

## 댐 붕괴 홍수파 해석을 위한 무차원 홍수추적곡선의 유도

### Derivation of Dimensionless Routing Curves for Dam Failure Flood Wave

이종태\* · 한건연\*\*

Lee, Jong Tae · Han, Kun Yeun

#### Abstract

The types of dam-break have been classified as instantaneous and gradual failure. Equations for estimating the peak outflow have been derived respectively as a metric unit. New dimensionless routing curves have been developed based on the distance parameter which has been used in SMPDBK and hydro-geometric characteristics of dams and reservoirs in Korea. These suggested curves can be used for any case of the flow of supercritical or subcritical. The computed peak flowrate shows the trend of decreasing dependence on the Froude numbers as it increases. These curves are applied to Hyogŭ dam, and the results have good agreements with the data observed in the peak discharges, peak elevations and flood travel time. The simplified dam-break model in this study would contribute effectively to forecast the dam-break flood in this country with minimum informations in a short time.

#### 요 지

댐 붕괴의 유형을 순간적 붕괴와 점진적 붕괴로 구분하였고 각 경우에 대하여 첨두유량의 산정식을 Metric 단위로 환산하여 유도하였다. 기존의 SMPDBK 모형에서 사용된 거리 매개변수의 개념을 도입하고 국내 댐 및 저수지의 자료를 기초로 한 새로운 무차원 홍수추적곡선을 유도하였다. 새로운 추적곡선은 기존의 모형에서 다루지 않은 射流상태의 경우도 포함하고 있으므로, 산지하천이 많은 국내유역에 적용시킬 수 있도록 하였다. 본 연구에서 유도된 무차원 홍수추적곡선은 Froude 수가 증가됨에 따라 流量減衰比도 증가하고 있는 경향을 보여주었으며, 그 증가율은 Froude 수가 증가함에 따라 감소하고 있었다. 특히, 사류의 경우에는 Froude 수가 커짐에 따라 그 증가율이 비교적 작게 나타나는 특성을 보이고 있었다. 孝基 댐 붕괴의 경우에 대하여 본 연구에서 유도한 무차원 홍수추적곡선을 적용한 결과를 실측치 및 동역학적 모형에 의한 계산결과치와 비교할 때, 댐 붕괴 지점에서의 첨두유량, 최고수위 및 홍수파의 도달시간 등에 있어 비교적 잘 일치되었다. 본 연구결과는 국내의 중소 댐에 경제적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

\* 정희원 · 경기대학교 공과대학 교수, 토목공학과

\*\* 정희원 · 경북대학교 공과대학 부교수, 토목공학과

## 1. 서 론

댐은 재해방지와 수자원의 활용면에서 국민생활에 매우 중요한 비중을 차지하고 있는 반면에, 예상하지 못한 재해로 붕괴되었을 때 하류에 주는 피해는 막대하다. 댐의 붕괴 및 이로 인한 홍수피해는 비교적 짧은 시간 동안에 댐의 특성이나 지형학적 조건들과 같은 복합적인 요인들에 의하여 이루어지는 현상이므로, 이에 관한 해석을 일반화시킬 수 있는 정교한 이론의 정립은 많은 연구자들의 노력에도 불구하고 아직까지는 만족스럽지 못한 실정이다.

댐 붕괴로부터의 홍수파 해석을 위한 방법은 그 해석 알고리즘이 비교적 정교한 해석 모형으로서는 동역학적 홍수추적 방법을 사용하는 미국기상청(NWS)의 DAMBRK, 수문학적 홍수추적 방법을 사용하는 미국육군공병단(HEC)의 HEC-1이 있으며, 비교적 간략한 해석모형으로서는 미국기상청의 SMPDBK, 미국토양보존국(SCS)의 Att-Kin Procedure, 미국육군공병단의 무차원 추적곡선 등이 있다. 그러나, DAMBRK나 HEC-1의 경우는 비교적 많은 양의 입력자료를 필요로 하고 많은 노력과 시간이 소요되므로 단시간내에 홍수범람 예상범위를 추정하거나 주민 대피계획 등을 수립하는데 있어서는 비효율적인 면이 있다. 간략화 한 수치모형 중에서 비교적 적용성이 우수한 SMPDBK의 경우는 그 모형의 구성에 사용된 댐 및 저수지의 자료가 미국내의 것을 근거로 하였기 때문에 실제 국내유역에 대한 적용시 댐의 규모나 지형학적 차이 등으로 인하여 결과치에 큰 오차가 있을 수 있으며 常流의 경우에만 국한되어 적용할 수 있도록 하였다.

댐 붕괴에 따른 홍수파 해석에 관한 연구의 효시는 1892년 Ritter<sup>(1)</sup>에 의하여 단순화된 이론적인 해가 유도되었으며, 1954년 Dressler,<sup>(2)</sup> 1955년 Whitham<sup>(3)</sup> 등은 홍수파 선단에서의 수심이 영에 가까운 값에 접근함에 따라 수면형의 경사는 무한이 커질 수 있다는 사실을 연구하였다. 1960, 1961년 WES<sup>(4)</sup>에서는 급격한 붕괴로부터 발생하는 홍수파에 관한 수리모형실험을 실시하여 많은 실험자료와 함께 붕괴부의 형상과 침투유출량간의 관계를 제시하였다. 댐 하류부의 홍수추적과정에 관한 수치해석기법은 대부분의 경우 Saint-Venant식을 기초로 하고 있는

데 1973년 Sakkas 등,<sup>(5)</sup> 1978년 Rajar,<sup>(6)</sup> Katopodes 등,<sup>(7)</sup> 1980년 Chen,<sup>(8)</sup> 1981년 Ponce 등,<sup>(9)</sup> 1985년 Fread 등<sup>(10)</sup>은 유한차분기법을 이용하여 댐붕괴 홍수파를 해석하였다.

