

## 댐 붕괴 홍수모의에 대한 불확실도 해석 Uncertainty Analysis for Dam-Break Floodwave Simulation

이 홍 래\* / 한 건 연\*\* / 조 원 철\*\*\*  
Lee, Hong Rae / Han, Kun Yeun / Cho, Won Cheol

### Abstract

DAMBRK-U model is developed for the evaluation of overtopping risk of dam and levee and for the estimation of uncertainty in floodwave simulation. The original algorithm is revised and expanded to include Monte-Carlo analysis to estimate them. The model is tested by applying to hypothetical channels of widening, uniform and narrowing geometry. Larger variation in discharge and water depth are expected at narrower sections of a river. It is calibrated by applying to the Hantan River, where severe damages from Yunchun dam-break and levee overtopping occurred on July, 1996. Overtopping risk of dam is calculated for various discharge conditions for Yunchun-dam, and that of levee is also calculated by comparing levee height with flood level at Hantan recreation area. Simulation results show that the overflow depth of flood level is 1.266~0.782 m and the overflow risk turns out to be 100%.

*Keywords* : Dam-break model, Floodwave, Uncertainty analysis, Monte-Carlo method

### 요 지

댐 붕괴에 따른 홍수류의 해석시의 불확실도를 규명하기 위해서 범용 프로그램인 DAMBRK 모형을 Monte-Carlo 기법을 이용하여 수정, 보완함으로써 댐 및 하천제방에 대한 붕괴 위험도를 산정할 수 있는 DAMBRK-U 모형을 개발하였다. 본 모형은 하천의 홍수추적에 있어서 불확실도에 기인한 홍수위 해석결과를 살펴보기 위해 확대하도, 균일하도 및 축소하도 구간에 적용하여 모형에 대한 비교검토를 실시하였는데, 축소하도 구간에서 유량과 수심에 있어 큰 변동치를 가지는 것으로 나타났다. 또한 본 모형은 1996년 7월 인천댐 붕괴에 따른 한탄강에서의 홍수범람 해석을 모의함으로써 모형의 실제 적용성을 입증하였다. 인천댐 유역에서 여러 가지 방류유량 조건에 따른 댐의 월류 위험도를 계산하였다. 한탄강 유원지 지점에서의 제방고와 홍수위를 비교하여 월류 위험도를 산정한 결과 홍수위에 있어 제방고를 1.266~0.782 m로 상회하는 월류가 발생하였고, 이 구간에서의 월류위험도는 100%로 나타났다.

**핵심용어** : 댐붕괴 모형, 홍수파, 불확실도 해석, Monte-Carlo 기법

\* 한국건설기술연구원 수자원연구소 선임연구원/연세대학교 토목공학과 박사과정 수료

\*\* 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\*\* 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수/국립방재연구소장

## 1. 서 론

댐 및 하천제방의 붕괴로 인해 발생하는 홍수에 따른 인명 및 재산피해는 큰 재앙이 되고있다. 댐 붕괴에 따른 홍수모의는 홍수량 및 홍수위의 범위 등을 정확하게 예측하고, 홍수위험지구를 제시하며, 단계적인 피난대책을 수립하는데 있어서 필수적인 것이다. 댐 붕괴 홍수모형에 있어서 지난 10여년간 발전과 개선에도 불구하고, 댐 붕괴 모의는 이전의 강우-유출 사상보다 매우 큰 규모의 홍수이기 때문에 모형에 대한 정확한 검증이 어렵게 되어, 모의수행에 있어서 많은 불확실성을 내포하게 된다.

붕괴된 댐의 하류부 임의 지점에서의 홍수발생 시간과 크기를 정확하게 예측하는데 있어 몇 가지 오차들이 이를 제한하고 있다. 주요한 오차의 원인은 하천-계곡에서의 수리학적 매개변수의 불확실도에 기인하는데, 하도단면의 기하학적 특성과 이에 관련된 오차 및 Manning의 조도계수 추정에 있어서의 오차를 포함한다. 즉, 하도단면 형상을 결정하기 위해서 현지 측량자료에 기초한 지형도가 사용되었다면 연직 및 수평 좌표에 있어서의 오차가 존재하게 되며, 댐 붕괴 홍수의 규모는 이전의 홍수자료에 기초로 한 Manning의 조도계수를 완전하게 보정하는 것을 불가능하게 하며 이에 따른 불확실도를 야기하게 된다.

댐 붕괴의 경우를 포함한 홍수전달에 있어 불확실도 해석에 대한 연구에 있어 McBean과 Perkins(1975)는 점변류의 흐름방정식을 푸는데 있어서 수치적인 오차를 연구하였고, Tung과 Mays(1980)는 Manning 식에 있어서의 매개변수에 대한 불확실도의 영향을 검토하였으며, Fread(1981)는 자연 하천구간의 하도단면 특성을 기술하는데 있어서 오차의 영향을 규명하였다. Oegema와 McBean(1987)은 부등류식에 대한 불확실도를 평가하기 위해서 Monte-Carlo 방법을 적용하였고, Burnham과 Davies(1990)는 100년 빈도 홍수조건에 대한 정상상태 모의에 대해서 지형자료의 정확도와 모형의 신뢰도가 홍수위에 미치는 영향을 조사하였다. Defalque 등(1993)은 홍수위 해석시 지형자료에 도입되는 임의오차에 대해서 연구하였으며, Kung과 Yang(1993)은 댐 붕괴에 따른 모의수행에 있어서 지형자료의 오차와 조도계수의 불확실도가 홍수해석에 미치는 영향을 BOSS-DAMBRK를 이용하여 해석하였다.

