

필댐 파괴 특성에 따른 위험 요소 분석

Risk factor analysis for failure characteristics of fill dam

임정열¹⁾, Jeong-Yeul Lim, 오석훈²⁾, Seok-Hoon Oh, 장봉석³⁾, Bong-Seok Jang,
김범주⁴⁾, Bum-Joo Kim, 임은상⁵⁾, Eun-Sang Lim

¹⁾³⁾⁴⁾⁵⁾ 수자원연구원 댐기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Dam Engineering Research Center, Korea Institute of Water and Environment

²⁾ 수자원연구원 댐기술연구소 책임연구원, Principal Researcher, Dam Engineering Research Center, Korea Institute of Water and Environment

SYNOPSIS : For various historical reasons and some technical reasons, the safety of dams has been controlled by an engineering standards-based approach, which has developed over many years, initially for the design of new dams, but increasingly applied over the past few decades to assess the safety of existing dams.

And some countries were asked for risk assessment on existing dam, which included structural, hydraulic safety of dam and social risk. So, Many countries were developed and could be adapted as an additional tool to assist in decision-making for dam safety management.

Key words : Dam, System, Safety management, Dam safety program

1. 서 론

댐 안전을 확보하기 위해서는 댐 시설물에 대한 체계적이고 과학적인 안전점검 및 진단이 중요하며, 필요시에는 그에 상응하는 보수·보강이 이루어져야 한다. 또한, 합리적이고 체계적인 의사결정을 위해서 최근 이상기후, 지진발생, 댐 노후화 등과 같은 댐 및 주변 환경에 대한 위험도 특성을 분석하는 기법에 대한 연구가 미국을 비롯한 유럽 등 선진국에서 실시되고 있는 실정이다. 이러한 댐에 대한 위험도 분석은 최근 사회적인 문제가 되고 있는 이상기후로 수문학적 측면에서는 연구가 활발히 진행 중이며, 이를 바탕으로 댐 재개발 및 기술 개발을 위한 참고자료로 활용 중이다. 그러나, 댐의 안전도 문제는 수문학적 관점뿐만 아니라, 구조적인 측면에서 발생할 수 있는 여러 가지 요인을 분석하여 보다 객관적인 댐에 대한 위험도 분석을 실시하여 평가하는 것이 요구되고 있는 실정이다. 따라서 댐에 발생할 수 있는 위험요소에 대한 정리 및 필요성과 저감방법 등의 시나리오를 통하여 안전관리를 위한 의사결정의 신뢰성을 높이는 것이 필요하다. 우리나라는 최근까지도 댐 안전관리에 대한 인지도가 낮아 관련 분야에 대한 체계적인 연구가 미흡하여 위험도 분석과 같은 체계적인 연구를 실시하여 댐의 유지관리 및 보수보강 등의 의사결정 도구가 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 필댐의 파괴특성에 따른 위험요소를 분류하여 댐 위험도 분석을 위한 자료로 활용하고자 한다.

2. 댐 붕괴 현황 분석

2.1 댐 현황 분석

댐 건설은 1950년대 이후 급증하여 약 20여년동안 활발한 건설과 기술개발을 통하여 꾸준히 증가하였으나<그림 1, 2>, 1970년대 이후부터 감소하기 시작하였다. 국제대댐회(ICOLD)에 등록된 댐의 개수를 보면 <그림 3>에 나타난 것처럼 미국이 가장 많고, 인도, 중국, 스페인, 일본 순서로 나타나고 있으며, 우리나라도 전체 댐의 개수는 상당히 많은 편에 속한다. 현재 댐의 건설은 감소하였으나, 준공 연수가 경과함에 따라 댐의 노후화가 최근 문제점으로 발생하기 시작하였으며, 일부 지역에서는 댐의 붕괴로 인한 피해가 발생되고 있어, 전체 댐에 대한 위험도 분석과 그에 대한 대책마련이 시급한 실정이다.

