

댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발:

I. 이론 및 모형

Risk Model for the Safety Evaluation of Dam and Levee:

I. Theory and Model

한 건 연* / 이 종 석** / 김 상 호***

Han, Kun Yeun / Lee, Jong Seok / Kim, Sang Ho

Abstract

The risk assessment model for hydrologic safety analysis of dam and levee is developed by using Monte-Carlo and AFOSM (Advanced First-Order Second-Moment) method. The fault tree analysis and four phases approach are presented for the safety evaluation of risk of dam and levee. The risk model consists of rainfall-runoff analysis, reservoir routing and channel routing considering the variations in the model parameter. For the rainfall-runoff analysis, KRRL method is adopted with 200-year precipitation and PMP (Probable Maximum Precipitation). Reservoir routing is performed by fourth order Runge-Kutta method and channel routing by standard step method. The suggested model will contribute to safety evaluation of dam and levee and their rehabilitation decision problem.

Keywords: dam, levee, safety evaluation, fault tree, Monte-Carlo, AFOSM

요 지

본 연구는 댐 및 하천제방에 대한 수문학적 위험도 평가를 위해서 Monte-Carlo 기법과 AFOSM 기법에 의한 위험도 모형을 개발하였다. 댐 및 제방에 대한 위험도 해석을 위하여 fault tree를 작성하였고, 단계별 위험도 평가과정을 제시하였다. 본 연구의 위험도 모형은 모형 매개변수에 대한 변동성을 고려하여 강우-유출해석, 저수지 추적, 하도추적 등으로 구성하였다. 강우-유출해석에 있어서는 200년 빈도 및 PMP에 의한 설계강우에 대한 KRRL법에 적용되었다. 저수지 홍수추적은 4차 Runge-Kutta법을 이용하였고, 하도부 추적은 표준축차계산법에 의한 부등류 해석을 실시하였다. 본 연구 모형은 기존의 댐 및 제방에 대해서 홍수시 안전도 평가와 유지보수의 정책결정 등에 기여할 수 있는 모형으로 제시하였다.

핵심용어: 댐, 제방, 안전도 평가, fault tree, Monte-Carlo, AFOSM

* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 미국 Utah State Univ. 토목공학과 박사과정

*** 경북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

1. 서론

최근에 들어 이상기후에 따른 집중호우의 영향과 하천에 인접한 제내지에서의 토지 이용도 극대화 등으로 인하여 하천 연안지역에서의 홍수피해는 더욱 증가하고 있다. 댐 및 제방의 붕괴는 주로 집중호우로 인하여 댐의 여수로 및 하천의 수로단면에서의 홍수소통 능력이 충분하지 못하여 수체가 댐 및 제방을 월류하는 경우 또는 제체내에서 발생하는 침윤, 활동 등이 주요 원인이다. 대규모의 물을 저류, 소통하는 수공구조물의 예기하지 못한 붕괴로 인한 피해는 막대한 것이기 때문에 이미 많은 국가에서는 댐 하류부의 인명, 재산과 각종 시설물을 보호하기 위해서 댐 및 제방에 대한 위험도 해석과 그에 따른 홍수범람 예상도 등의 작성을 법적으로 의무화하고 있다. 특히 댐 하류부에 인구밀집 지역이 분포되어 있거나, 중요한 국가시설물이 위치하고 있는 경우에는 극한적인 강우조건하에서의 댐 및 제방에 대한 위험도 해석기법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

외국에서 댐이 붕괴된 자료를 살펴보면, Middlebrooks(1953)의 조사에서 1950년 이전에 미국에서는 220개의 토사댐이 붕괴되었다고 보고하였고, Johnson과 Illes(1976)는 1946년부터 1965년의 20년간 전세계적으로 붕괴된 300여개 댐에 대한 조사분석을 실시하였으며, 육군공병단의 자료(Costa, 1985)에 의하면 미국내의 50,000여개의 댐 중 약 40%가 붕괴시 하류부의 인명과 재산에 커다란 위험이 있으며 이들 중 대부분은 토사댐으로 조사되었다.

Monte-Carlo 기법은 대응하는 확률분포에 따라 각 모의발생에서 인위적으로 발생시킨 임의변수들의 집합을 사용하는 과정이다. Askew 등(1971)는 다목적 저수지시스템의 설계와 운영에 대해서 Monte-Carlo 기법을 사용하였다. Bohun과 Vischer(1978)은 Monte-Carlo 기법을 입력자료의 상이한 분포함수로서 위험도와 민감도 분석에 적용하였다. Haan(1977), Chow(1978), Qaisi(1985) 등은 수자원시스템에 관한 연구에 있어 Monte-Carlo 기법을 유용하게 적용한 바 있다.

FOSM(First-Order Second-Moment)은 임의변수의 Taylor 급수 확장에서 2차 이상의 고차항을 절단하는 근사적인 확률이다. Cornell(1972)은 공학적인 적용을 위한 이 방법의 개발을 시작하였다. 변수들의 평균점에서 Taylor 급수가 확장될 때가 MFOSM(Mean Value First-Order Second-Moment)이며 이 방법의 적용은 Ang과 Tang(1984)에 기술되었다.

Yen(1990)은 이 방법을 수문학적, 수리학적 불확실성을 고려한 배수암거의 설계에 적용하였고, Yen과 Tung(1993), Cheng과 Yen(1993)은 불확실성 요소를 고려하여 위험도와 안전계수 사이의 관계를 결정하는데 사용하였다.

MFOSM의 정확도를 개선하기 위한 AFOSM(Advanced First-Order Second-Moment) 기법의 기본 개념은 Hasofer와 Lind(1974)에 의해 최초로 제안되었으며, Rackwitz와 Fissler(1977)가 완전한 AFOSM 기법을 개발하였다. 이 방법의 요점은 파괴면상의 가능 파괴면에서 실행함수가 0인 경우에 대하여 Taylor 급수 확장을 통해 실행함수를 선형화하는데 있다. 파괴점을 결정하기 위해 여러 가지 반복기법이 제안되어 왔는데, 그 중 Rackwitz와 Fissler(1977), CIRIA(1977)가 제안한 방법이 표준적인 반복기법으로 알려져 있다. AFOSM 기법은 여러가지 수리구조물의 위험도 평가에 아주 효율적인 방법으로 Ang과 Tang(1984), Yen과 Tung(1993) 등에 의해서 다양한 수공구조물에 대해서 적용된 바 있다.