국내에서는 한건연 등(1997a; 1997b)이 댐 및 하천

제방의 위험도 평가를 위해서 Monte-Carlo 기법과 AFOSM(Advanced First Order Second Moment) 기법에 의한 위험도 모형을 개발한 바 있으나, 이는 월류 위험도를 중심으로 하였고, 하도추적도 부등류 해석 기법을 이용하였기 때문에 댐 붕괴시 나타나는 흐름의 농역학적 특성이 제대로 반영되지 못하였다.

따라서, 본 연구에서는 댐 붕괴에 따른 홍수류의 해석시의 불확실도를 규명하기 위해서 범용 프로그램인 DAMBRK(Fread, 1988)를 수정, 보완하여 댐 및 하천제방에 대한 붕괴 위험도를 산정할 수 있도록 하였다. 본 연구의 모형은 확대하도, 균일하도 및 축소하도 구간에 적용하여 모형에 대한 비교검토를 실시하였고, 1996년 7월 연천댐 붕괴에 따른 한탄강에서의 홍수범람 해석을 모의함으로써 모형의 실제 적용성을 입증하였다.

## 2. DAMBRK 모형에 대한 불확실도 해석

### 2.1 댐에 대한 위험도 해석

실제 댐에서 유량규모별 월류위험도 계산을 위해서는, 실행함수를 정의하고 이와 관련된 매개변수에 대한 분포형을 결정해야 한다. 댐의 유량규모별 월류위험도를 평가하기 위한 실행함수는 식 (1)과 같이 기술될 수 있다.

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

여기서  $H_D$ 는 댐의 높이,  $Q_S$ 는 여수로를 통과하는 방류량,  $C_D$ 는 유출계수,  $L_S$ 는 여수로의 길이,  $H_P$ 는 여수로의 높이이다. 여기서  $g_D > 0$ 인 경우는 월류가 발생하지 않으며,  $g_D > 0$ 인 경우는 월류로 인한 댐의 붕괴가 발생하게 된다.

댐의 월류위험도를 계산하기 위해서는 실행함수의 매개변수들에 대한 확률분포와 변동계수들을 미리 파악해야 한다. 실행함수의 매개변수들에 대한 확률분포와 불확실성의 결정은 많은 경우에 있어서 실제 자료를 구하기 어렵기 때문에 단순화시켜 가정하거나, 이와 관련된 문헌자료를 바탕으로 결정되는 경우가 많다.

### 2.2 댐 붕괴 홍수파 해석에 대한 불확실도

댐 붕괴 홍수파 해석에 있어 하천 유역의 하도단면의 형상을 결정하기 위해 필요한 자료정보는 통상 지

형자료로부터 얻게 된다. 하도단면의 불확실도에 관한 오차의 주요 원인은 실제 관측에 의한 오차, 지형도 상의 등고선 간격간의 선형변화를 가정한 오차, 등고선 간격간의 거리가 측정될 때 도입되는 수작업에 의한 오차 등이다. Manning의 조도계수( $n$ )는 하천에 있어 흐름에 대한 수로내의 저항력을 포괄적으로 표시하고 있으나 직접적인 관측은 불가능하다. 통상적인 강우-유출에 의한 홍수의 경우에 있어서 Manning의 조도계수는 주로 실제 관측에 의해서 평가되며 과거의 홍수 기록으로부터 관측된 홍수위를 사용함으로써 검정하게 된다. 그러나, 댐 붕괴의 경우는 과거의 댐 붕괴에 따른 관측기록이 없는 매우 큰 홍수위가 발생되기 때문에 이전의 홍수기록에 기초로 하여 Manning의 조도계수를 완전하게 검정하는 것은 불가능하다. 과거홍수로부터 유도된 계수는 댐 붕괴 홍수와 관련된 추가적인 에너지 손실을 고려하기 위해서 때로는 증대될 필요가 있다. 과연 어느 정도까지 그 계수를 증대시켜야 할지에 관한 불확실도가 야기된다.

본 연구에서는 Monte-Carlo 기법이 댐 파괴 홍수 추적에 있어서의 하도단면의 형상과 저항계수에 기인한 불확실도의 영향을 검토하기 위해 적용되었다. 하천의 형상과 조도계수에 있어서의 오차는 공간적으로 비상관적이며 임의적으로 분포되어 있는 것으로 고려하였다. 단순화를 위해 모든 오차추정에 있어서 균등확률 또는 정규확률분포가 사용될 수 있다.

홍수위와 관련된 하천제방은 홍수를 소통시키기 위해 하도를 제한하는 시설물로서, 홍수소통 능력을 상회하는 홍수량이 상류로부터 전달되어 유하하는 경우에는 제방의 정상부를 월류하게 된다. 이 경우의 실행함수  $g_L$ 은 식 (2)와 같다.

$$g_L = H_D - H_0 - h_F \quad (2)$$

여기서  $h_F$ ,  $H_D$ ,  $H_0$ 는 각각 홍수의 유입에 의한 상승수위, 제방제체의 높이, 초기수위를 나타내고 있다.  $H_D$ 의 값은 제방지점에서 직접 측정하거나 설계도면으로부터 알 수 있다.  $H_0$ 는 저유량시의 하천수위이다.  $h_F$ 는 홍수에 의한 최대 상승수위로서 그 값은 상류로 유입되는 홍수의 유입수문곡선, 초기수위, 하천의 수위-저류량 관계 등에 따라 변동성을 가지게 된다.