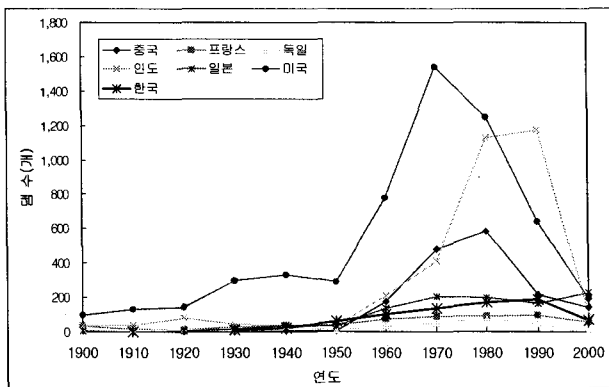


그림 1. 주요 국가 연도별 댐 건설 추세

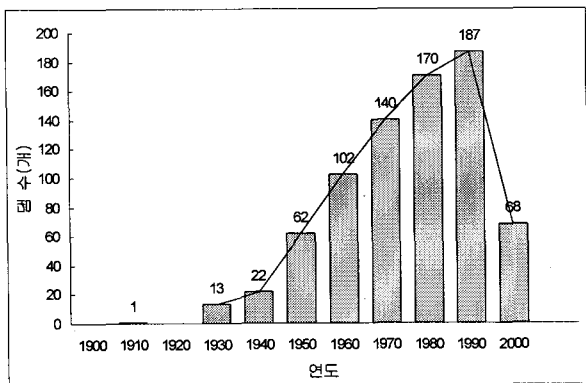


그림 2. 우리나라의 연도별 댐 건설 추세

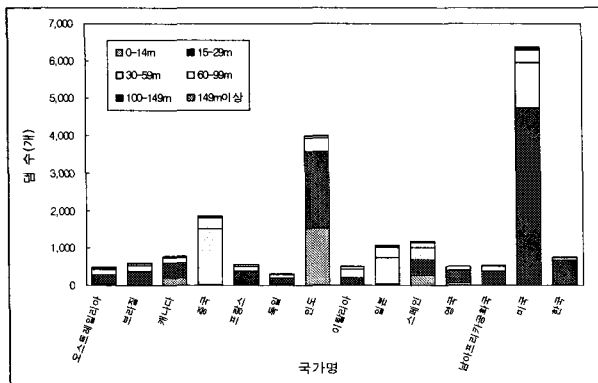


그림 3. 주요 국가별 규모별 댐 수

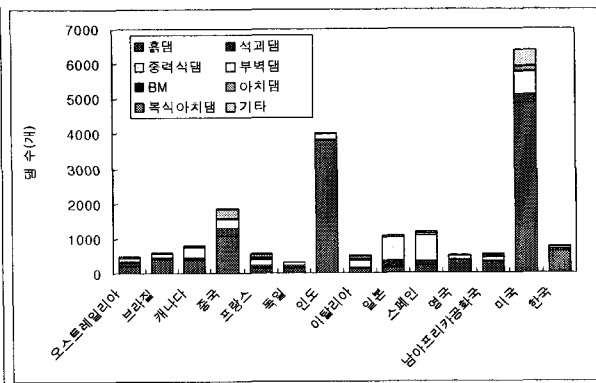


그림 4. 주요 국가별 형식별 댐 수

또한 <그림 4>에서 알 수 있듯이 주요 국가별 형식별 댐의 수를 나타낸 것으로 모든 국가들이 대부분 흙댐과 석괴댐이 가장 많은 것으로 나타나고 있어 댐에 대한 위험도 분석은 전체를 대상으로 할 때 흙댐과 석괴댐을 중심으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

2.2 댐 붕괴 현황 및 요인 분석

<표 1>에서 전체 붕괴된 댐의 수는 약 318개 이고, 이 중 흙댐(205개)이 가장 많은 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 필댐(흙댐, 사력댐 포함)의 분류에 따른 유형과 파괴 원인 및 요인에 대한 분석을 실시하고자 한다.

