 착공됨에 따라 댐 기초공사를 위해 수위를 EL.157m 이하까지 낮추기 위해 시행되었다. 이를 위해 기존 댐체에 5×5×30m(터널 하단부 표고 EL.150m 지점)의 수정마제형 터널 5개소 설치를 계획하였으며 이와 함께 댐 하류 500m 지점에 방류구 유출 시 낙하점 손상 방지를 위해 길이 275m, 높이 15m의 락필 하류조정언을 축조하였다.

평화의댐 건설 1단계 축조 후 1989년 3월 23일 화천댐 비상방류구 임시폐쇄를 결정하고 같은 해 7월까지 임시 가물막이로 폐쇄를 완료한 후 담수해 운영했으나, 철구조물 부식과 댐 본체를 현 상태로 방치할 경우 안전상의 문제가 우려되는 상황에 부딪혔다. 그러나 비상방류구 원형복구(폐쇄)보다 이를 활용해 수도권의 치수안전도를 높이고 용수공급능력을 증대시키는 것이 바람직할 것으로 판단되었다. 이에 따라 한전은 정부와 협의해 국고보조로 5개의 영구적인 수문 설비를 설치해 120백만m³의 용수공급 증대와 190백만m³의 홍수조절능력 등 신규 댐 건설 대체효과를 거두었다. 이 공사는 국내 최초의 기존 댐 본체를 굴착한 배수터널에 수문을 설치하는 공사로 2001년 12월부터 2003년 12월까지 시행하였다.

2) 괴산수력(괴산댐)

괴산댐 건설공사는 6·25전쟁으로 전력시설 대부분이 파괴되어 기존 전력시설의 복구와 신규 발전소 건설이 필요한 상황에서 시작되었다. 당시 전원개발 여건상 대용량 발전소의 건설은 어려운 재정상황과 장기간의 공사기간이 소요되는 점 등으로 현실적인 대안이 아니었으므로 소계곡에 수력발전소를 건설해 전원(電源)을 확보하고 국내 전원의 분산(分散)과 농촌 전화(電化) 등을 도모하기 위한 대책으로 1951년 9월경에 소계곡 전원 개발이 계획되었다.

이에 따라 소계곡 발전소 건설을 위하여 괴산댐 지점을 포함하여 충남북, 경남북 등 10개 지점에 대한 조사를 실시한 결과 지형, 지질, 골재 상황, 물자 수송을 위한 철도와의 거리, 송전선의 설치 여건 등에서 유리한 조건을 갖춘 보성강, 청양, 괴산 등 3개 지점이 선택되었으나 괴산지점에서만 실시하게 되었다. 괴산댐은 남한강수계에서 광복 이후 처음으로 건설하는 댐식 수력발전소이자 우리 손으로 만들어진 최초의 대형 댐이었다.

충북 괴산군 칠성면 사은리에서 남한강 지류 달천을 횡단해 높이 28m, 길이 171m로 건설되었다. 댐 기초공사를 하기 위한 물막이는 당초 콘크리트 물막이로 계획하였다. 그러나 하류의 평수위 수심이 약 80cm 정도에 불과하고 하상의 모래퇴적층이 80cm 정도여서 공사비 절감과 공기 단축을 위해 원래 설계를 변경해 흙물막이를 실시하였다. 물막이 규모는 마루너비 2m, 밑너비 4.5m, 높이 3m로 내외 측면을 토사로 이중으로 에워싸고 중심부에 진흙을 다져넣으며 기초부가 암반에 도달하도록 사력층을 파낸 뒤 공사를 실시하였다. 다행히 기초작업 기간 중에 물막이둑의 파괴 유실 등을 초래할 만한 대홍수가 발생하지 않았다.

콘크리트는 댐 중심선 방향으로 14m 간격에 시공 접속부를 설치하였는데, 접속부 하부에 댐 중심선을 따라 동판을 삽입하고 상부에는 댐 중심선에서 0.8m 하류 위치에 동판을 삽입하였다. 콘크리트는 접속부를 1구획으로 각 블록을 분할해 전체를 12블록으로 나누어 타설하였다. 1회 타설 시 높이를 1.5m씩으로 하여 콘크리트 타설 2주 후 다음 단의 거푸집을 세우고 상부표면 치핑을 했는데, 적어도 4주가 경과한 후에 다음 단의 타설을 실시하였다. 거푸집은 높이 1.5m, 너비 1.75m의 판넬을 사용하였다. 특기할 만한 일로 예년이면 외기가 영하 5도만 떨어져도 결빙기 휴업에 들어가곤 했으나 1956년 말에는 보통 때보다 보기 드문 혹한이었음에도 불구하고 공기 단축을 위해 댐, 교각 등 타설 장소에 방한장치를 실시하고 배치플랜트의 방한시설, 골재

의 보온장치 등을 마련하여 영하 13도까지 작업을 계속하였다.

괴산댐 지점의 지형은 양 언덕이 좁게 맞서 있어 홍수 때에는 급격히 수위가 높아진다. 이러한 특성 때문에 공사 준공 이후에도 홍수피해가 발생하였는데, 특히 1980년 7월 22일에는 댐마루를 2.5m 월류해 발전소 등 부속시설에 막대한 피해를 입혔다.

한편 괴산댐은 1999년, 2004년, 2009년 3차례 정밀안전진단 결과 가능최대홍수(PMF) 시의 수문학적 안정성 부족으로 D등급 판정을 받았으며, 이에 따라 2011년 4월에 댐체 보강공사를 위한 기본계획을 수립하고 댐체 월류부의 하류사면은 기존의 1:0.94 경사에서 1:1.70 사면으로, 비월류부는 1:1.30~1.50사면으로 콘크리트단면을 확대 보강하는 방안을 제시하였다. 2012년 5월 보강공사에 착공해 2013년 5월 준공하였으며 보강공사에 따라 그 해에 시행한 제4차 정밀안전진단에서는 안전등급이 C등급으로 상향되었다.

3) 춘천수력(춘천댐)

춘천댐 건설은 1953년 11월 당시의 긴박한 전력사정을 타개하기 위해 전원개발위원회(위원장: 상공부장관 / 위원: 내무 및 경제 각부 차관, 전업 3사 사장 및 해당 분야 권위자)를 설치하고 새로운 전원개발계획을 마련해 수력조사사업이 활기를 띠면서 시작되었다.

이 위원회에서는 제1차 전원개발계획으로 댐 높이 35m, 발전출력 30,000kW의 춘천댐 건설 계획을 수립하였다. 이후 1954년 5월부터 1956년 11월까지 3년간 충주를 비롯한 한강수계의 8개 지점과 낙동강수계의 합천(陜川) 수력지점 등에 대해 세부조사가 실시되었다. 이 조사에서는 장래의 전력수요를 감안해 과거의 계획에 대폭적인 수정이 가해져 춘천댐은 댐 높이 36m, 발전력 29,000kW로 변경되었다. 또한 수력이 기저부하를 부담하던 것을 점차 첨두부하 부담으로 전환하고 이미 설정된 상시만수위를 가능한 한 올려 설비용량을 변경하였다.

조사 결과는 1956년 12월 한미합동전력위원회의 검토과제로 상정되어 춘천수력지점의 기술 및 경제적 재검토를 실시하는 방향으로 결정되었다. 이후 1958년 ICA자금으로 미국 기술용역회사인 Smith Hinchman and Grills Association Inc.가 실시한 조사에서도 개발 규모와 경제적 타당성이 재확인되어 댐 높이 40m, 길이 453m(우안 콘크리트댐 384m, 좌안 콘크리트코어흙댐 69m), 상시만수위 EL.103m, 발전설비용량은 57,600kW 연간 145백만kWh의 전력을 생산해 하류의 기설 발전소의 발전량 증가를 가져왔다.

1962년에 새로 발족된 건설부에서는 제1차 경제개발5개년계획에 포함된 국토건설사업을 전담하였다. 이에 따라 연차계획을 수립해 각 수력지점 조사를 광범위하게 실시하였다. 이러한 사업을 수행하려면 정부부처에 소속된 기술진만으로는 감당하기 어려워 국내 기술용역업체가 구성되어 조사를 실시하였다. 이는 본격적으로 민간 기술용역활동이 건설부문에 등장하는 계기가 되었다. 그 결과 이전까지의 국내 기술진에 의해 작성된 답사, 도상계획 정도의 자료를 토대로 용역업체가 기본계획을 작성하는 단계에 이르렀고, 각 지점별로 별개의 조사보고서가 나오게 되었다.

이중 비교적 조건이 양호한 춘천댐이 제1차 경제개발 5개년계획에 포함되어 1961년 9월 착공된 이후 1965년 2월에 준공되었다. 춘천댐은 우리나라 기술진이 최초로 참여한 댐 축조공사로서 그동안 단절되었던 한·일관계 정상화로 수력댐 분야의 경험이

많은 일본 기술진의 협조를 얻을 수 있었다. 1961년 12월 일본공영(NK, Nippon Koei)과 역무계약을 체결해 설계서 작성과 감독에 관한 조언을 받아 사업을 추진하였다.

춘천댐 건설은 그 시급성으로 조사, 설계와 공사 시공을 병행 실시하였다. 한국전력(주)은 1962년 2월 NK와 계약을 체결해 댐, 여수로, 수문설비, 발전소 하부구조, 옥외변전소 등 주요 영구시설물에 대한 세부 설계도와 시방서 작성 등의 기술지원을 받고 시행공정에 따른 부대시설물의 설계를 담당하였다. 또한 전체 설계공정에 대해 건설부장관의 승인을 얻어 시행하였다.

1961년 9월부터 공사에 착공했는데 댐 좌안 쪽 기초지반 표층은 점토질 토사이고 내부는 대부분 부식암으로 이루어진 지대로 이 부분을 콘크리트댐에 접속해 길이 69m의 흙댐을 건설한 복합댐 시공이 춘천댐의 특색이다. 흙댐의 차수존은 심벽콘크리트로 지하 약 25m 깊이까지 타설하는 매스콘크리트였다. 이에 따라 경화열에 의한 피해를 막기 위해 댐 공사 중 유일하게 냉각설비를 설치해 타설하였다.

4) 팔당수력(팔당댐)

팔당수력의 건설은 1962년에 새로 발족된 건설부에서 제1차 경제개발5개년계획에 포함된 국토건설사업의 연차계획을 수립해 각 수력지점 조사를 수행하며 시작되었다. 그러나 이 지점은 낙차가 적고 사용수량 과다 등 애로사항과 수차형(水車型) 선정에 대한 난점이 많았다. 이를 해소하기 위해 프랑스 소프레렉(Sofrelec)사가 팔당수력의 기술 및 경제적 타당성조사를 수행하였으며 1964년 프랑스은행단으로부터 차관 공여를 받은, 큰 프로젝트 개발용으로는 건국 이래 최초의 사례였다.
1965년 소프레렉사와 설계 및 시공 자문 기술용역 계약을 체결하였고 1966년 6월 발전소 건설에 착수해 8년 만인 1973년 12월 준공해 상업운전을 개시하고 1974년 5월에 준공식을 하였다. 팔당수력발전소 착공 이후 정부의 수자원 개발 방향이 이전의 발전 위주 댐 개발을 지양하고 종합개발을 위한 다목적댐 건설로 추진됨에 따라 한강에서 수력전용댐으로는 팔당댐이 마지막을 장식하였다.

팔당수력 지점은 댐 축조에 유리한 지형을 갖추고 있을 뿐만 아니라 상류로부터 오는 유입수가 방대해 상수도와 관개 등 수자원 활용과 하류 평야지대의 홍수 조절에 유리한 조건을 지니고 있다. 또한 서울-강릉 간 국도와 중앙선 철도에 근접해 건설기자재, 시설용 기기 운반 시에 직접 이용할 수 있고, 전력 수요 중심지인 서울과 가깝고 덕소변전소와의 거리도 멀지 않아 생산된 전력을 쉽게 공급할 수 있다는 장점이 있다.

팔당댐은 1973년 준공 당시 설비용량 80MW (20MW×4기), 총 저수용량은 244백만m^3으로 높이 29m, 연장 574m 규모였다. 준공 이후 1980년대 초반에 팔당댐 하류의 하상 정비와 골재 채취 등 한강종합개발사업에 의한 방수위 저하로 낙차가 증가되자 이를 이용하고, 발전 시 진동 발생 등 운전 및 유지관리에 많은 문제점이 발생하여 이에 대한 해결방안으로 용량 증대 개체공사를 시행하면서 설비용량이 120MW(30MW×4기)로 증설되어 현재에 이르고 있다.

팔당수력발전소의 특징은 국내 최초의 저낙차용 대용량 벌브(Bulb)형 수차발전기의 도입이다. 벌브형 수차는 수직형 카플란(Kaplan) 수차의 스파이럴 케이싱(Spiral casing)과 엘보형 흡출관 설치에 과다한 구조물 공사비가 소요되는 단점을 개선하기 위해 1950년대에 미국과 유럽에서 연구되어 프랑스에서 실용화 개발에 성공한 모델이다.

팔당수력발전소와 댐을 축조하기 위한 가물막이 및 기초굴착공사를 4단계로 나뉘어 시행하고 가물막이는 5년빈도 설계홍수량 기준으로 설계하였다. 소프레렉사의 수리모형시험 결과에 따라 가물막이 표고를 EL. 22m로 결정하였고 이때 하상까지의 평균 높이가 18m에 이름에 따라 큰 홍수량과 깊은 수심에 가장 알맞은 강널말뚝을 사용한 셀(Cell)형 특수 가물막이공법을 국내 최초로 도입하였다. 이 가물막이 구조물은 원형 셀을 결합시키고 내부에 자갈 섞인 모래로 충진하였다. 가물막이공사는 하폭이 넓어 4차에 걸쳐 연차적으로 분할 시공하고 기설치된 가물막이 파일과 충진 토사를 재활용하였다.

팔당댐은 홍수 조절기능은 없지만 한강 최하류인 수도 서울의 관문 댐으로 홍수 예보기능을 갖고 피해 예방에 기여하고 있다. 갈수기에는 138m³/s의 책임방류를 실시해 하류지역 관개용수 공급과 하도 유지에 기여하며, 수도권 상수도와 공업용 수원으로서의 기능을 부과해 가치를 더욱 높였다.

5) 강릉수력(도암댐)

강릉 수력발전사업은 대관령 서쪽 송천에 위치한 도암댐 저수지에서 취수하여 동해안으로 유역 변경, 방류함으로써 고낙차를 이용한 수력발전사업이다.

1981년에 수행한 수력지점 예비조사사업은 남한강 상류의 8개 수력지점(도암, 화의, 대화, 평창, 판운, 수주, 도곡, 하동)에 대한 예비조사를 기초로 1981년 말~1982년에 수행한 수력지점 타당성 조사는 3개 지점(도암, 화의, 평창)을 대상으로 지점 간 단독개발과 상호연계개발 가능성에 대한 대안을 검토하였다. 이를 다시 강릉 단독개발 대안과 그 장단점을 비교 검토하여 강릉수력 단독개발안을 확정하기까지의 일련의 기술적, 경제적 타당성을 검토하였다. 이 타당성 조사를 통하여 강릉 단독개발안이 확정되어 실시설계 과업을 1984년 중반부터 착수하게 되었으며 발주처에서는 사업의 중요성을 감안, 타당성 조사와 실시설계 과업에서는 국내 엔지니어링사 책임 하에 해외 선진 엔지니어링사와의 제한적인 기술제휴를 요망, 미국의 하자 엔지니어링(Harza Engineering Company)과 제휴하여 과업을 수행하였다.

이 사업은 주요 시설 제원 또는 형식 등에서 우리나라에서는 최고, 최대, 최초의 기록을 가지고 있다. 발전 총낙차 640m, 도수로 연장 15.65km, 수직수압터널 연장 504m 등 국내 수력발전소에서는 일찍이 없었던 기록이며, 수차형식도 국내 최초로 충동수차인 펠튼(Pelton)수차이다. 또 남한강 상류의 물을 동해안으로 유역 변경하여 방류하는 동해안 최초의 수력발전소인 점도 특색이라 할 수 있으며, 총저수용량 51백만m³, 댐 높이 72m, 댐 길이 300m, 댐 체적 1.49백만m³인 국내 최초의 경사중심코아형 록필댐인것도 특징이라 할 수 있다.

국내에서는 보기 드문 경사중심코어형 록필댐으로 댐 지점 부근에서 축조재를 충분히 구할 수 있었기에 록필댐 형식을 선택했으며, 대관령의 다우(多雨)·저온(低溫)·다설(多雪)의 특수기상조건을 고려해 경사코어형으로 선택하였다. 경사코어형 록필댐은 중심코어형 록필댐에 비해 쉘층과 코어층의 압축성 차이로 발생하는 아칭(Acrhing) 작용을 감소시켜 균열이 발생해도 코어층이 하류측으로 침식되는 것을 줄이기에 유리하다. 또한 중심코어에 비해 코어 수량을 줄일 수 있고, 코어 축조에 앞서 코어재와 석재가 어느 정도 별개의 공정으로 성토작업을 선행할 수 있어 공기 단축에 유리하다.

코어형록필댐에서 코어존은 축조과정에서 기술상의 문제점을 인위적으로 해결할 수 있지만, 기후관계로 발생하는 문제점은 불가항력적인 요소로 댐 축조공사에 가장 큰 변수가 되었다. 당시 시방서에

의하면 강우량이 5mm 이상이거나 저온 상태(밤 0℃ 이하, 낮 10℃ 이하)가 3일 이상 지속되면 공사를 중지하도록 정해져 있었다. 특히 도암댐 현장(평창군 도암면 수하리)은 해발 712m의 고지대로 인근 대관령과 비슷한 기후조건을 갖추어 코어 축조기간 중 일기가 고르지 못하고 작업 중에 비가 오는 등 하루에도 몇 번씩 변하는 변덕스러운 날씨 때문에 코어 축조의 시공 및 품질관리에 어려움이 많았다. 실제로 코어재 축조는 4월 초순부터 11월 하순경까지만 가능하였다. 코어재는 1일 평균 1.5층씩(총층수 350층) 축조했으며, 수량은 1일 평균 70m³씩(총축조량 166,732m³) 축조하였다. 코어재가 축조되어야만 타 공정의 작업이 가능하므로 코어존의 축조작업이 댐 축조 전체 공정을 좌우하는 작업공정이 되었다.

1991년 1월 발전소 가동 이후 1991년 5월 강릉시에서 민원이 제기되어 발전방류수 영향 및 개선대책 공동용역조사 결과에 따른 개선대책협의를 시행하였다. 그 후 환경부 주관 관계기관 회의에서 선택취수구 설치 후 1년간 수질조사를 시행하고 그 결과에 따라 당사자 간에 협의 조치하기로 함에 따라 1995년 5월에 선택취수구 설비공사에 착수해 1998년 6월에 완료하였다.

취수탑의 형식은 안정성과 수문설비의 특성을 고려해 청수층의 변화에 따라 4단계로 선택 취수할 수 있는 정팔각형의 철근콘크리트 구조로 선정했고, 취수구에 이물질이 유입되는 것을 방지하기 위해 고정 제진격자형의 스크린을 설치하였다. 모든 설비는 발전소 측과 댐 측에서 수동 및 원격으로 조작하는 것으로 계획하였으며, 기존 설비와의 상호 연계성을 충분히 고려하여 설계하였다.

그러나 선택취수탑 건설공사를 위해 댐 수위를 하부의 상시배수구를 이용해 낮추는 과정에서 도암호 탁류물질이 정선까지 흘러가면서 하천의 하상 및 상수원을 오염시키는 일이 발생하였다. 이에 따라 1995년 5월과 6월에 3차에 걸친 대책협의를 갖고 정선군 광역상수도 사업비와 주민 숙원사업비를 지원해 민원을 종결시켰다.

이후에도 강릉시 남대천으로 유입되는 발전방류수가 남대천의 수질을 악화시킨다는 강릉시와 시민단체의 발전방류 반대에 부딪혔다. 강릉 시민단체는 1999년 10월 발전방류 금지 가처분 신청을 하고 직간접피해 보상요구 등 지속적으로 민원을 제기하였다. 강릉수력은 2001년 4월 한수원 사장과 강릉시장과의 면담에서 협의체 구성 및 현안민원해결원칙(안) 합의 후 발전을 재개하기로 하였으나, 현재까지도 지자체와의 입장 차이를 좁히지 못한 채 발전 중지 상태로 있다.

6) 양수발전소 상·하부댐

물을 끌어올려 위치에너지(Potentioal energy)화하는 것은 저장수단이 없는 전기에 대한 일종의 에너지 저장장치라 할 수 있다. 특히, 급격히 증가하는 전력수요를 충족하기 위해서는 대용량 화력발전소 또는 원자력 발전소 건설이 불가피하고 이러한 대용량 기저부하용 발전소의 건설은 필연적으로 대용량 첨두 발전설비를 필요로 하며 대용량 양수발전은 기동, 운영의 신속성과 편리성 및 수요량 충족이라는 측면에서 계통운영상에 꼭 필요한 시설인 것이다. 이런 점에서 한국수력원자력은 전력시설의 확충과 함께 양수 발전설비의 건설을 병행해 오고 있다.

우리나라 최초의 양수발전소 건설을 위해 지점 조사부터 추진하였다. 한전은 1969년 6월 상공부에 양수발전소 건설용역 계약허가 추천(일본공영, NK)을 의뢰해 1969년 8월 재무부로부터 기술용역 계약허가를 받았다. 이듬해에 NK의 조사 결과, 한강수계의 의

암·청평·팔당 등 3개 지점, 낙동강수계의 삼랑진지점, 남해도지점 등 양수발전이 개발 가능한 5개 지점을 도출하고 이에 대한 타당성 검토를 하였다.

1974년 3월 정부가 '신장기에너지정책'에 따라 양수 1호기를 1978년에 준공하도록 계획을 수립하면서 전력계통, 지역 수급균형 특성상 경인지역에 건설하는 것이 타당하다는 판단을 내렸다. 이에 따라 이미 검토된 팔당·청평·의암지점 중 기술적인 면에서 가장 유리한 팔당지점을 선정해 1974년에 양수발전소 기본계획을 확정하였다. 검토 내용 중에는 경제적인 면에서 약간 우수한 청평지점(CP-1)에 청평댐 저수지를 이용하는 고낙차양수발전지점(CP-2)도 존재하였으나, 낙차가 400m 이상으로 고낙차 가역펌프기계 제작 경험이 없어 당장 개발이 불가능한 것으로 결론 내렸다. 그러나 그 후 양수발전기계 제작기술의 발전으로 500~600m 정도의 고낙차 가역펌프기계 개발이 가능해짐에 따라 경제적 타당성이 입증되었다. 이와 함께 타당성조사가 시행되지 않았더라도 입지 및 기술적 제반 여건이 이미 조사된 청평지점(CP-1)보다 유리한 청평지점(CP-2)을 최초의 대규모 양수발전지점으로 최종 선정해 건설기본계획을 변경하였다.

청평 양수지점은 서울 근처로 경인지구의 변전소망으로부터 45km 이내에 위치해 부하중심에 가깝고 청평수력의 기존 댐을 보유하고 있다. 또한 인근에 있는 해발 EL. 580m의 호명산 500m 지점에 상부저수지를 축조할 수 있는 천혜의 분지를 갖추어 단군 이래 최초의 청평양수발전소가 건설되기에 이르렀다.

청평양수 상부저수지 주댐의 형식은 축조재료 구입면에서 경제성이 있는 중앙심벽형 록필댐으로 결정하였으며 상부댐 코어는 저수지 굴착공사 중에 발생하는 토사를 가적치하였다가 사용하였다. 랜덤(Random) 존 및 석재 일부는 저수지에서 굴착하는 암을 유용하고, 대부분 댐 하류 약 500m 지점에 위치한 석산을 개발하여 사용함으로써 록필댐을 축조할 수 있는 조건을 갖추어 저렴한 시공을 할 수 있었다. 댐의 심벽부와 저수지 주변은 기반암까지 굴착하고 커튼그라우트를 실시하여 누수를 방지하였다. 저수지의 유역면적이 매우 작기 때문에 여수로를 별도로 건설하지 않고, 유입수는 순환도로변에 설치될 측구로 배수시키거나 NHWL(상시만수위)보다 0.7m 높은 EL.535.7m까지 저수하도록 설계하였다.

표 16. 국내 양수발전소 현황

구분		운전 운영 중						
		청평	삼랑진	무주	산청	양양	청송	예천
설비용량		400MW (200×2)	600MW (300×2)	600MW (300×2)	700MW (350×2)	1000MW (250×4)	600MW (300×2)	800MW (400×2)
양수방식		일조정식	일조정식	일조정식	일조정식	일조정식	일조정식	일조정식
계획	양수	8시간/일	8시간/일	8시간/일	10시간/일	8시간/일	10시간/일	10시간/일
	발전	6시간/일	6시간/일	6시간/일	8시간/일	6시간/일	8시간/일	8시간/일

삼랑진 양수지점은 C.T.MAIN사의 설계 당시 조사로는 점토 코어재가 거의 없는 것으로 판단하여 콘크리트표면차수벽식(CFRD)으로 설계되었으나 일본공영(NK)이 사전답사해 감리용역 입찰 시 대안으로 중앙코어차수벽식 록필댐을 제시한 것을 다각적으로 검토한 결과 중앙코어 형식이 현재 록필댐의 기본형식으로 가장 흔하게 채택되어 시공사례가 많아 검증이 이루어졌다는 결론을 내렸다. 또한 댐 지점의 유하량이 적어 하부댐 갈수량이 40ℓ/sec 정도이고 상부댐은 거의 없으므로 누수량이 적은 중앙코어형식댐이 바람직하다고 판단해 중앙코어차수벽식 록필댐으로 변경하였다.

무주 양수지점의 상부저수지는 천혜의 자연과 각종 문화재를 자랑하는 적상산 정상 계곡부에 위치해 있다. 댐의 기초는 단층 및 절리가 발달되어 덴탈콘크리트 및 그라우팅작업을 실시해 누수 방지에 심혈을 기울였다.

댐의 심벽부에는 커튼(Curtain), 블랭킷(Blanket) 그라우팅을 단층대에는 부채골 모양의 컨택(Contact) 그라우팅을 실시해 댐 기초 암반의 지지력과 수밀성을 증대시켰다. 저수지 주변 동측 및 남측 안부순환도로변에 길이 약 600m, 심도 최대 55m까지 그라우팅을 실시해 사면으로의 누수를 방지하였다. 저수지의 유역면적이 0.6km²으로 매우 협소하기 때문에 여수로를 별도 설치하지 않고 비상시 가배수터널에 설치한 비상방류설비로 배수시킬 수 있게 설계하였다.

무주양수 상부댐은 준공 이후 누수와 변형으로 2차례에 걸쳐 보강을 시행하였다. 상부댐은 1994년 10월 준공되어 침윤선 형성에 따라 누수량이 점진적으로 증가 추세(연도별 누수량 평균: 1995년 50.1m³/day, 1996년 142.1m³/day, 1997년 182.6m³/day)를 보이다가 1998년 2월 말부터 3월 초의 일상점검 시에 누수측정장치에서 탁도가 동반된 급격한 누수량의 증가가 발견되었다. 이후 안전진단 실시결과 댐체 변위와 이상징후가 발견되어 단기적으로 상시만수위 하향운전(EL. 860.0m→ EL.858.5m)을 시행하였다. 이어 시행한 전자파탐사와 시추조사 결과 댐 우안 코어존과 댐 좌안 기초암반 내에서 누수대 형성이 발견되었다. 보강공사로 1998년 6월부터 7월까지 시멘트, 벤토나이트 용액을 이용한 그라우팅을 우안 39공, 좌안 6공에 대해 시행하였다. 보강공사 후 저수지 수위 변화에 관계없이 누수량이 52m³/day로 일정하고 혼탁성분이 완전히 소멸되어 댐의 안전성이 확보되었다고 판단하였다.

그러나 2007년 이후 또다시 지속적인 누수량 증가(최대 968m³/day) 및 변위 발생으로 댐체의 안정성에 문제가 제기되어 누수의 침투경로 확인과 안정성 확보를 위한 정밀안전진단을 시행하고 보강공사를 한 번 더 시행하였다. 전기비저항탐사, 표면파탐사, 시추조사, 공 내 촬영, 추적자시험 결과 좌우안 측은 수위 변동에 따라 지체시간이 거의 없이 같이 움직이는 경향을 보여 직접적인 유로가 형성되었을 가능성이 큰 것으로 분석되었다. 특히 우안의 경우 기초암반 이하로 저수위가 하강하더라도 공내 수위가 저하되지 않는 것으로 보아 기초암반부와 코어재 접합부에서 유로가 형성된 것으로 결론지었다. 댐체 중앙부는 수위 변동에 따른 공내 수위의 민감도가 상대적으로 낮은 것으로 나타나 직접적인 유로 형성보다 댐체 내부의 코어존을 통한 누수로 판단해 수압에 의한 수압할렬 가능성이 큰 것으로 분석되었다.

이에 따라 보강공사를 시행했는데, 전차(1998년)와 같이 그라우팅 보강방법으로 시공하였다. 2008년 8월부터 11월 까지 1차 57공, 2차 176공 등 총 233공을 코어존과 기초암반 하부에 시행하였다. 2차 보수 후 누수량은 상시만수위에서 약 42m³/day로 나

타났으며 현재까지 수위 변동에도 누수량의 변동이 크지 않은 양호한 상태를 유지하고 있다. 그러나 그라우팅 보강방법이 영구적이지 않기 때문에 현재도 누수량 및 탁도 모니터링과 안전진단을 실시해 지속적으로 관리하고 있다.

산청 양수지점은 1978~1979년에 수행된 양수지점 예비조사에서 진주지점으로 선정되었으나 1991년 타당성조사부터 산청지점으로 바뀌게 되었다. 발주처의 선진 외국 엔지니어링사와의 기술제휴에 의한 과업수행 방침에 따라 국내 엔지니어링사는 타당성조사부터 미국의 Harza Eng.사와의 기술제휴에 의해 시공감리를 포함한 실시설계에 관한 엔지니어링 과업을 수행하였다.

상부저수지는 총 저수용량 6.32백만m^3, 댐 높이 72m, 하부저수지는 총 저수용량 7.13백만m^3, 댐 높이 69m이다. 상부지와 하부지를 연결하는 수로계통은 총 연장 1.68km이며 총 낙차는 429m, 발전시설용량 700MW로 수차설비는 가역식, 단단 프란시스 수차(Francis pump)인 것이 특색이다.

산청양수 상·하부댐은 지금까지의 사력댐 형식이 아닌 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)을 선정하여 최근의 댐 기술이 적용되었다. 이는 1960년대 이후 댐 설계 및 시공기술과 다짐장비 발달로 댐 제체의 안정성과 경제성이 우수해 당시 각국에서 많이 채택하는 형식으로 우리나라는 동복댐에서 최초로 적용하였으며, 양수댐에서는 산청양수가 최초로 채택하였다. 이 댐 형식 적용으로 기존 댐에 비해 건설비를 약 30% 절감하였으며 시공 중 기상영향을 적게 받아 공사기간을 단축함으로써 경제성을 높이는 효과를 거두었다.

1998년 8월 1일 1시간 강우량 100년빈도, 2시간 강우량 200년빈도의 집중호우가 발생하자 가배수로 터널 통수능력 부족으로 가물막이댐이 월류하면서 많은 피해가 발생하였다. 당시 산청양수 건설사무소 옆 자동기상관측설비에 측정된 강우기록은 최대강우강도가 105.5mm/hr로 재현기간 100년에 해당되는 호우였다. 하부댐 상부 유역이 험준한 산악지역이라는 점을 감안하면 이보다 더 큰 강우강도로 비가 내렸을 것으로 추정된다. 이처럼 엄청난 집중호우로 재현기간 25년 홍수 시 첨두유입량 538.5m^3/s와 첨두유출량 434.5m^3/s로 설계된 가배수터널 입구부 수위가 상승해 인접지역의 마루표고 EL.237m로 축조된 가물막이 제체를 월류하여 댐마루 일부가 유실되고 지하발전소와 주위 수로터널 일부가 침수되었다. 또한 지하발전소 침수피해 복구를 위해 총 5대의 배수펌프(50~150HP)로 19일간 배수작업을 하였다. 이 피해는 지구온난화에 의한 기상변화 심화에 따라 가물막이시설의 설계홍수량을 증대해야 할 필요성을 부각시켰다.

양양 양수지점은 지금까지의 국내의 양수지점 중에서는 낙차가 가장 큰 지점(총낙차 819m)으로서 발주처에서는 양수방식을 1단으로 할 것인지 다단 방식으로 할 것인지에 대하여 고심하게 되었다. 총낙차 819m 범위는 1단 또는 2단 양수의 분기점이라 할 수 있고 1단 또는 2단 어느 쪽으로도 개발 가능한 낙차범위에 속한다. 발주처에서도 양양 이후 앞으로 나타날 유사한 낙차의 발전소나 그보다 더 큰 낙차의 발전소에 대비하는 의미에서뿐만 아니라 한국에서는 최초가 될 다단양수에 대한 기술을 확보, 발전시킨다는 관점 등에서 1단보다는 다단 양수방식으로 개발하는 방침을 결정하게 되었다.

발주처에서는 주계약자와 협력할 외국 엔지니어링사의 선정을 주계약자에게 일임하게 됨에 따라 외국 엔지니어링사의 선정에 부심하게 되었다. 국내 엔지니어링사는 과업에 참여하기를 희망한 미국의 Harza, 프랑스의 EDF, 일본의 일본공영(NK), 이태리의 ENEL사 등을 대상으로 검토한 끝에 1단 양수나 기타 수력발전사업에 경험이 풍부한 Harza와 2단 양수에 발군의 경험을 쌓고 있는 EDF를 선정하게 되었고 Harza는 댐 및 수로 터널을 중심으로 하는 토목설비 부분에, EDF는 다단가역 펌프(Pump) 수차를 중심으로 하는 기전설비 부분에 기술지원을 담당하도록 하여 선진국의 신기술 도입 창구로서의 역할을 담당하게 되었다.

양양양수발전소는 지금까지의 국내 양수설비로서는 규모가 가장 큰 1,000MW 이며 국내 최초의 2단 양수시설을 갖추게 되었다. 상부지와 하부지는 총 연장 5.5km의 수로터널로 연결되며 수로터널의 중간지점에 지하발전소가 위치하게 된다. 지하발전소는 연장 1.9km의 진입터널과 모선터널로 지상과 연결되며 진입터널의 입구부에 발전소를 운영하는 본관 건물이 위치한다. 상부지의 총저수용량은 4.93백만m^3, 상부지 댐 높이 95.9m로 상부댐 형식은 당초 콘크리트 중력댐으로 계획하였으나, 상부지 현장의 유수발생량과 경제성을 고려하여 콘크리트 표면차수벽형석괴댐(CFRD)으로 변경 설계해 공사비를 절감하였다. 하부지는 총 저수용량 9,220,000m^3, 댐 높이 53m의 콘크리트 중력식댐이 건설되며 하부댐에는 양양 남대천의 회귀어종인 연어를 보호하기 위하여 국내 최초로 생태계 보호를 위한 댐 내 볼랜드식 어도(Fishway)를 설치하였다.

외국의 대형댐에 설치되어 성공적으로 운영되는 볼랜드식 어도는 상부 풀, 샤프트(Shaft), 하부 풀로 이루어지는데 어류의 유영력에 관계없이 모든 어종이 자유롭게 통행할 수 있도록 운영 조작이 간편한 어도 형식이다. 하천에서 댐 직전까지 계단식 어도를 설치하고 댐체에 상부 저수지와 하부 풀을 연결하는 어도를 설치했는데, 낙차 49.5m로 당시 운영 중인 댐 어도 중 가장 높은 영국의 오린(Orrin)댐 어도(낙차 42m)보다 높아 세계 최대 높이를 기록하고 있다.

청송 양수지점은 인근 예천군과 청송군이 지역경제 활성화를 위해 경쟁적으로 유치한 끝에 사업이 결정되어 국내 최초로 지역과 지자체의 요구에 의해 건설된 양수발전소이다.

청송양수는 낙동강의 최상류부 하천인 길안천 상류에 상부댐이, 용전천 상류에 하부댐이 위치해 있으며 유역면적은 상부지 0.76km^2, 하부지 7.51km^2로 매우 협소한 편이다. 저수지로 유입되는 유량이 극히 적어 기본계획 시에 갈수기 부족수량에 대비하기 위한 추가수량으로 이월용량(Carry-over storage, 700,000m^3)을 하부지에 계획하였다. 연평균 유입량과 10년빈도 갈수년 유입량을 산정한 결과, 댐 준공 후 상·하부댐과 수로터널 내에 물을 채우기 위한 초기담수기간이 각각 47개월, 85개월의 긴 시간이 필요한 것으로 나타났다. 이에 따라 초기담수를 24개월 이내에 완료하기 위해 하부댐을 상부댐보다 1년 먼저 준공하였다. 하부댐 준공 전에 조기담수를 위해 발전소에서 약 4.5km 떨어진 청송 읍내를 흐르는 하류 하천인 용전천에 취수시설을 설치해 송수관로로 양수하여 초기담수용량과 공사용수를 확보하는 계획을 추진하였다. 취수시설 설치과정에서 취수펌프장 하류의 몽리 주민들이 용수 취수로 물 부족현상이 나타나 경작피해가 우려된다는 민원을 제기하여 수차례 공사 중지가 되는 등 많은 어려움을 겪었다.

댐제체 축조 시에는 GPS 다짐관리공법을 도입해 다짐횟수, 다짐속도, 다짐두께, 다짐방향 등을 체계적이고 과학적으로 관리하였다. 특히 청송양수 댐 축조공사 시에는 국내 최초로 커브 엘리먼트(Curb element) 공법을 적용하였다. 기존의 모든 CFRD에서는 콘크리트차수벽을 지지하는 층으로, 흙으로 축조하는 제체 사면을 숏크리트나 린 콘크리트로 보호하였다. 그런데 이 공법은 제체 사면의 경사로 시공이 어렵고, 축조된 제체의 면 고르기 작업과 시

공 후에도 침하작용으로 면 고르기 작업을 다시 해야 하는 등 시간이 많이 소요되는 문제가 있었다. 그러나 커브 엘리먼트 공법은 삼각형 형태의 거푸집에 빈배합콘크리트를 타설해 차수벽 지지층을 형성하고, 제체 축조와 함께 단계별로 시공함으로써 공기 단축과 공사비 절감 등의 효과를 거두었다.

예천 양수지점은 그동안 축적된 양수발전소 설계, 감리의 기술력을 바탕으로 국내 엔지니어링사가 실시설계 및 시공감리 업무를 수행하였으며, 지금까지의 국내 양수설비로서는 단일 호기의 시설용량이 가장 큰 400MW로 건설되었다. 발주처에서는 주계약자와 협력할 외국 엔지니어링사의 선정을 주계약자에게 일임하게 됨에 따라 단위호기 설비용량 400MW 이상의 설계 경험이 있는 외국 엔지니어링사중 과업에 참여키를 희망한 일본의 NK, 미국의 Harza 등을 대상으로 검토한 끝에 일본의 NK가 기술지원을 담당하도록 하여 선진국의 신기술 도입 창구로서의 역할을 담당하게 되었다.

상부지 조성공사 중에 어림산성 문화재 조사에 따른 공사 간섭이 발생하여 공정이 중단되기도 하였다. 이에 따라 어림산성 훼손을 최소화하기 위해 상부댐 댐축을 변경하였으며, 어림산성 간섭구간에 토류벽을 시공해 산성을 보호하고 댐 축조 후에 단절된 산성은 에코브리지 등을 이용해 복원하였다.

상·하부댐 페이스 슬래브콘크리트의 내구성을 향상시키기 위해 블렌디드(Blended) PVA섬유(Poly vinyl alchol fiber) 콘크리트를 적용했다. 블렌디드 PVA섬유는 청송양수에서 사용된 비구조용 PVA섬유에 고탄성 구조용 섬유를 혼합해 콘크리트의 인장응력을 보완하고, 소성수축과 건소수축 균열에 대한 저항성을 증대시켜 콘크리트 내구성을 향상시키는 공법이다.

2010년 8월 상부댐 페이스 슬래브 콘크리트 타설을 완료하고 전면에 불투수존을 축조하기 위해 시공 중에 댐제체 내부의 배수를 위한 스타터 베이 배수공 폐쇄작업을 시작하였다. 배수공 폐쇄 후 이틀만에 댐체 중앙부 약 39m 구간에 137~14mm의 변위가 발생했는데, 이는 제체 내 유입수 상승으로 슬래브에 양압력이 작용한 것으로 추정되었다. 이에 따라 부력에 대한 안전성 검토를 하여 배면에 수위가 상승하더라도 양압력에 대해 안전하도록 배수공을 연장하고 불투수존을 축조하였다. 변위로 인한 성토재 공극을 채우기 위해 그라우팅을 주입하고, 프린스 및 스타터 베이에 앵커와 철근을 설치한 후 콘크리트 보강을 시행하였다. 보강 시 이음부는 동지수판과 PVC, 매스틱 커버(Mastic Cover) 등으로 3단 지수를 시행하였다.

하부댐은 당초 일반적인 콘크리트 표면차수벽형사력댐(CFRD) 형식으로 설계했으나 하부댐 지역에서만 202만m³의 사토량이 발생함에 따라 현장토사를 댐 축조재료로 활용하기 위해 설계개선을 추진하였다. 개선 내용으로는 기존 락존의 석재를 굴착토사로 변경하고 하류면 경사를 1:1.4에서 1:3.0으로

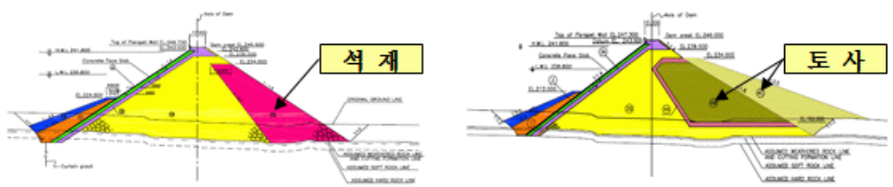


그림 3. 예천양수 하부댐 축조재료 변경(설계 개선)

완화하였다. CFRD 댐에 토사를 축조재료로 활용하는 것은 국내에서 시공사례가 없었지만 미국·호주 등 해외에서는 찾아볼 수 있었다. 또한 설계사, 전력연구원 등과 안전성 검증을 위한 댐 축조재료 시험과 사면 안정, 응력-변형해석을 수행한 결과 불균질 재료 사용에 따른 응력 전이와 침하가 발생하지만 GPS 성토다짐기법을 적용해 철저한 다짐관리를 시행하면 댐 안전성에 문제가 없는 것으로 나타났다. 이와 함께 현장 발생 토사를 활용함으로써 석산 개발 규모를 축소해 공사비를 절감하고 자연훼손 면적을 감소시킬 수 있었다.

7. 농업용댐

1) 안성천 유역 4개 댐

안성천 유역에 설치된 농업용 저수지 중에서 저수용량이 1천만m³ 이상으로 일정량의 홍수조절 용량을 갖춘 것으로 평가되는 저수지는 안성천 상류의 금광저수지 및 고삼저수지, 오산천 상류의 기흥(신갈)저수지, 진위천 상류의 이동저수지이다. 4대 저수지의 유역면적을 합하면 265.3km²로 안성천 유역면적 1,654.7km²의 약 16%에 해당한다.

4대 저수지의 댐은 필댐으로 1960년대와 1970년대 초반에 설치되었으며 기흥(신갈)저수지, 이동저수지, 금광저수지는 여수로에 수문을 설치하는 여수로 구조개선에 의해 저수지의 저수용량을 추가 확보하였다. 고삼저수지의 여수로는 1991년 수해 이후 홍수관리를 위해 수문 일부분을 여수로 표고보다 낮게 설치해 홍수기에 하류하천의 수위를 감안해 사전방류를 할 수 있도록 하였다. 고삼저수지의 수문바닥고는 측구식 여수로 웨어부 마루에서 아래로 2.8m에 있다. 고삼저수지의 수문은 저수용량을 확보하는 것이 아니라 홍수 조절용으로 설치되어 수문을 열 수 없는 상황이 발생하면 월류식 여수로로 과잉수를 방류할 수 있다. 그러나 금광저수지, 이동저수지, 기흥저수지는 수문을 열지 못할 경우 심각한 상황에 처하게 된다.

기존 댐은 여수로에 수문을 신규로 설치해 유효저수용량을 추가로 확보했으나, 기존 저수지의 관리수위와 홍수위 사이의 구역은 농경지로 임대되어 계획 당시의 만수위로 운영됨에 따라 관리수위의 상승 운영이 제한적이다. 대부분의 저수지는 제방에 인근해 하천에 방류할 수 있도록 관개계통을 수립했으나 저수지 계획 시 하류하천 유지를 위한 방류량은 설정하지 않았다. 대부분의 농업용 저수지는 계획 시 하류하천 유지를 위한 환경용수량의 방류량을 설정하지 않았으며, 댐의 유입량은 저수지 내 만수위를 초과하는 경우에만 하류하천에 방류하고 있는 실정이다. 비관개기에는 만수위를 유지하기 위해 저수지를 운영하고, 관개기인 4월 하순부터 관개용수를 공급해 하류하천 건천화의 원인이 되고 있다.

안성천 유역에 있는 4대 농업용 저수지의 홍수저류용량은 금광저수지 약 1.7백만m³, 고삼저수지 약 4.0백만m³, 이동저수지 약 4.2백만m³, 기흥저수지 약 2.8백만m³으로 총 홍수저류용량은 12.8백만m³이다. 한편 4대 농업용 저수지 관리규정에서 2002년부터 여름 집중 강우기간에는 저수율의 70%를 유지하도록 규정해 홍수조절용량이 그만큼 증대되었다.

표 17. 안성천 유역 4개 저수지 개요

항목별 \ 댐		금광	고삼	이동	기흥
저수지	유역면적(km²)	48.30	710	930	530
	만수면적(ha)	160	27.9	326	231
	총저수용량(천m³)	10,590	15,224	17,290	10.728
	유효저수용량(천m³)	10,550	15,144	17,200	10.069
	홍수위(EL.m)	67.7	55.5	46.09	47.3
	만수위(EL.m)	67.0	54.1	45.00	46.2(홍수) 46.5(상시)
	사수위(EL.m)	51.5	42.5	33.80	38.0
댐	형식(필댐)	중심코어	중심코어	중심코어	중심코어
	제고(m) / 제장(m)	21 / 225	17 / 207	18 / 260	14 / 222
물넘이	형식	수문식	수문식, 월류식	수문식	수문식
	폭(m)x연장(m)x연	7.6 x 6.2 x 4	4.0 x 3.0 x 5	6.0 x 4.5 x 5	8.0 x 5.3 x 4
	최대방류량(m²/s)	847	835	725	727
	총폭(m)	-	143.0	-	-
준공연도		1961	1963	1973	1964

2) 덕동댐

덕동댐은 경주관광종합개발사업의 일환으로 1972년 8월 농림부에서 댐과 용수로 및 경지정리 등의 조사 설계를 추진하면서 착수되었다. 1972년 12월에 기본조사보고서가 세계은행에 제출된 후 1973년 3월부터 4월까지 세계은행의 타당성평가를 거쳐 1974년 1월에 차관협정이 체결되었다. 이에 따라 덕동댐 건설사업은 1975년 1월에 착공되어 1977년 12월에 완공되었다.

이 댐은 보문저수지의 수위를 항상 만수위로 유지해 관광에 기여하고 보문지역의 기존 관개구역에 농업용수를, 보문관광단지와 경주시가지에 생활용수와 관광용수를 공급한다. 댐의 총 저수용량은 327만m³, 농업용수 45만m³, 생활용수 132만m³, 관광용수 140만m³, 기타용수 10만m³로 구성되었다.

덕동댐은 경사가 심한 협곡 사이에 있기 때문에 당초에 콘크리트댐을 검토했으나 댐의 불투수성 성토재료와 필터재료가 댐 주변에 풍부하게 매장되어 있어 공사비가 저렴하고 공사기간을 단축할 수 있는 점토코어형사력댐으로 결정하였다.

여수로 시설에 대해 측구식 여수로(Side channel type)는 협곡의 지형경사가 가파르고 시공관리에 어려움이 많아 공사비가 저렴하고 공사기간이 짧게 소요되는 나팔형 여수로 형식(Morning glory type)을 선택하였다. 나팔형 여수로의 직경은 23m, 원주의 높이는 72.2m로 최대홍수량 520m³/s를 방류할 수 있다. 여수로 마루에는 와류를 방지하기 위해 4곳에 십자형 벽을 설치하고, 여수로 수심은 유입되는 흐름을 안정적으로 유지하도록 3.5m로 정하였다. 나팔형 여수로 바닥의 수직 통관에서 공동현상(Cavitation)과 수격작용을 완화하도록 직경 50mm의 배기공(Air vent) 2개를 설치하였다. 여수로 말단의 변위부에 설치된 방수로는 직경 5m, 길이 160m의 마제형(Horse shoes type) 터널로 설치되었다. 방수로 말단부의 45m 구역은 개거로 연결하고 그 하류는 암반이 노출된 지역이어서 플립 버킷(Flip bucket)만 설치하고 수맥의 낙하거리를 증대하여 수격에너지를 감소시킨 후 하천에 유입되도록 만들었다.

덕동댐의 물은 보문통관(댐 하부를 통과하는 취수관)과 불국통관을 통해 급수된다. 보문통관의 물은 산정을 따라 30도 경사지게 설치된 사통을 통해 통관으로 유입된 후 댐을 횡단하는 복통을 통해 방류된다.

3) 영산강 4개 댐

1968년부터 차관도입을 위해 방문한 FAO/IBRD 조사단이 영산강 상류뿐만 아니라 영산강 전체 수계의 수자원을 종합적으로 개발하기 위한 종합개발계획을 수립하며 1972년 3월 '영산강종합개발계획서'가 작성되었다. 또한 영산강농업종합개발사업의 전체 면적이 100,000ha로 규모가 방대하기 때문에 4단계로 구분해 개발할 것을 계획하였다. 제1단계 사업은 상류에 4개 댐을 축조해 25,930ha를 관개하고 서부의 4,070ha를 관개하는 덕호지구를 포함해 30,000ha를 개발한다는 계획으로 추진되었다. 이어 2단계 사업으로 영산강하굿둑 건설사업, 3단계 사업으로 영암과 금호만 간척사업, 4단계 사업으로 무안군 현경면의 농업종합개발사업이 추진되었다.

영산강 4개 댐은 영산강 상류 담양군 용면의 담양댐을 비롯해 지류인 황룡강의 장성댐, 지석천 상류의 나주댐, 무등산 줄기인 고서천의 광주댐으로 구성되었다. 영산강 제1단계 사업은 1972년 2월 차관협정을 체결해 시행한 해외지원사업이었다.

영산강에 설치된 4개 댐의 특징은 다음과 같다.

- 댐의 유역면적이 관개면적에 비해 비교적 작기 때문에 저수지의 유효저수용량은 10년빈도의 한발기준으로 수년간의 강우를 저수지에 담아 두었다가 급수하는 캐리오버 시스템(Carry over system)의 해석방법을 도입하였다. 초기에 만수되는 기간은 3~5년이 걸리는 것으로 분석되었다.
- 기초지반처리는 압밀그라우트(Consolidation grout)와 차수그라우트(Curtain grout) 공법으로 시공했고, 장성댐의 단층구간(Fault sheared zone)은 철근콘크리트 플러그(Plug)로 시공하였다.
- 담양댐·장성댐·나주댐의 취수시설은 수면에서 3m 이내의 표층수만을 취수하는 이중방식(Double chamber type)의 취수탑과 유량조절장치인 콘 밸브(Cone valve)로 구성하였다.

담양댐 지점은 댐의 내측 지반의 풍화대층이 깊어 댐 형식을 경사코어록필댐으로 설계하였으며 댐의 기초지반 굴착과 시공을 건조한 상태에서 시행하기 위해 슬러리 지수벽(Slurry trench, 泥水工) 공법을 사용하였다. 이 공법을 적용한 결과 모래층의 굴착

표 18. 영산강 4개 댐 개요

항목별 \ 댐		담양댐	장성댐	광주댐	나주댐
저수지	유역면적(ha)	6,560	12,280	4,130	10,470
	만수면적(ha)	405	687	186	780
	총저수용량(백만m³)	66.68	89.72	17.37	91.20
	유효저수용량(백만m³)	64.80	85.54	15.00	87.80
	홍수위(EL.m)	123.46	88.95	78.75	65.86
	만수위(EL.m)	121.86	88.95	76.95	65.86
	사수위(EL.m)	88.36	64.45	65.35	42.96
댐	형식(필댐)	경사형코어	중심코어	중심코어	중심코어
	제고(m) / 제장(m)	46 / 305.5	36 / 603	25.5 / 505	31 / 496
물넘이	형식	측구식	수문식	측구식	수문식
	폭(m) / 연장(m)	50 / 430	31.8 / 354	60 / 500	42.5 / 446
	홍수량(m²/s)	546/215	1,040	495/310	972
	수문 형식	-	Radial gate	-	Radial gate
	규모(m)		9.2×7.9×3연		9.5×6.0×4연
취수시설	형식	취수탑	취수탑	사통	취수탑
	높이(m) / 직경(m)	37.0 / 6.0	25 / 6.0	29.0 / -	26.0 / 5.0
	취수량(m²/s)	8.10	13.70	3.10	11.40
공사기간		1973. 8.~ 1976. 10.	1973. 8.~1 976. 10.	1974. 3.~ 1976. 12.	1973. 4. ~ 1976. 9.

면을 수직상태로 유지할 수 있었으나 지표면과 굴착 바닥면의 표고차가 커서 수직굴착면이 붕괴되어 지수효과가 기대한 만큼 만족스럽지는 못하였다.

취수탑은 온수 취수를 위해 이중방식(Double chamber type)으로 구성하고, 취수터널은 충격하중과 수격작용을 견딜 수 있도록 내압터널로 설계하였다. 취수부 말단에는 용수량을 정확하게 조절할 수 있는 콘 밸브를 국내 농업용 댐 중 최초로 설치하였다.

장성댐 지점은 댐의 홍수위를 저수지 상류의 넓은 농경지와 마을, 백양사 등 문화유적지가 침수되지 않도록 설정하였다. 또한 홍수위와 만수위를 같게 하여 수자원 이용을 높이고 여수로는 레이디얼 게이트(Radial gate)로 제어하는 슈트형(Gate controlled chute type)으로 정하였다. 댐은 중심코어형필댐으로 댐의 기초에서 대규모 단층이 발견되어 댐 기초단층대의 누수를 막기 위해 30m 이상의 차수막그라우팅을 실시하고 플러그 콘크리트는 단층구조에 따라 약 6m 두께로 시공하여 단층처리공을 포함한 기초처리공법의 혁신을 꾀하였다. 장성댐의 공식적인 높이는 36m이지만 댐 기초지반의 플러그 콘크리트를 설치한 표고에서의 높이는 43m이다. 취수시설은 담양댐과 같이 온수를 취수하도록 이중방식 취수탑과 콘 밸브를 갖추고 있다.

광주댐 지점은 댐의 우안측 중심선상에 연약지반으로 깊은 이탄층(Peat soil layer)이 확인되어 좌안측 위치를 고정한 채 우안측 댐의 중심선을 하류 쪽으로 약 100m 이동시켜 댐의 중심축을 변경하였다. 댐의 높이는 25.5m로 다른 댐보다 규모가 작기 때문에 물넘이시설은 측구식 물넘이 형식으로 정해 댐의 홍수유입량 495m³/s 중 저류효과를 고려해 310m³/s를 방류하도록 설계하였다. 댐의 규모는 좌안 상류에 1559년(명종 15년)에 지어진 송강 문학의 산실인 식영정 침수를 피하기 위해 현재의 규모로 결정하였다.

나주댐 지점은 축조재료를 부근에서 충분히 공급할 수 있고 양안부가 급경사를 이루므로 기초처리가 쉽고 침하량이 적은 중심코어형필댐을 댐 형식으로 채택하였다. 댐의 기초 터파기 바닥면은 지반보다 매우 낮기 때문에 댐 기초부로 유입되는 지하수를 차단하기가 어려워 댐의 상류 바닥에 슬러리 트렌치를, 댐 중심코어층 양측의 상하류 필터층 바닥에 키 트렌치(Key trench)를 설치하고 필터 층과 중심코어 사이에 높이 1m의 콘크리트벽을 설치해 물길을 유도하여 바닥을 건조 상태로 유지하였다. 댐의 물넘이구조는 972m³/s의 첨두홍수량을 배제하기 위해 슈트형으로 설계하고 4연의 레이디얼 게이트를 설치해 만수위와 홍수위를 같은 수위로 조절하였다. 취수시설은 높이 26m, 직경 5m의 취수탑과 이중방식으로 표층수를 취수해 2,103m의 터널을 포함한 2,551m의 도수로로 11.4m³/s의 유량을 급수하도록 설계하였다.

4) 경천댐

경천댐의 형식은 중심코어형필댐으로 높이 66.4m, 유효저수량은 27,200,000m³로 10년빈도의 한발에 견디도록 설계되었으며 1983년 6월에 착공해 1990년 1월에 준공되었다.

댐의 설계홍수량은 200년빈도의 홍수량을 기준으로 설정되었고, 홍수 조절을 위해 당초에 폭 6m, 높이 5.5m의 레이디얼 게이트(Radial gate) 3연이 설치되었다. 여수로 감세공은 기초 암반이 견고해 플립 버킷(Flip bucket) 구조물로 설치되었다. 또한 여수로 방수로의 원활한 홍수 배제를 위해 2008년부터 2011년까지 비상수문(레이디얼 게이트 3연)이 추가로 설치되었는데, 그 규모는 당초와 같이 폭

6m, 높이 5.5m이다. 이와 함께 비상수문 하류에 당초 방수로와 같은 규모로 방수로를 설치했고 방수로 중간에 횡단교량을 설치하였다.

이 댐은 1982년부터 1983년 초까지 설계되었는데, 이 설계에는 1976년대에 완공된 영산강 4개 댐의 설계와 공사 관리에 종사한 경험이 많은 기술자들이 참여하였으며, 영산강 4개 댐의 실행과정에서 외국의 기술용역단이 전수한 새로운 기술이 반영된 현대적인 시설이다.

한편 경천댐에는 1994년에 설치된 제1소수력발전소와 2010년 7월에 설치된 제2소수력발전소가 운영되고 있다. 제1소수력발전소는 댐의 취수로 말단에 설치된 발전시설(버티컬 카플란형 400kW급 발전기 2대)로 취수로를 통과하는 농업용수를 발전에 이용하는데, 발전유량은 2.52m³/s이고 취수낙차(유효낙차 36.3m)로 연간 2,510,000kWh의 전력을 생산한다. 제2소수력발전소는 댐 하류 6.28km 지점에 설치되어 댐의 방류수를 이용하는 발전시설로, 저낙차 입형프란시스형식으로 700kW 발전용량의 3상교류 유도형 발전기 3기를 갖추어 연간 4,867천kWh의 전력을 생산한다.

5) 동화댐

동화댐은 농업용수 공급을 주된 목적으로 축조한 댐이지만 부수적으로 생활용수의 공급, 하천유지용수의 확보, 소수력발전 및 홍수 조절기능도 함께 담당해 다목적댐의 역할을 하고 있다. 댐은 1987년 12월 착공해 1997년에 준공되었다.

동화댐의 위치는 장수군에 있지만, 생활용수를 남원시 상수도의 수원으로 공급하고 관개용수도 대부분 남원시 농경지로 공급하고 있다. 댐 유역면적의 경우 백운천이 동화댐으로 직접 유입되는 자체 유역면적은 47.0km²이다. 계획된 저수량으로는 3,000ha의 농경지에 안전하게 용수를 공급하기에 어려울 것으로 분석되어, 인근 용림천 수계에 취입보(길이 110.0m, 높이 5.7m) 및 도수터널(직경 1.8m, 길이 555.0m)을 설치해 용림천의 유출량을 10.0m³/s 이내로 동화댐에 유입시키도록 하였다.

동화댐은 존형필댐으로 높이가 최고 70.55m, 만수면적은 약 1.27km², 총 저수량은 3,134.8만m³이다. 홍수기에는 댐의 만수위를 EL.321.6m(겨울철 만수위)로 홍수위 EL. 322.6m보다 1.0m 낮추어 운영함으로써 125.6만m³의 홍수조절용량을 보유하고 있다. 또한 농업용수 및 생활용수의 방류량을 이용해 수력발전을 생산함으로써 수자원의 효율을 극대화시키고 정부의 저탄소 대체에너지 개발정책에 부응하였다.

하천유지용수의 공급은 2001년까지 방류기록이 없으나 2002년부터 환경용수량 개념으로 연간 약 130만m³의 수량을 방류하고 있다. 2003년부터 추진해 2005년 5월에 준공된 수력발전의 유효낙차는 47.5m, 시설용량은 1,000kW이며 연간 기대되는 발전량은 4,119MWh로 평가되었다. 이와 같이 동화댐은 기존 농업용수댐과 비교해 농업용수 공급, 생활용수 공급, 수력발전 생산, 하천유지용수 공급 및 홍수조절의 기능을 수행하는 다목적댐이라고 할 수 있다.

2002년 9월 태풍 '루사'의 영향에 따른 '재해대비 수리시설 설계기준 개정 통보'(2003년 2월)의 일환으로 동화댐은 이상홍수에 대비해 시설보강계획을 수립하였다. 즉 레이디얼 게이트(Radial gate) 권양기 인양능력을 30톤 유압식에서 40톤 드럼식으로 교체하는 공사를 2005년 8월에 착공해 20015년 12월에 준공하였다. 또한 준공 시 필댐 길이 462m에 대해 기시공된 점토상단고인 EL.323.1m에서 3.1m 높여 EL. 326.2m까지 점토중심코어로 보강하고 기존 댐 마루표고인 EL.326.2m로부터 1.2m 높이의 홍수방어벽을 설치하는 방안도 제시되었다.

1992년 11월 17일 오전 11시 20분경 물넘이 접근수로 우측 임야에서 산사태가 발생하였다. 산사태 위치는 동화댐 제4토취장으로 선정되어 1988년부터 토취했으나 함수비가 다소 높아 토취에 어려움을 겪던 지역이었다. 이 지역은 1992년 3월 10일경에 토취장 주변 지반에 소규모 균열이 일어나 토취장 주변의 토지 매수를 추진하고 사면 경사가 완만히 유지되도록 토취작업을 진행해 왔으며, 이러한 작업이 이루어지던 중 물넘이 유입부 법면 암발파를 위해 화약을 장약한 상태에서 토취장 상부 임야의 지반에 균일이 갑자기 커지면서 지반 슬라이딩이 발생하고 물넘이 유입부 터파기 구간이 매몰되었다. 매몰량은 약 30,000m³ 정도였다. 1993년 2월 25일에는 관리도로 우측 절토부 부근에서 2차 산사태가 발생하여 산사태 발생 원인을 지형, 토질, 지질, 강우, 융설, 지하수 등의 측면에서 도출했으며 추가로 물넘이, 방수로 설치 부분의 굴착에 의한 활동 저항력 감소를 인위적인 원인으로 지적하였다. 이를 토대로 제시된 복구계획에 따라 복구하였다.

6) 농업용 지하댐

우리나라의 지하댐 6개소 중 5개소는 농업용수로 이용되고 있다. 1983년에 경상북도 상주의 이안지하댐이 설치된 것을 시작으로 1986년에 경상북도 영일의 남송지하댐, 충청남도 공주의 옥성지하댐, 전라북도 정읍의 고천·우일지하댐 등이 설치되었다. 우리

표 19. 농업용 지하댐 현황

구분		이안	남송	옥성	고천	우일
위치		경북 상주 이안면	경북 연일 흥해면	충남 공주 우성면	전북 정읍 태인면	전북 정읍 태인면
하천명		이안천	곡강천	유구천	용호천	한교천
준공연도		1983	1986	1986	1986	1986
유역면적(ha)		2,130	15,300	27,500	2,700	2,200
관개면적(ha)		120	155	146	134	99
공급능력(m³/일)		24,000	27,000	27,900	25,110	16,200
차수벽	길이(m)	230	89	482	192	778
	높이(m)	5	18.8	9.16	7.5	6.7
	두께(m)	0.9~1.7	3.0	1.95	1.2~1.34	-
	공법	철근콘크리트 연속벽, 주입	시멘트 주입	시멘트 주입	철근콘크리트 연속벽, 주입	점토 연속벽
방사상 집수정		4기	4기	4기	5기	4기

- 출처: 소유역 지하댐 개발에 관한 기술개발연구보고서, 1996, 농어촌진흥공사

나라에서 가장 큰 지하댐은 강원도 속초시의 쌍천지하댐으로 1998년 수돗물 공급을 위해 건설되었다.

이안지하댐은 1981년 한해가 발생했을 때 정부의 '농업용수10개년개발계획'에 따라 우리나라 최초로 경상북도 상주시 이안면 양범리에 건설된 지하댐이다. 이 사업은 1981년 11월부터 1년간의 조사를 거쳐 1983년 4월 공사에 착수해 같은 해 12월에 준공되었다. 이 지역에 분포된 암석은 화강암질의 편마암과 석영편마암이다.

이안천의 유역면적은 21.3km²로 이 중 충적층 면적은 3.72km²(17%), 충적층 심도는 평균 4.5m이다. 이 지역 대수층의 평균 투수량계수는 268m³/일로 하상에 착정한 우물의 평균 투수량계수는 403m³/일로 나타났다. 지하 물막이벽 시공에서 물막이벽의 총대상구간은 230m로 SGR공법(특수약액주입공법: Space grouting rocket system)으로 194m, 콘크리트 타설공법으로 36m를 시공하였다.

지하 물막이벽의 효과를 확인하기 위해 6개의 시험공을 시추하여 투수시험을 시행한 결과, 평균투수계수는 3.92×10-6cm/s로 주입 시공 전 2.45×10-1cm/s에 비해 개량된 효과를 보였다. 콘크리트 타설구간 36m는 지하 물막이벽의 우안부로 기반암 상부까지 절개한 후 두께 0.3m, 평균심도 5m의 콘크리트벽을 구축하였다. 방사상 집수정은 관정과 집수암거의 장점을 복합한 시설물로, 양호한 대수층을 대상으로 수평 집수관을 20~30m씩 방사상으로 다수 설치함으로써 다량의 지하수가 중앙의 우물통으로 집수되도록 한 시설이다.

이안지구에 방사상 집수정 4개소를 설치했는데, 우물통은 수평천공작업이 가능한 공간을 제공하는 원통형 구조물로 깊이 7.5m, 내경 3.5m(외경 4.0m)의 규모를 갖추었다. 4개소의 집수정 중 3개소는 철근콘크리트로, 1개소는 조립식 파형강판(波形鋼板, Corrugated steel plate)으로 각각 우물통을 시공하였다. 수평천공 공사는 4개소의 집수정 1개소당 6~20공씩 총 50공을 시공하는 것으로 총천공길이는 1,055m에 이른다. 수평천공의 공당 평균채수량은 1일 400m³~500m³로 20공이 설치된 교촌집수정의 경우 1일 8,000m³~10,000m³를 채수할 수 있다. 천공장비는 TOP-MB형 수평착정기를 이용했으며, 천공 구경은 4인치로 천공 완료 시마다 구경 2.5인치의 PVC 스트레이너(Strainer) 집수관을 삽입해 수평천공이 붕괴되지 않도록 하였다.

1983년 12월에 이안지하댐 시험사업을 준공하고 이듬해 5월부터 12월까지 사후평가조사를 시행하였다. 취수공별 채수능력시험 결과 평균채수량이 당초 계획수량의 72%로 감소했는데, 그 원인은 집수유공관의 침하 또는 막힘 효과, 수평관의 경사도, 지역 내 유입수량 감소 등으로 판단되었다. 이를 보완하기 위해 각 수평공에 에어써징(공기청소) 정비작업을 시행하고, 정비 후 수평공의 연장이 당초 1,055m에서 920m로 약 13% 감소했음을 확인하였다. 또한 수평집수관이 우물통 유출구에서부터 평균 6°정도 상방으로 굴착된 것을 확인했는데, 수평관 20m당 1.4m 정도가 올라오므로 대수층 영역이 좁아지는 원인이 되었다.

농업용 지하댐은 1983년부터 1986년까지 5개소를 설치해 운영해 왔으나 이후에는 설치하지 않았다. 이는 계절에 따른 지하수위와 수량의 변화가 심하고 시설의 보수와 유지관리 비용에 비해 생산성이 높지 않기 때문이다.

7) 농업용 댐 형식의 변천

우리나라의 농업용 댐의 형식과 각종 설계제원에 대한 변천 추이를 살펴보면 다음 표와 같다.