### 2.3 DAMBRK-U 모형의 개발

댐 파괴에 의한 홍수추적 모형으로 널리 사용되고

있는 DAMBRK 모형에 불확실도 해석기법을 적용하였다. 월류에 대한 댐의 위험도를 정량적이고 체계적으로 평가하기 위해 Monte-Carlo 기법을 적용하였으며, 댐의 붕괴로 인해 발생한 홍수유가 하도 내로 유입될 경우 이로 인한 제방의 붕괴 위험도를 산정하기 위해 Monte-Carlo 기법을 적용하여 DAMBRK-U 모형을 개발하였다. 그림 1은 본 연구 대상인 DAMBRK-U 모형의 구조도를 보여주고 있으며, 그림에서 보는 바와 같이 기존 모형으로부터 7 개의 부프로그램이 수정되었으며, 6 개의 부프로그램이 새로이 추가되었다. 본 연구에서 개발된 프로그램에서 댐 및 제방의 붕괴 위험도를 별도 또는 동시에 수행할 수 있도록 구성하였는데, 다음과 같은 사항이 추가 또는 수정되었다.

- (1) 댐 붕괴 위험도를 구하기 위해 저수지로 유입되는 홍수로 인해 여수로에서 방류되는 최대 방류량을 구하여 위험도 평가를 위한 기본 자료로 사용하였다.
- (2) 지배함수의 각 변수에 대해 정규분포, 비정규분포, 삼각형분포, 그리고 균등분포 등의 다양한 분포형

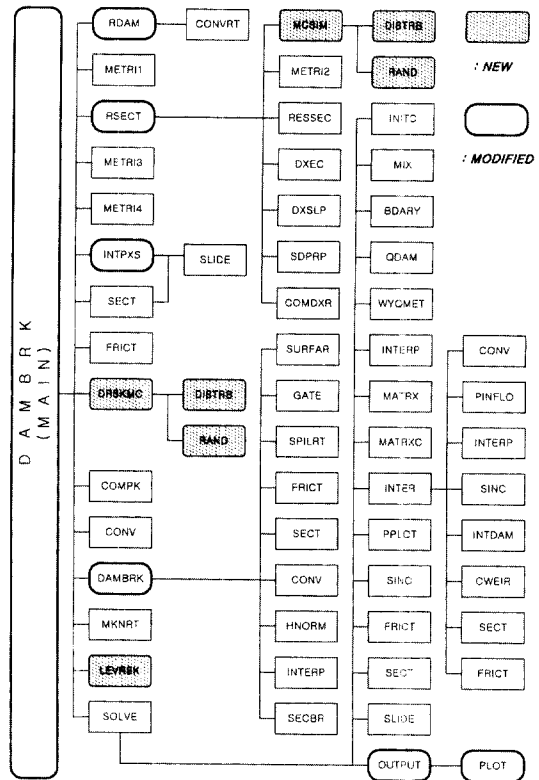


그림 1. DAMBRK-U 모형의 구조도

에 대해 적용할 수 있도록 하였다.

(3) AFOSM 기법과 Monte-Carlo 기법에 대한 댐 붕괴 위험도를 동시에 구할 수 있도록 구성하였다.

(4) 댐 붕괴 모의를 통한 홍수류의 하도추적에 따른 제방의 붕괴 위험도를 구하기 위해 각 매개변수에 대한 여러 가지 분포형을 적용할 수 있도록 하였다.

(5) 기본 입력 자료에서 주어진 제방의 높이에 대한 하도의 각 지점에서의 제방의 월류 위험도를 구할 수 있도록 하였으며, Monte-Carlo 기법을 통한 반복수행에서 하도내에서의 모든 지점에 대한 최고·최저 수위와 최대·최소 유량을 찾아 자료로 저장하였다.

(6) 댐 붕괴 위험도와 제방의 붕괴 위험도를 구하는 모의에 대해 독립성을 부가하였으며, 필요에 따라 동시 모의가 가능하도록 구성하였다.

### 3. 홍수와 해석에서의 불확실도

하천에서 홍수와 해석에 대한 불확실도를 검정하기 위해서 DAMBRK-U 모형을 적용하였다. 하도단면의 형상은 확대구간, 균일구간 및 축소구간을 설정하고 각 경우에 대한 홍수위의 변동양상을 해석하였다. 50 km의 하도구간에 대해서 하도경사를 0.0008로 하고 사다리꼴 단면의 저면폭이 150 m에서 500 m로 선형적으로 확대되는 경우, 저면폭이 500 m에서 150 m로 축소되는 경우 및 300 m로 일정한 경우를 설정하였으며, 이에 대한 측벽면 경사는 1/2 ~ 1/10의 범위를 사용하였다.

