

댐의 재해와 대책

김 범 주*, 신 동 훈*, 박 한 규*, 임 희 대*

1. 서언

댐 건설의 목적은 생활, 공업, 농업용수의 공급과 전력생산 등 인류에게 필요로 하는 수자원의 효율적 이용과 홍수와 같은 물의 재해로부터 벗어나고자 함이다. 그러나 그러한 목적으로 건설된 댐은 때로는 당초의 의도와 달리 댐 시설물 자체에 위해가 발생하거나 홍수 조절에 실패하는 경우 반대로 인류에게 커다란 피해를 줄 수 있다.

국제대댐회(ICOLD)의 보고에 따르면 역사적으로 전 세계에서 댐 사고는 약 15만건에 이르고 있으며, 12세기 이후에 2,000여개 댐이 손상을 입었고, 20세기 이후에는 200여건의 이상의 댐 사고가 발생하여 약 238,000여명 이상의 인명피해가 발생하였다(ICOLD, 1995). 이와 같이 댐 사고는 전 세계적으로 빈번하게 발생해왔으며 그로 인한 인명 및 재산피해

는 심히 막대하다 할 수 있다. 국내에서도 다수의 댐 사고가 발생한 바 있으며, 최근의 이상기후 발생빈도의 증가와 시간경과에 따른 댐의 열화 및 노후화된 댐의 증가는 댐의 재해 위험도를 높이고 있어 국가 차원에서의 이에 대한 대책 마련이 요구되는 현실이다.

이에 본 고에서는 국내외의 댐 사고 사례를 포함하여 댐 재해의 원인 및 영향에 대하여 정리, 소개하고 이에 대한 대책 방안 등에 대하여 기술하고자 한다.

2. 댐 사고로 인한 재해

국내에서 발생한 대표적인 댐 사고는 1961년 7월 전남 남원군에 위치한 효기리 댐 붕괴사고로 57명이 실종되고 9,800여명이 이재민이 발생하였으며, 이후 1972년 부산의 구덕저수지, 1980년 충북 보은의 장속 저수지, 그 외 1987년과 1998년 대홍수로 인해 국내 많은 소규모 농업용 저수지가 붕괴된 바 있다. 또한, 최근에는 1999년 경기도 연천군의 연천댐이

*1 한국수자원공사 댐기술연구소 선임연구원
(bjkim@kowaco.or.kr)

*2 한국수자원공사 댐기술연구소 책임연구원

*3 한국수자원공사 댐기술연구소 소장

*4 충남대학교 토목공학과 교수

댐의 재해와 대책

표 1. 연천댐 시설물 개요

시설물 제원		설계 및 시공	
댐 형식	콘크리트 문비형 토사혼합식	설계빈도	200년
규 고	길이: 169.5m, 높이: 22 m	설계홍수량	5,230 m ³ /sec
도수로	길이: 2.6 km, 직강: 4.2 m	시공기간	1983 - 1986 년
저수량	1,300만 ton (유효저수량 800만 ton)	유역면적	1,830km ²

붕괴되었으며, 2002년 태풍 루사에 의해 농업용 저수지가 다수 붕괴되었다(김경덕 등, 2003).

국외의 경우 대표적인 댐 재해 사례로는 1963년 이탈리아의 Vajont댐에서 상류측 좌안에서 사면이 붕괴되어 저수된 물이 월류, 하류지역에 있던 2,600명이 사망하고 집계가 어려울 정도의 재산피해가 발생한 사례와 1976년 미국의 Teton댐이 붕괴되어 약 3억7천만m³의 물이 댐 하류지역의 농경지와 도시들을 덮쳐 14명이 사망하고, 10억 달러 이상의 재산피해가 발생한 사례를 들 수 있다. 또한, 1975년 8월에는 중국 허난성에 있던 Banqiao댐과 Shimantan댐이 붕괴되어 약 230,000명(공식적으로는 86,000명)이 물에 휩쓸려 사망하고, 수백만명이 질병, 식중독 및 기아로 고통을 받았으며, 대만에서는 1999년 9월 20일 규모 7.7의 지진이 발생하여 대만 최대의 용수 공급원이었던 Shihkang댐이 붕괴되어 용수공급능력의 40%를 잃게 되는 피해를 입었다(김기석, 2003).

위의 사례 외에도 다수의 댐 사고들이 보고된 바 있으나 큰 절에서는 국내·외의 대표적인 댐 사고 사례로서 비교적 사고 현황이 자세하게 보고된 국내의 연천댐과 미국의 Teton댐 사고 사례에 대하여 간략히 소개한다.

2.1 국내의 댐 사고 사례 - 연천댐

경기도 연천군 청산면 궁평리에 위치한 연천댐은

댐 높이가 22m, 길이 169.5m의 콘크리트 문비형 토사 혼합식 댐으로 1986년 산간벽지의 전화사업 및 대체에너지 개발을 촉진하기 위하여 민간에 의한 소수력 발전사업을 권장하던 정부방침에 부응하여 임진강제1지류인 한탄강에 건설되었다.