최소의 자료로 신속히 침투 홍수량을 추정하는 단순화 수치해석 모형에 관한 연구는 NWS의 SMPDBK 모형,<sup>(11)</sup> 수문학적 방법으로 붕괴부에서의 수문곡선을 구한 후 Attenuation-Kinematic 모형으로 일컫는 저수지 추적방법을 사용한 SCS의 Att-Kin 모형,<sup>(12)</sup> 일반적인 포물선형의 등단면에 대해서 특성곡선 방법으로 홍수추적을 실시한 HEC의 무차원 추적곡선<sup>(13)</sup> 등이 있다.

국내에서 이 분야에 대한 연구는 이종태 등,<sup>(14)</sup> 한건연 등<sup>(15,16)</sup>에 의하여 댐의 붕괴로 인한 유출수문곡선을 유도하고, 홍수파를 Preissmann 기법에 의하여 차분화 한 후 double-sweep, fore-sweep 알고리즘으로 해석한 연구가 있었으며, 한건연<sup>(17)</sup>이 급격한 댐 붕괴로부터의 홍수파가 마른하도상에 전파되는 양상을 Hartree의 이동기법에 의하여 해석한 연구가 있다. 최소한의 수리특성자료만으로 단시간내에 상류 및 사류 하도구간에 대한 홍수전달특성을 간단한 계산과 도표로 신속하고 간편하게 추산할수 있는 실용적인 연구는 이기영<sup>(18)</sup>에 의하여 시도된 바 있으나 아직까지는 미비한 실정이다.

본 연구에서 개발한 해석모형은 SMPDBK 모형의 기본해석과정을 이용하면서 국내의 댐, 저수지의 자료를 기초로 한 홍수추적을 실시하였으며, 기존의 SMPDBK 모형이 常流에 대해서만 그 적용이 가능하였지만 본연구에서는 국내의 중소 관개용 댐들이 산지하천에 있음을 감안하여 射流의 경우에도 활용할 수 있도록 함으로써, 상류의 경우에만 해석한 기존의 SMPDBK 모형보다 그 적용범위를 크게 확장한 모형을 제시하고자 한다.

## 2. 댐 붕괴부에서의 침투홍수량 산정

댐 붕괴의 양상은 크게 순간적 붕괴와 점진적 붕괴로 구분할 수 있다. 순간적 붕괴는 콘크리트 중력댐, 아치댐에서 발생될 수 있는데 댐 자체의 부적절한 설계나 월류, 지진, 댐 접합부의 결함 등으로 인하여 댐 구조물에 과잉응력을 발생시켜 댐을

전도시키거나 밀어냄으로써 발생되며, 붕괴시간은 數分 이내로 매우 짧고, 제체의 대부분이 붕괴된다. 한편, 점진적 붕괴는 Fill 댐의 경우에서 발생하게 된다. 붕괴원인으로는 저수지 물이 댐을 월류하거나, 댐 제체나 기초부 또는 접합부 등을 통한 침투, 파 이핑에 의한 경우 등의 세가지의 유형으로 나누어 볼 수 있다. 이때 붕괴부는 제체를 구성하는 토립자가 침식되어 감에 따라 발달되며 붕괴시간은 數分에서 3, 4시간 정도에 이르고, 대체로 댐의 일부분만이 붕괴부로 형성된다.<sup>(15)</sup> 댐 붕괴로 인한 침투홍수량의 산정은 단순히 댐의 높이, 저수용량 및 기왕의 붕괴자료에 근거하여 경험적으로 산정하는 방법과, 붕괴양상을 수리학적으로 추적하여 침투홍수량을 결정하는 방법의 두 유형으로 대별할 수 있다.<sup>(19)</sup> 본 장에서는 SMPDBK 모형에 사용될 붕괴지점의 침투홍수량을 수리학적으로 해석하는 과정을 기술하였으며, Metric 단위로 환산하여 표현하였다.