세 가지의 하도에 대한 불확실도의 양상을 검토하기 위해서 하폭과 수면고에 대한 오차의 변동계수는 각각  $\pm 5\%$ ,  $\pm 1\%$ 로 하였고 조도계수에 대한 오차의 변동치는  $\pm 10\%$ 로 설정하였으며, 균등분포에 의한 난수를 발생시켜 해석하였다 (Kung과 Yang, 1993). 각 하도 단면형상과 조도계수에 대해서 100회 반복수행이 이루어졌다. 단면형상과 조도계수에 대한 난수발생의 임의조합에 의해 모의수행이 이루어졌고 각 매개변수 군에 대해 모의과정은 확정론적인 것이었고 따라서 100개의 확정론적 해석결과를 얻을 수 있었다. 그림 2와 그림 3은 각 경우의 하도구간에 대해서 최고수위와 침투유량의 중단양상을 도시한 것이다.

그림 2에서 보는 바와 같이 최고 수위수문곡선의 경우 확대구간에서의 불확실도는 하류부로 갈수록 감소하고 있었으나, 축소구간에서의 불확실도는 하류부로 갈수록 증가되고 있었다. 하폭이 좁은 하도구간에서의 조도계수와 하도단면 형상의 보정은 흐름 소통에 있어

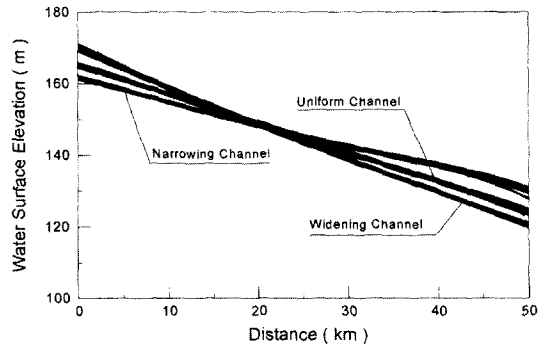


그림 2. 각 지점별 최고수위의 변동성

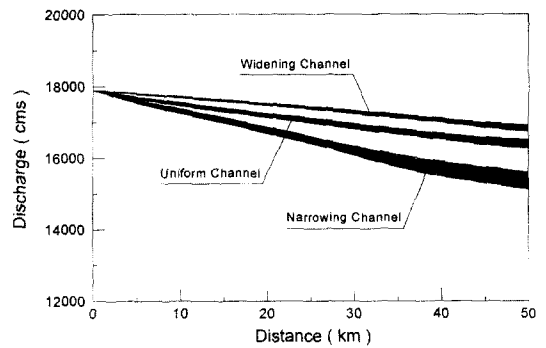


그림 3. 각 지점별 침투유량의 변동성

큰 변화를 야기하게 되었고, 따라서 흐름 수심에 있어 보다 큰 변동범위를 야기할 수 있는 것으로 판단되었다. 그림 3에서 보는 바와 같이 유량수문곡선의 경우는 모든 하도구간에 대해서 불확실도의 범위가 증가하고는 있으나 그 변동폭은 축소 하도구간이 확대 하도구간에 비해서 변동폭이 훨씬 크게 나타났다.

그림 4와 5는 각 하도구간내의 5 km, 25 km, 45 km 지점에 대한 홍수위 해석결과를 도시한 것이다. 각 지점별 최고수위의 변화는 상류에서 하류로 갈에 따라 확대구간의 경우  $\pm 0.904$ ,  $\pm 0.805$  및  $\pm 0.316$  m로 나타났고, 축소구간의 경우  $\pm 0.643$ ,  $\pm 0.744$  및  $\pm 1.204$  m로 각각 나타났다. 그림에서 보는 바와 같이 수위수문곡선의 경우는 확대 하도구간에서 하류부로 갈수록 불확실도의 정도가 감소하였으나, 축소 하도구간에서는 불확실도의 범위가 하류부로 갈수록 크게 나타났다. 균일 하도구간에서는 불확실도의 범위가 일정하게 유지되고 있었다.

그림 6~그림 8은 확대하도, 균일하도 및 축소하도

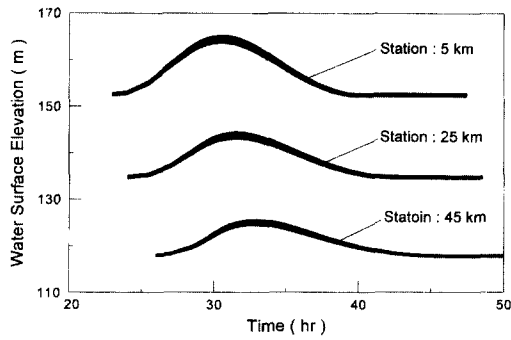


그림 4. 지점별 수위수문곡선의 변동성(확대구간)

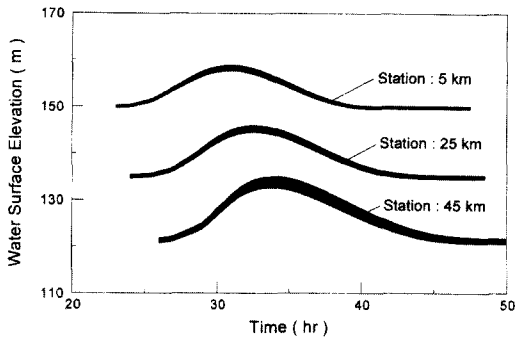


그림 5. 지점별 수위수문곡선의 변동성(축소구간)

