

## II. 학술 · 기술기사 (6편)

수질-수량 연계 강화를 위한 댐-보 운영 고도화 방안 (김현식 차장, K-water)

불확실성 증가에 따른 댐 · 저수지 위험도 평가 (임정열 수석연구원, K-water)

콜롬비아 이투안고 댐 건설 중 수재해 위험 사례 (김남룡 책임연구원, K-water)

「내진설계기준 공통적용사항」 제정에 따른 「댐 내진설계기준」 개정 (유진권 선임연구원, 김선욱 차장, 오병동 차장, 양승인 차장, K-water)

내진설계기준 강화에 따른 댐 내진안정성 평가 (조성배 선임연구원, 김태민 선임연구원, 김남룡 책임연구원, K-water)

파키스탄 Patrind 수력발전사업 소개 (임경희 차장, K-water)

# 불확실성 증가에 따른 댐 · 저수지 위험도 평가



임정열 수석연구원  
(K-water)

### 1. 개요

전 세계적으로 급증하는 기후변화의 영향으로 인한 이상홍수, 강우 패턴 변화, 대규모 지진발생 빈도 증가 등 불확실성으로 인한 자연재해가 증가하고 있다. 최근 자연재해 증가로 인하여 시설물의 안전관리 강화를 위해 “시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(‘18.1.18)”을 개정 · 시행하여 국가 시설물 안전관리의 일원화 및 안전관리체계 정비, 시설물의 성능평가 도입 및 유지관리 전략을 수립하도록 유지관리체계를 강화하고 있다. 이러한 시설물의 안전 및 유지관리는 국민의 삶의 질을 향상시키기 위한 기본적인 국가 정책이며 이를 위하여 시설물의 안전성 및 성능확보를 위한 지속가능한 첨단 기술 개발을 꾸준히 진행하고 있다.

미국 캘리포니아  
Oroville dam 피해현황



### 2. 댐 · 저수지 위험도 평가

국가 SOC 시설물의 안전관리를 위해서 ICT 기술을 융합한 첨단 기술로 자연재해에 대한 예측, 모니터링 및 평가 방법 등을 고도화하는 기술개발이 지속적으로 이루어지고 있다.

이러한 시설물 중 수자원의 효율적 관리를 위한 댐, 농업용 저수지 및 보에 대한 안전성 평가 기법도 통합적인 평가 방법으로 전환, 안전에 대한 개념을 안전성(Safety)에서 위험도(Risk)로 확대하여 불확실성을 반영한 다양한 기법 등 새로운 평가 방법을 도입하고 발전시키고 있다.

댐 및 농업용 저수지는 이상홍수 발생 증가로 여유고 부족, 시설 노후화, 도시화 및 산업화 등으로 시설물의 붕괴를 위협하는 다양한 위험인자가 도출되고 있다. 수문학적 불확실성 증가로 인하여 댐 건설당시 산정한 가능최대강우량(Probability Maximum Precipitation, PMP), 가능최대홍수량(Probability Maximum Flood, PMF)의 빈도년수(Return period) 보다 발생할 가능성이 커지고 있으며, 시설물의 축조년도 증가로 인한 노후화도 기존 구조물의 성능 저하를 일으켜 복합적인 원인으로 댐 및 저수지의 붕괴 가능성이 커지고 있는 실정이다.

댐 및 저수지의 붕괴는 월류, 내부 침식 및 침투, 사면 활동, 지진 등 다양한 원인에 의해 발생된다. 그 중에서도 내부 침식은 월류와 함께 발생 빈도가 높은 댐의 주요 붕괴 원인이다(Biswas and Chatterjee, 1971; Foster et al., 2000; Brown and Gosden, 2004). 특히, 최근 댐의 파해는 수문기상학적 변동성 증가로 인한 여수로 방류능력 부족이 대부분을 차지하고 있다. 이러한 외적요인의 변동성으로 인한 불확실성 증가로 댐 위험도 분석에 대한 필요성은 1976년 Teton 댐 붕괴 이후 미국에서 대두되어 시설물에 국한된 안전성 평가 방법에서 다양한 불확실성을 반영한 위험도 기반 댐 안전성 평가 체계를 도입하여 현재까지 실무적인 관점에서 활용하고 있다.

