

수공구조물에 대한 Risk Analysis 기법의 적용(II)



한 건 연 |

경북대 토목공학과 교수, 우리학회지 편집위원장
kshanj@knu.ac.kr



이 종 석 |

한국건설교통기술평가원 선임연구원
kicstep@kistep.re.kr

Contents...

1. 서 언
2. Risk Analysis 방안
3. 수공구조물 안전에 대한 Risk Analysis
 - 3.1 1단계 분석
 - 3.2 2단계 분석
 - 3.3 3단계 분석
4. 댐 하류부 Risk Analysis
 - 4.1 하류부 Risk Analysis의 중요성
 - 4.2 모델링 결과 평가
 - 4.3 공공 안전성 평가
 - 4.4 경제적인 측면 평가
 - 4.5 환경적인 측면 평가
5. 적용 예
 - 5.1 댐 위험도 발견
 - 5.2 댐 위험도 예측
 - 5.3 댐 위험도 평가
 - 5.4 댐 위험도 관리
6. 결 언

4. 댐 하류부에 대한 Risk Analysis

4.1 하류부 Risk Analysis의 중요성

수공구조물 붕괴 등 자연재해에 의한 사고들에 대해서 경제적 및 사회적인 손실을 일관되게 계산하기는 쉽지 않다. 여러 기관들에 의해서 피해 정도를 계산하지만 적용되고 있는 기술은 시간에 따라 변화하는 비용산정 과정이 포함되어야 한다. 위험도 계산기법들은 결과의 심각성을 표현하는데 사용되고 다양한 위험수준에 의해 대상 구조물을 분류하게 되는데, 그 분류 방법은 적용하고 있는 기관에 따라 상이하다. 이 경우 댐 붕괴 등 자연재해와 연관되어 있는 피해도를 추정하기 위해 광범위하게 수용될 수 있는 도구를 사용하는 것이 용이하지 않다. 특히, 인명의 잠재적 손실과 같은 공공안전의 영향을 정량화하기 어려운 문제점을 내포할 수 있다.

Kaplan과 Garrick(1981)은 공식적으로 위험도 분석은 다음의 세가지를 요구한다고 기술한바 있다. 즉, ① 시나리오와 사상의 집합

$$E_i, i=1, \dots, n$$

② 각 시나리오와 사상에 연관된 확률

$$P_i, i=1, \dots, n$$

③ 각 시나리오와 사상에 연관되어 나타나게 되는 결과 $C_i, i=1, \dots, n$ 가 그것이다.

공학적으로 보면 위험도는 주로 확률과 결과의 곱으로 정의된다.

$$Risk = \{probability \times consequence\} = pc \quad (1)$$

이것은 대부분 댐 안전 위험 분석들이 risk 라는 용어로 사용하는 방법이다. 한 가지 이상의 사건이 역결과로서 나타낼 수 있는데, 이와 같은 정의는 사

상들의 집합에 대한 결과치로 확장될 수 있다.

$$Risk = \text{expected consequences} = \sum_{i=1,n} (p_i c_i) \quad (2)$$

여기서 P_i 는 결과 C_i 의 발생확률이다. 이것은 댐 붕괴가 이미 발생한 것으로 가정한 조건부 확률의 결과(즉, 댐 붕괴가 발생한 결과의 기대값)와는 다른 개념으로서 식 (2)에 의한 위험도는 여러가지 요인에 의한 댐 붕괴 확률과 각 요인에 의해서 발생한 댐 붕괴에 따른 하류부 결과의 발생 확률을 조합한 것을 의

표 1. 댐 규모에 따른 분류

구분	저수용량	높이
소규모	1.2×10 ⁶ m ³ 이하	12m 이하
중규모	1.2×10 ⁶ m ³ ~60×10 ⁶ m ³	12m~30m
대규모	60×10 ⁶ m ³ 이상	30m 이상

표 2. 댐 위험도에 따른 분류

위험도구분	인명피해	재산피해
낮음	없음	소규모
중간	거의 없음	상당규모
높음	있음	대규모

표 3. 설계 홍수량 조건

구분	소규모 저수지	중규모 저수지	대규모 저수지
위험도 낮음	100	100~0.5×PMF	0.5~0.1×PMF
위험도 중간	100~0.5×PMF	0.5~1.0×PMF	1.0×PMF
위험도 높음	0.5~1.0×PMF	1.0×PMF	1.0×PMF