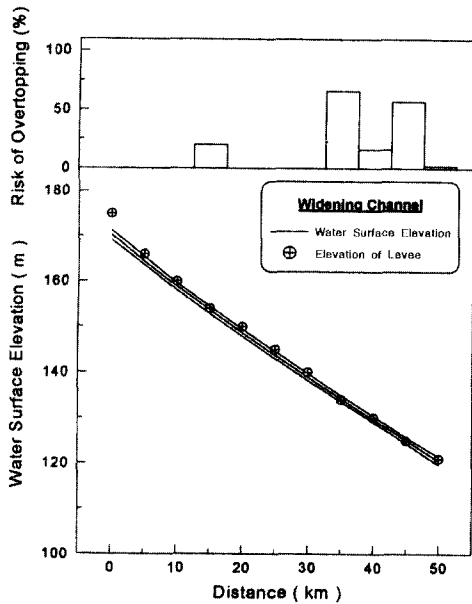


그림 6. 제방월류의 위험도(확대구간)

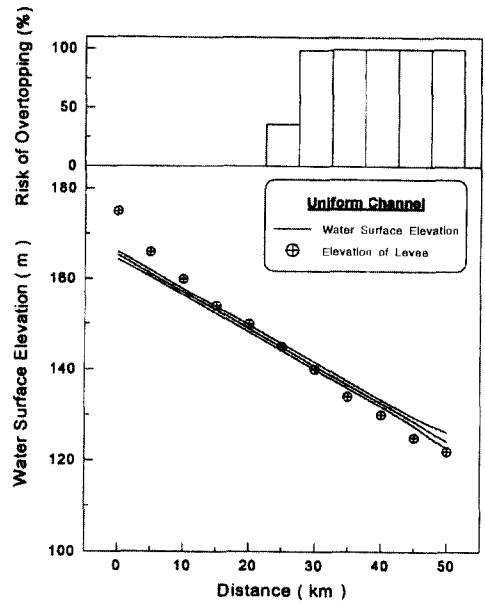


그림 7. 제방월류의 위험도(균일구간)

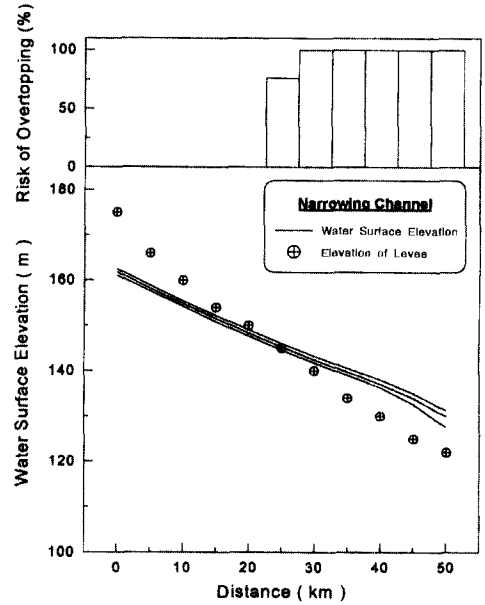


그림 8. 제방월류의 위험도(축소구간)

구간에 대한 제방월류의 위험도를 해석하여 제시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일하게 설정한 제방고에 대해서 축소하도 구간의 경우 하류로 갈수록 월류위험도가 급격히 증대되는 것으로 나타났고, 확대하도구간의 경우 월류위험도는 상대적으로 작게 나타났

다. 본 적용 예는 가상하도 구간에 대해서 적용된 것이나 하도단면의 물리적 형상특성을 효과적으로 반영한 홍수위의 변동양상과 제방 월류의 위험도를 산정할 수 있었다.

#### 4. 실제 유역에 대한 적용

본 연구의 DAMBRK-U 모형을 1996년 7월 연천댐 붕괴와 이에 따른 한탄강 유역의 홍수범람에 대해서 적용하였다. 연천댐은 댐 높이 23 m, 댐 길이 243.5 m인 콘크리트 문비형과 토사댐의 혼성형식이며 저수지의 총 저수량이 1300만  $m^3$ , 유효저수량 850만  $m^3$ , 총 유역면적 1838  $km^2$ 으로서 1996년 7월 27일 댐의 우측 날개둑이 붕괴되었다. 댐 붕괴부의 상부폭은 60 m, 하부폭 20 m, 깊이 14 m의 사다리꼴이었고, 댐 붕괴시간은 약 80분이었다. 연천댐으로 형성된 저수지는 하도형으로 영평천의 합류지점을 최대폭으로 한탄강 및 영평천 하구지역의 하도구간을 저류공간으로 하고 있다. 댐의 높이에 따른 저수량이 상대적으로 작게 나타나 홍수감쇠의 효과는 그다지 크지 못한 하도형 저수지의 특성을 보이고 있었다.

연천 소수력댐은 홍수 및 하류부 유지용량 소통을 위해서 7련의 테인터형 (10.5 m × 11.3 m) 수문 및 댐 월류형 여수로를 갖추고 있다. 이들 여수로를 통하여 하류로 방류할 수 있는 최대 통수능은 저수지의 수위가 계획 만수위시 5230  $m^3/s$ 로 설계되었다.

적용구간은 그림 9에서와 같이 연천댐~임진강 합류부까지의 20.75 km 구간으로서 전 하도구간의 하안은 협곡을 이루며 자연제방의 역할을 하고 있다. 댐으로부터 11.05 km 지점의 좌안으로는 강하천이 유입하고 있고 합류점의 상류부 좌안에는 연천소수력 발전소가 위치하고 있으며 이와 마주보는 우안부에는 연천읍이 위치하고 있다. 또한 강하천과 차탄천이 유입하는 합류부 지점의 인근은 비교적 넓은 하폭을 보이고 있다. 이 지역들이 연천댐 하류로부터 한탄강 하류인 임진강 합류구간에서의 홍수범람피해 지역의 대부분을 차지하고 있다. 본 연구에 사용된 자료는 주로 임진강 하천정비기본계획(1980), 임진강 유역조사보고서(1995) 및 주요 지점에 대한 실측자료와 현지답사를 통하여 수집, 정리하여 사용하였다.