국내의 경우 전국 17,300여개소의 댐 및 저수지에 대한 안전관리는 전반적인 상태를 A~E 등급으로 표시하는 정밀안전진단 결과에 의존하고 있지만, 이를 근거로 유지보수 예산을 효율적으로 분배하기는 어려운 실정이다. 일례로 전남 지역의 경우 D (미흡) 또는 E (불량) 등급의 댐 및 저수지가 해당 지역 저수지의 35%를 차지하고 있어(Yang et al., 2014), 이러한 등급 결과만으로 개·보수 등 투자 우선순위를 판단하기에는 무리가 있을 것이다.

최근 세계적으로 댐 안전(Safety, the condition of being safe from loss)은 위험(Risk, the probability of loss) 개념으로 인식이 전환되고 있으며, 특히 안전에 대한 개념은 안전성과 잠재적인 위험도라는 견해를 가지고 있다. 댐은 전통적으로 고도화된 기술로 건설되어 안전에는 문제가 없다는 인식을 가지고 있지만, 최근 수 많은 자연재해에 대한 경험을 바탕으로 모든 구조물은 잠재적인 위험을 가지고 있다는 인식의 전환에 따라 댐을 안전하게 유지하는데 방안을 찾고 있다.

유엔재해경감국제전략기구(UNISDR)에 따르면, 지난 20년 동안 64,578건의 지진, 홍수, 가뭄, 쓰나미, 산사태 및 화산폭발 등의 기후관련 재난이 발생했다고 보고하고 있다. 이러한 자연재해로 인하여 많은 인명과 경제적인 피해가 막대하게 발생하고 있다. 기후관련 재난 중 저수지의 파괴에 영

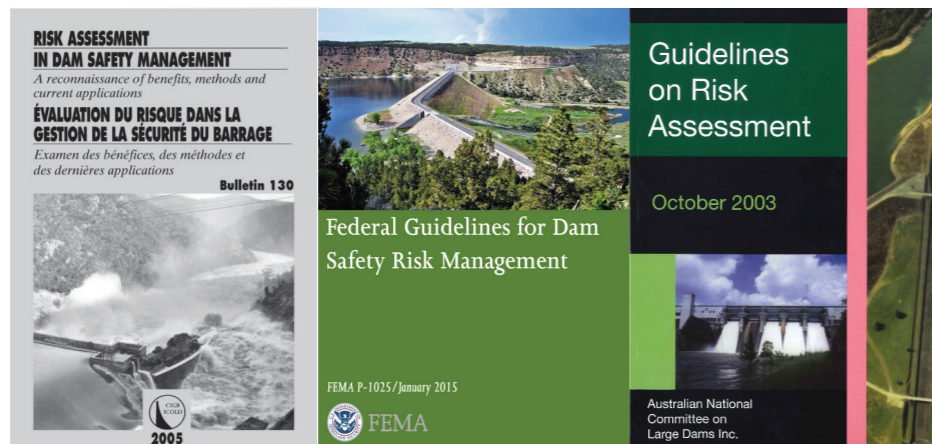
향을 미치는 요인은 집중강우 및 태풍으로 인한 국지적 호우로 발생하는 홍수와 지진이 있으며, 구조물 자체의 구조적인 문제를 야기하는 노후화를 제시할 수 있다.

이러한 외적요인은 댐에 대한 구조적 결함, 시스템적 파괴 등 취약성을 유발하는 주요 원인이 되지만, 설계오류, 부실시공, 유지관리 부실 등과 같은 인위적 원인에 의하여 위험요인이 발생하기도 한다. 이처럼 불확실한 외적요인에 대하여 댐의 취약부 및 위험요인에 따른 잠재적인 파괴요인을 분석하고 평가하는 위험도 평가(Risk Assessment)는 현재 불확실성을 고려한 확률론적 평가 기법으로 많이 활용하고 있다.