(자료: Canadian Dam Safety Guideline)

미한다. 표 1~표 3은 댐의 위험도 분류방법을 나타내고 있는데, 최근 전지구적인 이상기후현상에 따라 FERC(Federal Energy Regulation Commission), ICOLD(International Committee On Large Dams), NRCS(National Resources Conservation Service) 등의 기관에서도 댐, 저수지 하류부의 인명 피해가 예상되는 경우에는 PMF를 설계유입조건의 기준으로 설정하는 것이 일반적인 추세이다.

4.2 모델링 결과 평가

일반적으로 모델링 결과는 다음과 같은 네 가지의 사항을 포함하게 된다.

- ① 댐 붕괴부의 특성
- ② 홍수파의 하류부 추적
- ③ 홍수에 의한 하류부 영향 평가
- ④ 인명손실, 경제적 손실 및 환경적인 손실의 정량적 산출

모델링 결과는 그림 1과 같은 네 가지 부분으로 구성하게 된다. ① 댐 붕괴부와 홍수추적에 관한 물질적인 과정의 모델링 ② 영향범위내의 토지사용, 경제활동, 인구의 분석 ③ 홍수범람에 따른 물질적인 영향과 개인 및 사회적인 반응의 예측 ④ 홍수피해에 대한 정량적인 피해도 분석 등이 그것이다.

4.2.1 댐 붕괴부의 모델링

하류부 인구가 댐 지역에서 상당구간 멀리 떨어져 있을 때 댐 붕괴부의 형성과정에 대한 구체적인 세

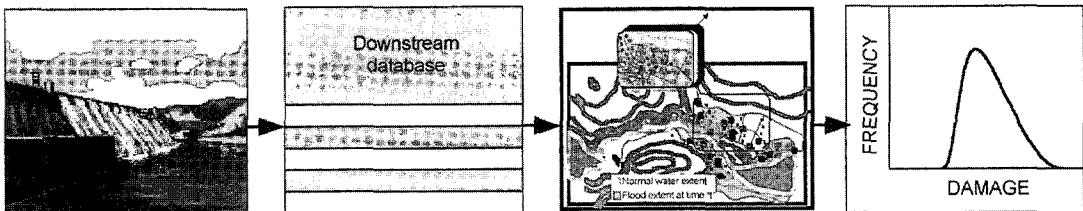


그림 1. 댐 붕괴 하류부 모델링의 4단계

부내용은 공공의 안전 및 대피계획 수립 등에 큰 영향을 미치지 않을 수도 있다. 이런 경우에는 홍수추적, 홍수도달시간, 홍수파의 감쇠특성 등이 결과 계산에 영향을 미치게 된다. 다른 한편으로 하류부 인구가 댐 지역에 가까이 있는 경우 댐 붕괴부와 관련된 구체적인 세부사항(즉, 붕괴부 양상, 붕괴부 폭, 붕괴지속시간 등)이 상대적으로 큰 영향을 미치게 된다.

댐 붕괴는 물리적인 붕괴발달 특성과 붕괴를 막기 위해 댐 관계자에 의해서 응급복구 등의 영향에 의해서 천천히 혹은 급격히 발생할 수 있다. 하류부 피해는 홍수류의 전파속도, 예경보시간, 홍수파의 위력 등에 따르지만, 전형적으로 댐의 붕괴 유출수문곡선은 한시간에서 몇시간 내에 급격하게 침두치로 상승하였다가 수십 시간에 걸쳐서 저수지내의 물을 배수시키게 된다.