표 20. 농업용 댐 형식 및 설계기준 변천

공종별	구분	광복 이전	1960년대	1970년대	1980년대	1990년대
제당	댐의 형식	균일형흙댐 (토언제)	중심점토형흙댐	중심점토형, 경사코어형, 존형 필댐-계측기매설	중심점토형필댐, 콘크리트댐, 존형필댐-계측기 매설	필댐: - 균일댐 - 존형 - 표면차수벽형 - 코어형 콘크리트댐: - 중력식 - 중공중력식 - 아치식
	높 이	20m 미만	30m 미만	30~50m	3~60m	30~60m
	정 폭	3~6m	4~8m	6~10m	6~10m	높이 50m 이상: 10~15m 낮은댐: 5m 표면차수벽형: 6~7m
	여유고	1~2m	2~3m	2~3m	2~3m	2~3m
	단위저수량	필산	필산	전산처리	전산처리	전산처리
	중심점토(폭)		1.5~3.0m	2.5~3.5m	2.5~4.0m	
	중심점토(고)		계획만수위 + 0.6~1.5m	계획만수위 + 1.0~1.5m	홍수위 + 0.5m	좌동
	중심점토(경사)		저폭: 수심/3 (1:0.1~0.15)	경사코아형 설치 저폭/3 (1:0.12~0.15)	중심코아형 (1:0.10~0.15)	
	수직필터(폭) 수직필터(고) 제당필터		수평필터	1.0~1.5m 계획만수위 수평, 수직필터	1.0~4.0m 계획만수위 수평, 수직필터	좌동
	가제당 지수공법		토사(점토) 지수공법	브랭킷 지수벽공법	좌동	좌동
	제당안전도	1:1.4~1:1.5 원형활동법 (절편법)	1:1.4~1.5 원형활동법 복합활동면법	1:1.3~1.5 원형활동법 복합활동법	1:1.2~1.3 원형활동법 복합활동법 Spencer법 Wedge법	원형, 복합활동법, Spencer법, Wedge법, Fellinius법, Janbu법, Bishop법, Morgenster and Price법
	하중	자중, 정수압	자중, 정수압	자중, 정수압 + 간극수압	좌동 + 관성력 + 지진계수	좌동 + 양압력 + 동수압, 병압
	사면기울기 내제 외제	 1:2~3 1:2	 1:2~3 1:2	 1:2.5~3.0 1:1.8~2.0	 1:2.5~3.0 1:1.8~2.0	 1:2.5~3.5 1:1.8~2.5

공종별	구분	광복 이전	1960년대	1970년대	1980년대	1990년대
제 당	보호공 내제	장석 (0.3~0.6m) 줄떼	사석 (0.3~0.6m) 줄떼	유용사석(1.0m) 사석 (0.3~0.6m) 줄떼	좌동 좌동	좌동 좌동
	외제					
	저수량 / 홍수량	필산	필산	전산처리	전산처리	전산처리
	소비수량 내용적결정 수로손실량	강우기록치와 소비수량분석 (토공수로)	강우기록치와 소비수량분석 (토공수로) (수로손실 20%)	기상자료 유역상황계수 수로손실률: (토공: 15~25%) 일삼투량	좌동 좌동 좌동 좌동	좌동 수로손실률: (토공: 10~25%, 구조물: 10%) 일삼투량
	침전량산정	-	침전량조사	유효저수량X10%	좌동	좌동
	계획기준년	3년	좌동	10년빈도 가뭄	좌동	좌동
	토질시험		물리적 시험	물리적, 역학적 현장시험	좌동	좌동
	그라우팅공법		제당시초처리	제당, 여수토 복통기초처리	콘솔리데이션 그라우팅, 커튼그라우팅	좌동
	제당축조공법	점축식공법	좌동	점고식공법	좌동	좌동
	굴착장비	인력	D7 도저 (와이어식)	19톤 도저 (유압식) 0.7m²백호	19, 32톤도저 (유압식) 1~2m³톤백호	좌동
	운반장비	인력, 우마차, 토운차	토운차, 리어카, 경운기, 4톤 덤프트럭	경운기, 8톤 덤프트럭	10.5톤 덤프트럭, 15톤 덤프트럭	좌동
	다짐장비	인력	견인식롤러 (12톤)	견인식롤러(12톤)	19톤 자주식롤러, 19톤 양족식롤러	좌동 + 텐덤롤러, 탬핑롤러, 타이어롤러
	적재장비	인력	무한궤도로더 (0.5톤)	백호(0.7m³톤) 무한궤도로더 (0.5~1.34)	백호(0.7, 1.0, 2.0m³톤) 무한궤도 타이어로더 (1.7~2.3)	좌동
물넘이	여수토형	슈트식, 측구식, 월류식	슈트식, 측구식, 자유낙하식	좌동 오리피스식	좌동	좌동
	홍수량계산 ·설계빈도계산 · 방법	100년 가지야마식	100년X1.2, 좌동+단위도법 합성단위도법	200년 좌동	200X1.2 좌동+합리식, P/G: SCS. HEC1	좌동
	방수로형	슈트식	좌동	좌동+터널식, 제체유하식	좌동	좌동

공종별	구분	광복 이전	1960년대	1970년대	1980년대	1990년대
물넘이	정수지형	도수식	좌동	좌동+플립식, 자유낙하식	좌동	좌동
	하류접속수로 보호공	막돌쌓기	돌쌓기, 메붙임	돌망태 메붙임, 찰붙임 콘크리트구조	좌동 철근콘크리트 보호공	좌동
가배 수로	형 식	기설하천이용 점축식공법 복통, 콘크리트관	복통	복통 가배수터널	좌동	좌동
	홍수량 적용	비관개기	비관개기 (10년빈도)	10년빈도	10~20년빈도	20~50년
	최종체절	점축식성토	입구체절	복통:입구체절 바이패스:입구 및 제당중심체절	좌동	좌동
취수시설	취수부(형식)	사통	좌동	사통 및 취수탑	좌동	좌동
	도수부(형식)	복통	좌동	복통, 터널, 감세공	좌동	좌동
	조절부(형식)	판재	목비	철비	밸브, 게이트, 유량계 설치	좌동
	거푸집재료	육송(판재)	좌동	합판	합판 및 철재 (Sliding form)	좌동
	동바리, 비계	육송	좌동	육송 및 각재	각재 및 철재	좌동
이설 도로	노면형식	비포장(사력)	좌동	비포장 및 포장	포장(아스콘, 콘크리트)	좌동
	굴착장비	인력	인력, 도저 (12~15톤)	19톤도저 백호(0.7~1.0m²)	19, 32톤도저 0.7~2.0m²백호	좌동
	운반장비	인력, 우마차, 토운차	토운반, 리어카 덤프(4톤)	경운기 덤프(4~8톤)	덤프(8~15톤)	좌동
	다짐장비	인력	견인식롤러 (12톤)	견인식, 자주식롤러 (11~12톤)	19톤 자주식, 양족식 롤러, 쉬프트타이어 롤러	좌동

8. 홍수조절댐

1) 평화의댐

평화의댐 사업처럼 국민적 논란을 일으킨 사업은 일찍이 없었다. 댐 건설을 위해 600여억 원의 국민성금까지 투입된 사업이 1993년 2월 문민정부가 들어서면서 하루아침에 과거 군사정부가 정권안보를 위해 국민을 속여 건설한 사업으로 격하되어 오늘에 이르고 있으니, 사업건설에 참여했던 사람들로서는 그 참담한 심경을 가눌 길이 없을 뿐이다.

당시 정부에서는 북한이 북한강 상류지점에 대용량의 댐(임남댐, 속칭 금강산댐)을 건설 중에 있으며 이 댐이 자연적 또는 인위적 원인에 의해 붕괴되거나 또는 군사작전상 악용될 때에는 하류에 막대한 피해를 유발할 것이므로 그 안전장치로서 하류에 대응댐(또는 평화의댐)을 건설하여 상류로부터의 피해를 방어해야 한다는 판단 아래 평화의댐 건설을 추진하여 1989년 12월 마침내 그 1단계 댐의 준공을 보게 되었다. 댐 건설에 대한 당시 정부의 방침이 고도의 정치적 목적을 위한 것이었는지 아니면 격심한 군사적 대치 속의 지나친 군사적 피해의식에서 결정된 것이었는지 역사의 시간이 흐르면서 그 진상이 차차 밝혀질 것이다.

1단계 사업이란 북한 금강산댐의 가물막이 댐 붕괴에 대비한 댐을 말하고 2단계 사업이란 금강산댐의 본댐이 붕괴되었을 때에 대응한 댐을 말한다. 1단계의 규모는 북한의 가물막이 댐의 저수용량 4억m^3가 홍수 시에 붕괴되었을 때에 대응하는 규모로서 저수용량 5.9억m^3, 댐 높이 80m이다. 이 댐을 88올림픽 개최 이전인 1988년 5월 말까지 그 골격구조를 완성한다는 목표로 추진되었다. 2단계 댐 규모는 금강산댐 규모가 명확하지 않고 여러 가지 규모로 추정되기 때문에 여러 가지 경우의 추정규모별로 그에 대응하는 규모를 추정하였던 것이다.

1단계 설계 시 고려사항을 살펴보면 임남댐 규모가 불확실하므로 북한댐의 축조공정에 맞추어 대응할 수 있도록 댐은 안전성, 공사의 시급성, 증고 등 확장 가능성을 고려해 콘크리트표면차수벽형석괴댐(CFRD)으로 계획하였으며, 본댐의 단면은 1단계 댐을 계획할 때 2단계를 고려해 재료의 생산성, 댐의 안전성, 단계적 시공성, 경제성 등을 더욱 구체적으로 검토해 설정한 댐 표준단면의 구역화(zoning) 계획을 수립하여 표면차수벽 두께는 최대 2m로 설계하였다.

평상시에는 비워두어야 할 댐이므로 문비 없는 배수터널을 여수로 개념으로 설치(Bottom spillway tunnel)해 북측 지역에서의 배수 영향을 최소화할 필요가 있었다. 배수터널의 규모는 화천댐의 홍수처리능력을 감안해 어느 경우에도 5천m^3/sec 이하(2단계 댐의 경우에도 6천m^3/sec 이하)의 통수능력이 되도록 직경 10m의 터널 4개를 설치하였다. 1단계 평화의댐 높이는 60m로 추정되는 임남댐 가물막이(저수량 3억m^3)가 50년빈도 홍수(1984년 7월 홍수규모, 9.4억m^3의 유입 기준)와 중첩되어 총 12.4억m^3의 홍수가 유입되는 조건을 설정하였다. 미국의 벡텔(Bechtel)사에 의뢰해 NWS DAMBRK 모형을 이용해 금강산댐 붕괴 시 홍수분석을 실시했으며, 이 분석결과를 토대로 1단계 평화의댐 정상표고를 EL.225m로 채택(높이 80m)하였다.

CFRD는 국내에서는 1985년 준공된 동복댐에 처음 적용되었는데, 평화의댐 사용으로 그 경제성과 시공성이 입증되어 이후 건설되는 댐의 형식 결정에 지대한 영향을 끼쳤다. 특히 표면차수벽형댐에서 가장 중요한 콘크리트차수벽 타설장비인 슬립-폼 페이버(Slip-form paver)의 설계·제작기술을 비롯해

시공에 필요한 신기술을 축적하는 성과를 올렸다.
임남댐은 1986년 착공 이후 1993년과 1994년 3회에 걸쳐 가물막이댐이 유실되는 등 공정이 극히 부진하였으나 1999년 6월부터 본격적인 공사에 재착수해 2000년 10월에 댐 높이 88m, 저수용량 9억m^3의 1단계 사업을 준공하고 홍수기 시 물을 배제하는 여수로 공사를 완공하지 않은 채 담수를 시행해 45km의 도수터널을 통해 동해안으로 발전을 하였다.

임남댐의 실체와 그 안전성 여부에 대해서는 1986년부터 많은 논란이 있었다. 그러나 2002년 1월 17일부터 2월 4일까지 임남댐 하류 화천댐의 유입량이 평상시 초당 2m^3에서 최대 273m^3으로 급격히 증가해 총 340백만m^3가 유입되는 사태가 일어났다. 이에 따라 정부에서 만일의 사태에 대비하기 위해 국내외 댐 전문가의 자문을 거쳐 2002년 5월 14일 1단계 평화의댐에 대한 보강공사에 착수해 8월 27일에 완료하였다. 우기 동안 큰 홍수가 발생할 경우 방류시설을 제대로 갖추지 못한 임남댐이 월류하거나 훼손 부위를 통해 댐이 붕괴할 경우에 대비해 평화의댐을 보강하였다.

또한 비상방류구 수문 설치를 위해 수위를 낮추어 운영 중인 화천댐의 수위를 최대한 낮게 유지해 홍수조절용량을 확보하는 한편 홍수예·경보시설을 확충하는 등 종합적인 수방대책을 수립하였다. 이어 6월 3일부터 6월 24일까지 임남댐에서 추가로 331백만m^3를 무단 방류하자, 북한에 임남댐의 안전성에 대한 공동조사 시행을 지속적으로 제의했으나 북한은 댐의 안전에 어떠한 이상도 없음을 통보하고 공동조사 등에 대해 어떠한 입장도 밝히지 않았다. 이에 따라 정부는 2002년 7월 19일 임남댐이 최종 완공 후에 붕괴되는 만일의 사태에 대비하기 위해 평화의댐 증축(2단계) 사업 추진을 결정하고 9월에 2단계 평화의댐 건설에 착공해 본댐을 45m 증축하고 2006년 12월에 준공하였다.

2) 한탄강 홍수조절댐

1995~1997년 임진강 유역조사를 바탕으로 임진강 유역의 항구적인 수해대책으로 1999년 수해방지기획단에서 임진강 다목적댐 건설을 결정하였다. 수도권지역 수자원개발계획 수립 조사 시 한탄강댐 지점과 영평천댐 지점을 검토하여 한탄강다목적댐을 건설하기 위한 기본계획를 수행하고 1999년 12월부터 2002년 3월까지 기본설계를 완료하였다. 실시설계를 앞두고 발주처에서는 타 SOC 사업에서는 이미 시행되고 있던 설계·시공일괄입찰(턴키) 발주에 대하여 국내 댐 설계 및 시공기술의 향상을 위하여 적극적으로 검토하였으며, 국내 최초로 한탄강다목적댐 건설사업에 도입하게 되었다. 일괄입찰 발주 시의 장점을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 입괄입찰 시 기타공사(최저가) 입찰에 비해 공사기간이 단축된다. 턴키는 우선시공(Fast track) 적용 시 실시설계 완료 이전에 공사착공이 가능하지만 기타공사 공사발주는 기본계획 수립 및 세부설계 완료 후 입찰로 공사착수가 턴키에 비해 늦다.

둘째, 신기술 신공법 도입을 통한 기술력 향상으로 민간업체의 보유 기술을 활용한 최적대안 선정으로 공사기술력을 향상시키며 선진국의 기술 및 친환경 공사기법 등의 도입으로 댐 분야 기술력 향상에 기여한다.

셋째, 설계·공사 일괄입찰로 설계변경이 금지되어 공사비 증가를 억제시킨다.

넷째, 대형업체의 참여로 인한 책임시공 및 품질관리가 보장되어 시공 및 품질관리가 유리하다.

다섯째, 공사 기술인력의 탄력적 운영으로 외부 기술인력을 활용함으로써 공사 주력사업 및 신규사업 분야에 집중적인 인력투입이 가능하다.

한탄강다목적댐은 턴키로 실시설계 적격자를 선정하고 이 사업을 본격적으로 추진하는 과정에서 민원에 의해 2004년 1월부터 2004년 11월까지 대통령 자문기구인 지속가능발전위원회 주관으로 갈등조정이 추진되어 '천변저류지 및 홍수조절댐' 건설을 결정하였고, 2005년 8월부터 2006년 8월까지 국무총리를 위원장으로 하는 '임진강유역홍수대책특별위원회'와 분야별 중립적인 전문가들로 '검증·평가실무위원회'를 설치·운영하여 '홍수조절댐+천변저류지'로 결정하는 과정에서 2004년 1월부터 2007년 3월까지 과업이 중지되었다.

홍수조절댐 최종 결정(홍수조절분담량 등)에 따른 후속조치로 당초 한탄강다목적댐에서 홍수조절댐으로 변경되었으며, 전문가 자문단의 한탄강홍수조절댐 및 천변저류지의 규모 검토를 거쳐 중앙하천관리위원회에서 '임진강홍수대책 추진계획(안)'을 심의·확정(2006년 10월 27일)하고 「댐건설법」에 의거해 댐 건설 기본계획 고시 및 실시계획 고시와 함께 본댐 공사를 착수하였다.

한탄강댐 환경영향평가는 1년 7개월에 걸쳐 환경영향평가 협의를 완료(2003년 7월 28일)하였으며 이후 용수공급 없이 홍수조절 전용댐으로 건설하기로 최종 결정한 것을 계기로 하천환경 및 생태계 유지를 위한 설계대상수량 150m³/s를 현실화시키기 위해 환경부와 협의내용 변경 협의를 추진하였으나 확보 조건을 그대로 두었으며, 이 협의내용은 댐 지점의 풍수량이 21.7m³/s임을 감안하면 턱없이 과다한 유량으로 실현 가능성이 없어 향후 계속 분쟁의 소지를 안고 있다.

당초 다목적댐으로 계획한 턴키 공사 설계를 홍수조절댐으로 결정함에 따른 주요 설계변경 내용은 다음과 같다.

표 21. 한탄강댐의 수리·수문 변경 현황

구분	당초(다목적댐)	변경(홍수조절댐)
계획홍수(방류)량	5,490(1,970)m³/s	5,943(1,950)m³/s
계획홍수위	EL. 116.8m	EL. 114.4m
최대유입(방류)량	11,669(9,083)m³/s	15,776(12,796)m³/s
최고홍수위	EL. 119.1m(PMF)	EL. 117.92m(PMF)
총저수용량	311백만m³	270백만m³
홍수조절용량	305백만m³	270백만m³
용수공급량	128백만m³/년	-

주요시설물 변경 현황

- 변경된 홍수량을 기준으로 댐마루고: EL. 119.5m (높이 83.5m)
  ※ 당초 다목적댐마루고: EL. 121.0m(높이 85m)
- 환경부 협의내용 변경 결과를 반영한 여수로 규모 및 배치 계획
  ·생태통로(배사관): B 3.7m×H 3.5m×4문 (B 5.3m×H 4.5m×2문)
  ·상용여수로: B 4.9m×H 4.9m×2문
  ·비상용여수로: B 13m×H 15.9m×5문

본댐 형식은 지형 및 지질 조건, 재료원 조건, 댐의 안전성, 여수로 설치 조건, 친환경 조건, 경제성 등을 종합적으로 고려해 국내 최초로 RCD(Roller Compacted Dam concrete) 공법에 의한 콘크리트 중력식댐으로 결정하였다. 댐 축조 높이 83.5m, 길이 690m, 축조량 70만m³로 공사기간은 절대공기 81개월이었다. 주요 시설물로 월류식 비상용여수로 5문, 상용여수로 및 배사관 각각 2문, 생태통로 4문을 축조하였다.

9. 댐 재개발

선진 외국의 경우에도 수자원 개발이 대부분 완료되어 더 이상 적절한 댐 지점을 확보하기 어려운 상황과 댐이 타 구조물에 비해 장기간 수명이 기대되는 사회 자산으로서 댐의 기능을 장기적으로 유지, 향상시킬 경우 효과적으로 이용할 수 있어 기존 시설의 재개발 사업을 통한 수자원 환경변화에 적응하고 있다. 기존에 개발된 수자원의 활용도를 높이고 환경적으로 건전하고 지속가능한 개발(Environmentally soundable and sustainable development)을 위한 새로운 댐 건설 정책방향의 일환으로 기존 댐의 저수용량 증대, 저수지 운영시스

표 22. 댐 재개발사업의 목적과 방법에 따른 분류

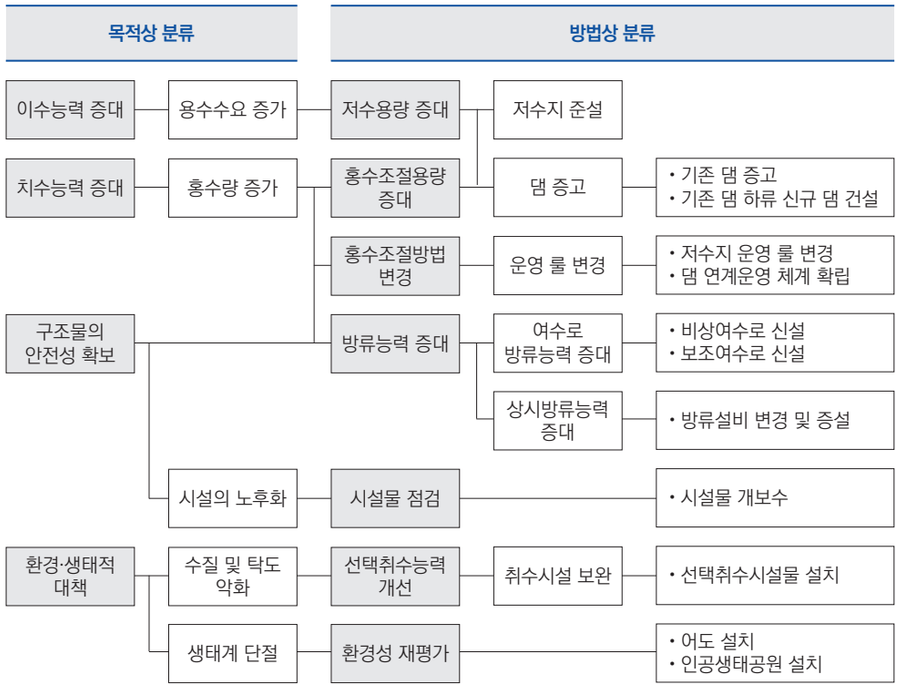


표 23. 국내 댐 재개발 주요 사례

구분	재개발시기	댐 용도	재개발방안	저수용량(백만m³)	
				당초	재개발
섬진강댐	1965년	다목적	기존 댐 하류 신규건설	66	466
동복댐	1985년	생·공용수	기존 댐 하류 신규건설	2.6	99.5
가창댐	1986년	생·공용수	기존 댐 증고(16m)	2.0	9.1
대아댐	1989년	농업용수	기존 댐 하류 신규건설	20	51
남강댐	1999년	다목적	기존 댐 하류 신규건설	136	309
성덕댐	2015년	다목적	기존 댐 하류 신규건설	0.8	27.9

표 24. 농업용저수지 둑 높이기 사례

저수지명	당초				증고				비고
	준공연도	제원			준공연도	제원			
		제당길이(m)	제당높이(m)	저수량(만m³)		제당길이(m)	제당높이(m)	저수량(만m³)	
오봉저수지	1983	268	50.6	1,440	2015	268	55.6	1,700	재해 대비 개보수
백곡저수지	1949	182	16.5	–	1984	410	27.2	2,175	재해 대비 개보수
					2012		29.2	2,637	지표수 보강, 4대강
충도저수지	1944	120	19	655	2007	135	25.2	115.4	지표수 보강
갈망골저수지	1945	115	5	0.8	2004	137	9	1.9	지표수 보강
낭산저수지	1947	207	10.4	51	2000	207	13.65	132	지표수 보강
학동저수지	1944	273	9.85	11	2002	272	12.6	28	지표수 보강
옥금저수지	1944	175	9.5	35	2003	184	9.8	41	지표수 보강
유곡저수지	1952	310	21	45	2001	310	24	69	지표수 보강
일대저수지	1949	242	14	80	2004	318	14.5	85	지표수 보강
신전저수지	1957	176	14.8	33	2002	176	15.5	39	지표수 보강
월성저수지	1961	175	14.5	43	2007	194	16.6	64	지표수 보강
대아저수지	1923	254.1	32.62	2,000	1989	255	55	5,100	재해 대비 개보수
					2011		56.5	5,440	지표수 보강, 4대강
성주댐	1997	430	60	3,824	2005	430	62.6	4,749	재해복구 개보수
오태지	1970	100	30	70	1992	110	32	90	농업생산종합정비
보림지	1975	59	19.6	16.2	2006	69	22.1	23.6	지표수 보강
조성지	1959	258.5	16.8	307.8	1985	258.5	18.0	359.6	지표수 보강
삼정지	1986	138	22.2	76	2010	152	24.2	102	지표수 보강
강사지	1986	144	24.0	77	2010	180	26.4	104	지표수 보강
용곡지	2002	103.5	29.1	50.9	2008	153.0	39.0	179.2	지표수 보강
화곡지	2004	178.0	14.0	112.0	2006	200.0	16.6	160.4	지표수 보강
연죽	1978	156	22	51	2008	180	26	75	지표수 보강
운암	1949	167	9.1	18	1993	187	16.2	25	재해 대비 개보수
마둔지	1975	170	24.12	350	2011	–	26.62	456	지표수 보강, 4대강

템 변경, 댐과 저수지의 기능개선 등의 방법으로 기존 댐을 재개발하는 방안을 '댐건설장기계획'(2001년 12월, 건설교통부)에 포함하였다.

국내의 댐 재개발사업은 목적과 방법에 따라서 다음과 같이 분류하여 시행하고 있다.

우리나라는 댐 개발 역사가 짧아 선진 외국에 비하여 사례가 많지 않으나 다목적댐인 섬진강댐과 남강댐, 생·공용수댐인 동복댐과 가창댐 그리고 농업용수댐으로 비교적 규모가 큰 대아댐, 성덕댐 등의 재개발 사례를 볼 수 있다.

1) 치수능력증대사업

국내 기존 댐의 치수능력증대사업은 기후변화로 인한 이상호우의 증가 및 댐 월류로 인한 붕괴사례가 발생함에 따라 기존 댐 치수능력 재검토 및 대처 필요성에 의해 진행되었다. 또한 '댐의 수문학적 안정성검토 및 치수능력증대 기본계획수립'(2004년 9월 건교부/한국수자원공사)에서는 기존 댐의 수문학적 안정성을 검토하였으며, 치수능력이 부족한 기존 댐에 대해서 치수능력증대방안을 제시하였다.

이에 따라 2003년부터 2015년까지 소양강댐 등 전국 23개 댐에 대해 가능최대강수량(PMP) 및 가능최대홍수량(PMF) 발생 시에도 댐이 붕괴되지 않도록 안정성을 확보하기 위하여 치수능력증대사업을 추진하였다. 기존 댐의 치수능력을 증대하는 방안으로 표 25와 같이 구조물적 방안은 증가된 홍수위에 댐의 안전을 위한 여유고를 고려하여 댐을 증고하는 방안, 기존 여수로를 확장하는 방안 및 보조여수로를 신설하는 방안 등이 있으며, 비구조물적 방안은 예비방류방안, 홍수기 제한수위 설정방안이 있다.

치수능력증대방안 수립 시에는 먼저 비구조물적 방안을 검토하여 수문학적 안정성 확보가 가능하면서 이에 따른 제반 문제점이 없을 경우에는 구조물적인 방안과 함께 병행하는 조합 안을 계획하지만 비구조물적 방안이 현실적으로 채택하기 어려울 경우에는 구조물적 방안 단일안으로 치수능력증대계획을 수립하게 된다. 다목적댐에 비구조물적인 방안 적용 시 예비방류로 인한 이수, 발전 및 하천환경목적의 용수공급에 지장이 발생할 수 있으므로 신중하게 결정하여야 한다.

사업기간은 2003년에서 2015년까지 총사업비 약 22,446억 원으로 국토부 소관 전체 32개 댐(다목적댐 16개, 용수댐 14개, 홍수조절댐 2개) 중 보강이 필요한 24개 댐을 대상으로 수행하였으나 2021년 현재 영천댐(2003년)을 시작으로 소양강댐 등 19개 댐은 완료되었으며 충주댐, 안계댐은 공사 중이고 남강댐, 선암댐은 추진 중, 사연댐은 미착수 중에 있다.

준공된 달방댐, 영천댐, 광동댐, 구천댐, 소양강댐 등 18개 댐은 구조물적 대책으로 여수로 신설 및 확장공사가 완료되었고, 합천댐은 비구조물적 대책으로 홍수조절방식을 변경하였다.

표 25. 구조물 및 비구조물적 치수능력증대방안

구조물적 방안	비구조물적 방안
• 댐 증고안: 댐 제체 증고, 파라페트월 설치 등 • 기존 여수로 확장안 • 터널식 및 개수로식 신설 여수로	• 예비방류 방안 • 홍수기 제한수위 설정방안

표 26. 댐 치수능력증대사업 현황 (2021년 8월 기준)

구분	댐명	사업기간	PMF (m³/s) 금 회	치수능력 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)	달방댐	'04~'06	1,140	여수로 구조개선	3.5×3.5×2	웨어를 7m 낮게 설치	1,084.8 (기존 여수로 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 (기존 여수로 확장)	개거식
	구천댐	'05~'07	520	기존 여수로 확장 + 파라펫월	웨어부 50→ 60m, 여수로 바닥굴착 5m 파라펫월 H=1m 설치		510 (기존 여수로 확장)	개거식
	수어댐	'04~'07	1,652	보조여수로 신설	3.0×3.0×1	D12~8×L703	1,525 (기존 653, 보조 872)	터널식
	연초댐	'05~'08	500	기존여수로 확장	웨어부 25→ 52m, 여수로 바닥굴착 5.9m		482 (기존 여수로 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
준공 (19개 댐)	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 2,118		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 콘크리트보강	댐 하류사면 콘크리트(t=1.5m)보강		16,596 (기존 10,559 보조 6,037)	사면보강
공사 중 (2개 댐)	충주댐	'13~'18	32,727	보조여수로 신설	10.0×19.8×6	16.3×567×3	28,500 (기존 17,500, 보조 11,000)	터널식
	안계댐	–	122	파라펫월 설치	파라펫월 H=1.7m	80 (기존 10, 보조 70)	파라펫월	개거식
추진 중 (2개 댐)	남강댐	–	20,771	제수문증설 + 보조여수로 신설(안)	(제수문) 8.0×16.3×5	12.1×300×1	14,106 (남강 1,948, 가화천 12,158)	터널식
	선암댐	–	34	파라펫월 설치(안)	파라펫월 H=1.2m	13 (보조 13)	파라펫월	개거식
미착수 (1개 댐)	사연댐		2,290	기존 보조여수로 확장(안)	9.0×8.7×2	21.0×8×220	2,120 (기존 1,130, 보조 990)	개거식

2) 기존 농업용 저수지 둑 높이기

정부가 4대강살리기사업의 일환으로 추진한 '농업용 저수지 둑 높이기 사업'은 농업용 저수지 93개소(한강 11개소, 낙동강 30개소, 금강 29개소, 영산강 14개소, 섬진강 9개소)의 둑을 평균 5.8m 높여 2억 10,000,000m³의 저수용량을 확보하기 위한 것이다. 둑 높이기 사업은 기존 농업용 저수지를 재개발해 홍수 및 가뭄피해를 예방하고 환경유지용수 공급 등을 위해 저수용량을 추가 확보하는 데 목적이 있다. 또한 4대강 인근 저수지를 지역특성에 맞는 친환경 테마타운으로 개발해 지역 명소화하는 방안도 추진하고 있다. 이 사업은 확보된 수자원을 활용해 부족한 농업용수를 공급하고 남는 물을 갈수기 하천으로 흘려보내 농어촌 소하천의 수생태계 보존과 수질개선에 기여할 것으로 기대되고 있다.

기존 농업용 저수지에 대한 용수확보 방안은 상·하류 유역의 지형적인 여건, 환경적인 여건, 주민호응도, 추가개발 가능성 등을 고려하여 검토하였다.

표 27. 저수지 둑 높이기 사업

구분	사업 수(개소)	사업기간	추가저수량(억m³)	
계	110		6.1 ⇒ 8.5	2.4
4대강 내	93	'09~13(5개년)	5.3 ⇒ 7.4	2.1
4대강 밖	17	'10~'15(6개년)	0. 8⇒ 1.1	0.3

※ 4대강 유역 내 93개소: 한강 12개소, 낙동강 30개소, 금강 28개소, 영산강 14개소, 섬진강 9개소
※ MP수립 이후 사업추진 과정에서 주민반대 등의 사유로 3지구 사업 취소(한강 1, 낙동강 1, 금강 1)

표 28. 추가용수 확보를 위한 제체쌓기(보강) 유형

구분	적용 조건	비고
기존 제체 이용	• 기존 제체가 안전하고 제체 덧쌓기 높이가 5.0m 이내 • 유역 상류부 수몰부분에 대한 제약 조건(증고 5.0m 이내) • 만수면적이 넓어 증고 높이(5.0m)에 따른 추가용수확보가 용이 • 취수탑 또는 방수로(북통) 개수가 용이한 지구 • 여수로 수문설치와 병행으로 추가용수확보 용이 지구 • 기존 제체 후면 사면 층따기	
기존 제체 후면 덧쌓기	• 기존 제체가 안전하고 제체 덧쌓기 높이가 5.0m 이상 • 유역 상류부 수몰지 내의 조건이 양호 • 증고에 제약 조건 없이 추가용수확보 가능 지역 • 용수확보를 위한 제체 이동에 제약 조건이 있을 경우 • 기존 제체 후면 사면 층따기	수문 병행 가능
하류부 제체쌓기	• 제체 쌓기 높이가 5.0m 이상 • 제체 설치지점 하류부 이동으로 저수용량이 2배 이상 증가 • 기존 지점 하류부 지점의 지형 및 지질 조건이 양호 • 항구적 가뭄 및 홍수 재난방지를 위한 추가용수량 및 여수로 규모 확보 가능 지역	수문 병행 가능

제체 덧쌓기
(유역 내: 56개소 / 유역 밖: 9개소)
〈증고: 5.0m 미만〉

후면 덧쌓기
(27개소 / 4개소)
〈증고: 5.0~15.0m 미만〉

이설 쌓기
(13개소 / 4개소)
〈증고: 15.0m 이상〉

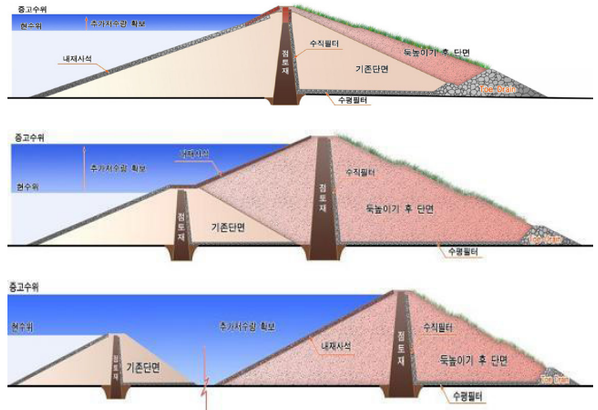


그림 4. 저수지 둑 높이기 표준단면도

참고문헌

1. 농업생산기반시설 설계기준, 농림축산식품부 / 건설기술센터, 2018
2. 농업생산기반정비사업 총람, 농어촌진흥공사, 1999
3. 농업생산기반정비사업계획설계기준 콘크리트댐편, 농림수산부, 1989
4. 농업생산기반정비사업계획설계기준 필댐편, 농림부, 2002
5. 댐건설기술집, 한국수자원공사, 2017
6. 댐설계기준, 국토해양부, 2011
7. 댐설계기준, 환경부 / 국가건설기준센터, 2022
8. 댐설계기준·해설, 한국수자원학회, 2011
9. 수력발전 자료집, 한국전력공사, 2000
10. 수자원(댐분야) 설계실무요령(조사편, 설계편), 한국수자원공사, 2018
11. 조선전기사업사, (사)중앙일한협회, 1981
12. 한국 상수도 100년사, 환경부, 2008
13. 한국대댐회 20년사, 한국대댐회, 1994
14. 한국대댐회 40년사, 한국대댐회, 2012
15. 한국수리사, 한국관계배수위원회, 1996
16. 한국수자원 100년의 발자취와 교훈, 한국수자원공사 / 한국대댐회 / 한국수자원학회, 2015
17. 한국의 댐, 한국수자원공사, 2000
18. 한국의 수자원개발 30년, 한국수자원학회 / 한국수자원공사, 1997
19. 한국전기 100년사, 한국전력공사, 1989
20. 4대강살리기 마스터플랜, 국토해양부 4대강추진본부, 2009

수자원개발(댐)과 한국의 경제·사회 발전

(부제: 한국의 댐 건설사)

강종수

대한토목학회·한국수자원학회 원로회원
기술사, 공학박사

1. 서언

물은 인류를 포함한 모든 생명체의 생존에 필수적이며 모든 산업활동에 없어서는 안 될 뿐만 아니라 부족 시 다른 대체재가 없는 중요한 자원이다. 해수담수화방법(다단증발법, 다중효용증발법, 역삼투압법)은 고가이며 대량공급에 한계가 있다. 이 외에 다른 방법으로는 물(민물)을 구득할 수단이 없다.

우리나라 수자원의 원천은 강수량인데, 연 강수량의 2/3가 여름철 3개월 동안에 집중되고 연도별·지역별로 강수량 편차가 커서 하천의 유황이 매우 불안정한 상태이기 때문에 자연 상태에서는 물이 필요한 곳에서 필요한 만큼의 수량을 확보하기가 어렵다. 인구의 급속한 증가와 도시 집중으로 인해 생활용수의 수요가 증가하고 산업발전에 따라 공업용수 수요가 급증하면서 갈수기에 자연하천에 흐르는 물만으로는 수요량을 감당할 수 없게 되었다.

이와 같은 수자원 환경에서 댐 건설은 수자원확보·관리의 핵심정책으로 채택되어 왔다. 댐 건설로 풍수기에 하천유량을 저류해 홍수량을 줄이고 이를 갈수 시에 이용함으로써 부존 수자원을 최대로 이용하는 방법이 가장 합리적인 방안이었던 것이다.

세계적으로 인류문명의 발상지 4곳이 모두 물이 풍부한 큰 강을 중심으로 그 문명의 꽃을 피웠다. 사막에서도 오아시스가 있거나 물이 공급되는 지역에서 마을 또는 도시가 형성되었다. 한때 호수를 끼고 번창했던 도시도 그 호수가 메마르면서 사라졌던 경우도 있었다. 이렇듯 우선 물이 있어야 문명의 터전이 될 수 있었다.

우리나라에서 벼농사 중심의 농업이 시작된 것은 B.C. 4~3세기경으로 알려져 있다. 이에 따라 관개사업이 시작되었고, 저수지를 수원으로 하는 관개를 위해 댐(제언)을 축조하여 왔다. 특히 우리나라는 20세기 후반기에 들어 단기간에 선진 댐 기술을 과감히 도입, 발전시켜 수자원을 효율적으로 이용·관리함으로써 괄목할 경제발전을 이룩하였다.

세계적으로 댐 건설 목적은 용수공급, 홍수 방어, 양어 또는 물레방아를 돌리기 위해서였으나 19세기에 산업화가 시작되면서 전기에너지를 공급하여 동력을 이용할 수 있게 됨에 따라 수력발전용 댐을 건설하게 되었다.

우리나라에서 최초의 댐은 김제지역의 벽골제(원평천, 농업용, 흙댐, H=4.3m, 330년)이며 최초의 현대식 대규모 댐은 한대리댐(부전강, 콘크리트중력식, H=75.8m / 발전시설용량 200.7천kW, 1932년)이다. 일제강점기에 건설되었으나 일제 수탈정책으로 댐 기술의 전수는 없었다.

본격적인 댐 기술도입은 1960년대부터 소양강다목적댐을 비롯한 많은 대규모 댐을 건설하게 되면서부터이다. 세계적으로 19세기 말엽에 개발된 콘크리트 댐 기술과 20세기 전반기에 개발된 록필댐 기술이 도입되었고 20세기 후반에 그 기술이 정착된 콘크리트표면차수벽형록필댐을 다수 건설하였다. 이 과정에서 설계기술, 건설공법, 운영관리기법 등 괄목할 만한 댐 기술발전이 있었으며 이를 바탕으로 해외 건설수출에도 일익을 담당하였다.

우리나라는 1950년대까지 농업국가로서 농업용수, 생활용수 및 수력발전용수 공급을 위한 단일목적댐이 건설되었으나 1960년대부터 공업입국을 지향하면서 공업용수, 홍수 조절 및 하천유지용수 공급 등의 목적을 추가하면서 다목적댐이 등장하였다. 최초의 다목적댐은 섬진강다목적댐(1965년)이었다.

2022년 현재 국제대댐회(ICOLD, 104개 회원국, 개인회원 10,000여 명, 1928년 창설)에 등록된 높이 15m 이상의 댐은 58,713개이다. 이 중 댐 형식별 분포는 흙댐 65%, 중력댐 14%, 록필댐 13%, 아치댐 4%, 기타 4% 등이며 건설목적은 수력발전, 생·공용수, 관개, 홍수 조절, 레크리에이션, 양어 및 기타로 분류되고 있다.

1972년에 67번째 회원국으로 가입한 우리나라는 댐 수효 1,338개로서 세계 제6위국이다. 댐 기술은 역사적으로 선진 외국에서 개발되었으나 1960년대부터 단기간에 적극적으로 기술도입을 이룩하면서 선진국으로 가는 국가 경제사회 발전에 확고한 기반이 되었다.

가급적 조건을 위하여 그림(사진) 및 도표를 활용하고 개조식으로 기술하였다. 한국대댐회 창립 제50주년을 맞이하여 주요 댐의 기술발전내력을 살펴본 다음 우리나라의 수자원기술도입, 댐건설 현황 및 해외사업진출 실태를 개관하여 보았다.

2. 댐 기술 발전내력 개관

2. 1 중력댐 기술발전 개관

1) 중력댐의 시작: 차수코어 상·하류측이 석축벽인 석축댐

중력댐은 고대로부터 댐 단면 중간에 차수재료를 두고 상·하류측에 석축벽(마름돌)을 쌓는 형식을 시작으로 진화해왔다. 세계에서 가장 오래된 중력댐은 수공학기술을 크게 발달시켜 문명발전에 이용했던 우라르투(Urartu) 왕국(B.C. 9~6세기, 현 아르메니아와 튀르키예 동부지역)이 B.C. 7세기에 건설한 Kesis Golu댐으로 알려져 있다. 이 지역에는 이 댐뿐 아니라 축조연대를 정확히 알 수 없는 고대 중력댐들이 남아 있다.

우라르투 왕국을 자주 침공했던 아시리아(현 티그리스강 상류 이라크)도 그 기술을 받아들여 중력댐을 건설하였으며. 이어서 이 지역에서 페르시아가 정치 및 수리기술 면에서 주도권을 잡게 되자 쿠르(Kor) 강(현 이란) 등에 중력댐을 건설하였다. 지중해 동쪽인 지금의 이스라엘과 요르단 지역에서도 고대부터 중력댐을 쌓았다. 나바테아인(Nabataeans: 고

대 아랍부족, 지금의 시리아와 이라크 서부지역)을 서기 62년경에 합병한 로마는 이탈리아뿐만 아니라 식민지인 튀르키예, 스페인, 북아프리카, 시리아 등에도 중력댐을 건설하였으며 그 일부는 현재까지도 남아 있다. 당시의 댐은 오늘날 취입보로 분류될 수 있는 것이며 건설목적은 주로 음용수와 관개용수 확보였다.

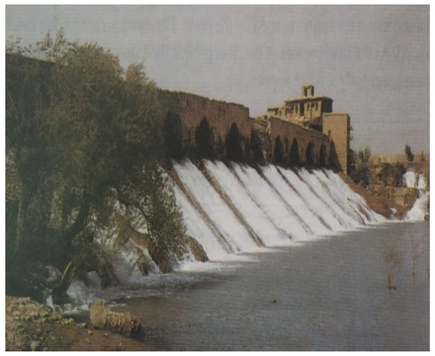


사진 1. Bend-e-Amir댐(페르시아, H=9m, 980년) 물방앗간(몇 개는 지금도 사용), 용수공급, 교량설치 등 최초의 다목적댐.

페르시아는 로마 발레리안(Valerian) 황제의 확장주의에 맞서 서기 260년 우르파(Urfa) 근처 전투에서 승리하자 로마의 수리기술을 합병하여 10세기까지 여러 개의 댐을 건설하였다. 특히 쿠르 강의 Bend-e-Amir 중력댐(H=9m / L=103m, 980년)은 좌안 하류에 약 30개의 물레방앗간이 있고 그 중 몇 개는 아직도 사용되고 있으며 용수공급 및 댐 위 교량설치로 교통로를 제공하는 등 최초의 다목적댐의 하나라고 볼 수 있다.

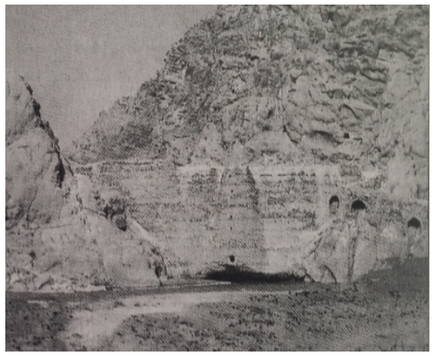


사진 2. Saveh댐(페르시아, H=25m, 1280년) 제형단면중력댐, 취수탑 밑 세굴, 우안에 통수관

그리고 12세기 이후 페르시아에서 처음으로 제형단면으로 잘 알려진 Bend-e-Saveh댐(H=25m, 1280년)을 건설하였다. 당시 새로운 기술로서 댐의 수직 상류벽면에 취수탑 설치, 댐 하류측 사면을 1:3 경사(높이 20m)로 축조, 댐 마루를 자유월류구조로 한 홍수배제 그리고 강의 잡석을 단단히 다져서 댐의 기초를 시공하는 등 그 기술이 독특했다. 14~15세기의 마슈하드(Meshed: 이란 동북부) 근처 중력댐들 역시 제형단면이고 오늘날의 중력댐 구조와 대단히 유사하다.

사진 3. Castellar댐(스페인) 유럽 최초 물방앗간 설치, 부벽댐원리도 발견.

스페인은 로마의 수리기술과 무어인(711년 점령)들이 가져온 페르시아의 수리기술을 합하여 상당기간 댐 건설의 종주국으로서 16세기 초에 세계강국이 되었으며, 댐 건설도 부흥기를 맞았다. Castellar 중력댐에는 유럽 최초로 물방앗간을 설치하고 부벽댐 원리도 발견되었다. Tibi댐(발렌시아지방, 아치중력댐, H=42m / 저수용량 540만m³, 1580~1594년)

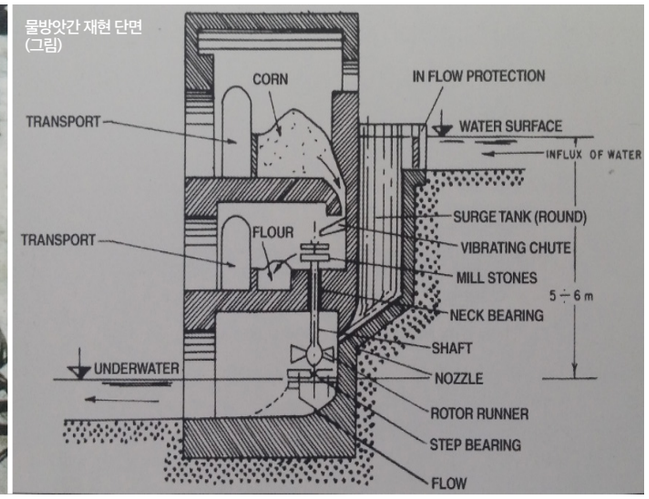


사진 4. Bend-e-Emir댐(페르시아-현 이란, H=9m, 980년)의 물방앗간

은 처음으로 퇴적이 있어도 취수할 수 있는 취수탑을 설치하였다. 스페인에서 이 시대의 중력댐은 거의 대부분 사각형 단면이었으나 17세기 이후부터 제형단면 중력댐이 도입되었으며 처음으로 건설한 것이 스페인 동북부 Isuela 강의 Arguis댐으로서 지금도 이용하고 있다.

스페인은 식민지인 멕시코, 볼리비아, 페루 등에도 중력댐을 건설하였다. 그중 볼리비아는 1626년 홍수로 San Ildefonso댐이 붕괴되어 Potosi 시민 4,000여 명이 인명피해를 입는 사고가 있었으며, 그 후 이 나라에서는 댐 건설을 중지하였다. 댐 강국이었던 스페인은 2세기가 지난 후부터 쇠퇴하였다. 이 시기 건설 도중 및 누차에 걸친 기존 댐 붕괴사고와 함께 수리기술도 퇴보했으며 다음으로 프랑스가 댐 건설의 선도국이 되었다.

이스탄불 근처에도 17~19세기까지 7개의 댐을 건설했는데 일부는 지금도 이스탄불에 음용수를 공급하기 위하여 사용되고 있으며 이들 중력댐은 자연석, 중심코어, 잡석, 잘 쌓은 외부벽돌로 되어 있다.

19세기 말엽에 포틀랜드시멘트를 이용한 콘크리트가 실용화된 이후부터는 오늘날과 같은 콘크리트댐을 축조하게 되었다.

2) 19세기: 종래의 중력댐에서 현대적인 콘크리트댐 개발로의 전환기

19세기 후반에 석축댐의 횡단면에 대한 응력곡선을 만드는 시도가 처음으로 있었으며, 이것은 중력댐의 설계기준이 되었다. 이 시도는 1586년 낮은 중력댐의 상류측 정수압 분포를 정한 Simon Stevin(1548~1620년, 벨기에 출생 네덜란드 국적, 수학자ㅊ물리학자·기술자)의 기록에 근거를 두고 있다. 중력댐의 전도에 대한 최초 조사는 1750년에 Bernard Forest de Belidor(1698~1761년, 프랑스)가 시행하고 기록하였다.

Lorenzo Allievi(1856~1941년, 이탈리아)는 Sazilly, Delocre와 함께 수격압 효과에 대한 이론을 개발하는 등 구조물의 설계를 위한 계산방법을 개발하였으며 Delocre는 중력댐의 전도에 대한 안전 즉, 자중

사진 5. Furens댐 (프랑스, 아치중력식, H=60m, 1866년) Sazilly의 첫 번째 작품

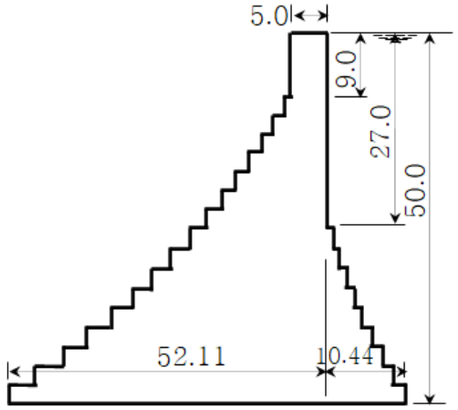


그림 1. Sazilly에 의한 중력댐의 횡단면도(단위: m)

과 수압의 합력이 기초면적 안에 있어야 한다는 것을 제시하였다.

1853년 M. de Sazilly(프랑스)는 여러 경험적 문헌작업 후 저수와 관계없이 댐 상·하류측에 거의 같은 극한응력이 나타나는 '동일저항단면'을 제안하였다. 따라서 댐 단면은 상·하류측 모두 오목단면이 최적이며 표면의 곡률을 나타내는 적분식의 해석을 할 수 없으므로 계단형으로 만들었다.(그림 1) 그 후 직선단면으로 진화되었다. 그는 활동에 대한 것도 다루었지만 주로 중력댐의 횡단면에서 수학적 응력계산을 최초로 가능하게 한 것으로 유명하다. 18세기 말 스페인을 제치고 댐건설 선도국이 된 프랑스의 위치는 Sazilly의 이론으로 더욱 강화되었다. Sazilly의 조사를 근거하여 첫 번째로 Furens댐(프랑스, 아치형 중력식, H=60m, 1861~1866년)을 건설했으며 지금도 이용하고 있다. 이 댐의 단면은 Sazilly가 개발한 연직계단 대신에 곡선을 주었는데, 상류측은 하나의 곡률반경으로 하고 하류측은 낮아지면서 3단계로 나누어 점차 곡률반경을 크게 하였다. 그러나 당시에는 상류측 인장응력과 잠재 양압력이 고려되지 않았다. 이로 인하여 프랑스의 에피날(Epinal) 부근에 있던 Bouzey댐(1895 파괴)과 알제리의 몇몇 댐은 양압력에 의해 파괴되었으며 그 이후에 이점을 댐 설계에 반영하게 되었다.

사진 6. Vyrnwy댐(영국, H=44m, 1892년) 한때 세계 최고 인공호수, 기초에 배수망을 설치하여 양압력을 감소시킨 첫 번째 댐

영국에서 1881~1892년에 건설한 당시 최대인 Vyrnwy 중력댐(H=44m / L=410m)은 기초에 배수망을 설치하여 양압력을 감소시킨 첫 번째의 댐이며 지금도 이용하고 있다. 하지만 영국은 19세기에 건설한 168개 댐 중 4개만이 중력댐이다. 영국은 19세기 호주에 많은 석축댐을 건설하였으며 세기가 바뀌면서 호주는 아치형댐 건설의 고장이 되었다.

중부 유럽에서도 여러 가지 목적으로 많은 중력댐을 건설하였다. 독일에서는 음용수댐(Otto Intze 시기, 1843~1904년), 오스트리아와 이탈리아는 홍수 조절과 산지하천의 조절용으로 그리고 오스트리아, 스위스, 유고슬라비아에서 뗏목 운반을 위하여 중력댐을 건설하였다.

19세기 후반에 역학적으로 설계이론(전도, 활동, 지지) 및 중앙 1/3 이론(W.J.M. Rankine)이 개발되고 1890년 포틀랜드시멘트를 이용한 콘크리트가 실용화되면서 중력댐은 물론 콘크리트댐이 급속히 발전하게 되었다. 초기에는 중력댐 횡단면의 상·하류측이 곡선형(Furens댐, 1866년)이었으나 점차 현대와 같이 삼각형단면으로 발전하였다.

건설재료로 쓰는 시멘트는 고대 이집트의 피라미드 건설에 사용된 것으로 보아 그 출현은 5,000년 전으로 알려져 있으나 당시의 시멘트 재료는 석회와 석고였다. 로마시대에 이르러서는 석회와 화산회와의 혼합물을 사용하기도 했지만 포틀랜드시멘트가 나오기까지 이렇다한 발전은 없었다. 포틀랜드시멘트의 특허는 1824년에 Joseph Aspdin(영국)이 획득하였다. 이어서 19세기 중엽에 콘크리트가 발명된 이후 철근콘크리트가 고안됨으로서 19세기 말엽에 오늘날의 콘크리트가 실용화되었다. 콘크리트의 등장은 건설재료의 혁명이었으며 20세기 전반기에 세계적으로 콘크리트댐 전성기를 이루게 하였다.

사진 7. Arrowrock댐(미국, 아치형중력댐, H=106.7m / 저폭 73m, 1915년)

사진 8. Grand Coulee댐(미국, H=168m, 1942년)

사진 9. Grande Dixence댐(스위스, H=284m, 1961년) 세계 최고(最高)의 중력댐

3) 19세기 말~20세기: 현대적인 콘크리트댐 출현

20세기에 들어 댐 건설에 획기적인 발전이 있었다. 19세기에 개발된 현대적인 콘크리트기술(영국인 J. C. Johnson 프랑스에 첫 시멘트공장건설, 1840년)과 철근콘크리트(프랑스인 Joseph Monier, 1867년 철망보강 화분제조로 최초 특허)의 실용화로 새로운 댐 시스템이 개발되었다. 중력댐에 석축댐의 시대가 가고 콘크리트댐의 시대가 온 것이다. 우리나라는 일제강점기에 최초의 대규모 댐인 한대리댐(발전용, 중력식, H=75.8m, 1932년)과 수풍댐(발전용, 중력식, H=106.4m, 1941년)을 비롯한 많은 콘크리트중력댐을 주로 북한지역에 건설하였다.

미국의 Arrowrock댐(H=106.7m, 저폭 73m, 1915년)은 당시 상상을 초월하는 높이의 아치형콘크리트중력댐이다. 이어서 Hoover댐(다목적, 아치형, H=223m / L=200m / 부피 336만m³, 1936년), Grand Coulee댐(다목적, 중력식, H=168m / L=1,272m / 부피 809만m³, 1942년) 등을 건설하였다.

콘크리트댐은 계산방법의 정교화, 건설재료의 발전, 월등한 안전성 등을 바탕으로 1961년 세계에서 가장 높은 콘크리트중력댐인 스위스의 Grande Dixence댐(H=284m)이 건설되었다. 사업규모를 기준으로 한 항목별 세계 최고 댐은 표 1과 같다.

표 1. 세계 최대의 댐 2003년 ICOLD 통계

항목		댐명	규모	형식	소재국가	준공
높이	흙댐	Rogun	335m	TE/ER	타지키스탄	1986
	록필댐	Alberto Ilerasc	243m	ER	콜롬비아	1989
	콘크리트중력댐	Grande Dixence	285m	PG	스위스	1961
	부벽댐	Antonivanovtzi	145m	CB/PG	불가리아	1975
	하굿둑	Coiselet	48m	BM/PG	프랑스	1971
	아치댐	Xiaowan(Yunnan)	292m	VA	중국	2010
	복식아치댐	Daniel Johnson(Manic 5)	214m	MV	캐나다	1970
여수로 용량		Sanxia(Three Gorges)	124.3천m³/s	PG	중국	2008
저수 용량	자체	Kariba	1,806억m³	VA	짐바브웨	1959
	Victoria호수	Owen Falls(※H=30m)	2,048억m³		우간다	1954
준공 시기		Bercial, El			스페인	100
발전시설 용량		Sanxia(Three Gorges)	1,820만kW	PG	중국	2008
관개면적		Xiaolangdi	26,666km²	ER	중국	2001
홍수 조절 용량		High Aswan	470억m³	ER	이집트	1971
이주민 수		Sanxia(Three Gorges)	113만 명	PG	중국	2008

주) TE: Earth dam, ER: Rock fill dam, PG: Concrete gravity dam, CB: Buttress dam, BM: Barrage dam, VA: Arch dam, MV: Multiple arch dam

2.2 필댐 기술발전의 개관

1) 19세기까지의 필댐: 차수벽은 뗏장, 설계는 직관적

세계 최초의 필댐은 B.C. 2550년 이집트의 Sadd-el-Kafara댐(TE&ER, H=14m)이다. 초기의 댐은 주로 흙댐 또는 흙 위에 돌을 쌓은 것이었으며 주로 용수공급, 양어장(식량공급용) 또는 홍수 방지 목적이었다.

독일은 16~17세기 중반까지 Harz 고원에 광산용으로 60개 이상의 흙록필댐을 건설하였으며 차수벽은 뗏장(두께 약 10cm, 엇갈리게 놓고 흙을 채우면서 다짐, 흙에 숯을 혼합하기도 함)을 이용하고 상류측 사면에 돌을 쌓아 보호하였다. 18세기 초 뗏장이 부족해 중력댐인 Odertteik댐(수심 17m, 1714~1721년)을 건설하기도 했으나 이후 약 200년 이상 큰 흙록필댐 건설은 없었다. 필댐은 지속적으로 발전된 것이 아니며 특히 축조기술은 토질역학의 발전에 근거를 두고 있다. 고대로부터 19세기까지 세계적으로 많은 필댐이 건설되었지만 흙과 돌의 취급은 항상 직관에 의했다. 근세기에 와서야 건설기술의 급격한 발전으로 필댐 건설을 위한 흙과 암석의 장점을 충분히 알게 되었다.

2) 20세기 전반기: 설계이론 및 대형장비 개발로 현대식 필댐 등장

필댐은 지하수리 시스템과 안전성에 대한 문제를 극복해야만 했다. 먼저 지하수리 시스템은 D. Bernoulli(1700~1782년, 스위스)와 L. Euler(1707~1783년, 스위스)가 수리학의 수학적 접근을 가능하게 한 뒤 1856년 H. Darcy(프랑스)가 댐과 그 지반을 통과하는 물의 흐름을 계산할 수 있게 하였다. 또한 1900년 이후 P. Forchheimer(독일)와 L. F. Richardson(영국)이 투수성 매체 속의 수압과 유속분포에 대한 Laplace 미분방정식의 개략 해를 구하는 도해법을 개발한 후에 실험적 방법이 나왔으며 오늘날 컴퓨터의 도움으로 수치해석을 할 수 있게 되었다. 그리고 1937년에 A. Casagrande는 흙댐의 계산에

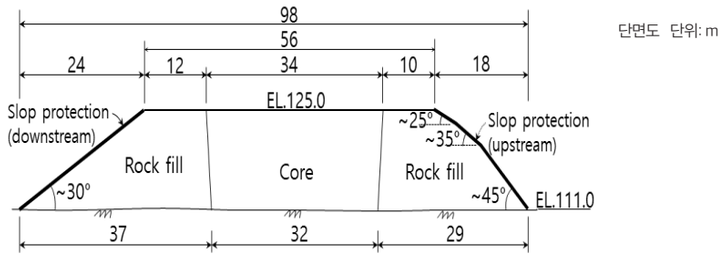


그림 2. Sadd-el-Kafara댐(이집트, H=14m, B.C. 2550년)

유선망을 처음 사용하였다. 침윤수량을 정하고 간극수압 분포를 알 수 있게 하였으며 침식에 대한 위험을 나타내는 수리기울기도 구할 수 있게 되었다.

다음으로 안전성 분석방법은 수리학보다 늦게 개발되었는데, 먼저 토질역학에 대한 이해가 있어야 했기 때문이다. K. Terzaghi(1883~1963년, 체코, 1925년 Soil Mechanics 저술)는 토질역학을 공학으로 확립하고 흙록필댐의 안정성 계산을 위한 이론적 관계를 제시하였다. 앞서 C. A. Coulomb(1736~1806년, 프랑스)과 W. J. M. Rankine(1820~1872년, 스코틀랜드)이 토압이론을 수립하였으나 댐 설계에 직접적인 기여는 하지 못했다.

수문통계학의 발달로 홍수 방어에 자신감을 같게 됨으로써 필댐을 안전하게 계획할 수 있게 되었으며 K. Terzaghi, R. R. Proctor, A. Casagrande, G. E. Bertram 등의 공적으로 토질공학, 최적함수비, 필터의 역할·법칙, 록필다짐공법 등이 개발되어 필댐 여건이 성숙되었다. 이와 같은 필댐 기술개발에는 미 공병단(USCOE) 및 미개척국(USBR) 두 기관의 공적 또한 크게 뒷받침되었다. 1930년대에 처음으로 흙댐 건설에 마찰원법 적용을 시작하였으며 오늘날 흙록필댐 설계는 마찰원법과 지하 수리학적 계산을 기초로 하고 있다.

1933년에 ICOLD총회에서 처음으로 안정성분석이 흙댐건설에 관련된다는 의견이 제시되었으며 1953년에 R. R. Proctor(미국, 1933년 최적함수비 발견)는 사면경사를 지반조건에 따라 정해야 한다고 주장하였다. 지반공학의 발전은 기본적으로 종래 콘크리트댐에서 흙록필댐까지 댐 건설공법이 확대될 수 있게 하였다. 이와 같이 흙댐과 존별 역할분담공법인 록필댐은 수문학 및 토질공학의 발전으로 조사계획, 설계 및 시공 기술이 개발됨과 아울러 토공장비가 대형화되어 대규모 토석축조시공이 가능하게 됨으로써 1940년대에 비로소 세계적으로 등장하였다.

3) 20세기 후반기: 현대적인 필댐 건설의 전성기

20세기 전반기의 콘크리트댐 전성기에 뒤이어 후반기에는 세계적으로 필댐 건설의 전성기를 이루었다. 필댐 형식은 오늘날 세계에서 가장 높은 타지키스탄의 Rogun댐(H=335m, 1986년)을 비롯해 일본 Miboro댐(H=131m, 1960년), 미국 Oroville댐(H=235m, 1968년, 2017년 2월 홍수로 인한 여수로 붕괴사고 후 새롭게 보강·복구함), 캐나다 Mica댐(H=243m, 1972년) 등이 건설되었으며, 우리나라에는 소양강 및 안동다목적댐, 청평양수발전소 상부댐, 삼랑진양수발전소 상·하부댐 등을 건설하였다. 프랑스는 예외적으로 중력댐이 우세하나 오늘날 세계의 댐 78%(2022년 현재)는 흙댐과 록필댐이다.

1892년 제5차 주운총회(파리)에서 많은 경험을 가진 영국과 미국 기술자가 필댐의 축조 가능한 높이를 최고 30m까지로 보았으나 현재 세계에서 가장 높은 댐은 필댐이다. 오늘날 필댐 높이의 증가는 재료의 강도와 변형성 사이의 관계에 대한 이론적 지식과 Terzaghi가 처음 보고한 간극수압에 관한 지식의 발전에 따라 가능하였다.

※ 국내 실적이 없는 나머지 댐 형식에 대하여는 생략함.

사진 10. Miboro댐(일본, H=131m, 1960년)

사진 11. Oroville댐(미국, H=235m, 1968년)

사진 12. Mica댐 (캐나다, H=243m, 1972년)

청평양수 상부댐(H=62m, 1980년)

삼랑진양수 하부댐(H=78m, 1985년)

무주양수 상·하부댐(H=60.7 / 42.6m, 1995년)

사진 13. ECRD로 건설한 양수발전소의 댐

3. 일제강점기의 댐 건설

일제강점기 동안 일제가 남농북공정책(식민지 수탈 정책)을 꾀하면서 수자원 개발은 오직 발전용댐과 농업용댐으로 진행되었다. 생·공용수공급, 홍수 조절 등 여타 목적은 고려대상이 아니었다. 수력발전용댐은 북한지역을 중심으로 집중 개발하였다. 3차에 걸친 수력조사결과 부존수력이 예상외로 풍부하며 경제적가치도 높은 것으로 판명됨에 따라 1930년대 이후 대규모 수력개발이 이루어진 것이다.

일제는 일찍이 명치유신(1876년)으로 서구문명을 도입해 20세기 초 수문학 및 수리학에 기초를 둔 하천개수와 수력발전기술을 펼쳐 우리나라의 댐 건설에서 그 기술역량을 발휘하였다고도 볼 수 있다. 당시 일본에서도 경험하지 못한 대규모 댐이었다. 1910년 당시 우리나라 발전시설용량은 1,065kW로 도시(서울, 인천, 부산)의 전등용으로 공급하고 있었으며 1914년에 평양, 대구, 원산, 지방도시 등 14개 지구로 확대되었다. 1920년대에는 소규모 디젤발전설비(발전시설용량 33,000kW, 일부 기력 포함)를 이용하는 실정이었다. 소규모 수력발전은 북한강 화천하(금강산)계 4개 발전소인 판유리(720kW, 1927년), 중대리(2기: 7,000kW, 1925년), 향천리(3,250kW, 1928년), 신일리(2,600kW, 1936년)로서 유역변경방식, 시설용량은 13,570kW이었다.

1930년대 이후에는 대규모 댐으로서 조선수전(주)(일본질소비료(주)의 계열회사, 1926년 1월 설립)가 1926년 4월 압록강 지류인 부전강(장진강 지류)에 한대리댐 및 발전소를 유역변경방식(동해)으로 착공한 것이 현대식 수력개발로서 최초다. 이로써 흥남에 대규모 질소비료공장을 건설하였다. 이어서 압록강 지류인 장진강에 갈전리댐(1938년, 장진강수전(주)-1933년 5월 설립해 1937년 4월 조선수력전기(주)로 개명) 등 유역변경방식(동해) 수력댐을 준공하였다. 이 전력은 조선송전(주)이 1935년 10월 평양으로 송전(154kV)을 개시하였다. 계속해서 조선수력전기(주)는 압록강 지류 허천강 계통(연두평댐 등 4개 댐)의 유역변경방식 수력개발을 1937년 5월에 착공하여 1943년에 완공하였다. 여기서 생산된 전력을 135km 떨어진 흥남까지 당시 동아시아 최고 전압인 220kV로 송전하였다. 위 3개 수계댐 개발과 병행해서 1940년에는 부령댐 건설 등으로 두만강 지류 성천에서 유역변경방식(동해)으로 부령수력을 개발하였다.

8·15(1945년) 당시 건설하다가 중단된 댐(표 2 및 표 3 참조)들을 보면, 강계수전(주)이 장진강 하류에서 강계수 쪽으로 유역변경방식 개발 중이던 댐 및 3개 발전소(총 218,900kW)와 압록강 지류 독로강의 댐식 수력발전소(86,100kW)가 8·15로 중단되었다. 그리고 두만강 지류 서두수에 유역변경방식에 의한 원봉댐 및 3개 발전소(총 308,400kW)는 조선수력전기(주)의 자회사인 북선수력전기(주)에 의하여 1942년 10월 착공되었으나 중단되었다.

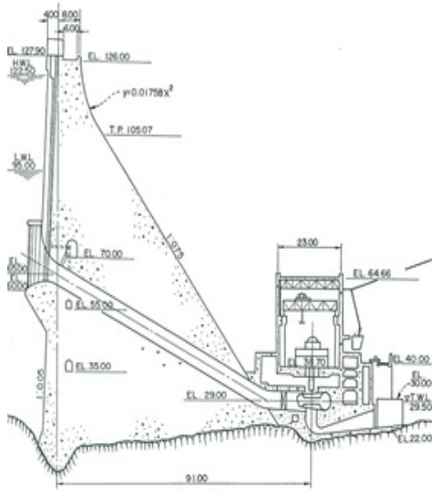


그림 3. 수풍댐(H=106.4m, 1944년)

또한 압록강 본류의 수풍댐의 수력발전소는 1937년 9월 착공하여 1941년 8월에 일부 발전개시를 시작으로 전체 시설용량 700,000kW 중 1945년 8월까지 600,000kW를 완성하였다.(표 3 참조) 1942년 6월에는 수풍댐 하류에 의주수력(200,000kW)을 착공하였으며, 1945년 7월에는 수풍댐 상류에 운봉댐(500,000kW)을 착공하였으나 각각 중단되었다.

참고로 모든 댐 및 발전소는 1943년 10월 조선전업(주)를 설립하여 국가가 관리하게 되었다. 따라서 기존의 발·송전회사는 모두 이 회사로 통합되었다.

표 2. 일제강점기 유역변경방식 댐 및 수력발전소(완성 또는 미완성)

구분	수계 (준공)	댐 규모						수로		총유효낙차 (m)	발전소	
		댐명 (준공)	형식	높이 (m)	부피 (천m³)	유효저수량 (백만m³)	유역면적 (km²)	수 (기)	길이 (m)		수 (기)	출력 (kW)
8.15까지	부전강 (1932)	한대리 제1양수장 제2양수장	PG ER ER	75.8 29.2 24.4	487.7 316.0 350.	484.0 8.4 4.5	794.0 7.2 13.2	4	45,972.0	1,027.8	4	200,700
	장진강 (1938)	갈전리 예물	PG PG	54.5 24.6	565.0 74.5	840.0 33.4	1,511.0 189.0	4	44,667.0	898.1	4	334,000
	허천강 (1943)	연두평 황수원 내중리 사초평	PG PG PG/TE PG	100.5 65.6 43.5 39.0	880.0 470.0 196.0 157.0	457.0 331.0 80.0 26.0	1,253.7 529.9 278.6 416.9	5 압력4 압력1	94,577.0 62,577.0 32,000.0	868.4	4	338.800
	두만강 성천수	부령 (1940)	PG	57.5	303.4	51.4	224.0	3	19,641.0	613.3	3	28,000
	북한강 화천하	판유리 외 (1936)	PG	26.7		11.1		3	7,812.0	407.2	4	13,570
	섬진강	운암 (1931)	PG	28.0				1	3,400.0	75.2	1	5,120
	보성강	보성강 (1937)	PG	11.8	42.0	4.7		1	2,203.0	83.6	1	3,120
	소계										21	923,310
미완성	장진강 (강계)	이상 (梨上)	PG	101.0	1,810.0	677.7	1,444.8	3	49,655.5	590.2	3	218,900
	두만강 서두수	원봉	PG	107.5	900.0	340.0	1,911.9	3	71,624.0	779.6	3	218.800
	섬진강	칠보	PG	64.0	470.0		763.0	1	7,531.0	154.0	1	28,800
	소계										7	466,500
합계											28	1,389,810

주) PG: Concrete Gravity ER: Rock-fill Embankment TE: Earth

유역변경방식수력발전소

수계	댐명	번호	형식	높이 (m)	발전 (천kW)	비고
부전강	한대리	①	PG	75.8		
	제1양수장	②	ER	29.2	200.7	
	제2양수장	③	ER	24.4		
장진강	갈전리	④	PG	54.5	334.0	
	메 울	⑤	PG	24.6		
허천강	연두평	⑥	PG	100.5		
	황수원	⑦	PG	65.6	338.8	
	내중리	⑧	PG/ER	43.5		
	사초평	⑨	PG	39.0		완성
두만강 (성천수)	부 령	⑩	PG	57.5	28.0	
북한강 (화천하)	판유리	⑪	PG	26.7	13.57	
섬진강	운 암	⑫	PG	28.0	5.12	
보성강	보성강	⑬	ER	11.8	3.12	
장진강 (강경계)	이 상 (붕 괴)	⑭	PG	101.0	218.9	
두만강 (서두수)	원 봉	⑮	PG	107.5	218.8	미완
섬진강	절 보	?	PG	64.0	28.8	

댐 방식 수력발전소

수계	댐명	번호	형식	높이 (m)	발전 (천kW)	비고
압록강본류	수풍	ⓐ	PG	106.4	600.0	
북한강본류	화천	ⓑ	PG	82.0	54.0	완성
	청평	ⓒ	PG	30.0	39.6	
압록강본류	수풍	ⓐ	PG	106.4	100.0	
압록강본류	운봉	ⓓ	PG	112.5	500.0	
압록강본류	의주	ⓔ	PG/ER	PG41.6 ER26.5	200.0	
압록강본류 (독로강)	독로	ⓕ	PG	56.0	86.1	미완
북한강본류	화천	ⓖ	PG	82.0	27.0	

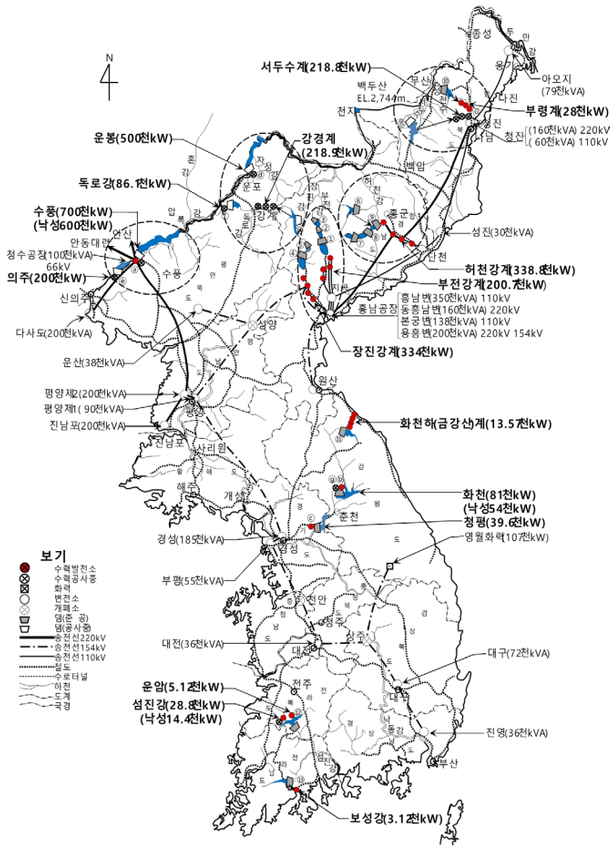


그림 4. 댐, 발전소 및 송전계통도(1945년 8월 현재)

아울러 38선 남쪽에서는 유역변경방식은 섬진강의 운암댐(칠보발전소)과 보성강의 보성강댐(보성강수력)을 건설했으며, 댐 방식으로는 한강에 한강수전(주)이 화천댐 및 청평댐 등 수력발전소를 건설하였다. 이 중 운암댐은 농업용수공급(동진강 유역 김제평야)을 겸하고 있었다. 유역변경방식으로 개발한 댐은 표 2이고, 댐 방식으로 개발한 댐은 표 3이다.

