

# 신뢰도 해석기법에 의한 댐 및 제방의 위험도 산정

한건연\*, ○김상호\*\*, 이종석\*\*\*

## 1. 서론

우리나라에서의 댐 및 제방붕괴의 예는 1961년 전남 남원군 효기리에서 관개용 댐이 붕괴되어 커다란 인명 및 재산피해가 있었고 1980년에는 충북 보은군 보청천유역에서 소규모 소류지들이 연쇄적으로 유실된 적이 있다. 1984년 9월 한강 하류부의 망원동 지역, 1987년 금강 유역의 부여, 강경 지역, 1991년 8월 수영강 상류부 지역 및 1990년 9월 일산제 붕괴에 따른 제내지에서의 범람 피해, 1995년 금강 및 삼교천 하류부 홍수범람 피해, 1996년 연천댐 붕괴 등은 댐 및 제방에 대한 위험도 해석에 관한 연구의 필요성을 증대시키고 있다.

본 연구에서는 댐 및 제방의 위험도 해석을 위하여 붕괴의 원인을 분석하였다. 이상강수 조건 하에서의 댐 붕괴에 대한 위험도 해석기법을 개발하고, 이에 따른 홍수류의 하천제방에 대한 위험도 해석을 실시하였다. 이를 위해서 신뢰도 해석기법을 도입하여, Monte-Carlo기법과 AFOSM 기법에 의한 위험도 산정모형을 개발하였다.

## 2. 붕괴의 원인

댐 및 제방과 같은 수공구조물은 설계와 관리에 만전을 기울이고 있음에도 불구하고 예기치 못한 붕괴로 인한 피해는 막대하다. 국제 대댐위원회(ICOLD)에서의 1900년과 1973년 사이에 붕괴된 높이 15m 이상의 댐에 대한 조사결과 주요한 세 가지의 붕괴요인은 월류 및 부적절한 여수로(34%), 기초부 결함(30%), 파이핑(28%) 등 이었다. 콘크리트 댐의 주요 붕괴 원인은 기초부 결함(53%)이었으며, fill 댐의 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.

---

\* 경북대학교 토목공학과 교수

\*\* 경북대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* Utah 주립대학교 토목공학과 박사과정

댐 건설 후의 붕괴된 기간과 댐의 노후화의 관계조사에서는 다른 요인들이 상대적으로 긴 댐 연령을 가지는 반면 기초부 결함에 의한 댐 붕괴는 건설후 짧은 기간 내에 주로 발생함을 알 수 있다. 우리나라에서 댐 연령도 점차 노후화 되고 있으므로 월류 등에 의한 붕괴확률은 증대된다고 사료되므로 이에 대한 대책 수립이 절실히 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 댐인 것을 보여준다. 부벽식 댐은 건설된 예가 가장 적으며 가장 불안한 것으로 보고되었다. 우리나라의 경우는 관개용 댐의 약 95%가 fill 댐으로서 전체 댐의 대부분을 차지하고 있었다.

세계 전역에서의 댐 붕괴 자료로부터 예측된 댐의 붕괴확률은  $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4} / \text{dam-year}$ , 미국의 경우는  $3 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4} / \text{dam-year}$ 으로 추정되었다. 주요 댐의 붕괴만을 고려할 때, 미국에서 붕괴확률은  $0.8 \times 10^{-4} / \text{dam-year}$ 이고, 세계적으로는  $2 \times 10^{-4} / \text{dam-year}$ 으로 조사되었다.

물론 이러한 추산치는 많은 불확실성을 내포하고 있으나 단지 세계적으로 댐 붕괴의 확률에 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 있음을 보여준다.

### 3. 위험도 평가단계

기존의 댐 및 제방은 수리, 수문학적, 지반공학적 및 내부적인 원인들에 대해 부적절한 것으로 고려될 수 있다. 특정 댐 및 제방에 대해 필요한 유지, 보수,의 형식과 범위를 결정하는 것은 다음과 같은 세심한 평가를 바탕으로 하여야만 한다. 즉, 댐 붕괴의 위험도 (붕괴유형, 붕괴발생확률 및 붕괴에 따른 결과 등) 를 평가하고, 댐 유지보수에 대한 여러 대안을 검토하여 잠재적인 편익들을 검토한다.

모든 댐들은 미리 정해놓은 크기의 홍수를 안전하게 소통시킬 수 있어야 한다. 이때의 홍수를 유입설계홍수라 하며, 이는 댐과 저수지에 대해 개별적으로 결정되어야만 한다. 통상적으로 요구되어지는 설계유입홍수의 크기는 댐의 붕괴시 하류측 주민과 재산에 대해 심각한 위협이 될 수 있는 크기보다 큰 값이어야 한다. 많은 경우에 있어서 설계유입홍수의 크기는 가능최대홍수(PMF)로 정의되며, 이것은 개념적으로 특정한 지점에서 상한치가 되는 최대 홍수를 의미한다.