### 2.1 순간적 붕괴의 경우

콘크리트 중력식 댐의 붕괴에서의 붕괴시간  $t_f$ (분)는  $H_d(m)$ 를 댐 높이라 할때  $t_f < 0.003 H_d$ 로서 표시될수 있으며 붕괴부에서 침투 유량을 산정하는데 그림 2.1에서 보는 바와 같이 負波(negative wave)가 큰 영향을 미치게 된다. 부파의 영향을 고려한 붕괴부에서의 유량을 넓은마루 웨어의 식으로 표현하면 (2.1)식과 같다.

$$Q_{max} = 1.71 Br(H-y)^{3/2} = 1.71 Br h^{3/2} \quad (2.1)$$

여기서,  $Q_{max}$  : 붕괴부에서의 유량(cms)

Br : 붕괴부의 폭(m)

H : 댐의 높이(m)

y : 웨어로 고려된 붕괴부를 월류하는 수심(m)

h : 부파의 표면동요 높이(m)

이때, 저수지 및 하도단면 형상에 따른 河幅을  $B = kh^m$ 으로 표현하면 水理 水深은  $D = h/(m+1)$ 이 되고 負波에 관한 (2.2)식을 (2.1)식에 대입하면 붕괴지점에서의 침투유량에 대한 1차적인 근사해인 (2.3)식을 얻는다.

$$y = \frac{Q(m+1)}{B\sqrt{gh}} \quad (2.2)$$

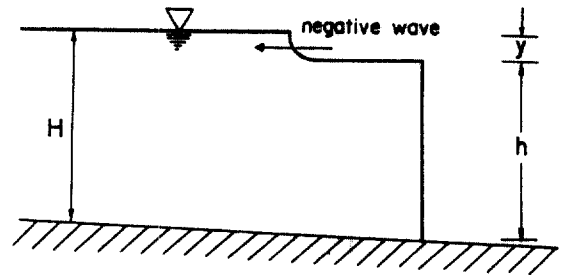


그림 2.1. 순간적 붕괴시 수면형상의 설명도

$$Q = 1.71 Br \left[ H - \frac{Q(m+1)}{B\sqrt{gh}} \right]^{3/2} \quad (2.3)$$

(2.1)식을 (2.3)식에 대입하고  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 로 하여 정리하면 (2.4)식과 같다.

$$Q = 1.71 Br \left[ H - 0.5467 \frac{Br}{B} (m+1) h \right]^{3/2} \quad (2.4)$$

이제  $h = H - y$ 로 놓고 (2.2), (2.3)식을 (2.4)식에 대입하여 정리하고, 이와 같은 과정을 반복 수행하면 (2.5)식을 얻는다.<sup>(20)</sup>

$$Q = 1.71 Br H^{3/2} I_n \quad (2.5)$$

여기서,

$$I_n = \left[ 1 - 0.5467 \left( \frac{Br}{B} \right) (m+1) + 0.2989 \left( \frac{Br}{B} \right)^2 (m+1)^2 - 0.1634 \left( \frac{Br}{B} \right)^3 (m+1)^3 + 0.0893 \left( \frac{Br}{B} \right)^4 (m+1)^4 \dots \right]$$

댐 상류부에서의 속도수두의 항을 이 식에 포함시켜 보정하면 (2.1)식에서의 H 대신 H'에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$H' = H + \frac{V^2}{2g} = H + \frac{Q^2}{2g B^2 D^2} \quad (2.6)$$

(2.6)식의 Q항을 (2.1)식에 대입하면 (2.7)식을 얻게 된다.

$$H' = H + 0.15 \left( \frac{Br}{B} \right)^2 (m+1)^2 h \quad (2.7)$$

$h = H - y$ 이고 y는 (2.2)식으로 표시되므로 이 식들을

(2.7)식에 대입하고 이 과정을 반복 수행하면 (2.8)식을 얻게 된다.

$$H' = H I_v' \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } I_v' = & [1.0 + 0.15 \left(\frac{B_r}{B}\right)^2 (m+1)^2 \\ & - 0.08 \left(\frac{B_r}{B}\right)^3 (m+1)^3 + \dots] \end{aligned}$$

따라서 (2.5)식의 첨두유량값은 (2.8)식에 의하여 보정되어 순간적 댐 붕괴에 대한 첨두유량 산정식은 (2.9)식과 같이 기술된다.

$$Q_{\max} = 1.71 B_r H^{3/2} I_v I_n \quad (2.9)$$

여기서,  $I_v$ 는  $(I_v')^{3/2}$ 이고  $I_n$ 은 (2.5)식과 같다. (2.9)식의 적합성을 검토하기 위하여 직사각형 단면  $m=0$ 인 하도구간에서의 순간적이고 완전한 붕괴( $B_r/B=1$ )에 대하여  $Q_{\max}$ 값을 구하면  $I_v=1.10$ ,  $I_n=0.498$ 이 되어 (2.10)식과 같다.

$$Q_{\max} = 0.94 B_r H^{3/2} \quad (2.10)$$

이 식은 직사각형 단면의 마찰없는 수평수로에서의 Ritter<sup>(1)</sup>의 계수값  $8/27\sqrt{g}$  ( $=0.93$ ) 비교하면 그 계수값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 2.2 점진적 붕괴의 경우

흙 댐의 경우 붕괴는 서서히 진행되며 붕괴부에서의 첨두유량은 그림 2.2에서와 같이 넓은마루 웨어의 유량공식인 (2.1)식을 이용하여 산정한다. 그림에서  $H$ 는 댐의 높이,  $y_b$ 는 붕괴부의 높이,  $h$ 는 월류수심,  $y$ 는 월류에 따른 수위低下깊이,  $B_r$ 은 붕괴폭을 각각 나타내고 있다. 댐 붕괴부를 월류하는 수심  $h$ 는 (2.11)식과 같고, 붕괴지속시간  $t_f$ 에서 첨두유량이 발생된다고 가정하면  $h$ 는 (2.12)식이 된다.