국내에서는 우수관거의 신뢰도 분석을 위해서 Monte-Carlo, MFOSM, AFOSM 기법을 이용한 바 있으나(김문모 등, 1993), 아직까지 댐 및 하천제방 등의 중요한 수공구조물에 대해서 신뢰도 분석방법을 도입한 위험도 해석의 연구는 미흡한 실정이다. 특히 최근에 들어 이상강우의 빈번한 발생과 댐 및 제방 인근 지역에서의 인구증가, 토지 이용도의 극대화 등으로 인하여 이들의 붕괴로 인한 피해가 급격히 증대되고 있음을 감안한다면, 댐 및 제방 등의 위험도 해석기법의 개발은 절실히 요구되고 있는 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 댐 및 제방의 위험도 해석을 위하여 붕괴의 원인을 fault tree 해석에 의해 분석하였다. 이상강수 조건하에서의 댐 붕괴에 대한 위험도 해석기법을 개발하고, 이에 따른 홍수류의 하천제방에 대한 위험도 해석을 실시하고자 한다. 이를 위해서 신뢰도 해석을 도입하고, Monte-Carlo 기법과 AFOSM 기법에 의한 위험도 산정모형을 개발하였다. 앞으로 본 연구에서 개발한 위험도 산정 모형은 댐 및 하천제방의 안전도 확보 및 수공구조물의 유지관리면에서 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 댐 및 제방에 대한 위험도

2.1 붕괴의 원인

댐 및 제방과 같은 수공구조물은 설계와 관리에 만전

을 기울이고 있음에도 불구하고 예기치 못한 붕괴로 인한 피해는 막대하다. Jansen(1980)에 의해 조사된 자료에 의하면 12세기 이후 세계적으로 2,000여개의 댐이 붕괴되었으며 수천 개의 자연 댐이 붕괴되었다. 지난 1세기 동안에는 약 200여개의 특이할 만한 인공 댐들의 붕괴가 있었는데 이로 인하여 11,100명 이상의 인명이 희생되었다. 국내에서는 1961년 7월 11일 전북 남원군 이백면 효기리에 있었던 높이 15.6 m인 흙댐의 붕괴로 인하여 128명의 사망자를 낸 사건이 국내 최대의 참사였다. 미 육군공병단이 미국내의 8,639개 댐에 대하여 실시한 안전도 진단에서는 약 1/3이 불안정한 것으로 판정되었는데, 주된 결함원인은 82%가 여수로의 단면부족이었다(Costa, 1985). 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%, 파이프링 침투가 7%, 부실시공 및 운영실수 등의 기타원인이 19%였다.

Biswas와 Chatterjee(1971)은 세계 전역의 300개 이상의 댐에 대하여 검토한 결과, 35%가 여수로 통수능을 초과한 홍수로 인한 붕괴, 25%가 침투, 파이프, 초과간극수압, 부적절한 절토, 침하, 활동 등의 기초부 문제였고, 40%가 부실시공 및 불량재료, 파랑의 작용, 전쟁 등으로 인한 붕괴였다.

국제 대담위원회(ICOLD, 1973)에서의 1900년과 1973년 사이에 붕괴된 높이 15m 이상의 댐에 대한 조사결과 주요한 세 가지의 붕괴요인은 월류 및 부적절한 여수로(34%), 기초부 결함(30%), 파이프(28%) 등이었다. 콘크리트 댐의 주요 붕괴 원인은 기초부 결함(53%)이었으며, 토사댐의 경우는 파이프링 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 건설 후의 붕괴된 기간과 댐의 노후화의 관계 조사에서는 다른 요인들이 상대적으로 긴 댐 연령을 가지는 반면 기초부 결함에 의한 댐 붕괴는 건설후 짧은 기간 내에 주로 발생함을 알 수 있었다. 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 토사댐이 58%로 가장 많았고, 중력 댐은 26%로 두번째를 차지하고 있다. 붕괴된 댐 중 약 74%가 토사댐이었으며 댐의 붕괴확률 측면에서는 중력 댐이 가장 안전하였고, 그 다음이 부벽식과 토사댐인 것을 보여준다. 부벽식 댐은 건설된 예가 가장 적으며 가장 불안한 것으로 보고되었다(ASCE, 1973). 우리나라의 경우는 관개용 댐의 약 95%가 토사댐으로서 전체 댐의 대부분을 차지하고 있다.

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 추정된 바 있다(Baecher 등, 1980). 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(Mark와 Stuart-Alexander, 1977).

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 있다(Mark와 Stuart-Alexander, 1977; Rose, 1978).

2.2 fault tree 해석

댐 및 하천제방의 위험도를 나타내기 위해 사용되는 방법 중의 하나가 fault tree analysis(FTA)이며, 이는 댐 붕괴와 그 원인들 사이의 관계를 고려하기 위한 것이다(Cheng, 1982; Ang과 Tang, 1984). 위험도를 계산하기 위해서 fault tree 해석을 사용함으로써 위험도 인자들을 연립적으로 적분하여 댐 및 제방에 대한 위험도를 산출할 수 있다. fault tree 해석은 붕괴의 잠재적인 요소나 극한 붕괴 양상들을 규명하기 위한 수단도 제공할 수 있으므로 붕괴확률을 경감하기 위한 적절한 대응책이나 수정안들이 제안될 수 있다.

fault tree는 가능한 붕괴사건의 다양한 요소를 나타낸 것으로서 고려 대상인 댐 및 제방의 운영과 연관된 최상위 사상을 연관지어 정의하는 것으로 시작되며, 이에 따른 붕괴를 야기하는 모든 잠재원인과 최상위 사상에 기여하는 가능한 붕괴사건들을 규명하는 일이다. fault tree를 만드는 것은 직접적으로 최상위 사상을 일으키는 사건들에서 시작한다. 붕괴사건을 야기할 수 있는 원인과 기본적인 붕괴사건의 논리적 결합을 위해 수지상의 구조를 가지며, 가지들은 절점에 의하여 결합

된다. fault tree가 일단 만들어지면, 각기 나열된 붕괴사건 확률은 붕괴사건에 대한 적절한 수학적 공식과 위험도 계산방법을 이용하여 가지들을 따라 계산할 수 있고, 총 위험도는 fault tree의 절점과 수치상의 조합을 통하여 계산될 수 있다. 그림 1은 댐 및 제방의 붕괴원인에 대한 논리형 fault tree를 도시한 것이고, 그림 2는 월류에 의한 댐 및 제방의 붕괴 위험도 계산을 위한 논리형 fault tree를 도시한 것이다. 따라서, 본

연구에서는 그림 2의 댐 및 하천제방의 붕괴원인 중 중요한 요소인 유입홍수량이 댐 여수로 및 하도의 소통능력을 초과하는 수문학적 요소에 대한 위험도 평가모형에 대해 고찰하고자 한다.