만약 설계유입홍수가 기존 댐의 여수로의 통수능을 초과한다면, 이것은 수리학적 부적합한 것으로 고려된다. 이 경우에 있어서는 다음 사항을 결정하는 것은 중요하다. 이것은 월류에 의해 댐 붕괴가 발생하는지의 여부와 댐 붕괴가 저류된 물을 갑자기 방류한 결과로서 주민에 대한 안전성을 위협하는 정도와 하류측 재산상의 피해 가능성을 증가시키는지의 여부로서

어떤 경우에는 위험의 증가가 중요하지 않은 것으로 판단될 수 있고, 비록 설계유입홍수하에서는 붕괴가 될 지라도 기존의 구조물이 불안전하지 않은 것으로 판단될 수 있다. 이러한 여건하에서 구조물이 안전한 것으로 판단하기 위해서는 공학적인 평가와 홍수추적이 필요하다. 또한 재산 피해와 인명 손실의 크기와 확률 등의 평가가 요구되기도 한다. 그림 1은 댐 및 제방의 위험도 평가를 위한 단계별 과정을 나타내고 있다.

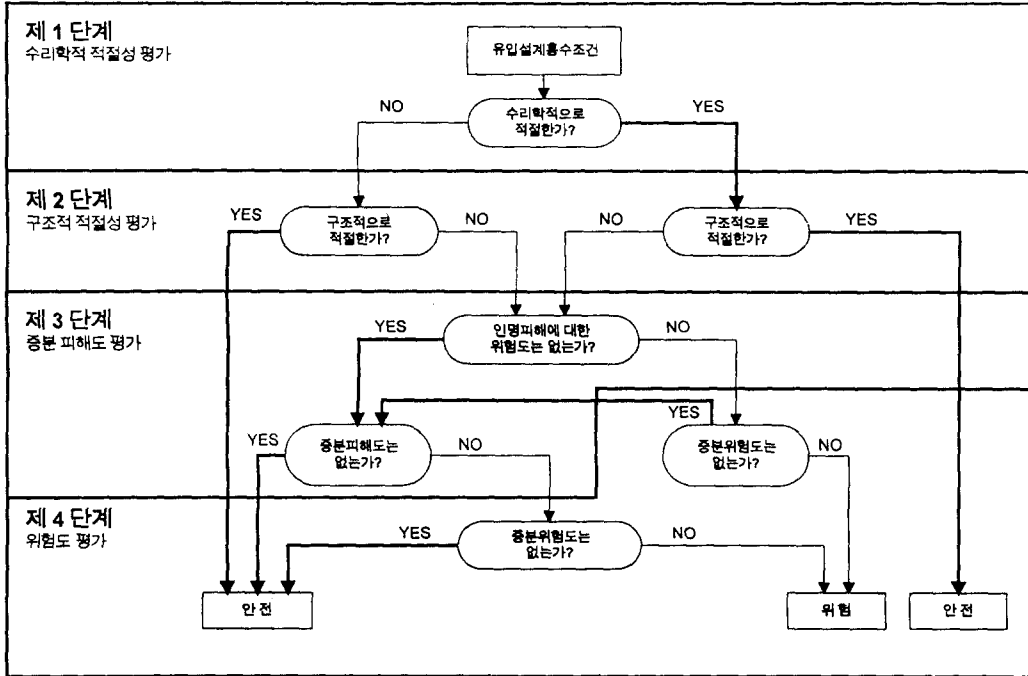


그림 1 댐 및 제방의 위험도 평가를 위한 단계별 과정

#### 4. 위험도 해석 모형의 적용

##### 4.1 유역 및 댐의 개황

본 연구의 모형은 상류부에 두개의 댐이 공존하고 댐 하류부에는 국가시설물이 위치해 있는 경상북도 “가” 유역에 적용하였다. 본 유역은 유역면적 54.6 km<sup>2</sup>, 댐 하도부 유로연장이 약 5.63 km으로서 하상경사가 상류부에는 1/10~1/20 정도로 매우 급하게 나타나고, 중류부에는 1/100~1/250, 하류부에서는 1/250~1/550 정도로 조금 완만해지는 경향을 가지고 있다. 두개의 댐이 위치한 상류부에는 거의 원시적인 자연 하천을 형성하고 있다. 중류부 및 하류부의 좌안에는 도로를 접한 제방이 하구부 직전까지 축조되어 있고 우안에는 전답이 넓게

