

댐 · 제방의 붕괴 및 홍수범람

한 건 연 (경북대학교 토목공학과 교수)

김 원 (한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원)

1. 서론

최근에 들어 지구상에서는 담수원이 한계에 달하고 있는 상황에서, 이제 댐은 지표수를 제어하고 저류할 수 있는 최선의 수단이 되고 있다. 그러나, 댐은 극한강우 발생상황에서 예기치 못한 붕괴시 항상 잠재적인 위험성을 내포하고 있으며, 특히 댐 하류부 지역이 인구밀집 지역이거나 중요 국가 시설물이 위치하고 있는 경우에는 그 위험성에 대한 평가가 더욱 필요하다. 댐의 잠재적 위험성 가운데, 댐 붕괴는 한계 설계조건(예를 들어, 수리·수문학적 조건 및 지반공학적인 제반 조건)에 대한 잘못된 계산이나 부적절한 평가, 시공상의 부실 및 댐 운영에서의 오류 등으로 인해서 발생될 수 있다.

실제적으로 커다란 재앙을 불러 일으켰던 댐 파괴가 발생된 바 있고, 향후 발생될 가능성은 상존하고 있는 상황이다. 통계적인 분석결과에 의하면, 미국에서는 매년 한 개 이상의 평균적인 비율로 상당한 규모의 댐들이 붕괴되는 것으로 보고된 바 있다(Ellingwood 등, 1993). 댐 붕괴시 붕괴부를 통해 일시에 유출되는 대규모의 저수유량으로부터 야기되는 폭발적인 파괴력은 댐 하류부에 거주하는 인명 및 재산피해에 막대한 손실을 초래할 수 있다. 댐 붕괴를 일으키는데 있어 가장 위험한 호우조건은 규모적인 측면뿐 아니라, 댐 붕괴에 특별히 직접적인 원인 제공을 하게되는 집중적인 호우라고 할 수 있다. 다행히, 전체 기존 댐 가운데, 금세기 동안에 파괴되는 비율이 설계나 시공적인 면에서 기술적인 향상으로

인해 줄어들고 있으나, 최근의 기상이변에 따라 댐 붕괴, 제방붕괴 등에 따른 홍수해석의 필요성이 크게 대두되고 있다.

최근의 피해상황으로는 1990년 9월에는 일산 제방붕괴로 인한 일산지역의 대침수 피해, 1991년 8월에는 태풍 Gladys에 의한 부산 수영강 상류부의 제방월류에 따른 저지대 침수로 인한 큰 피해가 있었다. 1992년 9월 방조제 붕괴로 인한 목포시의 침수 피해와 1995년 태풍 Janis와 집중호우로 인해서 금강, 남한강, 북한강, 삼교천, 내성천 등 전국에 걸친 하천유역에서 범람침수 피해가 있었다. 1996년 한탄강 유역에서 발생된 연천댐의 붕괴와 이에 따른 제방 월류에 의한 범람피해 등은 이 분야에 대한 종합적인 연구의 필요성을 증대시켰다.

특히, 1998년 전국적으로 내린 유례없는 집중호우로 인한 피해와 1999년 경기 북부의 문산지역 등에 내린 범람침수로 인한 피해는 댐 붕괴와 제방붕괴에 따른 홍수발생시 예상될 수 있는 피해규모의 산정과 이에 대비하기 위한 구체적인 대책 마련을 시급히 요구하고 있다.

2. 댐 및 제방붕괴의 발생원인

댐과 같은 수공구조물은 설계와 관리에 있어 만전을 기하고 있음에도 불구하고, 예기치 못한 붕괴로 인한 피해는 막대하다. Jansen(1980)에 의해 조사된 자료에 의하면 12세기 이후 전 세계적으로 2,000여 개의 댐이 붕괴되었으며, 지난 1세기 동안에는 약

200여개의 특이할 만한 인공 댐들의 붕괴가 있었는데 이로 인하여 11,100명 이상의 인명이 희생되었다.