$$h = H - y - y_b \quad (2.11)$$

$$h = H - y \quad (2.12)$$

일정한 저수지 수표면적에 (2.1)식을 대입하여 양변을 적분하여 정리하면 면  $R_{\max}$ 을 유도할수 있다.<sup>(20)</sup>

$$h_{\max} = H - y_f = \left[ \frac{1.17 A_s/B_r}{t_f + 1.17 A_s/(B_r\sqrt{H})} \right]^2 \quad (2.13)$$

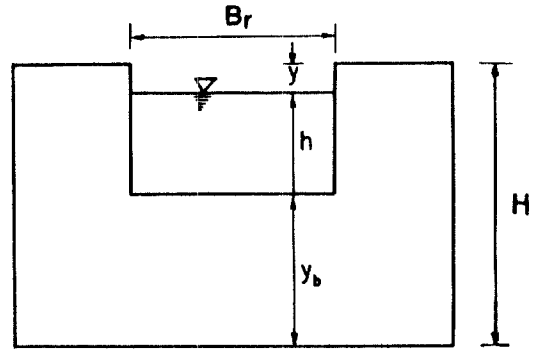


그림 2.2. 점진적 붕괴단면의 형상

이제, 붕괴지속시간  $t_f$ 를 시간의 단위로, 저수지의 표면적  $A_s$ 를  $ha$ 의 단위로 표시하면 (2.13)식은 (2.14)식과 같다.

$$h_{\max} = \left[ \frac{C}{t_f/60 + C/\sqrt{H}} \right]^2 \quad (2.14)$$

여기서,  $C = 3.25 A_s/B_r$

Wetmore 등<sup>(11)</sup>은 DAMBRK 모형에서 위의  $C$ 값을 기존의 실측자료와의 일치율을 위하여서는 약 3배로 할 것을 제시하고 있다. 즉,

$$C = 9.75 A_s/B_r \quad (2.15)$$

(2.14), (2.15)식을 (2.1)식에 대입하면 (2.16)식에 의하여 점진적 붕괴에 대한 첨두유량을 구할 수 있다.

$$Q_{\max} = 1.71 B_r \left[ \frac{C}{t_f/60 + C/\sqrt{H}} \right]^3 \quad (2.16)$$

따라서, 댐 붕괴지점의 첨두유량은 순간적 붕괴의 경우 (2.9)식을, 점진적 붕괴의 경우 (2.16)식을 이용하면 댐 직하류부에서의 첨두유량  $Q_{b\max}$ 는 (2.17)식과 같다.

$$Q_{b\max} = Q_0 + Q_{\max} \quad (2.17)$$

여기서,  $Q_0$ 는 하도부에서의 초기유량이다.

### 3. 하도부에서의 홍수파 해석

무차원홍수추적곡선을 작성하기 위하여 앞장에서 기술한 댐 붕괴지점에서의 첨두유량을 사용한 붕괴

유출수문곡선을 합성하고, 이것이 하류 하도구간으로 전파될 때의 홍수파를 동역학적 모형(dynamic wave model)에 의하여 해석하였다. 댐 하류부 하도구간에서의 흐름은 常流와 射流의 두 상태로 구분할 수 있으며 각 경우에서의 해석기법은 매우 상이한 바, 그 해석과정과 계산 알고리즘을 각각 기술하였다.

### 3.1 홍수파의 기본방정식

동역학적 모형의 기본식은 (3.1), (3.2)식과 같은 연속방정식과 운동방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A+A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \left( \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f + S_e \right) - q, V_f = 0 \quad (3.2)$$

여기서,  $x$ 는 하천의 흐름방향거리,  $t$ 는 시간,  $Q$ 는 유량,  $y$ 는 수심,  $h$ 는 수위,  $A$ 는 단면적,  $A$ 와  $A_0$ 는 각각 하천의 active와 inactive 단면적,  $q, V_f$ 은 측방 유입량과 그 유속,  $S_0, S_f, S_e$ 는 각각 수로바닥경사, 마찰경사, 단면변화에 따른 손실경사의 항이며, (3.2)식에서  $\partial y/\partial x - S_0 = \partial h/\partial x$ 로 쓸 수 있다. (3.1), (3.2)식을 해석하기 위하여 Preissmann이 제안한 4점 음형차분법을 도입하여 정리하면 하도 각 격점에서의 비선형 대수방정식이 구성된다. 이 방정식들의 해를 구하기 위하여 본 연구에서는 반복계산 기법의 하나인 Newton-Raphson 방법을 이용하였다. 이 방법은 2차 이상의 고차항이 무시되는 비선형 함수의 Taylor 급수 전개이론에서부터 유도할 수 있는데, 이 경우의 알고리즘은 (3.3)식과 같다.