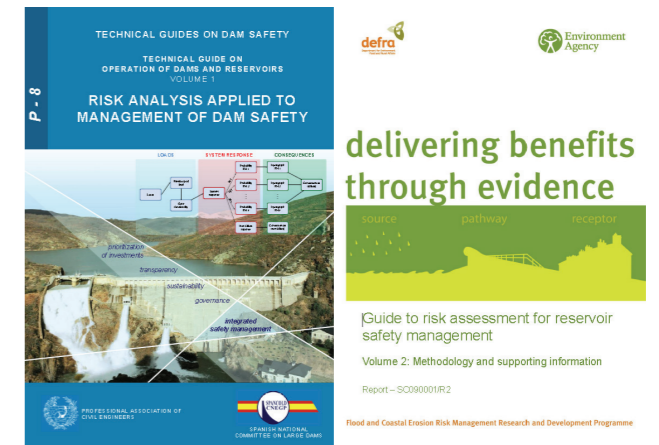
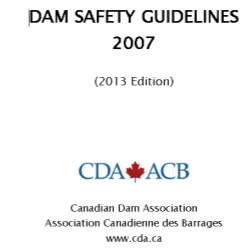
댐 위험도 분석 및 평가는 미국 FEMA, USACE, USBR을 중심으로 호주(ANCOLD), 스페인(SPANCOLD) 등에서 활발하게 진행되고 있으며, 국가 특성에 맞는 위험도 평가 기준을 마련하여 운영하고 있다. 특히, 국제대댐회(ICOLD)에서는 Bulletin 130 Risk Assessment in Dam Safety management를 발간하여 위험도 분석과 평가에 대한 기준, 평가 방법 등에 대한 내용을 다양하게 소개하고 있으며, Dam Safety Committee에서 댐 위험도 평가에 대한 기술동향 및 국가별 기술개발 특징, 개선방향에 대한 발표와 논의가 꾸준히 진행되고 있다.

그러나 국내에서는 외적하중에 대한 독립적인 개념의 위험인자에 대한 안전성 평가만을 진행하고 있으며, 다양한 위험인자와 상관관계를 고려하는 복합적인 개념의 위험도 평가는 연구가 미흡한 실정이다. 국외의 경우 미공병단(U.S. Army Corps of Engineers, 이하 USACE)을 중심으로 다양한 위험인자와 불확실성을 고려한 정량적인 위험도(Risk) 평가 기법을 이용하고 있다(ANCOLD, 1994; Bowles et al., 1997; Brown and Gosden, 2004; DEFRA, 2002). 미국 내 704개소의 댐을 관리하는 미 공병단(U.S. Army Corps of Engineers, 이하 USACE)에서는 댐 안전성 평가, 유지보수를 위한 재정투자 우선순위, 위험도 저감 계획 등을 수행하기 위해 확률론적인 위험도 분석기법을 사용하고 있다.

ICOLD, FEMA, ANCOLD  
위험도 평가 기준



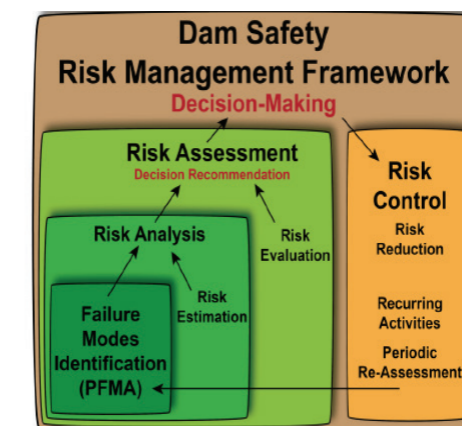
CDA, SPANCOLD, UK  
위험도 평가 기준



댐의 위험도 분석 및 평가는 전통적인 댐 안전성 평가 방법이었던 결정론적 평가 방법에서 확률론적 평가방법으로 전환하여 정량적인 계산과 정성적인 평가에 대한 결과를 제시하고 있다. 댐 위험도 평가의 프로세스는 댐의 위험요인 분석과 전문가 판단이 포함된 공학적 평가에서 시나리오별 위험도 분석과 확률을 산정하는 위험도 분석과 하류피해결과를 고려한 위험도 평가를 하도록 되어 있다.