표 1.은 댐붕괴 사례 중 주요내용을 외국학자에 의해서 정리된 것으로 국내의 경우 효기리댐이 명시되어 있는 것이 눈에 띈다.

댐의 붕괴원인에 있어서, 미 육군공병단이 미국내의 8,639개 댐에 대하여 실시한 안전도 진단에서는 약 1/3이 불안정한 것으로 판정되었는 바, 주된 결합원인은 82%가 여수로의 단면부족이었다.

Gruner(1963)의 조사에 의하면 1799년~1944년의 기간에 308건의 댐 붕괴 사건이 있었는데 이 중 57%가 흙댐이었고, 23%는 중력댐, 3%는 아치댐, 나머지 17%는 기타 형식이었다.

붕괴의 주된 요인으로는 부등침하 및 지진 등을 포함한 기초부 유실이 51%, 부적당한 여수로가 23%, 파이핑과 침투가 7%, 부실시공 및 운영실수 등의 기타 원인이 19%였다. Biswas와 Chatterjee(1971)은 세계 전역의 300개 이상의 붕괴댐에 대하여 검토한 결과, 35%가 여수로 통수능을 초과한 홍수로 인한 붕괴, 25%가 침투, 파이핑, 초과간극수압, 부적절한 절토, 침하, 활동 등의 기초부 문제였고, 40%가 부실시공 및 불량재료, 파랑의 작용, 전쟁 등으로 인한 붕괴였다.

국제 대댐위원회(ICOLD)에서의 1900년과 1973년 사이에 붕괴된 높이 15m 이상의 댐에 대한 조사결과 주요한 세 가지의 붕괴요인은 월류 및 부적절한 여수로(34%), 기초부 결합(30%), 파이핑(28%) 등이었다. 콘크리트 댐의 주요 붕괴

원인은 기초부 결합(53%)이었으며, 토사댐의 경우는 파이핑과 침투(38%) 및 월류에 의한 붕괴(35%)였다. 댐 붕괴의 주된 원인들은 댐 설계시에 설계홍수량의 크기와 빈도를 과소 산정하였거나 기초지질의 부적절한 처리에 기인함을 보여준다.

댐 붕괴에 있어 fill 댐의 경우에는 상당한 기간이 경과됨에도 불구하고 파이핑과 침투에 의한 붕괴도 상당한 비중을 차지함을 알 수 있으며, fill 댐에 대한 유지보수의 필요성이 콘크리트 댐보다 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 우리나라에서의 댐 연령도 점차 노후화 되고 있으므로 월류 등에 의한 붕괴확률은 증대된다고 사료되므로 이에 대한 대책 수립이 절실

표 1. 댐 붕괴 사례 중 주요내용 (Lou, 1981)

댐명	국가	붕괴 일시	인명 피해	재산 피해(백만\$)
Puentes	Spain	April 30, 1802	600	1.0
Mill River	USA	1874		
Lynde Brook	USA	1876		1.0
South Fork	USA	May 31, 1889	2,200	100.0
Saint Francis	USA	March 13, 1928	450	1.5
Brokaw 2	USA	1938		0.7
Veg de Tera	Spain	January 10, 1959	144	
Malpasset	France	December, 1959	421	68.0
Oros	Brazil	March 25, 1960	50	
Babii Yar	USSR	March, 1961	145	4.0
Hyokiri	Korea	July, 1961	250	
Quebrada La Chapa	Columbia	April, 1963	250	
Vaiont	Italy	October 9, 1963	3,000	
Baldwin Hills	USA	December 14, 1963	3	50.0
Mayfield	USA	1965		2.5
Vratsa	Bulgaria	May 1, 1966	600	
Nanak Sagar	India	September 8, 1967	100	
Sempor	Indonesia	December 1, 1967	200	
Wyoming	USA	1969		1.5
Pardo	Argentina	1970		20.0
Buffalo Creek	USA	February 26, 1974	118	65.0
Teton	USA	June 5, 1976	6	70.0
Hirakund	India	September 20, 1980	118	

히 요구되고 있다.