이들 모든 요소들은 불확실한 것으로서 댐 및 제방에 따라 차이가 있고, 시간과 공간에 따라 변화한다. 붕괴에 기여하는 모든 요소들과 가능한 요인들은 댐 및 제방의 총 위험도를 평가하는데 있어서 체계적으로 고려

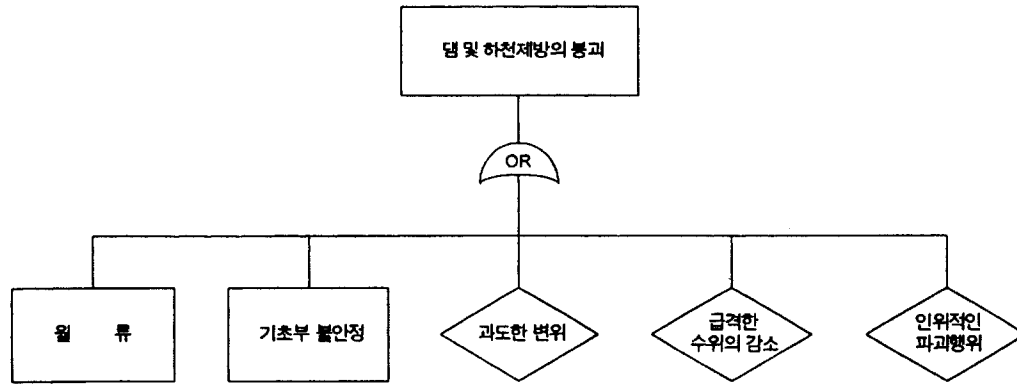


그림 1. 댐 및 제방의 붕괴원인

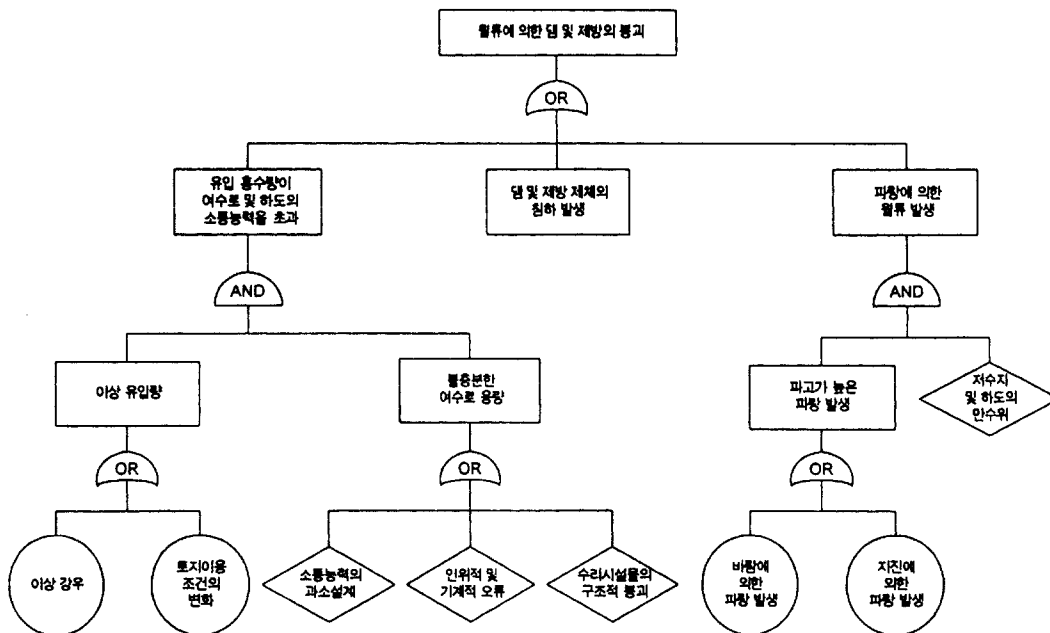


그림 2. 월류에 의한 댐 및 제방의 붕괴원인

되어야 한다. 이를 위해서는 많은 양의 정보, 인력, 시간 등을 필요로 한다. 본 연구에서는 수리, 수문학적 요인들에 의한 댐 및 제방의 월류에 따른 위험도 계산에 중점을 두었다. 본 연구에서 제시된 방법론은 댐 및 제방의 총 위험도 계산에 원인이 되는 다른 요소까지도 확장, 발전시킬 수 있을 것으로 사료되었다.

3. 위험도의 평가기법

기존의 댐 및 제방은 수리, 수문학적, 지반공학 및 내부적인 원인들에 대해 부적절한 것으로 고려될 수 있다. 특정 댐 및 제방에 대해 필요한 유지, 보수, 보수의 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 고려하여 잠재적인 편익들을 검토한다(Bowles 등, 1987; Bowles, 1993). 모든 댐 및 제방은 미리 정해 놓은 크기의 홍수를 안전하게 소통시킬 수 있어야 한다. 이 경우의 홍수를 설계유입홍수(또는 수문학적 기본 안전 조건)라 하며, 이는 댐과 저수지에 대해 개별적으로 결정되어야만 한다. 통상적으로 요구되어지는 설계유입홍수의 크기는 댐 및 제방의 붕괴시 하

류부 주민과 재산에 대해 심각한 위협이 될 수 있는 크기보다 큰 값이어야 한다. 많은 경우에 있어서 설계 유입홍수의 크기는 가능최대홍수(PMF)로 정의될 수 있으며, 이것은 어느 지점에서 발생할 수 있는 상한치가 되는 최대홍수를 의미한다.

만약 설계유입홍수가 기존 댐의 여수로의 통수능을 초과한다면, 이것은 수리학적으로 부적합한 것으로 고려된다. 이 경우에 있어서는 다음 사항을 결정하는 것은 중요하다.

월류에 의해 댐 붕괴가 발생하는지의 여부와 댐 붕괴가 인명에 대한 안전성을 위협하는 정도와 하류측 재산상의 피해 가능성을 증가시키는지의 여부이다. 어떤 경우에는 위험도의 증가가 중요하지 않은 것으로 판단될 수 있고, 비록 설계 유입홍수 조건하에서는 월류가 될 지라도 기존의 구조물이 안전한 것으로 판단될 수 있다. 이러한 여건하에서 구조물이 안전한 것으로 판단하기 위해서는 공학적인 평가와 홍수추적이 필요하다. 또한 재산 피해와 인명 손실의 크기와 확률 등의 평가가 요구된다. 그림 3은 댐 및 제방의 위험도 평가를 위한 단계별 과정을 나타내고 있다. 댐 및 제방의 수문학적 안전성 결정을 위해서는 다음의 4가지 단계가 기술될 수 있다.