형성되어 있으며, 하구부는 파랑에 의한 표로 단구를 형성하고 있다. 그림 4는 적용지역의 유역도를 나타내고 있다. 본 유역에는 그림 서 보는 바와 같이 A댐과 B댐이 위치하고 있었다. A댐은 유역면적 22.93 km<sup>2</sup>, 댐 높이 14 m, 길이 130 m인 earth-fill 댐으로서 길이 56m인 측수로형 여수로와 방수로가 부속구조물로 형성되어 있으며 여수로의 계획홍수량은 3.75 m<sup>3</sup>/sec/m로 설계되어 있다. B댐은 유역면적 11.86 km<sup>2</sup>, 댐 높이 29 m, 길이 240 m인 earth-fill 댐으로서 길이 53m인 측수형 여수로와 취수탑이 부속구조물로 형성되어 있으며 여수로의 계획홍수량은 207 m<sup>3</sup>/sec로 설계되어 있다.

#### 4.2 강우-유출 조건

강우-유출조건은 200년 빈도 홍수량과 PMF 조건을 산정하여 해석하였다. 본 연구에서의 PMP 산정은 건설부(1988)의 “한국 가능최대강수량 추정”에 관한 보고서의 자료를 인용하여 해석하였다. 해당지역에서의 24시간-1000 km<sup>2</sup> PMP값을 가능최대강수량도로부터 구적계를 이용하여 472.9 mm로 구하고 면적감소계수를 이용하여 본 유역의 유역면적인 54.57 km<sup>2</sup>에 대한 PMP를 522.55 mm로 산정하였다. 해당 지역에서는 장기간에 걸친 강수량에 관한 구체적인 특성치들을 구할 수 없었으므로 이 유역에서의 Mononobe의 수정 n값을 이용하여 1시간 PMP를 106.67mm로 산정하였다. 장기간 확률강우강도식을 보유한 지역에서의 확률강우강도식을 활용하여 이 유역의 강우강도 106.67 mm/hr로 놓고 환산하면 해당 지역에서의 PMP에 관한 강우강도식을 얻을 수 있었다.

#### 4.3 월류 붕괴 위험도의 산정

실제 댐에서 위험도 계산을 위한 두가지 방법을 적용하기 위하여 실행함수를 정의하고 그에 따른 각 매개변수에 대한 분포형을 결정해야 한다. Monte-Carlo 기법과 AFOSM 기법에 의한 실행함수는 식 (1)과 같다.

$$g(x) = H_D - \left( \frac{Q_S}{C_D L_S} \right)^{2/3} - H_P \quad (1)$$

여기서 H<sub>D</sub>는 댐의 높이, Q<sub>S</sub>는 여수로를 통과하는 방류량, C<sub>D</sub>는 유량계수, L<sub>S</sub>는 여수로의 길이, H<sub>P</sub>는 여수로의 높이이다. 댐의 월류 위험도를 계산하기 위해서는 앞에서 정의한 실행함수의 매개변수들에 대한 확률분포와 불확실성을 미리 파악해야 한다. 실행함수의 매개변수들에 대한 확률분포와 불확실성의 결정은 이와 관련된 많은 기록과 실측자료를 바탕으로 결정되어야 하나, 많은 경우에 있어서 기록자료를 구하기 어려울뿐 만 아니라 많은 불확실성을 포함하고 있기 때문에 현장에서 직접 자료를 수집한다는 것도 용이하지는 않다. 본 연구에서는 댐 및 하천유역과 관련된 자료를 현장조사를 통하여 광범위하게 수집하였고, 참고문헌에

서 조사된 자료를 활용하여 실행합수에 대한 확률분포를 결정하였다. 각 댐에 대해서 Monte-Carlo와 AFOSM 기법에 의한 위험도 계산 결과는 표 1과 같다.

표 1 월류 위험도의 산정

댐 구분	Monte-Carlo	AFOSM
B댐	0.0000	0.0000
A댐	$3.6667 \times 10^{-4}$	$4.135 \times 10^{-4}$

표 1에서 보는 바와 같이 B댐의 경우 충분한 저수용량과 적정 길이의 여수로가 홍수로 인한 저수지로의 유입량을 적절히 소통시킴을 알 수 있었다. 그러나 A댐의 경우는 B댐보다 유역의 면적이 넓을 뿐만 아니라 충분한 저수용량을 가지고 있지 못하므로 PMF의 유입으로 인한 월류위험도가 상당히 높은 것으로 산정되었다. 이에 대한 대처방안으로는 근본적으로 댐의 높이를 높이거나, 여수로의 높이를 낮추는 것으로 댐의 저수용량을 홍수에 대해 적절히 대처하는 것이라 하겠다. 그러나 저수용량을 조절하는 문제는 A댐의 기능상의 문제와 하구부 하천의 상황에 따라 조절할 문제이므로 제반 여건의 검토가 있어야 하겠다. 한편 200년 빈도의 강우량조건에서는 A, B의 댐이 위치한 강우강도식을 구할 수 없어, 근접지역의 강우강도식을 이용해서 해석한 결과 A, B댐의 경우 모두 안전한 것으로 나타났다.