연천댐의 붕괴는 홍수로 인한 월류가 원인이 되어 발생하였다. 1996년 7월 25일부터 26일 사이 연천군 일대에는 300mm 정도의 폭우가 집중되어 발전소 수문 7개를 모두 개방하고 수위를 조절하려 하였으나, 7월 27일 추가로 200mm 정도의 폭우가 내려 발전소가 물에 잠기고 한탄강 유역에 대홍수가 발생하였다. 같은 날 오전 9시가 넘어 발전소 수문위로 2m 이상의 물이 월류하였으며, 월류된 홍수류가 댐 하류부 양안을 급속히 세굴시키면서 우측 댐체와 양안 기반암과의 연결부까지 세굴을 시켰고 결국 댐체 우안부가 붕괴되었다. 한편, 붕괴된 지역의 기반암은 부분적으로 단층대가 분포한 응회암으로 구성되

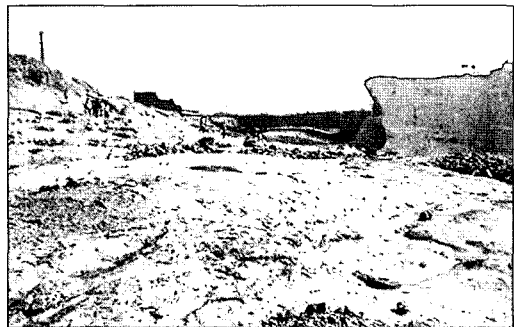


그림 1. 연천댐 붕괴후 전경

어 있었는데 응회암은 물의 접촉에 영향을 받아 강도가 약해지는 특성이 있고, 특히 댐 우안부 지반은 둥글둥글한 역질로 구성되어 있어 이들을 통한 침투 발생도 가능했었던 상황이었던 것으로 알려져 있다.

이 사고의 영향으로 댐 하류부의 장탄리 및 전곡리 지역이 범람하여 침수피해를 입었으며 하류부 한탄강 유원지의 가옥 약 50동이 전파되었다.

2.2 국외의 댐 사고 사례 - Teton댐

미국 Idaho 동쪽의 Teton강에 위치한 저수량 356백만톤의 Teton댐은 1975년 건설된 높이 93m의 중

심코아형 사력댐으로, 시공완료 후 담수 중 댐체 우안부에서 발생한 누수가 원인이 되어 붕괴되었다.

1976년 6월 3일 댐 우안 임반지역에 소량의 누수가 최초 발견되었으며 6월 5일 오전 7시에서 8시 사이, 우안부 댐체와 원지반의 접합부에서 초당 0.6~0.8m³의 심각한 누수가 발생하기 시작하였다. 약 3시간 이후 누수 속도는 현저하게 증가하여 오전 10시경에는 댐체 사면에서 약 0.4m³/sec의 대량 누수가 발생하였다. 누수발생 구간은 점차적으로 댐축에서 거의 수직으로 제체부 11m 까지 확대되었고 약 1.8m 직경의 공동으로부터 유출발생이 시작되었다. 공동은 제체 상부로 발전되었고 오전 11시경에



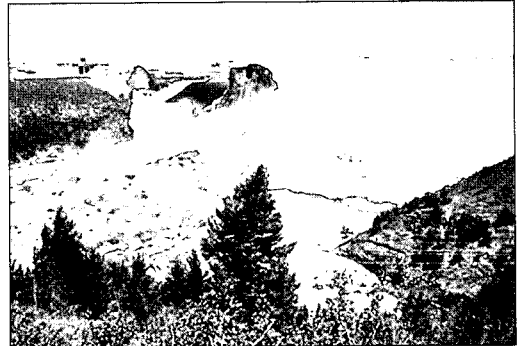
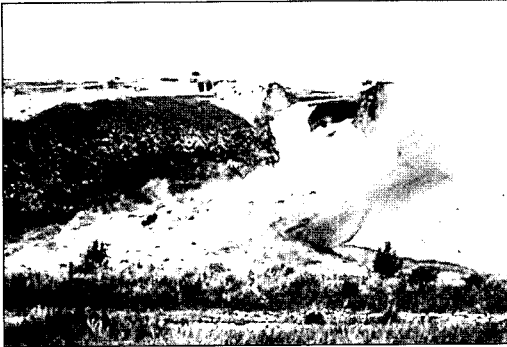
(a) 누수발생 및 확대



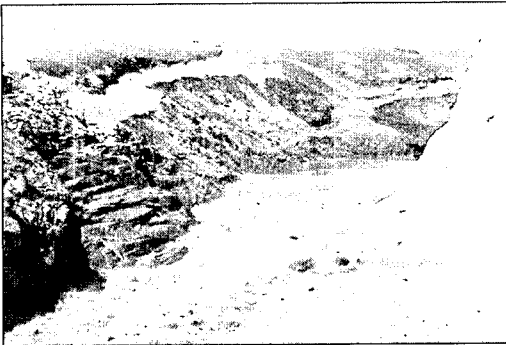
(b) 댐 우안부 붕괴 시작

그림 2. Teton댐 붕괴

댐의 재해와 대책



(c) 댐 우안부 붕괴 및 범람



(d) 붕괴 후 댐체 및 침수된 하류지역

그림 2.(계속) Teton댐 붕괴

는 제체 상류사면 부근의 저수지에 소용돌이가 발견되었으며, 11시 30분경 댐 정상부근 하류 사면에 침식도랑의 전면이 확대되면서 이후 11시 57분경 결국 댐 정상이 붕괴되었다.

사고원인으로는 Teton댐 지점의 화산암반은 화산암반의 특성상 크고 작은 균열이 발달하고 투수성이 매우 커, 효과적으로 그라우팅된 부분을 제외하고는 모든 방향으로 침투면에서 매우 불리한 상황이었으며 또한, 중앙부 코어가 소성이 작은 실트질 흙으로 축조되어 내부침식(internal erosion)에 상대적으로 취약했기 때문인 것으로 판명되었다.