일제강점기 수자원개발사업의 특색을 보면 우선 경제적 수익성을 중시한 민간주도였다. 또한 댐, 발전소, 터널, 가설비 등 일본에서도 경험하지 못한 대규모 기계화 시공이였다. 발전시설용량을 한 예로 보면 당시 일본국 내 1기당 평균출력이 6,200kW(계획 중 7,250kW)에 불과한 반면 우리나라에서는 100,000kW를 상회하는 등 최초이자 최대 규모였다.

부문별로 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 기계수송설비

오지에 대량의 시멘트, 골재 및 중량물인 발전기기 등의 수송을 위하여 도로, 철도 등 신설은 모두 최초로 시도된 것이었다.

① 수풍발전소용 광궤(오늘날의 '표준') 철도 124km, 철교(사력채취용) 670m, 수풍-서울 간 약 500km 유선전화선(반송전화, 2회선) 가설

② 부전강 및 장진강 수력개발용 협궤철도 100km, 인클라인 설치

③ 허천강의 수력개발용 광궤철도 80km 신설

④ 댐 및 발전소용 공사용 송배전선 3~66kV

둘째, 댐 기술의 특징

① 부전강수력발전소(1926년 착공) 공사에 주교용 천공장비로 왜건드릴 사용.

② 장진강수력발전소(1934년 착공) 공사에 신형 전기쇼벨(종래의 스팀쇼벨 대신) 사용, 콘크리트혼합설비(3m³/배치) 사용.

③ 수풍댐 골재채취에 전기쇼벨(2입방야드, 8대)로 8,000m³/일 수송, 지브크레인(Jib Crane, 8.5톤) 6대를 사용해 콘크리트 최대 6,800m³/일 타설(1940년 5월 18일)

④ 의주댐의 만주 측 흙댐구간(L=1,542m) 심벽기초에 뉴매틱케이슨공법 적용.

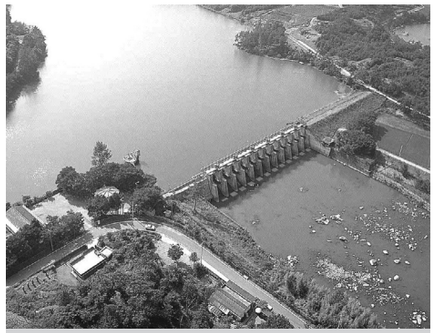
⑤ 부전강(동절기 영하 30~40℃)에서 콘크리트공사 가능기간은 6개월(5~10월)이나 수풍댐에서는 한중콘크리트타설(대상: 가물막이댐, 발전소, 취수시설, 옥외변전소)로 8개월간 시공. 골재(온돌)와 혼합수를 데우고 현장에 방한상옥 및 내부 스팀난방.

⑥ 수풍댐 콘크리트용 시멘트(소요량 850,000톤)

표 3. 일제강점기 댐 방식 댐 및 수력발전소(완성 또는 미완성)

구분	수계 (준공)	댐 규모						최대 사용수량 (m³/s)	유효 낙차 (m)	발전소 출력 (kW)
		댐명 (준공)	형식	높이 (m)	부피 (천m³)	유효 저수량 (백만m³)	유역 면적 (km²)			
8.15 까지	압록강 본류	수풍 (1944)	PG	106.4	3,231.0	7,600.0	45,535	990.0	93.0	600,000 (5호기 미완)
	북한강 본류	화천 (1944)	PG	82.0	817.0	541.0	4,145	131.3	70.6	54,000 (3호기 미완)
		청평 (1944)	PG	30.0	234.0	82.6	10,138	182.0	26.0	39,600
	소계									693.600
미완성	압록강 본류	수풍	PG	106.4	3,231.0	7,600.0	45,535	990.0	93.0	100,000
	압록강 본류	운봉	PG	112.5	3,450.0	3,000.0	17,211	550.0	115.3	500,000
	압록강 본류	의주	PG ER	41.6 26.5	448.7 3440.0	56.0	48,163	1,200.0	20.3	200,000
	압록강 본류 (독로강)	독로	PG	56.0	370.0	433.0	5,105	200.0	51.7	86,100
	북한강 본류	화천	PG	82.0	817.0	541.0	4,145	131.3	70.6	27,000
	소계									913,100
	합계									1,606,700

주) PG: Concrete Gravity ER: Rock-fill Embankment TE: Earth



보성강댐(H=21.7m, 1937년)

화천댐
(H=81.5m, 1944년, 6.·25 폭격)

청평댐(H=31m, 1943년)

사진 14. 일제강점기 남한의 주요 수력댐

공급용으로 자가용 시멘트공장을광복 오노다시멘트공장(평양) 구내에 설치하고 클링커 상태로 반입해 댐 현장에 분쇄설비 설치사용.

셋째, 수로기술의 특징

① 터널공사

가) 부전강수력발전소 제1수로터널(26.6km)에 작업갱(횡갱 4개, 사갱 3개, 수직갱 14개) 설치. 분수령 근처 수직갱 깊이는 150m

나) 장진강수력발전소 제1수로터널(23.6km)에 원형단면 채택

다) 부전강수계 수로공사부터 부동다이너마이트 연구 시작. 일부 화약을 수입(독일) 사용하다가 장진강수력발전소부터는 일본화약(주)에 제작시켜 사용

② 조압수조

가) 부전강 제1발전소(1930년)의 월류식 차동조압수조, 화천발전소(1944년)의 제수공조압수조 등 당시로서는 참신한 설계였음

③ 수압철관

가) 부전강수계 제1발전소(유효낙차 678.8m, 정격낙차 736.6m)의 낙차는 당시 세계 유수의 고낙차임. 폴란드제(페룸사) 거대한 수압철관[연장 2,833m, 내경 1,625~1,145mm, 총중량(4열) 12,000톤] 사용. 하부 고압부분의 철관은 밴디드 파이프공법(띠로 보강) 채택

나) 장진강 제1발전소 수압철관[유효낙차 407.1m, 연장 1,620m, 내경 1,850~1,500mm, 총중량(4열) 6,134톤] 제작에 일본(가와사끼중공업)이 고낙차에 도전해 최초 성공. 현장전기용접 연결부위 X선 검사

다) 부전강 제4발전소는 수압철관을 사용하지 않고 서지탱크 밑바닥에서 약 30m의 철근콘크리트 수직갱으로 대체

④ 문비 및 기타

가)당시 스루스 게이트(Sluice gate)를 많이 사용했으나 부전강수력발전소에서 처음으로 외국제 케터필러 게이트(Caterpillar gate) 취수문비 채택

나) 청평댐 여수로(경간 12m, 높이 10m)에 레디얼 게이트(Radial gate, 24문) 설치

다) 수풍댐에서 뗏목유하용 사수로 및 특수수문(수심 일정유지 조정용) 설치

넷째, 발전기용 기기

① 최대용량 기록품인 발전기기 사용(가급적 일제)

우리나라에서 채택한 발전기기는 대부분 최대용량인 기록품이었다. 부전강 제1발전소(최대출력 129,000kW)는 수압철관 페룸사(폴란드), 수차 포이스사(독일), 발전기 지멘스사(독일) 제품이었다. 다만 36,000kVA 용량 3상변압기는 일본 도시바 제품이었다. 1929년 부전강 제2 및 제3발전소부터는 모두 일본제품으로 충당하였다. 형식상 미국, 영국, 독일의 메이커들과 견적경쟁을 실시하였으나 다소 효율이 떨어지더라도 기술축적을 위하여 일본제품으로 결정하였다. 그러나 수풍댐의 발전기는 초대형 용량일뿐만 아니라 제작기간 문제 등으로 5대는 일본제품, 2대는 지멘스사 제품으로 결정하였으나 지멘스사 제품은 8·15까지 1대(5호기)는 도착하지 않았다.

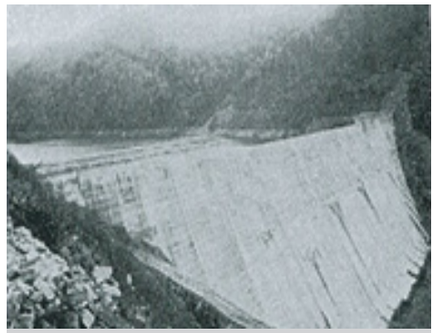
② 수차

가) 펠턴수차[Pelton wheel, 소유량 고낙차(300~1,700m)용]

- 부전강 제1발전소(유효낙차 678.8m, 33,000kW) 외제 4대 사용
- 장진강 제1발전소(유효낙차 407.1m, 38,500kW) 일제 4대 사용

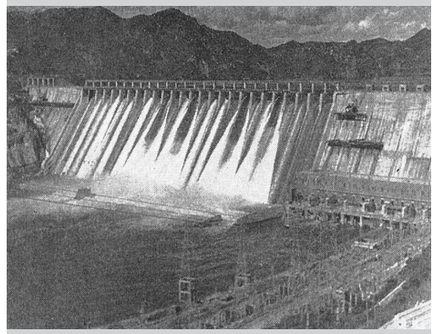
나) 프랜시스수차[Francis turbine, 일반적으로 수량이 많고 중간 낙차(25~300m)용]

- 부전강 제2발전소(1929년, 당시 일본 최대용량 22,700kW) 2대 사용
- 장진강 제2발전소(1935년, 최고낙차 310m, 당시 일본 최대용량 33,000kW) 4대 사용
- 강계수력 제1발전소(1940년, 최고낙차 400m, 당시 일본최대용량 46,000kW) 3대 사용



한대리댐(H=75.8m, 1930년)

갈전리댐(H=54.4m, 1936년)



수풍댐(H=106.4m, 1944년)

사진 15. 일제강점기 북한의 주요 수력댐

- 수풍발전소(당시 세계적으로 대용량 105,000kW) 1938년 발주

여기서 특기할 점은 고낙차임에도 프랜시스수차를 장진강과 강계수력에 사용한 사실이다.

다) 카플란수차(Kaplan turbine)

- 청평발전소(정격낙차 27.05m, 21,000kW) 2대 사용. 당시 일본 최대용량.
- 의주발전소(정격낙차 20.6m, 38,000kW) 6대 사용. 당시 일본 최대기록.

③ 발전기와 변압기

- 부전강 제1발전소(36,000kVA) 독일제품 4대, 제2발전소(36,000kVA) 일본제품
- 이어서 장진강 및 허천강수계 발전기도 전부 일본제품
- 수풍발전소 발전기(100,000kVA) 7대 중 5대는 일본제품, 2대는 독일제품
- 변압기

: 부전강 제1발전소(3상 36,000kVA), 장진강의 제1발전소(3상 45,000kVA)와 제2발전소(3상 60,000kVA), 허천강 제2발전소(3상 80,000kVA 2기), 수풍발전소(3상 100,000kVA 7기) 등 당시 일본제품 최대용량

- j2차 전압은 허천강발전소 및 수풍발전소에서 220kV 채택

④ 기타 전기설비

부전강 제2 및 제3발전소는 각각 전자동방식이었다. 당시 일본국 내에서는 2,000kW 규모의 자동화가 이루어진 단계로서, 우리나라에서 대용량 수차·발전기의 자동화운전에 의한 성력화(省力化)는 괄목할 만한 일이었다. 종전에는 발전기의 거버너의 운동에 벨트를 사용하고 있었으나, 수풍발전소에서부터는 벨트 대신 전기적 운동방식이 채택되었다.

⑤ 양수장 설치

부전강 제1발전소 본댐의 하류유역(下流流域) 하천유량과, 장진강 제1발전소의 하류유역 하천유량을 각각 50~60m의 양정으로 본댐에 양수하여 유역변경식으로 1,000m의 고낙차 발전을 하면 양수에 사용한 전력회수는 물론 발전 면의 큰 이득이 있었다. 양수펌프의 용량은 부전강수계 2개 지점에서 1,850kW 5대, 장진강수계 1개 지점에서 5,000kW로서 당시의 발전용 양수 펌프용량으로는 최대의 것이었다. 또한 부전강 제2양수장에서는 원격제어방식을 채택하였다.

다섯째, 송전선 및 변전소

부전강수계의 각 발전소에서 흥남(興南)의 조선질소비료(주)까지 송전(1929년 9월)에는 전압 110kV를 채택하고, 장진강수계에서 평양과 서울로의 송전(1935년 10월)에는 당시 일본 최고전압인 154kV를 채택하였다. 허천강수계에서 흥남비료공장 및 청진까지의 송전(1941년 6월)에는 동양 최초 및 당시 세계 최고표준전압인 220kV를 채택하였다. 그 후 수풍발전소에서 만주 측 또는 우리나라 측 송전에 전부 220kV의 전압이 채택되었다.

여섯째, 반송식 전화설비

부전강수계 개발의 초기부터 송전선을 이용한 전력선 반송전화(返送電話)를 가설하였다. 또한 장진강수계 개발에서부터는 일본 국산의 전력선 반송전화를 가설하였고, 허천강과 수풍댐 개발에서는 일본 최초의 220kV 송전선을 이용한 전력선 반송전화가설에 성공하였다.

4. 우리나라의 수자원 기술 도입 및 환경

우리나라는 8·15(1945년) 이전은 물론이고 1950년대까지 '다목적댐'이라는 용어가 생소했을 뿐만 아니라 건설된 사례도 없었다. 현재 다목적댐은 모두 21개다. 최초의 다목적댐인 섬진강다목적댐(1965년)은 1940년 4월 농업용댐으로 시작해 수차례 착공과 중단을 거듭한 우여곡절을 거쳐 다목적댐으로 준공하였다. 1936년 치수 목적으로 시작한 남강다목적댐(1969년)도 유사한 내력이 있다.

1960년대 후반에 착수한 4대강유역조사를 시작으로 1960년대부터 1990년대까지는 소양강다목적댐을 비롯한 댐 건설의 전성기로 '한강의 기적'을 이루는 토대를 마련하였다. 그러나 댐 개발과정에서 일부 이해집단과 외부 개입으로 혼란을 겪기도 했으며 수급자 결정에 특별했던 점도 있었다. 한편 2000년대 들어 성덕다목적댐(2015년)은 새로운 개발정책으로 기존의 농업용댐을 재개발한 첫 사례이기도 하다. 이와 같은 댐 건설 과정에서 우리나라 기술자들이 선진 댐 건설기술을 습득하고, 댐 운영관리기술을 포함한 수자원기술 자립을 할 수 있게 되었다.

다목적댐건설을 위한 법률로는 처음 하천법(1961년)의 특례를 규정해 「특정다목적댐법」(제1785호, 1966년 4월 23일)을 제정함으로써 선진공업 입국을 지향하게 되었다. 이 법에 의해 소양강다목적댐(1973년)이 최초로 착공되었다. 그 후 경제사회여건 변화에 걸맞게 이 법을 폐지하는 대신 「댐 건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률」(제6021호, 1999년 9월 9일)을 제정하였다. 다목적댐 건설 및 관리 업무는 한국수자원공사(1967년 11월 16일)가 전담하고 있다.

4.1 4대강유역조사와 댐 건설

정부는 1965년 9월 수자원종합개발10개년계획(1966~1975년)을 성안해 초창기 수자원개발의 길잡이 역할을 하는 중요한 계기를 마련하였다. 이 계획의 10여 가지 기본방향 중에서도 수자원종합개발을 위한 주요하천, 즉 4대강유역조사사업을 조속히 착수하는 것이 핵심과제였다. 당시에는 유역조사라는 어휘 자체가 생소할 때였다.

한강유역조사(1966년 4월~1971년 12월)와 낙동강유역조사(1966년 12월~1972년 3월) 사업은 건설부가 착수한 것을 도중에 한국수자원개발공사(한국수자원공사 전신)가 흡수 통합했고, 금강유역조사(1968년 3월~1972년 2월)와 영산강유역조사(1968년 7월~1971년 12월) 사업은 처음부터 한국수자원개발공사가 착수하였다. 이 유역조사는 우리나라 수자원 개발의 신기원을 이룬 것으로 해외 선진국의 기술 도입, 기술자 양성을 비롯해 수자원 조사기법 및 체계 등을 크게 발전시켰다.

4대강유역조사 결과에 따른 주요 핵심 건의사항으로 한강은 소양강 및 충주다목적댐의 조기 건설이, 낙동강은 안동다목적댐을 건설한 후 1980년대에 합천다목적댐과 낙동강하굿둑에 이어 임하다목적댐 건설 추진이 제기되었다. 금강은 대청다목적댐의 조기 건설과 용담다목적댐, 금강하굿둑, 수통 및 명천다목적댐 건설 등이 제기되었다. 영산강은 장성댐·담양댐·나주댐 건설로 유역상류부의 용수문제를 일부 해결하고, 영산강하굿둑 건설로 간석지 개발과 임해공업단지 용수공급을 하며, 1978년 이후 광주 일대의 생·공용수를 공급해온 동복댐을 증고하는 것을 비롯해 유역 특성에 따라 영산강과 섬진강을 종합한 광역수자원종합개발계획을 수립하는 것이 제기되었다.

4대강유역조사의 중간성과가 나오자 건설부는 수자원종합개발10개년계획을 수정했으며 이를 1970년 12월 27일 4대강유역종합개발계획(1971년~1981년)에 포함해 대용량 다목적댐과 하굿둑 등의 건설계획을 더욱 구체화하였다. 이 계획에 따라 소양강 등 많은 다목적댐과 하굿둑 등이 건설되었다. 당시 국가의 열악한 재정형편에도 초기에 4대강의 핵심 다목적댐인 소양강·안동·대청·충주다목적댐 등의 대형 다목적댐 건설을 과감하게 착수해 일거에 용수난을 해결하고 홍수 조절과 수력발전을 도모한 것은 우리나라의 경제성장에 엄청난 기여를 했다고 평가할 수 있다. 이렇게 대규모 댐을 건설한 후에는 중규모댐 건설을 추진하였다.

4대강유역조사사업을 발의하게 된 배경에는 당시 USOM/K(US Operation mission to Korea)의 Bernstein 처장의 역할이 컸던 것으로 전해지고 있다. 그는 박정희 대통령에게 "한국경제개발의 필수요건은 수자원 개발이며, 장래 엄청나게 늘어날 물 수요에 대비한 수자원조사의 시급성과 다목적댐 개발의 중요성을 강조"하는 조언을 하였다. 박 대통령이 이를 수용해 4대강유역조사를 착수하였다. 조사 초기에는 선진국들과 국제기구의 지원을 받았으나 점차 기술습득이 되면서 우리 기술자가 직접 수행하였다.

한강 유역은 1965년 건설부와 USAID(United States Agency for International Development) 공동으로 시행한 예비조사에서 지표수와 지하수를 포함하는 유역 전체에 대한 종합적인 조사가 필요한 것으로 밝혀졌다. 이에 따라 1965년 10월 우리나라와 미국정부 대표 간에 한강유역조사사업에 대한 협정을 체결하고, 미국정부의 특별지원을 얻어 1966년 4월

표 4. 4대강유역조사 개요

구분	단위	한강	낙동강	금강	영산강
계획기관		건설부	건설부	건설부	건설부
실시기관					
한국 측		한국수자원개발공사	한국수자원개발공사	한국수자원개발공사	한국수자원개발공사
외국 측		USBR/USGS/USACE	UNDP/ FAO	일본공영주식회사	-
조사기간		1966. 4~1971.12	1966. 12~1972. 3	1968. 3~1972. 2	1968. 7~1971. 12
조사비					
내자	백만원	273.6	269.0	177.4	99.7
외자	천$	1,750(USAID)	1,452(UNDP/SF)	750(PAC)	-
종사인원					
한국 측	M/M	5,928	2,579	1,320	928
외국 측	M/M	576	507	372	-
보고서 제출		1971.11	1972.8	1972.4	1971.12

미국 내무성 개척국(USBR: United States Bureau of Reclamation), 지질조사소(USGS: United States Geological Survey), 미 육군공병단(USCOE: United States Army Corps of Engineers) 소속의 미국 측 기술진과 우리나라 측 기술요원들이 공동으로 조사에 착수해 1971년 12월에 완료하게 되었다.

우리나라 정부는 1964년 낙동강유역조사를 위한 특별기금(UNSF)을 UNDP(United Nations Development Program)에 요청했고, UNDP에서는 사업집행기구로 FAO(Food and Agricultural Organization)를 선임하였다.

이에 따라 낙동강유역조사는 1966년 9월 우리나라 정부와 UND / FAO 간에 서명한 운영계획에 의거해 같은 해 12월에 발족되었으며, 1967년 3월 FAO에서 선정한 세계 각국의 전문가와 국내요원으로 조사단을 구성해 조사에 착수하여 1972년 3월 완료를 목표로 추진되었다. 이 조사의 외국인 기술진으로 FAO에서 선정한 각국 전문가들이 분야별로 참여해 눈길을 끌었다.

한강과 낙동강 유역조사를 시행하는 중에 금강 유역은 1968년 3월 한국수자원개발공사가 대일청구권자금을 기반으로 당시 낙동강유역조사에 참여했던 일본공영(NK) 기술진과 공동으로 조사에 착수해 1972년 2월에 완료하였다. 영산강유역조사는 상기 유역조사에 참여했던 자 등 국내 기술진만으로 1968년 7월에 착수해 1971년 12월에 완료하였다.

4대강유역조사의 주요특징 및 성과는 ① 열악한 국가재정에서도 우선적으로 막대한 투자 ② 전문인력 양성의 매우 중요한 계기 ③ '한강의 기적'을 일구어낸 경제발전의 기틀 ④ 이·치수사업의 기본적 로드맵 제시 ⑤ 유역종합수자원개발계획 최초 도입 계기 등이다.

4.2 수자원(댐) 기술도입의 경제·사회적 환경

1) 기술도입 측면

1-1) 선진기술 습득과 무관한 일제강점기

우리나라에 현대적인 댐이 도입된 것은 일제강점기부터이다. 일제가 2차에 걸친 하천조사와 3차에 걸친 수력지점조사를 통해 남한지역은 농업용수 및 소수의 수력발전용 댐, 북한지역은 대규모 수력발전용 댐을 위주로 개발하였다. 따라서 남한지역에는 최초로 농업용댐인 대아댐(아치식, H=32.7m, 1923년, 최초의 콘크리트댐이며 하류에 새 댐표건설로 수몰), 운암댐(H=28.0m, 1929년, 섬진강다목적댐 건설로 수몰)과 수력발전용댐인 화천댐(H=82.0m, 1944년), 청평댐(H=30.0m, 1943년) 등을 건설하였다.

북한지역의 수력발전용 댐은 1920년대부터 개마고원 지역에 위치한 압록강, 두만강 등 대하천 지류에 동해안 지역으로 유역변경식 발전방식을 채택하여 큰 낙차를 얻을 수 있도록 계획한 한대리댐(H=75.8m / 2,007,000㎾, 1932년)을 비롯하여 다수의 댐을 건설했고, 압록강 중하류에 댐식 발전방식으로 수풍댐(H=106.4m / 700,000㎾, 1944년) 등 대용량댐을 건설하였다.

이 시기 댐 건설 목적은 일제의 수탈과 식민지배 및 대륙침략에 필요한 병참기지화를 위한 식량증산과 전력생산 정책에 있었으므로 우리 기술자들이 선진기술을 습득할 수 없었다. 그러나 그 시기의 건설기록은 해방 이후 우리 기술자들의 기술습득에 참고자료가 되었다.

1-2) 1960년대부터 본격적인 선진기술 도입

8·15 이후 사회적 혼란과 6·25동란(1950년 6월~1953년 7월)을 격고 전재복구의 과정을 거치면서 각종 외국 원조사업이 시행되는 가운데, 비로소 선진기술을 접하고 해외연수프로그램 등을 통해 우리 스스로 기술을

배양할 기회를 가지기 시작하였다. 원조사업은 일부 농업용댐 개발과 전쟁으로 파손된 청평댐, 화천댐 복구 등이며 한편으로 괴산댐(콘크리트중력식, H=28m / 2,800kW, 1957년)을 우리 기술로 건설하였다.

1960년대부터 20여 년은 수자원 개발 측면에서 보면 가히 우리나라의 수자원개발기술을 획기적으로 전환·발전시킨 르네상스 기간으로 볼 수 있다. 국가적으로 경제개발정책의 틀 속에서 물을 자원으로 간주하기 시작했고 수자원이라는 용어를 처음 사용한 시기였다. 당시 정부의 큰 목표였던 중화학공업 육성을 뒷받침하기 위한 수자원확보방안과 함께 다목적댐 개발방식이 등장한 것이다. 수자원을 종합적이고 체계적으로 개발하기 위하여'수자원종합개발 10개년계획(1965년)'을 수립하고 「특정다목적댐법」(1966년 4월)을 제정하였으며 외국 선진기술에 의한 유역 차원의 대규모 '4대강유역조사'(1966~1972년)를 시행하였다.

우리나라에 대형댐 건설기술이 전무하고 재정형편도 대형댐 건설을 감당하기에 태부족인 상태에서 외국기술(일본, 미국, 호주, 네덜란드 등)과 많은 해외차관을 도입해 4대강에 소양강·안동·대청·충주다목적댐 등 초대형댐과 농업용인 장성댐 등 영산강 4개 댐을 비롯한 대규모댐을 과감히 착공하였다. 또한 낙동강하굿둑, 영산강하굿둑, 삽교천방조제 등을 건설하였으며 수력발전용 댐은 양수발전용댐을 위주로 건설하였다.

이들 댐이 완성됨에 따라 한강의 기적이라고 일컬어지는 우리나라 경제개발에 크게 기여하였다. 그 결과 설계 및 감리에 투입되어 외국 기술진으로부터 우리 기술자들이 전수받은 기술은 후에 댐 기술 자립의 기초가 되고 해외진출이 가능하게 되었으며 임하다목적댐(1993년) 이후 건설된 댐은 모두 우리 기술로 설계와 시공감리를 할 수 있게 되었다.

2) 경제·기술 성숙 및 사회적 측면

2-1) 열악한 경제사회 여건 및 정부재정

1960년대에 들어 전후복구사업에서 벗어났으나 4·19(1960년), 5·16(1961년) 등 국가적으로 대변혁을 거친 다음 정부의 경제개발정책으로 소양강다목적댐과 경부고속도로와 같은 국가기간시설을 이 시기에 건설한 것은 기적과 같은 일이었다.

경제·사회적으로 1960년대 후반까지 보릿고개가 있었고 1970년대까지 도로보수를 위한 자갈부역을 국민의 의무로 하였었다. 당시 1인당 국민총생산이 300달러 미만(1961년 85달러, 1971년 292달러)이었으며 1966년 국산 흑백TV(진공관식 19인치)를 최초로 생산했다. 1970년 전후까지 미국의 잉여농산물 원조(PL480) 물자(밀가루)로 일부 국토건설사업을 시행하고 있었으며, 서독에 광부(1963~1977년)와 간호사(1965~1976년)를 파견하고 있던 시기로서 자본과 기술뿐만 아니라 대규모댐 건설에 필요한 기자재와 중장비를 수입해야만 했다. 아울러 도로, 철도 등 국내 사회기반시설까지 매우 열악한 상황에 있었음에도 사업규모가 1967년도 정부예산(1,643억원)의 17.6%나 되는 소양강다목적댐에 대일청구권자금의 상당 부분을 투입해 건설했다는 것은 당시 경부고속도로와 함께 대단한 역사였다.

2-2) 고리체인 해외차관 등으로 댐 건설

이와 같이 1960년대 우리나라는 외국의 원조 없이는 스스로 나라살림을 꾸릴 수 없는 형편이었다. 댐 건설 등의 대형사업은 선진국에서 돈을 빌리지 않고서는 시행할 수가 없어 연리 3.5~10.5%인 높은 이자에 거치기간을 포함해 16~27년 상환조건의 차관을 들여왔다. 총사업비 중에서 차입금의 규모는 충주다목적댐이 약 47.5%, 합천다목적댐이 약 45.4% 이었다. 1990년대 초까지 7개 다목적댐에서 이처럼 불리한 조건으로 돈을 빌려 투자했다.

이 자금으로 한강 유역에 소양강, 충주 등 2개 다목적댐을 건설해 일찍이 한강 하류의 수해를 막고 용수를 확보·공급함으로써 수도권의 경제발전에 기여하였다. 낙동강은 안동다목적댐을 건설해 낙동강 연안의 수해 경감과 함께 부산광역시를 비롯한 김해·창원지역의 용수문제를 해결하였다. 1966년 가뭄 때 낙동강 진동지점의 하천이 메말랐던 문제(Q=0m³/s)를 우선적으로 해소한 것이었다. 금강 중류에는 대청다목적댐을 건설해 중부권 대전광역시와 청주시의 용수문제를 완전히 해결하였다. 이와 같이 시급한 물 문제를 일단 해소한 후에 전국적으로 수자원종합개발을 확대시행하였다. 한편 이때 도입한 각종 선진기술은 댐 건설 및 운영과정에서 댐 분야의 기술수준을 획기적으로 발전시켰다.

이와 같이 초기에는 차관도입이 절실했던 어려움 속에 시작했으나 점차 국가경제가 성장하게 되면서 임하다목적댐(1993년)을 마지막으로 차관도입 없이 댐을 건설할 수 있게 되었다.

이는 크나큰 탈바꿈이었다. 아울러 당시 단일공사 최대사업인 소양강다목적댐 공사를 활발하게 추진함으로써 타 산업분야(울산미포국가산업단지, 1962년 기공 등) 발전에도 파급효과를 가져온 것은 우리나라 경제발전의 시너지효과를 상승시킨 또 다른 큰 성과라고 할 수 있다. 한국수자원공사의 자체자금 투입도 점차 확대되어 장흥다목적댐(2007년)의 경우 총사업비의 약 76%까지 공사가 부담하는 등 공기업의 성장에 따라 그 역량도 한층 확대되었다.

표 5. 다목적댐 사업비의 차입금 내역

단위: 백만원

댐명	총사업비	차입금	비율(%)	차관(차입) 및 조건	비고
소양강	28,977	8,662	29.9	대일청구권자금 투입	
안동	41,465	8,806	21.2	ADB: 연리 7.5%, 7년 거치 후 20년 상환	균등
대청	144,492	21,457	14.85	OECF: 연리 3.5%, 7년 거치 후 13년 상환	〃
충주	555,047	263,526	47.5	1) 석유안정기금: 연리 10%, 5년 거치 후 15년 상환	내자
				2) 산업은행: 연리 10.5%, 5년 거치 후 10년 상환	〃
				3) IBRD차관: 연리 7%, 3.5년 거치 후 13년 상환	외자
				4) OECF차관: 연리 3.5%, 7년 거치 후 13년 상환	〃
				5) 산업은행: 연리 10.5%(변동금리), 5년 거치 후 10년 상환	〃
합천	262,114	118,972	45.4	1) OECF: 연리 4.5%, 7년 거치 후 18년 상환	외자
				2) 산업은행	내·외자
낙동강하굿둑	200,593	50,513	25.2	IBRD	외자
주암	370,633	37,849	10.2	1) OECF: 연리 4.75%, 7년 거치 후 18년 상환	외자
				2) 석유안정기금: 연리 5%, 5년 거치 후 10년 상환(225)	내자
임하	327,118	83,207	25.4	1) OECF: 연리 4.25%, 7년 거치 후 18년 상환	외자
				2) 기금	

주) 충주다목적댐 차입금263,526백만원: 내자 42,571+외자 220,955

표 6. 다목적댐별 재원 내역 단위: 억원

댐명	국고	차입금	자체자금 (공기업)	합계	댐명	국고	차입금	자체자금 (공기업)	합계
섬진강	21	-	-	21	횡성	1,819	-	24	1,843
남강(구댐)	66	-	-	66	부안	616	-	-	616
소양강	170	86	33	290	밀양	1,801	-	243	2,044
안동	104	88	223	415	용담	7,324	-	7,626(51%)	14,950
대청	1,188	215	42	1,445	보령	1,161	-	3,216*2	4,377
충주	1,115	2,635	1,800	5,550	장흥	1,607	-	5,072	6,679
합천	614	1,190	817	2,621	군위	1,550	-	1,839	3,389
낙동강하굿둑	479	505	1,022	2,006	김천부항	2,931	-	2,628	5,559
남강(보강)	6,391	-	2,281	8,672	청송성덕	1,349	-	1,349	2,698
주암	3,103	378	225	3,706	영주	-	-	11,315	11,315
임하	2,439	832*1	-	3,271	보현산	-	-	3,551	3,551

주) ① *1: 기금 575억원 포함(외자는 사업비의 7.9%) ② *2: 충청남도 418억원+한국전력공사 2,608억원+한국수자원공사 190억원 ③ 섬진강다목적댐에 1,547천달러를 투입했으나 KFX자금

표 7. 다목적댐별 건설장비 및 설비공급 단위: 대

댐명	장비 및 설비		댐명	장비 및 설비	
	관급	사급		관급	사급
소양강	51종 379대	-	충주	11종 59대	19종 53대
안동	-	56종 304대	합천	-	9종 24대
대청	10종 47대	37종 136대	주암	10종 70대	-

주) 관급장비: 무상 공급. 사급장비(공기업 소유): 유상 운영

2-3) 정부가 건설장비 공급

1960년대 이후 상당기간 우리나라 경제의 어려움으로 국내 건설회사가 대규모댐 건설현장에 필요한 중장비 및 설비를 확보할 수 있는 능력이 없었다. 이에 따라 정부에서 대일청구권자금과 차관자금으로 중장비 및 플랜트를 도입해 공급하였다. 덤프트럭(32톤, 15톤), 케이블크레인(20톤, 6m³), Power shovel(2m³), Bucket wheel excavator(760m³/hr) 등 국내에 없는 대다수 장비와 설비를 모두 발주자(정부)가 공급하였다. 처음 접하는 장비도 많았다. 관급(정부 소유)은 무상이고 사급(한국수자원개발공사 소유)은 유상으로 운영하였으며 내용연수를 마칠 때까지 이어지는 여러 댐 공사에서 활용하였다.

그 후 점차 국가경제가 발전하고 해외건설을 통해 건설회사의 역량이 급속도로 커지게 되면서 차츰 수

급자장비로 대체되다가 임하다목적댐(1985년 3월 착공) 건설에서부터 전량 수급자장비로 바뀌었다. 이와 같은 민간건설시장의 변화는 우리나라가 개발도상국에서 벗어나 KOICA(1991년 4월)를 설립해 후진국을 돕는 나라로 탈바꿈한 것과도 유사하다.

2-4) 댐 설계 및 시공감리

1970년대 초까지 댐 설계 및 시공감리는 거의 외국 용역회사에 의존하였다. 주로 일본공영(日本工營, NK)이 설계와 시공감리를 담당하였다. 그 후 설계는 우리나라 용역회사가 수행했으나, 시공감리는 한국수자원개발공사(1967년 11월 16일)가 다목적댐 건설관리를 전담함에 따라 용역회사와 공기업이 함께 시공감리를 수행하게 되었다. 설계의 경우 예외적으로 횡성 및 부안다목적댐을 한국수자원공사가 직접 수행하였다.

소양강다목적댐의 경우 공기업 외 용역회사로는 NK 단독으로 시공감리를 했지만, 안동·대청·충주다목적댐에서는 NK가 소수 우리나라 기술자들을 채용해 함께 수행함으로써 국내 기술자 양성의 전기가 되었다. 이후 합천·주암·임하다목적댐의 시공감리는 NK와 우리나라 용역회사가 공동으로 수급해 민간 댐 설계 및 감리 기술인력이 크게 늘어났다. 특히 남강다목적댐(보강)의 경우에는 국내 용역업체가 단독으로 시공감리를 하였다.

낙동강하굿둑의 경우에는 네덜란드의 용역회사인 NEDECO(Netherlands Engineering Consultants)가 설계와 시공감리를 전담했으며 충주다목적댐의 경우와 같이 Consulting panel을 운영하였다. 최근에는 발주자인 한국수자원공사가 책임감리를 전담하고 있다.

2-5) 댐 공사비보다 커진 보상비

댐 사업비는 공사비, 보상비, 기타(조사·설계·관리비 등)로 구분된다. 소양강과 안동다목적댐의 경우 공사비가 60% 내외이고 보상비가 30% 내외였으나 그 후 대청다목적댐부터 이 비율이 반대로 바뀌기 시작하였다. 남강다목적댐의 경우에는 보상비가 무려 80.5%에 이르렀고 공사비는 16.7%였다. 이와 같은 현상은 대규모 댐일수록 심해지는 경향을 보였다. 한편 주암·부안·보령·밀양다목적댐의 경우에는 공사비가 보상비보다 많았다. 이는 댐 입지여건상 보상 물건이 적은 경우이다.

표 8. 다목적댐과 시공감리

댐명	시공감리회사		발주자 감리	비고	댐명	시공감리회사		발주자 감리	비고
	국외	국내				국외	국내		
섬진강	NK	-	한전		충주*	NK	(삼안)	수공	NK 채용
남강(구댐)	NK	-	건설부		합천	NK	삼안	수공	공동수급
남강(보강)	-	도화	수공		낙동강하굿둑*	NEDECO	-	〃	환경관리 포함
소양강	NK	-	〃		주암	NK	삼안	〃	공동수급
안동	NK	(삼안)	〃	NK채용	임하	NK	삼안	〃	〃
대청	NK	(삼안)	〃	〃	여타 댐	-	-	수공	

주) NK: Nippon koei[日本工營(株)]. NEDECO: Netherlands의 용역회사. 한전: 한국전력(주). 수공: 한국수자원공사. 삼안: (주)삼안. 도화: (주)도화. *Consulting Panel 운영(IBRD 차관 조건)

표 9. 다목적댐의 사업비 구성

단위: 금액; 억원, ( )내; %

댐명	전체	공사비	보상비	기타
섬진강	21	15.0(71.4)	4.5(21.4)	1.5(7.2)
남강(구댐)	66	28(42.4)	30(45.5)	8(12.1%)
소양강	290	180(62.1)	77(26.5)	33(11.4)
안동	415	240(57.8)	131(31.6)	44(10.6)
대청	1,445	550(38.1)	781(54.0)	114(7.9)
충주	5,550	1,692(30.5)	2,737(49.3)	1,121(20.2)
합천	2,621	1,129(43.1)	946(36.1)	546(20.8)
낙동강하굿둑	2,006	1,358(67.7)	302(15.1)	346(17.2)
남강(보강)	8,672	1,446(16.7)	6,979(80.5)	247(2.8)
주암	3,706	1,528(41.2)	1,782(48.1)	396(10.7)
임하	3,271	909(27.8)	2,030(62.1)	332(10.1)
횡성	1,843	576(31.2)	1,201(65.2)	66.6(3.6)
부안	616	351(57.0)	224(36.4)	41(6.6)
밀양	2,044	1,129(55.2)	805(39.4)	110(5.4)
용담	14,950	4,012(26.8)	9,791(65.5)	1,147(7.7)
보령	4,377	2,771(63.3)	1,321(30.2)	285(6.5)
장흥	6,679	1,206(18.1)	5,072(75.9)	401(6.0)
군위	3,389	1,215(35.8)	1,727(51.0)	447(13.2)
김천부항	5,559	2,257(40.6)	3,105(55.9)	197(3.5)
성덕	2,698	861(31.9)	1,446(53.6)	391(14.5)
영주	11,315	3,020(26.7)	8,080(71.4)	215(1.9)
보현산	3,551	2,013(56.7)	1,342(37.8)	196(5.5)

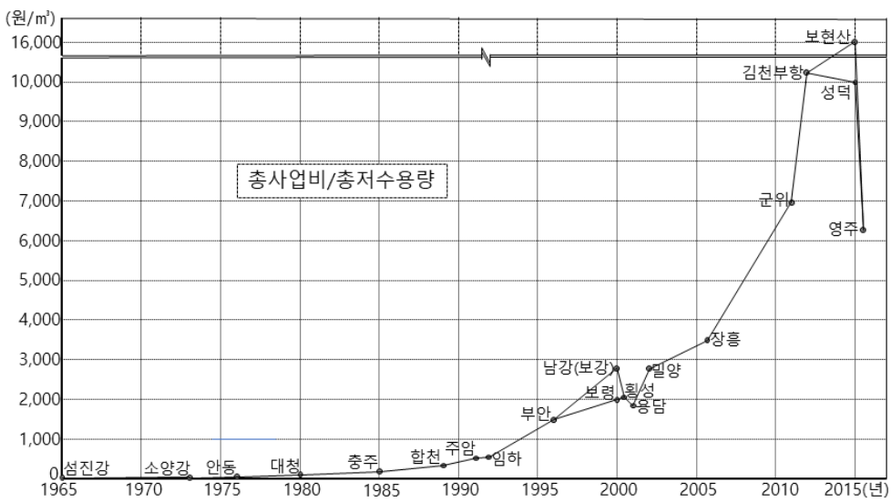


그림 5. 다목적댐 건설시기별 단위저수용량 대비 건설비 변동도

표 10. 다목적댐 단위저수용량당 건설비

댐명	총사업비 (백만원)	총저수용량 (백만m³)	단위건설비 (원/m³)	댐명	총사업비 (백만원)	총저수용량 (백만m³)	단위건설비 (원/m³)
섬진강	2,118	466	0.22	부안	62,060	41.54	1,494.70
소양강	31,870	2,900	11.00	밀양	204,433	73.6	2,777.62
안동	41,465	1,248	33.23	용담	1,495,003	815	1,834.35
대청	144,492	1,490	96.97	보령	437,650	116.9	3,743.80
충주	555,047	2,750	201.84	장흥	667,898	191	3,496.85
합천	262,114	790	331.79	군위	338,918	48.7	6,959.30
남강(보강)	867,165	309.2	2,804.54	김천부항	555,900	54.3	10,237.57
주암	370,633	707	524.23	성덕	269,827	27.9	9,883.77
임하	327,118	595	549.78	영주	1,083,800	181.1	5,984.54
횡성	184,333	86.5	2,131.02	보현산	355,053	22.11	16,058.48

주) 한국은행 소비자물가지수(총지수, 전국)는 2010년을 100으로 기준했을 때 1970년 5.383, 1980년 24.269, 1990년 44.543, 2000년 73.102, 2014년 109.040이다.

2-6) 단위저수용량당 다목적댐 건설비 폭증

소양강다목적댐의 단위저수용량 대비 건설비는 11원/m³이다. 그러나 충주 202원/m³, 부안 1,494.70원/m³, 보령 3,743.80원/m³ 등으로 크게 증가하는 추세이며 영주다목적댐의 경우에는 5,984.54원/m³, 군위 6,959.3원/m³, 성덕 9,883.77원/m³, 김천부항 10,237.57원/m³이고 보현산다목적댐의 경우에는 무려 16,058원/m³이다. 총사업비가 댐 건설 당시의 경상가격이므로 이를 그대로 비교하기에는 무리가 있지만 단가가 폭증하는 추세임에는 틀림없다. 그만큼 제반 댐 건설여건이 좋지 않다는 방증으로 수자원개발의 어려움을 보여주고 있다.

3) 기술적 도약 측면

3-1) 1990년대 말부터 친환경적인 댐 개발

댐 설계 및 건설기술이 어느 정도 괘도에 오른 1980년대 이후에는 경제발전에 따른 도시화·산업화 정책으로 각종 환경문제가 야기되었다. 1990년대 들어 대규모 다목적댐 건설에 반대여론이 일기 시작했으며, 가용수자원의 제한에 따라 많은 지역에서 수리권 분쟁이 발생하기 시작했고, 댐 건설도 중소규모 댐 위주로 건설하는 방향으로 전환하였다.

따라서 「특정다목적댐법」(1966년 4월)을 「댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률」(1999년 9월)로 변경해 댐 주변지역에 대한 지원 확대와 함께 자연생태환경에 조화롭도록 댐 배면(일부 또는 전면)을 녹화하고 댐 주변은 친수공간을 조성하는 등 문화적이고 친환경적인 댐을 건설하는 방향으로 발전시켜 나아가고 있다. 군위다목적댐(2011년)의 경우 최초로 여수로 슈트 부위에 가공 생물이동통로(Arch교 형식)를 설치하여 댐 좌·우안 생태축을 연결하였다.

3-2) 수계별 지능형통합수자원관리 기술개발 및 해외 건설수출

종래의 다목적댐별로 기상, 수문, 용수공급, 수력발

전, 홍수 분석 등 기능별 운영·관리시스템에서 정보통신기술을 기반으로 한 수계별 '지능형통합수자원관리의사결정툴킷'인 'K-HIT'(K-water Hydro Intelligent Toolkit, 2011년)을 개발하여 센터에서 실시간으로 원격운영·관리함으로써 효과를 극대화했다.

나아가 AI, 빅데이터 등 신기술을 활용한 스마트수자원관리시스템으로 첨단화를 추진하는 한편 세계적인 패러다임 선도를 위한 디지털 트윈(Digital twin) 기반 스마트수자원관리플랫폼인'Digital GARAM+'(2022년 3월)을 개발하여 K-HIT 시스템과 연계하고 있다. 따라서 그동안 민관이 축적한 수자원기술을 활용하여 해외 댐 건설 및 운영관리기술 수출에도 활발하게 기여하고 있다.

3-3) 댐 설계기준

댐 설계기준은 1979년 '하천설계기준(댐편)'이라는 이름으로 제정된 후 댐 설계기술의 향상과 사회적 변화 등을 반영하여 1982년(제1차), 1993년(제2차), 2001년(제3차), 2005년(제4차)의 4차례에 걸쳐 개정되었다. 그러나 빈번한 이상강우로 인해 나타나는 극심한 홍수와 가뭄, 강한 지진의 빈번한 발생 등 자연재해에 대비하기 위하여 댐의 안정성을 더욱더 확보하고자 2011년 설계기준을 보완·개정하였다.

이 중 크게 바뀐 것은 댐의 설계홍수량과 내진설계기준이다. 1970년 이전까지 설계홍수량을 콘크리트댐의 경우 100년 빈도 홍수량으로, 필댐의 경우 100년 빈도 홍수의 1.2배(대략 200년 빈도 홍수에 해당)로 적용해 왔으나, 소양강댐을 위시하여 안동댐, 대청댐 및 충주댐 등 대형다목적댐 설계를 외국 기술용역단에 의뢰하여 시행하는 과정에서 기준에 관계없이 용역단의 판단에 따라 정하였는 바 이때까지만 해도 빈도홍수를 채택하고 있었다.

2001년도의 설계기준 개정 시 설계홍수량으로 가능최대홍수량(PMF, Probable Maximum Flood)을 검토하기 시작하였다. 2005년 개정 시 PMF가 발생해도 댐이 월류하지 않도록 여유고를 두도록 하였으나 2011년(제5차) 개정 시에는 PMF를 의무적으로 적용하고 여기에 파랑고, 여수로 문비조작 장애 등을 감안한 여유고를 따로 두도록 정하였다. 이에 따라 대부분의 기존 다목적댐과 용수전용댐은 치수능력증대사업이라는 명분으로 여수로 방류능력 확보공사를 하였다.

한편, 이웃 일본지역에서 최근 발생한 대규모 지진의 영향으로 댐과 같은 주요구조물의 내진성능의 확보가 이슈화되었다. 그동안 1960년 이전에 건설한 댐에서 지진영향은 고려대상 밖이었다. 그러나 외국 기술용역단이 참여하면서 1970년대 초부터 소양강댐, 안동댐 및 대청댐 등 다목적댐에 정역학적 지진계수 0.05가 적용되기 시작하였다.

1980년 초에 시작된 충주다목적댐 설계 시에도 적용 지진계수는 0.05였으나 0.1을 적용했을 때 제체 내 응력 분포를 검토하여 제체가 안전하도록 일부 단면을 보강한 사례가 있다. 그러나 1995년 일본에서 발생한 고베지진을 계기로 수행된 국토해양부 연구과제 '내진설계기준연구'(1997년 2월)에서 제시된 내진성능기준을 참고하여 2005년에 개정한 댐 설계기준에 내진설계기준이 제시되었다. 이 기준에 따라 설계진도계수는 종래 0.05에서 0.154로 대폭 강화되어 현재 일본의 설계기준 수준으로 되었다.

이어서 2016년 국가건설기준 코드화정비, 2019년 기술융합 축조기술공법 및 하드필(Hardfill)댐 설계기준 추가, 2022년(제8차 개정) 지방상수도용댐 설계기준(소규모댐), 댐 유지관리 설계기준, 국가건설기술기준용어 반영 등 8차례 개정으로 기술선진화를 꾀하였다.

5. 우리나라의 수자원 개발

5.1 건국 초기의 댐 건설(1945~1960년)

일제강점기의 댐 및 수력개발은 우리나라 북쪽에 매우 편중되어 있었다. 따라서 1945년 독립 직후 우리나라 38°선 남쪽의 수력발전시설용량은 불과 62,440kW(남한의 총발전시설용량 199,000kW의 31%)뿐이었다. 이때 심각한 전력난 해소를 위해 6·25동란 중 당시 이승만 대통령의 특명으로 38°선 이북에 위치한 화천댐을 확보하기 위해 치열한 전투가 벌어졌다는 일화는 유명하다.

건국 초기(1948년~)에는 수력댐과 농업용댐을 중심으로 건설하였다. 일제강점기에 많은 댐 건설이 있었으나 우리 기술자가 기술을 습득할 수는 없었고 훗날 그 기록은 참고만 되었다. 독립 당시 전국의 급수인구는 약 200만 명(일제강점기에 조선총독부가 거의 일본인에 집중혜택)으로 수도보급률은 10% 미만이었다. 그 후 용수공급사업이 부진해 1960년 말의 급수보급률은 17%에 불과했으며 1인1일급수량은 99L이었다.

표 11. 1945년 현재 남한의 수력발전시설 현황

수계	발전소명	시설용량(kW)	가능출력(kW)	비 고
한강	청평	39,600(19,800×2대)	39,600	
섬진강	칠보	14,400(14,400×1대)	12,000	출력미달(신댐 미완성)
	운암	5,120(2,560×2대)	3,120	
	보성강	3,120(1,560×2대)	3,120	
제주	서귀포	200	200	
계		62,440	60,040	

표 12. 괴산댐 개요

구분	내용	구분	내용
위치	괴산군 칠성면	총저수용량	15백만m^3
하천	달천	유효저수량	5.7백만m^3
유역면적	671km^2	발전방식	댐식
댐 형식	콘크리트중력식	유효낙차	22.42m
댐 높이·길이	28.0m, 171m	설비용량	2,800kW
상시만수위	EL.135.65m	건설기간	1952~1957

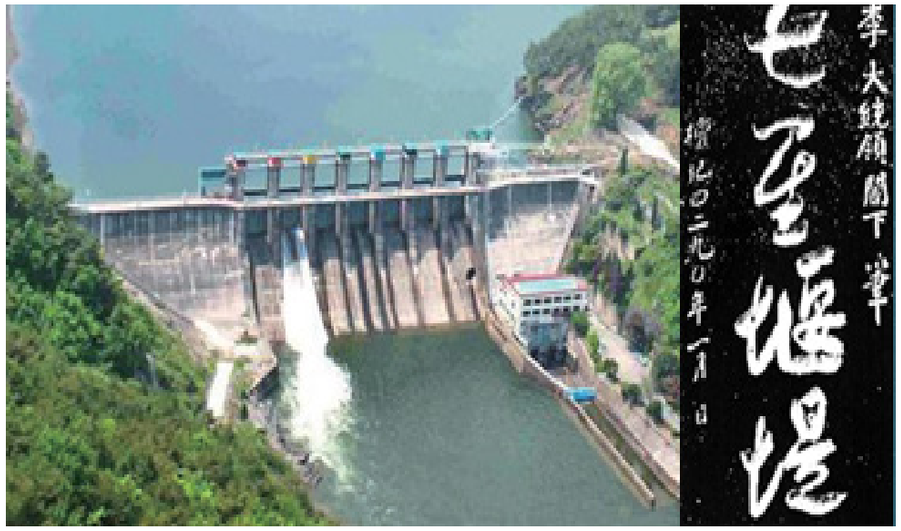


사진 16. 괴산댐(H=28m, 1957년)과 이승만 대통령 휘호 '칠성언제'

1) 수력댐

독립 직후에는 총수요전력량의 60~66%를 북한으로부터 수전했다. 그런데 북한이 우리나라 총선(1948년 5월 10일) 이후 5월 14일 12시 일방적으로 단전했다. 극심한 전력난 속에 설상가상 6·25동란(1950년)으로 남한 발전시설의 약 40%가 손상되었다. 청평댐은 수문 손상 및 발전소 총격이 있었으며 전쟁 중에 제1호기(1951년 10월)와 제2호기(1952년 5월)를 복구했다. 또한 칠보, 보성강 등의 거의 모든 발전소가 전재를 입었고 1951년 2월까지 복구했다. 한편, 북한에 속해 있었던 화천댐을 수복(1951년 8월)하여 제1호기(1952년 1월 복구)와 제2호기(1954년 7월 복구)를 가동(시설용량 54,000kW)하면서 전력난 해결에 실마리가 풀렸다.

6·25전쟁 후 미국 원조로 전재복구와 함께 국내 최초로 우리 기술자가 괴산댐(콘크리트중력식, H=28.0m)을 건설했다.(표 12 참조) 당시 콘크리트 타설은 이동식 믹서를 이용하여 용적배합으로 콘크리트를 생산하였다. 오늘날은 볼 수 없는 콘크리트 배합 방법이었다. 한편으로는 신규화력발전소도 건설하였다. 또한 FAO원조자금으로 화천3호기를 증설(1955년 11월, 27,000kW)하여 1961년 우리나라 총발전시설용량 365,780kW 중 수력이 39.2%인 143,480kW이었다.(표 14 참조)

2) 농업용댐

독립 이후 심각한 식량난으로 농업용댐 건설이 필수적으로 요구되었다. 그러나 국가재정결핍으로 일제강점기에 시행하던 공사도 중단·지연될 수밖에 없었다. 다행히 미국이 저수지 등 수리시설 확충을 위해 시멘트, 철근, 화약 등을 지원하고 1947년 미군정이 불도저 14대를 양여해 1948년부터 가동시켰다. 그러나 6·25동란으로 대부분의 농업용댐 공사가 중단되었다. 이와 같은 여건 속에서 예당저수지(유효저수용량 46.0백만m³, 관개 6,917ha, 1964년), 서암저수지(유효저수용량 89.4천m³, 관개 285ha, 1959년) 및 대천방조제(길이 6,170m, 관개 623ha, 1960년)를 건설하였으며, 1960년대까지 안성천 4대 저수지(금광, 고삼, 이동, 기흥)를 건설하였다.

표 13. 원주천댐 및 봉화댐 사업개요

구분		원주천댐	봉화댐
위치		강원도 원주시 판부면 신촌리	경상북도 봉화군 춘양면 애당리
하천 수계		한강-섬강-원주천-신촌천	낙동강-운곡천-월노천
댐 규모		H=46.5m, L=210m	H=41.5m, L=266m
형식		콘크리트중력식	중심코어형록필댐
총저수용량		1.8백만m³	3.1백만m³
사업효과	용수공급	-	1.26백만m³
	홍수조절용량	1.74백만m³	2.08백만m³
총사업비		841억 원	536억 원
시공회사		삼부토건(주) 컨소시엄	삼부토건(주) 컨소시엄
사업기간		2014~2023년	2014~2024년

사진 17. 원주천댐 조감도

사진 18. 봉화댐 조감도

5.2 경제개발 및 성장기의 댐 건설(1960년~)

1) 개관

우리나라는 1960년대부터 수자원기술 도입 및 개발로 국가경제개발을 이룩할 수 있었다. 우리나라 하천은 비교적(일본에 비해) 하상구배가 완만하고 연장이 길며 단면이 U형이므로 수자원 개발 입지여건이 좋아 대용량 다목적댐을 건설할 수 있는 장점이 있다. 이 점은 큰 다행이라고 할 수 있을 것이다. 현재 댐은 원주천댐과 봉화댐을 건설하고 있다.

1-1) 수력댐

1960년대 이후 수력댐(1960년대 후반부터 발전 단일목적댐 지양, 양수발전소 개발)은 한국전력공사(정부수립 후 전기3사 경성전기(주), 남선전기(주), 조선전업(주)를 통합하여 1961년 7월 1일한국전력(주), 1982년 1월 1일 한국전력공사로 변천)가 담당하고 있으며, 2001년 4월부터는 6개 자회사(한국남부발전(주), 한국동서발전(주), 한국남동발전(주), 한국중부발전(주), 한국서부발전(주), 한국수력원자력(주))를 두어 운영하고 있다.

정부의 경제개발5개년계획에 따라 춘천댐(1965년), 섬진강다목적댐 칠보발전소 증설(2호기, 1965년), 의암댐(1967년), 남강댐(구댐, 1971년), 울릉도의 추산(錐山)수력(1호기 1969년, 제2호기 1978년), 팔당댐(1973년) 등 수력발전용 댐을 건설하였다. 독립(1945년) 이후 1972년까지 수력전용발전시설의 증가추세를 보면 표 14와 같다. 다목적댐의 발전시설을 포함하여 1980년 말 우리나라 총발전시설용량은 9,391,000kW로 대폭 증가했는데 이 중 수력은 1,157,000kW로 12%를 차지한다.

1970년대 중반 들어 정부는 수력개발을 추진하는 한편 원자력발전소 건설을 위한 인적 물적 준비를 하였으며 1970년대 후반 두 차례에 걸친 석유파동을 계기로 기저부하설비도 유전소화력(油專燒火力)으로부터 원자력 및 석탄화력 주도형으로 계획을 전환하였다. 따라서 1978년 4월 우리나라 최초의 고리원자력 1호기가 상업운전에 들어감으로써 우리나라에서도 본격적인 원자력시대가 개막되었다.

아울러 지금까지 댐 및 발전소를 건설하는 데 있어서 외국의 기술과 기자재에만 의존하던 외국주도의 턴키방식에서 벗어나 국내주도형으로 과감한 전환을 시도하여 기술축적과 기자재의 국산화를 크게 촉진하였다. 이 시기에 안흥소수력(횡성군, 450kW, 1978년) 증설, 추산소수력(울릉도, 200kW, 1978년) 증설, 청평양수발전소(400,000kW, 1980년) 등이 각각 운전을 개시하였다. 제4차 전원개발5개년계획(1977~1981) 기간 중에 건설한 청평양수발전소(1980년)는 우리나라 최초의 양수발전소이다. 이

표 14. 수력전용발전설비 증가추세(1945~1972년) 단위: kW

구분	1945년	1961년	1966년	1967년	1968년	1971년	1972년
화천	-	81,000	81,000	81,000	108,000	108,000	108,000
춘천	-	-	57,600	57,600	57,600	57,600	57,600
청평	39,600	39,600	39,600	79,600	79,600	79,600	79,600
칠보	14,400	14,400	28,800	28,800	28,800	28,800	28,800
운암	5,120	2,560	2,560	2,560	2,560	2,560	2,560
보성강	3,120	3,120	3,120	3,120	3,120	3,120	3,120
괴산	2,600	2,600	2,600	2,600	2,600	2,600	2,600
의암	-	-	-	45,000	45,000	45,000	45,000
남강	-	-	-	-	-	12,600	12,600
서귀포소수력	200	200	200	200	200	200	※폐지
추산소수력	M/M	-	-	-		1,200	1,200
합 계	65,040	143,480	215,480	300,480	327,480	341,280	341,080
비율(%)	-	100	150	209	228	238	238

주) 단, '남강'은 다목적댐.

표 15. 주요 수력발전용 댐 건설 현황 (2012년 현재)

유역	하천명	댐명	형식	높이 (m)	길이 (m)	총저수용량 (백만m³)	발전용량 (kW)	준공 (년)
한강	방대천	양양양수댐(상)	CFRD	95.5	335	4.93	1,000,000	2006
	후천	양양양수댐(하)	PG	53.0	247	10.31		
	무명천	청평양수댐(상)	ER	62.0	290	2.68	400,000	1980
	북한강	의암댐	PG	23.0	273	57.52	45,000	1967
	북한강	청평댐	PG	31.0	407	82.60	79,600	1944
	북한강	춘천댐	PG	40.0	453	61	57,600	1965
	북한강	팔당댐	PG	29.0	575	18	80,000	1974
	북한강	화천댐	PG	81.5	435	658	108,000	1944
	달천	괴산댐	PG	28.0	171	5.72	2,600	1957
	송천	도암댐(강릉)	ER	72.0	300	51.4	82,000	1991
낙동강	금곡천	예천양수댐(상)	CFRD	75.0	620	6.98	800,000	2012
	용두천	예천양수댐(하)	CFRD	63.0	535	9.08		
	길안천	청송양수댐(상)	CFRD	89.8	400	7.49	600,000	2006
	용전천	청송양수댐(하)	CFRD	57.0	302	10.13		
	반천	산청양수댐(상)	CFRD	86.9	386	6.37	700,000	2001
	대내천	산청양수댐(하)	CFRD	70.9	286	7.37		
	심곡천	삼랑진양수댐(상)	ER	88.0	269	6.46	600,000	1985
	안태천	삼랑진양수댐(하)	ER	78.0	529	10.89		
금강	무명천	무주양수댐(상)	ER	60.7	287	3.39	600,000	1995
	괴목천	무주양수댐(하)	ER	42.6	234	6.40		
섬진강	보성강	보성강댐	ER	11.8	273.8	4.69	3,120	1937
합계							5,155,920	

주) TE: Earthfill embankment ER: Rock-fill embankment PG: Concrete Gravity CFRD: Concrete Faced Rockfill Dam

어서 삼랑진양수발전소(1985년), 무주양수발전소(1995년), 산청양수발전소(2001년), 양양양수발전소(2006년), 청송양수발전소(2006년), 예천양수발전소(2012년) 등의 순으로 지금까지 7개 양수발전소를 건설하였다. 각각 상부댐 및 하부댐이 있으나 이중 청평양수발전소는 상부댐만 건설하고 하부댐은 기존 청평호(청평댐)를 활용하여 개발하였다. 수력발전용 댐 건설은 다목적댐을 건설하기 시작한(1960년대) 다음부터 양수발전소 건설에 국한하였다.

이와 같이 적극적인 수자원 개발로 1961년 143,480kW이었던 수력은 다목적댐의 발전시설을 포함하여 1980년 말에는 1,157,000kW(우리나라 총발전시설용량 9,391,000kW의 12.3%), 1997년 말에는 3,115,000kW(우리나라 총발전시설용량 41,042,000kW의 7.6%)이며, 2012년 말에는 6,446,000kW(우리나라 총발전시설용량 81,806,000kW의 7.9%)로 증가하였다.

1-2) 다목적·생·공·농업용댐, 하굿둑, 방조제 및 다기능보

현재 다목적댐 21개, 주요 생·공용수전용댐 60여 개(한강 5, 낙동강 23, 금강 9, 영산강&섬진강 24), 농업용수전용댐 1,180여 개를 건설하였다. 또한 하굿둑 3개(낙동강, 금강, 영산강) 및 방조제 13개(남양방조제, 1973년 등)를 건설하였으며, 2011년 댐설계기준(PMF 의무적용)을 변경함에 따라 25개 댐을 대상으로 치수능력증대사업을 시행하여 대부분 완공하였다.

한편, 2009년 2월 '4대강살리기기획단(후에 추진본부로 개칭)'을 설치하여 4대강에 보를 설치하였다. 주요내용은 다기능 보 16개, 관개용댐 증고 96개, 신규댐 건설 2개(영주댐, 보현산댐), 기존 댐 저수지를 연결한 운영개선 1개소(안동댐↔임하댐), 낙동강하굿둑 배수문증설 1식, 하도준설 1식, 홍수조절지 2개소(화순, 담양), 노후제방보강 620km, 환경기초시설 1,618개소, 비점오염원대책 199개소, 생태복원사업 1식, 자전거길 1,728km, 4대강지천(지방하천) 정비 367개소 2,141km, 금강 및 영산강의 뱃길복원 147km 등이다. 특히 생태복원사업, 자전거길 등에는 섬진강을 포함하고 있으며, 2012년까지 대부분 마무리하였다.

1961년 이후 적극적인 수자원개발로 1980년 말에는 급수보급률이 1960년 말 16.8%에서 54.6%로 늘어났고 1인1일급수량도 99L에서 256L로 늘어났다. 나아가 1997년 말에는 급수보급률 84.5%, 1인1일급수량 409L, 2012년 말에는 급수보급률 98.1%, 1인1일급수량 332L가 되었다. 77L가 감소한 것은 노후급수관 교체와 정부의 수요관리 노력 등에 기인한 것으로 보인다.

이상 각종 용도별 댐 및 국가경제사회 기여도 등을 개관하여 보았으며, 다음은 다목적댐을 포함한 댐 형식별 건설 및 기술개발현황을 중심으로 살펴보고자 한다.

2) 콘크리트댐

2-1) 콘크리트중력댐

괴산댐(용적배합, 1957년) 이후 춘천댐(1965년) 건설에서 중량배합기술을 최초로 도입하였으며 대청(1980년) 및 충주다목적댐(1985년)부터는 자동중량배합으로 기술이 발전하였다. 팔당댐(발전용, 1973년)에서는 최초로 셀식가물막이공법을 채택하였다.

충주다목적댐은 현대적인 콘크리트중력댐 기술을 처음 도입한 댐으로서 많은 기술발전에 기여했다. 그리고 합천다목적댐(1989년)에서부터 그동안 외국 용역단의 도움을 받았던 댐 설계 및 감리를 우리 기술자가 주도하기 시작하였다. 농업용 콘크리트댐으로는 희소한 미호댐(진천농다리 1km 하류 좌안 500m 초평천)은 구댐(초평댐, 1949년) 2km 하류에 신댐(H=19.4m / L=174m, 1985년)으로 건설하였으며 말굽형 갤러리와 매설계기를 설치하였다. 보현산다목적댐(2014년)은 처음으로 종래와 달리 아치형콘크리트중력댐을 ELCM공법으로 건설했다. 또한 댐 안정성과 직결되는 양압력을 줄이기 위해 설치한 기초배수공의 배수량을 콘크리트댐체 내 여타 누수량과 완전히 분리하여 측정할 수 있도록 개선하였다. 세계에서 가장 높은 콘크리트중력댐은 스위스의 Grand Dixence댐(H=285m, 1962년)이며, 우리나라에서는 충주다목적댐(H=97.5m, 1985년)이 가장 높다.

사진 19. 팔당댐(셀식가물막이, H=29m, 1973년)

사진 20. 미호댐(농업용, H=19.4m, 1985년)

표 16. 1945년 이후 건설한 콘크리트중력댐

댐명	용도	형식	높이 (m)	길이 (m)	발전시설 (kW)	총저수용량 (백만m³)	하천	준공 (년)
괴산	발전	CGD	28.0	171.0	2,800	15.0	달천	1957
섬진강	다목적	CGD	64.0	344.0	34,800	466.0	섬진강	1965
춘천	발전	CGD	40.0	453.0	62,200	150.0	북한강	1965
의암	발전	CGD	23.0	273.0	48,000	80.0	북한강	1967
팔당	발전	CGD	29.0	575.0	120,000	244.0	한강	1973
충주	다목적	CGD	97.5	447.0	400,000	2,750.0	남한강	1985
미호	농 업	CGD	19.4	174.0	-	13.87	초평천	1985
합천	다목적	CGD	96.0	472.0	100,000	790.0	황강	1989
군남	홍수조절	CGD	26.0	658.0	-	71.6	임진강	2011
보현산	다목적	CGD(아치형)	58.5	250.0	170	22.1	고현천	2014
성덕	다목적	CGD	58.5	274.0	230	27.9	보현천	2015
한탄강	홍수조절	RCCD	83.5	690.0	-	270.0	한탄강	2016

주) CGD: Concrete Gravity Dam, RCCD: Roller Compacted Concrete Dam

사진 21. 충주다목적댐(H=97.5m, 1985년)

사진 22. 보현산다목적댐(H=58.5m, 2014년)

표 17. 댐 콘크리트(Ⅰ&Ⅱ종) 시방배합(중량)

구분	종류	시멘트	$\int ck$ (kg/cm²)	굵은 골재 (mm)	Slump (cm)	Air (%)	S/a (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	W/C (%)	S (kg/m³)	G(kg/m³) 20~5	40~20	80~40	150~80	계	포조리즈 No.8A₆ (g/m³)
대청	F	Ⅰ종	120	150	4±1	3±1	25	105	170	62	531	483	322	403	403	1,611	425
	E	Ⅰ종	160	150	4±1	3±1	23	104	208	50	482	489	326	408	408	1,631	520
충주	A	Ⅰ종	120	150	4±1	3±1	25	99	152	65	549	455	387	404	438	1,684	380
		Ⅱ종	120	150	4±1	3±1	25	94	145	65	554	458	391	408	442	1,699	363
	B	Ⅰ종	180	150	4±1	3±1	24	98	178	55	522	457	389	406	440	1,692	445
		Ⅱ종	180	150	4±1	3±1	25	94	171	55	548	454	387	404	437	1,682	428

주) ① F, A: 내부콘크리트, E, B: 외부콘크리트 ② Ⅰ종: 보통포틀랜드시멘트, Ⅱ종: 중용열포틀랜드시멘트 ③ 시멘트사용: 대청 Ⅰ종, 충주 Ⅱ종(Ⅰ종은 비교용) ④ 시멘트비중: 대청 3.14 , 충주 3.14 ⑤ 잔골재 비중: 대청 2.62, 충주 2.67 ⑥ 포조리즈량: C×0.25% ⑦ 관리시험 Air값(wet screening 후): 4±1

콘크리트중력댐을 건설하면서 축적한 주요 기술은 다음과 같다.

첫째, 기계화시공으로서 대청 및 충주다목적댐에서 케이블크레인(20톤, 6m³, 2기)으로 댐 콘크리트를 타설하고, 합천다목적댐은 대용량 지브크레인(13.5톤, 4.5m³, 3기)으로 타설하였다.

둘째, 충주다목적댐(1985년)은 중용열포틀랜드시멘트(Ⅱ종 시멘트)를 최초로 주문 생산하여 축조함으로써 시멘트산업발전에 기여하였으며 댐 콘크리트 배합설계, 콘크리트혼합설비(120m³/hr, 2기)에 자동계량 및 기록, 배출, 혼합, 방출장치 설치, 국내 최초로 댐에 강재거푸집 사용, 케이블크레인 타설, 파이프쿨링, 골재냉각 등 선진화된 기술로 매스콘크리트 시공기술의 신기원을 이룩하였다.

셋째, 댐 계측기기로서 처음으로 댐건설 중 및 준공 후 안정과 유지관리를 위하여 Thermometer, Strain meter, Stress meter, Non stress meter, Pore pressure meter 등 매설계기와 Uplift measuring apparatus, Plumb line, Switch box 등을 설치하였다.

넷째, 여수로 설계기술을 선진화하여 충주다목적댐을 시작으로 슈트부위에 공기흡입장치를 설치해 고속흐름에 기술적으로 대비하였다.

다섯째, 충주다목적댐의 우안 부위 553만m³에 달하는 랜드슬라이딩 지반 토석제거와 그 사면처리공법은 새로운 성공사례로 이후 보령다목적댐에서 그 기술을 활용하였다.

여섯째, ELCM(Extended Layer Construction Method)을 보현산다목적댐에서 최초 도입하였으며 줄눈(아연도강판 t=0.27mm, 15m 간격)은 진동줄눈삽입기로 설치하고 기초갤러리를 프리캐스트 제품으로 시공하였다.