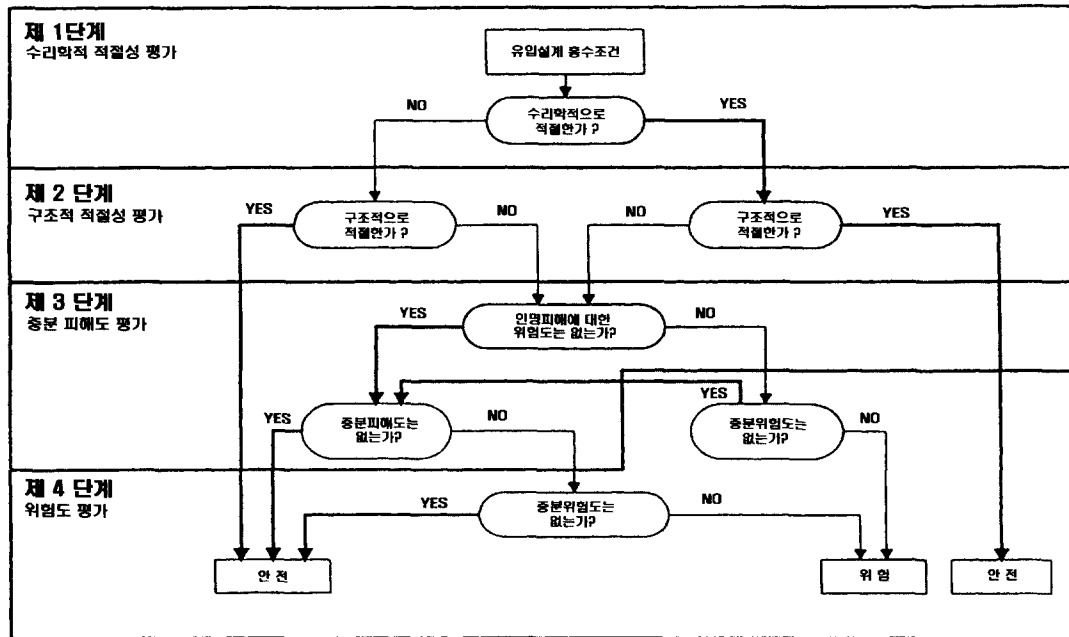


그림 3. 댐 및 제방의 위험도평가를 위한 단계별 과정

3.1 위험도 및 크기분류

일부 공학자들은 위험도(높음, 보통, 낮음)와 크기(매우 작음, 작음, 중간, 큼)에 따라 댐을 분류한다. 위험도는 댐 붕괴시 인명손실과 재산상의 피해에 대한 잠재도를 나타내나, 이것이 댐 자체의 적절성을 나타내지는 못한다. 댐의 크기는 수리학적인 높이와 저류용량을 기초로 한다. 댐 붕괴에 있어서 위험도는 댐 자체의 적절성이 아닌, 인명 손실과 재산 피해에 대한 가능성을 측정하는 척도이기 때문에 위험도의 분류는 하류부 조건이 변화함에 따라 시간에 따른 변동성을 가지게 된다. 예를 들어, 단지 하류부 개발이 수행되었다는 이유만으로도 댐은 높은 위험도를 가진 것으로 재 분류될 수 있고, 설계 유입홍수의 크기도 공학적 검토를 거쳐 증대되어야 한다.

3.2 수리학적 적절성 평가

일부 공학자들은 댐이 위험도와 크기에 따른 분류에 의해 정의된 설계유입홍수에 의하여 월류가 발생하지 않는다면, 수리학적으로 적절한 댐으로 분류한다. 비록 댐에서 월류를 고려하여 설계하는 것이 흔한 일은 아니지만, 콘크리트 댐이나 석조 댐은 상당한 수심을 가지고 발생하는 월류 조건하에서도 견딜 수 있다. 그러므로 수리학적으로 부적합한 댐이라고 해서 반드시 붕괴가 발생하는 것은 아니다.

3.3 구조적 적절성 평가

월류가 발생하였을 때, 콘크리트 댐이나 석조 댐의 붕괴 여부에 대한 결정은 진도와 활동과 같은 다양한 조건에 대한 구조적인 해석을 필요로 한다. 더우기, 월류 발생기간 동안에 지반공학적 조건들이 그 적합성 여부를 결정하기 위해서는 검토되어야 한다. 만약 댐이 설계 홍수유입동안 안전성의 요구를 충족시킨다면, 이것은 구조적으로 적합하다고 결정할 수 있다. 토사댐은 보통 월류에 의한 침식에 의해 매우 급속히 붕괴되는 것으로 간주하므로, 설계유입홍수에 의해 월류가 발생한다면 구조적으로 부적합한 것으로 고려되어야한다.

3.4 증분피해도 평가

수리학적 및 구조적으로 부적절한 댐들은 때로는 월류가 발생하지 않도록 수리학적 용량을 증대하거나, 붕괴가 일어나지 않도록 구조적 용량을 증대시키는 것과 같은 보수방안이 요구된다. 그러나, 댐 붕괴가 일어나지

않을 경우 보다도 댐 붕괴시의 하류부 피해가 항상 큰 것이 아닐 수도 있는데, 이는 하류부의 피해는 댐이 붕괴되지 않았을지라도 이상홍수에 의해 발생할 수도 있기 때문이다. 구조적 또는 비구조적 조치에 상당한 비용이 요구되는 댐 및 제방의 안전성 결정과정에는, 댐 및 제방의 붕괴에 의해 증분된 피해도를 명백히 하는 것이 중요하다. 어떤 경우에 있어서 증분피해도 평가는 기존 댐을 현재 그대로 남겨둘 수도 있고, 또한 위험도, 크기 등에 의해 제시된 설계유입홍수보다 큰 규모의 홍수를 소통시킬 수 있도록 댐 등급을 높일 수도 있다. 증분피해도는 경제적, 인명손실의 측면으로도 나타낼 수 있으나, 대개의 증분피해도 평가는 홍수의 수심으로 나타낸다. 붕괴와 비붕괴에 의한 홍수추적에서의 증분피해도 평가에 대한 중요도는 붕괴부의 정의, 붕괴부에 대한 매개변수의 부여 및 홍수추적의 정확성과 대표성 등이 종합적으로 검토되어야 한다.