이 사고로 인해 사고 발생 전 많은 주민이 대피한

관계로 인명 손실은 14명에 그쳤으나 매우 넓은 지역이 침수되는 등 약 10억 달러 이상의 경제적 손실이 발생하였다.

3. 댐 재해의 원인 및 영향

3.1 댐 재해 원인

댐 재해를 간단히 정의하면 댐이 붕괴하여 댐 하류지역의 인명과 재산에 피해를 초래한 경우라 할 수 있다. 그리고 여기서 “댐 붕괴”란 부속 구조물에

표 2. 댐의 손상 형태 및 시기(ICOLD, 1995)

시기유형	건설중	축조직후	축조후 5년 이내	축조후 5년 이후	이용하지않을 때	계
댐 기초 관련	2	10	15	6	1	34(25.2)
댐 재료 관련	1	8	5	14	1	29(21.5)
댐체의 구조적 거동	7	8	14	33	1	63(46.7)
부속 구조물의 거동	1	-	2	3	-	6(4.4)
기초와 구조물의 거동	-	1	-	1	-	2(1.5)
댐체의 구조적 거동 및 부속구조물의 손상	-	-	1	-	-	1(0.7)
계(%)	11(8.15)	27(20.0)	37(27.4)	57(42.2)	3(2.2)	135(100)

표 3. 댐 사고의 주 요인(ICOLD, 1995)

구 분	내 용	(설계 및 시공 공통 사항)
설계 관련	<ul style="list-style-type: none"> • 가능최대홍수량(PMF) 산정오류 • 여수로 방류능력 부적정 • 부적절한 재료의 선정 	<ul style="list-style-type: none"> • 댐 기초 및 제체의 누수/파이핑 • 댐체의 상·하류 사면파괴 • 월류(overtopping) • 저수지 양안의 활동(sliding) • 변형에 따른 콘크리트댐의 균열 • 변형에 따른 사력댐의 횡방향 균열 • 터널 및 배수로 등의 변형 • 방류관 및 배수시설의 파손 • 댐체의 경사(tilting)
시공 관련	<ul style="list-style-type: none"> • 나쁜 건설 관행 • 신·구 구조물의 접합 불량 	
운영 및 유지관리 관련	<ul style="list-style-type: none"> • 여수로 문비 기능 장애 • 여수로 문비의 폐색 • 여수로 감세공의 파손 • 콘크리트의 열화 • 사면보호공의 풍화/손상 	
자연현상 관련	<ul style="list-style-type: none"> • 지진 • 기상이변에 따른 대홍수 	
기타	<ul style="list-style-type: none"> • 테러리스트의 공격 또는 전쟁활동 • 상류댐 붕괴에 따른 하류댐의 연쇄 붕괴 	

서부터 전체 구조물의 파괴에 이르기까지 모든 범위에 적용되는 일반적 의미의 용어이다. 댐에서 붕괴 혹은 붕괴를 유발할 수 있는 손상 등은 월류, 균열, 파이핑, 침하, 변형침식, 침투, 사면활동 등 매우 다양한 요인으로 나타나며 그러한 손상을 유발하는 원인은 크게 홍수, 지진, 댐체의 노후화에 의한 댐체

의 구조적 결함 등과 같은 자연적 원인뿐만 아니라 설계오류, 부실시공, 및 유지관리 부실 등과 같은 인위적 원인에 의하여 발생된다고 할 수 있다.

표 2와 3은 1995년 ICOLD에서 집계한 세계 각국의 댐 사고 사례 135건에 대하여 댐 손상 형태, 발생 시기 및 주요 원인 등을 요약한 것이다.

댐의 재해와 대책

인위적 원인에 의해 댐 붕괴(손상)가 발생하는 경우를 '인적 오류'라 정의하면, 이는 다시 발생의 유형에 따라 '단기 오류(short time error, STE)'와 '장기 오류(long time error, LTE)'로 구분된다(Vogel, 2000). 단기 오류는 댐 건설 직후 또는 5년 이내, 그리고 초기 담수의 시기에 나타나는 반면, 장기 오류는 오랜 기간 잠재되어 다른 인자나 상황과 함께 복합적으로 나타나며 매우 위협적인 상황을 초래하기도 한다. Hirschberg et al.(1998)은 댐 파괴의 50%가 담수 전, 초기 담수 동안, 또는 초기 담수 후 5년 이내에 발생한다고 보고하였으며, 그에 따르면 댐 파괴의 50%가 단기 오류에 의한 것이라고 할 수 있다.

건설기간 중의 단기 오류는 a) 흙댐의 부분적인 흘러내림과 활동, b) 초기 담수기간 중에 건설 중인 댐체의 침식 또는 월류, c) 시공불량으로 인해 만수상태에서 댐의 완전한 붕괴 등 3가지 붕괴형태를 나타낸다. 영국의 Carsington댐은 1984년 건설기간 중 상류사면에서 500,000m³의 토사가 흘러내리면서 파괴되었다. 이와 비슷한 요인으로 인해 1888년에 오스트리아의 Prospect댐, 1909년 멕시코의 Necaxa댐, 1938년 미국의 Fort Peck Dam댐 등에 부분적인 파괴가 발생하였다. 초기 담수 시점으로부터 지질학적, 수문학적 또는 건설기간 중의 이러한 인적 오류들은 댐의 파괴를 유발하고 더 나아가 홍수파를 발생시켜 공공 위험을 증가시킨다. 1923년 이탈리아의 Gleno댐과 1925년 웨일즈의 Eigion댐의 파괴는 부실한 시공과 감리가 원인이 되어 발생한 경우로 600여명의 인명 손실을 초래하였다(Vogel, 1982).