$$J(x^k)(x^{k+1} - x^k) = -f(x^k) \quad (3.3)$$

여기서,  $x = (Q_1, h_1, Q_2, h_2, \dots, Q_N, h_N)$ 으로서 표시되는 미지의 벡터량,  $k$ 는 계산 반복횟수,  $J$ 는  $X^k$ 값에 대한 편미분치로 구성되는 Jacobian 매트릭스,  $f(x^k)$ 는  $X^k$ 값에 대한 비선형방정식,  $X^k$ 는 초기가정값,  $X^{k+1}$ 은 계산에 의하여 개선된 값을 각각 나타내고 있다.  $(n+1)\Delta t$  시간대에서의 수위와 유량을 구하기 위하여  $\Delta X (= X^{k+1} - X^k)$ 가 허용한계 이내에 들 때 까지 계산이 반복수행되는데 그 허용한계는 적절한

범위를 부여 할 수 있다. (3.3)식에서의 Jacobian 매트릭스  $J(X^k)$ 는  $(a, k)$ 의 요소로 구성되어 있는데, 常流흐름일 경우 上流端 및 下流端에서는 두개의 요소로 구성되며, 그밖의 요소에 대하여는  $Q_j^{n+1}, h_j^{n+1}, Q_{j+1}^{n+1}, h_{j+1}^{n+1}$ 에 관한 각각의 편미분치인 4개의 요소로 구성되어 있다. 이제 (3.4)식을 C로 (3.5)식을 M으로 나타내고 Jacobian 매트릭스를 구하면 상류 및 사류에 대하여 각각 (3.9), (3.12)식과 같이 기술된다.

### 3.2 常流상태에 대한 해석

상류상태의 해석을 위한 초기조건으로서 (3.2)식을 정상류 상태로 단순화시켜 계산한다.

$$\left( \frac{Q^2}{A} \right)_{j+1} - \left( \frac{Q^2}{A} \right)_j + g\bar{A}_j(h_{j+1} - h_j + \Delta x_j \bar{S}_{fj}) = 0 \quad (3.4)$$

상류의 경우에 있어서의 (3.4)식의 계산은 下流端에서 上流方向으로 진행되는데 단일방정식에 대한 Newton-Raphson의 식인 (3.5)식을 적용하면 그 해를 구할 수 있다.

$$x^{k+1} = x^k - f(x^k) / f'(x^k) \quad (3.5)$$

여기서,  $f'(x^k)$ 는 수위에 대한 미분치로서 (3.6)식과 같다.<sup>(21)</sup>

$$f'(h^k) = \frac{df(x^k)}{dh_j} = \left( \frac{Q^2 B}{A^2} \right)_j + 0.5 g B_j (h_{j+1} - h_j + S_{fj} \Delta x_j) + g\bar{A}_j \left[ -1 + \Delta x_j \left( \frac{d\bar{S}_{fj}}{dh_j} \right) \right] \quad (3.6)$$

상류해석을 위한 경계조건은 상하류단에서 각각 1개씩이 필요로 하는 바, 상류단에서는 유량수문곡선의 조건인 (3.7)식을 하류단에서는 forward Implicit형 경계조건식인 (3.8)식을 이용하였다.<sup>(21)</sup>

$$B_1 = Q_1^{n+1} - Q(t) = 0$$

$$\frac{\partial B_1}{\partial Q_1} = 1 \quad \frac{\partial B_1}{\partial h_1} = 0 \quad (3.7)$$

$$B_j = Q_j^{n+1} - Q_N = 0$$

$$\frac{\partial B_j}{\partial Q_j} = 1 + \frac{Q_N}{n_j^{n+1}} \left( \frac{\Delta n}{\Delta Q} \right)_j^{n+1}$$

$$\frac{\partial B_j}{\partial h_j} = \frac{QN}{3} \left[ 3 \frac{\Delta n / \Delta h}{n} + 2 \frac{\Delta B / \Delta h}{B} - \frac{5B}{A} \right]_j^{n+1} \quad (3.8)$$

여기서,

$$QN = \left( \frac{A^{5/3}}{n B^{2/3}} \right)_j^{n+1} \left( \frac{h_j^n - h_j^{n+1}}{\Delta x_j} \right)^{1/2}$$

상하류단 경계조건이 도입되면 상류상태의 흐름에 대하여 (3.9)식과 같은 매트릭스로 구성된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial Q}{\partial Q_1} & \frac{\partial B_1}{\partial h_1} \\ \frac{\partial C_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial C_1}{\partial h_1} \\ \frac{\partial M_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial M_1}{\partial h_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial C_{j-1}}{\partial Q_{j-1}} & \frac{\partial C_{j-1}}{\partial h_{j-1}} \\ \frac{\partial M_{j-1}}{\partial Q_{j-1}} & \frac{\partial M_{j-1}}{\partial h_{j-1}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial C_n}{\partial Q_n} & \frac{\partial C_n}{\partial h_n} \\ \frac{\partial M_n}{\partial Q_n} & \frac{\partial M_n}{\partial h_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dQ_1 \\ dh_1 \\ dQ_2 \\ dh_2 \\ \vdots \\ dQ_{j-1} \\ dh_{j-1} \\ dQ_j \\ dh_j \\ \vdots \\ dQ_n \\ dh_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_1 \\ -C_1 \\ -M_1 \\ \vdots \\ -C_{j-1} \\ -M_{j-1} \\ \vdots \\ -C_n \\ -M_n \\ -B_n \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