일곱째, 수차발전기 조립 및 설치기술의 자립을 이루었다. 댐 건설기술이 축적됨에 따라 1980년대 중반부터 수차와 발전기를 우리 기술자가 직접 분해, 조립, 설치할 수 있게 되었다. 따라서 1986년 최초로 이 기술을 전문으로 하는 민간기업이 창립되었다.

여덟째, 섬진강다목적댐 재개발사업(2015년)에서는 댐의 하류용수공급설비를 확대(D=0.3m, 최대 1.0m³/s→ D=2.0m, 최대 22.0m³/s)하기 위하여 수중가물막이공법 및 Shield jacking method로 댐체에 터널을 뚫어 수압철관 및 소수력발전소를 설치하였다. 우리나라에서 처음이며 특수한 사례이다.

아홉째, 낙동강하굿둑(1989년)은 심도 50~60m인 퇴적층 위에 건설하였다. 가물막이의 사면 안정을 위해 Deep well 공법으로 지하수위를 저하시켰고 장대강관파일 기초시공(직경 608mm, 두께 18mm, 길이 40m), 경간 50m급 PC박스거더형 교량설치 및 박스거더형 보에 레이디얼 게이트를 힌지로 정착·설치한 것 등은 새로운 공법이었다. 4대강사업 일환인 하굿둑 증설구간(2012년)에는 레이디얼 게이트 폭이 95m로 우리나라에서 가장 크다. 또한 이 일대는 우리나라 최대의 철새도래지로서 국가가 지

차관사업과 Consulting panel 운영

산업기지개발공사(전신: 한국수자원개발공사, 한국수자원공사로 승계)는 충주다목적댐의 계획·설계·시공감리 등을 수행하기 위해 1978년 5월 일본공영(주)과 용역계약을 체결하였다. 또한 세계은행(IBRD) 차관협정서(제3.03조)에 의거해 용역회사가 작성한 설계서를 검토·승인해 안전하고 경제적인 댐 설계를 지원하고자 세계은행이 추천하고 공사가 동의한 3인 즉 지질전문가, 콘크리트전문가, 설계전문가 등으로 Consulting panel을 구성했다.

Panel은 용역회사가 제출한 설계검토 외에 건설기간 중 발생하는 설계변경사항 및 주요 현안문제에 대해 공사측과 협의하고 Panel의 의견을 보고서로 제출하였다. Panel 회의는 1978년부터 1985년까지 총 13회에 걸쳐 소집되었다. 우안 Land Slide 처리문제로 지질전문가가 3회에 걸쳐 단독 내한해 제출한 보고서 3권을 포함해 총 16권의 보고서를 제출했으며 1회 회의는 8~11일간이었다.

이들의 해박한 지식과 광범위한 경험을 바탕으로 댐 건설과정에서 제기된 많은 난관 특히 랜드슬라이드 굴착, 콘크리트 품질관리, 여수로 수문설계, 발전소 콘크리트의 철근 배치분야에서 탁월한 해법을 제시함으로써 원활한 공정추진은 물론 공사비 절감효과가 있었다. 이들이 전수한 신기술은 우리 기술자의 기술향상에 크게 기여하였다.

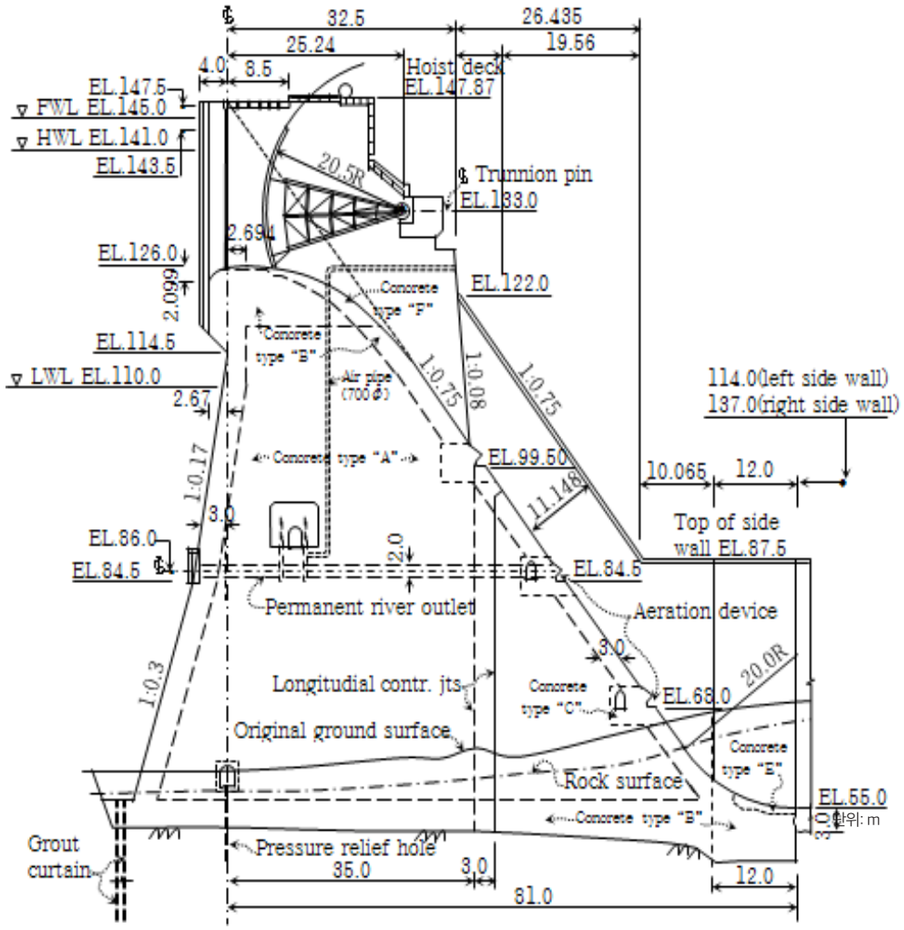


그림 6. 충주다목적댐(H=97.5m, 1985년) 횡단면도

사진 23. 낙동강하굿둑

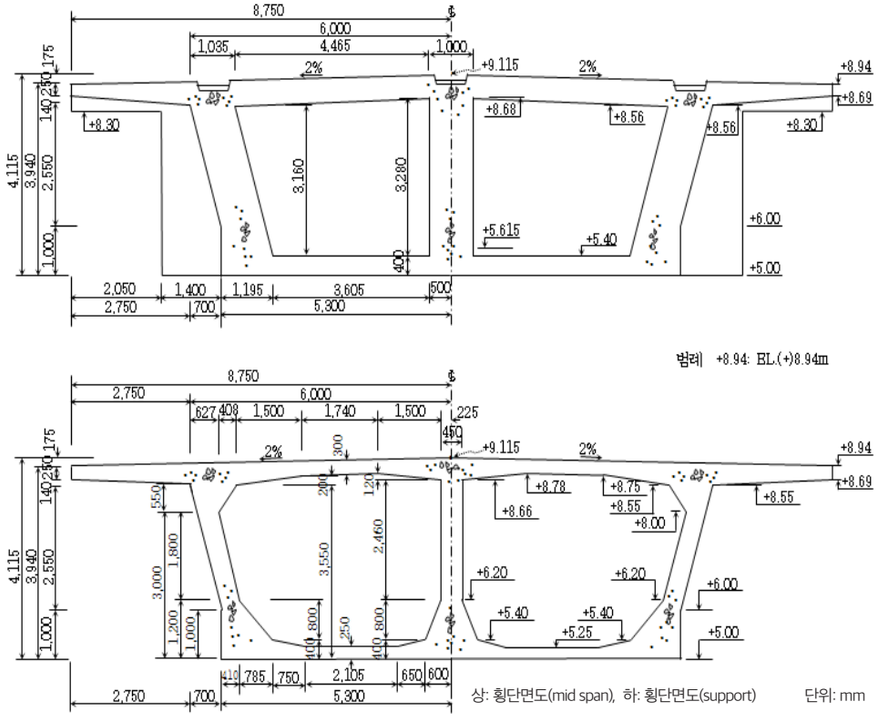


그림 7. 낙동강하굿둑 Box Girder 횡단면도

정한 철새보호구역인데, 환경보전법에 의해 1982년 3월 우리나라 최초로 환경영향평가를 실시하였다. 그 결과 자연생태계를 보전하기 위해 수문(水門)을 월류 및 저류 병행 작동식으로 설치했고, 철새 먹이 공급용으로 흙댐 부위에 조절수문 1개를 추가 설치했으며 어족 보호를 위해 어도 2개소를 설치하였다.

2-2) 롤러다짐콘크리트중력댐

세계적으로 1980년대에 정착한 공법으로서 필댐의 축조기법을 콘크리트댐에 적용한 것이다. 공기단축 및 댐 내부콘크리트의 단위시멘트량을 획기적으로 감축하는 등 공사비를 절감할 수 있어 경제적인 공법으로 개발되었다. 종래 일반 콘크리트중력댐(내부)의 단위시멘트량이 160~180kg/m³인데 비하여 롤러다짐콘크리트중력댐은 110~120kg/m³이다. 세계적으로 미국 Upper Stillwater댐(H=90m / RCC 113만m³, 1987년), 중국 Yantan댐(H=111m / RCC 57만m³, 1993년), 일본 Miyagase댐(H=155m / RCC 153만m³, 1997년) 등을 이 형식으로 건설하였다.

우리나라는 최초로 한탄강홍수조절댐(H=83.5m / RCC 70만m³, 2016년)을 롤러다짐콘크리트중력댐(RCCD, Roller Compacted Concrete Dam) 공법으로 건설하였다.(표 16 및 사진 24 참조) 특히 한탄강홍수조절댐 건설 중 콘크리트다짐 장비인 Vi-Back과 줄눈절단기를 우리기술로 개발하였으며 기존 일본장비 못지않게 우수하였다. 그 중 줄눈절단기는 장비의 위치에 관계없이 360° 회전하면서 시공할 수 있도록 국내에서 최초로 개발하였다. 이 댐은 평화의댐에 이어 단지 홍수조절을 위해 항상 비워두는 댐이다.

사진 24. 한탄강홍수조절댐(RCCD, H=83.5m, 2016년)

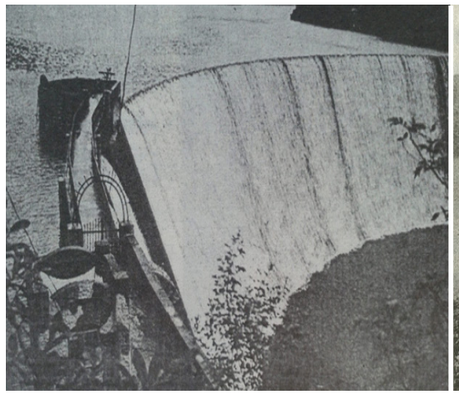


사진 25. 대아댐(H=32.6m, 1923년, 구댐)

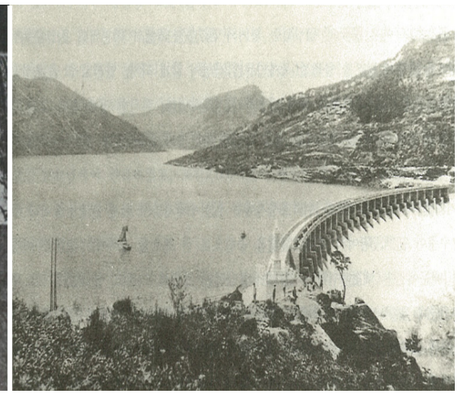


사진 26. 운암댐(H=28m, 1929년, 남강댐 내 수몰)

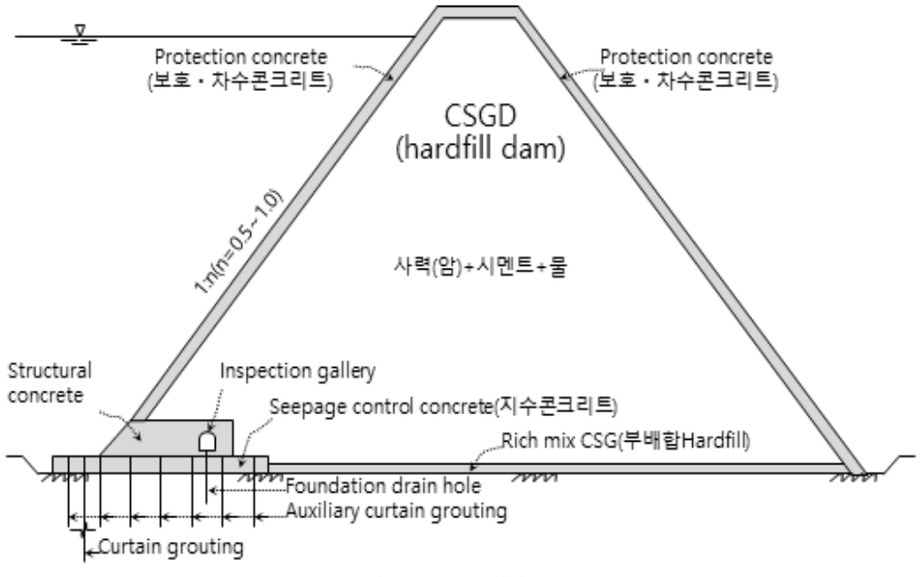


그림 8. CSGD 표준단면도

2-3) 기타의 콘크리트댐

일제강점기에 콘크리트아치댐인 대아댐(1923년)과 아치형콘크리트중력댐인 운암댐(1929년)을 건설하였으나 두 댐 모두 그 직하류에 신댐을 건설하여 지금은 저수지 수중에 있다. 특히 이 두 댐은 할석혼입 콘크리트로 축조하였다.

우리나라는 지질, 지형 등 댐 입지여건상 현재 전형적인 아치댐이나 중공중력댐, 부벽댐 등은 없다. 최근에는 선진국에서 개발하고 있는 하드필(Hardfill)댐인 CSGD(Cemented Sand and Gravel Dam) 공법을 연구하고 있다. 댐 단면이 사다리꼴(상·하류측 경사 1: 0.5~1.0) 형인 콘크리트중력댐으로서 축조재료가 현장의 쇄석, 사력 등에 시멘트를 혼합한 것이며 초빈배합 콘크리트로 축조하는 공법이다. 단위시멘트량이 롤러다짐콘크리트중력댐(RCCD)보다 적은 60~100kg/m³(외국의 사례 80kg/m³)이다.

3) 필댐

3-1) 흙댐

우리나라에서 B.C. 4~3세기경 벼농사와 밀접한 관개사업이 시작된 후 삼국시대에 벼의 담수재배를 위한 토목기술은 보, 댐(제언), 방수제, 용수제, 저수지 등 농업토목시설물을 구축하면서 발전되어 왔으며 댐 형식은 흙댐이었다. 그 현황은 표 18과 같다.

표 18. 삼국시대~조선시대의 댐(제언)

댐명	위치	축조시기	높이(m)	길이(m)	비고
벽골제	김제	330년	4.3	3,240	고적 제157호
시제	미상	429년		3,945	
눌제	정읍	백제 초중엽		2,160	
황등제	익산	백제 초중엽		1,620	
의림지	제천	신라시대		105	관개 중
수산제	밀양	삼한시대			
공검제	상주	미상			
청제	영천 남쪽 6km	536년			◦보물 제517호 ◦관개 중
남대지	황해도 연안	1066년 이전			동국여지승람(권43)
합덕제	지금의 당진	고려시대(추정)			성종실록(권25)
주산지	청송	1721년	15.0	63	명승 제105호
축만제	수원	1797년			현 수원시의 서호
혜정제	청주 북쪽	1854년			조선금석총람(비문)
영금제	전주	미상			-비변사등록 제159책 제언절목
행광신제	전주	미상			

표 19. 1945년 이후 주요 농업용댐

댐명	형식	준공	높이(m)	길이(m)	저수용량 (백만m³)	비고
예당	필댐(존형)	1964.12	13.3	314.5	47.1	1952.12 착공
금광	필댐(존형)	1961	21.0	225.0	10.6	안성천 4개 댐 중 첫 준공
덕동	사력댐(존형)	1977.12	50.0	169	3.27	나팔형여수로
담양	필댐(존형)	1976.10	46.0	305.5	66.68	영산강 4개 댐
장성	필댐(존형)	1976.10	36.0	603	89.72	
광주	필댐(존형)	1976.12	25.5	505	17.37	
나주	필댐(존형)	1976. 9	31.0	496	91.21	
경천	필댐(존형)	1990. 1	66.4	380	28.22	
동화	필댐(존형)	1997	70.55	474	31.35	용림천 보설치 인수
미호	콘크리트중력식	1985.12	19.4	174	13.87	미호천 9개 댐 중 2개
백곡	흙댐(균일형)	1984. 3	27.2	410	21.50	

그림 9. 몽촌토성 축조공법

최초의 흙댐은 삼국사기에 기록된 신라 흘해왕 21년(330년) 김제의 벽골제(사적 111호, H=4.3m / L=3,240m / 마루폭 7.5m)이다. 지금은 물이 있던 자리 대부분이 논과 마을로 바뀌었지만 상당부분의 제방과 총 5개의 수문 중 2개(북단의 경장거와 남단의 장생거)의 수문은 남아 있다. 수문은 오늘날 Sluice gate처럼 2개의 석주 안쪽에 위에서 아래까지 파인 홈에 목판을 끼워 놓고 그것을 상하로 움직여 유량을 조절하였다. 석주 사이의 바닥에는 납작한 석재를 깔았다. 댐 축조방식은 판축기법(板築技法)과 부엽토공법(敷葉土工法)을 썼다. 일본의 사서인 일본서기에 백제인에 의하여 제언이 축조되었다는 기록이 있는 것으로 보아 당시 우리나라의 대규모 저수지 건설을 위한 흙댐축조기술이 상당히 발전하였다는 것을 알 수 있다. 흙댐 축조와 유사한 공법을 적용한 몽촌토성(사적 제297호, 3세기 초 축조)은 '협축식판축법'과 '내탁식판축법'을 사용했다.

1395년 조선 태조실록에 오늘날 취수탑과 같은 혈주연통공법(穴柱連桶工法) 기록이 있으며 축만제(1797년) 축조 때에는 이 공법 및 역사이펀식과 비슷한 도수잠관공법(導水潛管工法, 1798년)이 이용되었다. 농업용 댐의 경우 2012년 1월 현재 17,505개를 건설하였는데, 1945년 이후에는 록필댐 형식이 대부분이지만 백곡댐은 흙댐이다. 백곡댐은 신댐(H=27.2m, 1984년) 이전의 구댐(H=16.5m, 1953년)에 최초로 사이펀식 여수로를 설치하였다.

3-2) 토질차수벽형록필댐

1960년대까지는 수자원이란 용어가 생소했으며 많은 논쟁 끝에 우리나라에 최초로 다목적댐 기술을 도입한 시기이다. 또한 세계적으로 콘크리트댐에 비해 기술정착이 얼마 되지 않은 록필댐 형식을 채택해 지금과 같은 대규모 소양강다목적댐(H=123m, 1973년)을 건설한 것은 수자원기술발전에 있어서 획기적인 일이었다. 이에 앞서 우리나라 최초로 록필댐 형식으로 1965년 사연댐(공업용수용, H=46m / L=300m / 상시만수위 EL.60.0m / 총저수용량 25.0백만m³)을 건설하였다.(사진 28 참조) 이 댐은 처음에는 공업용수 공급용이었으나 수질이 좋아 지금은 생활용수용으로 변경·이용하고 있다. 이와 같이 사연댐은 수자원(댐)분야의 역사적인 문화재다.

그러나 댐 저수지 물 꼬리 부위에 있는 울산반구대암각화(국보 제285호, 폭 8m / 높이 4m(EL. 52.5~56.5m), 1971년 발견, 2025년 세계문화유산 등재 추진)를 보호하기 위하여 여수로(무문식) 월류정을 13m(EL. 60m→ 47m) 낮추어 수문(3문)을 설치하고, 감소되는 생활용수는 새로이 마련하는 방안을 추진하고 있다. 이 경우 암각화보존이 미흡하고, 생활용수대책이 불확실한 가운데 사연댐만 훼손하게 될 것이란 우려가 있어 현재 재검토를 하고 있다.

사진 27. 사연댐(국내 최초 록필댐, H=46m, 1965년)

화강토(花崗土) 용어의 유래

안동다목적댐의 심벽재료는 당초 점토로 설계하였다. 댐 상류 약 12㎞ 떨어진 지역에 점토채취장이 있었다. 도로개설 및 운반에 상당한 비용이 소요되므로 댐 부근 구릉지 일원에 많이 분포하는 화강토(Decomposed granite)를 심벽재료로 이용하면 공사비를 절감할 수 있을 것이라는 점에 착안해 1972년 12월부터 1973년 6월까지 타당성조사시험 및 현장성토시험을 각각 실시하였다. 시험결과 모든 면에서 화강토가 점토에 비해 유리해 댐 심벽재료를 점토에서 화강토로 변경했으며, 화강토가 점토보다 내부마찰각이 커서 안전상 유리하나 댐 단면 변경은 하지 않았다. 도로개설비용을 포함해 당시 약 3억 50,000,000원의 공사비를 절감하고 공기를 4개월 단축하였다. 이 공법은 심벽재료의 새로운 분야를 개척한 선례가 되었다.

화강토는 본래 일본말 그대로 '마사토(磨砂土, 眞砂)'로 쓰였으나 안동다목적댐의 시험과정에서 화강암이 풍화되어 형성된 흙이니 '화강토(花崗土)'로 부르기로 하여 새로운 우리나라의 토목용어를 만들었다. 이 공법은 1976년 멕시코에서 열린 제12차 국제대댐회(ICOLD) 연차회의에 보고되어 그 기술적 타당성을 널리 인정받았다.

표 20. 우리나라의 주요 토질차수벽형록필댐

댐명	목적	높이(m)	길이(m)	발전시설 (kW)	총저수용량 (백만m³)	하천	준공 (년)
소양강	다목적	123.0	530.0	200,000	290.0	소양강	1973
안동	다목적	83.0	612.0	90,000	1,248.0	낙동강	1976
주암	다목적	57.0	330.0	1,440	457.0	보성강	1992
이사천	다목적	106.0	575.0	22,500	250.0	이사천	1992
임하	다목적	73.0	515.0	50,000	595.0	반변천	1993
횡성	다목적	48.5	205.0	1,000	86.5	계 천	2000
보령	다목적	50.0	291.0	701	116.9	웅천천	2000
청평양수상	발전	62.0	290.0	400,000	2.7	한강	1980
삼랑진양수 상/하	발전	88.0/78.0	269.0/529.0	600,000	6.5/10.0	낙동강	1985
영천	생 · 공용수	42.0	300.0	-	96.0	자호천	1980
수어	생 · 공용수	67.0	437.0	-	28.1	수어천	1978
덕동	생활용수	50.0	169.0	-	32.7	신평천	1977
운문	생활용수	55.0	407.0	-	135.3	동창천	1996
사연	공업용수	46.0	300.0	-	25.0	대곡천	1965
오봉	생 · 농용수	50.6	267.0	-	14.4	도마천	1983

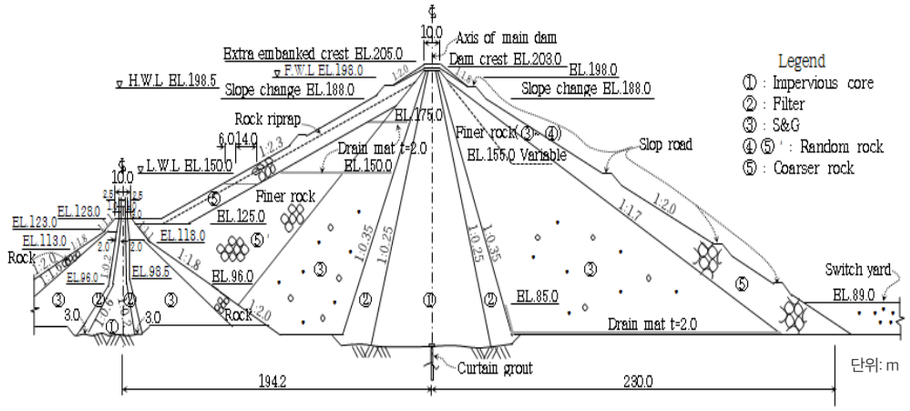


그림 10. 소양강다목적댐(H=123m, 1973년) 횡단면도

표 21. 우리나라의 양수발전댐

댐명	하천명	형식	높이(m)	길이(m)	총저수용량 (백만m³)	발전시설 (kW)	준공 (년)
청평양수	상부 북한강	ECRD	62	290	2.7	400	1980
삼랑진양수	상부 낙동강	ECRD	88	269	6.5	600	1985
	하부 낙동강	ECRD	78	529	10.0		
무주양수	상부 금강	ECRD	60.7	287	3.5	600	1994
	하부 금강	ECRD	42.6	234	6.4		
산청양수	상부 반천	CFRD	86.9	360	6.4	700	2001
	하부 내대천	CFRD	70.9	286.1	7.4		
양양양수	상부 후천	CFRD	72	347	5.2	1,000	2006
	하부 후천	CGD	52	247	10.3		
청송양수	상부 길안천	CFRD	90	400	7.1	600	2006
	하부 용전천	CFRD	62	300	10.2		
예천양수	상부 금곡천	CFRD	73	620	6.9	800	2011
	하부 금곡천	CFRD	63	535	9.1		

주) ① ECRD: Earth core rock fill dam, CFRD: Concrete facedrockfill Dam, CGD: Concrete gravity dam
② 준공연도: 발전소 기준

최초로 시행한 Handed riprap공법

안동다목적댐의 상·하류 비탈면은 당초 불도저로 펴놓은 소위 Dumped riprap공법으로 마감하도록 설계하였다. 소양강다목적댐의 비탈면마감과 같은 공법으로서 공학적으로 안전하고 경제적인 시공법이다. 그러나 외관상 보기 좋게 할 목적으로 크레인 및 인력으로 암석을 잘 골라 짜 맞추는 공법으로 변경하였다. 즉 Handed riprap공법으로 변경한 것이다. 이후 우리나라의 록필댐 비탈면마감은 모두 이 공법으로 시공하게 되었다.

안동다목적댐(1976년)은 우리나라 최초로 유하·양수겸용 기술로 발전소를 건설했고 록필댐 차수벽 재료로 종래의 점토 대신 화강토(花崗土) 이용기술을 개발하여 시공했으며 화강토란 새로운 용어가 탄생하였다.

영천댐(1980년)은 터널식 여수로 입구조절부 형태에 원통형(D=42m) 공법을 채택하였으며 주암다목적댐(1992년)은 보성강과 이사천에 각각 댐을 건설하고 도수터널로 연결하는 기술을 처음 기획하여 수자원이용을 보다 효율적으로 계획한 댐이다.

보령다목적댐(2000년)은 기초암반에 요철 및 절리가 발달되어 있어 일반적인 Cap콘크리트공법이 아닌 심벽구간에 전면 면고르기 콘크리트를 시공한 후 차수그라우팅을 하였다.

이 형식으로 건설한 청평양수발전댐(상부, 1980년)의 발전소는 위리나라 최초의 양수발전소이며 하부 저수지는 기존 청평호이다.

토질차수벽형록필댐을 건설하면서 축적한 주요기술은 다음과 같다.

첫째, 대형장비에 의한 기계화시공이다. 소양강다목적댐(1973년)은 우리나라 최초의 대규모 사력댐으로서 축조재료의 운반과 함께 재료선정 및 다짐이 핵심이었다. Tamping compactor(27톤), Tire roller(22톤), Scooper(3m³), Dump truck(32톤, 15톤), Bucket wheel excavator(760m³/hr) 등 대형장비를 이용한 기계화시공의 신기원을 이룩하였다. 이와 같이 우리나라 근대 필댐의 상징이며 필댐 축조기술발전에 크게 공헌한 댐이다.

둘째, 안동다목적댐(1976년)은 당초 점토로 설계된 중앙차수벽을 화강토로 세계최초 변경 개발함으로서 댐 차수재료의 영역확대를 가져왔으며 1976년 제12차 국제대댐회(ICOLD) 연차회의(멕시코)에서 신기술로 발표하였다. 또한 우리나라 최초로 유하·양수겸용 수력발전소를 건설하였다.

셋째, 낙동강하굿둑의 축조재료(필댐 부분) 중 90%를 준설해사로 충당했다는 것은 특기할만한 사례이다.

넷째, 최근 이상강우로 증가된 가능최대홍수량(PMF)으로 댐 설계기준을 변경하였다. 이에 따라 비상여수로 및 보조여수로를 소양강다목적댐에서부터 최초로 터널식 여수로 공법을 적용함으로써 환경친화적으로 자연경관 훼손을 최소화하는 데 기여하였다.

다섯째, 주암다목적댐(1992년)에서는 최초로 본댐과 조절지댐을 연결하는 도수터널(길이 11.5km) 건설에 TBM공법을 도입했으며 이후 이 공법은 영천댐도수로, 용담다목적댐 도수터널 등에 그 기술을 활용하였다. 최근에는 주암다목적댐에 도수터널을 추가로 건설(길이 11.2km, 2021년)하여 복선화(시설안정화)하였다.

여섯째, 소양강다목적댐 하류에 찬 발전방류수를 데우기 위하여 최초로 농업용수 공급용 온수지(溫水池)를 설치하였다. 뒤이어 충주다목적댐과 주암조절지댐 하류에도 설치하였으나 임하다목적댐(1999년, 표면수 취수설비 설치)부터는 온수지 방안 대신 처음으로 다단식 표면수 취수설비를 갖추어 방류수의 수온이 하천수온을 유지할 수 있도록 하였다.

일곱째, 사력댐인 소양강다목적댐에서부터 처음으로 댐 건설 중 및 준공 후 댐 안정과 유지관리를 위하여 댐체 계측기기인 간극수압계, 정수압 및 연직침하측정계, 수평이동측정계 등 매설계기와 침하측정점(댐 마루 및 비탈면), 누수량측정설비 등을 설치하였다.

여덟째, Bentonite slurry를 이용한 차수공법을 충주다목적댐(1985년) 하류 역조정지댐의 Coffer Dam에 최초로 적용하였다. 이 시공법은 Bentonite slurry 용액을 채우면서 Backhoe로 하상의 사력층을 암반까지 거의 수직트렌치(B ≒ 50cm)를 굴착한 후 여기에 사력&점토-Bentonite cutoff wall을 형성하는 공법이다.

하천 수위보다 조금 높은 표고까지 이 공법으로 시공하고 그 이상은 점토심벽을 이어 축조했다. 그 이후 임하다목적댐(1993년) 및 동 역조정지댐의 Coffer Dam에서는 Cement-bentonite cutoff wall공법을 적용하였다. 그리고 안동호-임하호 연결수로터널 공사(2015년)의 Coffer Dam에서는 차수그라우팅과 차수매트 복합형식 차수벽공법을 고안·적용하였다.

아홉째, 이외 필댐의 주요설계·시공기술을 개괄하면 다음과 같다.

소양강다목적댐

장성댐(농업용, H=36m, 1976년)

안동다목적댐(H=83m, 1976년)

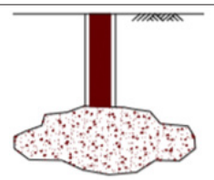
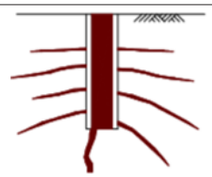
사진 28. 토질차수벽형록필댐 사례

운문댐 댐체 함몰 및 보수·보강공법

운문댐은 1998년 4월 최초로 상시만수위(EL.150m)까지 운문호에 물이 차자 여수로 Tongue Wing 접합부의 댐 마루(측점 No.2)가 함몰되고 하류사면(Riprap) 침하와 함께 다량의 누수가 관찰되었다. 6월에는 댐 중간부위 마루(측점 No.12) 하류측 어깨부에 직경 1.7m, 깊이 0.7m의 함몰이 발생하였다. 그리고 10월에는 댐 마루(측점 No.10) 중앙부에 직경 1.2m, 깊이 2.5m의 원형 함몰이 발생하였고, 심벽Zone 재료 중 일부가 하류측 Riprap zone까지 이동된 상태가 확인되었다. 이와 같은 댐 부실은 그 유래를 볼 수 없었다.

사진 29. 운문댐(H=55m, 1996년) 댐체 함몰 상황

표 22. 운문댐 댐체 보강공법

구분	1차, Compaction그라우팅공법	2차, Permeation그라우팅공법
특성	침하지반의 압밀, 치환	미세 틈새 지반의 침투, 충진
주입	물 + 점토 + 시멘트	물 + 시멘트 + 급결재
	된 반죽 몰탈 가압 주입	Milk 정수압 주입
	보성강	3,120(1,560×2대)
개요도		

누수량은 평상시 1,900~2,100m³/day, 강우 시 4,000~5,000m³/day로서 과도하게 많았다. 2000년 1차 보수·보강(댐체 중앙 80m 구간, Compaction그라우팅공법) 후 누수량이 상당히 감소하였으나 2002년 12월 누수량 및 탁도가 급증하였다. 따라서 2003년 2차 보수·보강공사(댐체 전 구간, Permeation그라우팅공법)를 댐 중앙 2열 총 404공을 시행하였다. 전기 비저항탐사법으로 효과를 검증한 결과 안전성이 확인되었다. 보수 전에 비해 댐 마루 하류측 수평변화가 적을 뿐만 아니라 하류측 댐 단면 방향으로 갈수록 전기비저항 값이 상대적으로 높게 분포하였다. 특히 1차 보수 후 누수량이 640m³/day이었으나 2차 보수결과 4.1m³/day(저수위 EL.147.0m)로 현저하게 감소되었으며 댐은 안정화되었다.

① ECRD의 4가지 요소기술(기초처리에 대한 설계·시공, 차수존의 설계·시공, 필터존의 설계·시공 및 접합부의 설계·시공)
② 기초개량공법 3종 기술(성형, 그라우트, 치환)
③ 누수경로 3종 처리공법(투수성 기초암반, 접합부, 차수존의 취약부-균열 또는 다짐부족)
④ 필터의 역할 3종 기술(물만 통과하고 토립자 누출방지, 역학적 완충작용, 차수존의 균열 자기치유 작용 지원)
⑤ 댐 기초의 문제점 4종에 대한 대책공법(투수·침식 가능성, 변위·침하 가능성, 전단에 의한 활동가능성, 기하학적 형상문제)
⑥ 그라우트공법기술 4종(Consolidation grout (Blanket grout), Curtain grout, Contact grout, Rim grout)
⑦ 차수존 시공관리 3항목 기술(입도, 함수비, 다짐밀도)

열 번째, 운문댐(용수전용, 토질차수벽형록필댐, H=55m, 1993년 7월 축조완료) 댐 마루 일부부위 함몰현상을 처리하면서 보강기술을 개발하기도 하였다.

3-3) 콘크리트표면차수벽형록필댐

일찍이 포틀랜드시멘트가 실용화되면서 출현한 콘크리트댐과 같은 시기인 1890년대에 개발되었으나 록필 축조공법에 문제가 있어 1940년대에 쇠퇴하였다가 이를 극복하여 1980년대에 재등장으로 회생한 댐 형식이다. 우리나라 최초의 콘크리트표면차수벽형록필댐(CFRD, Concrete Faced Rockfill Dam)은 동복댐(동복천, 생활용수용, H=44.7m, L=188.1m)이다. 세계적으로는 1880년대 미국 서부에서 처음 Log Face Rockfill Dam 및 Steel Face Rockfill Dam 건설을 하였으나, 최초(기술정착 이전)의 CFRD는 1895년 미국 캘리포니아의 Chatworth 댐(H=13m) 및 Morena댐(H=54m) 이다.

콘크리트표면차수벽형록필댐 형식의 개발 초기에는 그림 11과 같이 Cut off(Trench) 위에 Face slab를 연결한 전통적인 설계기법이었으며 암석축조공법은 Dumped rockfill공법(내려뜨린 석괴공법)이었다. 시공 결과 공극률()=41%, 간극비()=0.69로서 준공 1년 후 침하량이 댐 높이의 3~5%로 나타났다. 따라서 콘크리트 Face slab 손상으로 누수가 많아 1940년대에 건설을 중단하기에 이르렀으며 미국토목학회(ASCE)는 높이 60m 이하로 제한할 것을 권고기도 하였다.

그 후 Toe slab(Plinth) 위에 Face slab를 연결하는 등 현대적인 설계기법이 개발되고 암석축조공법으로 1958~1980년 Compacted rockfill공법(층별다짐석괴공법)이 개발되어 시공결과 공극률()=27%, 간

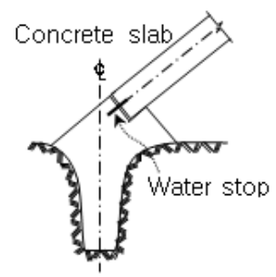


그림 11. Cut off(초기)

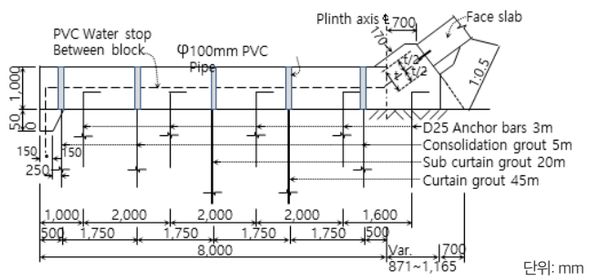


그림 12. Plinth 구조도(현대) 예

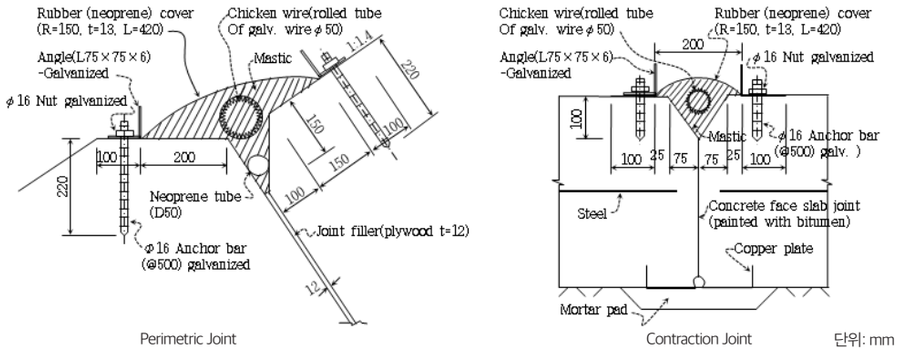


그림 13. Face slab의 Joint 구조도 예

표 23. 우리나라의 콘크리트표면차수벽형록필댐

댐명	용도	높이(m)	길이(m)	발전시설 (kW)	총저수용량 (백만m³)	하천	준공 (년)
동복	생활용수	44.7	188.1	-	99.5	동복천	1985
평화의댐	홍수조절	125.0	601.0	-	2,630.0	북한강	2006
남강	다목적	34.0	1,126.5	14,000	309.2	남강	1999
부안	다목적	49.0	280.0	193	41.54	직소천	1996
밀양	다목적	89.0	535.0	1,300	73.6	단장천	2001
용담	다목적	70.0	498.0	24,400	815.0	금강	2001
장흥	다목적	53.0	403.0	800	191.0	탐진강	2006
군위	다목적	45.0	390.0	500	48.7	위천	2011
김천부항	다목적	64.0	472.0	600	54.3	부항천	2013
산청양수상/하	발전	86.9/70.9	360.0/286.1	700,000	6.4/7.37	반천/내대천	2001
양양양수상	발전	72.0	347.0	1,000,000	5.2	후천	2005
대곡	용수	52.0	192.0	-	28.5	대곡천	2005
청송양수상/하	발전	90.0/62.0	400.0/300.0	600,000	7.1/10.2	길안천/용전천	2006
예천양수상/하	발전	73.0/63.0	620.0/635.0	800,000	6.9/9.1	금곡천	2011

극비()=0.37로서 준공 1년 후 침하량이 댐 높이의 0.04%로 관측됨으로써 20세기 후반에 재등장 회생하였으며 그 장점을 살려 세계적으로 이 형식으로 많은 댐을 건설하게 되었다. 여기에는 K. Terzaghi, J. L. Sherard 및 J. B. Cook 등 3명의 공적이 많았다.

세계적으로 호주 Cethana댐(H=111m, Slip form 개시, 1971년), 콜롬비아 Alto Anchicaya댐(H=140m, 1974년), 브라질 Foz do Areia댐(H=160m, 1980년), 대한민국 평화의댐(1차, H=80m, 1988년, 국내 최초 담수 없는 댐), 중국 Xibeikou댐(H=95m, 1990년) 등 이후 많은 댐을 건설하였다.

CFRD를 건설하면서 축적(연관)한 주요기술을 개관하면 다음과 같다.

우리나라는 이 댐 형식의 공법을 국내 최초로 동복댐(H=44.7m / L=188m, 1985년) 재개발에 도입하였고, 평화의댐 1단계(H=80m, 1988년)에서 그 경제성과 시공성이 입증되어 1980년대 이후 건설한 댐의 형식 결정에 지대한 영향을 미쳤다(표 23).

평화의댐은 2단계(H=125m로 증고, 2006년) 숭상 후 우리나라에서 가장 높은 댐이 되었다.

밀양다목적댐(2001년)의 경우 기존 Slip form 장비를 개선·개발함으로서 차수벽 콘크리트타설 속도를 1.5m/h에서 2.5m/h로 향상시켰다. 또한 Parapet wall에 Pushing and sliding 방식의 수밀Door(고무 Fender 부착)를 고안·설치함으로써 댐유지관리 기술자가 안전하게 Face slab점검 및 계측관리를 할 수 있게 하였다.

군위다목적댐(2011년)은 댐체에 암거형가배수로(4m×4m)공법을 채택하고 발전소 수로로 활용하였으며 최초로 시험담수를 하였다.

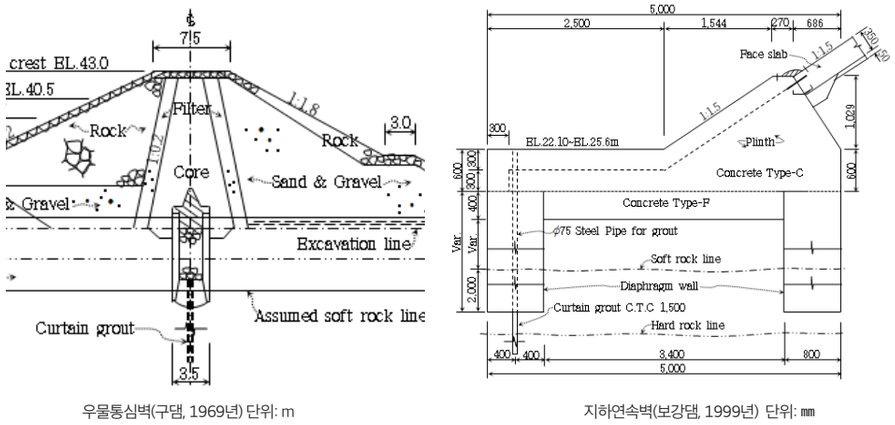
동복댐(H=44.7m, 1985년, 국내 최초)

평화의댐(H=125m, 2006년, 증고)

양양양수 상부댐(H=72m, 2005년)

용담다목적댐(H=70m, 2001년)

사진 30. 31. 콘크리트표면차수벽형록필댐 사례



우물통심벽(구댐, 1969년) 단위: m　　지하연속벽(보강댐, 1999년) 단위: mm

그림 14. 남강다목적댐 지하차수벽공법

김천부항다목적댐(2013년)에서 차수벽 시공 중 지지층 안정처리를 위하여 Curb element공법을 처음으로 적용하였다. 이 공법은 시공성, 기능성 및 경제성에서 강성 재료인 시멘트계열의 공법보다 우수했다.

어려운 지반조건을 극복한 경우로서 남강다목적댐(구댐: ECRD, 1969년)은 하상부 8~9m 심도의 사력층에 최초로 우물통공법(Well Foundation Method)으로 콘크리트심벽을 설치해 성공하였으며, 보강한 남강다목적댐(CFRD, 1999년)에서는 최초로 콘크리트지하연속벽공법(Concrete diaphragm wall method)을 기초부위 차수공법으로 적용해 성공하였다.

CFRD의 Plinth는 지하연속벽 위에 시공·연결하였다. 또한 구댐 시공과정에서의 성과로서 방수로의 안부급류수로 우안 지반활동구역을 1969년 강관말뚝공법(D ≒ 32cm, 콘크리트주입, 3m 입체 Truss로 결속)으로 안정화한 것은 좋은 신공법사례이다.

CFRD건설 전성기에 환경친화적 패러다임이 도입되었다. 1990년대 말부터 하천의 공학적 기능(이수, 치수) 못지않게 자연적 기능 즉, 환경기능을 중요시하기 시작하였다. 사회·문화적으로 댐 및 저수지와 연관한 국민정서 함양의 장이 될 수 있도록 댐 하류비탈면 상당부분을 포함한 일대를 환경친화적으로 조성함에 따라 오늘날 댐 주변 환경을 세계 어느 나라 못지않게 잘 조성하였다.

한편 어승생댐(H=23m / L=306m / 총저수용량 375,000m³, 1971년)은 표면차수벽형댐이지만 특수한 경우로서 차수벽 재료는 콘크리트가 아닌 Butyl rubber(함몰부위 복구: 아스팔트 패널 Gulf-seal)로 시공하였다.

사진 32. 어승생댐(H=23m, 1971)

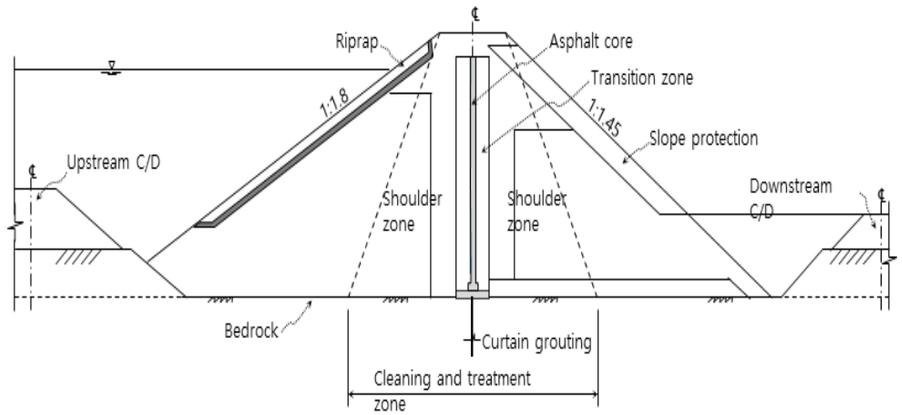


그림 15. ACRD 표준단면도

3-4) 기타의 필댐

아스팔트를 차수재료로 이용한 아스팔트표면차수벽형록필댐(AFRD: Asphalt Faced Rockfill Dam)과 아스팔트차수벽형록필댐(ACRD: Asphaltic Cored Rockfill Dam)은 새로운 댐 형식으로 최근 도입·연구하고 있으며 건설실적은 없다.

AFRD는 1930년대 독일에서 개발하였으며 암석으로 쌓은 댐체의 상류측 표면에 아스팔트(t ≒ 5cm)를 입히는 형식이다. 장점은 강수량이 많거나 습도가 높은 산악지역에 적합하고 점토가 없는 곳의 차수재료로 이용, 과잉간극수압에도 안전하며 계단식 공사가 가능해 경제적인 점 등이다. 단점은 댐 상류측 비탈경사가 1: 1.7보다 완만해야 하고(댐 부피증가), 동결융해작용에 취약, 직사관선에 취약, 차수벽 조기노화(20~50년), 차수벽연성에 따른 파손, 결빙방지대책 필요 및 전쟁·테러에 취약 등이다.

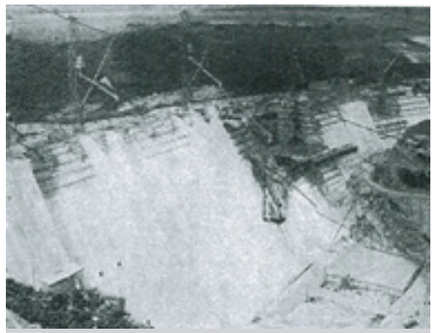
주로 유럽에서 AFRD의 장점을 사유로 20여 개의 댐을 건설하였으나 단점을 보완하기 위해 1950년대부터 ACRD 경향으로 바뀌었으며 차수벽두께는 t=0.5~1.0m로서 외기환경영향이 없어 높이 150m 이상(보통 AFRD는 75m 이하) 건설이 가능하다.

이 외 필댐체 내의 차수공법 및 CFRD의 표면차수공법에 대하여 시트나 매트 등을 이용한 신기술을 다양하게 연구·개발하고 있다. 최근에는 필댐으로 분류할 수는 없으나 필댐 기술을 콘크리트댐 기술과 융합한 하이브리드댐과 용도에 따라 프리캐스트 제품을 이용한 댐 축조 기술도 연구하고 있다.

이 외 필댐체 내의 차수공법 및 CFRD의 표면차수공법에 대하여 시트나 매트 등을 이용한 신기술을 다양하게 연구·개발하고 있다. 최근에는 필댐으로 분류할 수는 없으나 필댐 기술을 콘크리트댐 기술과 융합한 하이브리드댐과 용도에 따라 프리캐스트 제품을 이용한 댐 축조 기술도 연구하고 있다.

4) 복합댐

복합댐은 일반적으로 콘크리트중력댐과 필댐을 결합한 댐이다. 대표적인 복합댐은 대청다목적댐(1980년)이다. 이 댐은 콘크리트중력댐을 토질차수벽형록필댐에 댐체 근입식으로 결합하였다. 영주다목적댐(2015년)의 경우에는 콘크리트중력댐과 콘크리트표면차수



내중리댐(H=43.5m, 1944년)

대청다목적댐(H=72m, 1980년)

영주다목적댐(H=55.5m, 2015년)

사진 33. 복합댐 사례

벽형록필댐을 분리벽형으로 결합한 복합댐이다. 한편, 내성천은 유사가 많은 하천이므로 영주다목적댐의 경우 저수지 상류에 국내 최초로 유사조절지보를 설치하였다. 특히 대청다목적댐은 강체인 콘크리트댐과 소성체인 필댐의 불투수성 차수벽과의 공학적인 접촉부(Interface) 설계·시공이 매우 중요한 기술로서 최초로 개발하여 시공한 공법이다.

우리나라 최초의 복합댐은 일제강점기에 건설한 허천강의 내중리댐(CGD + TE, H=43.5m, 1944년)이라고 할 수 있다. 압록강의 의주댐(CGD + TE, H=43.5m, 1945년 독립 당시 건설 중) 또한 복합댐이다. 이들은 모두 댐 길이방향으로 결합한 방식이다.

복합댐을 건설하면서 축적한 주요기술을 개관하면 다음과 같다.

대청다목적댐은 전형적인 복합댐으로서 처음으로 접촉부의 심벽재료 및 시공법을 개발·시공하였으며 1979년 국제대댐회 총회(인도 뉴델리)에서 신기술로 발표해 좋은 평가를 받았다. 이 기술은 그 후 필댐 시공의 시범이 되었다.(그림 16, 표 25, 표 26) 또한 댐체 근입부위의 복합구조는 콘크리트댐 상·하류 측에 심벽재료와 같은 점토를 3m 폭으로 감싸고 심벽 존 단면과의 이행부위에는 Core flare를 두어 기능적으로 연결시켰다.

사진 34. 영주다목적댐 유사조절지보

영주다목적댐은 콘크리트중력댐에 저열시멘트(IV종 시멘트)를 사용하였다. 콘크리트타설공법은 높이별로 3분하여 하부 덤프트럭(15톤), 중간부위 크레인(8m³), 상부는 펌프카(100m³/h)를 이용했으며 콘크리트표면차수벽과 분리벽의 접합부위 이음공법으로 3중 이음인 수밀구조공법으로 시공하였다. 한편 유사가 많은 내성천의 유사대책방안으로 상류저수지 내에 우리나라에서 처음으로 유사조절지보를 설치하였으며 본댐에는 배사문(2문)을 두었다.

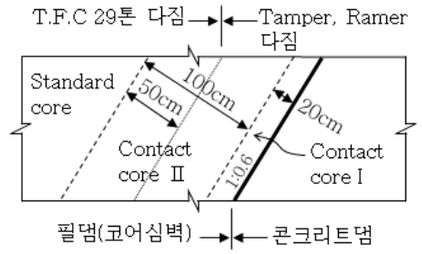


그림 16. 대청다목적댐 접합부 시공법도

표 24. 1945년 이후 건설한 복합댐(다목적댐)

댐명	높이(m)	길이(m)	결합형식	결합방식	결합부위 처리	하천	준공(년)
대청	72.0	495.0	CGD&ECRD	댐체근입형	점토 특수다짐	금강	1980
영주	55.5	400.0	CGD&CFRD	분리벽형	분리벽+그라우팅	내성천	2015

주) CGD: Concrete Gravity Dam, ECRD: Earth Core Rock fill Dam, CFRD: Concrete Faced Rock fill Dam

표 25. 대청다목적댐 접합부 심벽재료 설계기준

투수계수(cm/s)	#200 통과량(%)	함수비(%)	P.I(%)	#4 통과량(%)	다짐도(%)	5μ통과량(%)
$5x10^{-6}$ 이하	20 이상	ω_{OPT}+2~5	15 이상	100	95 이상	10 이상

표 26. 대청다목적댐 접합부 심벽시공기준

구분	단위	Interface부		일반 Core부
		Core Ⅰ	Core Ⅱ	
축조고	cm	20	100	-
함수비	%	OMC+3~5	OMC+2~4	OMC+0~2
최대입경	mm	5	25	150
포설고	cm	5~7	5~7(또는 30)	30
다짐장비		Rammer, Tamper	Rammer, Tamper(또는 T.F.C 29톤)	T.F.C 29톤
다짐회수	회	4 이상	4 이상(또는 8)	8
주행속도	m/min	10	10	4(km/hr)
투수도	cm/s	$5x10^{-6}$ 이하	$5x10^{-6}$ 이하	$5x10^{-6}$ 이하

6. 우리나라 댐 기술발전 등 주요성과

1960년대 말부터 본격적으로 시작된 다목적댐건설을 통해 그동안 이루어진 기술발전 등을 종합적으로 대별해 약술하면 다음과 같다.

첫째, 댐 형식 및 설계기술의 발전을 가져왔다.

세계적으로 19세기 말엽에 개발·정착된 콘크리트댐 기술과 건설장비의 개발과 토질역학 및 수문학(水文學) 분야의 기술발전에 힘입어 20세기 초·중반에 개발·정착된 록필댐 기술도입으로 댐 건설을 주도해 왔다. 최근에는 20세기 후반에 기술이 정착된 콘크리트표면차수벽형석괴댐(CFRD)이 주류를 이루고 있다.

소양강다목적댐(사력댐)은 대형 굴착 및 운반장비의 기계화시공으로 건설된 우리나라 근대 필댐의 상징이라고 할 수 있다. 또한 설계, 시공, 현장시험, 계기매설 등 댐 기술발전에 크게 공헌한 댐이다. 안동다목적댐(록필댐)은 중앙차수벽 재료로 당초 점토로 설계된 것을 화강토(花崗土)로 변경함으로써 댐 차수재료의 영역확대를 가져왔다. 또한 우리나라 최초로 유하식 및 양수식을 겸비한 양수겸용 수력발전소를 건설하였다.

콘크리트표면차수벽형석괴댐(CFRD)은 국내 최초로 동복댐(생활용수댐, H=44.7m / L=188m / 부피 42만m³, 1982년 11월~1985년 7월) 증고에 적용되었으며, 1988년 1단계 공사를 완료한 평화의댐(H=80m)에서 그 경제성과 시공성이 입증되어 그 후 건설되는 댐의 형식 결정에 지대한 영향을 미쳤다. 또한 낙동강하굿둑의 축조재료(필댐 부분) 중 90%를 준설해사로 충당했다는 점도 특기할 만하다.

충주다목적댐은 콘크리트댐으로서 최초로 II종시멘트(중용열포틀랜드시멘트)를 사용하고 Batcher plant(120m³/hr)에 자동계량장치를 설치해 콘크리트를 생산하였다. 또한 강재거푸집 사용, 케이블크레인(Cable crane, 20톤 / 6m³) 타설, 파이프쿨링(Pipe cooling), 골재냉각 등 선진화된 기술로 우리나라 매스콘크리트 시공기술의 신기원을 이룩하였다. 그러나 매스콘크리트용 II종시멘트를 처음 생산해 사용함에 따라 부랴부랴 Poly bag(1톤)을 개발하는 등 이용에 불비(不備)한 점이 있었다. 더욱이 충주에 앞서 대청다목적댐의 콘크리트중력식댐에 I종시멘트(보통포틀랜드시멘트)를 사용했었고 그 또한 부족해 수입까지 해야 했던 점 등으로 보아 여러 가지 면에서 국가적으로 콘크리트댐 건설을 위한 산업여건이 갖춰지지 않았던 시기라고도 볼 수 있다.

대청다목적댐은 특히 전형적인 복합댐으로서 콘크리트댐과 록필댐 접합부의 심벽재료 선정 및 시공법을 고심해 개발하였다. 대청다목적댐 접합부 시공의 기술개발은 그 후 토질차수벽형 필댐의 기초암반과 차수 존(Zone) 간 접합부(Interface) 시공의 시범이 되고 있다. 또한 한탄강홍수조절댐에는 최근 콘크리트댐의 공기단축 및 경제적 시공에 적합한 RCCD(Roller Compacted Concrete Dam) 공법을 도입해 기존 Block 타설공법을 댐 축 방향으로 수평타설하는 방법을 적용하였다.

보현산다목적댐에는 여러 개의 Block을 한 번에 타설하고 횡이음을 설치하는 ELCM(Extended Layer Construction Method) 공법을 최초로 적용하였다.

둘째, 여수로 공기흡입장치 설치 및 터널식 여수로를 도입하였다.

여수로 수공구조물 설계 시에 충주다목적댐을 시작으로 합천 등 대규모 다목적댐 여수로에 공기흡입장치를 설치해 고속류의 흐름에 기술적으로 대비하였다. 또한 최근 이상강우의 영향으로 홍수량이 크게 증대됨에 따라 기존 댐의 여수로 방류능력이 부족해지자 증가된 가능최대홍수량(PMF)을 대상으로 기존 댐 방류능력을 증대하기 위해 비상여수로 및 보조여수로를 건설하였다. 방류능력 증대를 위한 여수로 형식에서도 종래 채택하지 않았던 터널식 여수로를 소양강 및 임하다목적댐에 처음으로 적용하기 시작해 환경친화적으로 건설하면서 자연경관 훼손을 최소화하였다.

셋째, 어려운 지반 조건을 극복하였다.

대표적으로 남강다목적댐(구댐: 록필댐)은 댐기초 차수공법으로 하상부 8~9m 심도의 사력층에 우물통공법(Well foundation method)으로 콘크리트 심벽을 설치하였다. 1999년에 준공한 남강다목적댐(보강: 구댐 직하류에 건설)은 하상부 사력층 차수를 위해 콘크리트지하연속벽공법(Concrete diaphragm wall method)을 적용해 무난히 난관을 극복하고 성공하였다.

또한 낙동강하굿둑은 대하천 하구부 심도가 50~60m에 이르는 퇴적층 위에 건설한 가물막이의 사면 안정을 위해 Deep well공법에 의한 지하수위 저하와 장대강관파일을 기초로 한 콘크리트댐에 대규모 수문을 설치하는 새로운 공법을 시도하였다. 장대강관파일 시공, 50m급 경간의 PC박스거더형 교량, 레이디얼 게이트(Radial gate)를 박스거더형 보에 힌지를 정착하여 설치하였다. 4대강사업의 일환인 하구둑 증설구간은 레이디얼 게이트 폭이 95m로 우리나라에서 가장 크다. 하굿둑 본체를 지지하는 장대강관파일기초로 직경 608mm, 두께 18mm, 평균길이 약 40m 규격인 강관 882본을 시공하였다.

아울러 충주다목적댐의 우안 부위 553만m³의 랜드슬라이딩 토석 제거와 그 처리공법(저수지측 댐 우안 사면 안정화공법 등)은 새로운 성공사례로 이후 보령다목적댐에서 그 기술을 활용하였다.

넷째, 대형장비에 의한 기계화시공이다.

소양강다목적댐은 우리나라 최초의 대규모 사력댐으로 축조재료의 선정 및 다짐이 핵심 사안이었다. 27톤급 자주식 탬핑 콤팩터(Tamping compactor)를 도입해 좋은 다짐성과와 공기단축을 가져왔다. 이 댐은 당시 국내 최대의 토목공사로서 3m³ 용량의 Scooper, 32톤 Dump truck, 760m³/hr Bucket wheel excavator, 22톤 Tire roller 등 대형장비를 도입해 기계화시공의 신기원을 이루었다. 또한 대청과 충주다목적댐 콘크리트는 Cable crane(용량 20톤, 6m³)으로 타설했으며, 합천다목적댐에서는 대용량 지브크레인(Jib Crane, 용량 13.5톤 / 3m³)으로 약 90만m³의 댐 콘크리트를 타설하였다. 이 설비는 용량 13.5톤, 붐 길이 75m의 정치식 지브크레인 3대(대우조선 제작)를 댐축과 나란히 설치하는 방식이었다. 이와 함께 주암다목적댐에서는 최신 터널굴착공법인 TBM공법을 본댐과 조절지댐을 연결하는 도수터널(11.5km) 건설에 처음 도입했으며 이후 영천댐도수로(32.9km), 용담다목적댐 발전소 도수터널(21.9km) 등에 활용하였다.

다섯째, 수차발전기 조립 및 설치기술의 자립이다.

1980년대 전반기까지 수차와 발전기 조립설치를 외국 기술자에게 의존했는데, 이 과정에서 기술을 습득해 이후부터 우리 기술자가 직접 조립·설치하였다. 또한 1986년 (주)수자원기술공단을 창립(산업기지개발공사 출자)해 모든 기존 발전소의 수차발전기를 5년마다 정기점검·보수 시 완전히 분해조립(Overhale)을 하고 있다. 이 회사는 2001년 수자원기술(주)로 개명해 민영화되었다. 그러나 지난해 고용안

정, 운영안정성, 전문성강화 등을 위하여 공기업인 케이워터기술(100% 한국수자원공사 출자, 2021년 9월 17일)로 재설립하였다.

한편 중량물인 수차발전기를 트레일러에 싣고 곡선도로구간이나 교량(설계하중 DB-18: 당시 1등교, 현재 2등교)을 통과하기에 문제가 있어 임시교량을 가설해야만 했다. 당시 이와 같은 어려움을 극복한 경험은 사회기반시설이 확충될 때까지 수차발전기는 물론 여수로 수문의 Gate leaf, 변전소 변압기 등의 운반수단이 되었다.

여섯째, 환경친화대책의 도입이다.

1990년대 말부터 하천의 공학적 기능(이수, 치수) 못지않게 자연적 기능, 즉 환경기능을 중요시하기 시작하였다. 저수지 수질관리, 생태환경 조성, 국민의 사색공간 및 쉼터 제공 등은 물론 댐을 알리는 대국민서비스에도 중점을 두었다. 사회문화적으로 댐 및 저수지와 연관한 국민정서 함양의 장이 됨에 따라 댐 주변 환경개선이 세계 어느 나라 못지않게 발전하였다.

낙동강하굿둑 설치지점 일대는 우리나라 최대의 철새도래지로 국가가 지정한 철새보호구역인데, 환경보전법에 의해 1982년 3월부터 국내 토목공사로는 최초로 환경영향평가를 실시하였다. 그 결과 자연생태계를 보전하기 위해 수문(水門)을 월류 및 저류병행 작동식으로 했고, 철새 먹이공급용으로 토언제 부위에 조절수문 1개소를 추가 설치했으며 어족보호를 위해 어도 2개소를 설치하였다.

아울러 소양강 및 충주다목적댐과 주암조절지댐 하류에는 농업용수 공급을 위해 온수지(溫水池)를 설치했는데, 소양강다목적댐 하류(우두보)에 최초로 설치하였다.
임하댐은 다목적댐으로는 처음으로 다단식 표면취수설비를 갖추어 방류수의 수온이 하천수온을 유지할 수 있도록 하였다. 또한 임하댐을 포함 탁수저감을 위해 기존 댐 상류에 탁수저감댐 및 유사조절지 21개소(12개 댐)를 계획·추진하고 있다. 특히 임하호 유역에는 팽창성 Shale이 분포하고 있어 홍수 시 탁수발생이 심하다.

일곱째, 수자원 통합관리이다.

수계 내 댐 간 연계운영으로 각종 용수공급(발전) 및 홍수 조절효과를 극대화할 수 있는 수자원의 효율적 통합관리를 도모하고 있다. 그 일환으로 2002년부터 한국수자원공사에 '물관리센터'를 설립해 운영해 왔으며, 4대강살리기사업의 16개 다기능보를 포함한 수계별 통합운영을 위해 '통합물관리센터'를 구축(2010년)하였다. 또한 보다 과학적인 운영을 위하여 개별운영 중이던 물관리시스템을 최신 ICT를 기반으로 개선하는 한편 수문, 기상, 용수공급, 홍수분석 등 기능별 시스템을 통합해 '지능형통합물관리의사결정지원툴킷(K-HIT)'을 출시(2011년)해 운영하고 있으며, 해외 수자원관리사업 진출에 활용하고 있다. 나아가 최근 K-HIT과 연계하여 Digital twin기반 스마트수자원관리 플랫폼인 'Digital GARAM+(6개 패키지로 구성, 2022년)'을 개발하였다.

여덟째, 국가 경제·사회발전의 필수자원으로 기여이다.

수도권은 소양강 및 충주다목적댐을 준공함으로써 일거에 용수문제를 해결하였다. 부산, 창원(마산), 울산 및 대구지역 등은 낙동강 상류의 안동다목적댐, 대전과 청주 및 전주지역 등의 경우에는 금강 중류의 대청다목적댐을 우선적으로 건설하였다. 그리고 여천국가산업단지의 경우에는 4대강과 떨어져 있어 일찍이 수어댐(용수전용, 록필댐, 댐 유역 + 섬진강 도수, 1978년)을 건설하여 여수 및 순천지역과 함께 용수문제를 해결하였다.

이와 같이 대도시와 국가산업단지건설 등을 위한 수자원(용수)을 우선적으로 개발한 다음 국가경제·사회발전계획에 병행하여 많은 다목적댐과 각종 용수댐을 건설해 전국적으로 용수문제를 해결함으로써 오늘날 선진국으로 도약하게 된 것이다.

표 27. 수자원 개발(다목적댐)과 경제·사회발전

단위: 조원

연도	수자원 개발 (다목적댐)	건설 투자	해외 건설 수주	국민 소득 (달러/인)	특기사항 (정치·사회·경제·국제 등 주요사항)
'53*		-	-	67	'53 • 6·25동란 휴전(7월) • 제1차농업증산5개년계획개시(~'58) '54 • 우간다 오웬폴즈댐(저수용량 2,048억m³) 준공
'55		-	-	65	'56 • 제3대 이승만 대통령취임 • 경제부흥5개년계획 공표 '57 • 괴산댐(발전용, 콘크리트중력식, H=28m / L=171m, 우리기술자가 건설한 최초의 콘크리트댐) 준공
'60		-	-	80	'59 • 태풍 사라호 전국 내습 • UNDP/UNSF 회원국 가입 • 잠비아 카리바댐(저수용량 1,850억m³) 준공 '60 • 제4대 이승만 대통령취임 • 4·19의거 • 제2공화국 장면정부 출범('60~'61) • 경제계발5개년계획 수립('61~'65) '61 • 5·16군사정변 • 박정희 최고회의의장 미국방문 • ROTC 창설(전국 16개 대학) • 장면총리 사퇴 • 어린이날 국가기념일 제정 '62 • 제1차 경제개발5개년계획 수립('62~'66) 추진 • 윤보선 대통령 하야 • 산업박람회 개최 • 증권파동, 화폐개혁 • 화란정부장학생 파견시작(UNESCO-IHE, Delft)
'65	섬진강 ('65)	-	-	110	'63 • 제3공화국 출범(박정희 대통령 ~'72) • 일본 구로베댐 준공(아치식돔형댐, H=186m / L=492m) '64 • 수출 1억$ 달성 '65 • 한일국교 정상화 • 베트남 파병(4차례 32.5만 명) • 사연댐(록필댐, H=46m, L=300m, 국내 최초 록필댐) 준공 • 섬진강다목적댐(콘크리트중력식, H=64m / L=344m, 국내 최초 다목적댐) 준공
'66*		-	0.012	131	'66 • 특정다목적댐법 제정 • 한국과학기술연구소(KIST)발족 • 한미행정협정(SOFA) 조인 '67 • 제2차 경제개발5개년계획 수립('67~'71) 추진 • 한국수자원개발공사 창립 • 소양강다목적댐 착공 • 전국 대가뭄('67~'68) • 이집트 아스완댐(L=3.8km) 준공 • 세계물평화회의 개최

연도	수자원 개발 (다목적댐)	건설 투자	해외 건설 수주	국민 소득 (달러/인)	특기사항 (정치·사회·경제·국제 등 주요사항)
'70	남강 ('69) 소양강 ('73)	15	0.054	258	'70 • 경부고속도로 개통 • 포항제철 기공 '72 • 제4공화국 출범(박정희 대통령 ~'79) • 새마을운동 시작 • 제3차 경제개발5개년계획 수립('72~'76) 추진 '73 • 제1차 오일쇼크(건설 중동진출 계기) • 포항제철 준공 '74 • 육영수 여사 피격사망
'75	안동 ('76)	22	0.919	613	'75 • 미중 국교정상화 '77 • 제4차 경제개발5개년계획 수립('77~'81) 추진 • 수출 100억$ 달성 '78 • 제2차 오일쇼크: 세계경제 혼란(건설 중동진출 활성) • 자연보호헌장 선포 '79 • 박정희 대통령 서거 • 12.·12사태 발생
'80	대청 ('80)	40	9.315	1,699	'80 • 제4공화국 최규하 대통령 정부(~'81) • 국가보위비상대책위원회(국보위) 설치(상임위원장 전두환) • 환경청 발족(수질보전국)
'81*		38	15.429	1,857	'81 • 제5공화국 전두환 대통령 정부(~'88) '82 • 제5차 경제개발5개년계획 수립('82~'86) 추진 '83 • 한국건설기술연구원 개원(초대원장 안경모) '84 • 제5차 경제사회발전5개년계획수정계획 수립('84~'86) 추진 • 국제대댐회(ICOLD) Study Tour in KOREA 실시
'85	충주 ('85) 합천 ('89)	62	5.290	2,427	'86 • 86아시안게임 개최 '87 • 제6차 경제사회발전5개년계획 수립('87~'91) 추진 • 제2차 국토종합개발계획수정계획 수립('87~'91) 추진 • 건설기술관리법 제정
'88*		86	1.806	4,718	'88 • 제6공화국 노태우 대통령 정부(~'93) • 88서울올림픽 개최 '89 • 아시아태평양경제협력체(APEC) 결성
'90	주암 ('92), 이사천 ('92)	131	7.635	6,602	'90 • 환경청을 환경처로 승격 • 동서독 통일 • 소련과 국교 수립 '91 • 남북한 UN 동시가입 • 브라질/파라과이 이타이푸댐 준공(발전시설 1,260만kW) '92 • 제7차 경제사회발전5개년계획 수립('92~'96)추진 '93 • 문민정부 출범 • 김영삼 대통정부(~'98) • UN세계물의날 선포(3.22) • 신경제5개년계획('93~'97) 수립 추진 • 금융실명제 실시 '94 • 건설부와 교통부 통합 건설교통부로 확대개편 • 환경처를 환경부로 승격 • 북한 김일성 사망
'95	임하 ('93), 부안 ('96)	194	9.595	12,522	'95 • 수출 1,000억$ 달성 • 국민소득 10,000$ 달성 • 지방자치제 실시 • 세계무역기구(WTO)체제 출범 • 북한에 쌀 지원 • 자연재해대책법 제정 '96 • 기상이변 엘리뇨현상 발생(양자강 대홍수, 중남미허리케인 강타) • 경제협력개발기구(OECD) 가입 • 건설산업기본법 제정
'97*		213	15.826	12,334	'97 • 외환위기로 IMF자금지원 받음 '98 • 국민의정부 출범. 김대중 대통령 정부(~'02) • 북한 김정일 체제 출범 '99 • 국립시험소를 한국건설기술연구원으로 통합 • 댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률 제정 (특정다목적댐법 대체)
'00	횡성 ('00), 보령 ('00), 밀양 ('01)	179	6.127	12,179	'00 • 제4차 국토종합계획(~'20) 수립 • 국토기본법 제정 • 소련해체 후 푸틴의 러시아 시대 개막 '01 • 미국 9·11테러 발생 • 중국 WTO 가입 '02 • 한일월드컵 공동개최 • 한-칠레 FTA 타결 '03 • 참여정부 출범 • 노무현 대통령 정부(~'08) '04 • 경부·호남고속철도 동시개통 • 국제대댐회(ICOLD) 제72차연차회의 서울 개최
'05	용담 ('01), 장흥 ('06)	224	12.247	19,262	'05 • 아시아태평양경제협력체(APEC) 정상회의 개최 '06 • 최악의 물난리-장마와 폭우로 강원도 서울지역 물난리 • 노무현 대통령 탄핵 '07 • 한-미 자유무역협정(FTA) 타결 – 통상외교 최대성과 • 제2차 남북정상회담 • 타지키스탄 로건댐(H=335m) 준공 • 이명박 대통령 당선 '08 • 이명박 대통령 정부 출범(~'13) • 건설교통부와 해양수산부를 통합 국토해양부 출범 • 세계금융위기 '09 • G20 정상회의 유치 • 북한 화폐개혁 • 아이폰 국내 상륙 – 스마트폰 열풍 • 중국 삼협댐 준공
'10	군위 ('11)	222	80.726	23,118	'10 • 벤쿠버동계올림픽 개막 • 중국 제2의 경제대국 부상 '11 • 북한 김정일 사망 김정은 권력세습 • 일본동북부 해안지역 해일과 대지진 발생: 원전폭발사건 • 중동지역 민주화바람 • 유럽금융위기 • 아프리카 기근 '12 • 박근혜 대통령 정부 출범(~'18) ※ 탄핵으로 ~'17. 3 • 중국 시진핑총서기시대 시작 • 런던올림픽 종합5위
'15	부항 ('13), 보현산 ('14)	240	52.041	28,814	'17 • 황교안 총리 대통령직 권한대행 • 박근혜 구속(~'21) • 문재인 대통령 정부 출범('17. 5~'22. 5) '18 • 평창동계올림픽 개최 • 남북정상회담(문재인) • 이명박 구속 • K팝(BTS) 전 세계 열풍 '19 • 코로나19 팬데믹 발생('18.12 우한에서 최초 확인)
'20	성덕 ('15), 영주 ('15)	263	39.620	31,755 ('18: 33,564)	'20 • 코로나19 펜데믹 국내확산 '21 • 바이든 미국대통령 출범 • 대한민국 선진국 진입(7월: 개도국 최초) '22 • 윤석열 대통령 정부 출범(~'27) • 인도태평양경제프레임네트워크(IPEF) 가입

7. 수자원사업 해외진출 개관

우리나라는 수자원사업 중 다목적댐과 대부분의 생·공용수댐 사업을 한국수자원공사(1967년 11월 16일 창립)가 주관하여 왔다. 나머지 농업용댐(주관: 한국농어촌공사) 및 수력댐(주관: 한국전력공사와 자회사) 사업은 각각 다른 기관에서 담당하고 있다. 특히 1960년대부터 최초로 4대강유역조사 및 소양강, 안동, 대청, 충주 등 대규모 다목적댐사업을 한국수자원공사가 전담하면서 수자원기술의 도입·확산을 주도하여 왔다.