3.5 위험도 평가

증분피해도 평가의 제약사항은 댐 및 제방의 붕괴와 그에 따라 발생될 하류부 피해의 어떠한 가능성에 대한 정보를 제공하지 못한다는 것이다. 이와 같은 증분피해도 평가의 한계를 설명하고, 댐 관리 및 운영기관의 주요 의사결정에 대한 추가적인 정보를 제공하기 위해서 위험도 평가과정이 댐 안전성 평가를 위해 필요하다.

위험도 평가는 증분피해도 평가로부터 얻은 이용가능한 정보에 댐 붕괴 또는 하류부 피해결과에 대한 확률의 차원을 부가한 것으로서 댐 안전성 결정의 경제적인 측면만을 나타내거나 인명의 안전성에 대한 정보를 제공하기 위하여 사용될 수 있다. 증분피해도 평가의 사용에서와 같이 위험도 평가로 부터 얻은 정보를 기초로 하여 댐 안전성의 의사결정을 위해 개발될 수 있으나, 모든 위치별 제한적 요소를 고려하기 위해서는 댐 관리자가 각 경우에 있어 그것의 장점들을 주의해서 고려해야만 한다. 위험도 평가는 댐 및 제방 붕괴의 결과로서 심각한 피해의 증가나 인명의 위협 등을 구성하고 있는 문제점들을 유용하게 검토할 수 있게 한다.

4. 댐 및 제방에 대한 위험도 모형의 개발

댐 및 제방 등 수공구조물에 있어서는 두 가지 유형의 파괴가 있을 수 있는 바, 구조적 파괴와 비구조적 파괴가 그것이다. 구조적 파괴는 댐 파괴와 같은 구조물의 물리적인 손상으로서 구조물이 적절한 기능을 할 수 없는 경우이다. 비구조적 파괴는 댐의 물리적 손상

에 의한 것이 아니라 사용기간의 단축 및 손실, 재산손실, 피해, 댐 하류부에서의 인명 및 재산피해, 댐 하류부 환경에서의 악영향 등을 포함한다. 댐 파괴사상 F 는 월류, 기초부 불안정, 과도한 변형, 급격한 수위하강, 인위적인 파괴행위 등이 그 원인으로서 식 (1)과 같이 기술될 수 있다.

$$F = F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cup F_4 \cup F_5 \quad (1)$$

여기서, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 는 각각 월류, 기초부 불안정, 과도한 변위, 급격한 수위하강, 인위적인 파괴행위를 나타낸다. 따라서 전체 위험도는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$P[F] = P[F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cup F_4 \cup F_5] \quad (2)$$

댐은 홍수시 물을 저류하고 침투유량을 경감하는 기능을 가지는데 여수로와 방류구에서 댐체내의 물을 시기적절하게 방류하지 못할 경우, 저수량은 증가하고 댐의 정상부를 월류하게 된다. 홍수시의 월류에 의한 파괴확률은 식 (3)과 같다.

$$P_F = P[h_F > H_D - H_0] \quad (3)$$

여기서, h_F, H_D, H_0 는 각각 홍수의 유입에 의한 수위증가분, 댐체체의 높이, 초기 저수위를 나타내고 있다. 식 (3)식을 실행함수로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$g_F = H_D - H_0 - h_F \quad (4)$$

여기서 H_D 의 값은 댐 지점에서 직접 측정하거나 설계도면으로부터 알 수 있다. H_0 는 저수지 운영과 관련된 함수로서 유입, 유출, 증발, 기타 손실들을 고려한 물수지의 결과이다. H_0 는 과거 측정된 저수지 수위, 저수지 운영자료 등을 기초로 하여 얻을 수 있다. h_F 는 홍수에 의한 최대 상승수위로서 그 값은 저수지로 유입되는 홍수의 유입수문곡선, 초기 저수지의 수위, 저수지에서 수위-저류량 관계, 댐에서 수위-방류량 관계 등에 따라 변동성을 가지게 된다. 댐 및 제방에 대한 위험도 모형은 댐으로의 유입수문곡선을 산정하기 위한 강우-유출 해석, 저수지내에서 저수지 홍수추적, 댐으로부터 방류량의 하도홍수추적 등으로 구성하였고 각 경우에 대하여 Monte-Carlo, AFOSM 해석을 통한 위험도 모형을 개발하였다.

4.1 강우-유출 해석

최근에 들어 지역적으로 이상 집중호우로 인한 대규모

홍수를 유발하고 있는데 이상호우로 인한 홍수의 특성은 침투유량의 급증과 홍수도달시간이 짧게 나타나게 되어 단시간 내에 하천유역에서 홍수위 급상승에 따른 범람피해를 야기할 수 있다. 댐으로의 유입수문곡선을 유도하기 위한 강우조건으로는 200년 빈도 강우량과 가능최대강우량(PMP) 조건을 고려하였다. 특히, 국가 중요 시설물에 있어서는 만약에 발생할 수 있는 홍수피해는 경제손실과 인명피해 등 사회, 경제적 위험을 초래할 수 있기 때문에 초과 위험이 없는 강수량과 홍수량을 기본으로 한 토목공학적 설계를 필요로 하고 있다. 즉 최악의 기상조건하에서 발생할 수 있는 PMP조건하(건설부, 1988)에서의 유출해석을 실시하여야 한다.

댐 유역에서 강우-유출해석을 실시하기 위해서는 단위유량도법, kinematic wave에 의한 방법, KRRL법 등이 있으나 본 연구에서 적용하고자 하는 대상유역이 강우-유출해석 자료가 전무하기 때문에 KRRL법에 의한 유출해석을 실시하였다. RRL법은 유역의 도달시간-누가면적 관계를 사용하여 불투수성의 소유역에 내리는 호우로 인한 유역 출구점에서의 유량의 시간적 변화를 계산하는 방법으로 유역의 저류효과는 고려하지 않고 각 시각에 있어서 출구 유출량에 기여하는 유역면적을 시간의 함수로 표시하는 곡선을 우선 도달시간이 동일한 점들을 연결하는 등시간선을 그린 후 각 도달시간에 해당하는 누가면적을 결정하여 얻게된다. 이와 같이 결정된 도달시간-집수면적곡선에 강우강도분포를 적용하여 각 소유역의 시간별 유출량을 누가, 합산함으로써 유역출구에 대한 유출수문곡선을 얻게 된다. 국내 실무에서는 이와 같은 RRL법에 유역특성을 고려한 유출계수를 곱해줌으로서 유입수문곡선을 얻는 과정인 KRRL법을 사용하고 있는데 식 (5)와 같이 기술될 수 있다.

$$Q_j = 0.2778 \sum_{i=1}^j \bar{C}_{j+1-i} A_{j+1-i} I_i \quad (5)$$

여기서, Q_j 는 설계홍수수문곡선, \bar{C} 는 소유역 및 면적가중 유출계수, A 는 소유역면적, I 는 강우강도, j 는 등시간선에 의해 나누어진 소구역 갯수이다.