### 3.3 射流상태에 대한 해석

사류상태에 대한 초기조건은 (3.4)식을 上流端에서 下流方向으로 계산이 진행되며, 이 경우의  $f(h^k)$ 값은 (3.10)식으로 표시될 수 있다.

$$f(h^k) = \frac{df(x^k)}{dh_j} = - \left( \frac{Q^2 B}{A} \right) + 0.5gB_{j+1}(h_{j+1} - h_j + \bar{S}_{ij} \Delta x_j) + gA_j \left[ 1 + \Delta x_j \left( \frac{d\bar{S}_{ij}}{dh_j} \right) \right] \quad (3.10)$$

흐름이 사류일 경우 특성선은 하류방향으로만 전달되므로 상류에서의 경우와 같이 하류단의 경계조건은 필요하지 않게 되고, (3.7)식의 유량수문곡선의 조건이외에 수위-유량관계형태로 주어진 부가적인 상류단의 경계조건인 (3.11)식이 이용된다.<sup>(22)</sup>

$$B_2 = Q_1^{n+1} - QS = 0$$

여기서,

$$QS = \left( \frac{A^{5/3}}{n B^{2/3}} \right)^{n+1} \left( \frac{h_1^n - h_2^n}{\Delta x_1} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial B_2}{\partial h^1} = \left( \frac{3\Delta n / \Delta h}{n} - \frac{5B}{A} + \frac{2\Delta B / \Delta h}{B} \right)_1^{n+1}$$

$$\frac{\partial B_2}{\partial Q_1} = 1$$

상류단 경계조건식이 도입되면 사류상태의 흐름에 대하여 결국 (3.12)식과 같은 매트릭스 형태로 구성된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial B_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial B_1}{\partial h_1} \\ \frac{\partial B_2}{\partial Q_1} & \frac{\partial B_2}{\partial h_1} \\ \frac{\partial C_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial C_1}{\partial h_1} \\ \frac{\partial M_1}{\partial Q_1} & \frac{\partial M_1}{\partial h_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial C_{j-1}}{\partial Q_{j-1}} & \frac{\partial C_{j-1}}{\partial h_{j-1}} \\ \frac{\partial M_{j-1}}{\partial Q_{j-1}} & \frac{\partial M_{j-1}}{\partial h_{j-1}} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial C_n}{\partial Q_n} & \frac{\partial C_n}{\partial h_n} \\ \frac{\partial M_n}{\partial Q_n} & \frac{\partial M_n}{\partial h_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dQ_1 \\ dh_1 \\ dQ_2 \\ dh_2 \\ \vdots \\ dQ_{j-1} \\ dh_{j-1} \\ dQ_j \\ dh_j \\ \vdots \\ dQ_n \\ dh_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_1 \\ -B_2 \\ -C_1 \\ -M_1 \\ \vdots \\ -C_{j-1} \\ -M_{j-1} \\ \vdots \\ -C_n \\ -M_n \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

(3.9)식과 (3.12)식의 해는 banded 매트릭스를 형성하고 있기 때문에 Fread<sup>(23)</sup>가 제안한 바와 같이 우선 non-zero 요소만 보관하여 그 크기를 줄이며 penta-diagonal형으로 변형된 Gauss 소거법에 의하여 효율적으로 그 해를 구할 수 있다.

## 4. 국내 유역자료를 이용한 무차원 홍수 추적곡선

국내 유역의 자료를 이용하여 댐 붕괴 홍수와 해석을 무차원 홍수 추적곡선을 일반화시키기 위하여 SMPDBK 모형에서 사용된 距離媒介變數(distance parameter)를 도입하여 해석하였다. 저수지 및 하도부의 하도단면형은 하폭 B와 수심 h, 하도단면형상계수 k m과의 관계식  $B = kh^m$ 으로 일반화시켜 해석하였다.

### 4.1. 距離媒介變數

SMPDBK 모형에서는 댐 높이, 저류량 및 수로 단면형의 특성을 반영하여 거리로 나타낸 거리개개 변수  $X_c$ 의 개념을 도입하였다.

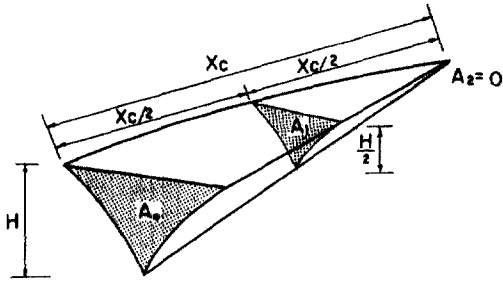


그림 4.1. 피라미드형으로 가정한 저수지 형상

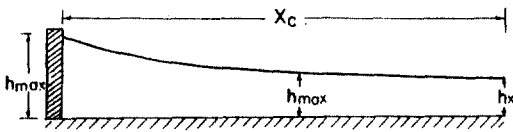


그림 4.2. SMPDBK 모형의 하도홍수추적의 개념

저수지가 그림 4.1에서와 같이 역피라미드 모양이라면 그 체적  $V_r$ 은 prismatic식으로부터 (4.1)식과 같이 표현된다.