댐 건설사업에 참여한 공기업 및 민간기업(설계사, 건설사)들은 소중한 설계·시공경험을 통해 기술을 축적하게 되었으며 이를 바탕으로 해외사업에 진출할 수 있는 역량을 가지게 되었다. 해외사업은 공기업 및 민간기업 단독 또는 공기업과 민간기업이 컨소시엄 형태로 진출하고 있다. 이와 같이 우리나라는 선진 수자원기술을 단기간에 습득하여 해외사업 진출은 물론 외국 기술자들을 우리나라로 불러 수자원기술을 교육하는 등 오늘날 선진국 지위에 걸맞게 성장하였다.

7. 1 공기업

1) 한국수자원공사, 한국농어촌공사 및 한국전력공사(자회사)는 1960년대부터 축적한 수자원기술을 활용하여 해외사업에 진출하였다. 한국수자원공사의 경우 1990년대 중반부터 수자원조사·설계·건설사업, 발전소운영사업, 홍수방지사업, 댐통합운영시스템구축사업, SWM기술지원사업, 수도사업, 수자원교육(국내초청, 수자원연수원) 등을 위하여 아시아를 비롯해 유럽, 아프리카, 남미, 태평양지역 등의 30여개 국가에 진출하였다. 한국농어촌공사는 농업용댐 및 관개수로건설사업을 중심으로 진출하고 있다. 한국서부발전(주) 등 한국전력공사 수력발전 자회사들은 민간기업과 컨소시엄 형태로 해외사업을 하고 있다.

이와 같이 선진국으로서의 지위로 해외사업을 펼치고 있으며 주로 공기업은 시공감리와 조사·계획·설계·운영관리·교육 등 소프트웨어적인 수자원기술을 담당하고, 민간기업은 설계 및 건설을 담당하고 있다.(표 28, 표 29 참조)

2) 한국수자원공사는 4대강유역조사 경험을 활용하여 처음으로 중국 산서성 분하강유역조사사업(1994. 7~1996. 6)을 수행했으며, 또한 수력발전소 운영 및 관리경험을 바탕으로 2009년 대우건설(주)과 컨소시엄을 구성해 파키스탄 Patrind댐수력발전소(인더스 강 지류, 콘크리트중력식, H=26m / L=114.5m / 총저수용량 6,140,000m³ / 발전시설 150,000kW, 2017년) 건설사업을 완공하였다. 이 사업은 건설(EPC 4년 + Cushion 0.25년) 후 30년간 운영관리를 포함한 대규모 민자 프로젝트이다. 4개 국제금융기관(K-EXIM, ADB, IFC, IsDB)이 참여했으며 2019년 10월 해외사업 최초로 탄소배출권(CDM) 197,000톤 발급승인(UNFCCC)을 득했다.

한편, 한국수자원공사는 2016년 국내 설계 및 시공업체들과 함께 기술수출의 일환으로 태국통합물관리시스템(국제적으로 인정받은 기술) 구축사업에 진출하였으나 태국의 사정으로 도중에 사업이 중단된 바 있었다.

3) 한국서부발전(주)은 건설선진국에서 자리 잡은 PMC방식으로 라오스의 세피안-세남노이(Xe Pian-Xe Nam Noy)댐수력발전소(발전시설 410,000kW, 7억$, 2013~2019년) 개발사업을 최근 완공하였다. 이 사업은 메콩강 지류에 본댐 2개와 보조댐 5개를 건설해 큰 낙차(690m)를 얻기 위한 유역변경식 개발사업이다. SK건설(주)(2021년 5월 'SK에코플랜트'로 개명)이 (주)유신과 함께 설계와 조달 및 시공을 담당하고, 한국서부발전(주)이 준공 후 27년간 발전소운영을 담당하는 사업이다. 아쉽게도 준공 이듬해 7월 홍수로 1개의 보조댐 붕괴사고가 있었으나 완전히 복구한 바 있다. 복구과정을 통한 제반 경험으로 국가적으로는 물론 또 다른 우리 기술자들의 능력향상 이상의 역량을 가지게 되었다.

4) 한국농어촌공사는 동남아시아, 남아메리카, 아프리카 등의 지역을 중심으로 주로 KOICA(1991년 4월 1일 설립)에서 주관하는 ODA자금을 활용한 농업용댐 및 관개수로사업을 주도하고 민간기업과 진출을 하는 등 해외사업을 적극적으로 펼치고 있다.

5) 한국수자원공사는 1990년대 중반부터 중국, 바투아니아공화국, 캄보디아 등 수자원조사 사업에 진출하기 시작하였으며, 2000년대 들어서는 네팔의 차멜리야댐수력발전소 실시설계(2002년) 등 KOICA에서 발주(ODA)하는 기술용역사업을 다수 수행하였다. 한층 더 발전하여 2010년경부터는 파키스탄, 인도네시아 등 외국에서 발주하는 기술용역은 물론 건설 및 발전소운영관리사업(30년 내외)에 진출하고 있다.

6) 한국남동발전(주)은 파키스탄의 굴프르댐수력

댐, 저수지 전경(저수용량 6.14백만m³)

댐 전경(H=26m / L=114.5m)

사진 35. Patrind댐수력발전소(파키스탄, 2017년)

Xepian 댐(H=48m)

Xe Nam Noy댐(H=73m / L=1,600m / 총저수용량 10.43억m³)

사진 36. Xepian-Xe Nam Noy댐(라오스, 2017년)

표 28. 한국수자원공사의 주요 해외수자원사업 진출현황

사업명	댐(m)	사업규모	사업기간	비고
차멜리야 수력발전소 실시설계 (네팔)		용역비 7.68억 원(무상)	2000~2002	KOICA 발주
이스탈리프소수력발전소 PMC용역 (아프가니스탄)	수로식	용역비 7.62억 원 / 30.42억 원(무상)	2004~2006	KOICA 발주
이스탈리프소수력발전소 사후관리 (1차, 2차) 용역(아프가니스탄)		용역비 1차 1.9억 원(무상) 2차 10.67억 원(무상)	2006~2011	KOICA 발주
까리안다목적댐건설 타당성조사 및 실시설계(인도네시아)	H=60.5 L=516	용역비 17.95억 원(무상)	2004~2006	KOICA 발주
하상수력발전사업 개발단계 자문 (인도네시아)	도수 터널식	용역비 21.43만$	2014년 4개월	인도네시아전력 공사 발주
Angat수력발전사업(필리핀) 〈시설인수 및 운영관리	H=131 L=368	발전시설 21.8만kW 용역비 5,500억 원	2014~2039 (25년 연장가능)	필리핀 전력자산 관리공사 발주
수력발전사업PMC 및 운영관리사업(인도네시아)		발전시설 4.2만kW 사업비 1,300억 원	2014~2026	PT.BNE[LX인터 내셔널(前LG상사)]
Lower 세산 Ⅲ 수력발전사업 예비 타당성조사(캄보디아)		사업비 1.29억 원(자체자금)	2008(6개월)	※결과: 사업성 없어 미시행
다운트리다목적댐 및 몽콜보레이댐 개발타당성조사 용역(캄보디아)	H= 47 H=13.5	사업비 4.61억 원(무상)	2009(6개월)	KOICA 발주
몽콜보레이댐 개발 사업 PMC 용역(캄보디아)	H=13.5 L=54	용역비 161.8만$ (EDCF 차관사업)	2011~2015 (38개월)	MOWRAM 발주
살라타온댐 개발사업 PMC용역 (캄보디아)	H=26 L=114	용역비 331.3만$ (EDCF 차관사업)	2015~2021 (38개월)	MOWRAM 발주
Patrind수력발전소 (파키스탄)	H=26 L=114.5	발전시설 15만kW 사업비 4.36억$	2010~2017 운영 30년	K-water + 대우건설
Nenskra 수력발전사업 (조지아)	H=130 L=850	발전시설 28만kW 사업비 10.54억$	2022계약(건설 5년, 운영36년)	조지아 경제부 발주
Tina수력발전사업 (솔로몬)	H=71.5 L=219	발전시설 1.5만kW 사업비 2.12억$	2019계약(건설 4.75년, 운영30년)	솔로몬전력청 (SIEA)

발전소(콘크리트중력식, H=35m / L=238m / 발전시설 10.2만kW, 3.67억$, 2015~2019년)를 준공하였으며, 네팔의 UT-1댐수력발전소(콘크리트중력식, H=29.5m / L=100.9m)를 건설했다.

한국중부발전(주)에서도 인도네시아 왐푸댐 수력발전소(H=153m / 발전시설 4.5만kW, 1억 70,000,000$, 2016년)와 땅가무스댐수력발전소(H=8m) 등에 진출하였다.

표 29. 공기업(한국수자원공사 외) 및 민간기업의 주요 해외수자원사업 진출현황

구분	사업명	댐(m)	사업규모	공사기간	비고
공기업 + 민간 기업	왐푸수력발전소 (인도네시아)		발전시설 4.5만kW, 1.7억$	2012~2016	한국중부발전 + 포스코엔지니어링
	Xepian-Xe Nam Noy댐 (라오스)	H=48 L=73	본댐2, 보조댐5, 7억$ 발전시설 41만kW	2013~2019 운영 27년	한국서부발전 + SK에코플랜트
	땅가무스댐수력발전소 (인도네시아)	H=8 L=40	발전시설 5.54만kW, 1.9억$	2015~2018	한국중부발전 + 포스코엔지니어링
	굴프르댐수력발전소 (파키스탄)	H=35 L=238	발전시설 10.2만kW, 3.67억$	2015~2019	한국남동발전 + 대림산업 + 롯데건설
	UT-1댐수력발전 (네팔)	H=29.5 L=100.9	발전시설 21.6만kW, 4,000억 원	2021~2026	
민간 기업	쿨레카니수력발전소 (네팔)			1977	삼부토건
	케냐르다목적댐사업 (말레이시아)	H=150 L=800	필댐 저수용량 160억m^3	1985 준공	현대건설
	바쿤수력발전소사업 (말레이시아)	H=205 L=750	사업비 51억$	1996	현대건설
	카룬댐 (이란)	H=177 L=500	저수용량 2.3억m^3 발전시설 200만kW, 5.2억$	1994~2001	대림산업
	카룬-4댐수력발전소 (이란)	H=230 L=440	저수용량 21.9억m^3 발전시설 102만kW, 12억$	1997~2010	대림산업
	뉴봉수력발전소 (파키스탄)	H=13 L=67	발전시설 8.4만kW, 12억$	2009~2014	삼부토건
	Site C댐(캐나다)	H=60 L=1,050	발전시설 110만kW, 2.35억$	2015~2025	삼성물산
	후웨이호댐 (라오스)	H=79	발전시설 15만kW, 1.5억$	1993~1999	대우건설
	할루어강댐 (필리핀)	H=109	저수용량 2.5억m^3, 1.9억$	2019~2023	대우건설
	다울리강가댐수력댐 (인도)	H=56 L=315	발전시설 25만kW, 0.84억$	2000~2004	대우건설
	까리안다목적댐 (인도네시아)	H=63 L=516	저수용량 3억m^3		대림산업

사진 37. 굴프르댐수력발전소(H=35m, 파키스탄)

사진 38. UT-1댐수력발전소(H=29.5m, 네팔)

7. 2 민간기업

1) 우리나라는 1960년대부터 수자원사업을 강력히 추진한 결과 댐건설경험을 축적한 민간기업이 1970년대부터 해외사업을 수주하기 시작하였다.

삼부토건(주)은 사연댐(1965년), 안동다목적댐(1976년) 등 시공경험을 살려 1977년 네팔의 쿨레카니댐수력발전소(록필, H=114m / L=397m / 저수용량 10.43m³, 1982년, EL.1,500m고지)를 준공했으며, 이 댐은 2015년 4월 규모 7.8의 강진에도 안전에 이상이 없어 우리나라 건설기술의 우수성이 다시 주목받았다. 또한 이 경험을 기반으로 파키스탄의 뉴봉수력발전소사업(84,000kW, 2009~2013년, 발전소만 건설)을 성공적으로 준공한 바 있다.

2) 소양강다목적댐(1973년)을 건설한 다음 대청다목적댐(1980년) 건설 중 현대건설(주)은 1980년 말레이시아(국영전력청)의 케냐르다목적댐(록필, H=150m / L=800m / 저수용량 136억m³)을 수주해 1985년에 준공하였다.

이후에도 1996년 말레이시아 최대 국책사업(51억$ 규모)인 바쿤댐수력발전소(콘크리트중력식, H=205m / L=750m / 저수용량 438억m³) 건설에 외국기업과 컨소시엄으로 참여하였다. 한편 대림산업(주)은 이란의 카룬댐(록필, H=177m / L=500m / 총저수용량 2.3억m³ / 발전시설 2,000,000㎾, 1994~2001년)을 건설하였다.

사진 39. 왐푸댐수력발전소(인도네시아, H=153m)

사진 40. 땅가무스댐수력발전소(인도네시아, H=8m)

사진 41. 쿨레카니댐(네팔, H=114m, 1982년)

사진 42. 카룬댐(이란 H=177m, 1994~2001년)

사진 43. 케냐르다목적댐(말레이시아, 록필댐, H=150m)

사진 44. 바쿤댐수력발전소(이란, H=205m)

사진 45. 까리안다목적댐(인도네시아, H=63m) 조감도

사진 46. Site C 댐(캐나다, H=60m)

사진 47. 카룬-4댐발전소(이란, 아치식, H=230m)

사진 48. 후웨이호댐(이란, 콘크리트·록필복합식, H=79m 1993~1999년)

3) 2015년 평화의댐(1단계 1989년 12월 / 2단계 2006년 12월)과 김천부항다목적댐(2013년 12월)을 건설한 대림산업(주)은 인도네시아의 까리안다목적댐(록필, H=63m / L=516m / 저수용량 3억m^3, 2019년) 공사를 수주하는 등 국제적으로 댐 건설분야의 기술력을 높게 인정받았다. 또한 대림산업(주)은 이란의 카룬-4댐발전소(아치식, H=230m / L=440m / 발전시설 102만kW, 2010년)를 건설하였다.

4) 2015년 삼성물산(주)은 캐나다의 Site C댐(흙댐, H=60m / L=1,050m / 발전시설 110만kW, 13억$)을 수주해 2025년 완공 목표로 시공하고 있다.

5) (주)대우건설은 라오스의 후웨이호댐(콘크리트·록필복합식, H=79m / 저수용량 35.3억m^3 / 발전시설 15만kW, 1.5억$, 1993~1999년), 인도의 다울리강가수력댐(흙댐, H=56m / L=315m / 발전시설 25만kW, 25만$, 2000~2004년), 필리핀의 할루어강댐(H=109m, 저수용량 2.5억m^3, 1.9억$, 2019~2023년) 등을 건설 또는 건설 중에 있다.

8. 맺음말

세계적인 수자원개발(댐) 내력을 일부 댐 형식을 중심으로 개관해 보았다. 그리고 우리나라 수자원기술의 도입, 개발 및 발전실태를 살펴보았다.

건국 초기 우리나라의 과학기술 수준은 세계 최하위권이였다고 할 수 있을 것이다. 수자원부문 기술 또한 다르지 않았다. 더구나 정부수립(1948년) 후 4년에 걸친 6·25동란(1950~1953년) 그리고 4·19혁명(1960년), 5·16군사정변(1961년) 등으로 폐허화된 국토에서 경제·사회는 형언하기 어려울 정도로 혼란했고 열악했다. 1961년 들어 1인당국민소득 겨우 85달러가 되었다.

그와 같은 암울한 실정을 딛고 국가경제를 발전시키고자 고심하던 중 당시 박정희 대통령이 USOM/K의 한 수자원기술자에게 들은 "한국경제개발의 필수요건은 수자원 개발이며, 장래 엄청난 물 수요에 대비하기 위해 수자원조사의 시급성과 다목적댐개발의 중요성을 강조'한 조언에 크게 감동받았고, 이를 강력히 추진한 결과 그 첫 작품이 소양강다목적댐이었다. 이어서 안동, 대청, 충주 등 많은 다목적댐 건설과 함께 생·공·농업용수댐 및 수력댐 등을 건설해 국가 경제사회발전의 기간산업으로서 크게 이바지하였다.

당시 '수자원', '다목적댐'이란 용어 자체가 생소하고 대형 건설능력 또한 거의 없었던 나라에서 그와 같은 도전은 국가경제발전을 위한 획기적인 사실(史實)로 기록되고 있다. 따라서 2021년 7월 놀랍게도 우리나라는 선진국에 진입한 것이다. 아시아 2번째이고 세계에서 개발도상국 중 최초이다. 더구나 6·25동란을 치른 최빈국인 나라였음에도 불가사의하다 할 만한 일을 해낸 것이다. 1인당국민소득은 2020년 31,755달러(최고: 2018년 33,564달러)로 성장했다.

그동안 워낙 국가재정이 열악했고 바쁘게 일한 관계로 아쉬운 점도 없지 않았다. 그것은 일부 댐 형식에 국한한 개발에 치우쳤으며(일반적·객관적·현실적인 측면은 있었지만), 건설한 댐에 있어서도 좀더 다양한 차원의 문화적 가치성을 고려할 수 있었다면 하는 점이다.

앞으로의 바람은 첫째, 일상의 빈번한 홍수와 가뭄에 대비한 수자원시설 유지·운영관리의 안전성확

사진 49. 다울리강가수력댐(인도, H=56m)

사진 50. 할루어강댐(필리핀, H=109m)

보 둘째, 기존 수자원시설에 대한 국가적 운영관리 효율화 모색 셋째, 극한강우 및 극한가뭄(이미 100여 년 전에 우리가 경험하지 못한 실제 극한상황이 있었음)에 대한 국가적 대비,]넷째, 수자원시설의 문화·예술적 작품성 고려 다섯째, 새로이 개발된 신 건설재료를 이용한 신공법개발 여섯째, 수자원 기술 발전을 위하여 국내외 다양한 댐을 건설하면서 부단한 연구개발 추진과 함께 특히 4차산업혁명 기술요소 중 AI, 빅데이터, IoT와 드론, 3D프린트 등을 이용한 조사계획, 설계, 시공 및 운영관리 기술개발에 힘써 미래 산업에 걸맞은 첨단화를 이루는 것이다. 일곱째는 우리나라의 유일한 수자원전문기관인 K-water와 한국대댐회가 수자원기술 발전 및 후학을 위해 수자원기술 집대성(기술적, 학술적) 등이 필요할 것이란 생각이 든다.

참고문헌

1. 댐운영실무편람, 한국수자원공사, 2018
2. 한국수자원공사 50년사, 한국수자원공사, 2017
3. 한국토목사 제5편 제3장 댐 및 수력발전(강종수 교정), 대한토목학회, 2001
4. 한국수자원 100년의 발자취와 교훈 제2장 다목적댐(김계호, 이희승, 강종수), 한국대댐회, 2015. 12
5. 더 나은 세상을 디자인하다(부제: 대한민국토목기술의 역사) 제9장 댐(부제: 문명의 근원, 물을 담는 댐)(강종수), 대한토목학회, 2017
6. 한국산업기술발전사(건설) 4.1 수자원산업 개발과 관리(이희승, 강종수), 한국공학한림원, 2019. 4
7. World Register of Dams(General Synthesis), ICOLD, 2022
8. 숫자로 보는 대한토목학회 70년, 대한토목학회, 2021
9. 한국수자원공사 해외사업현황, 한국수자원공사, 2022
10. 공기업 및 민간기업 해외사업현황, 한국수자원공사, 2022
11. 댐 사진현황, 한국수자원공사, 2022
12. 한국의 댐 건설사, 한국대댐회, 2012

댐 치수능력증대사업 추진현황

이혜승

한국수자원공사 수자원시설처장

1. 사업의 추진배경

기후변화로 인해 과거의 기상 패턴과는 달리 짧은 시간에 국지적 집중호우가 잦아지면서 당초 설계빈도를 상회하는 이상홍수 등이 빈번하게 발생함에 따라 댐의 비상상황을 초래하는 홍수가 증가하고 있다. 또한 기후변화로 인해 강우현상을 예측하기 어려워져 더 큰 피해를 발생시키고 있다.

이러한 기상이변에 따른 이상홍수에 의해 댐 월류 및 여수로 붕괴 등 국내·외에서 많은 피해가 발생하였다. 과거 미육군공병단(USACE)이 미국 내 8,639개 댐을 대상으로 실시한 안전진단 결과 약 30%가 여수로의 단면이 부족한 것으로 조사된 바 있으며, 국제대댐회(ICOLD)에서는 1900년과 1973년 사이에 붕괴된 높이 15m 이상의 댐 중 약 1/3이 댐 제체 월류 및 부적절한 여수로에 의한 것으로 조사된 바도 있다. 실제 해외에서는 1960년 브라질의 Oros댐, 1961년 인도의 Khadakwasla댐, 1975년 중국의 Banqiao댐, 1983년 미국의 Glen Canyon댐 등 기존의 설계홍수량을 초과한 홍수 발생 등에 따른 댐 붕괴로 수많은 인명과 재산피해가 발생한 바 있다.

우리나라도 1984년, 1990년 홍수 시 소양강댐 수위가 계획홍수위에 근접하였고, 1961년 7월 11일 150mm 이상 강우에 따른 댐 유입량 증가로 현대적인 댐 최초로 전북 남원 효기리댐이 붕괴되었다. 댐 여수로 및 방수로의 방류능력 부족으로 인한 댐체 월류가 댐 붕괴 원인이었으며, 이 사고로 마을 전체가 침수되고 155명의 사망자가 발생하였다. 1996년 7월에는 한탄강 유역에 위치한 경기도 연천댐이 집중호우에 의한 월류로 댐 하류 양안부를 세굴시켜 수압을 못 견디고 댐체가 붕괴되었다. 이후 1998년에도 집중호우로 댐 일부가 유실되었고 결국 2000년 5월에 철거되었다. 강원도의 장현저수지는 2002년 태풍 '루사' 내습 시 여수로 설계홍수량 190m³/s 대비 1.6배를 초과하는 313m³/s 이상의 홍수량이 발생되어 여수로가 유실되고 댐이 붕괴되었다.

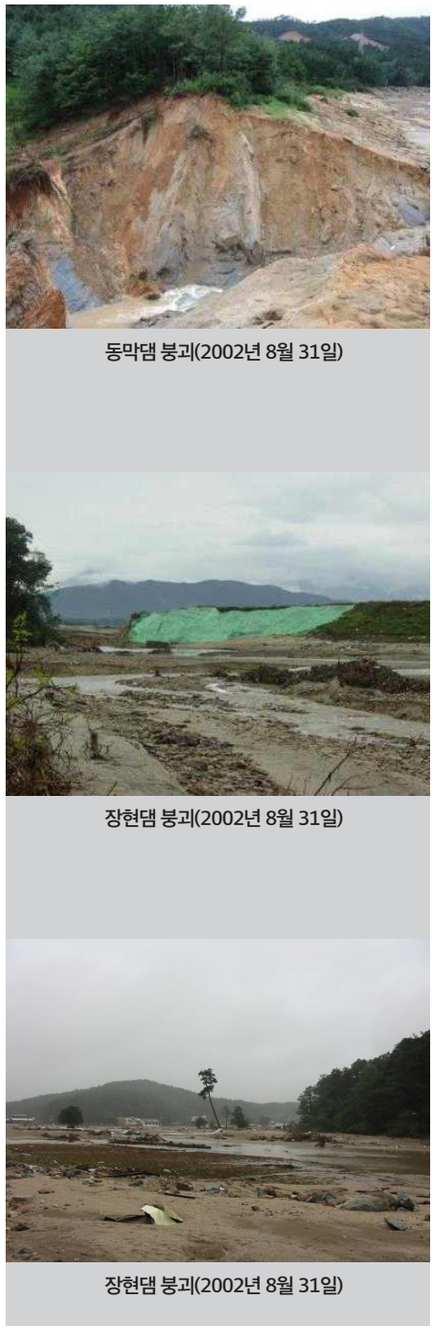
과거에는 신규 댐을 설계할 경우 경제성 및 안전성 등 여러 요소를 고려하여 최적의 댐 규모를 산정하였으며, 100년, 200년 등 빈도 개념으로 댐을 설계·시공해도 큰 문제가 발생하지 않았다. 그러나 기후변화로 인해 1,000년빈도 이상의 국지적 집중호우가 빈번하게 발생함에 따라 댐 붕괴에 따른 하류 침수피해, 용수공급 중단 등 대규모 피해가 발생할 확률이 커지게 되었고, 연천댐 붕괴 등 댐 안전성에 대한 위협이 커지자 이에 대한 대책 마련의 필요성이 대두되었다.

2. 관련 기준 강화 및 사업 계획의 수립

기후변화에 따른 이상홍수로 댐 월류 및 붕괴 등 피해를 예방하기 위해 먼저 관련기준 재정비 및 강화에 대한 요구가 커지게 되었다. 이에 따라 2001년 당시 건설교통부에서는 신규댐 건설 시 기후변화를 대비하기 위해 가능최대강수량(PMP)을 재산정하였고 댐설계기준에 반영하였다.

여기서 말하는 가능최대강수량(PMP)이란 주어진 지속기간 동안 어느 특정 위치에 주어진 유역면적에 대하여 연중 어느 지정된 기간에 물리적으로 발생할 수 있는 이론적 최대 강수량을 의미한다. 이론적 최대 강수량을 산정하는 방법으로는 경험적 방법, 수문기상학적 방법, 통계학적 방법 등이 있으며 이중 수문기상학적 방법은 해당 유역의 특성이 잘 반영되고 선진 외국에서 널리 사용됨에 따라 우리나라에서도 많이 적용하고 있는 방법이다. 추가로 가능최대홍수량(PMF)이란 일정 유역에 가능최대강수량(PMP)이 내린다는 가정하에 강우-유출모형을 통하여 산정하는 가능최대홍수량을 말한다.

2001년 개정된 댐설계기준은 신규로 건설되는 댐에만 해당됨에 따라, 기존 댐은 1998년에서 2002년까지 7개 댐 정밀안전진단 결과를 바탕으로 2006년부터 수문학적 안정성 확보가 미흡한 댐에 대해 안전성 확보를 위한 사업을 추진할 계획이었다. 그러나 2002년 태풍 '루사' 내습 시 강원도 강릉에 위치한 동막저수지는 여수로 설계홍수량 14m³/s을 4.8배 초과한 67m³/s 이상의 홍수량 유입으로 댐이 유실되고 하천이 범람하는 등 막대한 인명 및 재산피해가 발생하였으며, 2003년에는 태풍 '매미' 내습으로 인해 국내에서는 132명의 인명피해와 4조 2,000억원의 재산피해가 발생하였다.



동막댐 붕괴(2002년 8월 31일)

장현댐 붕괴(2002년 8월 31일)

장현댐 붕괴(2002년 8월 31일)

그림 1. 2002~2003년 태풍 '루사' 및 '매미'에 의한 댐 붕괴 사례

따라서 2003년 감사원에서는 자연재해대비 실태감사를 시행하였고 기상이변에 대비한 댐 안전성 확보 대책 추진 미흡을 지적하였으며 상류댐 건설, 수문 추가설치 등 PMP에 대비한 안전성을 신속히 확보할 수 있는 방안을 강구하도록 감사 처분하였다.

이에 따라 국무조정실 주관 범정부적 수해방지대책 수립(2003년 4월 8일) 및 국무회의 보고(2003년 4월 22일)를 통해 이상홍수 대비 댐 안전성 제고를 위한 사업 조기시행 근거를 마련하였다.

당시 건설교통부와 K-water는 PMP, PMF 재산정과 수문학적 안정성 검토 및 치수능력 증대방안을 마련하기 위하여 2003년 4월 '댐 수문학적 안정성 검토 및 치수능력증대 기본계획' 수립 용역을 착수, 2004년 9월 수립을 완료하였다. 이후 2011년 북한의 방류 위협에 대한 신속한 대응을 위해 평화의댐이 신규 추가되었다.

3. 사업 주요내용 및 추진현황

기존 댐의 수문학적 안정성 확보를 위해 구조적 대책을 추진하되 구조적 대책 완료 전까지는 비구조적 대책(단기대책)을 시행하는 것을 기준으로 수립하였으며, 24개 댐에 대한 구조적 대책을 크게 댐 월류가 우려되는 댐과 댐 여유고가 부족한 댐으로 나누어 계획을 수립하였다.

월류가 우려되는 댐은 총 14개이며, 가능최대홍수량(PMF)을 물리적으로 배제하기 위해 충주댐, 안동댐처럼 보조여수로를 신설하거나 연초댐처럼 기존 여수로를 확장하는 등 댐 방류량을 증가시켜 댐 월류를 방지하는 방안을 채택하였다. 보조여수로는 수리 및 구조적 안정성과 지형·지질조건, 환경영향 및 시공성 등을 종합적으로 고려하여 최적 형식(월류형, 터널형 등) 및 위치를 결정하였다.

월류형 보조여수로를 설치한 안동댐의 경우 유입부는 급경사이고 유출부가 완경사인 특징을 갖고 있으며 기존 여수로에 미치는 흐름 영향이 거의 없는 점, 전 구간 지상공사로 시공이 유리한 점 등 현장여건을 고려하였다.

터널형 보조여수로를 설치한 충주댐의 경우 터널노선부 암반이 Ⅰ, Ⅱ등급으로 양호한 암질 상태이며, 댐체 구조물 훼손 없이 댐 안정성 확보가 가능한 점, 본댐과 분리된 부지로 공사 중 댐 기능 장애가 없는 점, 환경훼손 최소화 등 현장여건을 고려하였다.

여유고가 부족한 댐은 총 10개이며, 대부분 파라펫월 설치방식을 채택하였다. 여유고란 저수면의 풍파, 지진 시 파랑, 여수로 문비 작동불량에 따른 저수지 수위상승 등 댐 형식별 월류에 대한 안전성을 고려한 추가 높이를 말하며, 파라펫트월 설치는 제체의 파도로 인한 월류 방지 및 댐 붕괴를 막고 댐 단면을 감소시켜 댐 축조량 등을 줄이는 역할을 한다. 안계댐의 경우 댐의 수변공간이 지역주민들에게 친숙해지고 관광지화가 되면서 투명유리 파라펫트월을 설치하여 경관개선의 목적까지 포함하였다.

치수능력증대사업은 2003년 소양강·섬진강·영천댐을 시작으로 2022년 현재까지 전체 24개 댐 중 19개 댐의 사업을 완료하였으며, 4개 댐은 진행 중이

표 1. 치수능력 증대사업 기본계획의 방향

구분	세부 내용
비구조적 대책	용수공급에 지장이 없는 범위 내에서 홍수기 예비방류를 통해 댐 수위를 가능한 낮게 유지하는 등에 의한 홍수조절능력 증대
구조적 대책	댐 증고, 제체 보강, 비상여수로 설치, 파라펫월 설치, 기존 여수로 확장 등 기존 시설 보완

표 2. 댐 월류가 우려되는 14개 댐(다목적댐 7, 용수댐 6, 홍수조절용댐 1)

구분	댐명	사업기간	총사업비(억원)	PMF(m^3/s)		치수능력 증대방안
				당초	재산정	
다목적댐(7개)	소양강댐	'03~'10	1,743	12,392	20,715	보조여수로 신설
	임하댐	'04~'12	1,706	7,550	14,800	보조여수로 신설
	대청댐	'04~'14	1,949	14,700	21,742	보조여수로 신설
	안동댐	'05~'14	1,179	8,350	15,094	보조여수로 신설
	섬진강댐	'03~'16	2,161	3,268	8,601	보조여수로 신설
	충주댐	'13~'22	2,691	26,680	32,800	보조여수로 신설
	남강댐	'21~'26	3,806	15,800	19,975	제수문 증설, 보조여수로 신설
용수댐(6개)	영천댐	'03~'07	493	1,740	3,700	보조여수로 신설
	광동댐	'04~'07	190	1,430	2,190	여수로 구조개선
	수어댐	'04~'07	244	687	1,652	보조여수로 신설
	연초댐	'05~'08	122	264	520	기존여수로 확장
	대암댐	'04~'10	415	993	2,269	보조여수로 신설
	운문댐	'09~'17	1,104	4,039	7,427	보조여수로 신설
홍수 조절용댐	평화의댐	'12~'18	1,385	11,664	23,622	댐 하류사면 보강

표 3. 댐 여유고가 부족한 것으로 우려되는 10개 댐 (다목적댐 5, 용수댐5)

구분	댐명	사업 기간	사업비 (억원)	PMF(m³/s)		치수능력 증대방안
				당초	재산정	
다목적댐 (5개)	합천댐	'09	-	8,900	10,610	홍수조절방식 변경
	보령댐	'08~'10	11	3,145	3,424	파라펫월 설치
	밀양댐	'09~'11	24	2,182	2,509	파라펫월 설치
	부안댐	'09~'11	23	1,674	1,388	파라펫월 설치
	주암댐 본	'06~'15	1,199	6,847	12,292	보조여수로 신설
	주암댐 조			3,625	2,711	파라펫월 설치
용수댐 (5개)	달방댐	'04~'06	53	1,256	1,140	여수로 구조개선
	구천댐	'05~'07	75	266	520	기존여수로 확장, 파라펫월 설치
	안계댐	'18~'23	81	167	122	파라펫월 설치
	선암댐	'20~'24	64	17	34	파라펫월 설치
	사연댐	미착수	295	1,675	2,290	기존여수로 확장

고 남강댐은 미착수된 상황이다.

완료되거나 진행 중인 댐 중 가장 이슈가 있던 사업으로는 충주댐 석면 발생 이슈가 있다. 2015년부터 보조여수로 굴착에 따라 발생된 터널굴착암 처리를 위해 외부에 반출(매각)하였으나, 2015년 11월 KBS의 '충주댐 인근 석면 발견' 언론보도를 통해 충주댐 주변 석면문제가 부각되었고, 치수사업으로 인한 식수 및 대기오염 우려에 대해 언론에 지속적으로 보도가 되었다.

석면 발생 우려에 따라 민관 합동조사단이 구성되어 조사를 착수하였고, 2017년 수질 및 대기질 허용기준치 이내로 인체 위해성은 없는 것으로 조사결과 발표되었다. 그러나 논란에 대비하고자 댐 상류에 사토장을 조성하고 외부반출을 하지 않도록 결정하였다. 이에 저수지 내 사토장 물량을 추가 확보하고 반출되었던 암반도 다시 매입하는 등 적기 대응을 통해 석면 발생에 대한 우려를 잠재울 수 있었다. 현재 충주댐 치수능력증대사업은 공정율 82.5%의 마무리 단계에 있다.

유일하게 미착수된 남강댐 치수능력증대사업의 경우, 직하류에 아파트 단지, 상가 등 대규모 도심지가

표 4. 치수능력증대사업 추진 현황(24개 댐)

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

형성되어 있어 이상홍수 시 댐 월류 및 붕괴가 된다면 진주시, 함안군 등 하류지역의 대규모 재산피해 및 일 1,600,000톤의 용수공급 중단, 삼천포·하동 화력발전소 운영 중지로 전국 전력의 7% 공급중단, 주민 10만 명 이상 대피가 불가피하다. 이런 사유로 남강댐 치수능력증대사업은 재난예방 차원의 목적으로 신속히 추진되어야 하지만, 사천-진주 지역 간 방류량 갈등, 방류에 따른 어업피해 문제 등 지역갈등이 발생함에 따라 현재까지 본격적인 추진을 하지 못하고 있는 실정이다.

그림 2. 치수능력증대사업 사진대지

남강댐 발원지는 덕유산과 지리산으로 집중호우시 댐 유입속도가 빠르지만, 댐 특성상 흔히 접시형 댐으로 불리울 만큼 물그릇이 작아 홍수조절에 한계점을 갖고 있다. 국내 최대규모인 소양강댐과 비교해 보면 유역면적은 비슷한 수준(소양강댐 2,703km², 남강댐 2,285km²)이나, 총 저수용량은 소양강댐(2,900백만m³)의 11%(309.2백만m³), 홍수조절용량은 54% 수준(소양강댐 500백만m³, 남강댐 269.8백만m³)에 불과한 수준이다. 이런 특성을 고려하여 당초 설계 시부터 남강 본류 방류와 사천만으로의 유역변경식 홍수조절로 계획하였고 이로 인해 진주시와 사천시의 갈등이 발생되었다.

이상 홍수 시 추가방류량에 대해 1:6으로 배분되어 방류량의 대부분을 사천만에서 감당함에 따라 사천시 어민들의 어업피해, 부유물 쓰레기 등 문제점에 대해 사천시에서는 남강 본류 방류 및 어민 지원 대책을 요구하고 있으며, 진주시에서는 댐 직하류가 도심지임을 고려하여 인구가 적은 사천만을 통한 방류량 증대를 요구하고 있다. 이에 따라 지역 간 갈등 해소를 위해 남강댐 방류에 따른 댐 하류 하천과 어업 영향조사 및 대책, 지역지원방안 등 지역의 요구사항을 종합적으로 검토하고 제도개선 등을 포함해 지역 상생을 위한 다양한 방안을 마련하고자 2022년 4월부터 남강댐 상생협력 민·관협의체를 구성·운영 중이다. 민·관협의체는 상생협력 방안 마련을 위한 별도의 연구용역을 시행하고 지자체 의견수렴 및 시민사회 공청회 등을 통해 제시된 의견을 검토하여 수용 가능한 사회적 합의를 도출할 계획이다.

4. 향후 과제

현재 추진되고 있는 치수능력 증대사업은 과거 20년 전에 산정된 PMP 기준으로, 최근 기후변화에 따른 이상홍수 등의 리스크를 반영하지 못하고 있는 것이 현실이다.

2022년 8월 서울시 한강 이남지역에 시간당 최대 강우량 141.5mm의 폭우가 내려 200년빈도 시간당 최대강우량 114mm를 초과하였고, 2022년 9월 태풍 '힌남노'로 울산, 포항, 경주지역에 시간당 70~100mm의 폭우가 내려 많은 인명피해와 재산피해를 입었다. 특히 태풍 '힌남노'로 인해 경주시에 위치한 농업용(47년 경과)의 왕신댐은 500년빈도의 300mm 집중호우가 내려 댐이 월류하면서 댐체 사면의 일부가 유실되어 긴급대피령이 발령되기도 하였다.

우리나라뿐만 아니라, 2022년 7~8월에 발생한 파키스탄 최악의 홍수, 미국·중국의 가뭄 등 전 세계적인 기상이변은 현재도 계속 발생하고 있다. 이와 관련하여 유엔 사무총장은 전 세계 온실가스 배출량으로 인해 파키스탄의 피해가 발생했다고 언급하였고, 전 세계 기후전문가들 또한 난개발 등으로 지구온난화, 생태계 파괴 등이 발생하고 기상이변이 속출하므로 이에 대비해야 한다고 강조하고 있다.

이렇듯 기상이변으로 예측하지 못했던 국지성호우가 빈번해지고 과거에 산정한 PMP보다 더 많은 강우가 내릴 수 있는 상황에 놓이면서 댐 안전성을 위협하는 위험요인도 증대되고 있다. 용수공급 및 홍수조절, 친환경발전 등 여러 목적을 위해 건설된 댐은 국가 중요기반시설로서 붕괴될 경우 국민의 생명과 재산에 막대한 피해가 생기는 것은 물론 대체재가 없어 용수공급 중단 등에 따른 2차 피해 발생도 우려된다.

이러한 이상기후를 대비하기 위해 과거에 산정한 가능최대강수량(PMP)에 대한 재산정 필요성이 높아짐에 따라, 환경부에서는'PMP 산정절차 재평가 및 보완연구(2020~2021년)' 용역을 수행하였다. PMP 산정절차 재평가 결과를 바탕으로 한 PMF 재산정 및 추가적인 치수능력 증대방안 필요성 등에 대한 검토와 논의가 필요할 것으로 생각되며, 강우패턴 변화에 따라 기존의 수문기상학적 방법을 활용한 가능최대강수량(PMP) 산정은 한계점을 가지고 있으므로, 기후변화에 적절히 대응할 수 있도록 다양한 방법을 적용하기 위한 과학적인 연구와 검토가 필요할 것으로 생각된다.

더 나아가 국가댐뿐 아니라 지자체 및 타 기관 등에서 관리 중인 주요 댐들도 치수능력 증대사업 추진을 통해 국민의 생명과 재산을 보호해야 할 것이다.

4대강살리기 사업

심명필

인하대학교 명예교수
전 4대강 살리기사업 추진본부장

1. 추진 배경

1. 1 4대강살리기 사업의 제안

2007년 12월 대선에서 한반도 대운하를 공약으로 내건 한나라당 이명박 후보가 제17대 대통령에 당선됐다. 그러나 집권 초반 미국산 소고기 파동으로 시작된 촛불시위로 이명박 대통령의 지지율은 한 자리 숫자로 떨어졌으며, 대운하는 시대를 역행하는 토목개발 사업이라는 반발이 일었다. 이에 따라 대통령 취임 100일 후인 2008년 6월 19일 이명박 대통령은 대선공약이었던 대운하 사업을 하지 않겠다는 담화를 발표했다.

한반도 대운하 추진은 중단됐지만 오랜 세월 지속돼온 우리나라의 하천의 문제점을 해결해야 한다는 과제는 남아있었다. 국토해양부는 2008년 하반기에 홍수피해 발생 후 사후복구 방식보다 근원적인 대비책을 마련하기 위해 홍수와 가뭄에 대비한 사전예방이라는 선제적인 대책을 마련했다. 단기간에 예산을 집중 투입함으로써 물 문제를 해결하고 나아가 강 중심으로 국토를 재창조하는 종합프로젝트(Package project)를 구상한 것이다. 이 프로젝트는 제방보강, 강변저류지, 생태복원 등 종합적 정비로 홍수 및 가뭄에 안전하면서도 활용도 높은 하천공간을 조성하고, 녹색 뉴딜사업의 일환으로 새로운 일자리를 창출해 침체된 지역경제를 되살리고, 나아가 이산화탄소 저감 등 지구온난화 방지에도 기여할 것을 목적으로 삼았다.

우리나라 수자원정책은 각각의 시대적 요구에 걸맞은 일정한 성과를 거두긴 했지만, 하천은 제방축조 위주의 획일적 대책이라는 점과 물 공급의 안정성과 형평성 취약 및 하천공간 활용정책 부재 등 여러 문제점이 있었다. 1996년, 1998년, 1999년에 잇달아 발생한 홍수피해에 따라 1999년 말 대통령비서실에 '수해방지대책기획단'을 만들어 예산 24조 원의 수해방지종합대책을 수립하여 유역종합치수계획의 수립 등 관련법과 제도의 개선, 하천개수 등 투자확대와 조직개편이 이루어졌다.

일련의 치수대책이 추진되고 있던 2002년 태풍 루사로 인해 사상 최대인 피해액 6조 원 이상의 홍수피해를 기록했다. 이에 따라 전국적이고 대규모로 발생하는 수해에 효과적으로 대응하기 위해서는 더 근원적인 대책을 수립하여 범정부적으로 추진하는 것이 필요하다는 인식 확산으로, 2002년 말 국무총리 국무조정실에 다시 수해방지대책기획단을 설치해 42조8,000억 원의 수해방지 종합대책을 수립했다.

두 번의 '수해방지 종합대책'은 모두 유역종합치수계획의 중요성을 강조했다. 다만, 정부의 재정투입 한계에 따라 10년 내에 추진할 수 없는 사업이 대부분이었으며, 말 그대로 계획에 그칠 수밖에 없었다. 여기에 더해 수질을 보전하고 하천생태계를 복원하자는 사회적 요구도 크게 늘었다. 또한 도시하천의 건천화를 막기 위해 환경개선 용수를 확보해야 한다는 주장이 설득력을 얻으면서 하천유지용수 확보에 대한 요구 또한 매우 커졌다.

2006년 태풍 에위니아와 집중호우 피해를 계기로 국토교통부 등 9개 부처 합동으로 풍수해피해 전 과정을 점검하고 총제적 진단결과에 따라 총사업비 87조4,000원의 예산이 소요되는 신국가방재시스템을 구축하여 추진하였지만, 성과를 내지는 못하였다. 국민소득의 증대로 수변공간을 문화적으로 이용하고자 하는 욕구는 커지고 또 수상레저활동 인구도 급격히 증가했으나 이를 만족시킬 다양한 수변문화 공간과 프로그램은 전무한 실정으로, 치수·이수·하천·환경문제를 해결하고 다양한 사회적 요구를 동시에 해결할 수 있는 새로운 방안이 필요하였다.

1. 2 4대강살리기 프로젝트와 녹색뉴딜사업

이명박 정부가 들어선 2008년 초는 세계적인 금융위기로 경제전망이 암울하던 시기였다. 2007년부터 미국에서 발생한 서브프라임 모기지 사태로 미국경기의 급격한 위축이 우려되었고, IMF사태를 겪은 한국은 금융위기에 대한 불안감이 더 컸다. 경제회복을 주요 공약으로 당선된 새 정부는 대책 마련에 더욱 부심하였다. 2008년 8월 15일 광복절 경축사에서 이명박 대통령은 '저탄소 녹색성장(Low carbon, Green growth)'을 새로운 국가비전으로 제시했다. 이에 따라 정부는 세계 일류의 녹색 선진국 건설을 목표로 녹색성장을 에너지·환경뿐만 아니라 일자리와 성장동력 확충, 기업경쟁력과 국토개조 및 생활혁명을 포괄하는 종합적 국가비전으로 규정하고 이를 통해 제2의 도약과 세계국가를 건설하겠다는 계획을 발표하였 다.

국토해양부는 이제까지 누적되어온 우리나라 하천관리의 근본적인 문제점을 종합적으로 개선할 수 있는 대대적인 하천정비 방안을 제안했다. 준설로 수심을 깊게 하여 유수 소통능력을 키워 홍수피해를 막자는 제안이었다. 또한 평시에는 강폭과 수심이 확대되면 물그릇이 커져 담수량이 늘어난다는 데에서 온 선제적 대응책이었다. 하천정비는 수십 년 동안 역대 정부가 필요성은 절감하면서도 손을 대지 못하고 있던 사업이었다. 세계적인 금융위기에 내수를 살려 경제의 숨통이 틔게 하면서 재난예방과 기후변화에 대비할 수 있는 사업이었다.

국토해양부는 10년마다 '4대강 유역종합치수계획'과 '하천정비기본계획'을 수립해왔다. 특히 2002년 태풍 '루사', 2003년 태풍 '매미' 이후 선제적인 재해예방 대책을 위해 전국 국가하천을 대상으로 조사한 '국가하천 하도정비 활성화 방안'이라는 종합보고서는 이미 2005년에 완성되어 있었다. 국토해양부가 수행해오고 있는 이 기본계획을 뼈대로 이수·치수 계획을 포함한 수질개선, 친수문화, 지역활성화 방안 등이 종합적으로 수립되었다. 2008년 12월 15일 이명박 대통령이 주재한 제3차 국가균형발전위원회에서 '4대강살리기 프로젝트'가 발표되었다. 기후변화 대비, 홍수 및 가뭄 등 물 문제를 근원적으로 해결하고, 하천공간을 합리적으로 정비하여 이용을 최대화하고자 하는 이 프로젝트에는 노후제방 보강과 퇴적구간 준설, 하천생태계 복원, 중소규모 댐·홍수조절지 건설, 농업용저수지 증고, 자전거길 설치 및 수면활용과 가뭄대비 비상용수 공급을 위한 친환경보 설치 등이 포함되었다. 이 프로젝트의 기대효과는 다음과 같았다.

- 제방 보강 중소규모 댐·조절지 건설로 매년 홍수로 인한 피해(연 2조 7,000억원) 및 복구비(연 4조 2,000억원) 저감
- 퇴적구간 정비 및 보 설치, 저수지 증고로 가뭄 시 비상용수 공급 및 수질개선
- 수변공간 조성 및 자전거길 설치로 다양한 여가활동 기회 제공
- 태양광 및 소수력 발전으로 신재생에너지 생산, 생태습지 등 이산화탄소 저감
- 일자리창출 및 생산유발효과 발생 등 지역경제활성화 견인

2009년 1월 6일 국무총리는 '4대강살리기 사업' 등 9개 핵심사업과 27개 연계 사업으로 구성된 녹색뉴딜사업 추진안을 발표하였으며, 2009년 상반기까지 마스터플랜을 수립하기로 하였다.

2. 마스터플랜의 수립

2. 1 수립 경위

국토해양부는 4대강살리기 프로젝트의 구체적인 액션플랜을 확정하기 위해 마스터플랜 수립 연구용역을 실시하였다. 이 용역은 한국건설기술연구원이 담당했으며, 2008년 12월 12일에 시작하여 6개월 동안 진행되었다. 다양한 분야의 융복합 연구를 위하여 국토연구원, 한국수자원공사, 미래자원연구원, 한국하천협회, 설계사 컨소시엄(동부엔지니어링(주관), 도화엔지니어링, 삼안, 이산, 유신, 현대엔지니어링) 등이 참여하였다. 환경부 국립환경과학원은 수질분야 예측 및 대책분야를 전담하였다.

2009년 2월 4대강살리기 프로젝트를 전담하는 범부처 조직으로 설치된 '4대강살리기기획단'은 4월 17일 '4대강살리기 추진본부'로 격상되면서 국토해양부 산하 조직으로 확대 개편되고 추진본부장은 장관급으로 보임되었다.

2009년 4월 27일에는 이명박 대통령이 주재하고 지역발전위원회, 녹색성장위원회, 국가건축정책위원회, 국토해양부, 환경부, 문화체육관광부, 농림수산식품부 등 7개 기관이 참여한 4대강살리기 합동보고대회를 개최하였다. 이 대회에서는 4대강살리기의 의미와 추진방향(지역발전위원회), 녹색성장과 4대강살리기(녹색성장위원회), 4대강 수변공간 재생디자인 기본구상(국가건축정책위원회), 4대강살리기 마스터플랜 중간보고(국토해양부), 4대강살리기 친환경적 추진방안(환경부), 문화가 흐르는 4대강살리기 추진방안(문화체육관광부), 농촌희망 금수강촌 만들기(농림수산식품부) 등의 주제가 발표되고 논의되었다.

정부 합동보고회에서 중간성과를 보고한 이후, 4대강살리기 추진본부가 개최한 4대강살리기 마스터플랜 지역설명회(2009년 5월 7일~19일, 12회)는 4대강 유역에 위치한 전국 12개 시·도를 순회하는 방식으로 개최되었다. 또한 관계 부처·학회 등의 전문가 그룹의 자문(5월 14일~15일) 및 한국수자원학회·물환경학회등 관련 학회 토론(5월 21일~22일), 전문가·시민 등이 참여한 공청회(5월 25일) 등을 통해 각계의 다양한 의견을 수렴한 뒤, 이를 종합적으로 검토해 반영하였다. 2009년 6월 8일 4대강살리기 사업의 추진방향과 주요사업내용 등을 담아 '4대강살리기 마스터플랜'이 확정 발표되었고, 최종보고서는 7월 24일 발간·배포되었다

2. 2 마스터플랜의 방향과 내용

2. 2. 1 비전, 목표 및 전략

4대강살리기 마스터플랜에는 사업의 추진배경, 목표 및 비전 등 총론과 5대 핵심추진과제, 사업추진계획 및 시행방안 등 사업의 기본방향과 주요지침 등을 수록해 4대강살리기 사업에 대한 가이드라인 역할을 했다. 4대강살리기 마스터플랜의 비전은 '생명이 넘치는 강, 새로운 대한민국!'이다. 목표는 기후변화 대비, 자연과 인간의 공생, 국토 재창조, 지역균형발전 및 녹색성장기반구축 등 4가지로 설정했다.

최우선 목표는 기후변화에 대비하는 것이다. 우리나라는 여름철에 비가 많이 내리지만 지형상 대부분 바다로 빠져나가고, 수자원 활용률은 매우 낮다. 더욱이 강바닥의 퇴적이 심해 많은 물을 하천에 머무르게 할 수도 없어 수자원의 공급이 불안정한 특성이 있다. 이에 따라 강을 준설하여 통수면적을 키워서 홍수에 대비하고, 보를 만들어 수자원을 확보해두고 극심한 기후변화에 대비하는 것이다.

둘째, 자연과 인간이 공생하는 것이다. 강이 환경적으로 개선되고 홍수기는 물론 갈수기에도 수량이 풍부해져 수면적이 넓어진 강은 경관도 좋아진다. 강이 가지고 있는 정서적 기능이 되살아나는 것이다.

셋째, 국토를 재창조하는 것이다. 그동안 강은 산업화를 거치면서 방치되다시피 하였다. 각종 재해의 원인이기도 하고, 오염되어 기피의 대상이기도 하였다. 4대강은 상류와 하류, 동서남북 지역의 여러 지자체가 함께 공유하는 자원이다. 4대강살리기 사업으로 각 지역이 통합되어 공동 번영함으로써 광역경제권이 형성될 수 있다. 도농통합·상생발전이 가능하고 국토-수공 간 연계형(Water-spatial synergy)의 새로운 국토발전 패러다임이 구축되는 것이다.

넷째, 국토 균형발전이다. 철도와 도로는 거의 직선으로 노선을 따라 지역발전을 이끌어왔다. 그러나 강은 전국의 모든 지역을 두루 지난다. 4대강 유역을 정비함으로써 그 혜택이 전국에 골고루 돌아가면 어느 복지정책보다 영향을 미치는 범위가 크다. 이로 인해 장기적으로 지역경제 활성화 효과도 예상되었다.

물 관리 분야의 글로벌 리더로서의 위상강화도 중요한 목표이자 과제였다. 전 세계적인 기후변화로 나라마다 물관리가 중요한 국가적 과제로 대두되면 4대강사업은 이후에도 우리가 예측하지 못하는 새로운 분야에서까지 부가가치를 계속 확대 재생산할 수 있다. 이런 일련의 부가가치 연쇄효과가 새로운 국가성장동력의 바탕이 될 것이다.

4대강살리기 사업은 단순한 하천정비 사업에 머무르는 것이 아니라 물관리와 강의 이용에 대한 패러다임 전환을 의미한다. 목표 달성을 위한 전략으로는 다음의 4대 전략이 설정되었다.

1. 사후대책에서 사전예방 종합대책으로의 전환
2. IT·GT 등 첨단기술을 활용한 수변 네트워크 구축
3. 치수 선진화로 세계적 녹색기술 선도국가로의 발돋움
4. 지역주민 중심의 협력적 거버넌스 구축

마스터플랜은 4대강살리기 사업의 기본방향을 제시하는 계획으로서 구체적인 내용은 설계 및 시공과정 등에서 조정될 수 있도록 했다.

2. 2. 2 사업 범위와 구분

1) 사업 범위

4대강살리기 사업의 공간적 범위는 4대강과 섬진강 본류 및 주요 지류를 포함한 18개 국가하천

표 1. 수계별 사업범위

구분	사업범위		공사구간 (km)
	연장(km)	행정구역(시점~종점)	
계	1,944		1,266.3
한강	478		254.7
한강본류	265	충북 단양 가곡~경기 김포 월곶	145.6
북한강	158	강원 화천 화천~경기 양평 양서	71.1
섬강	55	강원 횡성 횡성~경기 여주 강천	38.0
낙동강	711		470.2
낙동강본류	383	경북 안동 도산~부산 강서 명지	330.7
서낙동강	18	부산 강서 대저1~부산 강서 명지녹산	16.2
맥도강	7	부산 강서 대저2~부산 강서 강동	2.5
평강천	12	부산 강서 대저1~부산 강서 명지	3.0
금호강	69	경북 영천 완산~대구 달성 다사	57.7
남강	144	경남 함양 유리~경남 함안 대산	24.6
황강	78	경남 거창 거창~경남 합천 청덕	35.5
금강	448		272.4
금강본류	361	전북 진안 진안~충남 서천 마서	205.2
갑천	33	대전 서 용촌~대전 유성 봉산	27.4
유등천	15	대전 중 침산~대전 서 삼천	12.5
미호천	39	충북 청원 북이~충남 연기 금남	27.3
영산강	134		130.5
영산강본류	112	전남 담양 담양~전남 영암 삼호	111.0
황룡강	9	광주 광산 삼도~광주 광산 유계	6.5
함평천	13	전남 함평 대동 ~ 전남 함평 엄다	13.0
섬진강	173	전북 임실 신평 ~ 경남 하동 금남	138.5

(1,944km)으로 세부내용은 표 1과 같다.

- 한강: 본류, 북한강, 섬강
- 낙동강: 본류, 서낙동강, 맥도강, 평강천, 금호강, 남강, 황강
- 금강: 본류, 미호천, 갑천, 유등천

2) 사업 구분과 내용

4대강살리기 사업은 사업의 기본적인 목적인 홍수방지와 수자원 확보를 위한 직접사업(국토해양부 사업)과 그 외 간접적인 목적수행을 위한 간접사업(농림수산식품부·환경부 사업)으로 구분된다.

① 직접사업: 국토해양부에서 추진하는 하천사업으로 준설, 보 건설, 생태하천 조성, 제방보강, 자전거길 조성 등이며, 사업비는 15.4조원이다.(표 2 참조)

- 16개 보 건설: 한강 3개, 낙동강 8개, 금강 3개, 영산강 2개
- 퇴적토 5억 7,000만m^3 준설: 준설토는 골재판매 및 농경지 리모델링 등에 활용(*최종 준설량은 4억 5,677만m^3로 축소)
- 생태하천 929km 조성: 오염물질 하천유입을 막고 어도, 생태습지, 샛강 등
- 노후제방 620km 보강: 제방폭 확대 및 제방사면 완경사화 등 치수 안전도 증대
- 댐 3개, 조절지 2개소, 저류지 3개소 건설, 하구둑 2개소 배수문 증설
- 자전거길 1,728km: 4대강 상하류를 연결하여 스포츠·관광산업 육성
- 영산강: 본류, 황룡강, 함평천, 섬진강 본류

② 간접사업: 농림수산식품부에서 추진하는 농업용저수지 증고사업 및 영산강 하구둑 개선사업비는 2조9,000억 원, 환경부에서 추진하는 환경기초시설 확충사업으로 사업비는 3조9,000억 원이다.

- 농업용저수지 96개 증고: 농업용수 및 하천유지유량 공급(한강 12, 낙동강 31, 금강 30, 영산강·섬진강 23)
- 영산강 하구둑 증설사업: 영산호, 영암호 배수문, 연결수로 및 제수문
- 환경기초시설 1,281개소: 하·폐수 처리장 207개소, 마을하수도 589개소, 가축분뇨처리시설 31개소, TP처리시설 보강 545개소, 하수관거 확대 246개소, 빗물침투 저류시설·생태유수지 등 85개소

표 2. 국도해양부 소관사업 현황

구분	계	한강	낙동강	금강	영산강(섬진강)
보 설치	16개	3	8	3	2
준설	5.7억m^3	0.5	4.4	0.5	0.3
생태하천	929km	193	407	199	130
제방보강	620km	131	335	117	17(20)
댐	3개	-	3	-	-
하구둑	1개	-	1	-	-
저류지 · 조절지	5개	2	-	-	3
자전거길	1,728km	305	743	248	220(212)

3. 사업의 시행

3. 1 사업시행 체계

4대강살리기 사업은 마스터플랜 확정 이후 법정계획 정비, 예비타당성조사, 보상, 하천구역 내 시설물 등 정비, 준설토 처리, 사전환경성검토 및 환경영향평가, 문화재조사 등 일련의 사전작업이 진행되었고, 사업발주 및 착공 이후에는 공사 중 환경영향관리, 사업 전반에 관한 모니터링 등 공사 후 유지관리 사업이 시행되었다.

3. 2 예비타당성 조사

국가재정법과 예비타당성조사 운용지침에 근거하여 4대강살리기 사업은 단위사업별로 예비타당성조사가 수행되었다. 간이 예비타당성조사를 포함하여 조사가 수행된 단위사업 지구는 총 18개소로서, 4대강사업의 핵심이라 할 수 있는 준설, 보 건설, 제방보강, 강변저류지 및 홍수조절지 조성, 하구둑 배수문 증설사업 등은 「국가재정법」 시행령 제13조 제2항 제6호의 재해예방 사업으로 간주되었다.

기획재정부장관은 「국가재정법」에서 정한 절차에 따라 예비타당성조사 총괄기관인 한국개발연구원(KDI) 공공투자관리센터(PIMAC)에 예비타당성조사를 요청했다. 이에 2009년 6월부터 2010년 1월까지 4대강살리기 사업에 대한 예비타당성조사가 실시되었다. 다만, 보현산댐은 2008년 4월부터 9월, 영주댐은 2009년 1월에 기실시되었다.

4대강살리기 사업의 예비타당성조사 결과는 생태하천 조성, 자전거도로 설치, 댐 건설, 농업용저수지 둑 높이기 등 사업유형별로 살펴보면 표 3과 같다.

3. 3 보상

4대강살리기 사업 보상은 「공익사업을 위한 토지 등의 취득 및 보상에 관한 법률」 및 「하천법」에 따라 시행하였으며, 2009년 3월 신규 제정된 「하천편입 토지 보상 등에 관한 특별 조치법」에 따라 기존 하천구역 내 사유지에 대한 보상을 포함하여 시행되었다. 주요 보상항목은 토지보상, 경작자에 대한 영농손실보상, 비닐하우스 등 지장물이전비보상, 어업권보상 등이다.

전체 보상업무는 4대강살리기 사업 추진본부에서 총괄 관리했으며, 사업시행자인 지방국토관리청, 한국수자원공사는 보상 전문기관인 한국토지주택공사와 지자체에 보상을 위탁했다. 4대강살리기 사업과 관련한 보상업무는 2009년 3월 지방국토관리청에 보상지원센터가 설치되면서 시작되었다. 그해 5월에는 보상위·수탁계약이 체결되었으며, 9월부터 보상을 추진했다. 연도별로 보상 관련 사업추진계획은 다음과 같다.

- 2009년: 하천부지 내 경작지 영농손실 및 비닐하우스 보상 중점 실시
- 2010년: 하천 내 사유지 보상, 신규편입토지 보상
- 2011년: 어업권 보상, 계획물량 보상완료
- 2012년: 잔여/추가물량 보상완료, 보상업무 인계인수

보상 규모는 총 보상면적 9,457ha, 총 보상비 3조 3,282억원으로 집계되었다. 전체 보상액 중 토지보상은 1조 5,912억원으로 가장 많았고, 지장물보상이 6,074억원, 영농보상이 2,358억 원 순이었다. 수계별 보상면적을 비율로 보면 낙동강 44.2%, 금강 26.4%, 영산강 13.9%, 한강 14.2%, 섬진강 1.3%이었으며, 수계별 보상금액 비율은 낙동강 37.1%, 한강 14.2%, 금강 11.7%, 영산강 5.9%, 섬진강 0.9%이었다.(2012년 기준 추정자료)

표 3. 예비타당성 조사대상 사업별 평가결과

사업 종류			B/C	AHP
생태하천 조성사업	한강	하중도지구	3.46	0.708
	낙동강	동촌유원지	2.04	0.632
		감전, 엄궁지구	1.19	0.601
		금호지구	1.07	0.579
	금강	세도지구	1.63	0.690
		군수지구	0.92	0.518
	영산강	동림지구	1.32	0.608
		함평천3지구	1.80	0.608
자전거도로	낙동강자전거도로		0.94	0.508
댐건설	보현산댐(2008)		1.27	0.698
	영주댐(2009)		1.02	0.610
	안동~임하댐 연결		간이 예타(사업규모 적정성 검토)	
농업용저수지 둑높이기	나주저수지		3.25	0.77
	광주			
	함동			
	장성			
	담양			
	백곡		1.44	0.636

* B/C>1이거나 AHP가 0.5이상이면 사업시행이 바람직함을 의미

3. 4 하천구역 내 시설물 등 정비

본격적인 4대강살리기 사업 시행에 앞서 시행대상 하천구역 내 불법시설물에 대한 일제정비를 단행하였다. 이는 하천구역 안의 각종 불법행위 및 경작행위로 인한 오염원을 차단해 하천의 수질을 개선하기 위한 것이었다.

하천구역 내 불법적인 시설물 정비는 보상과 정리를 뜻하며, 그 대상은 사업지구 내 불법적인 시설물, 불법적인 경작행위 등 공사에 영향을 줄 수 있는 시설이나 경작행위로 규정하였다. 불법시설물 등의 사전정비는 사업의 성패를 미리 가늠할 정도로 매우 중요한 관문이었는데 전문인력 확보와 맞춤형 철거방식의 도입, 원칙의 고수와 지속적인 이해와 설득, 합동조사를 통한 민원해결 등으로 성공적으로 마무리할 수 있었다.

3. 5 사전환경성검토와 환경영향평가

4대강살리기 사업과 관련한 환경성검토와 환경영향평가는 사업구간과 주변지역별로 각 환경인자 간의 상호관계에 따른 환경변화를 예측 평가하는 것이다. 4대강살리기 사업의 시행으로 예상되는 환경에 대한 영향은 지형 및 토지이용 변화, 동·식물상의 변화, 공사 중 장비가동으로 인한 일시적인 소음·진동 발생 및 대기오염물질의 확산, 공사 중 토사유출에 따른 하천영향, 하천수위 및 수질변화 등이다. 예상되는 영향에 대해서는 효과적인 저감대책을 수립해 대처함으로써 4대강살리기 사업이 친환경적인 사업으로 이루어질 수 있도록 했다.

환경평가는 기존에 구축한 자료를 분석한 후 환경영향요소에 의해 영향을 받는 환경인자를 추출해 현지조사와 문헌조사를 근거로 영향을 예측하였다. 사업시행으로 인한 환경상의 영향평가는 2005년 '하천정비기본계획' 사전환경성검토 협의 등을 참고했다. 그 결과 공사 중에 비산먼지나 소음, 진동이 발생하거나 하도정비 중에 탁수나 불안정사면의 발생, 하상굴착에 따른 기존 교량에의 영향, 생태계 훼손, 운영 시 수질악화, 관리수위의 변경에 따른 영향 등이 예상되었다.

예상된 환경영향은 공사 중 이중 오탁방지막 설치, 준설토 처리대책 마련, 교량에 대한 기초보강계획 수립, 수질개선대책 마련 등 저감방안을 수립하고 공사 중 또는 운영과정에서 발생할 수 있는 경미한 영향 및 불가피한 악영향에 대해서는 합리적이고 효과적인 관리체계를 수립, 운영하였다.

「환경정책기본법」 및 「환경영향평가법」에 따라 2009년부터 2011년까지 101개 공구(한강 17, 낙동강 53, 금강 15, 영산강 13, 섬진강 3)에 대해 사전환경성검토와 환경영향평가 협의를 실시하였으며, 사전환경성검토만 받은 공구는 14개소, 환경영향평가만 받은 공구 1개소, 사전환경성검토를 받은 후 환경영향평가를 받은 공구는 86개소다.

3. 6 문화재 조사와 보존

4대강살리기 사업에 대한 문화재 조사와 현상변경 허가는 「문화재보호법」과 「매장문화재 보호 및 조사에 관한 법령」에 근거해 시행되었다. 사업으로 인한 문화재 훼손을 미연에 방지하고, 효율적인 문화재 보존·관리가 되도록 하기 위해 4대강 문화재지표조사 계획을 수립(2009년 1월 12일)하고, 한국문화재조사연구기관협회 주관으로 조사 전문인력을 집중 투입하는 체계를 마련하였다. 문화재지표조사는 2009년 2월부터 4월까지 총 23개 전문기관에 의해 이루어졌으며, 모두 220명의 전문인력이 참여하였다.

4대강 본류 전 구간, 총 294km(한강 56km, 금강 61km, 영산강 30km, 낙동강 147km)에 걸쳐 제방 외곽 50m 범위까지는 정밀조사를 실시했으며, 제방에서 500m 외곽지역은 지정문화재 분포현황 조사를 실시하였다. 그 결과 4대강 양안에 분포하는 문화재는 총 1,482건으로 이 중 제외지 구간에서 매장문화재 분포 추정지를 포함한 비지정문화재 407건이 확인되었으며, 제방에서 500m 이내 지정문화재는 총 169건이 분포하는 것으로 조사되었다.

4대강 유역 수중조사도 실시하여 국립해양문화재연구소가 중심이 되고 민간조사기관이 공동으로 참여하는 방식으로 이루어졌다. 조사기간은 2009년 7월 27일부터 8월 21일까지였으며, 나루터를 중심으로 한 수중조사는 모두 27개소에서 실시되었다. 조사 결과 특별한 유구나 유물은 확인되지 않았다. 한편 4대강살리기 사업 기본계획에 추가된 섬진강 및 13개 지류에 대한 지표조사도 추가로 실시하였다. 추가 지표조사는 2009년 2월부터 2010년 4월까지 구간별로 실시했으며, 서낙동강, 평강천 일대에서는 2010년 2월 18일에서 4월 18일까지 수중지표조사도 실시하였다.