##### 4.1 연천댐의 월류 위험도

연천댐에 대한 월류 위험도를 얻기 위해 식 (1)과 같은 실행함수의 매개변수에 대한 적절한 확률분포를

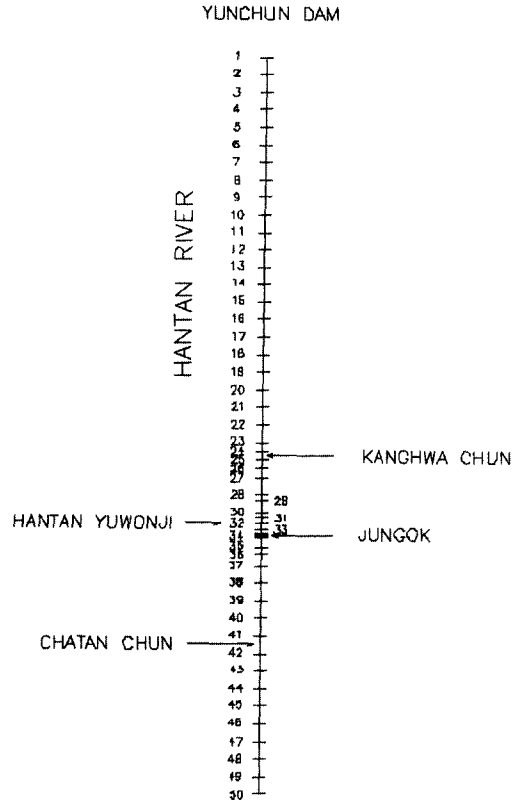


그림 9. 연천댐의 유역도

결정하는 일은 위험도 산정에 있어서 중요한 일이다. 그러나 현실적으로 매개변수들의 정확한 확률분포를 결정하기란 매우 어려운 작업이므로 본 연구에서는 실행함수의 매개변수들의 분포형을 정규분포로 보았으며, 이 때의 변동계수는 표 1에 나타내었다.

이와 같은 조건에 대해 댐 지점에서 방류 유량조건을 2000  $m^3/s$  에서 14000  $m^3/s$  까지 변화에 따른 월류위험도를 계산하였다(한진연 등, 1997a; 1997b). 그림 10은 Monte-Carlo 기법에 대한 계산결과를 나

표 1. 연천댐의 매개변수의 확률특성치

변수명	평균값	변동계수(%)	분포형
유출량 ( $Q_S$ )		3	정규분포
댐높이 ( $H_D$ )	53.5	3	정규분포
여수로 높이 ( $H_P$ )	39.2	3	정규분포
여수로 길이 ( $L_S$ )	72.8	3	정규분포
유량 계수 ( $C_D$ )	1.88	3	정규분포

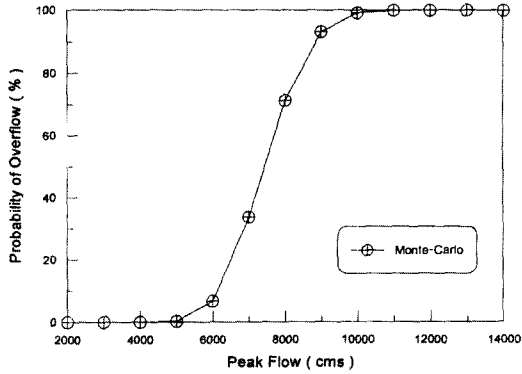


그림 10. 댐의 월류 위험도

타내고 있다. 실제 연천댐에 대한 계획최대홍수량인 5230 m<sup>3</sup>/s 에 대한 댐의 월류위험도는 0.3 %로 위험도가 작았으나, 96년 홍수시 발생한 최대홍수량 8860 m<sup>3</sup>/s 에 대한 월류위험도는 93.2 %로 비교적 크게 나타남을 알 수 있었다.

#### 4.2 한탄강에서의 홍수추적

유한차분법에 의한 홍수와 해석을 수행하기 위하여 대상하도에 대한 격자망을 구성하였는데, 각 격점간의 평균거리  $\Delta x$  는 약 500 m이며 평균하도 경사는 약 1/920 이었다. 이 때 사용된 조도계수는 기존의 자료를 참고로 하여 0.04~0.06의 범위에서 사용하였다. 하도의 단면 특성치를 도입함에 있어서는 홍수류의 유동 구간과 저류구간으로 구분함으로써 계산 결과치에 대한 정확도의 향상을 기하였다.