#### 4.4 하천제방에 대한 위험도 산정

하천제방에 대한 위험도 산정에 있어서 가장 중요한 것은 댐에서 방류되는 홍수량이 하천으로 유입되었을 경우, 이 유량이 하도를 따라 유하함에 따라 각 하도지점에서 나타나는 수위변동 양상이라 할 수 있겠다. 그러나 하도에서 수위를 찾는 많은 방법이 많은 연구자들에 의해 제시되고 있으나, 많은 불확실성을 내포하고 있다.

Manning식에서의 독립변수들은 하도의 기하학적인 형태, 마찰경사, 조도계수 등이다. 만약 독립변수들의 평균특성치가 일정하다면, 수리학적 불확실성은 각기 매개변수들에 의한 불확실성들의 결합으로 표시될 수 있겠다. 수리학적인 불확실성에 의한 증가된 위험도 값에 대한 검토는 각 변수들에 대한 변동계수 값을 찾아 주어진 수식에 대입하여 이루어질 수 있다.

Manning식에서 조도계수의 분포형은 삼각형분포로 가정하였다. 본 연구에서는 Manning식을 이용한 실제하도에서 수위변동 상황을 파악하기 위하여, 수위 산정의 불확실도에 영향을 미치는 매개변수들의 불확실성들을 고찰하고자 하였다. 특히, Manning식을 이용한 하도내의

수위변동 양상에 가장 큰 영향을 미치는 조도계수의 불확실성으로 인한 실제 하도내서 지점별 수위의 민감도 분석을 실시하였다. 홍수위의 계산은 표준측차법을 사용하였으며, 하도내의 유량은 A댐과 B댐의 여수로를 통한 홍수량을 기준으로 하였고 하도단면은 실제 하도단면 자료를 이용하였다. 또한 조도계수는 하한값이 0.07, 상한값이 0.09, 최빈수를 0.08로 하여 지점별 수위변동 상황을 도시하였다. 하도내에서 조도계수의 변화에 따른 수위는 0.02~0.63m까지 변화하였다. 이로서, 적절한 조도계수의 산정이 하천제방의 위험도 산정시 하도에서 홍수위 예측에 있어서 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

댐 및 제방에 대한 월류 위험도 해석을 위해서 다양한 파괴의 원인을 고려하여 Monte-Carlo기법과 AFOSM기법에 의한 위험도 산정모형을 개발하였다. Monte-Carlo기법과 AFOSM 기법은 댐의 월류 위험도 계산에서 대등한 결과를 나타내고 있었다. 본 위험도 모형을 실제유역에 적용한 결과, A댐의 경우 유출계수의 증가에 따라 PMP 조건하에서 위험도를 나타내고 있었으나, B댐의 경우는 200년 빈도 및 PMP 조건하에서 여수로가 홍수량을 적절히 소통시킴으로서 안전한 것으로 나타났다. 댐 하류부 홍수위 해석에 있어서는 Manning의 조도계수가 수위변동에 미치는 영향이 지배적임을 판단할 수 있었고, 하천 제방의 건설이나 제내지의 범람위험도 산정에 있어 정확한 조도계수의 추정과 이에 따른 위험도의 평가가 중요한 과정으로 나타났다.

### < 참고문헌 >

- Ang, A. H. S. and Tang, W. H. (1984). *Probability concepts in engineering planning and design*. Vol. II, John Wiley & Sons.
- Bowles. D. S. (1993). "Risk Assessment: A tool for dam rehabilitation decision." *Geotechnical Rehabilitation, ASCE*, April 25-28, Raleigh, North Carolina, 116-130.
- Cheng, S. T. (1982). *Overtopping risk evaluation for an existing dam*. Ph. D. Dissertation, University of Illinois at Urbana Champaign.
- Coasta, J. E. (1985). "Floods from dam failure." *Open-File Report 85-560*, USGS, Denver, Colorado.
- Mays, L. W. and Tung, Y. K. (1992). *Hydrosystems engineering and management*. McGraw-Hill.