수문학적 자료의 결핍은 통상 장기 오류를 초래하여 장기적으로 댐 운영에 치명적인 영향을 미친다. 이탈리아의 Sella Zerbino댐은 준공 후 10년이 경과

한 1935년 월류가 발생하여 기초부까지 완전히 파괴되었다. 이러한 조건하에서는 다양한 파괴요인에 대해 저항력이 우수한 것으로 간주되는 중력식콘크리트댐에서도 위험한 결과를 나타내게 된다. 또한, 댐 지역의 장기적인 수문학적 자료부족은 수문해석의 오류를 발생시켜 건설기간 중에도(즉, 단기오류) 월류에 의한 댐 파괴를 유발하기도 한다. Vogel(1993)이 조사한 바에 따르면, 월류에 의해 파괴된 85개의 댐 중에서 건설 중 13개, 준공 후 5년 이내에 19개의 댐이 파괴되었다(Vogel, 1993).

댐의 안전도 평가 측면에서 댐의 생애는 통상 건설기(birth stage: BS), 사용기(life stage: LS) 및 노화기(aging stage: AS) 3단계로 구분되는데, 노화기 단계는 (부실시공의 결과로서) 내부 침식이나 파이핑에 따른 파괴가 발생할 가능성이 높은 시기이며 또한, 공용 수명에 도달한 시점이 될 수도 있다. 인도의 Kantalai댐은 1400년간 운영 후 1986년에 파괴되었으며 미국의 Mohegan Park댐과 영국의 Warmwithens댐은 모두 110년간 운영되어 왔으나 내부 노후화에 의해 1963년 및 1970년에 각각 파괴되었다. 또한, 누수량 측정장치가 설치되지 않은 오래된 댐에서는 문제가 심각해지기 전까지 침식에 따른 위험한 상황을 감지하기가 거의 불가능하며, 노후화에 따른 파괴의 진행 속도는 너무 빨라서 그것을 인식한 후에는 대처하기가 거의 불가능하다.

3.2 댐 재해 영향

댐 재해의 영향은 Vogel(1993)이 파괴역학 이론을 기초로 댐 파괴의 진행과정을 연구한 결과에서 비교적 명확히 나타난다. 그는 댐 파괴시 파의 전달속도는 대략 3~7m/sec의 범위에 있으며 파괴에 의한 재

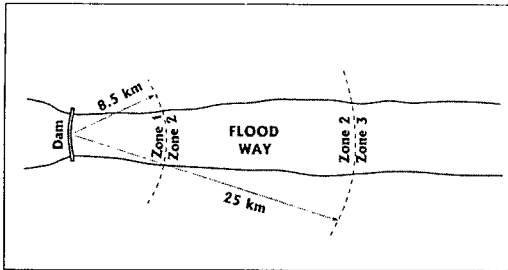


그림 3. 댐 파괴 발생시 홍수발생 영역(Vogel, 1993)

해 정도는 댐이나 저수지 규모와의 상관성보다는 파괴의 진행과정과 밀접한 관련이 있다고 하였다.

댐 파괴의 경우 홍수발생 지역은 그림 3과 같이 세 개의 영역으로 나눌 수 있다(Vogel 1993).

콘크리트 또는 석괴댐이 파괴되는 경우 초기 20분 내에 침수되는 Zone 1(하류 8.5km 반경범위)에서의 사람이나 동물의 생존 가능성은 희박하다. 표 4에서 보는 바와 같이 콘크리트 및 석괴댐에서 발생한 과거의 이력들은 이러한 비극적 사실을 극명하게 보여 준다.

안전을 고려할 때 댐이 운용되는 동안 Zone 1에는 사람이 거주하지 않아야 하며, Zone 2와 Zone 3에 대한 경보 체제의 구축은 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 댐으로부터 원격조정이 가능한 홍수 예경보 시설이나 원격지 통신시스템을 Zone 2와 3에 설치 하되 Zone 1의 침수범위 밖에 위치하여야 한다. 콘

크리트 및 석괴 댐의 파괴에 의해 야기되는 홍수는 막대한 힘을 갖고 있으므로, Zone 1에서 발생하는 홍수파고의 예측을 위해서는 예상되는 파괴요인에 대한 가능 파괴 시나리오(probable hazardous failure scenario, PHFS)를 반드시 고려하여야 한다. 적절하게 작동되는 예경보 시스템이 있는 경우, 댐 파괴 이후 초기 한시간 내에 침수되는 지역(댐 25km 하류)인 Zone 2에 살고 있는 사람들은 자력으로 대피 하는데 문제가 없으며, Zone 3의 하류지역 사람들은 공공의 비상조치계획에 따라 대피가 가능하다.

흙댐이나 제방댐은 그 붕괴과정이 콘크리트댐과 전혀 다른 양상을 보인다. 대부분의 경우 흙댐 및 제방댐은 파괴의 진행과정이 초기단계에서 최종적인 파괴단계에 이르기까지 상당한 시간이 소요된다. 이 경우 Zone 1에 거주하는 사람들의 효율적인 대피가 가능할 것으로 보인다. 좋은 예로서 1960년에 발생한 브라질의 Oros댐의 파괴를 들 수 있는데, 120,000명의 사람들이 대피할 수 있었으며 사상자는 50명 정도에 그쳤다. 또한 미국 LA의 Baldwin Hill 저수지가 1963년에 파괴될 당시 Zone 1에 상주 하던 수백명이 성공적으로 대피하였다.