실제적으로 댐 붕괴부 모델은 붕괴부 양상, 붕괴부 폭, 붕괴지속시간 등에 대해서 사전입력자료를 요구한다. 붕괴부의 폭 및 붕괴지속시간 산정 등에 관한 경험적인 자료는 Singh(1996)에 요약되어 있다. Wahl(1997)은 붕괴부 형성에 관한 공식을 이용하여 관측값과 예측값을 비교·분석하여 제시한 바 있다. 붕괴부의 형성은 주로 두 가지 방법에 의해 모델화된다. ① 경험적인 방법으로서 현장의 관측치와 물리적 모형 실험을 통해서 얻은 자료를 통계학적으로 분석

하여 사용하는 방법, ② 해석적인 방법으로 수리학과 댐을 구성하고 있는 토양의 침식성질에 기초를 둔 공학모형을 사용하는 것이다. 표 4는 널리 적용되고 있는 수치모델에 대한 모델링 과정을 비교·정리한 것이다.

4.2.2 홍수추적 및 범람해석

홍수추적 및 범람해석 모형은 홍수파가 하류부로 전파되어 가는 과정을 수리학적으로 예측하는 것이다. 이 모형의 목적은 댐 붕괴 이후로부터 하류부 구간에서 시간과 거리의 함수로서 홍수파의 유속과 수심에 대한 정확한 예측을 위한 것이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 대상하천에 대한 홍수파의 감쇠특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

표 5는 댐 붕괴 홍수추적에 필요한 기본자료를 나타내고 있다. 일반적으로 댐 하류부의 홍수파의 방향

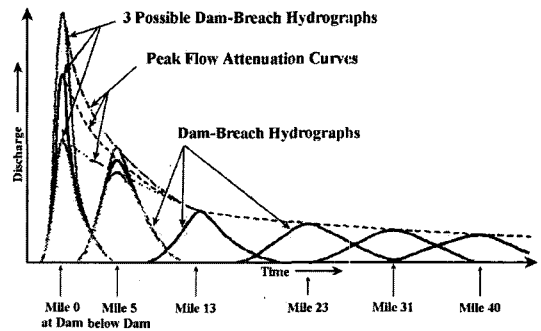


그림 2. 댐 붕괴파의 하류부 전달 양상

표 4. 댐 붕괴부의 모델링 방법

모형	저수지 수리		저수지 붕괴 홍수류 수리		붕괴부 형성조건		홍수추적	
	Level Pool Routing	저수지 수위계산	댐정부를 통한흐름	붕괴부를 통한흐름	붕괴부 형상	붕괴발달 과정	하도추적	홍수터 추적
DAMBRK	체적 평형	체적 평형	넓은마루 웨어공식	넓은마루 웨어공식	직사각형 사다리꼴 삼각형	선형 및 비선형 과정	동역학적 모의	동역학적 모의 및 저류모의
SMPDBK	×	×	넓은마루 웨어공식	넓은마루 웨어공식	직사각형	×	무차원 곡선	×
BREACH	질량 보존	체적 평형	넓은마루 웨어공식	Manning 방정식	직사각형 사다리꼴	제체 토양상수 자료필요	×	×
HEC-RAS	×	×	넓은마루 웨어공식	넓은마루 웨어공식	직사각형 사다리꼴	선형 과정	동역학적 모의	저류모의

표 5. 댐 붕괴 홍수추적에 필요한 기본자료

구 분	필요한 자료
수문곡선	저수지 유입수문곡선, 지류 유입수문곡선
저수지 자료	수위-유량 관계, 저수지 단면
댐 자료	수위에 따른 여수로 방류량, 댐 높이 월류 폭 및 월류 계수, 부속시설물(터빈, 수문)
붕괴부 자료	붕괴시작 조건(저수지 붕괴표고 혹은 붕괴시간) 최종 붕괴 크기, 붕괴 경사, 붕괴완료 시간
하도지형 및 수리특성	하도, 홍수터 그리고 지형 경계 단면 하도, 홍수터, 사수역의 구분, 하도와 홍수터의 조도계수
중간댐 및 교량자료	수위에 따른 댐 방류량, 교각이나 월류부의 지형자료 붕괴 조건 및 기준
경계조건	상류단 경계 : 통상 유량수문곡선, 하류단 경계 : 통상 수위수문곡선 내부 경계 : 댐, 초기조건 : t=0 일때의 유량 및 수위
계산 매개변수	계산시간 간격, 계산거리 간격 수치모의에 사용되는 매개변수(가중치 및 수렴기준)