확정론적 모형의 검정을 위해서 실제 전곡지점에서의 홍수상황을 확정된 기지값으로 하고 이를 재현하는 홍수량 및 주요 매개변수를 역추적의 과정을 통하여 산정하였다. 실제홍수를 재현하는 모형의 구성을 위해서 관측강우자료와 유역자료로부터 HEC-1 모형으로 산정된 유출수문곡선을 먼저 첨두홍수량과 홍수도달시간면에서 전곡지점의 실측 수위자료와의 비교를 통하여 검정하였다. 역추적된 연천댐 지점에서의 유입수문곡선을 적용하여 수치모의한 전곡지점에서의 계산치는 수위표 기록치와 잘 일치되는 결과를 보여주었다. 그림 11은 확정론적 해석결과를 이용한 최고수위의 중단형상으로서, 그림에서 보는 바와 같이 한탄강 유원지를 포함한 수개 지점에서의 실측된 수위는 12.75 km 지점에서 34.94 m, 12.95 km 지점에서 34.70 m, 13.35 km 지점에서 34.98 m으로 각각 나타났으며, 이는 계산치

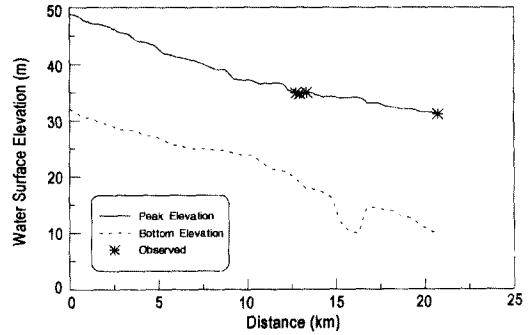


그림 11. 확정론적 홍수위 해석 결과

와 비교하여 비교적 잘 일치되고 있음을 확인할 수 있었다.

본 연천댐 하류부에 대해서는 댐 파괴 홍수추적에 있어서의 하도단면의 기하형상과 수리지장계수에 기인한 불확실도의 영향이 검토되었다. 하천의 기하형상과 조도계수에 있어서의 오차는 공간적으로 비상관적이며 임의적으로 분포되어 있는 것으로 고려하였다. 본 적용에 있어서 수위-수면폭 관계의 오차는 실제 측량도면에서의 읽음값의 오차를 고려하여  $\pm 1\%$ , 조도계수의 오차는 이 구간에서 이상홍수 발생이 전무하였던 것을 고려하여  $\pm 5\%$ 인 균등분포로 가정하여 모의수행을 실시하였다.

각 하도 및 수위-수면폭 구간에 대해서 균등분포에 의한 난수를 발생시켜 해석하였다. 모의 수행 오차를 감소시키고 통계학적으로 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서 각 하도단면 형상과 조도계수에 대해서 100회 반복수행이 이루어졌다. 모의수행에 사용된 매개변수군은 단면형상과 조도계수에 대한 난수 발생값의 임의 조합에 의해 형성되었다. 주어진 매개변수군에 대해서 모의 과정은 확정론적인 것이었고 따라서 100개의 확정론적 해석 결과를 얻을 수 있었다.

그림 12는 추계학적 해석결과에 의한 홍수위 해석결과를 도시한 것이고 그림 13은 댐 하류부의 대표적인 3개의 위치인 1.25, 11.25, 20.25 km 지점에서의 홍수위의 변동양상을 도시한 것이다. 이들 3개 지점에서의 최고수심의 변화는 상류에서 하류로 감에 따라  $\pm 0.169$ ,  $\pm 0.263$  및  $\pm 0.578$  m로 각각 나타났다. 이는 이 유역에서의 하류단 경계조건에 대한 불확실도의 영향과 조도계수에서의 불확실도에 기인하여 나타난 것으로 판단되었다.

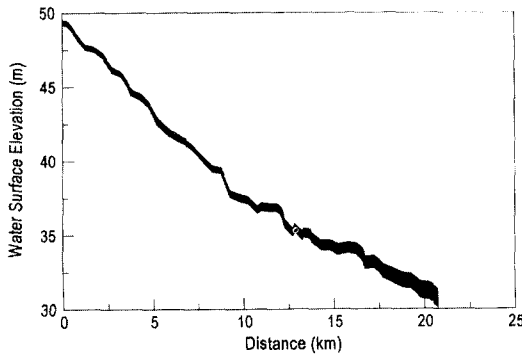


그림 12. 추계학적 홍수위 해석결과

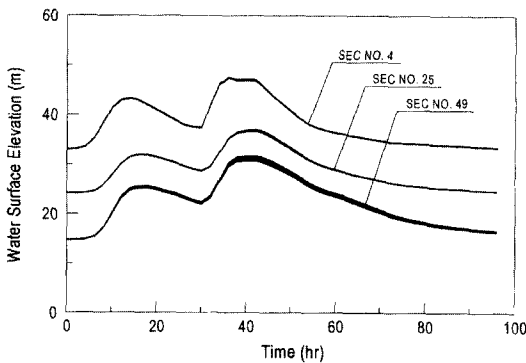


그림 13. 댐 하류부에서의 지점별 홍수위 변동양상

### 4.3 제방 월류 위험도의 산정

추계학적 홍수위 해석결과를 이용하여 한탄강 유원지 지점에서의 제방고와 홍수위를 비교함으로써 월류 위험도를 산정하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 댐 하류부 12.95~13.35 km 지점에서의 제방고는 EL. 34.20~34.40 m로서 이 구간에서는 평균적으로 홍수위가 1.266~0.782 m 범위로 상회하는 월류가 발생하였다.