KRRL법은 시간-면적 곡선상의 임의성, 유출계수 선택의 임의성, 중앙집중형 강우-시간분포의 적용 등에 있어 문제점이 없는 것은 아니나, 미계측 유역에서의 유출해석을 위해서는 적용성이 있는 것으로 판단된다(윤용남, 1993). KRRL법을 본 논문에서 채택하여 사용하게 된 이유도 PMP와 같은 최악의 기상조건을 고려하는 상태에서 본 연구의 대상유역이 이미 선행강

우로 인해 지표가 충분히 포화된 상태이고 더 이상의 저류효과는 기대할 수 없다고 가정하였기 때문이며 적용된 실제 해당 유역이 급경사의 산지인 점도 고려하였다.

4.2 저수지 홍수추적

저수지 홍수추적 방법으로서는 저류량과 유출량간의 관계가 필요로 하지 않는 4차 Runge-Kutta 방법에 의한 저수지 홍수추적을 실시하였다. 우선 저수지내의 연속방정식은 수위의 변화 dH 에 의한 체적의 변화 $dS = A(H)dH$ 이므로 식 (6)과 같이 기술된다.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{I(t) - Q(H)}{A(H)} \quad (6)$$

여기서, S 는 저수지에서 저류된 물의 체적이고, $I(t)$ 는 저수지 유입량이고, $Q(H)$ 는 저수지 수위 H 에서의 유출량, $A(H)$ 는 수표면적이다. 식 (4)의 계산하는 기지의 값인 증속변수 H 를 사용하여 독립변수인 시간의 작은 증분들에 의해 계산 값들을 구하게 된다. 본 연구에서는 수치적으로 정확한 결과를 구할 수 있는 식 (7), (8)의 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하였다(Chow 등, 1988).

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{I(t) - Q(H)}{A(H)} = f(t, H) \quad (7)$$

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{\Delta t}{6}$$

$$[k_1 + 2(1 - \frac{1}{\sqrt{2}})k_2 + 2(1 + \frac{1}{\sqrt{2}})k_3 + k_4] \quad (8)$$

여기서, k_1, k_2, k_3, k_4 는 4차 Runge-Kutta 방법의 적용을 위한 계수이다.

4.3 하도부 홍수추적

하천제방 등의 설계에 있어 불확실성의 범위는 수문학적, 수리학적, 구조적 그리고 경제적인 불확실성으로 구분된다. 이러한 불확실성들을 위험도 모형과 결합하기 위해서는 불확실성에 대한 특성화와 정량화를 위한 많은 시도가 필요한데, 이는 실제 설계과정에서 불확실성들은 다양하고 복잡하게 연결되어 있기 때문이다.

본 연구에서는 댐으로부터의 방류량 조건에 대해서 조도계수의 분포를 삼각형 또는 균등분포로 가정하여 변화시키고, 각 하도 단면별 수심의 변화양상 및 분포를 파악함으로써 홍수위의 하천제방에 대한 월류 여부를 판단하였다. 댐으로부터의 방류량조건에 대하여 댐 하류부 하도에서의 홍수위 계산을 위해서 표준축차법을

이용하였다. 부등류 해석의 경우에 있어서는 하도구간의 지점 1, 2에 대해서 에너지방정식을 적용하고 y_2 의 함수식 F 로 식 (9)와 같이 놓으면 dF/dy_2 는 식 (10)과 같이 기술된다(Chaudhry, 1993).

$$F(y_2) = y_2 + \frac{\alpha_2 Q^2}{2gA_2^2} - \frac{1}{2} S_{f_2}(x_2 - x_1) + z_2 - H_1 - \frac{1}{2} S_{f_1}(x_2 - x_1) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{dF}{dy_2} = 1 - \frac{\alpha_2 Q^2 B_2}{gA_2^3} + (x_2 - x_1) \left(S_{f_2} \frac{B_2}{A_2} + \frac{2S_{f_1} dR_2}{3R_2 dy_2} \right) \quad (10)$$

여기서 y 는 수심, Q 는 유량, A 는 단면적, z 는 하상고, g 는 중력가속도, S_f 는 마찰경사를 각각 나타내고 있다. α 는 에너지 보정계수, B 는 하폭, R 은 경심을 각각 나타낸다. 식 (9)는 y_2 에 대한 비선형식이므로 Newton-Raphson 방법에 의하여 그 해를 구할 수 있다.

4.4 위험도 모형의 개발

본 연구에서는 댐 및 하천제방의 위험도 해석을 4.1~4.3절의 강우-유출해석, 저수지 추적, 하도부 추적 과정을 Monte-Carlo 기법과 AFOSM 기법에 의해 실시하였다. Monte-Carlo 해석은 위험도와 관련된 매개변수가 많이 포함되어 있고, 그것에 대한 해석적인 해를 구하기가 불가능한 경우와 같이 복잡한 문제를 풀기 위한 난수발생에 의한 임의추출의 계산기법으로서 기대되는 위험도는 많은 수의 반복되는 모의결과에 의해서 식 (11), (12)와 같이 평가될 수 있다.

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (11)$$

$$P_f = P[Z < 0] \quad (12)$$

여기서 Z 는 실행함수, x_m 은 관련변수, P_f 는 위험도를 나타낸다. 식 (12)에서 실행함수 Z 의 대응되는 값은 식 (11)을 이용하여 계산할 수 있다. 붕괴위험도는 Z 에 대한 총 모의 횟수에 대한 Z 값이 음수가 되는 횟수의 비로 표시된다. Monte-Carlo 해석은 모형 불확실도를 정량화하는데 그 이론과 적용에 대한 수학적 이해가 용이하기 때문에 가장 보편적인 방법이다. 본 연구에서 난수의 발생은 식 (13), (14)와 같은 multiplicative congruential generator를 이용하였다.

$$X_{i+1} = aX_i \pmod{m} \quad (13)$$

$$U_i = \frac{X_i}{m} \quad (14)$$

여기서, $a \approx 16807$, $m = 2^{31} - 1$, (mod m)은 modulus m 에 의한 나머지 값, X_i 는 균등난수를 발생시키기 위한 초기값, U_i 는 균등분포에 의한 난수를 나타내고 있다. Monte-Carlo 기법에 의한 위험도 계산 방법은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- ① 각 매개변수에 대한 분포형을 결정하고 평균과 표준편차(또는 변동계수)를 산정한다.
- ② 각 분포형에 맞게 난수를 발생시킨다.
- ③ 정해진 실행함수의 각 매개변수 값들을 계산한다.
- ④ 반복계산 후 발생빈도 및 반복계산수에 의하여 식 (15)를 이용하여 위험도를 구한다.