유럽과 미국에서 1900년과 1969년 사이의 건설된 각종 댐의 구성비는 fill 댐이 58%로 가장 많았고, 중력 댐은 26%로 두번째를 차지하고 있다. 붕괴된 댐 중 약 74%가 fill 댐이었으며 댐의 붕괴확률 측면에서는 중력 댐이 가장 안전하였고, 그 다음이 부벽식과 fill 댐 인것을 보여준다. 부벽식 댐은 건설된 예가 가장 적으며 가장 불안한 것으로 보고되었다. 우리나라의 경우는 관개용 댐의 약 95%가 토사댐으로서 전체 댐의 대부분을 차지하고 있다(한건연 등, 1997). 표 2.는 댐 붕괴 원인에 대해서 여러 과학자들에 의해 조사된 결과를 요약한 것이다.

3. 댐 및 제방 붕괴의 위험도

댐의 붕괴확률에 관해서 많은 학자들이 연구한 바 있다. Serafim(1981)의 조사에 의하면 연간 댐 붕괴 확률은 10^{-4} /dam-year, 댐의 수명기간 (100년)동안 파괴될 확률은 10^{-2} /dam-year로 각각 산정되었다. Baecher 등(1980)의 조사에 의하면 세계 전역에서의 댐 붕괴 자료로부터 예측된 댐의 붕괴 위험도는 $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ /dam-year, 미국의 경우는 $3 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ /dam-year으로 추정되었다. 표 3.은 Baecher(1980)에 의해서 전세계와 미국에 대한 댐의 붕괴확률을 정리한 것이다.

Mark와 Stuart-Alexander(1977)에 의하면, 주요 댐의 붕괴만을 고려할 때 미국에서 붕괴확률은 0.8

표 2. 댐 붕괴 원인요약(Lou, 1981)

붕괴원인	Middle-brooks (1953)	Grunner (1967)	Takase (1967)	Babb와 Mermel (1968)	Biswas와 Chatterjee (1971)	USCOLD (1975)
월류(overtopping)	30	23	28	36	35	38
파이핑과 침윤 (piping or seepage)	38	40	44	30	25	44
활동(Sliding)	15	2	10	15	-	9
기타	17	35	18	19	40	9

표 3. 조사된 댐의 붕괴 확률(Baecher 등, 1980)

지역	참고문헌	붕괴된 댐의 수	전체 댐의 수	조사기간	붕괴확률 (dam-year)
미국	Gruner(1963, 1967)	33	1764	40	5×10^{-4}
	Babb와 Mermel(1968)				
	Post - 1940 dams	12	3100	14	3×10^{-4}
	USCOLD (1975)	74	4914	23	7×10^{-4}
	U.S. Bureau of Reclamation	1	4500**		2×10^{-4}
	Mark와 Stuart-Alexander(1977)	125	7500	40	4×10^{-4}
전세계	Middlebrooks(1953)	9	7833	6	2×10^{-4}
	Mark와 Stuart-Alexander(1977)				
일본		1046	2×10^6	15	4×10^{-5}
스페인		150	1620	145	6×10^{-4}

* 대략치

** Dam-years의 단위

표 4. 댐의 붕괴확률(da Silvera, 1990)

붕괴확률($\times 10^{-3}$)		콘크리트 및 석조댐	흙댐
구	분		
댐 완공년도	1900년 이전	4.2	5.3
	1900 ~ 1919	11.2	28.3
	1920 ~ 1939	8.4	11.2
	1940 ~ 1959	1.4	8.4
	1960 ~ 1975	1.4	3.5
댐 높이(m)	< 15	2.5	4.2
	15 - 30	6.3	8.4
	30 - 50	2.8	8.4
	50 - 100	5.6	14.7
	> 100	0	0

$\times 10^{-4}/\text{dam-year}$ 이고, 세계적으로는 $2 \times 10^{-4}/\text{dam-year}$ 으로 조사되었다.