댐 위험도 평가 프로세스,  
FEMA

공학적 평가 (Engineering Assessment)	잠재적 파괴모드 선정 (PFMA)	위험도 분석 (Risk analysis)	위험도 평가 (Risk assessment)	위험도 제어 (Risk Control)
댐의 위험요인 분석, 체크리스트 검토, 전문가 평가	파괴모드에 따른 시나리오 제시	시나리오별 위험도 분석 및 확률 산정	종합적 위험도 평가 및 결과 제시	위험요인 제거, 보수보강 우선순위 결정



### 3. 지반공학적 댐 위험도 요인 및 평가

국내·외 댐 및 저수지의 축조형태는 필댐이 가장 많은 부분을 차지하고 있고, 특히 국내의 경우 중소규모 저수지(농업용저수지)의 경우 약 99%가 필댐으로 축조되어 있으며, '17년 조사결과에 따르면 전국 17,313개소 저수지 중 축조년수가 50년을 경과한 곳이 13,124개소(75.8%)를 차지하고 있다. 또한, 보수보강이 필요한 곳은 약 1,022개소, 정밀안전진단이 필요한 곳은 120개소로 조사되었으며, 재해위험저수지로 430여개 지구를 지정하여 개선사업을 추진하고 있다.

이처럼 대부분 댐과 저수지의 형식이 필댐으로 축조되어 있어 홍수, 지진으로 인한 외적하중 및 노후화로 인하여 제체, 기초 등 취약부에서 잠재적인 문제점을 가지고 있다.

필댐에서 발생하는 파괴 메커니즘은 다양한 원인에 따라 한 가지 또는 여러 가지 조합으로 파괴가 발생할 수 있다. 따라서 댐의 파괴 모드를 결정하는 것은 단순히 정형화된 기준에 따른 것이 아니라, 각각 댐의 현재 상태, 주변 환경 등 경우에 따른 종합적인 판단이 요구된다.

지반공학적 파괴 메커니즘

구분	지반공학적 원인	특징
재료적 특성	전단강도 저하	축조 재료 문제
월류 가능성	세굴, 침식발생	대부분 저수지 발생
소류력 증가	표면 침식	제체·여수로 접합부
내부 침식	누수 및 파이핑	복통 주변
균열	역침식, 기초파손	제체 기초부 유실

댐에 작용하는 외력은 크게 홍수와 지진으로 구분할 수 있으며, 각각 규모, 자체의 성질, 상태 등에 따라 구조물에 미치는 영향이 다르다. 이 때문에 파괴 및 붕괴 등에 이르는 메커니즘은 매우 복잡하고 기술적으로도 설명되지 않는 부분도 있지만, 기본적으로는 지반공학적 요인과 수리 및 수문학적 요인, 구조적 요인, 기타 등으로 크게 나눌 수 있다.

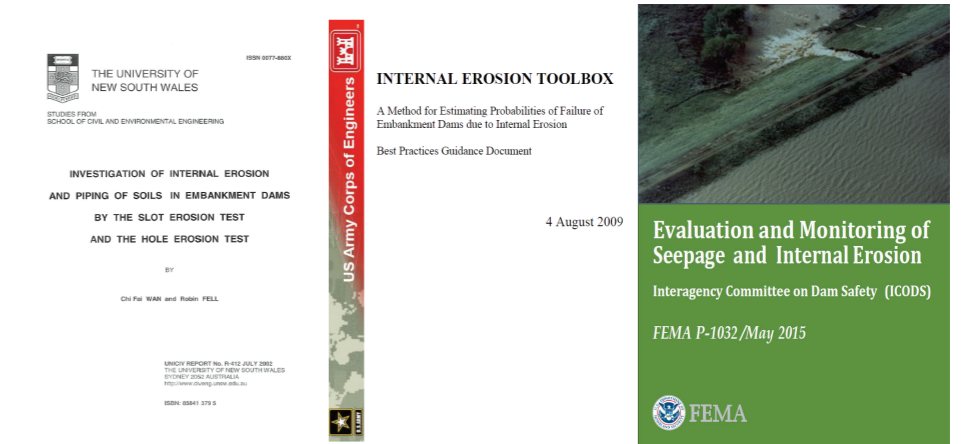
주요 요인별로는 강우, 월류, 침투, 침식(세굴), 지진, 그 외의 요인 등 6가지로 나눌 수 있다. 또한, 필댐과 같이 흙으로 축조된 구조물의 파괴 메커니즘에 대하여 크게 구분해보면 재료의 포화 특성, 이상홍수로 인한 월류 가능성, 홍수시 증가하는 흐름의 소류력, 내부 침식에 의한 파괴, 균열과 같은 현상으로 정리해 볼 수 있다.