월류에 의해 파괴가 발생하는 경우 대부분의 흙댐은 전체 높이까지 파괴되는데 약 0.2~3.0시간이, 록 필댐은 0.2시간이 소요된다. 그리고 상류에 위치한

표 4. 유럽에서의 콘크리트 및 석괴 댐의 파괴 사례(Vogel, 1993)

댐 명	파괴일시	인접도시	댐에서의 거리(km)	인명손실(인)
Puentes 3	1802/04/30	Lorca	12	680
Bouzey	1895/04/27	Bouzey	1	100
Gleno	1923/12/01	Dezzo	8	600
Sella Zerbino	1935/08/13	Ovada	8	100
Vega de Tera	1959/01/09	Ribadelago	7	144
Malpasset	1959/12/09	Frejus	7	421
Vajont	1963/10/09	Longarone	3	1994

댐의 재해와 대책

대댐이 파괴되어 발생하는 급작스런 홍수는 하류에 위치한 흙댐이나 사력댐의 전체를 휩쓸어버리기도 한다. 콘크리트댐은 보다 오랜 시간 월류에 견딜 수 있으나, 파괴의 진행속도는 매우 빠르다.

기초를 통한 파이핑 파괴의 경우 파괴에 소요되는 시간은 댐의 형식에 관계없이 약 0.5~4.0시간의 값을 보이며, 댐의 본체를 통한 파이핑 파괴가 발생할 경우에는 0.3~4.0시간까지 다양하게 분포한다. 댐 본체를 통한 파이핑은 댐 기초 형식에 관계없이 갑작스런 파괴를 가져오며, 이는 Puentes, Vega de Tera, Malpasset 댐 파괴의 경우와 같은 비극적인 예를 통해 알 수 있다.

4. 댐 재해 대책 방안

건설 중인 댐이나 기존 댐에 대해서 발생 가능한 재해를 방지하기 위해서는 기본적으로 댐의 안전성을 확보하는 것이 최우선 조건이 되어야 한다. 댐의 안전성에 관한 주요 이슈는 (1)기상이변 또는 이상기후로 인한 최대가능강수량(PMP)과 최대가능홍수량(PMF)의 증가, (2)지진발생 빈도 및 규모 증가에 따른 댐 설계기준의 강화, (3)기존댐의 노후화 및 (4)각종 필요에 의한 댐 재개발시 안전성 확보 등, 4가지로 요약할 수 있다. 이는 다시, 수문학적으로 안전한가? 불안정하다면 대책은 무엇인가? 구조적으로 안전한가? 불안정하다면 대책은 무엇인가? 하는 문제로 요약할 수 있다.

4.1 수문학적 안전성 확보

댐의 수문학적 안전성이란 “최대가능강수량

(PMP) 또는 가능최대홍수량(PMF)에 대한 댐체의 붕괴 가능성”을 의미한다. 여기서, PMP 및 PMF의 공학적 의미는 각각 다음과 같다.

- **최대가능강수량(Probable Maximum Precipitation, PMP):** 주어진 지속시간에 있어서 어느 특정 위치에 주어진 강우면적에 대하여 연중 어느 지정된 기간에 물리적으로 발생할 수 있는 이론적 최대 강수량
- **가능최대홍수량(Probable Maximum Flood, PMF):** PMP로 인한 홍수량을 말하며, 여수로나 댐마루의 표고를 결정하는 요소이며, 우리나라에서는 콘크리트댐의 경우 100년 빈도의 저수지 유입량을, 필댐의 경우는 200년 빈도의 저수지 유입량의 120%(500~1000년빈도)를 기준으로 산정

ICOLD(1995)의 조사 보고에 따르면, 댐 사고의 주요인 중 가장 큰 비중을 차지하는 요인은 월류(overtopping)이며, Vogel(1993)은 월류로 인해 붕괴된 댐의 주 원인은 유입량에 대한 낮은 추정치(65%), 원활히 작동하지 않는 수문(14%)이나 월류되었을 때 구조적 불안정성(21%) 등이라고 보고하였다. 따라서, 댐 붕괴에 의한 재해 방지를 위해서는 수문학적 안전성 확보를 통한 월류의 방지가 근본적인 조건이라 할 수 있다.

표 5는 국내 주요 다목적댐과 용수댐에 대한 설계 당시의 PMP 및 PMF 설계 현황을 나타낸 것이다. 그러나, 얼마전 최근의 이상기후 등을 포함한 기상자료를 반영하여 PMP를 재산정 해본 결과 설계 당시 PMP 보다 약 30% 정도가 증가된 것으로 나타나 이

표 5. 국내 주요 다목적댐 및 용수댐의 PMP 및 PMF 현황

구분	다목적댐						용수댐		
	대청	소양강	임하	충주	주암본댐	주암조절지	사연	영천	수어
PMP(mm)	625	519	632(730)	510	555(990)	598			
PMF(mm)	14,700	8,900	12,390	26,680	6,847	3,625	1,332	1,639	566