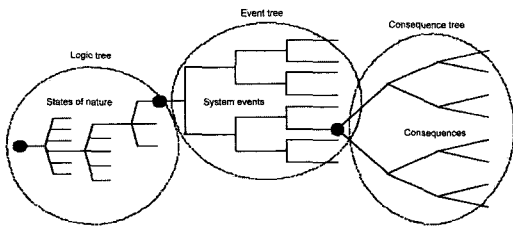


그림 3. 댐 하류부 영향 평가를 위한 Event Tree의 작성을 결정하는데 세 가지 방법이 사용될 수 있다. ① Saint-Venant의 1차원 부정류 흐름을 해석하는 수치 프로그램을 이용하는 방법, ② Manning의 방정식과 연계하여 침투홍수량의 감쇠특성을 파악하기 위한 그래프 또는 프로그램을 이용하는 방법, ③ Manning's 방정식과 함께 Muskingum-Cunge 추적기법을 적용하는 방법이 있다. 이들 중 ①의 방법이 가장 정확한 예측을 제공하며, 단지 흐름의 수심을 대략적으로 계산하기 위한 Manning의 방정식을 사용하는 ②, ③의 방법은 경우에 따라서 일정수준의 오류를 가지는 경우도 많다. 댐 붕괴 모델링에서는 붕괴부에서 발생하는 불확실도와 함께 조도계수 변화 및 지형 변화 등 하류부 하도구간에서 발생할 수 있는 불확실도의 영향을 고려하여 그 결과를 제시하여야 한다.

댐 붕괴부의 특성과 하류부 홍수추적 결과 등에 대한 다양한 영향도의 평가는 그림 3과 같은 Event Tree를 구성하여 불확실도를 정량화하는 노력이 요구된다.

4.3 공공 안전성 평가

대부분 댐 안전 연구들은 세 가지 결과에 초점을 맞추게 되는데, 공공안전, 경제적 결과 및 환경적인 결과가 포함되어야 한다. 댐 붕괴의 가장 중요한 결과는 공공 안전에 영향을 미치는 바, 특별히 댐 하류부에서의 인명피해는 대단히 심각하게 나타날 수 있다. 전세계적으로 가장 큰 인명피해를 일으킨 댐 붕괴사고는 1975년 8월 태풍에 의해서 중국 해난성에 위치한 높이 118m의 Banqio 댐 등의 붕괴사고로 직접적인 인명피해만도 26,000명 이었다. 유럽에서의 최악의 댐 붕괴사고는 1963년 10월 9일 이탈리아의 Vajont 댐 붕괴로서 약 2,000여명이 사망한 바 있고, 1985년 7월 19일 북부 이탈리아에서 Stava 댐이 붕괴되어 270여명의 인명손실이 있었다. 미국에서는 1874년 메사츄세츠주의 Miller 댐이 붕괴되어 143명의 인명피해가 있었고, 1889년에는 펜실베이니아주의 South Fork 댐이 붕괴되어 2,200

명이 사망하였다. 1995년에 조사된 바에 의하면 미국에서 인명피해를 야기한 댐 붕괴사고는 60여건이 기록되어 있으며 이에 따른 인명손실은 4,100명에 달하고 있다.

댐 붕괴에 의한 잠재적인 인명손실 수를 특징짓는 것은 홍수 범람에 노출되어 있는 잠재적인 인구(PAR, Persons At Risk)에 대해서 사망률에 영향을 미치는 많은 인자에 의해서 결정되어야 한다. 이에 대해서 Graham(1999)은 가장 중요한 인자로서 ① 댐 붕괴 범람지역에 거주하는 인구의 수, ② 위험에 노출된 사람들에게 전달되는 경고의 수준, ③ 홍수의 유속 및 수심, 파괴력 등 홍수의 심각성의 정도 등이다.

어떤 경우에는 공공 안전의 결과는 인명 손실에만 제한되고, 사후의 증상, 신체장애, 고통까지를 포함하지 못한다. 정책적인 관점에서 볼 때, 공공 안전의 결과들은 매우 중요한 요소로 다루어져야 하며 이것들을 정량화하여야 한다.