댐 파괴 개수, FEMA (Foster et. al. 1998)

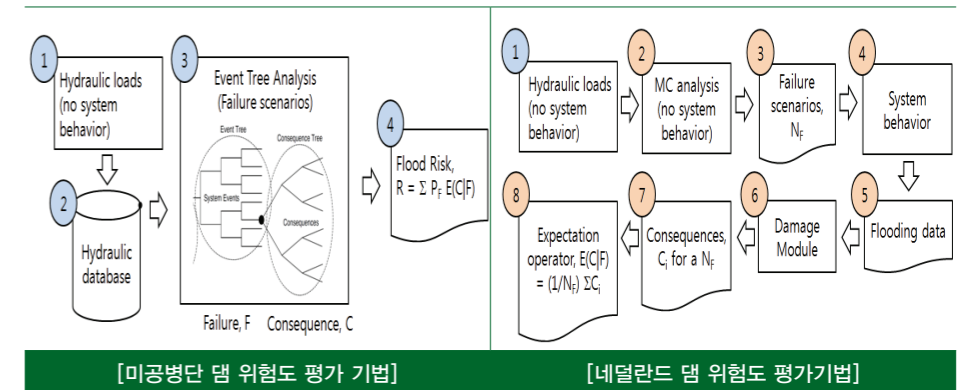
파괴 모드	파괴개수		파괴비율(%)	
	전체 파괴	운영 중 파괴	전체 파괴	운영 중 파괴
월류	46	40	35.9	34.2
여수로/수문	16	15	12.5	12.8
소계	62	55	48.4	47.0
파이핑(제체)	39	38	30.5	32.5
파이핑(기초)	19	18	14.8	15.4
파이핑(제체-기초)	2	2	1.6	1.7
소계	59	57	46.1	48.7
사면붕괴	7	5	5.5	4.3
지진/액상화	2	2	1.6	1.7
불확실	8	7		
파괴개수	136	124		

USACE (2009)가 개발한 내부 침식 평가 도구(Internal Erosion Toolbox)는 특정 하중 조건에서 내부 침식에 의해 필댐이 파괴될 확률, 즉 시스템 응답 확률(System Response Probability, 이하 SRP)을 산정할 수 있는 가이드라인을 제공하고 있다. USACE의 내부 침식 평가 도구를 사용하

Internal Erosion 관련 연구 동향



이러한 댐에 대한 위험도 평가 방법은 댐의 잠재적인 파괴모드에 대한 시나리오 기법을 적용하여 파괴확률을 산정하는 것으로 연구내용과 접근방법에 차이점이 있을 수 있다. 미공병의 위험도 평가 방법은 파괴 시나리오의 결정과 각 시나리오별 파괴 확률이 내부침식 평가도구(Internal Erosion Toolbox)에 근거하여 산정되도록 되어있고, 정해진 평가도구를 통해 시나리오를 결정하고 각 시나리오에 따른 파괴확률을 평가할 수 있으므로 단순한 과정을 통해 손쉽게 내부침식에 대한 지반공학적 파괴확률을 산정할 수 있다. 네덜란드 Delft 공대에서 제시하는 댐 위험도 평가 기법(Courage 등, 2013)은 미공병단의 방법과 다른 접근방법을 택하고 있다. 네덜란드의 방법에서는 발생 가능한 시나리오 모두를 파괴확률 산정에서 구체적으로 다루지 않고 이러한 내용을 함축적으로 내포한 성능함수를 작성하여 사용하고 있다. 따라서 이 방법은 다수의 댐 또는 제방이 연결되어 시스템이 구성되는 경우 개별 댐의 파괴확률을 신속하게 계산할 수 있다는 장점이 있다.