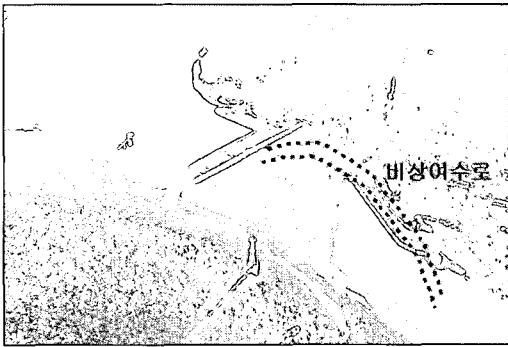


그림 4. 치수능력 증대를 위한 비상여수로의 설치방안 예

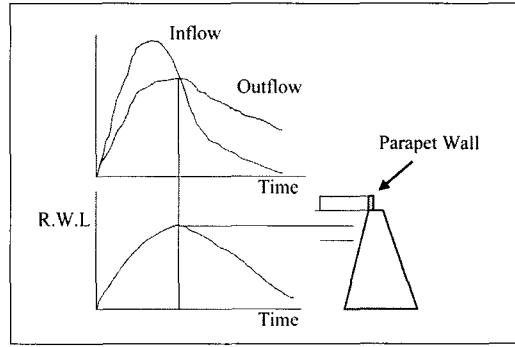


그림 5. 치수능력 증대를 위한 댐의 증고방안 예

에 대한 대책 마련이 시급한 것으로 나타났다.

PMP 증가에 따른 기존댐의 수문학적 안전성을 확보하기 위해서는 결국 최근의 기상자료를 고려하여 (1)PMP 및 PMF를 재산정하고, (2) 댐별로 치수(治水)능력확보 방안을 강구하며, (3) 주변 댐과 연계 운영을 도모하고, (4) 하류지역으로의 방류량을 조절하는 등의 방법을 강구하여야 한다.

댐의 치수능력을 증대하는 방법으로는 크게 비구조적 방법과 구조적 방법으로 구분할 수 있다. 비구조적 방법으로는 (1)제한수위를 재설정하여 운영하는 방법, (2)예비방류를 통하여 댐을 탄력적으로 운영하는 방법이 있으며, 구조적 방법으로는 (1)여수로를 확장하거나 신설하여 방류능력을 증대하는 방법, 그리고 (2)댐의 높이를 높이는 방법 등이 있다.

그림 4는 치수능력 증대를 위해 구조적 방법을 적용하여 댐의 좌안부에 비상여수로를 설치하는 경우의 예이다.

그림 5는 댐 높이의 증고를 통해 댐 치수능력을 증대하는 경우의 예이다. 이 경우 신설하는 Parapet Wall은 구조적으로 충분한 지지력을 갖지 못한 부재이므로 저수위 상승 등의 효과는 기대하지 않는 것이 안전하다고 할 수 있다.

4.2 구조적 안전성 확보

댐의 구조적 안전성은 필댐의 경우 1)사면안정, 2) 침투안정, 3)응력-변형거동, 4)지진시 사면안정 등에 의해 규정되고, 반면 콘크리트댐은 사면안정 대신 댐체에 대하여 전도, 지지력 및 활동에 대한 안정 여부 검토를 통하여 확인된다. 특히, 기존댐의 경우 댐 관리 주체별로 주기적인 안전점검을 실시하거나 “시설물의안전관리에관한특별법”이나 “농어촌정비법” 등의 법이 정한 바에 따라 정기적으로 정밀안전진단을 시행하여 위의 검토 항목을 포함하여 상세

댐의 재해와 대책

표 6. 안전점검·정밀안전진단의 주기 및 대상시설물(한국수자원공사)

구 분	빈 도	대상시설물	실시부서	비 고	
정기점검	• 분기 1회이상	1종, 2종, 기타시설물	관리부서		
정밀점검	초기점검	• 완공후 6개월이내 • 구조 형태변화시	1종, 2종시설물, 기타시설물	사업주관 부서	
	정밀점검	• 2년에 1회이상	1종, 2종시설물, 기타시설물		
간접점검	손상점검	• 재해나 사고시	1종, 2종시설물, 기타시설물		
	특별점검	• 필요시	1종, 2종시설물, 기타시설물		
정밀안전진단	• 5년에 1회이상	• 완공후 10년경과 1종시설물	사업주관 부서	한국시설안전기술공단 또는 안전진단전문기관	
	• 필요시	• 1종, 2종, 기타 시설물			

※ 정밀점검 및 정밀안전진단이 동일시기에 실시하여야 할 경우에는 상위점검 또는 진단으로 실시한다.

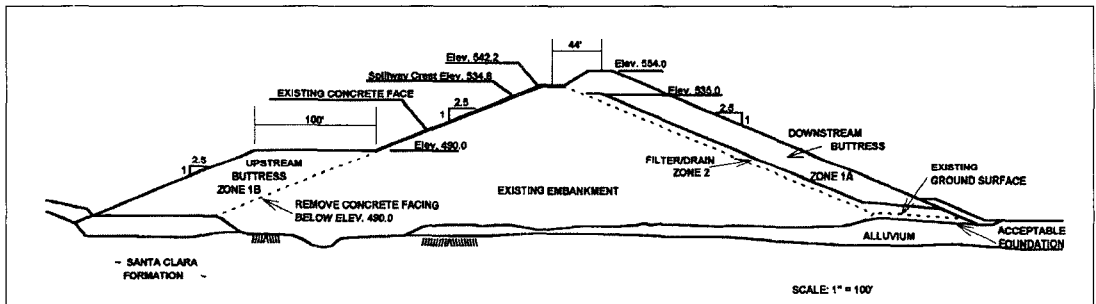


그림 6. 내진성능 향상을 위해 보강된 Stevens Creek댐

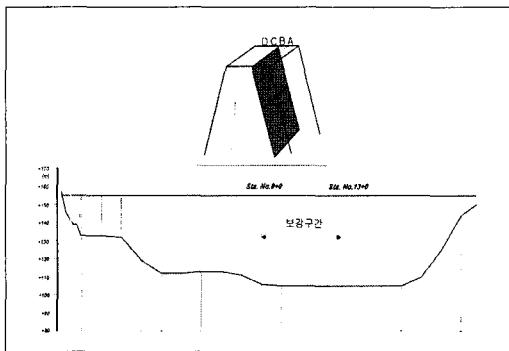


그림 7. 댐체에 손상이 생겨 Compaction Grouting공법으로 보수한 사례

외관조사, 댐체 상태에 대한 정밀조사의 실시 및 필요 시 보강대책 등이 수립되도록 하고 있다(표 6 참조).