지표조사에서 확인된 매장문화재 중 공사구간 내 매장문화재에 대하여는 문화재위원회의 심의를 거쳐 철저한 시굴 및 발굴조사가 이루어지도록 조치하였다. 한편 「문화재보호법」에 따라 4대강 주변에 분포하는 것으로 파악된 지정문화재 총 169건(등록문화재 포함)에 대하여는 문화재청에서 관련 전문가로 '문화재설계 자문단'을 구성해 설계단계부터 문화재에 미치는 영향이 최소화되도록 조치하였다. 문화재청에서는 문화재위원회의 심의 시 4대강살리기 사업이 문화재에 미치는 영향을 심도 있게 검토하도록 해 지정문화재 보호에 최선을 다하였다.

3. 7 사업 추진 갈등과 쟁점

4대강살리기 사업 추진에 대한 갈등은 시기적으로 사업착공 전, 사업시행, 보 개방 이후의 3단계로 분류할 수 있다. 4대강사업을 처음 추진할 당시에 부정적인 이미지가 팽배하였다. 물 부족과 홍수예방이라는 4대강살리기 사업의 본질적인 목적보다는 한반도 대운하 논쟁이 집중되었고, 종교계 일부에선 창조와 생명의 문제 등 종교적 논리로 압박을 가하기도 했으며, 언론에서도 많이 비판적이었다. 2008년 6월 대통령의 대운하를 하지 않겠다는 선언에도 불구하고 4대강사업의 시행을 대운하사업의 변형으로 몰아가는 경향이 많았다.

2009년 초까지만 해도 4대강사업은 대운하사업의 일환이라는 오해 때문에 반대 여론이 70%에 달하기도 하였다. 그러나 홍보활동으로 2009년 5월에는 찬성여론이 40~45%로 상승하였다. 그러던 중 4대강살리기 마스터플랜이 발표된 이후 보 건설과 수질문제가 집중적으로 부각되면서 반대여론이 다시 상승하기 시작하였다.

2009년 10월 4대강사업이 착공됨에 따라 절차상의 문제와 부당성이 제기되었다. 이어 환경영향평가, 문화재조사, 예비타당성조사 등 절차상의 문제와 사업 속도, SOC예산, 복지예산 축소 등 사회적 문제 등을 제기하면서 법정소송 등이 전개되었다. 무엇보다 준설에 따르는 하상의 교란이나 습지훼손 등 환경파괴 논란이 학계, 시민사회단체, 종교계를 중심으로 주장되었다. 4대강사업의 찬반여론은 직접적 효과를 입는 수계지역과 비수계 지역별로 큰 차이를 보였다. 대부분 지역주민과 단체장들은 지지하고 있는 편이었다.

2010년 후반에는 사업현장이 모습을 드러내면서 여론조사에서 찬성이 우세하게 나타났다. 4대강살리기 사업과 대운하사업 연관성에 관한 논의도 차츰 수그러들기 시작하였다. 2011년도의 집중호우에 4대강의 홍수예방 효과가 입증되면서 4대강사업에

대한 국민들의 인식이 조금씩 긍정적으로 바뀌기 시작하였다. 특히 2011년 10월 22일 보 개방 이후 4대강 방문객 수는 빠른 속도로 증가하여 2012년 11월 말에는 14,000,000명이 4대강을 방문하였다.

2011년 집중호우에 따른 피해의 최소화에 이어 2012년에는 극심한 가뭄피해가 4대강 영향권에서는 없었고, 이외의 지역에서만 제한적으로 나타났다. 또한 갈수기 수질이 과거에 비해 개선된 것으로 나타났으나 조류발생이 심각한 양상을 띠면서 그 원인과 대책에 대한 찬반론이 팽팽하게 대립하였다.

2012년 여름 녹조발생 관련한 논란이 일기도 했지만, 준설 등이 이뤄지지 않은 북한강 지역에서 녹조가 극심하고 4대강사업이 본격적으로 시행된 남한강 지역에서는 녹조문제가 생기지 않아 이 논란은 확산되지 않았다.

4대강사업에 대한 국민들의 현장확인이 가능해지면서 4대강사업에 대한 갈등은 사업의 효과의 부정과 유지관리, 그리고 보 누수와 하상세굴 등의 기술검증 등에 초점이 맞추어졌다. 또한 공사비 담합에 대한 공정거래위원회 발표와 감사원 감사 이후에 건설산업의 관행 문제까지 제기되었다. 사업의 마무리 단계인 2012년 12월 한국갤럽에서 실시한 국책사업 국민인식조사 결과 긍정적 평가 39.1%, 부정적 평가 41.5%로 나타나 사업 초기에 비해 긍정평가가 부정평가와 대등한 수준으로 조사되었다.

4. 공사 착공

4대강살리기 사업은 2009년 9월 30일에 사업자를 선정했고, 10월부터 본격적인 공사에 들어갔다. 조달청은 서울, 부산, 대전, 익산지방국토관리청으로부터 4대강살리기 사업 12개 공구를 일괄입찰방식으로 발주의뢰를 받아 설계서와 입찰가격을 종합적으로 평가해 사업자를 선정하였다.

일괄입찰공사는 지역경제 활성화를 위해 '지역의무공동도급제'를 20% 이상으로 확대하였다. 이를 위해 기획재정부 주관 하에 2009년 상반기까지 관련 법규인 「국가계약법」 시행령을 개정, 4대강살리기 사업에 한정해 지역업체가 일정비율 이상 공사에 참여하도록 의무화하도록 하였다.

지역업체 소재기간 요건도 90일 이상으로 강화하였다. 이에 따라 국토해양부 소관 신규사업 총 도급액의 약 35%를 해당 지역업체가 수주하였으며, 이는 조달청에서 발주한 기타사업보다 10% 이상 높은 수치에 해당한다. 또한, 설계평가의 공정성·투명성·전문성을 확보하기 위해 설계평가위원을 사전에 구성해 공개하고 평가결과도 공개하였다.

4. 1 공구 분할

4대강살리기 사업의 공구 분할은 지역경제 활성화, 행정구역과 인허가, 통합관리를 위한 본류 패키지사업, 공사비로 구분하여 기본방향을 설정하였다. 지역경제 활성화 측면에서는 300억 원 미만과 이상의 사업을 구분하여 지역업체를 참여시키고, 농업용저수지 및 지류사업 등 소규모 사업을 고려하였다.

인허가, 민원, 보상 등을 고려하여 각 공구는 단일행정구역으로 분할하며, 지방국토관리청, 한국수자원공사, 한국농어촌공사 등 사업시행기관을 구분·분담하였다. 통합관리를 위한 본류 패키지사업 측면에서는 공사기간 중 홍수, 가뭄, 수질오염, 안전사고 등의 통합관리를 위해 수리현상 변화 지점(보, 주요 지류합류점 등), 전체 공사기간 및 주요 시설물 적정 공기, 준설 및 준설토 처리장의 위치·접근로·이동거리 등, 랜드마크 대상시설물 포함 여부를 고려하여 분할하도록 하였다. 마지막으로 공구별 소요 공사비에 따라 공구분할을 실시하였다.

마스터플랜에서는 전체 사업을 267개 공구로 분할하고 공구별 발주방법을 결정하였다. 제방보강 등 기착공한 계속사업 75개 공구와 함께 댐·농업용저수지·하구둑 개량 등의 103개 공구는 해당 공기업(한국수자원공사, 한국농어촌공사)이 별도 발주계획을 마련하여 시행하도록 하였다. 준설·보 등 신규발주 하천사업 89개 공구는 일괄입찰공사와 일반공사로 구분하여 발주하도록 계획되었다. 반면 배수문, 댐, 홍수조절지 등 일괄적인 사업시행이 필요한 경우에는 공사비와는 무관하게 공구분할을 하도록 하였다.

4. 2 공사 발주

국토해양부는 2009년 6월 중앙건설기술심의위원회를 개최하여 4대강살리기 사업 21건의 설계 및 시공을 일괄입찰방식으로 발주하기로 의결하였다. 특히 본류의 패키지 사업에서 보 또는 슈퍼제방 지점을 고려하여 설계 및 시공단계에서 일괄입찰발주를 계획하였다.

설계, 예산, 인력, 자재, 장비의 병목현상을 완화하기 위해 각 공사의 입찰공고를 2차로 나누어 공사를 발주하였다. 1차는 2009년 6월, 16개 공구에 대한 보 위주의 대규모 공사로 진행되었으며(금강1공구는 4월에 입찰), 2차는 2010년 1월에 1,000억~1,500억원 내외의 하천환경정비와 준설공사로 6개 공구를 발주하였다.

4. 3 부처별 발주사업

4. 3. 1 국토해양부

국토해양부는 16개 보와 3개 댐을 포함하는 95개 신규사업과 75개 계속사업으로 공구를 수계 공구별로 분할해 발주하였다. 주요 발주청은 한국수자원공사, 지방국토관리청, 시·도단위 지방자치단체 등이며, 발주청별로 사업규모 및 물량, 기관의 경험 및 관리 인력현황, 효율성에 따라 사업을 구분하였다.

지방국토관리청은 계속사업과 신규사업 중 보 구간 및 준설물량이 많아 국가차원에서 공정관리가 필요한 사업 위주로 진행하였다. 한국수자원공사는 그동안 추진해오던 사업인 댐과 보, 홍수조절지, 하구둑 및 이들과 인접해 있는 공구 등 총 33개 공구를 대상사업으로 선정하고, 이중 13개 공구 약 4조 원 규모는 직접시행하고 나머지 20개 공구는 지방국토관리청에 위탁하여 시행하였다. 지방자치단체는 지역업체 참여 확대 및 지역경제활성화 등을 위해 지류하천 및 하천환경정비, 생태하천조성사업 등 규모가 크지 않은 사업 위주로 사업을 대행하였다.

4. 3. 2 농림수산식품부

농림수산식품부에서는 저수지 둑 높이기 사업, 영산강 하구둑 구조개선사업, 농경지 리모델링사업 등 농업 관련 사업을 발주하였다. 저수지 둑 높이기 사업은 한강 유역 13개소, 낙동강 유역 31개소, 금강 유역 29개소, 영산강 유역 14개소, 섬진강 유역 9개소로 총 96개소가 발주 예정이었지만, 주민반대 등으로 한강, 금강, 낙동강 유역에서 각각 1건이 취소되어, 총 93개소의 공사가 발주되었다.

영산강 하구둑 구조개선사업은 기상변화로 인한 영

산강 유역 침수재해를 예방하기 위한 사업으로 3개 공구에서 사업이 발주되었다.

4. 3. 3 환경부

환경부에서는 본 사업으로 하·폐수처리장에 233건 총인처리시설 설치사업과 하수도(하수처리·하수관거 등), 생태하천, 공단폐수, 비점저감, 가축분뇨, 완충저류, 측정망 등의 환경기초시설 1,048건 등 총 1,281건의 4대강 수질개선사업을 발주하였다. 수계별로는 한강 482건(인처리 80건, 기초시설 402건), 낙동강 392건(인처리 81건, 기초시설 311건), 금강 303건(인처리 60건, 기초시설 243건), 영산강 104건(인처리 12건, 기초시설 92건)으로 나뉜다.

5. 사업의 내용

5. 1 홍수 예방

5. 1. 1 준설

기존의 치수대책은 제방의 둑을 높이거나 수해가 난 뒤 피해복구에 중점을 두었으나, 4대강사업은 하천 전체를 대상으로 바닥을 준설하여 홍수요인을 사전에 차단하자는 신개념의 선제적 치수대책이다. 하천 상·하류를 준설해 넓은 통수단면을 확보함으로써 홍수위를 낮추어 제방누수와 하천범람 등으로 인한 피해를 사전방지하자는 것이다.

준설대상구간은 총연장 530.3km로, 그 선정기준은 다음과 같다. 필수 준설대상구간은 유사유입이 큰 지류(낙동강의 미천, 내성천, 영강, 병성천)에 의해 토사가 퇴적되어 하도의 통수능이 줄어든 구간, 본류의 만곡부 내측에 형성된 사주가 방치되어 통수능이 부족한 구간, 유역종합치수계획에서 유역 저류시설 및 방수로 등의 건설보다 하도에서 홍수를 분담하는 것이 유리하다고 판단된 구간 등이다.

4대강의 당초 준설량은 5.7억m^3이었으나 실시설계와 감사조정으로 최종 준설량은 4억 5,678만m^3이다.

1) 하도정비

하도정비계획은 기존 하천기본계획과 유역종합치수계획을 고려해 수립하였고 저수로 구간의 준설로 인해 영향을 받는 둔치와 제방, 여기에 제내지 저지대의 배수처리문제까지 함께 고려하여 보다 적극적인 개념의 하도정비를 시행함으로써 항구적인 치수대책을 마련하고자 했다.

항구적인 치수대책을 수립하기 위해 일관성 있는 설계, 시공 및 유지관리 사항을 고려하여 다음과 같이 저수로 정비방안을 세웠다.

첫째, 저수로 정비 폭은 현재 하폭 및 저수로 폭을 감안하여 구간별로 계획
둘째, 유지관리 측면에서 효율적인 하천이용을 위해 전체 하도단면 형상이 복단면이 되도록 저수로 정비단면은 단단면으로 계획
셋째, 자연 하천경사인 평균 하상경사, 평형 하상경사와 구간별 하도특성을 고려한 종단 경사계획, 치수편익을 고려한 굴착심도 결정

계획 하상경사는 상류에서 하류로 내려가면서 급경사에서 완경사로 점차 변하여 연속성이 유지되도록 했으며, 계획 하상의 변화점은 하도의 만곡 등 지형적인 특성을 고려하여 주요 지류하천을 기준으로 하였다. 하구둑 직상류구간의 과도한 준설을 피하고, 전체적으로 준설을 최소화할 수 있도록 평균 하상경사를 감안하였다.

2) 준설공사 방법

저수로와 둔치의 준설은 계획 횡단면을 토대로 경제성, 시공성, 현지여건을 고려하여 육상준설과 수중준설로 구분하고, 수중준설은 수심에 따라 가물막이 후 육상 준설하거나 준설선을 이용하여 준설하는 방법으로 진행하였다.

육상준설과 수중준설의 구분은 평수위를 기준으로 높은 곳은 육상준설, 낮은 곳은 수중준설을 적용하고, 수중준설은 토사 중 자갈이 없는 구간은 펌프준설, 토사 중 자갈이 있는 구간은 반체절준설을 적용했다. 하상준설에 의해 상하류에 급경사가 발생하여 낙차가 상류로 이동되는 현상을 방지하기 위하여 하상 유지시설을 설치하고, 지류 합류부 부근에는 낙차 때문에 발생할 수 있는 지류의 하상세굴을 방지하기 위한 시설을 설치하였다. 교각 및 교대 주변 하상이 침식·이송되는 세굴현상으로 인해 발생할 수 있는 교량 기초의 구조적 문제를 방지할 수 있는 세굴방지공도 설치하도록 하였다.

3) 준설토 처리방안

준설을 통해 발생하는 준설토는 골재판매 가능량과 사토량으로 구분하였다. 그리고 판매 가능 골재는 지자체와 협의해 투명하고 공정하게 처리하고, 인근 지역의 골재수요를 고려해 그 수급을 조절했다.

사토는 4대강사업의 유용토사로 우선 활용하며 그 다음으로 택지, 산업단지 등 인근 공공사업에 제공하였다. 잔여사토는 저지대 농경지 성토를 통한 홍수피해의 근원적 예방과 농경지 리모델링사업 등 공공목적에 활용하였다.

사토를 토양으로 재활용하는 경우에는 토양오염물질, 환경오염 공정시험 기준을 적용해, '토양오염 우려기준'(17개 항목) 초과 여부를 판단하였다. 여기서 우려기준을 초과하는 토사는 적정처리 후 재활용 또는 매립 등의 처리과정을 거쳤다. 총 4억 5,678만m^3 정도의 준설이 이루어져 안동댐(홍수조절용량 1억 1천만m^3) 4개와 맞먹는 홍수 예방효과를 얻을 수 있었다.

4) 준설의 역할과 성과

준설로 하천바닥이 낮아지면 홍수 때의 최고수위는 내려가게 된다. 준설로 이미 하천바닥이 낮아졌고 본류의 유수소통능력도 높아졌기 때문이다. 보는 둔치보다 낮게 설치되며 홍수 땐 수문을 개방하고, 준설로 인한 홍수위는 전 구간에 걸쳐 0.38~4m 저하, 주요지점은 2~4m 저하를 예상하였다. 남강의 경우 낙동강 합류점에서 79km 지점까지 최대수위는 1.75m 낮아지고, 금호강의 경우 본류 합류점에서 30km 지점까지 최대 1.34m 수위가 내려간다.

전국적으로 많은 비가 내린 2011년 장마철에 처음으로 4대강 준설의 홍수예방효과를 확인할 수 있었다. 7월 홍수량과 과거 동일한 규모의 홍수량이 흘렀을 때의 하천 주요지점별 수위를 비교한 결과, 낙동강 상주 부근에서는 홍수위가 최대 3.78m 낮아졌으며, 한강(여주) 2.54m, 금강(세종) 3.36m, 영산강(나주) 2.13m가량 홍수위가 낮아졌다. 2012년 태풍 '산바' 내습 시 낙동강 본류 주요지점의 최고수위는 사업 전 대비 약 3~4m가량 낮아진 것으로 분석되었다. 영산강 유역에 많은 비를 뿌린 제14호 '덴빈', 제15호 '볼라벤' 태풍 내습 때도 4대강사업 이전과 비교해 영산강 본류 주요지점(나주)에서 약

2.8m가량 수위가 낮아진 것으로 분석되었다.

본류 수위가 낮아짐에 본류에 연결되는 지류의 홍수위도 함께 낮아져, 4대강 유역에서는 농경지·가옥 침수 등 피해가 예년보다 크게 감소하였다. 본류 수위의 영향을 받는 지류구간의 수위는 섬강(한강의 지류) 약 0.5m, 황강(낙동강의 지류) 약 1.3m, 미호천(금강의 지류) 약 0.5m, 황룡강(영산강의 지류) 약 0.6m가 낮아졌다.

2014년 국무조정실 주도로 구성된 4대강 조사평가위원회는 '4대강 지류 235곳의 72%(170곳)에서 홍수위험이 줄었다'라는 결론을 내렸다. 길이 91km의 지류는 홍수위가 1m 이상, 749km 지류는 10cm 이상 홍수위가 떨어졌다. 이는 강 본류의 물그릇이 커져 지류에 내려오는 물을 받아들일 수 있었기 때문으로 추정된다. 한편, 낙동강 일부 지류하천에서 제방유실, 침수 등이 발생하기도 하였다. 이는 지류하천이 감당할 수 있는 강우량을 초과하는 집중호우로 인한 것으로 분석되었다.

집중호우에 따른 농경지 침수는 본류 강물이 범람하는 극한사태로 일어나기도 하지만, 지류의 물이 본류로 빠져나가지 않거나 역류해 침수가 잦다. 낙동강 수계 농경지 리모델링지구인 창원시 신촌지구는 2010년 7월 217mm의 집중호우가 내리면서 농경지 60ha가 물에 잠겼다. 하지만 낙동강 준설이 이루어진 2011년 6월 홍수 기간 강우량은 136mm로 2010년과 비슷한 강우량을 기록했지만 준설토로 북돋아진 농경지는 침수되지 않았다.

4대강 사업 이후 홍수피해는 이전보다 대폭 줄었다. 특히 4대강 유역에서는 주민의 인명·재산에 영향을 미치는 큰 피해가 없었다. 본류는 약 200년 빈도의 대규모 홍수에도 안전해졌다. 세계적인 기후변화의 영향으로 대규모 홍수, 가뭄, 태풍 등의 자연재해는 계속될 것으로 예상되는 바, 앞으로 지속적인 유지관리를 실시하고 본류와 연계한 지류지천 정비사업도 지속 추진하여야 할 것으로 판단된다.

5. 1. 2 홍수조절지와 강변저류지 조성

홍수조절지와 강변저류지는 평상시에는 담수를 하지 않고 홍수 때에만 일시 저류하는 것으로, 하도 내 첨두홍수량을 낮추어 하류부의 홍수피해를 줄이는 역할을 한다. 홍수조절지는 하천 내에 흐르는 유수의 양 곧 유량을 조절할 수 있는 수문이 있는 것 이외에는 강변저류지와 거의 같다.

5. 1. 3 노후제방 보강

제방 보강사업의 기본방향은 제방 안정성 향상을 위한 설계개념의 전환이다. 횡적 생태연결축으로서의 제방기능을 추가하여 제방증고와 같이 홍수피해 잠재성을 증가시키는 대응방법은 지양하고 단면확대, 완경사화, 슈퍼제방, 월류 대응 제방 등과 같은 방법을 적용하였다. 비탈면침식에 대한 위험성이 상대적으로 낮은 구간에서는 완경사비탈면에 식생호안을 적극 설치하고 복토 후 식재를 함으로써 생태서식처를 조성하였다.

4대강은 준설과 보로 인해 계획홍수위가 변동되므로 이를 반영할 필요가 있었다. 다만 공사 중인 사업은 그대로 진행하되 설계 중이거나 공사가 아직 시작되지 않은 지구는 4대강살리기 사업 후 홍수위를 계산하여 사업범위를 조정하였다. 또한 제방공사가 착공되지 않은 지구는 4대강사업 후 홍수위를 계산하여 제방이 불필요한 지구는 계획을 취소하였다. 다만 계획취소 구간 중 제방이 연속적으로 이어진 곳에서의 보축은 제방 구조물의 연속성 확보를 위해 시공하도록 조치하였다.

그림 1. 홍수조절지와 강변저류지 개념도

표 4. 4대강사업구간의 홍수조절지와 강변저류지

구분	지구명	면적(km²)	홍수조절용량(만m³)	비고
홍수조절지	담양	1.22	327	용천(지방)
	화순	1.58	638	지석천(지방)
	여주	2.93	2,461	한강(국가)
강변저류지	영월	0.77	790	평창강(지방)
	나주	1.97	719	영산강(국가)

5. 1. 4 하구둑 배수문 증설

4대강 중 낙동강, 영산강, 금강에는 각각 홍수위의 원활한 배제와 조류의 영향을 막고자 하구둑이 설치되어 있다. 그러나 건설 당시에 비해 계획홍수량이 현저히 증가함에 따라 계획홍수량의 원활한 소통을 위해 낙동강 및 영산강하구둑에 대한 증설계획이 수립되었다.

1) 낙동강하구둑

1987년에 건설된 낙동강하구둑은 주수문(B47.5m×H9.2m×6련)과 조절수문(B47.5m×H8.0m×4련)을 통해 18,300m³/s의 계획홍수량을 처리하도록 설계되었다. 낙동강하구둑의 배수문 증설은 기존 대비 약 20% 증가된 계획홍수량을 처리할 수 있도록 배수문 B47.5m×H9.2m의 6련(하구둑 우안측) 증설을 통해 계획홍수량 22,300m³/s 배제 및 계획홍수위 1.1m를 낮출 수 있다. 증설사업은 주수문 및 조절수문, 교량 설치뿐만 아니라 어도, 생태공원 및 수문 조작시설 등의 생태 시설도 함께 신설되었다.

- 주수문 및 조절수문 설치: Lifting gate 3문, 2단 Roller gate 2문
- 교량 설치: 331m, 배수문의 폭과 경관성을 고려한 3가지 형식의 교량 선정(Nielsen 아치교, Seg-Beam 거더교, IPC 거더교)
- 어도, 생태공원, 수문조작시설(기념조형관) 등 신설

2) 영산강하구둑

1981년에 건설된 영산강하구둑은 주수문(B30m×H13.6m×8련)을 통해 5,600m³/s의 계획홍수량을 처리하도록 설계되었다. 영산강 유역의 침수피해를 방지하기 위해 영산강하구둑 배수갑문, 영암호방조제 배수갑문 및 영산-영암호 연락수로를 확장하는 총 사업비 6,456억 원 규모의 영산강하구둑 구조개선사업을 시행하였다. 영산강하구둑은 건설 당시보다 50%가 증가된 홍수량 8,310m³/s를 견딜 수 있도록 증설하였으며, 홍수위 저감효과는 0.3~0.7m이다. 이 증설사업에는 주변의 영암호 배수갑문 확장, 영산-영암호 연락수로 확장, 제수문 확장 및 신설도 포함되었다.

- 영산호 배수갑문 확장: L=240m→ 480m, 영암호 배수갑문 확장: L=80m→ 410m
- 영산-영암호 연락수로 확장: 총연장 5.62km, 수로저폭=15m→ 140m
- 제수문 확장 및 신설: 영산→ 영암(B=30m→ 150m 확장), 영암→ 금호(B=30m 신설)

5. 1. 5 농경지 리모델링

4대강 정비로 발생되는 하천준설토를 하천제방 인근 저지대 농경지에 성토하여 지반을 높이고 다시 농지를 조성함으로써 하천토사량 처리와 농경지 침수해소 등 영농환경 개선을 목적으로 하였다. 상습침수지역인 4대강 주변의 저지대 농경지 7,727ha에 하천준설토를 평균 2.6m로 높이며 낙동강 수계가 113개 지구(6,244ha)로 가장 많으며, 금강 수계가 17개 지구(887ha), 영산강 수계가 8개 지구(556ha), 한강 수계가 2개 지구(40ha) 순이다. 2009~2012년까지 4년간 1조 3,895억 원을 투입하여 140개 지구를 대상으로 7,727ha 면적에서 1억8,800만m³의 준설토가 투입되었다.

5. 2 수자원 확보

5. 2. 1 보의 설치와 역할

준설 및 16개 다기능보 설치로 확보된 용수는 한강 4,000만m³,, 낙동강 6억 7,000만m³, 금강 5,000만m³, 영산강 5,000만m³로 모두 8억m³이었으나 최종 7억2천만m³으로 조정되었다. 이렇게 확보된 물은 평상시 풍부한 하천유지용수 공급 및 극한가뭄 시 비상용수로 활용된다.

준설로 낮아진 하천바닥에 보를 설치함으로써 하천수위를 높혀 하천 내에 풍부한 물을 확보해 평상시에는 하천에 흐르는 물을 공급하고 가뭄에는 용수를 활용할 수 있는 장점이 있다. 또한 강변경관을 향상시킬 수 있는 넓은 수면과 수상활동에 적합한 수심확보가 가능하다. 아울러, 주위에 지하수위를 유지하며 다기능보 상하류의 수위차를 이용한 소수력 발전을 통하여 신재생에너지 창출이 가능하다.

보는 하천의 횡단방향으로 설치하는 시설로 높이는 15m 이하이다. 댐은 하천의 흐름을 막아 그 저수를 여러 용도로 이용하기 위한 높이 15m 이상의 공작물(「댐 건설 및 주변지역 지원 등에 관한 법률」 제2조)로 정의된다. 다기능보는 주수로에만 설치하고 둔치를 포함한 수변은 친수공간으로 조성한다. 보 형식은 평상시 수위유지를 위한 고정보와 홍수 시 원활한 유수소통을 위한 가동보로 구성한다. 또한 주변경관 등을 고려한 디자인 도입을 통해 지역의 랜드마크로 조성한다. 보의 설치를 위한 전제 조건을 다음과 같이 설정했다.

- 보 마루고가 보 지점 둔치나 주변 제내지 지반 높이보다 높지 않아야 한다.
- 경제성을 고려할 때 보의 수는 가능한 적어야 한다.
- 보 설치에 따라 상시수위가 보 설치 전과 비교하여 높아지거나 낮아지므로 이에 대한 대책이 있어야 한다.

그림 2. 4대강 다기능보 위치

- 신설 보로 인한 홍수소통의 문제가 없도록 계획해야 한다.

보 설치 개수와 지역은 지형 및 입지, 생태환경을 고려한 환경공학적인 측면과 지역 간의 연계와 주민편의를 고려한 지리적인 측면, 지역의 역사문화자원 및 여가 수요, 친수공간 활용 등 문화경제적 측면을 고려하였다.

1) 보의 설계

보의 높이를 제한하면 현실적으로 하천에서 필요한 용수를 확보하기 어려우므로 수중생태환경 유지대책을 적절히 마련한다는 전제에서 필요용수량을 확보할 수 있는 높이로 계획하였다. 보의 높이와 위치는 다음과 같은 기준을 따르도록 하였다.

- 하류 보의 최대설치높이(보 지점의 둔치 높이 또는 제내지 지반 높이)와 보 설치 전 상시수위를 감안하여 지형여건이 양호한 지점으로 선정한다.
- 본 계획에서 보의 필요성을 하천유지용수와 비상용수 공급으로 한정했으므로 이 용수들을 확보할 수 있는 규모의 보 계획이 되어야 한다.
- 보 높이는 현재의 둔치 높이와 제내지 지반 높이를 고려하여 결정하도록 한다.

이수 목적으로 설치되는 보는 하천 내 시설로서 홍수소통에는 지장을 초래하지 않아야 한다. 보의 형

식은 수문을 설치하는 가동보와 평상시에는 수문조작 없이 계획된 상시수위를 유지하도록 고정보를 배치하는 복합형 보로 계획하고, 구조적 특징이나 재료원에 의한 형식은 콘크리트구조물로 설계하였다.

가동보의 수문을 통해 유량조절 및 보 상류의 퇴적물 배출이 용이하며, 유수의 흐름을 이용해 수질을 개선할 수 있도록 설계하였다. 가동보 수문의 설치 표고 즉, 가동보의 월류 마루높이는 원활하고 안전한 유지관리를 위하여 하류쪽 상시수위보다 0.5m 이상 높게 건설하도록 계획하였다. 또한 홍수 때 원활한 홍수소통을 위해 가능하면 수문을 보 가운데 배치하도록 했으며, 동시에 계획홍수량을 배출할 때 저수로 정비에 따른 수위저하에 악영향을 최소화할 수 있도록 일정 폭(40m 이상)의 수문 수를 HEC-RAS 모의를 통해 결정하도록 했다. 아울러 고정보 및 어도의 계획과 월류 마루높이는 용수확보를 위한 높이를 감안해 설계했으며, 가동보 구간의 필요길이를 결정한 후 남는 길이는 잔여시설을 배치하도록 계획하였다.

가동보의 수문은 개폐가 확실하고 완전한 수밀성 및 내구성을 가지고 홍수소통에 지장을 주지 않는 구조가 되도록 계획하였다. 주요 하천에는 원칙적으로 인양식을 적용하도록 권장하였다. 한편 상부구조물의 하중, 지반과 환경조건 등을 고려하되 구조물의 품질과 안정성을 높일 수 있도록 기초계획을 수립하였다. 먼저 구조물과 인접된 지역의 지반조사 자료를 참고하여 기초형식을 선정하고, 지지층 심도가 6m 이내인 경우에는 직접기초를, 6m 이상인 경우에는 말뚝기초를 검토해 결정하였다.

보의 기초 중 말뚝기초가 적용된 구간은 지지층 분포현황을 고려할 때 말뚝길이가 20m 내외일 것으로 예상되며, 말뚝길이가 20m 내외일 경우 현장타설말뚝에 비해 기성말뚝의 경제성이 우수하므로 보의 말뚝기초형식으로 기성말뚝을 선정하였다.

보의 안전성 검증은 기본설계와 실시설계 등 단계마다 전문가의 기술검토와 설계심의를 거쳤으며, 수리모형실험을 통해 안정성을 재검증하였다. 가동보 배치의 수리적 안정성 검토 등 보 공사와 관련된 수리모형실험은 2010년 3월에 완료했으며, 상·하류 수위변화에 따른 수문운영 등의 수리모형실험은 2010년 4월에 완료해 보 운영규정을 수립하는 데 활용하였다.

보 주변에는 다양한 어종이 이동할 수 있도록 자연형 어도를 설치해 생태계단절 문제를 해소하고, 여울 및 하중도 등을 설치해 친환경성을 고려하였다. 따라서 어류들의 서식에 알맞은 환경은 어도의 상·하류에 확보하도록 하고 어도는 서식 어종 모두가 이용할 수 있도록 어도 내 월류유속을 설정하였다.

2) 16개 보의 특징

① 이포보

이포보의 전체길이는 656.8m로 가동보 294.8m, 고정보 362m로 구성되어 있다. 가동보는 쉘형 롤러게이트 방식을 적용했으며, 하단방류(Under flow)와 상단방류(Over flow)가 모두 가능하고 하단방류 때에는 저층수를 흘려보내 양호한 수질을 유지할 수 있다는 특징이 있다. 이포보는 주민과 함께하는 즐거운 한강, 생명을 품어 되살아나는 한강, 하늘의 뜻을 품고 비상하는 미래의 한강을 의미하는 여주의 군조인 백로를 형상화하여 디자인하였다.

② 여주보

여주보의 길이는 503m로 전체가 가동보로 되어 있다. 유압식롤러수문 12련을 설치하여 과도한 상부 돌출구조를 없애 탁 트인 스카이라인을 확보하였다. 홍수 때에는 수문을 모두 개방하여 홍수소통에 유리하도록 했으며, 유심부 전 구간을 가동보로 만들어 수질악화와 퇴적토사의 문제점을 개선하였다. 여주보는 세종대왕의 업적인 물시계(자격루)의 형상을 재해석하여 빛이 차오르는 자격루의 기둥탑을 상부 인양봉에 디자인하여 야간 조명으로 특화하였다. 하부 보 기둥은 자격루의 장식재이자 물을 관장하는 신물인 용의 형상을 시각화하였다.

③ 강천보

강천보의 전체길이는 440m로 가동보 350m, 고정보 90m로 구성되어 있다. 가동보 형식은 수위조절 및 수문작동 시 배사기능이 가능하고 문비가 회전하여 개폐되는 구조적 특성을 가지고 있으며, 수문 조작에 의한 점검과 유지보수가 용이하도록 회전형 수문(Rising sector gate) 형식을 채택하였다. 강천보는 여주군의 군조인 백로의 비상하는 모습과 황포돛배의 지역적 특성을 고려하여 웅장함과 고전의 현대적 이미지, 남한강물에 비치는 또 다른 세상이라는 주제로 디자인하였다.

④ 창녕·함안보

창녕·함안보의 전체길이는 549.3m로 가동보 144m, 고정보 405.3m로 구성되어 있다. 가동보는 상단방류로 유량과 수위조절이 쉽고, 구조물의 높이가 낮아 자연경관성이 좋은 회전형 수문 형식을 선정하였다. 창녕·함안보는 주변환경과 조화로운 스카이라인이 돋보인다. 이 지역의 오랜 문화전통과 역사의 상징으로서 함안 '아라가야'와 창녕 '빛벌가야'의 지역적 특성을 반영했으며, 낙동강을 품은 큰고니의 날개를 모티브로 큰고니의 비상과 녹색성장의 날개를 형상화한 친환경 다기능보로 디자인하였다.

⑤ 합천·창녕보

합천·창녕보의 전체길이는 328m로 가동보 218m, 고정보 110m로 구성되어 있다. 가동보는 승강식 수문(Lift gate)과 보조수문인 복합형 가동보(고정보+전도 게이트)로 구성되어 수문의 곡선라인을 통해 부드러운 경관디자인을 구현하였다. 합천·창녕보는 멸종위기에 있는 따오기를 낙동강살리기의 희망상징물로 만들어 보의 디자인에 반영하였다.

⑥ 달성보

달성보의 전체길이는 534.1m로 가동보 162m, 고정보 372.1m로 구성되어 있다. 가동보는 회전형 수문 형식을 적용했고 상단 및 하단 방류가 가능하여 평상시와 소규모 홍수 때에 관리수위유지가 가능하다. 달성보는 안전을 상징하는 녹색 지킴이(Blue saver) 콘셉트로서 항해를 시작하는 크루즈를 형상화하였다. 이는 새 시대에 대한 희망과 건강한 자연, 문화의 강을 열어가고자 하는 의지를 반영한 것이다.

⑦ 강정고령보

강정고령보의 전체길이는 953.5m로 가동보 120m, 고정보 833.5m로 구성되어 있다. 가동보는 회전형 수문으로 원반부를 회전시켜 비체를 상·하 개폐함으로써 수위 조절 및 배사성능이 우수하다. 강정고령보는 '후기 가야시대의 중심'이라는 지역적 특성을 반영하여 '낙동 허브 강정고령보'라는 콘셉트로 디자인하였다.

⑧ 칠곡보

칠곡보의 전체길이는 380m로 가동보 232m, 고정보 148m로 구성되었다. 가동보는 셀타입 승강식 수문 3문과 전도식 보조수문(Flap gate) 2문의 복합형이다. 지역의 역사와 문화를 반영해 가산 바위설을 구현한 철우이야기로 역사테마형 스토리텔링을 부여하고 낙동강 물길을 형상화하였다.

⑨ 구미보

구미보의 전체길이는 374.3m로 가동보 103.5m, 고정보 270.8m로 구성되어 있다. 가동보의 형식은 전

도식과 쉘타입의 원통형으로 평상시나 홍수 때에 유량조절이 가능하도록 했다. 구미보는 장수와 복의 상징인 거북, 수호의 상징인 용을 소재로 고유의 디자인을 만들었다. 거북 형상의 중앙 권양대에는 전망타워를 설치하여 360도 모든 방향으로 풍요롭고 아름다운 낙동강을 바라볼 수 있도록 하였다.

⑩ 낙단보

낙단보의 전체 길이는 286m로 가동보 141.6m, 고정보 144.4m로 구성되어 있다. 가동보에는 홍수 때 유수소통을 최대화하고 신속한 조작 및 능동적 대처가 가능한 쉘타입 2단 롤러게이트를 적용하였다. 낙단보의 외관은 '이락지천(利樂之川)' 곧 자연은 이롭고 사람들은 즐거운, 생명이 유익한 생태환경조성에 초점을 맞추어 상주, 의성, 구미 세 지역의 자연과 역사, 문화 그리고 사람이 한데 융합하고 어우러지는 이미지를 형상화해 설계하였다.

⑪ 상주보

상주보의 전체길이는 335m로 가동보 105m, 고정보 230m로 구성되어 있다. 가동보는 쉘타입 2문이고 고정보에 폭 4×높이 1.8m의 개량형 전도식 2개 수문을 부착하였다. 상주보는 상주에 전래되어온 오복동의 전설을 지역특성과 결합해 디자인하였다. 폐원목을 비롯한 환경친화적 자재를 도로포장과 관리동 건축, 조경설계에 이용했으며, 소수력발전과 태양광발전이라는 저탄소 녹색발전시설도 도입하였다.

⑫ 백제보

백제보의 전체 길이는 311m로 가동보 120m, 고정보 191m로 구성되어 있다. 가동보는 상단방류형 2단 쉘타입 수문형식으로 평상시 관리수위 유지와 유량조절이 가능하고, 상단 및 하단방류가 모두 가능하다. 기본계획에 제시된 롤러게이트 형식보다 유량조절이 유리한 장점을 지니고 있으며, 수문 2개가 독립적으로 운영되어 퇴적토사 처리와 유지관리 및 보수가 간편하다. 백마강을 지키기 위해 돌아온 계백장군의 계백위환(階伯衛還)을 백제보의 테마로 삼았다. 말을 타고 백마강을 바라보는 계백장군을 수문장의 이미지로 형상화하여 백제보가 이루는 치수·이수 개념을 표현하였다.

⑬ 공주보

공주보의 전체길이는 260m로 가동보 220m, 고정보 40m로 구성되어 있다. 가동보는 수위조절효과를 높이기 위해 승강식 수문 3문과 전도식 조절수문(고정보 + 전도식 게이트) 3문 형식을 조합하였다. 공주보는 백제의 무령왕을 상징하는 봉황을 디자인 모티브로 차용하였다. 다기능 보를 예술적으로 형상화하기 위해 권양기 실에 봉황의 힘찬 날갯짓을 정형화된 디자인 선으로 도출하였다.

⑭ 세종보

세종보의 전체길이는 348m로 가동보 223m, 고정보 125m로 구성되어 있다. 가동보 형식은 개량형 전도식으로 정밀한 수위조절 및 담수량확보가 쉬우며, 하류수위 또는 퇴적토사에 의해 작동에 영향을 받을 우려가 적다. 내구성이 우수하고, 철판 바닥부 전구간으로 저층수를 배출하여 수질오염도를 낮추는 데도 유리하다. 세종보는 한글의 독창성과 측우기의 과학성, 연기군의 상징인 제비와 금강물결을 상징하는 구조로 만들어졌다. 금강의 물 위를 흐르는 또 하나의 흐름을 강조해 생동적인 형상을 이루도록 디자인하여 문화와 자연이 어우러지도록 표현하였다.

⑮. 죽산보

죽산보의 전체길이는 184m로 가동보로 되어 있다. 가동보는 쉘타입 롤러수문 4문과 나루터에 거더타입 롤러수문 2문으로 구성되어 있다. 기본계획은 160m로 되어 있었으나 24m를 확장함으로써 홍수 때 신속한 내수배제를 비롯하여 수리조건을 향상시

표 5. 보 현황 및 제원 (수면적: 백만m² / 저수용량: 백만m³)

구분	보	공구	기본제원					공도교 (m)
			길이(m)	높이 (m)	수면적 저수용량	수문제원	수문형식	
계	16개		6,932.7 (가 3,315, 고 3,616)	3.5 ~11.8	121.1/ 631.0			L=9,124.6
한강 3개	이포보	3	656.8 (가 294.8, 고 362)	3.5	5.9 / 16.8	45*3@6	shell type roller	L=706 B=7
	여주보	4	503 (가 503, 고 0)	3.5	4.4 / 12.9	36*2@8 36*3@4	shell type roller	L=830 B=7.5
	강천보	6	440 (가 350, 고 90)	3.5	4.4 / 11.6	45*3@7	rising sector	L=485 B=10.0
낙동강 8개	창녕·함안보	18	549.3 (가 144, 고 405.3)	7.08	16.6 / 96.8	40*7.08@3	rising sector	L=643.8 B=11.1
	합천·창녕보	20	328 (가 218, 고 110)	9.0	10.1 / 68.1	40*9@3	lift(truss), flap	L=675 B=11.5
	달성보	22	534.1 (가 162, 고 372.1)	8.91	9.6 / 56.4	40*7.91@3	rising sector	L=628.1 B=7.7
	강정고령보	23	953.5 (가 120, 고 833.5)	11.03	14.1 / 95.8	45*10.03@2	rising sector	L=810 B=12.0~13.3
	칠곡보	24	380 (가 232, 고 148)	11.8	13.7 / 87.1	40*11.3@3	shell type roller, flap	L=451.5 B=7
	구미보	30	374.3 (가 103.5, 고 270.8)	11.0	9.1 / 49.9	45*9.5@2	shell type roller, flap	L=649 B=4.5~6.4
	낙단보	32	286 (가 141.6, 고 144.4)	11.44	5.3 / 35.6	40*11.5@3	shell type 2단 roller	L=371.2 B=5.4~8
	상주보	33	335 (가 105, 고 230)	10.82	5.6 / 22.4	45*10@2	shell type roller, flap	L=540 B=5~11
금강 3개	백제보	6	311 (가 120, 고 191)	5.3	6.8 / 23.3	36*5.3@3	multi shell	L=680 B=7
	공주보	7	260 (가 220, 고 40)	7.0	4.7 / 15.3	40*7@2 20*7@1	lift(truss), flap	L=465 B=11.5
	세종보	1	348 (가 223, 고 125)	4.0	3.0 / 3.8	80*2.8@2 60*4@1	flap	-
영산강 2개	죽산보	2	184 (가 184)	8.13	5.3 / 27.3	가동보 36.5*7.13@4	shell type roller	L=622 B=5.34
						열린나루터 12*7.73@2	steel girder type roer	
	승촌보	6	512 (가 180, 고 332)	5.16	2.5 / 9.1	30*5.05@2 50*5.02@2	lift(truss)	L=568 B=12.5

* (수면적과 저수용량) 하천기본계획(2010.12) 기준단면으로 산정
* (보 높이) 보의 상류 쪽 계획하상고(바닥보호공 상단)에서 고정보 마루까지의 높이
* (보의 길이) 어도는 보의 기능(담수)을 겸할 때 길이에 포함, 소수력발전소는 보 길이에서 제외
  (단, 강천보와 강정고령보는 보 사이에 발전소가 위치하여 보의 기능 역할로 길이에 포함)

켰다. 죽산보의 외관은 남도의 숨결과 새롭게 태어나는 영산강이 힘차게 굽이치는 기상을 형상화하였다. 또한 보와 연계한 다양한 접근로를 만들고 주변 수변공원과 동선을 연결함으로써 지역의 관광자원으로서 가치를 창출할 수 있도록 하였다.

⑯ 승촌보

승촌보의 전체길이는 512m로 가동보 180m, 고정보 332m로 구성되어 있다. 가동보는 트러스트타입 승강식으로 수문 폭 50m 2문과 폭 30m 2문의 3방 지수형으로 상단방류가 가능하다. 아치형태의 강결 트러스 구조로 비틀림에 강하여 긴 경간에 유리하며 수면 위에 인상되므로 점검이 용이하고 하단방류에 의한 배사기능이 가능하다. 가동보의 수문형식인 트러스타입 승강식 수문은 50m 폭으로 인한 처짐을 최소화하고, 개방형구조로서 유지관리가 쉽다. 승촌보는 영산강의 재탄생이라는 지역의 염원을 담아 '생명의 씨앗'이라는 주제를 가지고 디자인하였다.

3) 보의 역할과 성과

① 안정적인 물 확보와 공급

4대강에서 보의 수문을 닫아두는 평소에는 관리수위가 올라가고 하천의 수량도 사업 이전보다 많아진다. 4대강살리기 사업으로 얻는 수자원확보량은 총 11억7,000만m^3인데, 이 중에 준설 및 16개 보의 설치로 확보되는 양은 7억2,000만m^3으로 팔당댐 저수량의 3배 정도 되는 양이다. 각 수계별 수자원 확보량은 표 6과 같다.

가뭄이 계속되던 2012년 5월, 4대강의 보 설치로 인해 수위는 예년에 비해 모두 상승하였다. 2011년 11월에서 2012년 5월까지 갈수기 평균수위가 한강 0.66m, 낙동강 3.14m, 금강 1.14m, 영산강 2.14m 상승해 평균적으로 1.77m 상승하였다. 또한 본류수위가 높아짐에 따라 본류로 유입되는 지류수위도 높아졌고, 주변 지하수위 함양량도 증가하여 본류 주변 관정도 정상운영되었다. 한편, 4대강사업 이전에는 4대강 본류 용수부족으로 관계기관에서 댐 방류요청(1999~2009년, 20차례)이 있었지만, 2012년 5~6월에는 기록적인 가뭄에도 불구하고 방류요청이 한 건도 없었다.

2012년 5~6월 가뭄은 최고 200년 가뭄빈도로 알려졌으나 본류 주변에는 취수장애 없이 안정적으로 물을 공급하여 중상류지역 농경지 8만 2천ha에 원활하게 물을 공급하였다. 하천의 수위는 보 높이만큼 일정하게 유지되어 모든 양수장과 취수장을 포함한 209곳이 정상가동되었다. 2016년 가뭄에도 취수장애 해소로 취양수장 본류 149개소와 지류 2개소가 정상 가동되었다.

표 6. 4대강살리기 사업을 통한 수자원 확보량 (억m^3)

구분	계	한강	낙동강	금강	영산강(섬진강 포함)
계	11.7	0.41	9.02	1.13	1.14
준설 및 보	7.2	0.31	5.92	0.63	0.34
중소규모댐	2.4	-	2.4	-	-
농업용저수지	2.1	0.1	0.7	0.5	0.8

2014년, 2015년 연속된 가뭄에는 물이 부족한 41개 시군 중 25개 시군을 대상으로 인접한 보와 직선거리 40km 이하인 경우에는 보의 수량 활용이 가능했다. 2015년 10월부터 백제보 하류에서 보령댐으로 4개월에 걸쳐 도수로를 건설하여 하루에 11.5만m^3의 용수를 공급하여 8개 시군이 혜택을 받았다. 또한 2017년 6월에는 공주보에서 예당지를 연결하는 도수로 완공으로 금강본류의 물을 공급할 수 있었다.

② 소수력 발전

4대강 보에는 소수력발전소를 설치해 연간 2억 7,000만kWh의 청정에너지를 생산하게 되는데, 이는 4인 기준으로 5만 8,000가구가 1년 동안 사용할 수 있는 양이다. 16개 보의 총 발전 시설용량은 5만 771kW로서 소양강다목적댐 수력발전 용량(20만kW)의 약 25%에 이른다.

CO2 저감효과가 연간 18만 톤으로 추정되며, 유류 수입대체 효과는 약 45만 배럴로 3천4백만달러(약 530억원)의 외화절감효과를 예상하고 있다. 2013~2016년의 연간평균 발전매출액은 600억원이었으나 2017년 6월부터 2018년 12월까지 수문개방으로 인한 매출액은 327.5억원으로 감소된 것으로 알려졌다.

5. 2. 2 중소규모 댐의 건설

4대강살리기 사업으로 낙동강 수계에 영주댐(경북 영주)과 보현산다목적댐(경북 영천)을 건설하고, 안동댐-임하댐을 연결하였다. 영주댐은 생활용수(영주 등)와 본류의 하천유지용수 공급을 목적으로 하고 있으며, 보현산다목적댐은 생활용수(영천 등)를 공급하여 지역의 물 부족 문제를 해결하도록 하였다. 안동댐과 임하댐의 연결(1.925km)은 홍수기와 연계운영을 통해 본류에 추가 용수공급이 가능하도록 하기 위한 것이다.

1) 영주다목적댐 건설

처음에는 송리원댐으로 불리었으나 지자체 요청으로 영주다목적댐으로 명칭을 바꾸었다. 총저수용량은 1억 8,110만m^3으로 연간 약 2억m^3의 용수를 공급해 낙동강 중하류지역의 수질개선이 주목적이다. 영주다목적댐은 댐체 아래에 분포한 단층대를 고려하여 콘크리트댐(CGD)과 콘크리트표면차수벽형석괴댐(CfRD) 형식을 조합한 복합댐 형식을 취하고 있으며, 비퇴사량이 많은 내성천 특성을 고려하여 배사문 및 유사조절지와 같은 시설들이 계획되어 있다. 댐 건설로 댐 하류 홍수피해 저감 및 용수공급과 갈수기 하천유지용수 공급을 통한 낙동강 수질개선에

표 7. 신규댐 건설에 의한 용수 확보량

구분	총저수량(억m^3)	용수공급(억m^3/년)	홍수조절(억m^3)	수력발전(GWh/년)
영주댐	1.8	2.0	0.8	16.3
보현댐	0.3	0.2	-	1.3
안동댐-임하댐 연결	-	0.3	-	3.3
계	2.1	2.5	0.8	20.9

기여하고, 상·하류 공원, 자전거도로를 포함한 수변 순환도로와 댐 주변에 지역주민의 휴식공간이 조성되어 지역의 새로운 명소로 거듭나고 있다.

2) 보현산다목적댐 건설

보현산댐은 경북 영천시 화북면(낙동강 지류 고현천)에 높이 57m, 길이 245m, 총저수용량 2,200만m³ 규모로 건설되었다. 영천 일대에 생활용수 공급을 통해 이 지역의 만성적 물부족 해소에 목적을 두었다.

보현산댐은 한동안 보현댐으로 불리었으나 댐 인근에 위치한 보현산천문대와 함께 관광명소로 조성하려는 영천시의 요청으로 보현산다목적댐으로 명칭을 바꾸었다. 보현산댐 건설로 연간 1,500만m³의 청정용수를 영천, 경산시에 공급해 지역발전의 기반을 마련하게 되었을 뿐만 아니라, 최근 빈번하게 발생하고 있는 국지성호우 등 이상기후에 대비해 홍수 시 350만m³의 물을 조절할 수 있어 고현천의 홍수피해를 크게 줄일 전망이다. 보현산댐 역시 상·하류에 수변공원을 조성하고 댐 주변에 지역주민의 휴식공간과 함께 자연과 인간이 소통할 수 있는 생태공간도 조성해 휴식과 관광의 명소로 자리 잡아가고 있다.

3) 안동댐과 임하댐 연결사업

안동댐과 임하댐을 도수터널로 연결하였다. 두 댐의 연계운영을 통해 낙동강수계의 수자원을 추가로 확보하려는 목적으로 계획되어 터널 1.925km(D = 5.5m), 취수탑 2기, 진입도로 1.2km를 건설하였다.

5. 2. 3 저수지 둑 높이기

기존 저수지 1만 7,600여 개 중 추가용수확보가 가능하고 환경영향·수몰면적이 적은 저수지를 대상으로 둑 높이기사업을 추진하였다. 이를 통해 방류능력이 부족한 시설물을 보강하고 추가저수용량 확보를 통해 유역 내 홍수조절능력 확보는 물론 하천의 환경유지용수 확보와 더불어 하천생태계 보전이 가능하다. 저수지 둑 높이기사업은 기존 저수지개발보다 사업기간이 짧고 경제적이며, 환경적 영향을 최소화하면서 추진할 수 있다는 장점이 있다. 또한 조성된 수변공간에 지역민을 위한 수변공원 등을 조성하여 지역균형발전에도 기여하게 된다. 당초 대상 저수지는 96개소였으나 최종 93개소로 조정되었다. 추가저수량은 2.1억m³로 사업비는 2.3조원이 소요되었다.

5. 3 수질개선

4대강살리기 사업에서 수질개선부문의 비전은 '물고기가 뛰놀고 아이들이 멱 감을 수 있는 물 환경'을 조성하는 것이다. 이를 위해 2008년 78.1%인 4대강의 좋은 물 2급수 달성률을 사업이 완료되는 2012년에는 86%로 개선하자는 목표를 세웠다. 이 목표를 이루기 위해 공사 중 발생할 수 있는 수질오염 및 사고를 줄이고 공사 후 늘어난 물그릇에 맑은 물을 채우는 한편, 오염원을 집중관리하여 수질을 개선하기 위한 오염저감대책을 세우고 과학적이고 효율적인 수질관리를 위해 수질예보제를 도입하는 단계별 개선책을 마련하였다.

수질개선을 위해 우선 공사 중 환경관리를 철저히 해 공사기간 중에 발생할 수 있는 취수 및 정수문제를 사전에 차단하고, 수질오염사고에 대비한 초동방제시스템을 구축하였다. 그리고 4대강 수질오염방제센터를 운영하는 한편 수질오염사고 예방 및 방제매뉴얼의 수립, 수질환경기준의 신설, 방류수의 기준과 수질오염총량제의 강화, 환경기초시설 확충, 비점오염 저감대책, 준설토의 적정활용 및 처리 등의 사업을 추진하였다.

4대강살리기 사업으로 신설된 보의 오염원 관리를 위해 34개 권역을 중점관리유역으로 선정해 특별관리하는 것도 중요한 정책사업이었으며, 이를 위해 산업폐수의 유입을 사전에 차단하도록 대책을 세웠다. 특히 공사 후 최적의 수질관리를 위해 수질모니터링 시스템과 세계 최고수준의 수질예보시스템을 구축해 효율적이고 안정적인 물관리가 가능하도록 했다.

5. 3. 1 4대강 수질개선시설

정부가 적극적으로 추진한 환경기초시설 확충 등으로 인해 4대강의 BOD는 전반적으로 개선되는 추세였다. 그러나 비점오염원 등으로 인해 COD, TP 기준으로는 상승 또는 정체추세에 있어 개선책을 마련하여 왔다. 특히 용수확보를 위해 보를 건설함에 따라 보 설치 상류유역에서 조류발생예방을 위한 수질개선대책이 필요했다. 이를 위해 엄격한 수질관리가 필요한 지역을 중점관리유역으로 정하는 한편 하천의 수질개선을 위해 3.9조원을 투입하여 1,281개소의 총인처리, 하수처리장, 폐수처리시설 등 수질개선시설도 신설·증설하였다. 결과적으로 오염되고 방치된 하천의 자연성과 생태성을 상당부분 회복하였다.

4대강수계 66개 중권역 중에서 COD, TP가 상승추세에 있거나 주변에 대규모 상수원이 있어 집중관리가 필요한 34개 중권역에 대해서는 하절기 유해조류발생의 원인이 되는 영양염류(TP) 저감을 위해 하·폐수처리장에 총인처리시설을 설치하고, 시설보강에 따라 하·폐수처리장의 방류수 수질기준도 선진화 수준으로 높여 지역에 따라 차이는 있지만 총인의 경우 최고 20배까지 강화되었다.

5. 3. 2 공사 중 수질관리

4대강살리기 사업은 본류에서 동시다발적으로 시행되므로 공사 중 수질관리가 매우 중요하며, 그 중에서 초기대응이 특히 중요하다. 이를 위해 평상시의 수질오염 사고 대응시스템에서 벗어나 사전예방기능을 강화하고, 초동방제시스템을 구축해 수질오염사고에 적극 대응토록 시스템을 구축할 필요가 있었다.

특히 공사기간 중 수질오염원의 무단방류로 발생하는 하천오염을 예방할 수 있는 관리대책이 요구되었다. 동시에 준설 같은 공사과정에서 탁수 등 수질오염이 발생할 경우에 대비해 안전한 취수대책을 마련하는 것이 필요하였다. 그리고 준설토에서 발생하는 부유토사로 인한 수질오염과 성토·복토재 등의 재활용으로 생길 수 있는 2차 수질·토양오염을 방지하기 위해 적정관리 및 활용·처리 방안을 세웠다.

5. 3. 3 수질개선 성과

환경부가 2012년 상반기 4대강의 수질을 종합분석하여 발표한 결과에 따르면, 적은 강우량에도 불구하고 주요지점(66개소) 및 16개 보의 수질이 사업 이전(2007~2009년)에 비해 개선된 것으로 나타났다. BOD 평균값은 2.6mg/L에서 2.1mg/L로 개선되었으며 수질측정소 66곳에서 다소 나빠진 곳은 16곳(24%)이었지만 개선된 곳은 45곳(68%)이었다.

TP의 경우에는 전체 평균값이 0.149mg/L에서 0.083mg/L로 44% 저감됐고, 클로로필-a는 사업 전에 비해 약간 감소했으며, 전체적으로 개선된 곳도 58%로 나타났다. 16개 보의 수질도 BOD 평균값이 3.2mg/L에서 2.8mg/L로 13% 감소했으며, TP는 0.201mg/L에서 0.114mg/L로 43%, 클로로필-a는 38.1mg/m³에서 33.1mg/m³로 13% 개선되었다. 또한, 낙동강 최상류에 위치한 상주보와 낙단보를 제외한 전체 보의 수질이 개선됐다. 특히 BOD는 16개보 중 12개보에서, 총인은 13개소, 클로로필-a는 11개소에서 농도가 감소했다.

2014년 국무조정실 4대강사업 조사평가위원회는 보와 준설에 의해 물이 머무르는 시간이 길어진 것은 수질악화 요인으로 판단했고, 2013년에 낙동강에서 녹조현상이 심해진 것도 강수량이 적고 물이 머무르는 시간이 길어진 것이 주요원인이며 높은 기온과 일사량의 증가도 복합적으로 작용한 것으로 발표하였다.

2018년 감사원 감사에서 용역을 수행한 대한환경공학회 보고서에 의하면 4대강 사업 전후 각각 4년간 16개 보 수질을 8개 수질지표로 비교한 결과 총 128건(16개 보×8개 지표) 중 조사대상 보의 수질이 44%는 개선된 반면 악화는 14%에 그쳤다는 조사결과를 내놨다. COD만 개선된 곳이 적을 뿐, 용존산소·총질소·총인 등 지표는 나빠진 곳이 한 곳도 없었고, 부유물질·BOD 등도 개선이 악화보다 더 많았다.

조선일보에 의하면 금강·영산강 5개 보를 대상으로 설치 전(2005~2009년), 설치 후(2013~2017년) 각각 5년씩 총 10년간 수질비교를 해본 결과, 각 보별로 7개 항목을 종합적으로 보면 5곳 중 4곳이 보 준설 후 수질이 개선되었다. 백제보는 전 항목, 공주보는 5개, 승촌보·죽산보는 4개 항목이 좋아졌고, 세종보만 개선(3개)이 악화(4개)보다 한 항목 적었다. 항목별로 보면 BOD·TP·TN은 보 전체, SS는 세종보를 제외한 모든 보에서 개선된 반면, COD·DO는 백제보를 뺀 모든 보, 클로로필-a는 공주보·백제보를 제외한 3곳에서 악화되었다. (조선일보 2022년 8월 29일자)

갈수기 수질이 과거에 비해 개선된 것으로 나타났으나 가뭄과 고온 등 이상기후에 의해 조류발생이 심각한 양상을 띠면서 그 원인과 대책에 대한 찬반론이 팽팽하게 대립하였다. 수질개선효과는 기준연도, 비교시점 및 비교방법에 따라 차이가 있기 때문에 4대강사업으로 인한 수질개선 효과를 단정적으로 비교하기는 어려움은 있으며 장기간에 걸친 조사 및 분석이 필요하다.

5. 4 생태복원과 관련사업

하천 내에서 경작하면 퇴비, 농약, 비료 등이 강우 시 하천으로 흘러들어가 수질을 악화시키고 하천의 생태서식처, 하천경관 등의 환경기능이 저하된다. 또한 비닐하우스 및 불법 부속시설(창고, 화장실 등)로 인해 홍수 시 유수의 원활한 소통에 지장을 초래하고 국민 모두가 이용할 시설을 일부 개인이 점유하여 사용함으로써 하천의 공용목적을 달성이 어려웠다.

이에 4대강살리기 사업을 통해 고수부지의 경작지 6,579ha를 정리하고 33,137동의 비닐하우스, 가옥 550동과 불법시설을 철거하여 비료·농약 등과 같은 오염원 유입을 근원적으로 차단하였다. 또한 하천 내 각종 폐기물 및 쓰레기 286만톤(15톤 덤프트럭 19만 대분)을 제거한 뒤 생태하천으로 복원하고 습지와 공원을 조성하였다.

아울러 생태복원을 위하여 야생 동·식물 서식공간 복원, 친환경적 사업계획 및 설계·시공, 생태연구개발 기반확대 등을 주요 목표로 삼았다. 이를 위해 90개소의 대체서식지를 조성하고 대체습지는 147개소를 조성하였으며, 어도는 33개소를 설치하였다. 친환경적 사업계획 및 설계·시공을 위하여 자연관찰시설과 녹색성장기반시설을 도입하고, 하천구조물은 환경친화적으로 설치하였다. 또한 생태계 조사·연구·기술개발을 확대하고, 4대강 생태지도를 이해하기 쉽게 제작하여 국민에게 제공하였다.

5. 5 복합문화공간의 조성

수변공간이 다양한 문화활동이 이루어지는 삶의 공간이자 일상의 공간으로 자리매김하기 위해서는 국민이 갖고 있는 강에 대한 인식의 전환이 뒷받침되어야 한다. 그간 경작지, 비닐하우스 등으로 방치되어 소수의 사람만 활용하던 수변공간에 130km² 의 쾌적한 수변공간을 조성해 다목적 기능을 갖추었다. 이는 여의도 면적의 40배에 이른다. 수변공간에는 공공성을 강화하여 강변을 시민의 휴식과 여가 및 생활체육공간으로 활성화하는 다양한 정책을 추진하여 시민주도형, 참여형 친수생활체육의 확산을 유도하였다. 보에는 자전거 접근이 가능한 공도교를 설치하고, 전망타워 등을 마련해 편의시설로 활용하고 있다. 또한 야간조명도 설치해 각양각색의 보 디자인을 통해 보가 지역관광 활성화에 기여하는 랜드마크가 되도록 했으며, 주변 생태공원을 활용해 지역주민의 삶의 질 향상에도 기여할 것으로 기대하고 있다.

4대강살리기 사업으로 마련된 고수부지 등 공간에 축구장 65면, 야구장 45면, 농구장 71면, 테니스장 43면, 족구장 85면, 배드민턴장 68면, 게이트볼 32면, 인라인 14면, 배구장 11면, 파크골프장 등 다양한 세대와 단체가 즐길 수 있는 생활체육시설을 마련하였다. 또한 수상레포츠의 보급을 위해 금강의 세종보, 한강의 강천보 등에 요트 등의 계류를 위한 마리나를 설치하고 4대강 요소요소에 56개의 나루터를 설치하였다. 이러한 시설은 지역의 수요에 따라 증설이 가능할 것이다.

자전거길 설치는 여가활동을 통해 건강을 증진시키고, 지역 간의 소통을 돕고, 자동차의 대체이용으로 환경오염물질과 이산화탄소 발생을 줄이는 다각적인 효과를 동시에 누리는 장점이 있다. 자전거의 이용으로 국민의 건강증진과 기후변화, 환경오염, 에너지 고갈, 교통체증 등의 문제를 해결하며, 4대강의 수려한 경관과 지역문화를 결합한 자전거길을 조성해 레저, 역사, 문화 등 다양한 이야깃거리를 제공해 현장학습과 지역의 축제, 특산물 등을 체험할 수 있는 기회를 제공하였다.

자전거길은 본류 하천의 상·하류를 잇는 종주노선으로 연결하고, 본류 및 지류의 생태하천 내에도 조성하였다. 하천구역 내 제방 또는 둔치를 이용해 자전거길을 설치하고, 협곡부와 지천 합류부 등 단절부는 기존 도로를 이용하여 우회하는 경로(도로)로 연결하도록 하였다. 4대강살리기 사업으로 조성되는 자전거길 총 길이는 1,757km(새재자전거길 100km 포함)이다.

자전거길 종주코스는 4대강종주자전거길과 국토전체를 횡단하는 국토종주자전거길로 나눠진다. 4대강종주자전거길은 각 수계별로 구성되며, 국토종주자전거길은 한강종주자전거길과 낙동강종주자전거길을 중심으로 아라자전거길, 한강서울자전거길, 새재자전거길을 합친 국토종단 코스이다.

5. 6 강 중심의 지역발전

4대강살리기 사업과 병행하여 지천(지방하천, 소하천 등)도 이수·치수·환경·친수·문화·관광 등을 종합적으로 고려해 정비하고, 지방하천의 홍수방어능력을 재평가하여 주요 도시구간은 국가하천과 같이 100~200년 빈도 홍수에 견딜 수 있도록 보강하도록 하였다. 아울러 4대강에 직접 유입되는 소하천은 4대강살리기 사업과 연계하여 단계적으로 정비하도록 하였다.

'문화가 흐르는 4대강살리기'는 문화와 역사, 사람과 이야기가 있는 문화의 물길로 4대강을 재탄생시켜 21세기 녹색르네상스시대 개막을 알리는 것이며 국토의 재탄생의 의미를 갖는다. 즉 4대강에 역사·문화의 옷을 입혀 격조 높은 문화국가로서의 이미지를 구축하는 것이 필요하다.

6. 4대강별 주요사업 내용

6. 1 한강

한강은 27개 공구로 나뉘어 사업구간이 정해졌으며, 지역은 강원도, 경기도, 충청북도를 포괄한다. 이중 3공구, 4공구, 6공구에 각각 이포보, 여주보, 강천보가 포함되어 있으며, 이포보 수중광장, 어도, 여주와 영월에 저류지, 자전거도로를 비롯한 수변공원, 하천정비 등의 사업이 이루어졌다. 한강 본류·북한강·섬강이 사업범위이다.

한강은 장기간 퇴적으로 하천단면이 축소되어 홍수소통능력이 떨어졌다. 특히 여주지역은 충주댐의 홍수조절용량이 부족해 달천, 섬강 유역의 물이 이 지역 하천으로 직접 유입됨에 따라 홍수조절능력이 매우 약했다.

이같은 한강의 특성을 고려해 퇴적토준설, 강변저류지건설, 노후제방보강 등이 한강살리기 사업으로 추진되었다. 모래가 많이 퇴적된 여주지역을 중심으로 약 4,700만m^3의 토사를 하천에서 준설했으며, 신규 댐이나 홍수조절지를 건설할 입지가 없어 저류지를 만들어 홍수조절 능력을 확보하였다.

- 사업구간: 255km / 사업 공구: 27개소(신규 17, 계속 10)
- 다기능 보: 3개(이포보, 여주보, 강천보) / 소수력 발전용량: 12,945kW
- 강변저류지: 2개소(여주, 영월)
- 저수지 둑 높이기: 12개소 / 농경지 리모델링: 2개소
- 수질개선사업: 482개소 / 자전거길: 310km
- 오토캠핑장: 4개소 / 문화관: 1개소(강천보)

6. 2 낙동강

낙동강은 92개 공구(8개 보 및 3개 댐 건설, 하구둑 배수문 확장 등 포함)로 나뉘어 사업이 진행되었다. 경북, 경남, 대구, 부산에 이르기까지 낙동강 수계에 있는 거의 모든 시와 도가 사업 구간에 포함되었다. 이 중 18공구 창녕·함안보, 20공구 합천·창녕보, 22공구 달성보, 23공구 강정고령보, 24공구 칠곡보, 30공구 구미보, 32공구 낙단보, 33공구 상주보 등 총 8곳에 보와 어도 등이 조성되었다. 영주댐, 보현산댐이 건설되고 안동-임하댐 간의 수로도 연결되었다. 또한 낙동강하구둑 배수문을 확장하고 수변공원 등을 조성하였다. 사업범위는 본류·서낙동강·맥도강·평강천·금호강·남강·황강이다.

낙동강은 평상시에도 물이 말라 바닥이 드러나 있으며 퇴적물이 쌓여 강바닥이 인근 농경지보다 높았다. 비가 조금만 와도 농경지가 침수되는 피해를 입었다. 또한 낙동강 유역권은 산업화시기에 부산과 대구를 중심으로 구미, 포항, 울산, 마산, 창원, 진주, 사천 등지에 도시화, 공단화가 추진된 지역이다. 그 결과 낙동강은 공업단지에서 배출되는 독성물질과 농업 및 생활폐수로 오염되어 대책마련이 시급하였다.

- 사업구간: 470km / 사업공구: 92개소(신규 52, 계속 40)
- 다기능 보: 8개(상주보, 낙단보, 구미보, 칠곡보, 강정고령보, 달성보, 합천·창녕보, 창녕·함안보)
- 소수력발전용량: 27,841kW / 댐: 3개(영주댐, 보현산댐, 안동-암하댐)
- 안동댐-임하댐 수로 연결 / 저수지 둑 높이기: 30개소
- 농경지 리모델링: 113개소 / 수질개선사업: 392개소
- 자전거길: 665km / 하구둑배수문 증설
- 오토캠핑장: 10개소 / 문화관: 2개소(강정고령보, 을숙도)

6. 3 금강

금강은 28개 공구(행복 1, 2공구 포함)로 나뉘어 사업이 진행되었다. 6공구에 백제보, 7공구에 공주보, 행복 1공구에 세종보를 각각 건설하였다. 지역별로는 충청남도와 충청북도, 전라북도 군산과 익산 그리고 대전광역시가 포함되었다. 오염원 유입 원인이 되었던 강변농경지를 정리해 수변공원을 조성하고 자전거도로, 농경지 리모델링사업 등을 시행하였다. 특히 금강 유역은 백제문화의 복원이라는 개념을 적용해 수변공간을 조성하였다. 사업범위는 본류·갑천·유등천·미호천이다.

금강은 1980년대 대청댐 건설 이후 수량이 200배 이상 증가하는 긍정적인 효과가 있었다. 하지만 지천에서 유입되는 토사가 하류로 흘러가지 못하고 하천바닥에 계속 쌓여 하상을 높이고 둔치를 형성하게 되었다. 여기에 농민들이 농사를 지으면서 천변 농경지가 크게 증가해 새로운 수질오염원으로 작용하였다. 금강하구에 강과 바다 사이를 가로막는 하구둑이 생긴 이후 해마다 20~25cm의 퇴적토가 쌓이고 있어 10년 내에 농업용수로도 부적합할 위험이 있었다. 예전에는 강 중류까지 선박이 왕래할 정도로 수심이 깊었으나 최근에는 수심이 1m도 안 되는 곳까지 있어 수심확보도 시급했다.