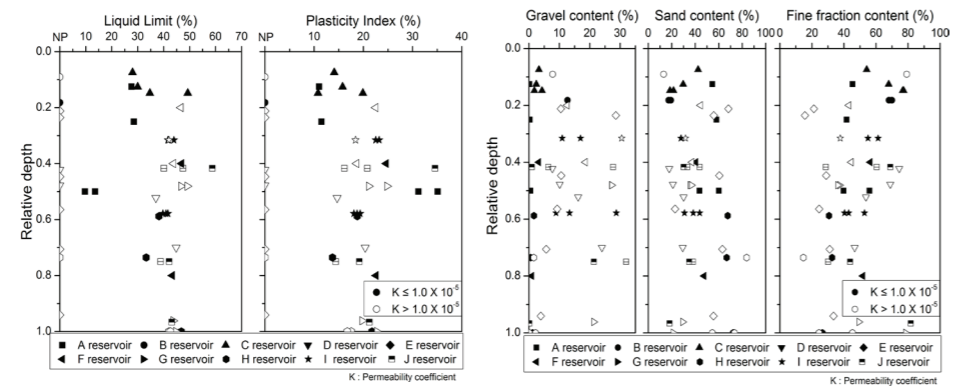


위험도 평가는 구조물에 결정된 안전성에 대해서 확률론적 또는 신뢰성을 기반으로 평가하는 방법 중 하나이다. 위험도 평가를 시도하는 이유 중 하나는 기존 구조물 평가 방법에 대한 새로운 방법을 찾는 것과 전통적인 해석 방법의 단점을 보완하고자 하는 것으로 최근 많이 활용되고 있는

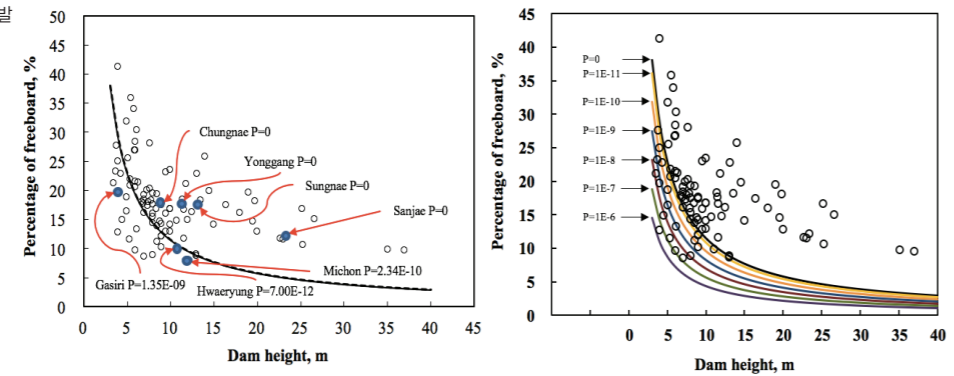
방법이다. 위험도 평가는 기존 댐에 대한 안전성 평가와 다른 부분이 있어 다소 생소하게 받아들일 수 있으나, 보다 정밀한 구조물의 성능 평가를 위해서 꼭 필요한 부분이다. 이러한 위험도 평가를 위해서는 확률론적 모델링, 경험적 또는 판단에 근거한 다양한 파괴모드 등을 도출해내고 그것으로 인하여 발생하는 시스템 파괴 현상과 피해결과를 찾아내는 것이 목적이다. 이는, 댐 파괴를 추정할 수 있는 댐 계획, 설계, 건설 및 운영과 관련된 전체 발생 가능한 상황을 포함하여 의사결정을 위한 확률을 추정하는 것이다.