댐의 구조적 안전성이 만족되지 않을 경우 대책방안은 다음과 같이 비구조적 방법과 구조적 방법으로

구분할 수 있다.

- (1) 비구조적 방법 : 저수위 조절 또는 방류량 조절 등의 댐 운영을 통한 안정성 확보 방법
- (2) 구조적 방법 : 문제 구간으로 파악된 구간에 대하여 적극적으로 보강을 실시하거나 상류 또는 하류 사면에 덧대기식으로 추가하중을 가하거나, 상류 또는 하류 지역에 댐을 신설하는 등의 방법

그림 6은 미국의 Stevens Creek댐에서 지진시의 안정성을 확보하기 위해 상류와 하류에 압성토 하중을 가한 경우이다. 이 댐은 1978년에 완성되었으나

표 7. 일반적인 손상종류별 보수·보강 대책공법

구분	손상 종류	보수·보강 대책	
필댐	누수	· 차수벽 설치 · 불투수층 설치 · 슬러리 벽체 설치 · 그라우팅 공법	· 배수로 설치 · 감압정 설치 · 블랭킷 설치
	사면활동	· 저수지 수위 저하 · 말뚝 타설공법 · 압성토 공법	· 사면 보호공 · 표면 차수벽 설치
	변위	· 치환공법 · 그라우팅 공법	· 덧쌓기 공법 · 방호벽 쌓기
	균열	· 그라우팅 공법 · 토목섬유 부설	· 표면 차수벽 설치
콘크리트댐	동결융해	· 프리팩트 공법	· 패칭 공법
	누수	· 에폭시 주입공법 · 그라우팅 공법 · 차수막 설치	· 프리팩트 공법 · 지수판 설치
	세굴	· 세굴 배근 · 에폭시 몰탈	· 공동현상 부위에 공기구 설치
	기초지반의 불안정	· 그라우팅 공법	· 배수공 설치
	균열	· 치환 공법 · 탄소섬유 보강공법 · 단면 보강공법	· 강재 보강 공법 · 철판 압착 공법 · 에폭시 주입 공법

내진안정성 평가결과 안정성이 부족한 것으로 나타나 상류 및 하류지역에 부벽(Butress Zone)을 시공하여 보강하였다.

그림 7은 과도한 누수량이 발생하여 침투에 대하여 취약한 곳으로 파악된 구간에 대하여 Compaction Grouting 공법으로 보강한 사례를 나타낸 것이다.

표 7은 필댐과 콘크리트댐이 손상되었을 때 손상유형별로 보수·보강하기 위한 공법을 나타낸 것이다.

4.3 댐 안전관리 체계 확립

댐 재해 방지는 우선적으로 재해 위험이 있는 댐에 대한 수문학적 및 구조적 안전성 확보를 통해 가

능할 수 있으나, 이러한 개개 댐에 대한 안전성 확보 노력은 기본적으로 국가적 차원에서 체계적으로 구축된 댐 안전관리시스템 하에서 가능하다 할 수 있다. 미국과 일본 등 방재 선진국이라 할 수 있는 국가들은 오래 전부터 댐 안전과 관련한 법률을 제정하고, 이를 기초로 국가차원의 댐 안전관리 체계를 구축하여 댐 재해 방지를 위한 노력을 기울이고 있다.

국내의 댐안전 관리는 90년대 이후 성수대교붕괴(94. 10) 등 대형공공시설의 안전사고 발생을 계기로 대형공공시설물에 대한 안전관리분야의 관심이 높아짐에 따라 시설물의 관리자에게 안전관리 의무와 책임을 부여하기 위해 1995년에 제정된 “시설물의 안전관리에관한특별법”과 “동법시행령 및 시행규

댐의 재해와 대책

칙”, 그리고 1994년에 제정된 “농어촌정비법” 및 “농업기반시설 관리규정” 등과, 각 댐 관리주체가 자체적으로 정하고 있는 댐 안전관리에 관한 내규에 따라 이루어지고 있다. 또한, 댐 안전관련 기관으로는 건설교통부, 농림부, 각 지방자치단체 등의 정부 기관, 한국수자원공사, (주)한국수력원자력, 한국농촌공사 등의 댐 운영관리기관과 한국대댐회, 최근 한국지반공학회 산하에 신설된 댐·제방기술위원회 등과 같은 학술단체가 있다. 그러나 아직까지는 관련 전문가의 숫자가 적어 효율적인 댐 안전관리에 많은 어려움을 겪고 있는 상황이며, 2006년 현재 전국에 산재한 댐들의 안전 현황에 대한 조사 및 통계 자료 등도 턱없이 부족하여 엄밀히는 한국의 댐 안전 현황을 정확히 알고 있지 못한 실정이라 할 수 있다. 따라서 보다 체계적인 댐 재해 방지를 위해서는 국가 차원의 정책적 지원 및 예산지원 등이 시급한 상황이다.