물론 이러한 추산치는 많은 불확실성을 내포하고 있으나 단지 세계적으로 댐 붕괴의 확률을 대한 전반적인 결론은 대략 $10^{-4}/\text{dam-year}$ 이다. 이 위험률은 인명의 희생 가능성이 높은 댐의 편익-비용 해석 및 기존 댐의 유지보수시의 비용 분담 등에서 중요한 자료가 될 수 있다(Mark와 Stuart-Alexander, 1977; Rose, 1978). 표 4.는 da Silvera(1990)에 의해서 조사된 댐의 붕괴확률을 요약한 것이다.

1963년~1983년 사이에 미국에 발생한 댐 붕괴 홍수에 따른 인명 및 재산피해를 나타낸 것으로서 연간 인명 사상 피해는 14명이었다. 이와 같은 피해는 매년 일반적인 홍수에 따른 인명사상 피해가 200명, 산사태에 따른 피해가 25명, 지진에 따른 피해가 12명, 쓰나미에 따른 피해가 6명인 것과 비교된다(Costa와 Baker, 1981). 이 기간동안 15m보다 작은 규모로 건설된 댐의 붕괴는 전체 댐 붕괴의 90%에 달하는 것으로 나타났다. 지난 세기동안 미국에서 붕괴된 20개의 댐에서 얻은 자료를 기초로 하여 미국 개척국(1983)의 조사자료에 의하면 댐의 붕괴당 평균 희생자의 수는 붕괴시의 적절한 경보체계가 있었던 경우보다 없었던 경우가 무려 19배 이상이 되었음을 분석하였다.

표 5.는 위험도에 따라 댐을 분류한 것이다. 실제로 선진국에서는 댐의 크기나 규모별로 관리하는 시

스템에서 예기치 못한 사고로부터 나타날 수 있는 하류부 피해의 가능성인 위험도에 따라 댐을 구분하고, 이를 통해서 댐의 유지관리 및 보수방안을 수립하고 있다.

4. 댐 및 제방 붕괴의 양상

4.1 Fill 댐

① 일반사항

Fill 댐은 아직까지는 가장 일반적인 댐의 유형이다. 미국에서는 운영중인 전체 주요 댐의 79%가 fill 댐으로 조사된 바 있고(USCOLD, 1975), 우리나라의 경우는 관개용 댐의 약 95%가 fill 댐으로서 전체 댐의 대부분을 차지하고 있다(한건연 등, 1997).

Fill 댐은 土砂, 砂礫 및 岩石 등의 재료를 쌓아올린 부분을 댐의 본체로 하고, 본체의 상류측 또는 댐 전체에 대해서 차수벽을 설치하여 축조된다. 본체를 구성하는 재료의 50%가 토사입자일 경우를 earthfill 댐, 토사가 아닌 사력, 암석 등이 50%를 넘을 경우를 rockfill 댐으로 구분하였으나, 일반적으로 양자의 혼합인 경우가 많고 이를 구별하기보다는 fill 댐으로 명명하는 경우가 일반적이다. Earthfill 댐의 경우 안정성의 조립토사와 수밀성의 점토층을 조합시켜 바깥측에 조립토사, 중앙부에 점토를 넣으며, 그 구성방식으로는 core형과 zone형이 있다. Rockfill 댐의 경우는 댐의 본체와 수밀성 차수벽을 조합시키며, 그 방식으로는 표면차수벽형과 내부차수벽형이 있다.

② 붕괴양상

Fill 댐의 붕괴를 초래하는 파괴형태는 월류, 파이핑, 활동 및 흐름 침식 등으로 분류된다. 이러한 파괴형태는 붕괴부를 확대시키는 호르는 물의 침식 작용에 의한 댐 재료의 소실에 좌우된다. 따라서, 댐에서 붕괴부를 완전히 형성하는데 필요한 크기, 형태 및 시간은 댐의 재료, 크기 및 파괴 지속시간 동안의 저수지에서의 유입 및 유출량 등에 좌우된다.