댐 및 저수지의 위험도 기반 안전성 평가 기법은 홍수, 지진 및 정상운영에서 각각 발생할 수 있는 위험요인을 고려하여 파괴 시나리오를 작성해서 기본적인 평가 Tool 개발은 일부 진행이 되었고, 평가 Tool의 고도화 및 시스템 통합 방법 등을 추진하고 있다. 확률론적 위험도 평가 Tool을 활용하여 기존 댐과 저수지의 위험요인 도출, 위험도 평가 결과를 제시하고 있으며, 해석 모듈과 지반공학적 물성값 산정을 위한 DB 확보, 세부평가 기준 고도화 등 추가적인 연구 수행이 지속적으로 이루어지고 있다.

국내 저수지 지반공학적 물성값 산정을 위한 실험값 (LL, PI, Contents)



중소규모 저수지 비액상화 지진파괴확률 산정 도표 개발



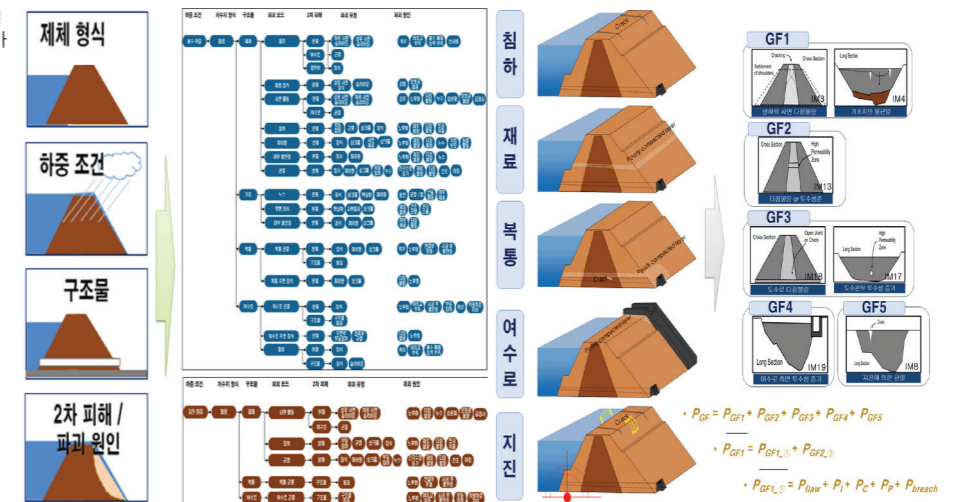
위험도 기반 댐 안전관리를 위한 평가 Tool



또한, 현행 수리시설물의 정량적 평가 방법 개발은 개별 구조물에 대한 평가 방법뿐만 아니라 복합적인 평가 방법을 개발 중에 있으며, 하루 피해결과를 예측하고 3차원으로 시뮬레이션 하는 공간정보를 병행하여 구체적인 시각적 효과까지 나타내고 있다.

위험도 기반 댐의 안전성 평가를 위한 프로세스는 위험도 평가 기준 수립, 해석 모듈 개발, 안전성 평가 및 피해결과 분석과 위험도 가이드라인을 제시하는 방향으로 구성되어야 할 것으로 판단된다.