표 1. 댐 타입별 댐 붕괴 수

댐 타입	개 수	댐 타입	개 수
콘크리트 부벽댐	2	철 아치댐	1
석조 부벽댐	3	흙댐	205
제방	4	흙/사력혼합식	10
사력댐	31	흙/중력혼합식	4
사력/중력혼합식	1	나무	1
다중아치댐	3	콘크리트 아치댐	6
콘크리트 중력댐	20	목조/사력혼합식	1
석조 중력댐	25	알 수 없음	1

필댐의 경우 다양한 파괴 원인과 유형이 있으나 가장 일반적인 원인은 월류(30%), 파이핑(25%), 사면붕괴(15%), 복통누수(13%)로 볼 수 있으며, 또한 <표 2>는 댐 준공후 기간과 붕괴 원인과 관계 나타내고 있는 것으로 댐의 경우는 준공 후 초기 단계에서 가장 많은 문제를 나타내고 있는 것을 알 수 있으며, 준공 후 10년 이후부터는 월류에 의한 파괴가 많이 나타나고 있음을 알 수 있다.

표 2. 댐 준공년도와 붕괴 원인 관계

완공후의 기간(년)	붕괴원인(%)			
	월류	복통 누수	침윤	슬라이딩
0-1	9	23	16	29
1-5	17	50	34	24
5-10	9	9	13	12
10-20	30	9	13	12
20-30	13	5	12	12
30-40	10	4	6	11
40-50	9	0	6	0
50-100	3	0	0	0

앞서 나타난 것과 같이 국내외 모두 필댐의 개수가 가장 많아 댐에 대한 위험 요소 분류는 필댐을 중심으로 구분하고자 한다. 국내의 경우는 <그림 5>에서 보는 것과 같이 목적별로 댐을 분류할 경우 농업용 댐이 대부분(전체 중 99.4%(17,764개))을 차지하고 있고, 준공년수가 50여년 가까이 되어 노후화 정도가 심하고, 대부분 3중 시설물로 분류되어 있어 관리가 쉽지 않은 실정이다.

또한, 이러한 농업용댐의 대부분은 결함을 보이고 있으며, 이 결함 비율은 여유고 부족(28%), 누수, 침투(32%)를 보이고 있어, <그림 7> ICOLD의 국외 댐 붕괴별 파괴 확률에서 알 수 있듯이 기초파괴는 15년 이내, 누수파괴는 10년 후부터 0.55%/yr 씩 증가하며, 월류 파괴는 준공 후부터 0.88%/yr 씩 증가 하는 경향과 비슷한 결과를 보이고 있다.

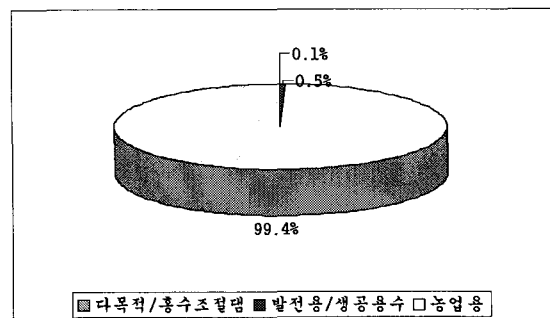


그림 5. 목적별 댐 분류 개수

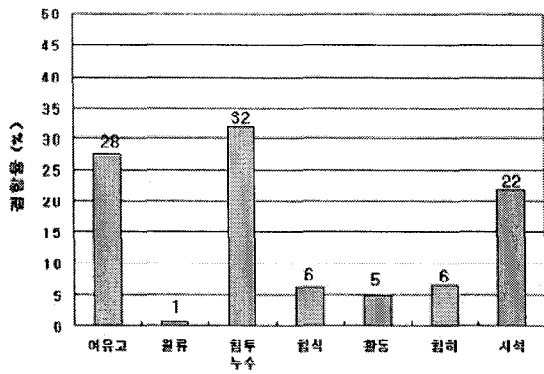


그림 6. 농업용 댐 결함 비율

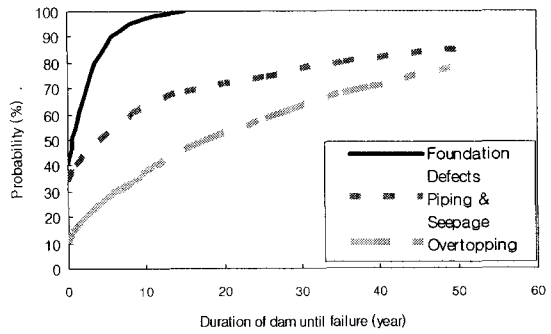


그림 7. 국외 댐 붕괴별 파괴확률(ICOLD)