댐의 월류는 일반적으로 부적절한 여수로 용량 및

홍수시 여수로상에서 발생하는 방해물에 의해 발생한다. 댐 제체를 월류하는 수체는 유속이 가장 큰 사면의 끝부분에서 시작하여 하류부 사면을 침식한다. 월류로 인한 붕괴는 댐의 취약 지점에서 시작되고, 하류부 사면 침식에 의해서 약화된 댐의 다른 부분으로 서서히 또는 빠르게 확대된다.

파이핑에 의한 붕괴는 댐 자체를 통한 침투나 교대의 경계면에서의 침투에 의한 내부 침식의 점진적인 전개에 의해 발생된다. 침식은 댐으로부터 침투가 발생하는 지점에서 시작하여 침투범위를 서서히 확대시키며, 댐의 후면부로 진행된다. 침투에 의해 생성된 공동은 공동 위의 댐 부분이 무너질 때까지, 댐의 상부를 침강시키며 확대된다. 댐의 아래 부분을 월류하는 물은 댐 재료를 침식해서 붕괴부를 확대시킨다. 붕괴에 의해 약해진 댐의 부분은 이 부분에 작용하는 저수압력의 영향으로 인해 갑자기 무너질 수 있다.

③ 붕괴부의 특성

그림 1.과 2.는 월류와 파이핑에 의한 fill 댐의 붕괴양상을 도시한 것이다(Singh, 1996). Fill 댐에서 형성되는 붕괴부의 형상과 크기는 유량의 흐름 조건과 댐 제체를 구성하고 있는 재료의 침식성에 따라 다르게 나타난다. 과거에 발생한 댐 파괴 현상들을

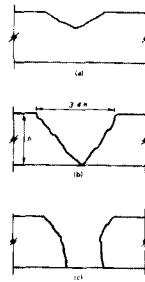


그림 1. 월류에 의한 붕괴부의 형성과정

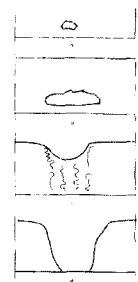


그림 2. 파이핑에 의한 붕괴부의 형성과정

살펴보면, 붕괴부는 처음 삼각형의 형태로 나타나다가 제체를 이루는 재료가 기초 암반이나 침식이 어려운 조건을 접할 때까지, 혹은 붕괴부를 통과하는 저수위 수위가 더 이상 제방을 침식시킬 만한 유속을 만들어 내지 못할 때까지 아래쪽으로 발달하게 된다. 만약 제체의 침식작용이 기초 암반 등과 같은 어떠한 저항력을 가진 지반층에 의해 저지된다면, 수직방향으로의 침식작용이 측방향으로 계속해서 발행하고 붕괴부는 결국 사다리꼴의 형상을 나타내게 된다.

Fill 댐의 침식작용에 대한 모형 실험에서 제방이 균질인 경우 수평방향으로 발생하는 침식율은 붕괴부를 통과하는 수위에 따라 다르게 나타나는 것으로 나타났다. 즉, 측방향으로의 침식율은 붕괴부에서의

표 5. 위험도에 따른 댐의 분류

구 분	댐 높이(ft)	저류용량(ac-ft)
댐의 크기		
소규모	25 ~ 40	50 ~ 1,000
중규모	40 ~ 100	1,000 ~ 50,000
대규모	100이상	50,000이상
구 분	인명 피해(개발 범위)	경제적인 손실
위험가능성		
낮은 정도	인명피해 없음(주민 주거를 위한 시설물이 없음)	경제적 손실 적음 (구조물과 농업에 대한 시설이 개발되지 않은 지역)
중간 정도	인명피해 적음 (도시화가 이루어지지 않았고, 주민 주거를 위한 시설물의 수는 적음)	경제적 손실 약간 있음 (농업, 산업, 구조물에 대한 피해가 존재함)
높은 정도	인명피해가 있거나 큼	경제적 손실 막대함 (지역사회, 농업, 산업에 대한 피해가 막대함)

수위가 감소함에 따라 작아진다. 따라서, fill 댐이 파괴되는 동안에, 붕괴부가 커지는 비율은 물이 저수지 밖으로 흘러나가고 저수지에서의 수위가 떨어짐에 따라 감소할 것이다. 만약 체체가 길고 댐이 저류하고 있는 물의 양이 클 경우, 붕괴부가 완전하게 형성되기 위해서는 많은 시간이 필요할 것이다.