중소규모 저수지 위험도 평가를 위한 알고리즘 및 평가 Tool 개발



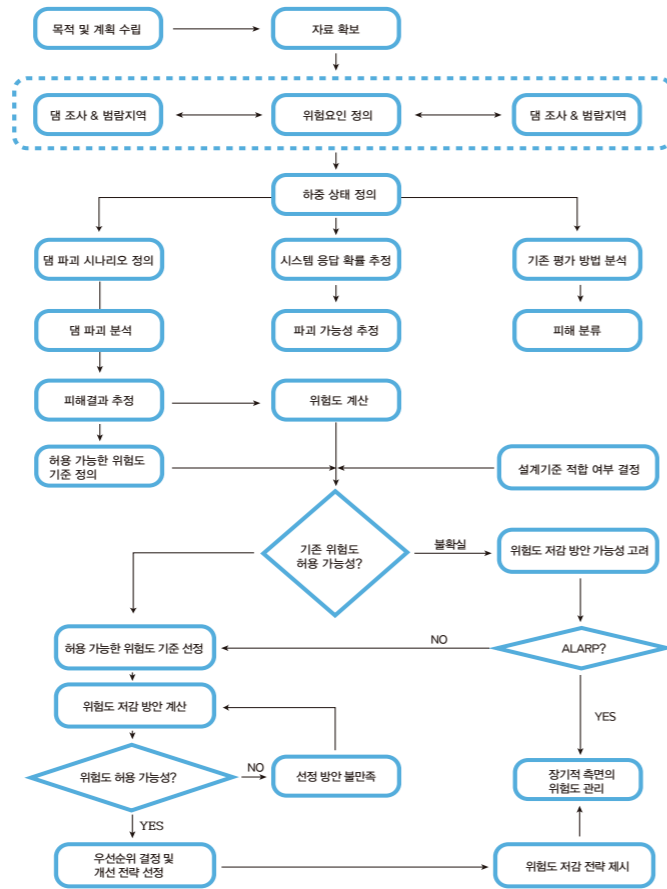
#### 4. 제언

국내 댐 및 저수지의 안전성 평가는 결정론적 해석에 근거하여 구조물의 상태평가와 홍수, 지진 등에 대한 각각 하중에 따른 구조물의 안전성 평가를 실시하고 있고, 그에 따른 보수보강 대책을 마련하여 유지관리를 진행하고 있다. 최근 개정 및 시행된 시설물 안전 및 유지관리에 관한 특별법은 이러한 시설물의 안전성평가와 더불어 구조물의 성능을 기반으로 유지관리를 체계화 할 수 있는 근거를 마련했다. 이는 시설물을 안전진단 결과에 따른 보수보강만으로 유지관리를 하는 단계를 넘어서 시설물의 안전성 확보를 위한 위험요인의 상호연계성을 고려한 위험도 개념이 포함된 것으로 판단되며, 시설물의 지속적인 성능목표를 유지하기 위해서는 기존의 안전관리에 대한 패러다임을 전환해야 할 것으로 판단된다.

본 원고에서는 자연재해에 대한 불확실성의 증가로 발생하는 이상 강우, 지진발생 증가 및 시설물 노후화로 인한 복합적인 위험요인을 고려하는 위험도 기반 수리시설물의 평가 현황을 소개하는데 목적이 있다. 댐 및 저수지의 위험도 평가는 현행 미국을 중심으로 댐 안전관리를 위한 주요 평가방법으로 활용되고 있으며, 국내도 댐, 저수지 및 제방에 위험도 분석 및 평가에 대한 기법이 적용되고 있다.

따라서 국내에서도 성능평가 방법 도입, 유지관리에 대한 개념의 중요성 확대 등 기존 수리시설물에 대한 평가 방법을 고도화하고 있는 시점에서 시설물에 발생 가능한 위험요소에 대해 복합적으로 고려할 수 있는 통합적 위험도 해석방안 수립이 적극적으로 활용될 수 있도록 노력해야 할 것으로 판단된다.

댐 위험도 평가 프로세스(안)



#### 참고문헌

1. 김우용, 임정열, 목영진, 정영훈, "내부 침식 평가 도구를 이용한 국내 필댐의 지반공학적 시스템응답 확률에 대한 비교 연구", Journal of the Korean Society of Civil Engineers ISSN 1015-6348 Vol. 36, No. 2 April, 2016
2. Noh, K.L., Lim, J.Y., Mok, Y.J. and Jung, Y.H, Estimating geotechnical system response probability of internal erosion risk in fill dam using event tree analysis, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Vol. 34, No. 6, pp. 1815~1829, 2014.
3. H.H Kwon, J.Y Kim, T.W Kim, J. Y Lim, "Roles of dam risk analysis in dam safety practice in South Korea" Hydropower'15 Stavanger, Norway 15-16 June 2015
4. FEMA, "Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management", 2015
5. FEMA, "Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion", 2015
6. Foster, M., Fell, R., Spannagle, M., "The statistics of embankment dam failures and accidents" Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, No. 5, pp. 1000-1024, 2000.
7. USACE, "Internal Erosion Toolbox", 2009
8. USBR, "Dam Safety Risk Analysis Methodology", Ver.3.3.1, 2003