3. 필댐의 파괴 특성 및 위험요소

필댐의 파괴 요인은 다양하지만 특정요인에서 대부분 파괴가 일어나고 있다. 위에서 언급한바와 같이 국내의 경우 농업용댐이 차지하는 비율과 댐 붕괴 사례 및 원인을 볼 때 세계적으로 필댐(Filldam)이 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 또 붕괴 원인도 다양하게 나타나고 있다. 그러나, 국내의 경우 이러한 댐 타입별 붕괴 현황과 붕괴 원인에 대한 자료관리가 되어 있지 않아서, 통계자료를 분석하는 것은 어려운 점이 많다.

따라서, 국외 ICOLD('74,'83,'95), USBR('94), BC Hydro, NGI, USCOLD('75,'88,'96), ANCOLD('92)의 통계를 분석하여 각 조건에 대한 결과를 나타내었고, 이 자료는 사고에 대한 결과를 바탕으로 모집단을 구성하여 작성된 것이다.

필댐은 <그림 8>처럼 다양한 형식으로 건설되어져 있어 발생하는 붕괴 비율 또한 여러 가지 형태를 보이고 있다. <표 3>에서 Zone 분포에 따른 준공년도 별 필댐 파괴 개수를 보면 년도별, Zone 분포 별로 지속적인 파괴를 보이고 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 필댐 파괴는 사력질코어로 건설된 댐이 가장 많이 파괴 되었다.

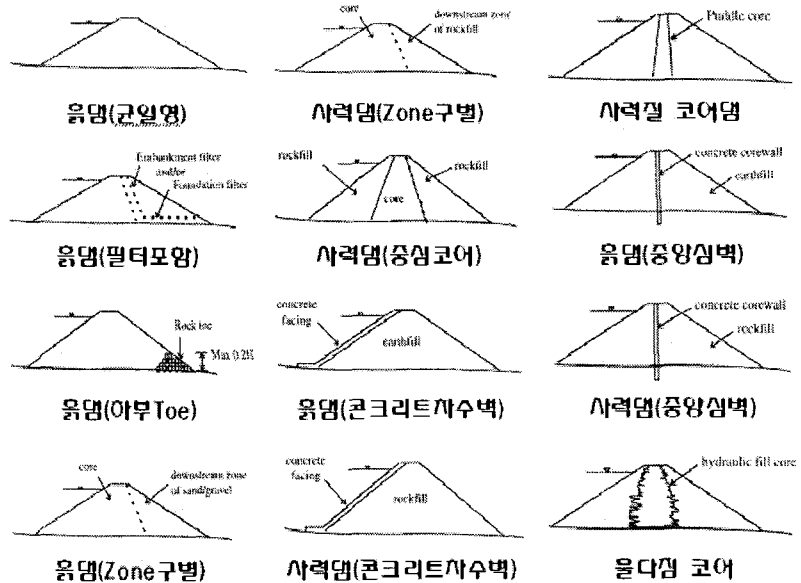


그림 8. 필댐 구분

이처럼 필댐의 경우는 사력댐보다는 흙댐의 파괴가 많았고, 건설년수가 오래됨에 따라 피해 댐의 수도 증가하는 것을 알 수 있었다. <표 4>에서 원인별 필댐 파괴모드 특성을 보면, 주요원인은 앞서 언급한 것처럼 월류, 파이프, 사면활동으로 나눌 수 있으며, 각 요소에 따라 나타나는 파괴도 다양한 것을 알 수 있다.