$$V_r = \frac{X_c}{6} (A_0 + 4A_1 + A_2) \quad (4.1)$$

여기서,

$$A_0 = \frac{k}{m+1} H^{m+1}$$

$$A_1 = \frac{k}{m+1} \left(\frac{H}{2}\right)^{m+1}$$

$$A_2 = 0$$

$h_v$ 를  $B = kh^m$ 의 관계식을 적용할수 있는 수위라 할때  $H < h_v$ 인 경우에 (4.1)식은 (4.2)식이 되어 이를  $X_c$ 에 대하여 정리하면 (4.3)식과 같다.

$$V_r = \frac{X_c k}{6(m+1)} H^{m+1} \left\{ 1 + 4\left(\frac{1}{2}\right)^{m+1} \right\} \quad (4.2)$$

$$X_c = \frac{(m+1)V_r}{kH^{m+1}} \left\{ \frac{6}{1 + 4(1/2)^{m+1}} \right\} \quad (4.3)$$

$H > h_v$ 인 경우에도 같은 방법으로 (4.4)식을 유도할 수 있다.

$$X_c = \frac{6V_r}{kh_v^m(3H - 5(mh_v^m(m+1)))} \quad (4.4)$$

이제, 그림 4.2에서와 같이 댐에서부터  $X_c$ 만큼 떨어진 위치에서의 수심을  $h_x$ 라 하고 댐 지점에서의 최고수위를  $h_{max}$ 라고 하면,  $X_c$ 거리 내에서의 평균수심  $h$ 는 (4.5)식과 같이 쓸 수 있다.

$$h = \frac{h_{max} + h_x}{2} = \alpha h_{max} \quad (4.5)$$

이 구간내에서의 평균유속  $V_c$ 와 Froude수  $F_c$ 는 (4.6), (4.7)식과 같고 無次元 體積媒介變數  $V^*$ 는 (4.8)식과 같이 표시된다.

$$V_c = 1/n(D_c)^{2/3} S^{1/2} \quad (4.6)$$

$$F_c = \frac{V_c}{\sqrt{gD_c}} \quad (4.7)$$

$$V^* = \frac{V_r}{A_c X_c} \quad (4.8)$$

## 4.2 국내 유역자료의 조사분석

4.1절에서 기술된 거리매개변수의 개념을 이용하여 국내유역특성에 적합한 무차원 홍수추적곡선을 유도하기 위해서는 댐 및 저수지의 지형학적 특성 자료, 붕괴부에 관한 관련자료, 하도부에서의 Manning의 계수 및 초기유량 조건 등의 자료가 필요하다. 이를 위하여 국내 댐 및 저수지의 자료를 수집하였고 Wetmore 등<sup>(11)</sup> 및 French<sup>(21)</sup>에 의하여 제시된 자료를 이용하였다.

저수지의 저수량과 댐 높이의 관계를 유도하기 위하여 국내 전역의 높이 10m 이상인 주로 관개용 수용 2,142개 댐의 자료로부터 상관관계를 (4.9)식으로 도출하였으며 그 상관계수는 약 0.7이다. 즉,

$$V_r = 2,637.3 H_d^{1.87} \quad (4.9)$$

여기서,  $V_r$ 은 저수지의 체적( $m^3$ ),  $H_d$ 는 댐의 높이(m)이다.

또한, SMPDBK 모형구성시 사용되었던 기본가정치를 참고로 하였는데 붕괴부의 폭은 댐 높이의 2배의 값, 붕괴지속시간  $t$ (分)은 댐 높이  $H_d$ (m)의 1/10의 값, 초기유량  $Q_0$ 는  $Q_{bmax}$ 의 10%의 값 등을

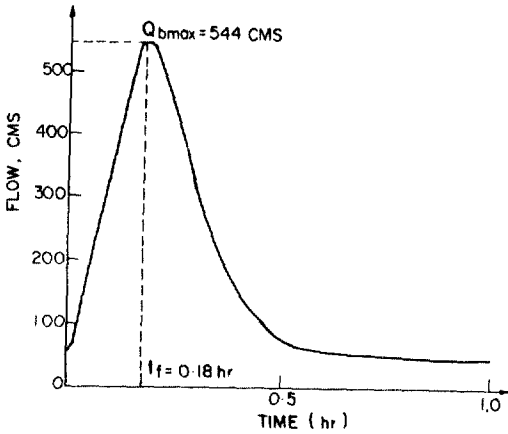


그림 4.3. 댐 붕괴지점에서의 합성유출수문곡선

이용하였다. 그밖의 각종계수 등은 SMPDBK 모형 유도시 사용된 값을 그대로 활용함으로써 본 연구에서 유도한 결과와의 비교 검토가 가능하도록 하였다.

댐지점에서의 첨두유량을 이용하여 동역학적 모형에 적용하기 위해서는 (2.17)식에서의 첨두유량을 최대치로 하는 상류단의 경계조건인 합성유출수문곡선이 필요하므로 본 연구에서는 4변수 Pearson-type IV 분포식을 사용하여 수문곡선을 유도하였다.

그림 4.3은 댐 높이가 10 m인 경우에 유도된 합성유출수문곡선의 형태를 나타내고 있다.