하도단면 및 조도계수의 불확실도를 고려한 경우에 대해서 이 구간에서의 최소 및 최대수위에 대한 월류 위험도는 모든 경우에 있어 100 %로 나타났다. 댐 붕괴 모의에 있어서 불확실도의 요인은 지형도로부터 하도의 기하학적 형상을 추출하는데 포함된 오차와 과거

홍수로부터의 조도계수를 산정하는데 있어서의 오차가 포함된다. 신뢰도 해석기법이 댐 붕괴에 따른 홍수추적에서 그것들의 효과를 검토하기 위해 적용되었다. 하천에서의 매개변수 불확실도로부터 야기되는 유량, 수심, 최고수위 도달시간에 있어서의 변동성의 범위는 댐 붕괴에 따른 홍수모의와 대피계획 수립시에 반드시 고려되어야만 하겠다.

본 연구를 통해서 몇 개의 변수들이 수리학적 매개변수들의 불확실성을 지배하고 있음을 알 수 있었으며, 이와 같은 연구과정은 제방의 위험도 해석에만 국한되지 않고 다양한 수공구조물들에 대해 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 앞으로 본 연구모형은 관련 매개변수들에 대한 많은 자료와 정보를 수집, 분석하여 적용한다면 더욱 정확한 위험도를 산정할 수 있을 것으로 사료되었고, 그 해석결과는 국내 주요 댐 및 하천제방의 안전도 평가 및 유지관리면에서 크게 기여할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 5. 결 론

댐 붕괴에 따른 홍수위의 해석시의 불확실도를 규명하기 위해서 범용 프로그램인 DAMBRK를 수정, 보완하여 댐 및 하천제방에 대한 붕괴 위험도를 산정할 수 있는 DAMBRK-U 모형을 개발하였다. 본 연구의 모형은 하천의 홍수추적에 있어서 불확실도에 기인한 홍수위 해석결과를 살펴보기 위해 확대하도, 균일하도 및 축소하도 구간에 적용하여 모형에 대한 비교검토를 실시하였고, 1996년 7월 연천댐 붕괴에 따른 한탄강에서의 홍수범람 해석을 모의함으로써 모형의 실제 적용성을 입증하였다.

연천댐 붕괴에 따른 홍수추적에 있어 추계학적 해석에 의한 홍수위 해석결과는 하도의 형상과 조도계수에서의 불확실도에 기인하여 하도의 하류구간에 이질수목 큰 불확실도가 발생하는 것으로 나타났다. 연천댐 유역에서 여러 가지 방류유량조건에 따른 댐의 월류위험도를 계산하였으며, 한탄강 유원지 지점에서의 제방고와 홍수위를 비교하여 월류위험도를 산정하였다. 그 결과, 홍수위에 있어 제방고를 1.266~0.782 m 상회하는 월류가 발생하였고, 이 구간에서의 월류위험도는 100

표 2. 한탄강 유원지 지점에서의 제방월류 위험도 산정

거리 (km)	제방고 (m)	최고수위 (m)	평균수위 (m)	최저수위 (m)	월류위험도(%)
12.95	34.20	35.740	35.466	35.196	100
13.35	34.40	35.463	35.182	34.887	100



%로 나타났다.

본 연구 결과는 기존 댐 및 하천제방에 대해서 홍수 시 안전도 여부를 판단할 수 있는 표준적인 해석모형으로 제시될 수 있었고, 댐 및 제방의 계획시 홍수피해액과 투자액을 감안한 경제적인 댐 및 제방의 단면결정에 기본자료로서 활용될 수 있을 것이다. 댐 및 제방의 인근지역 주민의 인명 및 재산보호를 위한 안전대책 수립 및 홍수보험제도의 도입을 위한 기초자료 제시 등의 홍수피해 경감대책의 수립에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

건설부. (1980). 임진강 하천정비 기본계획 보고서.  
건설교통부. (1995). 임진강 유역조사 1차 보고서.  
한건연, 이종석, 김상호. (1997a). "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: I. 이론 및 모형." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제6호, pp. 675-686.  
한건연, 이종석, 김상호. (1997b). "댐 및 하천제방에 대한 위험도 해석기법의 개발: II. 적용 예." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제6호, pp. 687-694.  
Burnham, M.W. and Davis, D.W. (1990). "Effects of data errors on computed steady flow profiles." *J. of the Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 7, pp. 914-929.  
Defalque, A., Wark, J.B., and Walmsley, N. (1993). "Data density in 1-D river model."

*Report No. SR 353*, HR Wallingford, U.K.  
Fread, D.L. (1981). "Some limitations of dam-break flood routing models." *ASCE Fall Convention*, St. Louis, Missouri.  
Fread, D.L. (1988). *The NWS DAMBRK model : Theoretical background and users documentation*, Hydrologic Research Lab., Office of Hydrology, National Weather Service. NOAA, Silver Springs, MD. pp. 1-123.  
Kung, C.S., and Yang, X.L. (1993). "Dam-break flood simulation and river parameter uncertainty." *Report No. 65*, Hydraulic Laboratory, Royal Institute of Technology, Stockholm.  
McBean, E.A., and Perkins, F.E. (1975). "Numerical concerns in water profile computation." *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 101, No. 11, pp. 1389-1403.  
Oegema, B.W., and McBean, E.A. (1987). "Uncertainty in flood plain mapping." *Application of Frequency and Risk in Water Resources*, D. Reidel Pub. Company. pp. 293-303.  
Tung, Y.K., and Mays, L.W. (1980). "Risk analysis for hydraulic design." *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 106, No. 5, pp. 893-913.

<최종본 접수일 : 1998년 5월 12일>