표 3. Zone 분포에 따른 준공년도별 필댐(Fill-dam) 파괴 개수

Zone 분류	1890년 전	1890-1930년	1930-1950년	1950-1970년	1970-1986년	All years
흙댐(균일형)	16	14	16	9	6	10
흙댐(필터형)	0	1	11	18	18	15
흙댐(하부Toe)	5	5	6	7	6	6
흙댐(존형)	7	18	37	37	40	36
사력댐(존형)	0	7	8	10	10	9
사력댐(중심코어)	0	0	5	8	12	8
흙댐(콘크리트 차수벽)	5	4	5	5	3	4
사력댐(콘크리트 차수벽)	1	5	2	2.5	3	3
흙댐(사력질코어)	58	24	4	0.5	0	5
흙댐(중앙심벽)	5	11	4	2	1	2
사력댐(중앙심벽)	0.5	3	1	1	1	1
물다짐	2	8	1	0	0	1
합계	370	819	1,167	4,436	4,400	11,192

표 4. 원인별 필댐에 대한 파괴 통계

파괴 모드	발생 개수		파괴(%)		파괴의 평균빈도($\times 10^{-9}$)	
	모두 파괴	운영 중 파괴	모두 파괴	운영 중 파괴	모두 파괴	운영 중 파괴
월류 및 부속시설						
월류	46	40	35.9	34.2	4.1	3.6
여수로-수문	16	15	12.5	12.8	1.4	1.3
소계	62	55	48.4	47.0	5.5	4.9
파이핑						
제체	39	38	30.5	32.5	3.5	3.4
기초	19	18	14.8	15.4	1.7	1.6
제체에서 기초	2	2	1.6	1.7	0.18	0.18
소계	59	57	46.1	48.7	5.3	5.1
사면활동						
하류사면	6	4	4.7	3.4	0.54	0.36
상류사면	1	1	0.8	0.9	0.09	0.09
소계	7	5	5.5	4.3	0.63	0.45
지진-액상화	2	2	1.6	1.7	0.18	0.18
알수 없음	8	7				
파괴 전체 개수	136	124			12.2(1.2%)	11.1(1.1%)
파괴를 알 수 있는 전체 개수	128	117				
댐 합계	11,192	11,192				

표 5. 준공 후 제체를 통한 파이핑 사고 통계

준공 후 사고 기간	파괴 수	사고 수	% (알려짐)	
			파괴	사고
건설 동안	1	0	2	0
초기 담수 동안	24	26	48	26
초기 담수 후 5년 내	7	13	14	13
5년 후	18	60	36	61
알 수 없음	1	3	-	-
합계	51	102	100	100

이처럼 댐의 파괴 특성은 요인별로 구분할 경우, Zone의 특징, 제체 재료의 특성, 다짐정도, 제체 필터 유무, 기초지반조건, 코어재료의 원지반 특성, 복통의 유무 등 다양한 요인으로 구분하여 나타낼 수 있으며, 그에 따른 사고수를 통하여 파괴 특성에 대한 위험도를 나타낼 수 있다.

4. 향후 연구

본 연구에서는 댐의 구조적인 위험도 분석을 위한 기초자료에 대한 분석을 실시한 것으로 댐의 파괴 특성 및 파괴 요인에 대한 분석을 우선적으로 나타낸 것이다. 이는 댐 안전관리 및 보수보강 우선순위 결정 등 위험도 관리를 위하여 연구를 진행하고 있으며, 수문학적 위험도를 포함하여 댐에 대한 총괄적인 위험도 분석을 하는 것이 본 연구의 최종 목표라 할 수 있다. 이처럼 댐은 지속적인 유지관리를 실시한다면 항구적으로 사용할 수 있으므로, 이러한 결과를 바탕으로 추후 발생할 수 있는 위험요소에 대한 저감 방안 및 대책 마련을 할 수 있는 기준을 마련하는 것이 시급한 실정인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 한국수자원공사(2002), **한국의 댐**, 한국수자원공사
2. 이종석(1994), "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석 기법", 경북대학교
3. 한국방재협회(2003) : **방재정보**, 제15호 Vol. 5 No. 3
4. ICOLD(1995), "*Dam Failure Statistical Analysis*", Bulletin 99
5. ICOLD(2005), "*Risk Assessment in Dam Safety Management*", Bulletin 130
6. Mark Foster Robin Fell and Matt Spannagle(2000), "The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents", *Can. Geotech. J.* Vol. 37
7. Eero Slunga(2001), "Concept and Bases of Risk Analysis for Dams", *Development of Rescue Actions Based on Dam-Break Flood Analysis*