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (15)$$

여기서 N_f 는 발생빈도수, N 는 반복계산수이다.

AFOSM 기법은 파괴표면상에 위치한 파괴가능지점 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*)$ 에서 실행함수 $g(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 를 선형화시키는 것이다. x_i^* 점에서 Z 의 1차 확장식은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z = g(x_i^*) + \sum_{i=1}^m (x_i - x_i^*) \frac{\partial g}{\partial x_i} \quad (16)$$

또한 Z 의 기대값과 표준편차는 각각 식 (17), (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[Z] = \sum_{i=1}^m C_i (\bar{x}_i - x_i^*) \quad (17)$$

$$\sigma_Z = \sum_{i=1}^m \alpha_i C_i \sigma_i \quad (18)$$

여기서, C 는 x_i^* 에서의 $\partial g / \partial x_i$ 값이고, α_i 는 민감도 계수로서 식 (19)와 같이 기술된다.

$$\alpha_i = \frac{C_i \sigma_i}{\left[\sum_{j=1}^m (C_j \sigma_j)^2 \right]^{1/2}} \quad (19)$$

위험도의 정도를 나타내는 신뢰지수 β 는 식 (20)과 같이 정의하였다.

$$\beta = \frac{E[Z]}{\sigma_Z} = \frac{\sum_{i=1}^m C_i (\bar{x}_i - x_i^*)}{\sum_{i=1}^m \alpha_i C_i \sigma_i} \quad (20)$$

이제 위험도 P_f 는 식 (21)과 같이 근사적으로 결정할 수 있다(Rackwitz와 Fiessler, 1977).

$$P_f = 1 - \phi(\beta) \quad (21)$$

여기서 ϕ 는 표준정규분포의 누가분포함수이고 P_f 의 값은 정규분포된 변수 x_i 의 선형조합의 실행에서만 정확하다. 그러나, 기본 변수들은 통상 왜곡되어 있고 비정규분포 형태이므로 비정규분포를 변수 x_i 에 대한 대등한 정규분포로서 근사화하여 사용할 수 있는 방법을 적용하였다. 본 연구에서 사용된 Rackwitz 알고리즘에 의한 AFOSM 기법의 해석절차는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 실행함수 $g(x_i^*)$ 를 결정한다.
- ② x_i 의 통계학적 변수들을 입력한다.
- ③ 신뢰지수 β 와 파괴점 x_i^* 의 초기값을 가정하여 대입한다.
- ④ $C_i = \partial g / \partial x_i$ 값을 구한다.
- ⑤ 초기값에 대한 \bar{x}_i 와 σ_i 를 계산한다.
- ⑥ x_i^* 를 계산하고 β 를 구한다.
- ⑦ ⑥에서 얻어진 새로운 x_i^* 를 이용하여 새로운 β 를 구한다.
- ⑧ β 가 수렴할 때까지 ④~⑧의 단계를 반복하고 위험도 P_f 를 계산한다.

그림 4, 5는 본 연구에서 적용된 위험도 평가절차를 요약한 것이고, 그림 6은 본 모형의 전체구조를

SET DIMENSIONS AND READ DATA	
DO for IJ = 1, JNN (Number of hydrograph ordinates)	
DO for M = 1, IJ	
DETERMINE INFLOW-TIME RELATIONSHIP	
DO for J = 1, NTM (Number of time interval)	
DETERMINE K1, K2, K3, K4	
DETERMINE HOUT = H1 + DT × (K1 + 2 × EFF2 × K2 + 2 × EFF3 × K3 + K4) / 6	
DETERMINE QOUT BY HEAD-DISCHARGE RELATIONSHIP	
DO for J = 1, NUM (Number of iteration)	
GENERATE RANDOM NUMBER WITH RESPECT TO EACH DISTRIBUTION	
CALCULATE $H_f = (QOUT / C_d L_s)^{2/3} + H_p$	
IF $H_f > H_b$	ELSE
OVERTOPPING OCCURS	NO OVERTOPPING OCCURS
COMPUTE RISK AND WRITE RESULTS	
END	

그림 4. Monte-Carlo 기법에 의한 위험도 평가모형

SET DIMENSION AND READ DATA
DO for IJ = 1, JNN (Number of hydrograph ordinates)
DO for M = 1, IJ
DETERMINE INFLOW-TIME RELATIONSHIP
DO for J = 1, NTM (Number of time interval)
DETERMINE K1, K2, K3, K4
DETERMINE HOUT = H1 + DT× (K1 + 2×EFF2×K2+2×EFF3×K3+K4)/6
DETERMINE QOUT BY HEAD-DISCHARGE RELATIONSHIP
DETERMINE PERFORMANCE FUNCTION $G(x) = H_D - (QOUT / C_d L_s)^{2/3} - H_f$
TRANSFORM NON-NORMAL DISTRIBUTION TO EQUIVALENT NORMAL DISTRIBUTION
ASSUME FAILURE POINT OF PERFORMANCE FUNCTION WITH RESPECT TO EACH VARIABLES
CALCULATE STANDARD DEVIATION AND MEAN OF PERFORMANCE FUNCTION WITH RESPECT TO EACH VARIABLES AT THE FAILURE POINT
CALCULATE DIRECTIONAL COSINES $\alpha_i^* = \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_* / \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)^2}$
CALCULATE NEW FAILURE POINT $x_i^* = \bar{x}_i - \alpha_i^* \beta \sigma_i$
SOLVE NONLINEAR EQUATION AND CALCULATE β
REPEAT UNTIL β IS CONVERGED
CALCULATE THE RISK AND WRITE THE RESULTS
END

그림 5. AFOSM 기법에 의한 위험도 평가모형

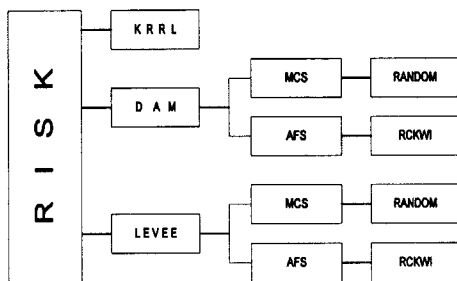


그림 6. 본 연구모형의 구조도

sub-module을 중심으로 정리한 것이다. 그림에서와 같이 본 연구모형 RISK는 유역에서의 강우-유출 해석을 위한 KRRL, 댐의 위험도 산정을 위한 DAM, 하천 제방의 위험도 산정을 위한 LEVEE로 구성되어 있다.