4.4 경제적 측면 평가

대부분 경우에서 경제적인 결과의 평가 방법은 상응하는 공공 안전 영향력의 평가보다 용이하다. 제내지(고속도로, 교량, 공공시설 등)에서 건물과 대부분 다른 기반시설들은 고정된 자료로서 피해를 예측하는데 이용가능하다. 공공 투자 이론에 있어서 비용-이익 분석은 어떻게 정량화하고 경제적인 비용과 비교하는지에 대한 분석적인 방법이 제공되어야 한다. 그럼에도 불구하고, 댐 붕괴의 경제적 손실에 대한 평가는 프로젝트를 계획하는 동안에 계획된 경제적 비용과 이익을 평가하는 것 보다 더욱 복잡하다.

댐 붕괴의 경제적인 결과에 있어서 주요한 분류는 직접적 결과와 간접적 결과이다. 직접적 결과는 붕괴의 영향이나 홍수파와 연관되고 있는 즉각적인 결과이다. 예를 들어, 직접적 경제피해는 ① 댐, 부속구조물, 하류하천정비에 대한 투자의 손실, ② 건물, 장

비, 토지 개선 등 하류부 경제손실, ③ 농작물의 손실 등을 포함한다. 간접적인 경제 피해는 홍수의 직접적 영향에 따른 주로 자원 이용 손실을 포함하는 부속적인 영향이다. 간접적인 경제피해는 경제적으로는 직접적인 영향보다 훨씬 더 중요할지도 있는데, 농업, 산업 그리고 여가를 위한 토지이용에 대한 생산적인 비용의 손실, 에너지 생산의 손실, 거주 재산 이용상의 손실, 다른 주거지 이용에 따른 손실 등이 포함된다. 평가방법에 있어 붕괴에 따른 경제적인 결과를 모델링하고 예측하는 것은 일반적인 프로젝트 수행을 위한 비용과 편익의 모델링 과정과는 상이할 수 있다.

4.5 환경적인 측면 평가

댐 붕괴의 환경적인 결과를 평가하기 위한 계산법은 상당히 난해하다. 최근 대중의 의견과 정부의 정책은 환경적인 결과를 고려하는 방향으로 발전되고 있다. 그러나 환경적인 결과를 댐 안전을 위해서 위험분석 내에서 포함하는 것은 어려운 과제이다. 어떻게 불확실한 환경적인 결과를 이해하기 쉽게 설명해야 하는지, 어떻게 생태계 반응에 대한 이해가 발생할 때 환경적인 영향을 평가할 것인지, 어떻게 경제적으로 이런 영향에 가치를 부여할 것인지 등이 논의의 대상이 되고 있다. 댐 붕괴에 대해서 정량적으로 환경적 결과를 예측하고 그것들의 결과에 가치를 부여하는 불확실성은 상당히 크게 된다. 대부분의 경우 공공 안전과 경제적 결과들에 있어서의 불확실성에 대응하는 것 보다 더 크게 나타날 수 있다. 예를 들어 범람에 의해서 특별 보호되는 서식지나 정부의 규제 아래에서 야생동물, 국가적 유적지, 독성물질의 확산 등을 포함하는 하류부 요구사항을 포함시킬 수 있어야만 환경적이고 생태적인 비용과 편익이 댐 붕괴에 따른 하류부 영향평가에서 정량적으로 포함하게 된다.

하천 유역은 수리·수문학적으로 풍부한 생태계를 구성하게 되며 환경과 생태계 분석을 위한 논리적인

기본단위이다. 그러나 예를 들어, 환경적 모델과 댐 붕괴에 의한 홍수와 같이 하천유역에 대해 비극적인 상황에 반응한 예측에 있어서 과학적인 지식을 일관적으로 통합하는 것은 어려운 일이고 효과적인 예측을 수행하기에는 경험이 많지 않다. 따라서, 환경분

석 중에서 주관적인 가치 판단에 기초를 둔 환경적, 정치적, 경제적 및 사회적인 요소 간의 균형있는 평가가 요구된다. ㉞

(다음호에 계속됨)