- 사업구간: 272km / 사업 공구: 28개소(신규 11, 계속 17)
- 다기능 보: 3개(세종보, 공주보, 백제보) / 소수력 발전용량: 7,950kW
- 문화관: 1개소(백제보) / 저수지 둑 높이기: 28개소
- 농경지 리모델링: 17개소 / 수개선사업: 303개소
- 자전거길: 305km / 뱃길 복원: 공주-부여 뱃길복원 67km

6. 4 영산강(섬진강)

영산강은 17개 공구, 섬진강 6개 공구로 나뉘어 사업이 진행되었으며, 2공구에 죽산보, 6공구에 승촌보 등 2개 보가 건설되었다. 영산강 공구는 전남과 광주시를 포함하고 있으며 섬진강 공구는 전남북 일부 군과 경남 하동군을 포함하고 있다. 지역주민들의 숙원이었던 영산강 하구둑 배수문 확장사업이 시행되었으며, 나주에 저류지, 담양과 화순에 홍수조절지를 조성하였다. 유서 깊은 뱃길복원사업도 이루어졌다. 사업범위는 본류·황룡강·함평천·섬진강이다.
영산강은 유량이 부족해 건천화된 곳이 많은 데다 퇴적토가 많이 쌓여 하상이 높다. 이 때문에 영산강 유역의 평야는 홍수가 나면 범람의 피해에 그대로 노출되었다. 게다가 산업화로 인해 강으로 오염물질이 유입되면서 주요 강 가운데 가장 오염이 심한 강이라는 오명을 쓰게 되었다. 2004년 상반기 나주대교 부근 수질은 BOD 6.0ppm/L 내외로 농업용수로도 쓸 수 없는 5급수였다.
영산강살리기 사업은 퇴적토를 걷어내 하상을 낮추고 강물을 더럽히는 오염원을 제거하는 데 초점을 맞추었다. 사업내용에는 지역주민의 숙원사업인 하구둑 배수문 확장공사도 포함되었다. 30년 전 준공된 하구둑에 토사가 쌓이면서 물이 빠져 나가지 못하자 주변 농경지로 범람했고 오염된 토사 및 폐수가 하구둑에 막혀 정체되는 바람에 수질악화가 심해졌다.

- 사업구간: 269km(영산강 131km, 섬진강 138km) / 사업공구: 23개소(신규 15, 계속 8)
- 다기능 보: 2개(승촌보, 죽산보) / 소수력 발전 용량: 2,020kW
- 자전거길: 377km / 강변 저류지: 1개소(나주)
- 홍수조절지: 2개소(담양, 화순) / 저수지 둑 높이기: 23개소(섬진강 9개소 포함)
- 농경지 리모델링: 8개소 / 수질개선사업: 104개소
- 오토 캠핑장: 4개소(섬진강 1개소 포함) / 문화관: 1개소(승촌보)

7. 감사원 감사와 4대강 조사·평가

7. 1 감사원 감사

4대강살리기 사업추진과정에서 사업의 타당성, 시설물안전성 및 사업효과 등에 대한 찬성과 비판이 이어짐에 따라 사회적 논란이 지속되었다. 이에 따라 감사원에서는 사업추진단계에 맞추어 사 세부계획 수립, 공사품질 및 수질, 계약집행실태 및 성과 등 총 4차례의 감사를 실시하였다.(2011년, 2013년 2회, 2018년)

7. 1. 1 제1차 감사(4대강살리기사업 세부계획 수립 및 이행실태 감사, 2010.1.~2.) 2011.1.27 발표

2010년 1월 25일 감사원은 4대강살리기 사업이 본격화됨에 따라 국토해양부 4대강살리기 추진본부 등을 대상으로 치수·이수·친수분야의 사업세부계획과 재원 확보, 공사발주, 계약체결 등의 적정성여부를 중점으로 감사에 착수하였다.

감사에 착수한 지 1년 후인 2011년 1월 27일 감사원은 예비타당성조사, 환경영향평가, 문화재조사 등 법적절차 이행에는 문제점을 발견할 수 없었으나, 기존 하천사업과의 연계 부족, 과다한 준설계획 등 총 20개 사항 29건을 처분요구하거나 국토해양부 등에 통보했으며 그 결과 수천억 원의 예산을 절감할 수 있는 내용의 감사결과를 발표했다.

7. 1. 2 제2차 감사(4대강살리기사업 주요 시설물 품질 및 수질관리 실태 감사, 2012. 5~9) 2013.1.17 발표

감사원은 사업초기였던 2010년, 사업추진계획의 적정성 등을 중점으로 사전예방적 감사를 실시한 데 이어 보 건설 등 주요사업이 마무리된 시점에 향후 시설물운영과정에서 발생할 수 있는 문제점 등에 대하여 선제적 대응을 유도하고, 장기적인 관점에서 사업성과 및 효과를 제고하는데 목적을 두고, 2012년 5월 14일부터 7월 11일까지 '보 등 주요시설물의 품질', '수질관리' 및 '유지관리계획의 적정성' 등을 중점으로 감사를 실시하였다.

2013년 1월 17일 감사원에서는 설계부실로 총 16개 중 11개 보의 내구성이 부족하고, 불합리한 수질관리로 수질악화가 우려되는 한편, 비효율적인 준설계획으로 향후 유지관리비용 소요 예상 등을 지적하였으며, 보 내구성을 위한 보강공사, 실효성 있는 수질개선대책 및 합리적 준설방안 등에 대한 개선이 필요하다고 발표하였다.

7. 1. 3 제3차 감사(4대강살리기사업 설계·시공일괄입찰 주요계약 집행실태 감사, 2013. 1~5) 2013.7.10 발표 & 2013.10.18 발표

2012년 6월 공정위에서 4대강살리기 사업 입찰담합 결과를 발표하였으나, 담합의혹이 시민단체 및 언론 등에서 지속 제기되었다. 또한, 2012년 10월 국정감사에서 4대강 턴키공사 담합에 대한 감사소홀 등의 문제가 제기되었고, 2013년 2월 4대강 사업 총인처리시설 입찰관련 담합의혹에 대한 국회감사요구가 의결되었다.

이에 따라 감사원은 4대강살리기 사업의 담합발생 원인규명 및 국민의혹 해소를 위해 국토부 및 공정위 등을 대상으로 2013년 1월 7일부터 3월 21일까지 '1차 턴키담합처리 및 대응의 적정성', '2차 및 총인처리 턴키담합 여부' 및 '최저가 입찰 부조리 확인' 등에 중점을 두고 감사를 실시하였다. 2013년 7월 10일 감사원은 공정위의 19개 담합업체에 대한 처분조치 장기간 지연, 15개 턴키공사 일괄 발주 등에 따른 담합빌미제공 및 대응소홀, 들러리입찰, 준설·보 설치 및 유지관리계획 부적정 등을 지적하였다.

또한 감사원은 국회의 「매장문화재 보호 및 조사에 관한법률」 위반여부 감사요구를 받고 2013년 4월 15일부터 5월 10일까지 감사를 실시하여 10월 18일 문화재 지표조사와 보존대책이행을 일부 누락과 향후 보다 철저한 관리 필요 등을 발표하였다.

7. 1. 4 제4차 감사(4대강살리기사업 추진실태 점검 및 성과분석, 2017.7~10) 2018.7.4 발표

감사원은 2017년도 연간감사계획에 따라 2017년 5월 15일부터 국토교통부·환경부 등을 대상으로 수자원 확보와 하천 홍수대비의 적정성, 관측 및 예·경보의 적정성 등을 중점으로 하는 '가뭄 및 홍수대비 추진실태'감사를 위한 예비조사를 실시하고 있었다.

그리고 2017년 5월 24일 감사원에 4대강사업 정책결정 및 집행과정, 현저히 불합리한 4대강사업의 관리, 4대강사업 관리에 따른 예산낭비 등에 대한 공익감사('4대강살리기 사업에 대한 공익감사」)를 청구되었다. 감사원은 당초 감사계획을 변경하여 2017년 7월 부터 10월 까지 국토교통부, 환경부 등 47개 기관을 대상으로 4대강사업을 체계적으로 점검하는 4대강살리기 사업 추진실태 점검 및 성과분석감사를 실시하였다. 또한 3개 연구기관에 의뢰하여 4대강 사업의 치수, 이수와 수질 및 경제성에 관하여 성과를 분석하였다.

2018년 7월 4일 감사원에서는 사업결정과 사업추진절차, 사업비관리 등 집행단계에서 주요사안의 보고누락, 법령이나 규정위반 등의 문제점에 대해 결과를 발표하였다. 그리고 유사한 문제의 재발 방지를 위해 해당기관에 주의를 촉구하거나 통보하였다.

2021년 2월 4대강국민연합(대표 이재오 전 국회의원)이 "금강·영산강 보 해체 결정은 부당하다"며 대통령 직속 국가물관리위원회와 환경부를 상대로 감사원에 공익감사를 청구하였다. 이에 따라, 감사원은 그해 12월 보 개방에 따른 수질·수생태계 개선평가에 대한 타당성 및 환경부가 민관합동으로 구성한 '4대강조사·평가기획위원회'의 법적 근거가 있는지 여부를 감사하겠다고 발표하였으며, 2022년 10월 현재까지 제5차 감사가 진행 중이다.

7. 2 4대강 조사 및 평가

2013년 국무총리실에서는 '4대강사업 조사평가위원회'를 구성하여 4대강사업의 조사평가를 진행하였다. 이후 환경부에서는 2018년 8월 보 개방에 따른 효과를 조사하고 보 처리계획을 수립하기 위해 '4대강 조사·평가단'을 설치하였다.

7. 2. 1 4대강사업 조사평가위원회(국무총리실, 2013년 9월~2014년 12월)

감사원의 3차 감사발표 후 국무조정실에 소속된 4대강 조사평가위원회를 구성하여 4대강사업에 대해 1년 4개월간 조사평가를 하였다. 4대강사업의 시설물안전 및 사업효과 등을 대상으로 수환경, 농업, 문화관광 등 4개 분야에 걸쳐 16개 세부과제를 선정하여 조사 평가하였다.

2014년 12월 23일 동 위원회는 4대강사업은 일정부분 성과를 거뒀다고 평가하고, 문제점과 부작용 등으로 지적한 사항 등의 제언사항은 후속조치가 따라야 할 것이라고 발표하였다. 세부적 사항으로 16개 보는 구조적으로 안전하고 다만 6개보에서 누수가 발견되어 상세조사를 통한 보강이 필요하고, 4대강사업의 효과 및 영향에 대한 평가로서 대부분

의 구간에서 사업 전보다 계획홍수위가 낮아져서 4대강 주변 홍수위험지역의 93.7% 위험도가 줄었고, 확보된 수자원활용방안의 필요성을 지적하였다. 그리고 수질은 전반적으로 개선되었으나 낙동강 상류는 BOD 악화, 영산강은 식물성플랑크톤(녹조) 증가 문제를 지적하였으며 무엇보다 지속적이고 체계적인 유지관리가 필요하다고 발표하였다.

7. 2. 2 4대강 조사·평가단(환경부, 2018년 8월~2022년 6월)

4대강사업 이후 녹조, 수질 및 수생태계 영향 등에 대한 논란으로, 정부에서는 객관적인 모니터링을 위해 녹조발생이 심하고 수자원이용에 영향이 적은 6개 보(강정고령, 달성, 합천창녕, 창녕함안, 공주, 죽산)를 우선개방하며 7개 분야(수질·수생태·어도·농업용수·생공용수·지하수위·하천 관련) 모니터링 및 정부합동상황반을 운영(2017년 6월 1일~)하였다.

이후 보 개방에 따른 강의 자연성회복가능성과 보 개방에 따른 효과를 조사하고 보 처리계획을 수립하기 위해 2018년 8월 4대강 조사평가단을 설치하였다. 기획위원회 및 전문위원회(4개 분과)를 구성하고 모니터링분야를 7개에서 14개 분야로 확대(수질, 수생태, 육상생태, 수리수문, 지하수, 물이용, 경관, 퇴적물, 구조물, 어패류구조, 하천시설, 농어업피해, 지류하천영향, 보 활용)를 통해 보 평가체계 마련 및 처리방안 결정기준을 제시(2019년 2월 21일), 유역물관리위원회에서는 제시안을 토대로 지자체·전문가 검토 및 국민인식조사 등을 종합하여 금강·영산강 보 처리방안에 대한 의견문을 국가물관리위원회에 제출(2020년 9월 29일), 국가물관리위원회에서 추가전문가 검토 및 인식조사 등을 거쳐 금강·영산강 보 처리방안을 최종심의·의결*(2021년 1월 18일)하였다.

* (금강) 세종보 해체, 공주보 부분해체, 백제보 상시개방, (영산강) 승촌보 상시개방, 죽산보 해체

2022년 6월 말 4대강 조사·평가단은 해체되고, 7월부터 환경부 물관리정책실 산하에 4대강조사평가업무를 전담하는 TF(Task Force)가 2022년 말까지 설치되었으며, 이 TF는 보 모니터링 등 일부 기능만 이어받는 한시조직으로 알려졌다. 4대강 보를 관리하는 현장대응팀도 각 유역환경청 소속으로 전환배치되며 전문위원회, 지역주민협의체도 해산할 전망이다.

우리나라 고대 수리시설의 축조기술

윤진섭

한국수자원공사 댐안전관리센터장

1. 서언

수리시설은 벼농사와 더불어 시작되었다. 우리나라의 고대 수리시설은 벼농사가 시작되었던 고대 삼한의 부족국가시대로 거슬러 올라간다. 그때 이미 수전(水田: 논)의 관개방법이 발달되었을 것이다. 삼국시대에는 농사를 경제적 기초로 삼음에 따라 제언 축조를 통하여 농업생산성을 향상시켰을 것이다. 하천의 흐르는 물을 막아 논에 물을 대는 것은 우리나라의 지리적 환경에 적합하여 가장 손쉬운 방법으로, 보(洑)와 같은 수리시설이 일찍부터 많은 곳에 만들어졌을 것으로 추정된다.

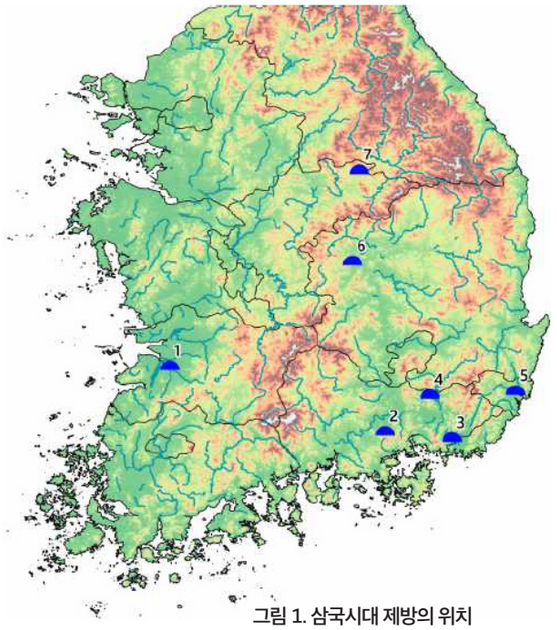
김제의 벽골지, 함안의 가야리제방, 김해의 봉황동제방, 밀양의 구위양지, 울산의 약사동 제방, 상주의 공검지, 제천의 의림지와 같은 저수지는 그 시축연대가 부족국가시대 말기 또는 삼국시대 초기로 추정된다. 그간의 문헌은 고고학적인 측면에서 기술되어 한국대댐회 창립 50년을 맞이하여 우리나라 고대 수리시설의 특징과 기술적인 측면인 축조기술을 살펴보고자 한다.

2. 우리나라 고대 수리시설의 축조기술

제방의 축조기술은 고대에서부터 이어져온 전통 토목기술로 예나 지금이나 콘크리트를 제외하고는 대부분의 재료는 흙이다. 삼국시대의 다양한 축조기술 중에서도 흙을 주재료로 삼아 축조한 구조물에서 부엽공법의 사용에 초점을 맞추어 김제 벽골제, 제천 의림지, 상주 공검지, 밀양 구위양지, 함안 가야리제방, 김해 봉황동제방과 최근 발굴된 울산 약사동제방의 특징을 살펴보았다.

2. 1 김제 벽골제

김제 벽골제는 『삼국사기』에 서기 330년 축조되었다고 전하고 있어 우리나라에서 가장 오래된 기록이 남아 있는 제언이다. 제방 길이가 3km가 넘을 정도여서 당진 합덕제, 연안 남대지(南大池)와 함께 조선 3대 제언의 하나로 꼽히는 거대한 제방이었다.



1. 김제 벽골제
2. 함안 가야리제방
3. 김해 봉황동제방
4. 밀양 구위양지
5. 울산 약사동제방
6. 상주 공검지
7. 제천 의림지

그림 1. 삼국시대 제방의 위치

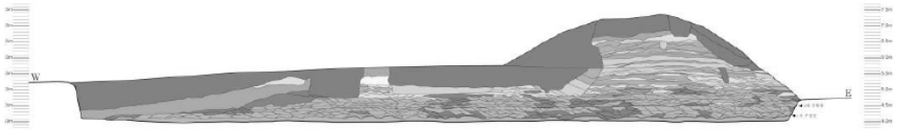
『신승동국여지승람』에 의하면 1415년 대규모의 수축공사를 실시하여 북쪽부터 차례로 수여거(水餘渠)와 장생거(長生渠), 중심거(中心渠), 경장거(經藏渠), 유통거(流通渠) 등 5개 수문을 보수 또는 신설하였는데, 이들 5개 수문에 의한 몽리 범위는 김제를 중심으로 북쪽의 만경현에서 서쪽의 부안현과 남쪽의 고부·인의현의 경계에 이르기까지 매우 광범위하여 관개면적이 약 9,500만m²에 달할 정도였다고 한다.

이처럼 긴 제방이 대단히 넓은 곡부평원의 한가운데 축조되어 있어, 처음 만들어질 당시의 목적이 과연 저수를 위한 것인지 혹은 해수로부터 경작지를 보호하기 위한 것인지 논란이 많았으며, 처음부터 저수용 제언으로서 하류를 관개하기 위해 축조되었다는 견해가 꾸준히 제기되고 있다.

벽골제의 기반층은 실트로 이루어진 습지이며, 지속적으로 유수가 유입되는 입지이기 때문에 유수가 제체 내로 침투하는 것을 방지하기 위해 기반층 위에 전체적으로 초본류의 부엽층을 설치했다. 부엽층 설치의 목적은 기초지반의 유동성을 낮추고, 입지가 대부분 습지이기 때문에 부엽층을 설치함으로써 유입되는 물을 외부로 원활하게 배출하기 위한 것으로 추정된다. 제체의 성토는 실트와 사질점토를 교차로 성토한 교호성토 기법이 사용되었는데, 이는 성토층 간의 접착력을 높이기 위함이다.

2. 2 제천 의림지

제천시 모산동 일대에 위치하는 현존하는 고대 수리시설 중 하나로 2009년 퇴적물의 연대측정 결과 서기 100년 전후의 퇴적물임이 입증되면서 서기 536년 삼국시대에 축조된 것으로 추정된다. 대형 산곡형 저수지의 축조를 통해 대량의 물을 저장·관리하면서 그 하류의 충적지 전체를 개발하는 삼국



벽골제 토층도

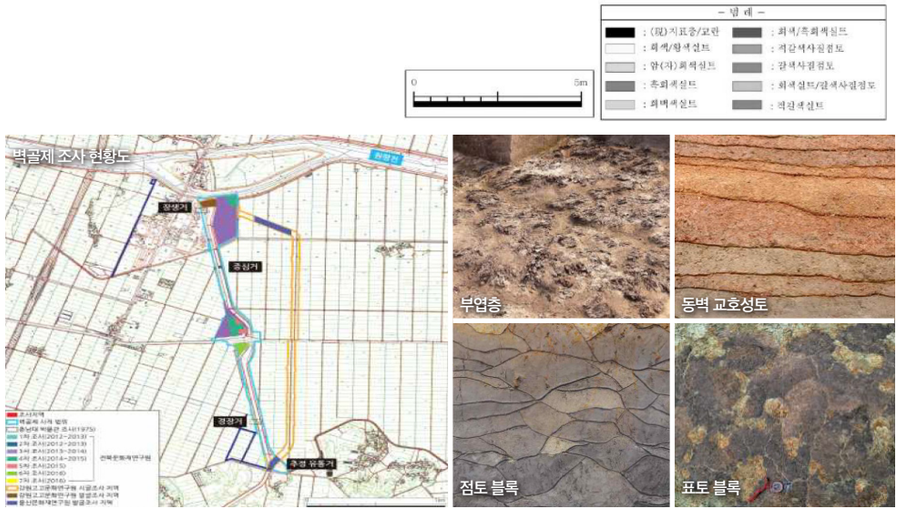


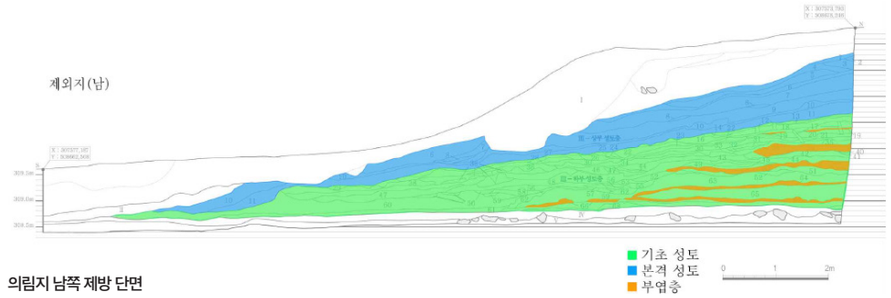
그림 2. 김제 벽골제 축조공법

시대의 농경체계를 대표하는 저수지이다.

해발고도 309m 지점에 축조된 제방으로, 만수면적 약 160,000m², 최대저수량이 약 660만m³에 달하는 인공저수지이며 용두산의 계곡 중 가장 폭이 좁은 곳에 제방이 축조되었다. 담수면적(0.13km²) 대비 최대 관개가능범위가 5.15km²로서, 저수면적의 39배 정도를 관개할 수 있는 관개제방으로 기능했던 것으로 추정된다. 제천이 집중다우지역이고 경지면적도 논보다 밭이 훨씬 많다는 점을 들어, 의림지가 홍수 시 수위조절을 위한 기능을 수행했다고 본다.

1972년 큰 홍수로 제방이 붕괴될 위험에 처하자 마을 주민들이 제방 일부를 파괴함으로써 제방의 내부가 드러났다. 제방 축조 모습을 보면 제방을 쌓기 전에 바닥을 깊이 파서 진흙을 넣고, 직경 30~50cm의 통나무들을 가로 세로로 묶어가면서 버팀목을 만들고, 바깥 벽면은 굵은 자갈돌을 섞은 흙을 성토하였다. 물에 닿는 안쪽 면은 진흙과 모래, 소나무 낙엽을 층층이 번갈아 다진 후 다시 굵은 자갈이 섞인 모래흙으로 두껍게 덮었다. 이는 제방이 부엽공법에 의해 축조되었음을 보여준다. 의림지는 주변의 산수와 어울려 빼어난 경관을 자랑한다.

의림지 조사는 1972년과 2013년 2차례 이루어졌다. 조사결과가 다소 차이가 있으나, 기반층은 하상퇴적층이고 굴곡진 모양으로 나타나며 이것은 특정 기능을 얻기 위한 인위적 가공이 이루어졌을 가능성이 높다. 기초부 성토는 점토블록과 부엽공법, 교호성토로 이루어졌으며 제체성토에서는 부엽공법 없이 교호성토 위주로 이루어졌다.



의림지 남쪽 제방 단면

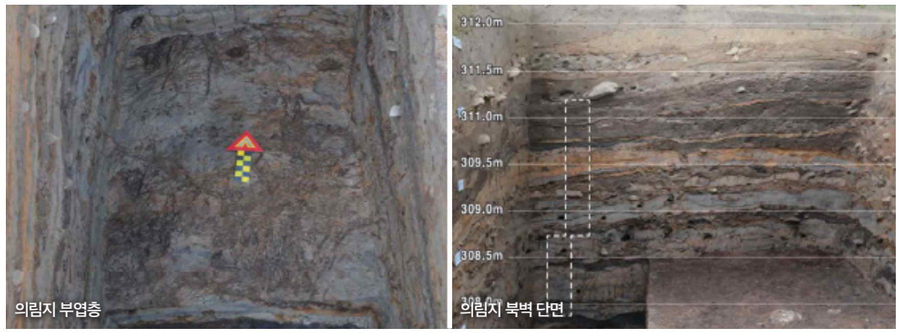


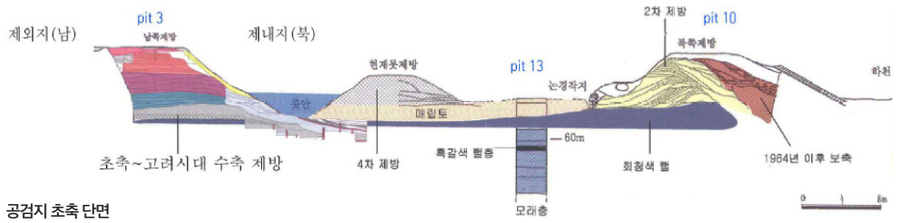
그림 3. 제천 의림지 제방축조공법

2. 3 상주 공검지

삼한시대에 축조된 인공저수지로 국내외에서 유일하게 목재시설층을 부설한 고대 제방축조기술이 밝혀진 저수지이다. 삼국시대에는 구릉지대의 협착부 양안의 구릉 안쪽을 막아 축조한 것으로 생각되며, 고려시대에 개축할 때까지도 그 형태가 유지되었으나 일제강점기부터 현대까지 개축하면서 타원형, 제형, 역삼각형으로 변화하였다. 저수지 내부에서 발굴된 부목재(소나무, 밤나무, 졸참나무 등) 14점은 655~695년에 벌채되어 공검지의 수문 등 수리시설에 사용된 것으로 밝혀졌다.

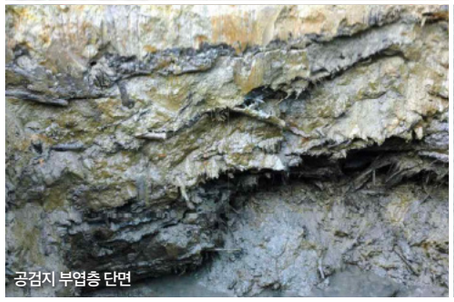
공검지는 주변으로 산이 둘러싸여 분지를 이루고 있으며 제방길이 430m, 둘레는 13,000m 정도로 일제강점기 때 저수지 옆으로 철길이 놓이면서 둘레 1,630m로 축소되었다. 초축제방의 범위는 명확히 알 수 없으나, 곡을 막는 규모를 바탕으로 보면 길이 180m, 너비 35~40m 정도로 추정된다.

제방의 방수시설은 확인되지 않으나 2009년 저수지 내에서 확인된 가공목재 중 방수시설인 저통으로 추정되는 목부재가 확인되었으며, 목부재가 저수지 내부에서 확인된 것으로 볼 때 원래는 목통을 사용하다가 후대 개축 시 방수시설의 변화가 있었던 것으로 추정된다. 제방 바깥쪽으로 10m 떨어진 남쪽제방의 끝단에서는 지름 25~30cm, 길이 90cm이상 되는 큰 통나무들을 제방의 방향과 교차하는 방향으로 깔고 2단으로 포개어 설치하되 윗단의 목재는 밑단보다 20cm 안팎으로 들여 까는 목재시설이 확인되다. 또한 목재시설의 앞쪽으로는 말목을 박았으며 그 사이로 나뭇가지를 엮어 보강하였는데, 이는 협착부의 가장 낮은 곳에 하천이 흐르는 곳을 막기 위해 연약지반에 설치된 지반의 개



공검지 초축 단면

공검지 초축 제방 단면


공검지 부엽층 단면

공검지 부엽층 평면

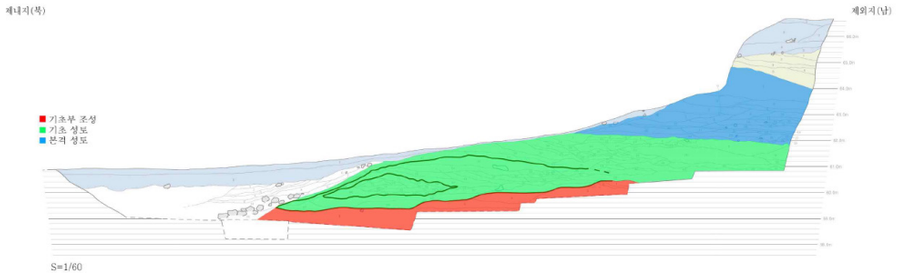
그림 4. 상주 공검지 제방축조공법

2. 4 밀양 구위양지

통일신라시대에 축조되어 경상남도문화재자료 제167호로 지정되었으며 현재까지 사용되고 있는 저수지로 2003년부터 2011년까지 3차례에 걸쳐 발굴조사가 실시된 유적이다.

밀양 구위양지는 곡부 양안의 구릉을 연결하여 조성되었으며, 조선시대와 일제강점기에 수축 및 개축된 량 및 보강을 위한 시설로 판단된다. 목재시설 부설 범위의 규모는 길이 15m, 너비 6m 정도이다.

제방이다. 초축제방은 6세기로 보고되었으며, 형태는 일자형으로 그 규모는 길이 약 300m, 폭은 3~40m, 높이는 약 6m이다. 제방의 축조공정은 기반층의 가공, 1차 성토(부엽층, 불투수성존), 2차 성토(투수성존), 밀봉 및 외형조성(피복, 호안석축) 순으로 확인된다. 현재의 구위양지 옆으로는 하천이 흐르고 있는데 『밀양지(密陽誌)』의 기록에 따르면 구위양지의 둘레는 4~5리에 이르렀으며, 조선조 후기에는 둘레 1,066척에 깊이 22척으로 축소되었고, 근대에는 길이 547척에 너비 68척으로 변경되었다고 한다. 이처럼 구위양지의 규모가 훨씬 컸다는 기록으로 본다면 초축제방은 하천을 완전히 막는 형태로 추정된다.



구위양지 동장벽 토층도

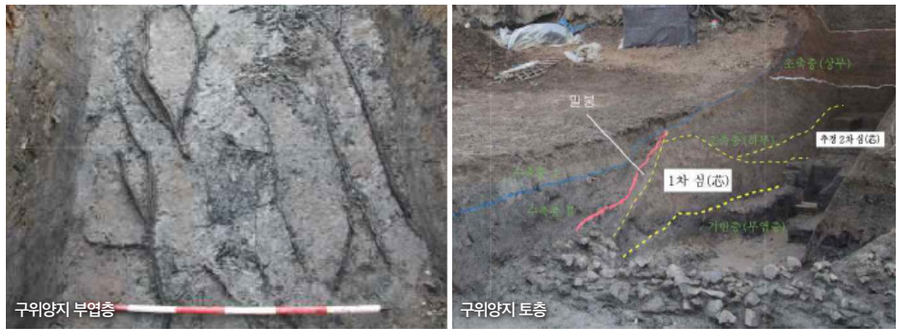


그림 5. 밀양 구위양지 제방축조공법

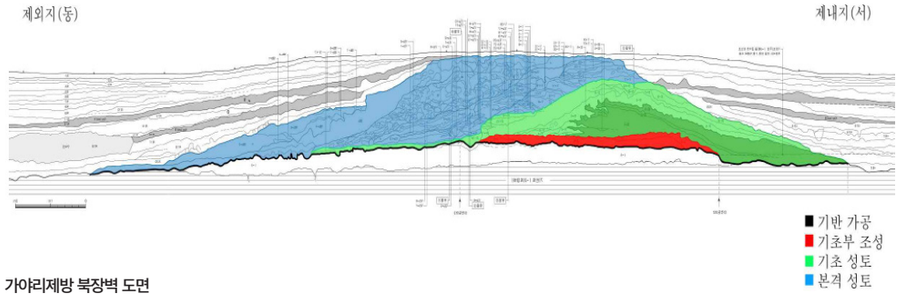
영남지역의 저수지제방은 구릉의 거리가 매우 가까운 협착부 등에 제방을 쌓아 흐르는 계곡물과 빗물을 저수하였다. 이러한 곳에 저수지가 입지하는 이유는 곡구만 막으면 저구릉의 사면을 타고 흐르는 물이 곡부 바깥쪽으로 흐르지 못하게 되므로 곡부 내부는 자연스럽게 저수지가 되고, 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 물의 성질을 이용하여 곡 아래쪽의 너른 경작지에 필요 시 물을 관개하기가 용이하기 때문이다.

또한 제방의 한쪽 편에는 암반을 굴착하여 여수로를 조성하여 유량이 많을 때는 여수로를 통해 여수를 흘러보냈으며, 저수지 내에 용수를 저장하였다가 필요 시에 방수로를 통해 아래쪽의 넓은 경작지로 관개하였다. 저수지에 의해 물을 공급받는 경작지는 곡저평야의 경사면을 따라 단차가 있는 계단식 논으로, 자연적인 구배를 통해 물을 논으로 공급하거나 구획된 수로를 막아 필요한 경작지에 물을 선택적으로 공급하는 관개체계를 갖추고 있었다.

2. 5 함안 가야리제방

가야 왕궁지로 추정되어 2008년 발굴조사가 진행되었으나, 조사 결과 남쪽의 산지에서 북쪽~서북쪽으로 뻗어내린 침식성 저구릉 사이 곡저평야 입구의 구릉과 구릉 사이를 연결하여 남강의 홍수로 인한 경작지의 수몰을 막기 위하여 조성된 하천제방으로 확인되었다.

2008년의 조사에서는 제방이 일직선으로 연결되는 것이 아니고 곡 중앙부의 제방 부분이 제외 쪽으로 돌출한 아치형으로 확인되었다. 이후 2010년의 2차 조사에서는 제방이 일자형이지만 제내 쪽으로 돌출한 아치형으로 확인되었다. 평야 입구에 조성



가야리제방 북장벽 도면

그림 6. 함안 가야리제방 축조 공법

된 1차와 2차의 제방을 연결하면 전체가 평면 완만한 S자 형태로, 홍수로 유입된 물이 자연적으로 만곡하여 흐르도록 하여 홍수 범람 시 가해지는 수압(횡압력)에 대응하도록 한 것으로 생각된다.

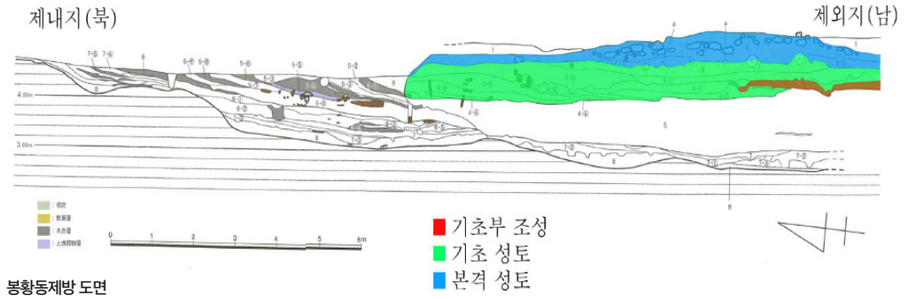
제방의 규모는 1차 제방의 길이가 285m, 기저부를 기준으로 한 폭은 평균 16.19m이며, 둑마루는 약 5m 정도이다. 잔존하는 제방고는 최고 2.6m이지만 홍수위를 감안하면 2.86~5.63m로 짐작된다. 2차 제방은 길이가 279m, 기저부를 기준으로 한 폭은 평균 14m이며, 둑마루의 폭은 6.1m 정도이다.

잔존하는 제방고는 1차와 유사할 것으로 생각된다. 1차와 2차 제방을 연결하면 전체길이는 555m이다. 제방의 축조공정은 기반토 층따기, 불투수성 재료를 사용한 지하수 차단 및 부동침하 방지, 심 또는 코어 형성, 제외지 덧대기 성토, 피복공정 등으로 구분할 수 있으며 축조공법상 횡압력의 대응, 누수차단, 부엽공법, 토낭 등의 다양한 토목기술이 확인된 제방이다.

2. 6 김해 봉황동제방

5세기 무렵 금관가야가 물을 다스리기 위해 쌓은 대규모 제방시설로 해발고도 4m 내외의 구릉밑단을 따라 형성된 관개제방이다. 김제 벽골제와 마찬가지로 바다를 접하고 있어, 해수의 침입을 방지하기 위한 방조제방일 가능성이 높다.

기초성토 단계에서 제방 하단부는 나뭇가지로 만든 목조구조물 시설 후 점성이 강한 흙과 패분을 섞어 채워 조성하였는데, 패분 내 탄산칼슘은 물과 반응하면 석회처럼 굳어 강도를 높이는 효과를 얻을 수 있다. 제방 상단부는 통나무로 만든 목조구조물



봉황동제방 도면

그림 7. 함안 가야리 제방축조공법

로 시설 후 석재를 주재료로 삼되, 사실실트를 채워 조성하였다. 아래쪽에는 중소형의 석재를 경사지고 불규칙하게 조성하였다.

봉황동제방의 특징은 토축 위에 석축이 나타나고, 목조구조물이 사용되었다는 점이다. 석축은 삼국시대 제방의 주요 성토기법이 아니기 때문에, 고려시대에 축조된 양산 물금 황산언에서 석축기법이 확인되면서 석축부는 후대에 조성되었을 가능성 또한 배제할 수 없다.

2. 7 울산 약사동제방

2. 7. 1 약사동제방의 수리시설 유형

울산 약사동 제방은 2009년 발굴조사를 통해서 확인된 저수지 제방으로 축조연대는 출토유물과 부엽층의 AMS연대측정결과를 바탕으로 7세기로 추정한다. 계곡의 가장 좁은 곳의 양쪽 구릉을 연결하여 일자형의 제방을 만들고, 측면에 암반을 굴착하여 여수로를 조성한 형태이다.

제방의 길이는 155m, 둑마루의 잔존폭은 8~12m, 제방부지의 잔존폭은 25~37m, 잔존높이는 8m이며, 파괴된 중앙부의 바닥면을 기준으로 볼 때 제체의 가장 높은 곳까지의 높이는 11~12m 정도이다.

제방의 저수면적은, 측면의 여수로를 기준으로 본 만수위는 21.5m이고 저수면적은 약 23.639m²로 추정할 수 있으며, 저수위를 21m로 보았을 때 대략적인 저수량은 약 95,153m³로 계산된다. 근대지형도에서 저수지는 확인되지 않으나, 현 제방이 확인되는 위치 아래쪽으로 좁은 범위의 경작지가 확인된다. 또한 지반의 가공, 점성이 많은 실트를 이용한 지반성토, 저수지 측으로의 패각성토, 요철모양의

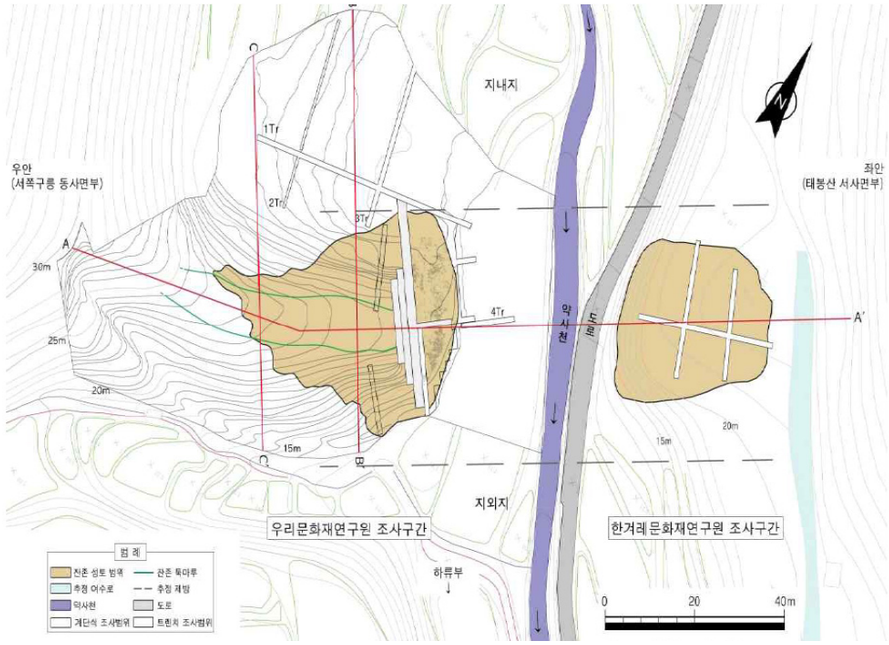


그림 8. 울산 약사동제방의 평면도

토심부, 부엽공법 등 고대의 제방축조공정 및 다양한 토목기법의 확인되었다. 이를 통해 고대의 토목기술이 현대의 기술과도 크게 차이가 없음을 확인할 수 있는 대표유적이다. 그러나 제방과 추정 저수범위 및 저수량 등이 영천 청제나 상주 공검지 등과 비교하여볼 때 전체적으로 규모가 작은 편에 속하며, 관개대상인 경작지의 범위가 협소한 편이다.

약사동제방은 둑을 쌓아 가둔 물로 관개하는 축제저수관개유형(산곡형저수지)으로 보가 하천의 유속과 유량을 조절하여 물을 나누는데 주된 기능이 있는데, 이는 '대규모의 제방(댐)을 축조하여 용수를 저장한 다음 이를 주변충적지 전체의 관개에 이용하는 것'을 말한다. 산곡형저수지와 같이 계곡을 흐르는 하천이 평원지역으로 넓어지려는 지점에 축조한 제방[堤]을 이용하여 대규모로 용수를 저장한 다음 하류의 충적지 전체를 경작지로 바꾸고 관개하는 것이 이 유형의 가장 대표적인 형태라 할 수 있다. 이는 제방 규모나 축조기술·저수량·수로를 이용한 관개방식 등에서 청동기시대 저수시설과는 비교되기 어려우며, 우리나라에서는 주로 산지가 많은 동쪽지역에 축조되어 있다. 산간계곡에 축조된 제언은 저수량은 최대가 되면서도 제방을 축조하는 공력과 저수면적은 최소가 될 수 있는 지점을 택하여 건설되는데(성정용, 2015년), 안동 저전리 등과 같이 보를 이용한 청동기시대의 저류지들이 대개 중소하천을 막아 유로를 돌리거나 소규모로 담수한 물을 이용하는 것과는 차원이 다른 형태로 발달한 것이라 할 수 있다. 약사동제방 이외에도 대표적으로 제천 의림지, 경주 영지, 영천 청제 등이 있다.

영남지역에서 확인된 제방 중 단면조사를 통해 축조공정을 확인할 수 있는 유적은 울산 약사동제방과 함안 가야리제방 정도이며, 이외의 유적은 부분

그림 9. 울산 약사동제방의 발굴조사현황

적으로 공정을 유추해볼 수 있다. 울산 약사동제방을 중심으로 제방의 구조와 공정별로 축조기술을 살펴보고자 하며, 공정별로 대입할 수 있는 경우 다른 유적의 사례로 함께 정리해 보고자 한다.

2. 7. 2 제방의 축조기술

제방의 기본구조를 설명하기 전에, 제방에서 사용하는 용어는 제방의 기능을 고려하지 않은 채 하천제방을 기준으로 한 용어를 그대로 차용해왔다. 제방에서 사용하는 용어로 물이 있는 쪽을 제외지(堤外地)로 하천의 범람을 대비해 보호해야 할 주거 및 경작지가 있는 곳을 제내지(堤內地)로 각각 사용해 왔지만 이를 저수지제방에 그대로 대입하기는 어렵다.

이 제외지, 제내지는 각 제방 밖과 제방 안을 뜻하는 것인데 하천제방과 달리 저수지제방에서는 제방의 안쪽은 물이 있는 곳이고, 제방의 바깥쪽은 경작지가 있는 곳이므로 저수지제방과 하천제방의 제내지, 제외지는 서로 반대가 되어 혼란을 주기 때문이다. 그러므로 저수지제방의 경우 물이 있는 쪽을 지내지(池內地)로, 저수지의 관개로 이익을 얻는 곳인 경작지 쪽은 저수지 바깥쪽이므로 지외지(池外地)로 바꾸어 사용하고 있으며, 이에 저수지제방의 단면구조와 명칭은 아래 그림에 구분하였다.

저수지는 저수범위가 최고위가 되면 제방의 앞비탈을 따라 침투한 물이 제체 내에 머물면서 중력에 따라 점차 아래로 떨어져 배수되게 하는데, 이러한 침투수가 흐르는 방향선이 침윤선이다. 침윤선이 제방의 밖으로 향하게 되면 제방은 붕괴되기 때문에 침윤선을 낮추어 제방 내부에 머무르도록 하거나 물을 다른 방향으로 배출하는 것이 저수지제방과 하천제방 등 물에 대응하는 시설에서는 제일 중요한 기능이라 할 수 있다. 따라서 제방 기저부의 너비를 넓게 조성하거나, 붕괴위험이 없는 안전한 양을 저수할 수 있는 높이까지를 계획수위(만수위)로 설정하였다.

2. 7. 3 약사동제방 축조공정

울산 약사동제방은 약사천 양안의 구릉[谷口]을 막아 해발고도 12.8~4.2m에 축조되었다. 주요기능은 관개제방으로 추정되며 하천의 중상류역에 위치하여 하류 쪽의 경작지가 확보되는 점으로 볼 때 저수를 목적으로 조영된 저수지 방으로 판단된다.

제방의 평면형태는 일자형으로 추정되며 길이는 약 155m이다. 종단면 형태는 사다리꼴이고 잔존규모는 둑마루 폭 8~12m, 제방부지 폭 25~37m, 제방의 높이는 4.5~8m(해발 13~22m), 비탈면의 각도

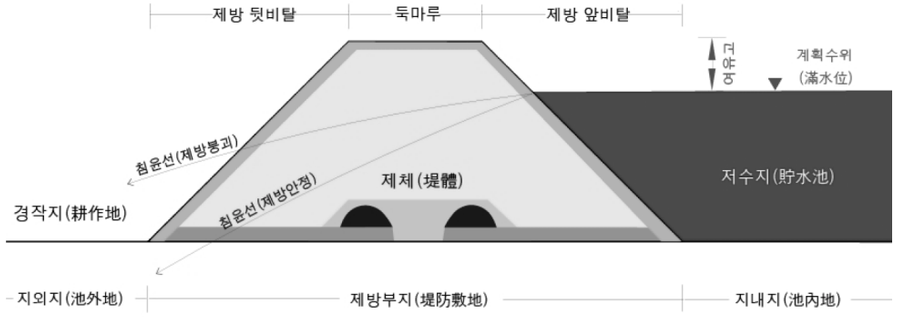


그림 10. 저수지제방의 단면구조와 명칭

는 약 35~40°이다. 제방의 저수면적은 약사천 좌안 한겨레문화재연구원의 조사구간에서 확인된 구가여수로일 가능성을 추정해볼 때 만수위는 21.5m이며 저수면적은 약 23,639m²로 추정되고, 대략적으로 담수위를 21m로 추정하였을 때의 저수량은 약 95,153m³로 추정된다.

제방성토 시 습지 및 하천에서 채취한 암갈색~흑갈색의 실트와 역혼입실트, 산지에서 채취한 이암과 근거리 기반층 중 습지에서 채토한 흙이 주로 사용되었다. 조사자는 피복층을 제외한 축조공정을 부지의 가공-기초부조성-기초성토-본격성토로 나누어 설명하고 있는데, 여기서는 4단계의 축조공정을 기준으로 각각에 사용된 기술을 정리하기로 한다.

1) 기반가공

기반층은 역(礫)혼입실트질사층, 역이 다량 혼입된 사층으로 구성된 산사면 및 하상퇴적물로 구성되었다. 구지표층을 제거하고 기반을 계단식으로 삭토하여 기반의 역(礫)을 노출시켜 마찰력을 높이고 미끄러짐 현상을 방지하였다. 가야리제방에서는 암반돌출면이 기초부조성과 기초성토의 범위, 심이 성토될 범위의 획정과 관련되는데 반해, 울산 약사동제방에서는 암반돌출면의 위치와 범위를 확실히 알 수 없었다. 다만 돌출부가 일종의 토제 역할을 하여 하중분산의 기능을 수행하였을 가능성이 있다.

2) 기초부조성

암갈색~흑갈색 점질실트와 역혼입실트를 제방부지 전반에 걸쳐 수평토하였다. 이러한 점성이 강한 실

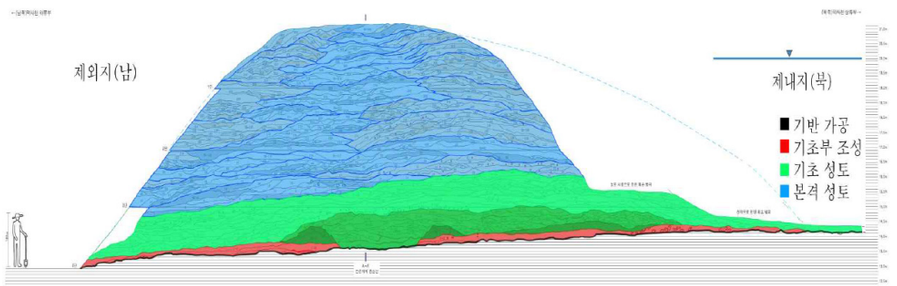


그림 11. 울산 약사동제방의 횡단면도

그림 12. 울산 약사동제방 기초부조성층과 기초성토층 내 패각층

트는 지반누수를 방지하고 상부성토층과의 접착력을 높인다. 또한 점질실트와 역혼입실트를 함께 사용하는 것은 층간의 접착력을 높이는 효과도 얻을 수 있다.

3) 기초성토

제체의 심을 만든 뒤 수평면을 조성하는 순서로 성토가 이루어졌는데, 패각성토, 요철상심 조성, 부엽공법, 교호성토기법이 사용되었다. 제내지 쪽에 패각류를 넓게 시설하였는데, 이는 공극이 많은 투수층을 형성함으로써 제체에 침투한 물의 배수를 원활하게 하기 위함이다. 이러한 배수과정에서 패각의 석회성분이 물과 반응하여 녹으면서 제체의 강도를 향상시켰던 것으로 보인다. 그리고 기초부조성 단계에서 확인되는 실트층 중앙의 일부를 재굴착하여 양옆에 호상(弧狀)의 토제를 조성하였다. 패각층을 포함하여 토제는 총 3개소에서 확인되었는데, 이는 상부성토층과의 접착력을 높여 층을 일체화하고 침투수를 심 사이로 모아 배출하는 기능을 수행했던 것으로 추정된다. 그리고 토제 사이와 그 위를 실트와 역혼입사토를 사용해 교호성토함으로써 또 하나의 심을 조성하고 있는데, 이 과정에서 부분적으로 초본류를 활용한 부엽공법이 확인되었다.

다음으로 앞 단계에서 조성된 심을 중심으로 하여 그것을 피복하는 방식으로 이후의 성토가 이루어졌는데, 이는 수평면을 형성하기 위함이다. 이 단계에서는 실트와 역혼입사질실트의 교호성토와 목본류를 활용한 부엽층이 확인된다. 이러한 부엽공법은 층간의 접착력을 높여 점성이 강한 실트의 유동성을 제어하고, 인장력을 높여 제체를 견고하게 만들기 위해서 사용되었다. 한편 기초부조성 단계와 기초성토 단계의 심조성공정에서는 초본류, 기초성토 단계의 수평면 형성과 본격성토공정에서는 목본류가 주로 사용되는 경향이 관찰된다. 그리고 부분적으로 점토블록의 사용도 확인되었다.

4) 본격성토

심 위에 역과 실트를 번갈아가며 쌓는 것을 기본으로, 일정단위의 층 역시 역층-실트층의 세트단위로 정점을 약간씩 달리하면서 성토하였다. 제외지 쪽에는 산지의 생토암반을 굴착한 투수성의 역을 주로 이용하였고, 제내지 쪽에는 역혼입의 실트를 덧붙이는 식의으로 일정범위의 벽을 성토하는 과정을 반복하였다. 성토에 사용된 흙이 대부분 주변의 구릉부 및 곡부에서 확인되는 토성과 유사한 것으로 볼 때 주변부의 흙을 굴착하여 이용한 것으로 확인되었다.

약사동제방에서는 패각의 이용, 요철상심의 조성, 부엽 등 토목기술이 확인되는데 패각층은 실트층의

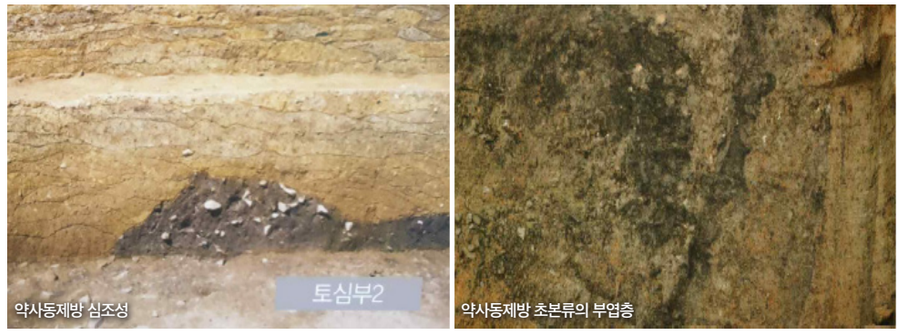


그림 13. 약사동제방의 심과 부엽층

상부에서도 담수와 관련된 제외지 쪽에서만 확인되었다. 실트층의 상부에는 역혼입실트를 단면상 요철형태로 성토하였으며, 상부에 다시 실트를 채우면서 작은 요철상의 심을 덮어 크게 보아 하나의 심의 형태를 이룬다. 심의 제작은 고대의 토성에서도 확인되고 있지만 이러한 형태는 약사동제방에서만 확인되었다. 또한 부엽공법은 점성이 많은 실트층의 심을 이루는 부분뿐만 아니라 본격적으로 성토한 공정에서도 확인되고 있다. 물론 실트가 없는 것은 아니지만 주로 역층에서 사용된 점이 주목된다.

조성방법도 기반부의 점질실트층 성토 시에는 초본류를 주로 사용하였고 제체의 성토부 내에는 생가지를 그대로 이용하여 횡방향과 종방향으로 쌓았다. 이는 나뭇가지가 가지고 있는 수분을 수분이 적은 역층에 배출하게 되어 층의 유동성을 잡아주는 기능을 하였을 것으로 판단되며, 더불어 과한 수분의 배출 길을 만들어주는 기능도 하였을 것으로 추정된다.

제방의 축조시점은 성토층 내부에서 확인된 유물이 5~6세기대의 경질토기편이 주를 이루는 것으로 볼 때 유물의 하한 이후인 6C로 추정되며, 성토층 내 나뭇가지의 AMS분석 결과 580~680년으로 측정되어 늦어도 7세기 말에는 축조되었을 것으로 판단된다.

약사동 제방의 축조공정은 ① 기반의 가공, ② 지반의 보강, ③ 기초부조성, ④ 제체조성, ⑤ 여·방수시설 조성, ⑥ 피복 및 호안 등 크게 6개의 공정으로 구분할 수 있으며, 각 공정별 축조방법과 공정별로 반영된 수리토목기술에 대한 내용은 아래에 간단히 정리하였다.

그림 14. 약사동제방의 부엽층 및 교호성토

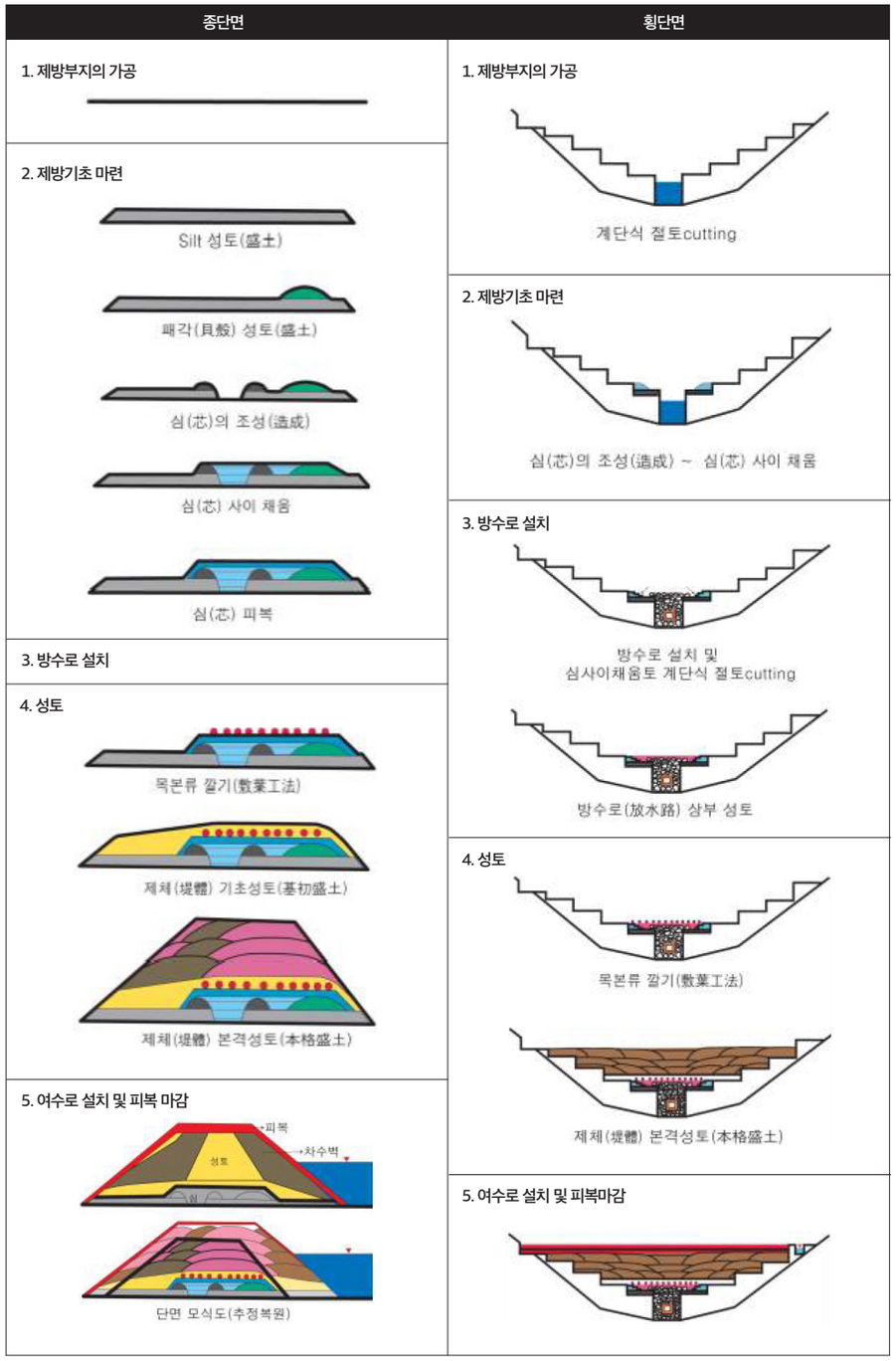


그림 15. 약사동제방의 축조공정 모식도

① 기반가공공정

제방이 축조될 부지에 대하여 구지표를 제거하거나 구릉의 암반을 계단상으로 잘라내는 공정으로 약사동제방에서는 구릉과 성토된 흙의 경계부에 계단식 절토선이 뚜렷하게 확인된다. 암반을 계단상으로 절토하게 되면 암반과 성토체 간의 접촉면적이 넓어지게 되고 암반과 접하는 부분의 마찰력도 높아져 흙이 흘러내리지 않게 되므로 제방이 안전하게 유지되도록 하는 것이다.

② 지반보강공정

제방부지에 물이 스며들기 힘든 성질의 점토 또는 실트를 기초지반 전체에 성토하는 공정이다. 불투수성의 성토재료를 사용함으로써 저수지 물이 제방의 기초가 되는 지반에 스며드는 것을 최소화하여 성토재료 간의 결합이 약해져 무너지는 것을 방지할 수 있었다.

③ 기초부조성공정

저수지 쪽으로 가까운 곳에 패각을 깐 뒤 앞서 성토한 흙을 일정간격으로 다시 파내어 쌓아 토심을 만드는 공정으로 기본적인 뼈대를 조성하는 공정이다. 그리고 이 사이에는 갈대와 같은 초본류를 깔고 흙을 쌓는 과정을 반복하였으며 점성이 있는 흙을 피복하였다. 패각은 위치와 형태로 보아 토심의 기능을 하였을 것으로 보인다. 굴패각은 표면이 거칠어 이를 성토하게 되면 서로 결합하여 마찰력이 높아지며, 패각에서 녹아나온 산화칼슘은 패각과 흙을 경화시켜 제방의 유동성을 줄이는 효과를 가져왔을 것이다. 또한 반원형의 작은 둑을 일정간격으로 조성하여 요철면을 조성함으로써 상부에 쌓일 흙과의 결합력을 높이고 제방의 유동성을 줄여 기초를 견고하게 하였다. 한편 토심의 축조에 있어서는 성토한 흙을 다시 굴착하여 양 옆으로 쌓음으로써 토심의 높이를 높이지 않아도 요철이 깊어지는 효과가 있을 것으로 생각된다.

④ 제체조성공정

제방의 높이를 높이기 위한 제체성토공정으로 제방의 기본적인 형태를 다지는 기초성토단계와 제방의 높이를 높이는 본격성토단계로 나뉜다. 먼저 토심피복층 상부에 소나무 등의 생가지를 펼쳐놓은 뒤 그 위에 구릉을 파내어 가져온 흙을 덮고 다시 그 상부에 생가지의 방향을 교차하도록 놓아 암반편이 적게 혼입된 실트를 성토하였다. 이처럼 나뭇가지나 잎을 펼쳐 까는 것을 부엽공법이라고 하는데, 성토재료 간의 유동성을 낮추고 접착력을 높이는 기능을 하는 고대 동아시아의 대표적인 토목기술이라 할 수 있다. 그 위에 다시 암반편이 다량 포함된 실트를 제방부지의 폭만큼 넓게 성토하여 제방의 형태를 만드는 동시에 성토부의 기초를 다져 제체의 하중을 견딜 수 있게 하였다. 이렇게 조성된 제체 기초성토부 위에 규모가 작은 반구상의 성토단위를 지내지에서 지외지 쪽으로 덧붙여 성토하는데, 지내지 쪽에는 암반편이 적게 포함된 실트를 성토하고 지외지 쪽으로는 암반편이 많이 포함된 흙을 덧붙이는 식으로 다른 성질의 흙을 성토하는 과정을 반복하였다. 이 성토단위는 서로 겹쳐지면서 호상을 이룬다. 이처럼 서로 다른 성질의 흙을 호상으로 쌓는 이질토호상성토는 다른 성질의 성토단위와 맞물리면서 제체를 견고히 하는 동시에 높이를 높일 수 있는 성토공정으로 고분과 토성 등에서도 확인되고 있다.

⑤ 여·방수시설공정

기초공정 또는 성토공정 과정 중에 제체의 일부를 절개하여 방수시설을 설치하거나 구릉 측면에 여수로를 측조하는 공정이다. 단 약사동제방에서는 방수시설이 있을 위치에 제방이 파괴되어 확인할 수 없었다. 그리고 여수로에는 약사천 좌안 쪽인 동쪽 구릉의 사면에서 구거가 확인되는데, 성토부와 가까운 구릉 기반암을 굴착한 점과 그 위치 및 형태로 보아 여수로의 가능성이 높아 보인다.

⑥ 피복 및 호안공정

약사동제방은 둑마루와 제방 사면의 삭평이 심하여 피복 및 호안시설은 유실되어 확인되지 않았다. 다만 저수지의 파랑에 의하여 제방 사면이 깎여 나가거나 만수위를 넘은 물이 여수로로 배수될 때 유속에 의하여 침식되는 것을 막기 위한 호안시설이 있었을 것으로 추정할 뿐이다.

이처럼 울산 약사동제방의 축조공정과 토목기술에서 주목받는 부분은 성토재료 간의 접착력을 향상시키는 동시에 제방의 유동성을 저하시키며 지반 및 제체 내에 침투수를 줄여 제방을 견고하게 한 것이다. 그리고 이러한 축조공정과 토목기술은 하천제방과 비교하여도 큰 차이가 없다. 즉 제방의 축조에 있어 반영된 다양한 토목공법과 기술은 저수지와 하천에 대한 수압과 침식에 대응하기 위한 것이며, 이는 현대의 제방에서도 재료와 관개시스템의 자동화 등에서 차이가 있을 뿐 기본적인 공법과 기술에 있어서는 차이가 없을 것이다.

3. 결언

지금까지 우리나라 고대 수리시설의 특징과 축조기술에 대하여 살펴보았다. 고대 수리시설은 다양한 정치·사회적 맥락에서 당대의 과학기술을 적용한 결과물로서 축조기술은 단순히 하나의 기술로만 이해할 것이 아니라, 그 사회 속에 내재된 지식의 결정체라 생각된다. 다양한 요소들의 상호작용과 의사결정의 일면으로 이해할 수 있었다. 각각의 수리시설마다 조금씩 축조기술이 다르긴 하였으나, 큰 맥락에서 기술의 보편성이 적용되어 건설되어진 것으로 보인다.

신라 혹은 통일신라기에 속하는 제방으로 그 특성상 끊임없는 보수가 필요하고, 붕괴되어 방치된 채 오랜 시간이 지나 다시 축조하는 경우도 있었다. 따라서 통일신라 이후 전 지역에 걸쳐 대대적인 제방정비와 보수가 이루어짐에 따라 거의 모든 제방에서 신라의 흔적이 관찰되는 것일 수도 있다. 하지만 신라가 삼국시대 다른 나라보다 제방축조에 많은 공력을 들였을 가능성도 배제할 수는 없다. 한편 제방의 축조시기, 축조주체, 기능에 따른 뚜렷한 특징은 확인되지 않는 것처럼 보인다. 대부분의 제방이 큰 틀에서 유사한 축조공정과 한정된 축조기술을 가지고, 축조환경에 맞춰 건설되었는데, 특히 부엽공법은 대부분의 제방에서 공통적으로 확인된다. 토성이나 고분과는 달리 제방의 성토재는 흙으로 한정되는 경우가 많고, 물을 저수하거나 막는다는 기능적 특성이 더욱 강하게 반영되기 때문에 토성 및 고분의 축조기술과는 다른 점이 존재할 수밖에 없었을 것이다.

토목기술자로서 고대 수리시설을 살펴보면서 수리시설은 인류문명이 활발해지기 시작하면서 같이 발전해 왔으며 문명발전과 떼려야 뗄 수 없는 관계라는 것을 알 수 있었다. 지금도 인류는 물 없이 살 수 없으며 물로 인한 분쟁이 지속적으로 발생하고 있다. 현재에 살고 있는 우리도 옛 선인들이 수리시설을 만들어 물을 이용한 것처럼 지혜롭고 슬기롭게 살기를 희망해본다.

끝으로, 우리의 자랑스러운 역사 속의 댐과 제방의 건설 및 운영기술에 대하여 국제대댐회(ICOLD)에 발표하여 국제사회에 알리는 것도 글로벌시대에 매우 의미 있는 일이라 생각하며, 이에 대한 한국대댐회의 적극적인 참여를 기대해본다.

참고문헌

1. 우리나라의 수리시설과 울산 약사동 제방, 이보경, 2017
2. 고대 제방의 축조 기술 연구, 조미래, 2021
3. 울산 약사동 제방 유적 전시관, 약사동 제방 유적 전시관, 2017

댐의 사회경제적 편익에 관한 고찰

류문현

K-water 물정책연구소 경제연구팀장

1. 사회경제적 측면에서의 댐의 필요성

인류의 문명이 시작되고 발달하면서 증가하는 물 수요에 대응한 물공급 방안으로 사람들은 댐을 만들기 시작하였다. 농경시대에는 댐을 통해 농사에 필요한 관개용수를 확보하였으며 세계적으로 공업화와 도시화가 진행된 산업혁명 이후 시대에는 댐을 통해 공장에 필요한 공업용수와 생활용수를 확보하였다. 뿐만 아니라 댐은 하천을 중심으로 이루어진 문명사회에서 하천의 유량을 조절하여 홍수와 같은 자연재해로부터 안정적인 생활여건을 제공하였다. 이처럼 댐은 시대에 따라 용도는 달랐으나 경제발전과 인간의 삶의 질 향상에 기여하여 왔다.

대부분의 세계문명이 그렇듯이 우리나라의 역사 또한 하천을 따라 발전해왔다. 과거 농경사회에서는 저수지를 통해 물을 확보하여 가뭄에 대비하였고 20세기 들어서는 급격한 인구성장과 경제발전을 꾀하고자 특정지역에 대량의 물을 필요로 하였다. 우리나라는 1960년대 이후 급속한 경제발전을 추진해왔고 이 과정에서 원활한 물공급은 필수적인 요소였다. 그러나 우리나라는 연간강수량의 2/3이 6월, 7월, 8월 3개월동안 집중적으로 내려 바다로 유실될 뿐만 아니라 홍수의 발생으로 거의 매년 인명과 재산상의 피해를 겪어왔다. 1971년에 발간된 홍수연보에 따르면 우리나라는 매년 평균적으로 2~3차례의 홍수피해가 발생하였으며 연평균 GDP의 2.35%의 피해를 경험하였다.

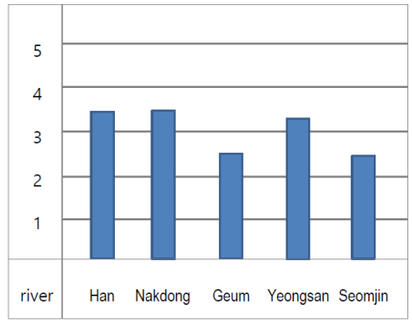
토목기술 등의 발달로 인류는 홍수방어와 수자원공급을 위한 대규모의 댐을 건설하여 왔고 우리나라 역시 1960년대 이후 경제개발계획과 더불어 대규모의 댐들이 건설되어 왔다. 산업발전과 인구의 증가는 절대적인 수자원이용량의 증가를 가져왔고 안전한 정주공간의 구축을 위해서 대규모 다목적댐의 건설이 진행되었다. 이 시기에 다른 국책사업들과 마찬가지로 댐 건설에 있어 가장 중요한 요인은 댐 건설의 필요성에 대한 검토가 아니라 어디에 어느 정도 규모의 댐을 어떻게 건설할 것인지를 결정하는 것이었다. 원활한 수자원의 공급과 홍수방어를 위한 댐의 필요성에 대해서는 어느 누구도 의문을 갖지 않았기 때문이다.

수자원공급과 홍수방어를 통해 대규모의 산업단지 조성 및 주거지역 개발이 진행되었고 이는 곧 우리나라 경제발전의 밑거름이 되었다는 것은 어느 누구도 부인하지 못하는 사실일 것이다. 또한 다목적댐의 건설은 지속적으로 증가하고 있는 전력수요,

특히 여름철 피크시기의 수요에 맞춰 탄력적으로 운영함으로써 안정적인 전력공급에도 큰 역할을 해왔다. 댐 건설의 궁극적인 목적이 바로 수자원의 공급, 홍수의 방어 및 전력의 생산이었고 이것이 바로 댐의 전통적인 역할이라고 할 수 있다.

그러나 1970~1980년대부터 제기된 환경의 중요성과 환경파괴의 위험에 대한 인식은 댐이 갖는 환경적인 문제에 대한 의문을 불러일으켰고 1990년대 우리나라에서도 새로운 사회적인 문제로 대두되었다. 낙동강의 수질사고를 비롯해 하천의 수질오염은 국가 수자원관리에 새로운 목표를 제공하였고 하천생태계 및 수질오염 문제가 전국적으로 제기되었다. 최근에는 소득수준의 향상으로 물을 이용한 수환경과 레크리에이션 수요가 증대하면서 하천과 댐의 기능에 새로운 역할을 요구하고 있고 국가정책은 이 같은 새로운 수요를 반영하여 결정되고 추진되고 있다.