4.2 Concrete 댐

① 일반사항

콘크리트 댐은 중력댐, 부벽식 댐, 아치댐 및 아치-중력댐 등으로 구분된다. 한강유역에서 운영중인 다목적 댐은 충주댐을 제외하면 모두 콘크리트 댐이며, 미국의 모든 주요 댐의 16% 이상이 콘크리트나 석조로 만들어졌다.

콘크리트 댐의 가장 보편적인 형태인 중력댐은 블록 사이의 이음새에 모르타르나 유연한 썰을 사용하여 콘크리트나 석조의 비강화 블록으로 만들어진다. 중력댐은 그 무게에 의해서 전도와 활동에 저항한다. 부벽식 댐은 연직 방향 지지력에 저항하는 콘크리트 슬래브로 구성되며, 상류면 슬래브에 작용하는 수압은 안정성을 유지하기 위해서 부벽을 통해 기초지반에 전달된다.

② 붕괴양상

중력댐은 전도나 활동에 의해서 기초부를 따라 파괴된다. 댐의 사용년한이 길어짐에 따라 블록 사이의 모르타르나 썰의 질이 저하되어 조인트 사이에서 누수가 발생한다. 누수는 댐의 저부에 작용하는 양압력에 의해서 증가될 수 있고, 다른 재하 하중과의 조합으로 전도의 원인이 될 수 있다. 수압에 의한 수평방향 작용력은 중력댐의 저부에 압력을 증가시키게 되고, 이 힘은 댐의 넓은 단면에서 하류방향으로 활동을 일으킬 수 있다.

콘크리트 중력댐의 활동에 의한 파괴는 통상 기초부 내의 응력에 의해서 발생한다. 석조 중력댐의 활동에 의한 파괴는 기초와 댐의 체체 내에 작용하는 압력에 의해 발생한다. 부벽식 댐은 일반적으로 부벽의 바닥에 작용하는 과중한 하중에 의해서 파괴가 발

생한다. 넓은 규모의 기초하중은 지지 암층을 붕괴시킬 수 있는데, 이것이 댐을 하류방향으로 활동시키는 원인이 되기도 한다. 부벽식 댐 역시 전도에 의해 파괴될 수 있다.

대부분의 콘크리트 댐은 다른 나쁜 영향이 없는 제한된 시간 내에서는 홍수에 의한 월류를 잘 견뎌낼 수 있다. 반면에 석조댐은 콘크리트 댐보다 훨씬 빠른 속도의 비로 침식될 것이고, 따라서 훨씬 월류에 의해 붕괴될 가능성이 크다.

③ 붕괴부의 특성

콘크리트 댐에 발생하는 파괴양상은 fill 댐과는 상반되는데, 단지 數分만에 댐의 최종 형태에 도달하는 급격한 붕괴부 발달과정을 나타낸다. 콘크리트 댐의 파괴의 최종 형태는 거의 연직하는 측면면 경사를 가진 사다리꼴 형상을 가진다.

콘크리트 댐의 구조적인 지지 특성 때문에 파괴가 거의 댐 체체의 상당부 또는 체체의 완전한 붕괴를 나타내기도 한다. 1959년에 붕괴된 프랑스에 있는 아치 댐인 Malpasseeet 댐의 경우는 대부분 완전하게 붕괴되었다.

부벽식 아치 댐은 때로는 파괴의 범위가 제한된 인접한 부벽 사이의 한 단면만이 유실된다. 중력식 댐의 경우 하나 또는 그 이상의 일체 단면들이 댐이 붕괴되는 동안 댐의 안정성과 댐에 작용하는 힘에 따라 해체될 수도 있다.