다행히 최근 정부에서도 댐 안전성 확보를 통한 재해 방지의 필요성을 인식, 국가차원의 댐 및 저수지 안전관리에 관한 법률 제정이 검토되고 있어 차제에 이를 바탕으로 국내 댐 안전관리 및 재난방지 체제를 선진국 수준으로 발전시키기 위한 체계적인 댐 안전관리시스템을 구축하도록 노력해야 할 것이다.

5. 댐 재해 예방을 위한 연구 및 기술개발

댐은 약 5,000년 전부터 축조되기 시작하여 전 세계적으로는 36,000여개, 국내에는 약 18,000여개의 대댐이 있으나, 지반공학의 이론과 그 이론에 부합하는 시공기술로 축조된 댐이 나타나게 된 것은 불과 100년이 채 되지 못한다. 20세기 초에는 주로 콘

크리트댐이 축조되었고, 1930년대 부터 Terzaghi 등에 의하여 토질역학이 눈부시게 발전을 하면서 높은 필댐이 축조되기 시작하여 현재는 러시아에 높은 335m의 댐이 건설되고 있다(KNCOOLD, 2006).

한편, 전 세계적으로 수많은 댐이 건설되면서 설계 및 시공기술은 매우 발전해 왔으며 특히, 20세기에 발생한 댐 붕괴로부터 얻은 안전 유지관리 기술 개발이 절실히 필요하다는 교훈을 남겨주었다. 이러한 교훈에 따라 선진외국에서는 전자·전기 분야, 생명공학, 컴퓨터공학 및 군사 분야 등에서의 각종 첨단기술을 융합시켜 댐 시설물의 안전상태를 조사하고 평가할 뿐만 아니라, 기상이변 또는 지진 등과 같은 자연재해 발생시의 댐의 거동을 예측 또는 감시함으로써 댐의 붕괴를 사전에 예방하고, 필요시 또는 댐의 잠재위험도에 따라 신속하고 경제적으로 적절히 대처할 수 있는 기술력을 갖추어 나가고 있다.

우리나라의 경우는 1990년대 후반부터 주로 기존 댐에 대한 내진안정성 조사 및 평가 기술, 기상이변에 따른 PMP/PMF 급증과 그에 따른 댐의 방류능력 증대 기술, 기존댐의 안전도 평가 및 보수·보강 기술 등에 대한 연구개발이 주로 정부투자기관 연구소(예: 한국수자원공사 댐기술연구소, 한국전력연구원, 한국농촌공사 농어촌연구원)와 학계(예: 한국지반공학회(댐·제방 기술위원회), 한국대댐회) 등을 중심으로 활발히 이루어지고 있다.

6. 결론 및 제언

댐은 붕괴시 도로, 철도, 기타 건축물이나 항공사고 등으로 인해 발생하는 재해보다도 일반적으로 더 큰 규모의 재해를 유발하는 중요한 사회기반시설물

이다. 최근 우리나라에서는 세계적으로 공통적으로 겪고 있는 지구온난화 등에 의한 기상이변과 노후화 된 댐들의 증가에 따라 댐의 안전에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다. 그러나 아직까지 전국의 수많은 댐들에 대하여 전체적인 안전 현황이 파악되지 않은 상태이며 따라서 댐 재해 방지를 위한 대책 마련이 시급한 실정이다. 이와 관련, 국가차원의 체계적인 댐 안전관리시스템을 구축하여 우리나라 전체 댐에 대한 안전 현황을 파악하고 우선적으로 재해 위험이 높은 댐들에 대하여 안전성을 확보토록 해야 할 것이다. 또한, 한정된 국토의 효율적 이용과 환경 복원 등의 측면에서 노령화된 댐 또는 저수지 시설을 활용하는 방안도 댐 안전확보 및 재해저감 차원에서 고려해볼 일이다.

2. 김기석 (2003). "우리나라 댐 및 제방의 안전성 제고를 위한 대책 및 방향." 방재정보, 제 15호, 한국방재협회.
3. 한국대댐회(KNCOLD) (2006), <http://www.kncold.or.kr/korean/dam>.
4. Hirschberg, S., Spiekerman, G., Dones, R. (1998). Severe Accidents in the Energy Sector. PSI Report. W renlingen and Villigen, Switzerland.
5. ICOLD (1995). Bulletin 99, Dam Failures, Statistical Analysis, Paris, 73pp.
6. Vogel, A. (1982). Die Gewichtsmauer im Talsperrenbau. Osterreichische Ingenieur-und Architekten-Zeitschrift, Nr. 11: pp. 385-392.
7. Vogel, A. (1993). Research for Risk Evaluation of Dam Failures Caused by Overtopping. Data Station for Dam Failures-Vienna, 93pp.
8. Vogel, A. (2000). "The influence of the dam type to the hazards of dam failures caused by human factors.", Proceedings of Esrel 2000, SARS and SAR-Europe Annual Conference, Edinburgh, Scotland, UK.

참 고 문 헌

1. 김경덕, 방돈석, 안상로 (2003). "댐 붕괴사례 조사 및 분석." 방재정보, 제 15호, 한국방재협회.

광고 게재 모집 안내

월간 "地盤"에 게재할 광고를 다음과 같이 연중 수시로 모집하오니 지면을 통하여 회사를 홍보하고자 하는 업체 및 회원은 신청하여 주시기 바랍니다.

- 다 음 -

(단위: 만원 / 회)

	표지 2, 4	표지 3	내 지
칼 라	60	50	45
흑 백	40	30	25

※ 1년 단위 계약 10% DC, 특별회원사 15% DC (1년 단위 계약 10% DC 추가)