과거 댐 건설의 필요성에 대한 의문의 제기가 불필요했던 시기와는 달리, 수자원에 대한 달라진 여건과 수자원을 이용한 다양한 수요의 창출은 댐이 갖는 전통적인 역할뿐만 아니라 사회경제적으로 새로운 역할에 대한 인식을 요구하고 있다. 본고에서는 댐이 가지고 있는 사회경제적 편익을 고찰하고 향후 새로운 댐 정책의 패러다임에 대해서 제시하고자 한다.



출처: 홍수연보(1916~1971), 건설부

그림 1. 연평균 홍수발생 건수(1916~1971년)

Year	Population (thousand)	Dead (person)	Damages(A) (Million Won)	GDP(B) (Billion Won)	A ÷ B (%)	Per Capita
1958	23,611	161	26,329,156	551.59	4.77	1.115
1959	24,291	781	85,127,830	575.84	14,78	3,505
1960	24,989	81	12,814,356	599.07	2.18	513
1961	25,700	252	17,401,114	613.51	2.55	679
1962	26,432	3 27	1,065,59	634.97	0.17	40
1960	27,104	296	4,712,441	693.03	0.68	173
1964	27,958	395	3,393,460	750.31	0.45	121
1965	28,670	242	10,900,409	605,05	1.35	380
1966	29,200	128	5,770,500	913.32	0.63	198
1967	29,703	26	483,598	995.16	0.05	16
1968	30,469	127	5,430.616	1,127.32	0.48	170
1969	31,139	562	29,540,947	1,240.1	2.38	949
1970	31,793	135	20,394,321	1,422.3	1.43	641
1971	32,429	225	11,004,640	1,561.9	0.70	339
AVG.		271			2.35	632

그림 2. 홍수발생 빈도 및 피해액

2. 댐 기능의 사회경제적 편익

댐은 다양한 기능을 수행하고 지역 및 산업에 수많은 혜택을 제공한다. 댐은 주로 물을 저장하고 홍수를 통제하며 전력을 생산한다. 또한 많은 댐이 물을 저장하여 호수로서 레크리에이션 기능도 가지고 있다. 일반적으로 댐은 저수를 목적으로 건설되는 중요한 구조물이다.

가장 잘 알려진 댐 중 하나인 미국의 후버댐은 지역사회에 관개용수를 공급하고 홍수를 통제하며 수력발전을 위해 건설되었다. 미국연방정부는 네바다 주와 애리조나 국경을 가로질러 30마일에 걸쳐 있는 후버댐 건설을 승인하였다. 이와 같이 큰 저수구역은 댐이 지역에 미치는 다양한 편익을 보여준다. 댐은 여러 가지 측면에서 사회경제적 편익을 제공한다. 공학적으로 댐은 홍수 시 막대한 양의 물을 저장하는 기능을 수행하며 심지어 레크리에이션 목적으로도 사용된다. 댐의 편익을 평가할 때 고려해야 할 요소에는 깨끗한 물공급을 통한 건강과 삶의 향상, 위생수준의 향상, 식량(작물 및 어류)생산 증가, 관개용수 공급, 홍수로부터 인명과 상품보호, 전력생산이 포함된다.

첫째, 댐은 홍수와 같은 자연재해로부터 인간의 생명과 재산을 보호하는 역할을 수행하여 왔다. 최근 도시화·산업화가 진행되면서 하천 주변의 토지이용이 고도화되고, 인구가 밀집되면서 홍수로부터 보호되어야 할 시설들의 직·간접적인 가치가 증가하였을 뿐만 아니라, 이상기후의 영향으로 집중적인 호우와 가뭄이 빈발하고 있어 댐의 역할을 더욱 증대되고 있다. 그림 3은 1972년의 한강의 모습과 2012년의 한강의 모습을 비교한 항공사진이다. 한강상류에 소양강댐이 있기 전의 서울은 매년 홍수를 경험

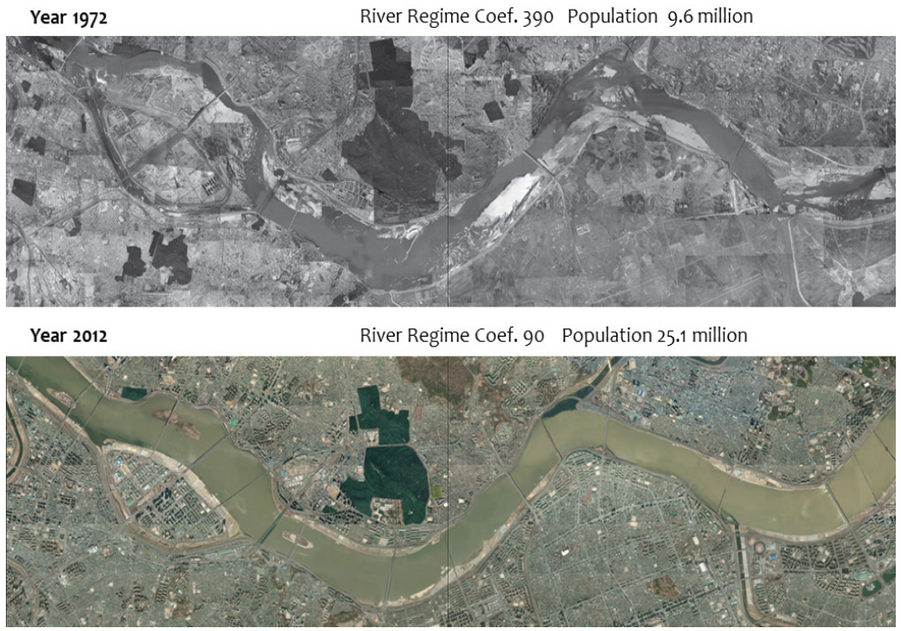
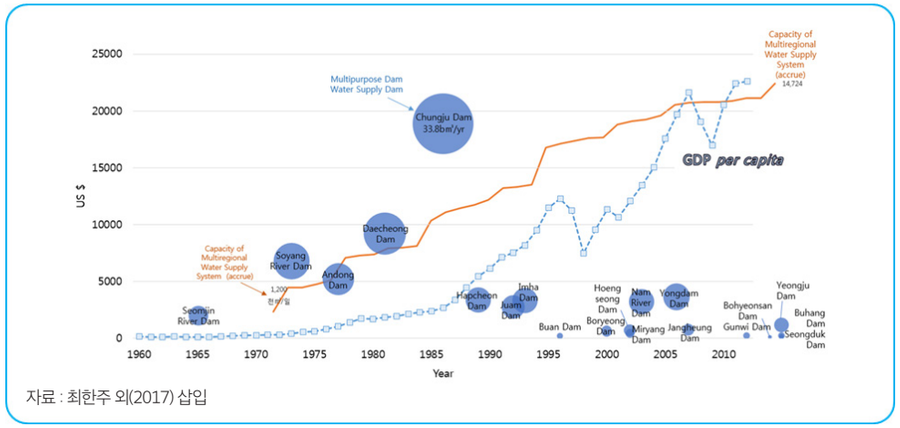


그림 3. 항공사진으로 본 한강의 변화(1972년과 2012년 비교)



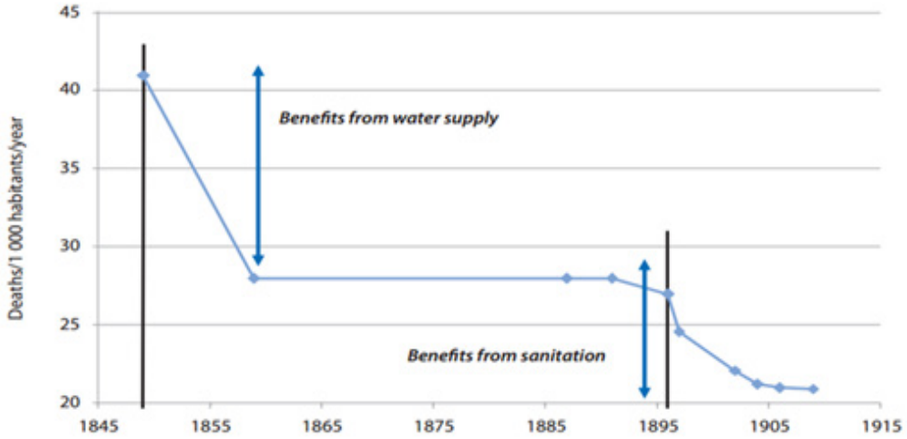
자료 : 최한주 외(2017) 삽입

그림 4. 다목적댐 건설과 경제성장의 관계

하였으며 한강주변은 홍수로 인해 많은 지역이 침수되는 상황이었다. 그러나 한강 상류에 소양강댐과 충주댐이 건설된 이후 한강은 홍수로부터 보호받게 되어 현재는 한강이 보이는 하천주변이 사람들이 가장 선호하는 지역이 되었다.

둘째, 댐은 안정적인 용수공급을 통해서 경제발전에 기여하여 왔다. 그림 4는 우리나라의 다목적댐 건설과 경제성장과의 관계를 나타낸 것이다. 댐의 가장 큰 역할은 물을 저장하여 안정적으로 용수를 공급할 수 있다는 것이다. 댐의 가장 큰 기능은 물을 저장하는 물그릇으로서의 기능이다. 이를 통해 자연하천이 물 수요를 충족시키기에 불충분할 때 저장하였던 유량을 방류하여 사회에 기여한다. 우리나라는 댐에 저수된 물을 활용하여 도시에 필요한 생활용수와 산업에 필요한 공업용수 그리고 농산물 생산에 필요한 농업용수를 제공하여 왔다. 댐은 증발산을 통해 작물과 식물을 돕고, 다량의 물이 저장되어 있어 관개용으로 쉽게 사용할 수 있다. 이를 통해 지역사회가 농사를 계획하고 작물을 육성하는 데 도움이 되어 식량공급역량을 더욱 향상시킬 뿐만 아니라 공업용수공급을 통해 경제성장을 도모하는 역할도 수행한다. 최한주 외(2017년)에 따르면 댐을 통해 확보된 수자원스톡 1%의 영향이 경제개발 초기단계(1977~1997년)에 GDP 0.577% 증가에 영향을 준 반면, 성장단계(1998~2014년)에는 수자원스톡 1%의 증가가 우리나라 GDP 0.214%의 증가에 기여하였음이 실증적으로 제시되었다.

셋째, 댐을 통해 확보된 용수는 양적인 측면뿐만 아니라 질적인 측면에서도 국민의 삶의 질 향상에 기여하였다. 대부분 하천 상류지역에 위치한 댐들은 수질오염원으로부터 안전하게 보호받고 있어 깨끗한 물을 공급할 수 있는 조건을 가지고 있다. 사람들이 마실 수 있는 깨끗한 물 공급은 콜레라와 같은 수인성 질병을 예방하는 데 도움을 주어 노동생산성을 높이고 인간의 예상수명을 연장하여 삶의 질 향상에 기여하였다. OECD(2012년)에 따르면 깨끗한 용수공급은 사망률을 약 50% 정도 낮추는 것으로 조사되었다. 우리나라 또한 댐에서 공급된 깨끗한 용수를 통해 콜레라와 같은 수인성 질병으로부터 벗어나게 됨으로써 예상수명이 증가하였을 뿐만 아니라 국민의 삶의 질을 향상하는 데 기여하였다.



출처: OECD(2012), Meeting the Water Reform Challenge

그림 5. 물과 위생투자와 사망률과의 관계(프랑스 마르세유)

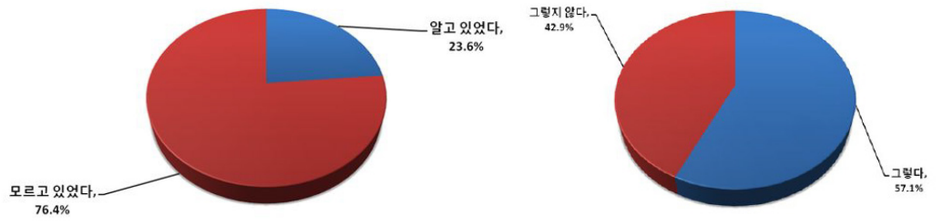
표 1. 유럽연합(EU)의 Extern-E 프로젝트 결과(발전원별 환경비용)

External Costs (Unit: KRW/kWh)	Health Damages	Biodiversity Loss	Crop Damages	Material Damages	Climate Change	Radionuclides	Total	Comparison with Dam
nuclear power plant	2.095	0.122	0.024	0.038	0.578	0.032	2.889	2.8
heavy oil condensing power plant	24.128	1.647	0.272	0.384	5.912	0.002	32.346	31.4
light oil gas turbine	18.814	1.357	0.284	0.437	12.376	0.003	33.270	32.3
hard coal condensing power plant	16.940	1.692	0.281	0.185	23.209	0.002	42.310	41.1
hard coal IGCC	11.272	1.068	0.197	0.149	23.701	0.002	36.389	35.3
lignite condensing power plant	12.510	1.198	0.160	0.081	26.121	0.001	40.071	38.9
lignite IGCC	5.180	0.430	0.058	0.034	26.409	0.001	32.112	31.2
natural gas combined cycle	5.723	0.701	0.167	0.100	12.110	0.000	18.800	18.3
natural gas, gas turbine	8.554	1.063	0.248	0.150	18.114	0.000	28.130	27.3
hydropower, run of river 10MW	0.620	0.022	0.009	0.006	0.172	0.000	0.830	0.8
hydropower, run of river <100MW	0.443	0.016	0.007	0.005	0.123	0.000	0.593	0.6
hydropower, run of river >100MW	0.399	0.014	0.006	0.004	0.110	0.000	0.534	0.5
hydropower, dam (reservoir)	0.772	0.031	0.011	0.007	0.209	0.000	1.030	1.0
hydropower, pump storage	0.669	0.025	0.007	0.004	0.141	0.000	0.847	0.8
wind, on-shore	1.018	0.051	0.011	0.015	0.287	0.001	1.383	1.3
wind, off-shore	0.969	0.042	0.008	0.013	0.232	0.001	1.265	1.2
solar PV, roof	8.664	0.449	0.083	0.145	2.455	0.005	11.802	11.5
solar PV, open space	8.875	0.452	0.090	0.126	2.436	0.004	11.983	11.6
solar thermal, parabolic trough	1.238	0.074	0.018	0.016	0.276	0.000	1.622	1.6
biomass (straw) CHP with an extraction condensing turbine	20.989	3.965	0.135	0.160	1.973	0.004	27.226	26.4
MCFC (natural gas)	19.549	1.312	0.317	0.423	5.321	0.002	26.924	26.2
SOFC (natural gas)	7.545	0.606	0.193	0.158	4.134	0.001	12.636	12.3
MCFC (biogas)	32.645	1.915	0.321	0.728	9.279	0.037	44.925	43.6

* These figures from the unit benefit transfer from ExternE CASES project by adjusting income level gaps.
Sources: www.feerm-project.net/cases

넷째, 댐은 친환경에너지인 수력발전을 통해 경제발전에 기여하여 왔다. 댐의 필수요소 중 하나는 수력을 통한 전력을 얻을 수 있다는 점이다. 수력발전에는 유연성, 경제성, 재생가능자원이라는 이점이 있다. 댐의 가장 큰 장점 중 하나는 친환경적 특성이다. 댐은 일단 건설되면 일정한 전력을 생산할 수 있다. 이 전기를 생산하는 데 추가적인 연료는 필요하지 않다. 수력발전에 사용되는 댐은 화력발전소보다 경제적 수명이 더 오래 지속되며 양수발전을 통해 하류에서 다시 상류로 전달하여 반복적으로 사용될 수 있다는 점에서 재생가능하다. 댐은 재생가능한자원을 사용하기 때문에 이산화탄소와 같은 온실가스 배출을 줄이는 데 도움이 된다. 수력발전은 에너지를 저장하거나 전용할 수 있으며 가장 친환경적인 전력생산수단 중 하나이다.

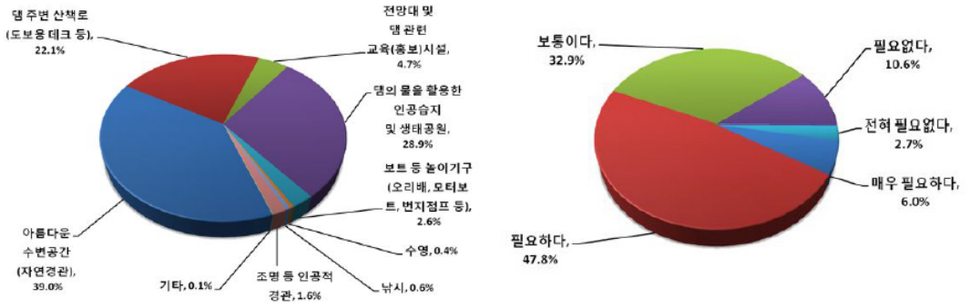
최근 기후변화로 인해 탄소중립경제가 대두되면서 친환경에너지로서 수력발전의 중요성은 더욱 증대



댐의 레크리에이션기능 인지 여부 댐의 여가 및 취미활동 도움 여부

출처 : 한국수자원공사(2014)

그림 6. 댐의 레크리에이션기능 인지 및 도움에 대한 대국민 인식



댐의 중요한 레크리에이션 시설물 댐 건설 시 레크리에이션기능 포함 여부

그림 7. 댐의 중요한 레크리에이션 시설물 및 레크리에이션기능 포함 여부

되고 있다. 모든 발전원별 환경비용을 조사한 유럽연합(EU)의 Extern-E 프로젝트 결과에 따르면 수력발전은 원자력이나 다른 석탄화력발전원에 비해 친환경적이라고 조사되었다. 최근 스위스는 댐의 다른 표현으로 'Water battery'라는 용어를 사용함으로써 댐의 친환경적 에너지 저장기능을 강조하고 있다.

다섯째, 댐은 환경용수와 레크리에이션 기능을 제공함으로써 삶의 질 향상에 기여한다. 경제가 발전하면서 친수공간에 대한 사람들의 수요가 증가함에 따라 환경용수와 같은 새로운 용도의 용수수요가 증가하고 있다. 환경용수는 자연환경형성, 사회생활환경형성, 유량확보, 수질정화, 하천생태계보전, 기후완화, 자연경관형성, 친수공간형성, 관광 및 레크리에이션 기능, 복지기능, 교육기능, 지역기능, 역사·문화·풍토기능 등의 다양한 기능 발휘를 목적으로 하천유지용수를 초과하여 해당하천에 흐르는 물 또는 해당하천 밖에 흐르는 물을 뜻한다.

대표적으로 청계천 복원과 같은 도심하천이 환경개선을 위해 필요한 용수라고 할 수 있다. 건천하천의 복원을 통한 수생태계복원 등 환경적인 측면에서 환경용수의 필요성이 증가하고 있다. 댐은 환경용수를 공급함으로써 수질개선 및 도심에 친수공간을 확보하는 역할을 수행한다. 또한 레크리에이션을 제공함으로써 국민의 여가향상에 기여한다. K-water(2014년)의 연구에 따르면 댐의 레크리에이션 편

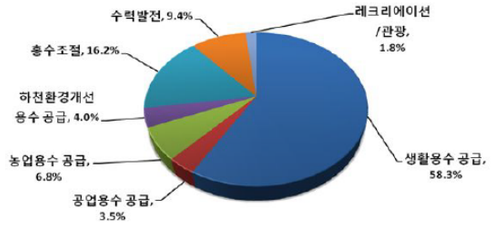


그림 8. 댐의 편익 중 중요성 우선순위

익에 대한 수요 또한 높은 실정이다. 우리나라 국민 중 76.4%가 댐의 레크리에이션기능에 대해서 인지하고 있으며 댐이 여가 및 취미활동에 도움을 준다는 의견이 57.1%에 달하고 있다.

표 2. 수자원사업의 유형별 편익항목

구분	댐	상수도 개발	지하수 개발	농업용수 공급사업	운하	방수로	하천복원/회복	하천공원화	하천개수	홍수조절저류지	지하저류시설	소수력 개발
생활용수공급	△	○	○									
공업용수공급	△	○	○									
농업용수공급	△		○	○						△		
홍수피해경감	△				△	○			○	○	○	
전력생산	△											○
환경비용절감	△				○		○					○
원수수개선	△						○					
자연자원개선	△						○			△		
레크리에이션	○				○	△	○	○		△		△
비상용수공급	△		○							△	△	
내륙주운수송	△				○				△			
자산고도화	△				△	○	○	○	○	○	○	
토지조성					○			○		△	△	
교통활성화 / 피해방지	△				△	○			○	○	○	
건설 및 연관산업 파급효과	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
공중보건위생 향상	△	○			△	○			○	○	○	

※ ○는 해당사업추진 시 반드시 발생하는 편익을 의미하며 △는 해당사업의 성격에 따라 발생할 수 있는 편익을 의미한다.

댐의 레크리에이션 관련 시설물 또는 활동 중에서 가장 중요하게 여기는 것에 대한 질문에는 '아름다운 수변공간'이 가장 중요한 시설물이라는 응답이 39.0%였으며, 댐을 건설하고 관리하는 데 있어 레크리에이션기능을 포함하는 것의 필요성 여부에 대해서는 약 53.8%가 필요하다는 의견을 제시하였다. 국민들이 댐이 주는 편익으로 가장 중요하다고 인식하는 것은 생활용수 공급으로 조사되었다.

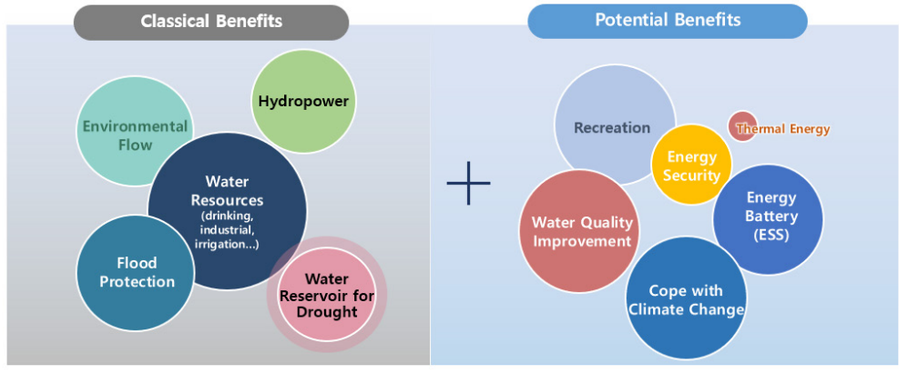
이상의 댐이 가지는 사회경제적 편익에 대해서 KDI에서 발간한 『수자원(댐)부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제4판)』(2008년)에 잘 정리되어 있다. 표 2는 KDI(2008년)에서 제시하고 있는 수자원사업의 유형별 편익항목이다. 댐의 경우 수자원사업이 가지는 모든 편익들을 발생시킬 수 있는 것으로 조사되었다.

3. 결론

지구온난화 등으로 인한 기후변화는 인간의 삶에 심각한 영향을 미칠 것으로 예측됨에 따라 전 세계가 대응책 마련을 위해 협력하고 있다. 기후변화는 특히 집중호우로 인한 홍수 증가, 태풍강도의 증가뿐만 아니라 가뭄 등 심각한 물 관련 자연재해를 유발할 것으로 예상되고 있다.

기후변화는 안정적인 물 확보를 위한 수자원계획 수립에 불확실성을 증대시키고 홍수나 가뭄 등 극심한 자연재해의 대비책 마련에 어려움을 가중시키고 있다. 이러한 기후변화시대에 댐은 물의 변동성을 줄이는 역할을 수행할 수 있다. 집중강우로 인한 홍수를 방어할 수 있으며 가뭄을 대비하여 물을 저장할 수 있다. 댐이 제공하는 이러한 전통적인 편익은 기후변화시대에 더욱 높아질 것으로 예상되며 물관리에 대한 최선의 대응방안이 될 수 있다.

또한 댐의 레크리에이션기능, 에너지저장장치로서의 역할 등 사회경제적으로 제공하는 다양한 잠재적 편익은 우리의 생활의 질을 향상시켜 줄 뿐만 아니라, 수생태계보전에 역할을 수행함으로써 환경적 편익도 증대시킬 수 있다. 과거 환경적 위해요소로서의 댐의 기능을 다시금 생각해 보고 기후변화시대 댐의 사회경제적 편익을 극대화할 수 있는 정책마련이 필요하다.



출처: 『동아시아 대댐회 학술대회 발표집』, 최효연, 2022

참고문헌

1. OECD Studies on Water 'Meeting the Water Reform Challenge', OECD Publishing, 2012
2. 수자원사업의 편익확대 및 개선방안 연구(2차년도), K-water / 한국수자원공사, 2014
3. ExternE project '발전원별 환경비용 추정', 유럽연합, 2005
4. 재정정책논집 Vol 19. no.3, pp.33-55 '우리나라 경제발전과정에서의 수자원 개발 효과 분석', 최한주 / 류문현 / 홍성표, 2017
5. 동아시아 대댐회 학술대회 발표집 '다목적댐의 사회경제적 편익', 최효연, 2022
6. KDI, 수자원부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정보완 연구(제4판), 2008

스마트 댐 안전관리

A study on the establishment smart dam safety management system

윤국희

한국수자원공사 수자원시설처
댐안전관리센터 차장

4차산업혁명은 댐 안전관리분야 산업이 도약할 수 있는 절호의 기회이다. 기존 산업은 노동집약적·현장의존적인 생산체계, 공급자 위주의 산업구조, 참여주체 간 정보의 단절 등으로 전통산업적인 형태를 나타내고 있으나 자동화·맞춤형·정보공유 등의 기술을 접목하여 산업패러다임 전환을 통한 새로운 성장동력의 확보가 가능하다. 댐 안전관리분야는 첨단기술(드론, 로봇, IoT, 빅데이터, AI, Digital twin 등)의 융합으로 기존의 경험의존적 유지관리에서 지식·첨단산업으로 변화하고 있고, 다양한 기술의 융합을 통해 업역 간 단계 간 단절을 해소하고 새로운 가치창출이 가능하다. 댐 안전관리에 필요한 신디지털융합기술은 데이터기반의 플랫폼을 통해 스마트한 분석으로 유의미한 분석결과를 도출하고 그에 따른 노후댐의 보수보강을 통한 선제적인 시설물관리로 안전하게 오랫동안 사용하도록 기여할 수 있다.

1. 서론

물의 사회적 가치는 시간이 지날수록 지속적으로 높아지고 있으며 이에 따라 기존 홍수조절, 용수공급, 발전에 집중되어 있던 댐의 용도 또한 보다 다양한 분야로 확대되어 가고 있다.

동시에 본연의 기능유지 및 안전관리가 그 어느 때보다 중시되고 있는 실정이다. 하지만 소양강댐 등 현재 한국수자원공사에서 위탁관리 중인 환경부의 37개 댐 중 46%는 건설된 지 30년 이상 경과되어 노후도가 심각하며, 전체 저수용량도 농업용댐이나 발전용댐에 비해 월등히 크기 때문에 평상시 체계적인 안전점검 및 관리가 매우 중요하다.

또한 국가적으로도 데이터·5G·AI(인공지능) 등 디지털인프라 구축, 비대면 산업 육성, SOC 디지털화 등 3대 영역에 중점을 둔 '한국판 뉴딜'정책을 발표하며 4차산업 기술도입을 통한 노후 국가기반시설물의 안전관리 및 디지털화를 강조하고 있다.

이에 4차산업혁명 기반의 드론, AI, 빅데이터분석시스템 등 스마트 댐 안전관리체계 구축을 통한 선제적 보수보강, 성능개선으로 댐을 안전하게 오랫동안 사용하기를 기대한다.

2. 댐 안전관리를 위한 4차산업혁명 기술 분석

스마트 댐 안전관리의 핵심기술은 실시간 스마트 모니터링 시스템, 드론 기반의 댐 안전점검, 디지털트윈 플랫폼을 통한 정보의 적시적인 취득·분석·공유로 구성된다. 국내 센서 내수시장은 2016년 51조 5,912억원에서 2021년 54조 9,438억원 규모로 연평균 3.2% 성장 전망이나 국내기업의 내수시장 점유율은 10.5% 수준으로 매우 낮다. 국내 드론시장은 빠른 성장상태에 있으며 정부의 드론사업 육성계획을 기반으로 2016년 704억원 규모에서 2026년 4조 4,000억원 규모로 성장할 것으로 예상된다.

현재 국내 민수용 드론기술의 수준은 초기단계에 머물러 8대 핵심부품기술은 선진국 대비 약 10~50% 격차가 존재하고 있다. 디지털트윈플랫폼은 한국판 뉴딜의 디지털 뉴딜사업에 포함되어 여러 관계부처에서 디지털트윈 도입을 위한 용역이 시행 중이며 2019년 발행된 Market and Markets의 디지털트윈 보고서에 따르면 세계 디지털트윈 시장의 폭발적인 성장이 예상된다. 국가 과학기술 지식정보 서비스(NTIS)의 R&D 과제현황에 따르면, 2017년부터 디지털트윈 관련 과제 지원건수는 매년 증가하는 추세이나 성과는 미흡한 실정이다. ICT 기술수준 조사보고서에 따르면 디지털트윈 분야 국내 기술수준이 미국 대비 82.3%에 불과하며 이는 유럽(93%), 일본(87%), 중국(83.3%)에 뒤처지는 수준이다.

4차산업혁명 기술은 물 인프라 안전관리분야 산업이 도약할 수 있는 절호의 기회이다. 기존 산업은 노동집약적·현장의존적인 생산체계, 공급자 위주의 산업구조, 참여주체 간 정보의 단절 등으로 전통산업적인 형태를 나타내고 있으나 자동화·맞춤형·정보공유 등의 기술을 접목하여 산업패러다임 전환을 통한 새로운 성장동력의 확보가 가능하다. 물 인프라 유지관리분야는 첨단기술(드론, 로봇, IoT, 빅데이터, AI, Digital twin 등)의 융합으로 기존의 경험의존적 유지관리에서 지식·첨단산업으로 변화하고 다양한 기술의 융합을 통해 업역 간, 단계 간 단절을 해소하고 새로운 가치창출이 가능한 분야로 기대되고 있다.

3. 사업개요

□ 사업목적

4차산업혁명 기반의 드론, AI, 빅데이터분석시스템 등 댐 스마트 안전관리체계 구축을 통한 선제적 보수보강, 성능개선으로 댐을 안전하게 오랫동안 사용

□ 필요성

국가댐은 노후도*가 심하며, 저수용량**이 비교적 커 댐 붕괴 시 대규모 재난발생이 우려되므로 평상시 체계적인 안전관리 필요

*국가댐(37개) 중 43%는 30년 이상 경과

**(전체 저수용량) 환경부댐 160억m^3, 농업용댐 30억m^3, 발전용댐 18억m^3

□ 사업대상

국가댐 37개소(다목적댐 20, 용수댐 14, 홍수조절용댐 3)

□ 사업내용

① 실시간 스마트모니터링 시스템-첨단장비(GPS, 실시간계측기 등)를 활용, 기존 하루 1회 실시한 댐의 거동계측을 실시간 안전감시체계로 전환

② 드론 기반의 안전점검체계-기존 육안진단에서 항공·수중*드론을 이용한 비대면 3차원 영상분석으로 보다 정밀하게 댐 손상여부를 진단

*항공드론은 댐 사면·여수로 등 접근제약·위험지대 안전점검용 / 수중드론은 취수탑용 소형 수중드론 및 터널용 ROV(Remotely Operated Vehicle)

③ 스마트 댐 안전관리 플랫폼-계측자료의 빅데이터화, AI 분석 등을 활용하는 디지털트윈 기반의 플랫폼 및 댐 안전관리센터 구축

□ 사업기간·총사업비

2020~2025년(6년), 총 1,061억원(국고 100%)

□ 기대효과

○ 일자리 창출-1,497명

○ 연관산업 효과 등- 4차산업 활성화, 댐 분야 디지털 선도국가 등

4. 핵심기술 1 실시간 스마트 모니터링

4. 1 배경

현재 댐에는 외부변위 감시를 위해 광파기(Total-station)를 활용한 일단위 또는 수동계측으로 데이터를 관리·분석하고 있으나, 강우·강설·안개 등에 따른 기상여건과 식생발달 등에 의한 잦은 결측이 발생함에 따라 안전관리를 위한 계측기 설치 및 운목적에 부합하지 못하고 있다.

취수탑, 여수로, 발전소 등 부속시설에 대한 안전감시체계 부재로 해당 시설물의 중요성 등을 고려, 최적의 GPS 등 실시간 무인계측시스템 구축을 통한 신속한 위기대응 체계를 마련하였다. [관련근거: 댐 설계기준 4.4.7 및 6.3.5 계측설비, 댐 관리규정 제2절(댐 계측관리), 댐 시설관리 업무기준 제24조(계측기기 운영 및 관리)]

구체적으로는 기존의 계측기가 설치된 위치의 변위 감지가 가능한 포인트형 계측의 제한적인 계측범위 한계를 극복하기 위하여 전방위적 계측이 가능한 방식으로의 전환이 필요하다. 또한 댐 및 부속시설에 대한 효율적이고 체계적인 안전감시체계를 마련하고, 실시간 무인계측 및 안정적인 데이터전송 시스템을 구축하여, 적시적인 데이터분석기반 구축을 목적으로 스마트센싱기법을 활용한 실시간 안전감시체계가 필요하다.

4. 2 기본계획수립 기준

현재 운영 중인 매설계기의 노후화로 의한 신뢰도 부족과 외부변위계측기의 주기적인 계측빈도(일단위 또는 수동계측)에 의한 계측데이터 분석속도지연 발생 및 기상(안개, 강우, 강설 등), 식생에 의한 결측으로 인해 댐 구조물의 안전관리체계에 부합하지 못하고 있다. 따라서 댐 및 부속시설에 대하여 실시간 스마트모니터링 및 적기대응이 가능하도록 스마트계측체계를 국가댐 37개소에 적용하고자 한다.

표 1. 실시간 스마트모니터링의 기대효과

구분	As-is	To-be	비고
운영체계	• 외부변위 감시를 위해 광파기를 활용한 일단위 또는 수동계측관리	• 댐 및 부속시설물에 대한 실시간 (RTK GPS 등) 계측관리 실시	
장애요소	• 강우, 강설, 안개 등의 기상상태 및 식생, 수목에 의한 장애로 결측 발생	• 스마트센싱기법(인공위성 등)을 통한 기상 및 식생의 영향 최소화	
분석체계	• 관리자에 의한 분기별 계측보고서 작성 (비정상데이터 포함 및 적기대응 불가)	• AI 분석체계의 구축으로 신뢰도 높은 실시간 구조물 안전관리	

표 2. 댐 실시간 스마트모니터링 기본계획(사례)

1단계																2단계
RTK GPS									경사계						사면 경사계	GB-SAR
댐 정상	댐 상류	댐 하류	취수탑	여수로	발전소	기타	기준점	소계	댐	여수로	취수탑	발전소	기타	소계		
16	7	9	2	3	1	-	1	39	-	2	2	1	-	5	-	1

4. 3 1단계사업

현장전수조사 결과를 반영하고, 기존 외부변위계(프리즘 타켓)를 GPS로 1:1 교체하여 실시간 스마트 모니터링이 가능하도록 계획하였다. 상시만수위를 고려한 설치위치 조정(E.L) 후 설치간격에 따라 수량의 변경을 결정하였다.(효율성 증대) 취수탑 및 발전소 등과 같은 콘크리트 구조물의 변위계측의 계획을 수립하였다.(구조물 계측기 적용사례가 없으며, 구조물 및 댐 준공 후 장기간이 경과함에 따라 이에 대한 계측관리 필요) C.F.R.D 및 콘크리트 구조물(발전소, 취수탑 등)은 GPS 비정상적 동작발생에 대비하여 구조물경사계 추가설치를 계획하였다.(결측발생 시 보완 가능 및 이상변위 발생 시 연관분석 가능) 기존 운영 중인 사면경사계, 자동경사계 중 수동계측 중인 경우에는 자동계측으로 전환하고 고장센서(간극수압계 등)는 교체 또는 신규설치하는 것을 계획하였다.

4. 4 2단계사업

1단계사업은 포인트형 계측방식의 GPS, 경사계 등의 계측기를 통해 댐의 외부변위거동의 계측에 대하여 기본계획을 수립하였다. 그러나 포인트형 계측

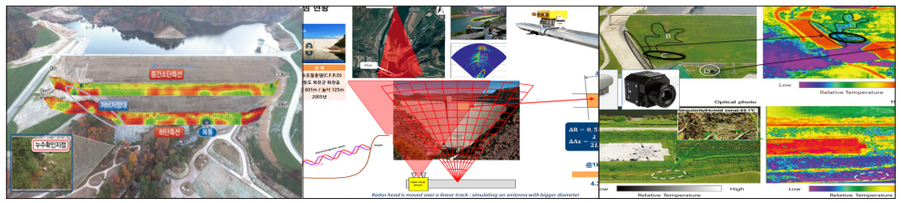
방식은 전방위계측이 불가능한 단점이 있으므로 이를 보완할 수 있는 계측계획이 필요하다.

이에 따라, 제3장의 핵심기술 현황에서 기술된 비접촉식 계측방식을 2단계 사업으로 선정하여 기본계획을 수립하고자 하였다.

2018년에 수행된 '6개 댐 침투량 측정시설 신설공사 실시설계'에 따른 침투량 측정시설공사가 진행되었으나, 이 중 대암댐 및 연초댐은 침투량 측정시설 신설공사가 시행되지 않은 상태이므로 전기비저항탐사(자동) 계측기술을 대체하여 댐 누수 및 제체 내부의 상태변화를 계측하고자 한다.

표 3. 실시간 스마트모니터링의 2단계사업 적용 계획

구분	적용 계측기술 기준	적용계획	비고
전기 비저항탐사 (자동)	• 침투량 침투시설이 미설치된 댐에 설치하여 댐 누수 및 제체 내부상태 변화 계측 • 시범적용 결과에 따라 향후 댐 안전관리를 위한 사업추진 시 필댐 및 표면차수벽형 석괴댐에 설치	대암댐(E.C.R.D) 연초댐(E.C.R.D)	2개 댐
GB-SAR	• 필댐 및 표면차수벽형 석괴댐, 콘크리트댐의 형식별로 시범적용 댐을 선정 • 댐의 규모 및 담수량 등을 고려하여 대상 댐 선정 • 시범적용 결과에 따라 향후 댐 안전관리를 위한 사업추진 시 전체 댐에 추가설치	소양강댐(E.C.R.D) 밀양댐(C.F.R.D) 대청댐(복합댐)	3개 댐
열화상 카메라	• 댐 누수는 균열 및 방수불량 등으로 발생하며, 댐 형식에 영향을 받지 않으므로 전체 댐의 누수관리가 필요함.	전기비저항탐사 또는 GB-SAR 적용을 제외한 댐	32개 댐



5. 핵심기술 2 드론 기반 안전점검

5. 1 배경

최근 전 세계적 온난화로 인한 기후변화로 물과 관련된 재해 및 이로 인한 피해가 늘고 있다. 특히 지난 7월에는 독일과 벨기에 등 서유럽에서 기록적인 폭우로 독일 120여 명, 벨기에 20여 명의 사망자가 발생하였고, 중국 허난성 정저우시에서도 폭우가 쏟아지면서 지하철에 갇힌 승객 12명을 포함해 50명 이상이 목숨을 잃었다. 인도 마하라슈트라주의 라이가드 지구에서도 폭우와 산사태로 인해 주민 36명이 목숨을 잃었다. 우리나라 역시 매해 태풍과 폭우 등 재해로 인한 피해가 계속해서 발생하고 있다. 이로 인한 인명과 재산피해규모가 막대한 재해 특성을 감안하였을 때 이에 관한 철저한 대비가 필요한 상황이며 댐 시설물은 그 중에서 가장 큰 비중의 역할을 담당하고 있다.

반면에 국가관리 댐 37곳 중에 30년 이상 경과된 고령화시설이 17곳(전체 중 45.9%), 40년 이상 경과된 곳 11곳(전체 중 27%), 50년 이상 경과된 곳도 4곳(전체 중 10.8%)이나 될 정도로 댐 시설물의 노후화가 급격히 진행되고 있는 실정이다.

또한 국가관리 댐 37곳 중에 28곳(전체 중 75.6%)의 총저수용량이 2,000만톤 이상이며 그 중 1억톤 이상도 17곳(전체 중 43.2%)이다. 만약 높은 저수용량의 댐에 붕괴사고가 발생할 경우 상대적으로 낮은 저수용량 댐의 붕괴 시보다 피해규모가 클 것으로 예상되므로 높은 저수용량의 댐일수록 더욱 강화된 안전관리가 필요하다.

5. 2 드론점검 업무체계

1) 일상점검

댐 지사에서는 댐 및 부속시설을 대상으로 월 1회 이상 점검을 실시한다. 댐 시설관리업무기준 제16조에 따라 월단위 일상점검 시 드론을 활용하여 점검하고, 그 결과를 댐현장안전점검시스템에 등록한다. 댐 지사에서 일상점검 중 이상현상이 확인되면, 댐안전관리센터에서 시설물별로 정밀점검 및 분석 등의 기술지원을 한다. 댐 지사에서 댐별로 지급된 드론으로 주/월/분기/반기 단위로 일상점검을 시행할 때 고위험, 접근성 결여지역에 드론을 활용한 모니터링을 시행한다. 일반드론으로 월 1회 이상 점검을 통해 동영상을 취득하여 축적한다.

2) 정밀점검

댐 안전관리센터에서 홍수기 전후, 재난 시 정밀드론을 배치하여 시설물을 정확하게 진단하기 위해 다양한 각도, 거리 기반의 복합영상을 취득하고 3차원모델링 기반의 분석을 진행한다.

3) 특별점검

집중호우, 지진 등에 따른 심각한 균열, 누수 등 이상징후 발생 시 특별점검을 시행한다.

그림 1. 드론점검 운용체계

표 4. 드론점검 업무체계

구 분	점검대상	점검방법	담당처
일상점검	• 댐체, 여수로, 보조여수로, 기초 및 양안부, 공도교, 여수로 수문, 취수시설, 발전소 구조물, 관리동 등 건축물, 옹벽, 절토사면 등	• 월 1회 이상 시행. • 드론 활용 점검결과를 댐현장안전점검시스템에 등록	지사
정밀점검	• 홍수기 전후 영향검토를 위한 정밀점검 및 3차원분석	• 홍수기 전후	센터
특별점검	• 댐체, 여수로, 보조여수로, 취수시설	• 집중호우, 지진 등에 따른 심각한 균열, 누수 등 이상징후 발생 시	센터

표 5. 육상드론 도입현황

구 분	일상점검 드론	정밀점검 드론		
형태				
형태	보급용(37기)	촬영용(2기)	긴급조사(2기)	정밀조사(2기)
제품명	A	B	C	D
무게	1,998g	1,174g	500g	2,800g
주요특징	• 사진해상도 12MP • 동영상 4K • 국산드론/유지관리 용이	• 사진해상도 21MP • 동영상 8K • 실시간 스트리밍 가능	• 사진해상도 21MP • 동영상 4K • 열화상 1280×720	• 사진해상도 36MP • 열화상 640×512 • 수직Gird 임무비행 가능

표 6. 업무별 드론 특징

구분	일반점검 드론	정밀/긴급점검 드론
자세/위치	RTK GPS	RTK GPS
카메라	10Mp / FHD 이상	20Mp / FHD~8K
열화상	미적용	적용
최대비행시간 / 이동거리	20분, 2km 이상	25분, 3km
장애물 회피기능	비전센서로 정지	적용
내풍가능 최고속도	10m/s	15m/s 이상
용도	주기적, 일반점검	0.1mm 수준의 정밀한 점검

6. 핵심기술 3 댐 안전관리 디지털트윈플랫폼

6. 1 배경

최근 4차산업혁명에 따른 디지털트윈기술이 등장하며 안전관리분야의 기술접목이 가속화되고 기술의 필요성이 요구되고 있다. 현재 국내 시설물은「기반시설관리법」시행에 따라 노후 기반시설관리 및 시설물을 안전하게 유지·관리할 수 있는 연구가 필요하다. 안전관리분야에 디지털트윈기술이 도입되면 새로운 성장동력 확보가 가능하다.

기존에 사람이 육안으로 파악했던 시설물 점검에 첨단센서가 도입되면서 플랫폼 내부에서 시설물 주변 사면 및 내·외부의 상시 변형·변위 등을 모니터링할 수 있게 되어 편리한 시설 및 시설물 주변파악이 가능하다. 인력점검으로 인해 인명사고가 많이 발생하였던 외관조사, 수중부조사는 디지털트윈기술인 드론, 수중 ROV, 로봇 등으로 대체하여 위험성을 줄이고 시간적·경제적 효과를 얻을 수 있다.

이러한 기계를 통해 수집된 디지털정보를 3차원 디지털트윈모델과 연계하여 계측데이터의 분석결과를 제공함으로써 안전관리에 따른 빠른 의사결정이 가능하다.

안전관리분야에 디지털트윈기술을 접목함으로써 현재까지 육안조사, 수기기록, 경험에 의한 판단에 의존했던 조사, 분석을 빅데이터와 AI 분석기술 도입을 통하여 객관적으로 평가 가능하게 되며 IoT 센서와 AI 기반 영상분석을 통해 상태평가를 실시간 자동수행할 수 있다.

또한 플랫폼 내부에서 사용자가 필요한 주요 시공정보, 점검·진단이력, 보수·보강이력 등에 대한 직관

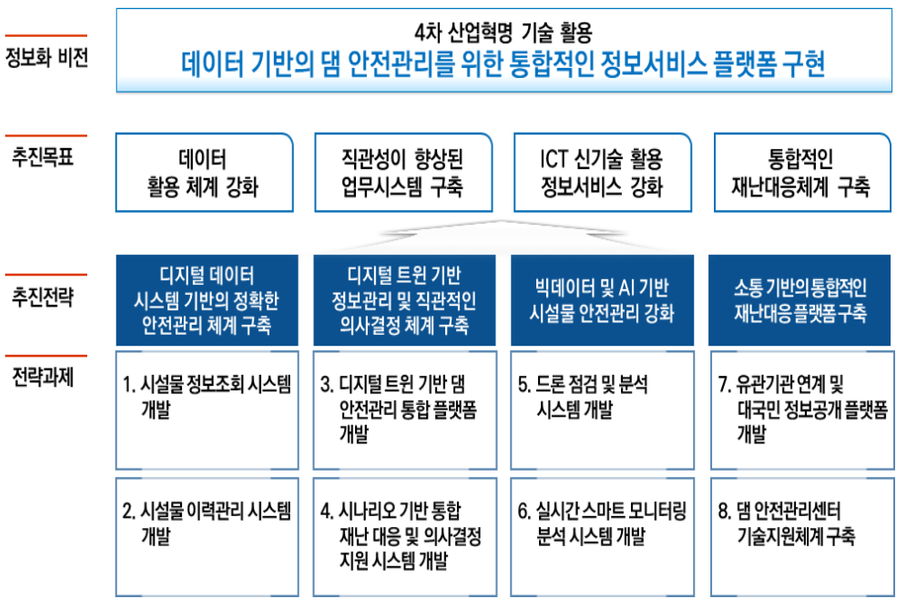


그림 2. 스마트 댐 안전관리 플랫폼 추진전략

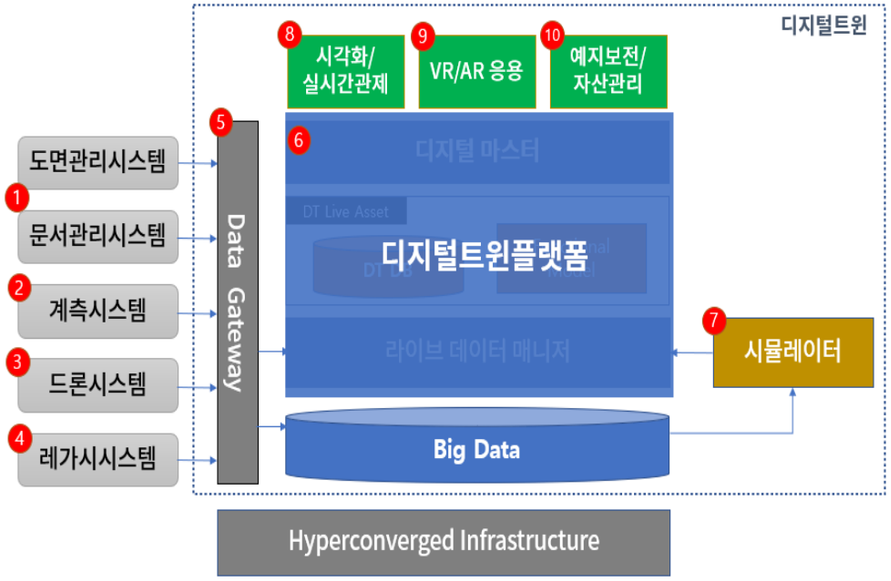


그림 3. 스마트 댐 안전관리를 위한 디지털트윈 시스템 모식도

적인 검색이 가능하다. 이러한 데이터 및 분석결과는 3차원공간에서 디지털트윈모델로 구현되어 시뮬레이션되기 때문에 정확한 시설물 파악이 중요하다. 3차원모델을 통해 실제 계측기기의 위치를 반영하여 가상의 공간에서 동일한 위치에 계측기기 정보를 관측할 수 있고 이를 통해 시설물의 정보관리가 가능하다.

또한 기후변화, 재해 등 발생 시 이에 따른 시설물 및 시설물 주변환경을 사전에 예측하여 안전관리를 할 수 있다. 이러한 안전관리분야의 디지털트윈기술을 댐에 적용하여 노후화된 댐을 더욱 안전하고 경제적으로 관리할 필요성이 요구되며, 댐에 디지털트윈기술을 접목한 3차원모델링을 통해 현장관리자 및 중앙관리자가 현장에 직접 가지 않고도 한눈에 댐의 안전 및 유지관리 현황을 파악하고 AI 분석 및 시뮬레이션을 통한 위험 사전예측 및 예방을 통하여 새로운 가치창출이 가능할 것으로 기대된다.

6. 2 시스템 구조

스마트 댐 안전관리에서 디지털트윈이 담당해야 할 역할을 데이터의 흐름 관점에서 그룹핑하여 스마트 댐 안전관리를 위해 디지털트윈에 요구되는 기능을 항목화해 보았다. 이를 시스템 아키텍처로 표현하면 그림3과 같다.

6. 3 애플리케이션 및 인프라 구축계획

기본계획수립 과업을 통해 제시된 애플리케이션 및 인프라 구축계획은 그림4, 그림5와 같다.

6. 4 추진전략에 따른 세부실행과제

스마트 댐 안전관리플랫폼을 구축하기 위한 세부실행과제는 총 8가지로, 구축 전과 후를 비교한 시스템의 효과는 그림6~그림13과 같다.

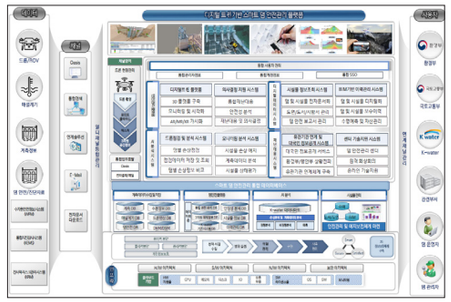


그림 4. 스마트 댐 안전관리 애플리케이션

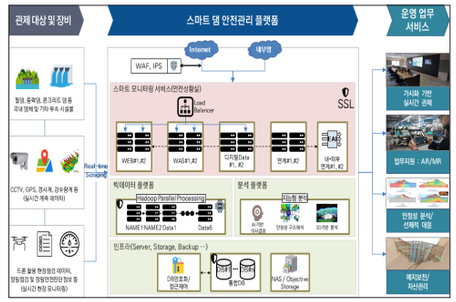


그림 5. 인프라 구축계획

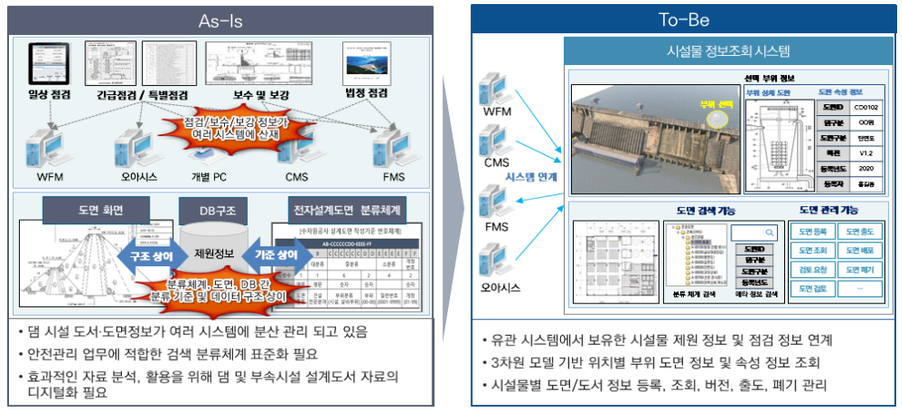


그림 6. 시설물 정보조회 시스템

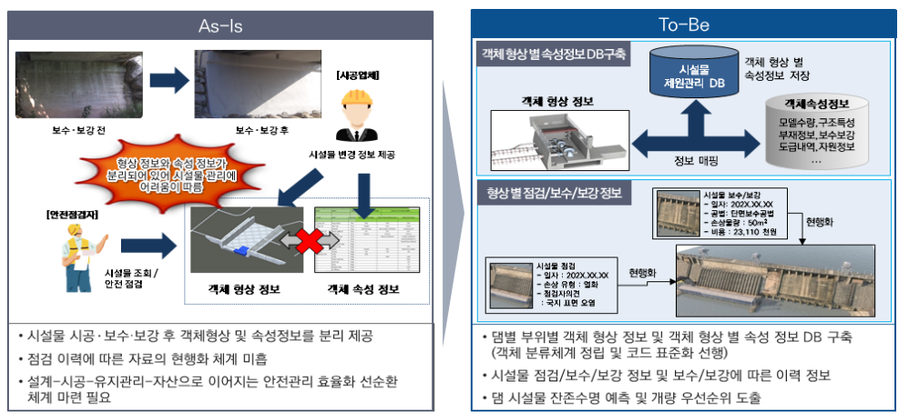


그림 7. 시설물 이력관리 시스템

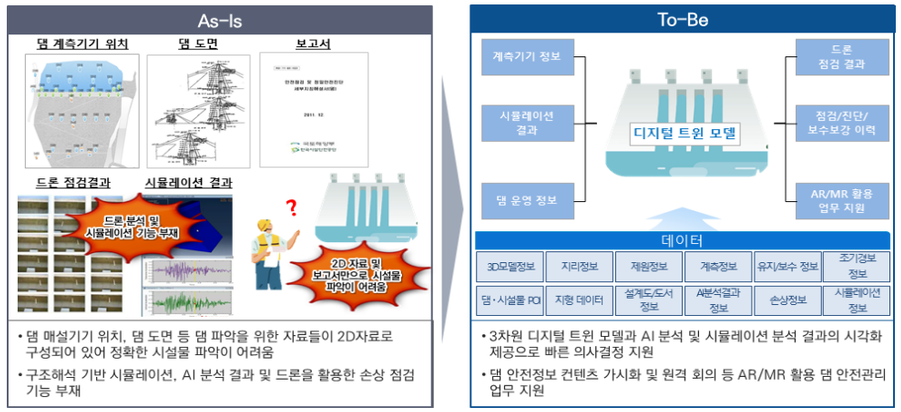


그림 8. 디지털트윈 시스템

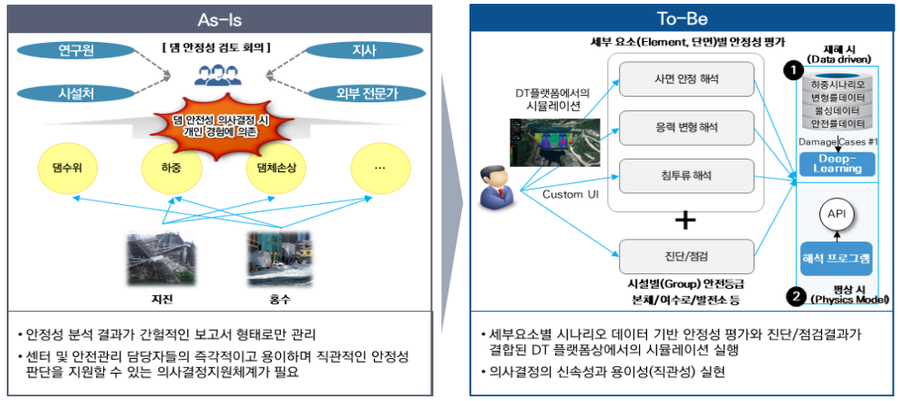


그림 9. 재난대응 및 의사결정 시스템

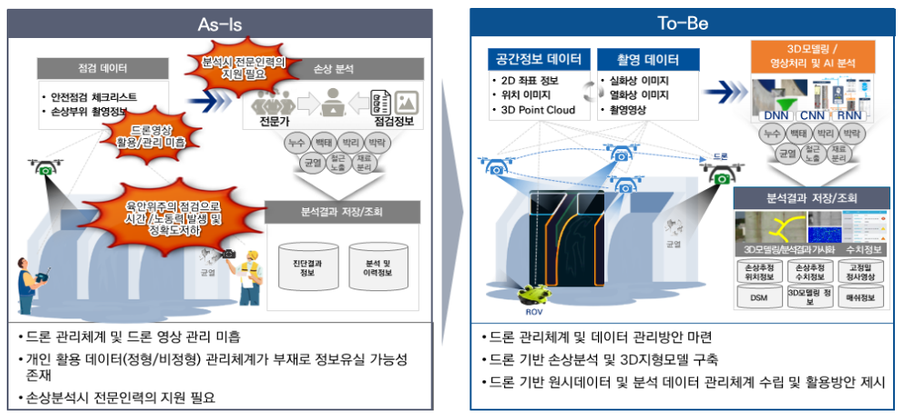


그림 10. 드론 점검 및 분석 시스템

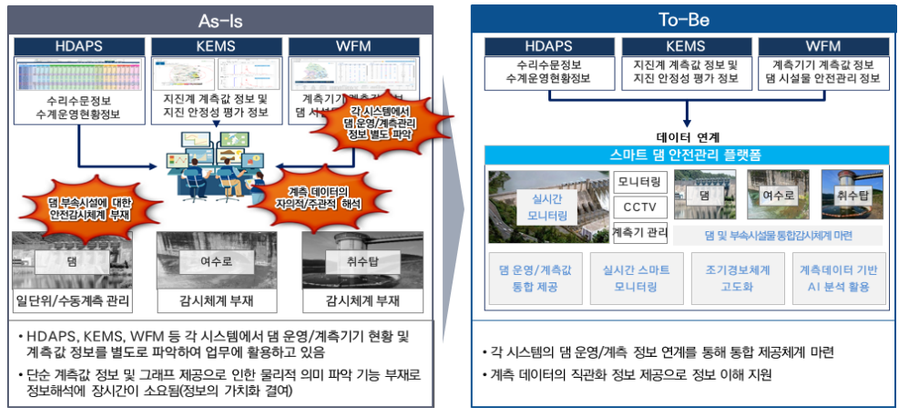


그림 11. 실시간 스마트모니터링분석 시스템

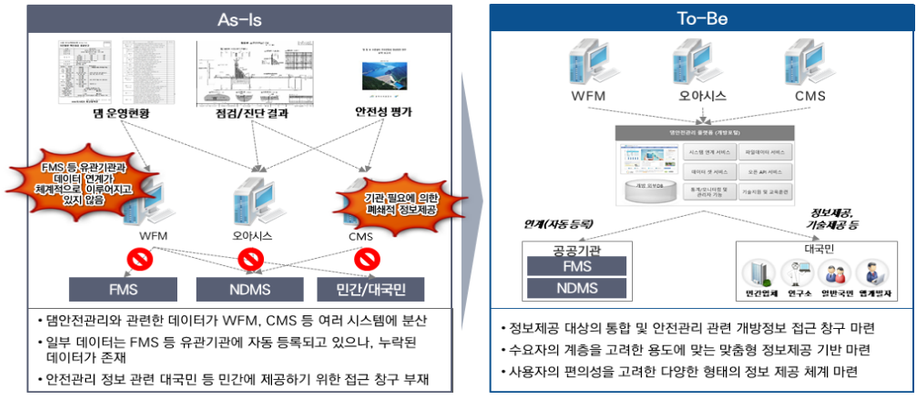


그림 12. 유관기관 연계 및 정보공유 시스템

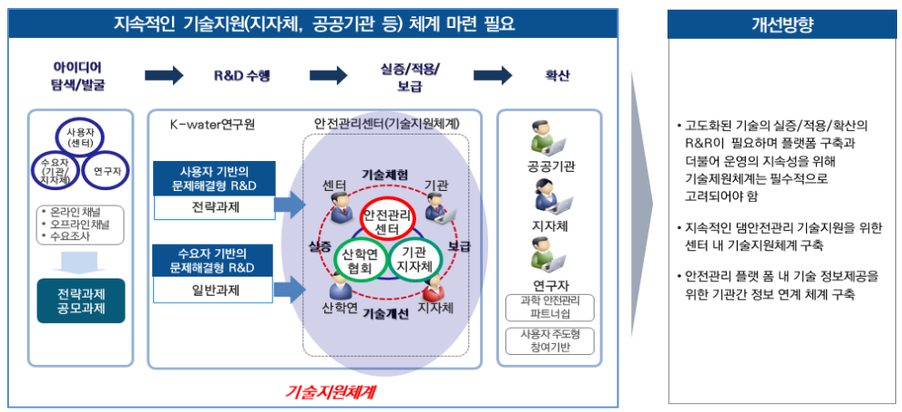


그림 13. 댐 안전관리센터 기술지원 시스템

7. 핵심기술 4 AI(인공지능) 손상예측

7. 1 계측데이터 기반의 이상치 검출

실시간 스마트모니터링 시스템에서 측정된 데이터를 통해 AI 분석관리와 이상징후를 사전에 탐지해 각종 사고를 예방하는 조기경보를 위해서는 자료의 수집과 관측 과정에서 포함되는 오차를 최소화하는 것이 중요하다.

계측데이터 내에 오차가 포함되어 있는 것은 정상적인 계측데이터와 상반된 경향과 특성을 갖는 이상치(Outlier)도 분포할 가능성이 높으며, 인공지능에 의한 분석관리와 조기경보 등을 위해서는 이상치 제외 등이 포함된 계측데이터 처리방법의 적용이 필요하다. 이를 한국수자원공사에서 실시하고 있는 조기경보시스템에서 활용하기 위해 계측이상치 판별 관련 연구를 진행(조기경보를 위한 계측이상치 판별방법 개발, 한국수자원공사, 2021)하였다. 그 결과를 실시간 스마트모니터링의 조기경보를 위한 계측기별 이상치 적용방법에 반영하여 계측데이터의 AI 분석결과의 신뢰도를 높일 수 있도록 한다. 한국수자원공사의 댐 및 보 매설계기의 계측데이터의 시범적용 결과에 따라 표 7과 같이 이상치 적용방법론을 적용한다.

7. 2 드론데이터 기반의 이상치 검출

드론 촬영으로 시설물을 점검하여 획득한 영상데이터를 점검자가 사진 하나하나 살펴보며 이상현상을 확인하려면 시간도 오래 걸리고 신속성과 경제성이 떨어지게 되며, 점검자에 따른 경험과 기술수준 등의 원인에 의해 판단기준이 다르게 적용되어 시설물 안전진단의 정확성이 낮아질 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 안전진단과정에 AI 기술을 적용해 점검결과의 정확성과 신속성, 경제성을 향상시킬 수 있다. 무인체(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)를 활용한 시설물 외관 영상을 촬영하는 기술과, 촬영된 콘크리트면 영상으로부터 균열을 검출하는 연구가 주를 이룬다.

최근 무인체기술이 발전함에 따라 무인체에 장착된 고해상도카메라를 이용해 교량 외각의 미세한 균열, 박락, 열화, 부식상태를 촬영하는 것이 가능하다. 시설물 외각 균열탐지를 위해 Canny, CrackFor-

표 7. 계측데이터를 활용한 이상치 적용 방법론 계획

반응변수	설명변수	상관분석 결과	이상치 적용 방법론			
			Cook	MD	LOF	iForest
정상침하계	-	유의	●	●		
간극수압계	-	유의	●	●		
누수량계	강우량계	부분적 유의		○	●	●
	저수위계	부분적 유의		○	●	●
	탁도	부분적 유의		○	●	●
	전기전도도	무의미				

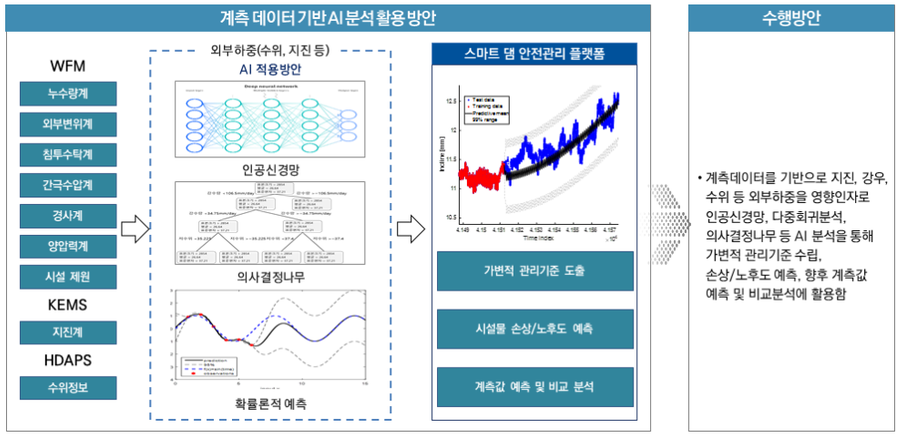


그림 14. 계측데이터 기반 AI 손상예측시스템

est, FFA, GC와 같은 경계선검출 기반의 알고리즘이 사용되어 왔으나 노후된 콘크리트 시설물의 경우 균열 이외에 박리·박락, 부식 등 다양한 손상이 발생하며 손상부위 또한 콘크리트, 강재 등 재료가 다양하므로 기존의 경계선검출 기반 알고리즘은 시설물의 상태평가에 적합하지 않다. 머신비전을 이용하는 경우 균열, 박리·박락, 부식 등 교량 손상의 종류를 판단하는 각각의 분류기를 학습한 후 다수의 분류기를 클러스터링하는 기술이 적용될 수 있으나, 각각의 분류기를 학습하기 위한 방대한 학습데이터를 구축하는 과정이 어렵고, 정확한 손상 위치를 파악하는 것이 불가능할 수 있다.

최근에는 딥러닝(Deep learning) 기술을 이용한 콘크리트 구조물 평가기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 서울시립대의 조수진의 연구(2018년)에서는 웹스크레이핑(Web scraping) 기법으로 인공신경망 학습에 필요한 다양한 콘크리트 무손상 / 손상 이미지들을 수집하고 학습데이터를 구축하였다. 네트워크학습을 위해 기존에 개발된 딥러닝 기반 이미지 분류기인 AlexNet을 초기모델로 하여, 학습된 데이터를 활용하여 미세조정을 수행하는 전이학습을 통해 이미지 내에서 자동으로 박락탐지를 수행할 수 있는 인공신경망을 개발하였다. 전이학습(Transfer learning)은 특정환경에서 기학습된 인공신경망을 다른 목적의 비슷한 분야에 적용하기 위해 일부 조정하여 사용하는 것으로, 현재 많은 연구가 이루어지는 기계학습분야이다. 전이학습은 학습데이터가 부족한 경우 유사한 분야에서 기학습된 인공신경망을 활용하여 학습할 수 있으며, 이미지 분류를 위한 인공지능 모델개발 및 학습시간을 단축시킬 수 있고, 검증된 정확도의 모델을 활용할 수 있다. 딥러닝 학습을 위한 가장 중요한 요소는 학습데이터의 양이다.

댐 외관조사를 위한 학습데이터가 부족한 경우에 이미지 증강기술을 통해 학습데이터 양을 늘릴 수 있다. 이미지 증강기술에는 이미지분할(Image segmentation)과 이미지 변형(Image transformation)이 있는데, 이미지분할은 하나의 전체이미지에 대해 다른 영역의 작은이미지로 분할하는 기법이며, 이미지 변형은 좌우반전, 상하반전, 3가지 회전(30°, 60° 및 90°), 명암조절과 블러링(Bluring)을 적용하여 이미지의 수를 늘리는 기술이다. 이미지 증강기술을 적용하면 손상의 거짓검출이 증가할 수 있으나, 실제 발생한 손상을 놓칠 확률은 낮아지는 효과가 있다.

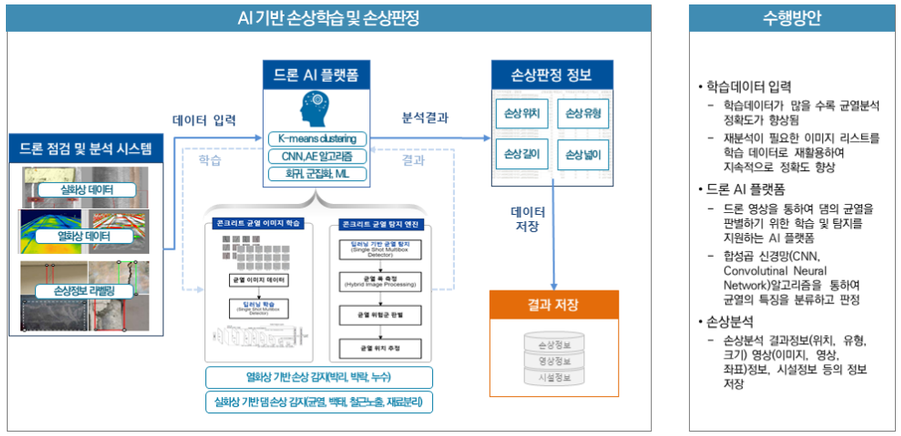


그림 15. 드론 점검 데이터 기반 AI 손상예측시스템

디지털이미지 분석기술을 이용한 시설물 점검기술은 점검대상 시설물을 촬영한 디지털이미지를 분석하여 균열과 같은 열화현상을 검출하는 기술로서 이러한 이미지 분석기술을 통해 기존 점검 및 조사에 소요되는 막대한 인력과 비용을 절감할 수 있으며 점검 시기 및 점검 위치에 대한 제약을 크게 개선할 수 있다. 콘크리트구조물의 비선형적인 균열을 검지하는 데 효과적으로 적용할 수 있는 모폴로지 기법(Morphological operation)은 어떤 이미지의 형태적인 면을 조작하는 과정으로 경계, 골격, 블록과 같은 영역형태를 표현하는 데 있어 유용한 요소들을 추출하기 위한 도구로 수학적 형태론의 개념으로 사용된다. 균열검출절차는 분할(Segmentation), 특징점추출(Feature extraction) 및 균열판정(Decision making)의 주요과정을 거쳐 이루어진다. 촬영된 이미지의 품질이 떨어지거나 특정요소를 추출하기 위한 이미지보정이 필요한 경우에는 실제 균열검출을 위한 이미지분석이 수행되기 전에 이미지 품질향상을 위한 사전작업(Pre-processing)이 수행될 수 있다.(Jahanshahi et al, 2009년)

8. 결론

'스마트 댐 안전관리 기본계획'(2021년 11월) 및 '스마트 댐 안전관리 플랫폼 ISP'(2022년 5월)를 바탕으로 디지털 신기술의 도입을 위한 세부 추진전략을 마련하였다. 하지만 급격한 기술의 변화로 최초의 계획을 유지할 경우 시대에 맞지 않는 성과물이 구축될 우려가 있으므로, 지속적인 국내외 사례조사 등을 바탕으로 기술동향을 파악하여 디지털 선도국가로 도약하는 데 이바지를 해야 한다.

개발 및 구축된 기술은 유관기관과 공유해 정보의 확산 및 신기술의 재생산으로 이어지도록 하고, 대국민 정보공개를 통해 국민의 알권리를 충족시키고 국내 기업들이 성장할 수 있는 여건을 조성하는 데도 활용될 것으로 전망한다.