댐 붕괴에 대한 분포를 살펴보면, 콘크리트 댐보다는 fill 댐이 훨씬 더 많이 파괴되는 것으로 나타나 있다. fill 댐 파괴의 가장 중요한 요인 중의 하나는 홍수에 의한 전도나 파이핑으로 인한 댐 침하이고, 콘크리트 댐의 경우 기초부분이 중요한 위험요인이 된다.

댐은 시공 중 또는 시공 후, 특별히 5년에서 7년 사이가 가장 파괴되기 쉽다고 볼 수 있다. 이 기간 이후에는, 파괴의 위험이 감소된다. 그러나, 댐의 평균 수명 이후에는 파괴율이 다시 증가할 수 있다. 댐의 높이에 대한 측면에서 볼 때, 20 m보다 낮은 높이를 가진 댐의 파괴가 가장 많은 것으로 기록되어 있고, 특별히 15~20 m 높이의 댐이 그러하다.

5. 댐 및 제방붕괴에 따른 홍수범람 해석

극한홍수에 따른 댐 붕괴 해석은 공학자들에 있어 중요한 의미를 가진다. 사실, 댐 건설에 대한 새로운 프로젝트들이 안전성과 환경적인 이유로 인해 그 건설이 연기될 수 있다. 설계단계에서 검토될 수 있는 댐 파괴류 분석은 여수로 설계 유량을 최적화시키고, 차후에 발생할지도 모르는 극한홍수에 따른 사전대비책을 마련한다는 면에서 의의가 크다. 특히 댐 하류부에 위치하여 위험성을 가질 수 있는 원자력 발전소와 같은 시설물은 댐 파괴에 따른 최대 수위에 대해 충분히 안전하도록 설계되어야 한다.

극한홍수에 따른 홍수터 관리를 위해서는 잠재적인 위험 요인이 될 수 있는 상류 댐 및 하천제방의 붕괴에 따른 예비책을 마련하여야 하므로 그에 상응하는 정책을 수립하여야 할 것이다. 이러한 정책들의 효율적인 추진을 위해서는 댐 파괴류 분석에 의해 준비된 홍수위험지역의 사전제시에 기초를 두고 있어야 한다. 수리학적인 모의 측면에서 볼 때, 댐 파괴류는 다음과 같은 이유들로 인해 강우-유출이나 통상적인 홍수에 따른 댐 방류에 의한 흐름과 구분되고, 해석상의 어려움이 상존하므로, 이를 극복하기 위한 해석 알고리즘의 개발이 계속적으로 요구되고 있다.

- ① 매우 큰 침투유량과 수위의 발생
- ② 소용돌이와 파상의 도수현상 발생
- ③ 사행의 소용돌이파와 매우 불규칙한 수표면을 포함해서, 홍수터에서 강한 2차원적인 효과를 나타내는 제방에서의 빠르고 격렬한 흐름
- ④ 마른하도상에서의 홍수류의 전파
- ⑤ 댐 붕괴에 따른 토석류 뿐만 아니라 저수지나 계곡에서의 하상 토사의 비정상적인 이송흐름
- ⑥ 매우 불규칙한 하도단면을 따라 유하하면서 연속적이고 번갈아 발생하는 상류와 사류의 천이

흐름(mixed flow)

- ⑦ 각 지류에서 뿐만 아니라 내부에 위치한 댐에서의 경계조건, 그리고 본류 하류단에서의 강한 역학적 효과에 따른 실제상황 예측의 어려움
- ⑧ 실제 사례연구에 의해 수리학적인 모의에 있어 보정과 검증의 어려움

6. 맺음말

공학적인 면에서 댐 및 제방 붕괴에 따른 극한 홍수해석은 비상 사태와 위기에 대한 대처방안으로 매우 중요하다. 또한 환경에 대한 영향과 사회-경제적 중요성을 평가하기 위해서도 댐 붕괴로 인한 홍수 특성의 평가와 예측이 필요한 시점이다.