5. 결 론

본 연구는 댐 및 하천제방에 대한 위험도 산정모형을 개발한 것이다. 댐 및 제방에 대한 위험도 해석을 위하여 붕괴 원인에 대해서 조사된 자료를 정리하였고, 댐 및 제방의 전체적인 붕괴원인과 월류로 인한 붕괴원인에 대해서 논리형 fault tree를 작성하였다. 댐 및 제방의 위험도 해석 평가단계로서 수리학적 적절성 평가, 구조적 적절성 평가, 증분피해도 평가 및 위험도 평가 과정 등으로 단계별로 기술하여 제시하였다.

본 연구의 위험도 모형은 200년 빈도 및 PMP에 의한 설계강우의 선정, KRRL법에 의한 강우-유출해석, 4차 Runge-Kutta법에 의한 저수지 홍수추적, 부동류 해석에 의한 하도부 홍수추적으로 구성하였고 이를 Monte-Carlo 기법과 AFOSM 기법에 의해 해석하는 위험도 산정 모형을 개발하였다. 본 연구모형 RISK는 기존의 댐 및 제방에 대해서 홍수시 안전도 여부를 판단할 수 있는 표준적인 해석모형으로 제시될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 한국과학재단 연구비지원 (과제번호 : KOSEF 961-1205-020-1)에 의한 결과로서 지원당국에 깊이 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 건설부 (1988). 한국 가능최대강수량의 추정. 한국건설 기술연구원 보고서.
- 김문모, 이원환, 조원철 (1993). "AFOSM 방법에 의한 하수관망의 신뢰성 분석." 대한토목학회논문집, 제13권, 제2호, pp. 201-209.
- 윤용남 (1993). ILLUDAS 모형. 제1회 수공학 워크샵. 한국수문학회, pp. 2.1-2.41.
- Ang, A.H.S. and Tang, W.H. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Vol. II, John Wiley & Sons.
- ASCE Task Committee on the Reevaluation of the Adequacy of Spillways of Existing Dams of the Committee on Hydrometeorology of the Hydraulics Division. (1973). "Reevaluating spillway adequacy of existing dams." *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 9, No. 2, pp. 337-372.
- Askew, A.J., Yeh W.W-G. and Hall, W.A.

- (1971). "Use of Monte Carlo technique in the design and operation of a multi-purpose reservoir system." *Water Resources Research*, Vol. 7, No. 4, pp. 819-833.
- Baecher, G.B., Pate, M.E., and Richard, N. (1980). "Risk of dam failure in benefit-cost analysis." *Water Resources Research*, Vol. 16, pp. 449-456.
- Biswas, A.K., and Chatterjee, S. (1971). "Dam disasters an assessment." *Engineering Journal of Canada*, Vol. 54, No. 3, pp. 3-8.
- Bohun, V., and Vischer, D.L. (1978). "Risk analysis Its use for evaluation of marginal projects and sensitivity of results to different probability distribution of input data." *IAHR Research and Practice in the Water Environment*, pp. 1-30
- Bowles, D.S. (1993). "Risk assessment : A tool for dam rehabilitation decision." *Geotechnical Rehabilitation*, ASCE, April 25-28, Raleigh, North Carolina, pp. 116-130.
- Bowles, D.S., Anderson, L.R., and Glover, T.F. (1987). "Design level risk assessment for dams." *Proc. of Session on Seismic Considerations in Risk Analysis of Dams, Structures Division, Specialty Conference*, ASCE, pp. 210-225.
- Chaudhry, M.H. (1993). *Open channel flow*. Prentice-Hall.
- Cheng, S.T. (1982). *Overtopping risk evaluation for an existing dam*. Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Cheng, S. T., and Yen, B. C. (1993). "Comparison of failure parameter criteria in first order reliability analysis." *Proc. of the XXVth Congress of International Association for Hydraulic Research*, pp. D. 149-156.
- Chow, V.T. (1978). "Evaluation of stochastic hydrology." in *Applications of Kalman Filter to Hydrology, Hydraulics and Water Resources*, Edited by Chiu, C.L., pp. 13-28.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- CIRIA (1977). *Rationalisation of Safety and Serviceability Factors in Structure Codes*. Report 63, London.
- Cornell, C.A. (1972). "First-order analysis of model and parameter uncertainty." *Proceeding of International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources System*, Vol. 2, pp. 1245-1272.
- Costa, J.E. (1985). *Floods from dam failure. Open-File Report 85-560*. USGS, Denver, Colorado, pp. 1-54.
- Gruner, E.C. (1963). "Dam disasters." *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, London, Vol. 24, pp. 47-60.
- Haan, C.T. (1977). *Statistical Methods in Hydrology*. Iowa State University Press.
- Hasofer, A.M., and Lind, N.C. (1974). "Exact and invariant second moment code format." *J. of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 100, No. 1, pp. 111-121.
- International Commission on Large Dams. (1973). *Lessons from dam incidents*. Abridged edition, U. S. Commission on Large Dams.
- Jansen, R.B. (1980). *Dams and public safety*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, pp. 1-332.
- Johnson, F.A., and Illes, P. (1976). "A classification of dam failure." *Water Power and Dam Construction*, pp. 43-45.
- Mark, R.K., and Stuart-Alexander, D.E. (1977) "Disasters as a necessary part of benefit-cost analyses." *Science*, Vol. 197, pp. 1160-1162.
- Middlebrooks, T.A. (1953). "Earth dam practice in the United States." *Centennial Transaction, ASCE*, pp. 697-722.
- Qaisi, K. (1985). *Uncertainty analysis of stream dissolved models*, Ph.D. Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor.

- Rackwitz, R., and Fiessler, B. (1977). *Non-normal distributions in structural reliability*. Technical University of Munich, pp. 1-22.
- Rose, D. (1978). "Risk of catastrophic failure of major dams." *J. of the Hydraulics Division, ASCE*. Vol. 104, No. 9, pp. 1349-1351.
- Yen, B.C. (1990). "Return period, risk and probability in urban storm drainage - From the experience of 20th century to the science in 21st century." *Proc. of Fifth IAHR/IAWPRC International Conference on Urban Storm Drainage*, Edited by Iwasa, Y. and Sueishi, T., pp. 1.59-1.72.
- Yen, B.C. and Tung, Y.K. (1993). "Some recent progress in reliability analysis for hydraulic design." *Reliability and Uncertainty Analyses Design*, ed. by Yen, B.C. and Tung, Y.K. ASCE, pp. 35-79.
- 〈최종본 접수일 : 1997년 11월 7일〉