댐 및 제방의 붕괴는 극한홍수의 상황이기 때문에 이를 수리모형실험을 통해서 그 영향을 평가하기는 매우 어렵다. 이 경우 수치모형은 하류지역에서의 홍수의 영향에 대한 평가를 신속하고 정확하게 해석하기 위해 가장 편리한 방법이다. 검토되어야 할 수리학적 영향은 댐 하류부의 지형과 시간의 변화에 따라 침식이나 퇴적양상 및 수위와 유속의 변동 등이다. 또한 설계 단계에서 댐 붕괴 홍수파 해석은 댐 여수로 통수능을 결정하기 위한 수문학적 안정성 평가의 보조적 절차가 될 수 있다.

앞으로 하천계획 및 관리에 있어서 범람홍수의 거동을 해석하는 것은 매우 중요한 정보가 될 것이다. 범람홍수를 포함한 홍수관리 종합대책에서 홍수지역에 대한 정보와 위험을 연구하고, 관리 및 지원대책을 마련하며 재현기간별 홍수터 지도를 주요 하천에 대하여 작성하여야 할 것이다. 이들 자료는 주민들에게 개발지역에 대한 범람홍수에 관한 정보를 제시하고, 홍수보험의 실시를 위한 기초자료가 되도록 구성되어야 하겠다. ●

〈참고문헌〉

- 이종태, 한건연 (1989). "하천제방의 붕괴로 인한 제내지의 침수예측 모형." 한국수문학회지 제22권, 제2호, pp. 223-231.
- 이종태, 한건연, 윤세외, 박재홍 (1995). "제내지에서의 범람 홍수파 해석을 위한 수치모형의 개발." 한국수자원학회지, 제28권, 제5호, pp. 163-174.
- 한건연, 이홍래, 조원철 (1998). "댐 붕괴 홍수모의에 대한 불확실도 해석", 한국수자원학회논문집, 제31권, 제3호, pp. 337-345.
- 한건연, 이홍래, 김상호, 최현상 (1998). "하천홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발: I. GIS와의 연계해석." 한국수자원학회논문집, 제31권, 제4호, pp. 415-427.
- 한건연, 이홍래, 김상호 (1998). "하천홍수범람해석을 위한 수치모형의 개발: II. 불확실도 해석." 한국수자원학회논문집, 제31권, 제4호, pp. 429-437.
- 한건연 (1987). "하천에서의 홍수파 해석을 위한 수치모형의 개발: 효기댐 파괴에 따른 홍수파 해석을 중심으로" 한국수문학회지, 제20권, 제4호, pp. 285-294.
- 한건연 (1990). "댐의 파괴형태와 하도부 양상에 따른 홍수파 전달특성 해석에 관한 연구." 한국수문학회지, 제23권, 제4호, pp. 467-476.
- 한건연, 박재홍 (1995). "도시하천에서의 홍수범람도 작성을 위한 2차원 모형의 개발." 한국수자원학회지, 제28권, 제6호, pp. 119-131.
- 한건연, 이종석, 김상호. (1997). "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: I. 이론 및 모형." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제6호, pp. 675-686.
- 한건연, 이종석, 김상호. (1997). "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: II. 적용 예." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제6호, pp. 687-694.
- 한건연, 이재영, 이을래, 송재우 (1998). "댐 붕괴 수치모형에 대한 적용성 평가", 한국수자원학회논문집, 제31권, 제2호, pp. 189-198.
- Han, K.Y., Lee, J.T. and Park, J.H. (1998). "Flood inundation analysis resulting from Levee-break." J. of Hydraulic Research, Vol. 36, No. 5, pp. 747-759.
- Lou, W.C. (1981). Mathematical Modeling of Earth Dam Breaches. Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Singh, V.P. (1996). Dam Breach Modeling Technology. Kluwer Academic Publishers.