#### 4.3. 상류 및 사류상태에 대한 무차원 추적곡선의 유도

무차원 추적곡선을 유도하기 위하여서는 하도에 관한 상수  $k$ ,  $m$ , 그리고 하상경사  $S_0$ 를 조정해 나가면서 여러가지 경우의 Froude수( $F_c$ )와 체적매개변수  $V^*$ 에 대한 추적곡선을 얻게 된다. 앞에서 기술한 기본자료를 기초로 하고 동역학적 모형을 각각의 경우에 대하여 반복 적용하여 새로이 유도된 무차원 홍수추적곡선을 그림 4.4~그림 4.8에 제시하였다. 그림에서 가로축은 댐 지점으로부터의 거리를 표시하는 무차원량  $X_1/X_c$ , 세로축은 댐지점으로부터 발생한 첨두유량의 감쇠를 나타내는 무차원량  $Q_p/Q_{bmax}$ 로 표시되고 있으며 체적매개변수  $V^*$ 를 제 3의 변수로 나타내고 있다. 여기서  $Q_p$ 는 댐붕괴시 하류의 각 지점을 통과하는 첨두유량이다.

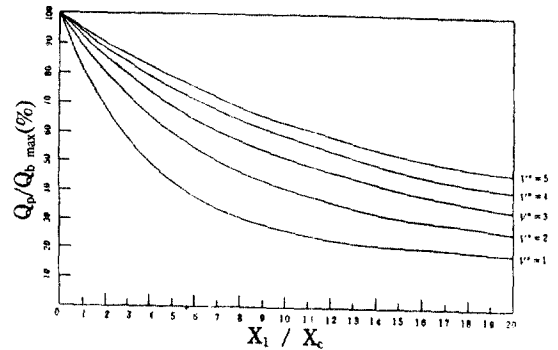


그림 4.4. 무차원 홍수 추적곡선( $F_c=0.25$ )

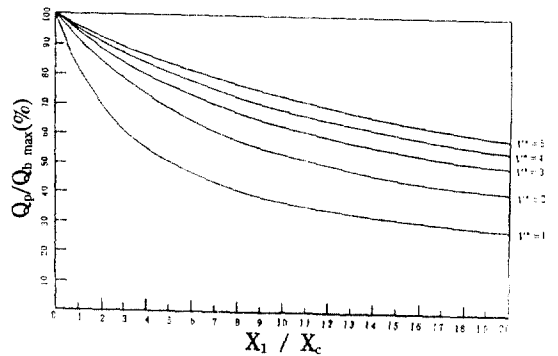


그림 4.5. 무차원 홍수추적곡선( $F_c=0.5$ )

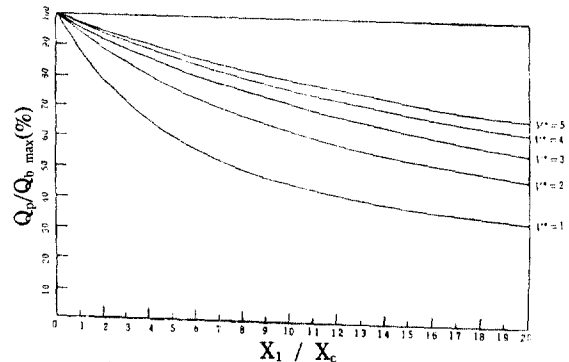


그림 4.6. 무차원 홍수추적곡선( $F_c=0.75$ )

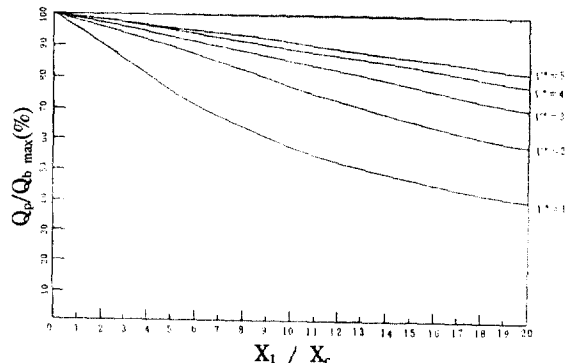


그림 4.7. 무차원 홍수추적곡선( $F_c=1.25$ )



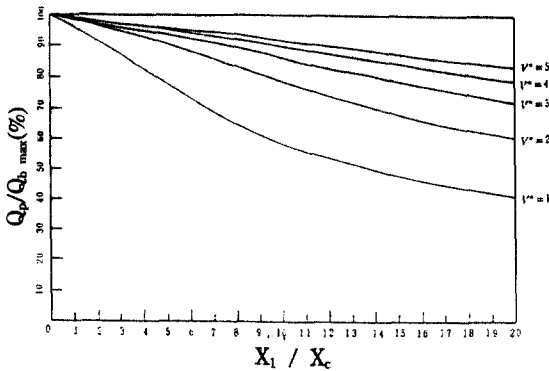


그림 4.8. 무차원 홍수추적곡선( $F_c=1.50$ )

그림 4.4~그림 4.6은 각각 Froude수가 0.25, 0.5, 0.75인 상류상태, 그림 4.7, 그림 4.8은 각각 Froude 수가 1.25, 1.5인 사류상태에 대한 유도 결과이다. 새로이 유도된 무차원 홍수추적곡선의 특징은 Froude 수가 증가됨에 따라  $Q_p/Q_{bmax}$ 의 값도 증가하는 경향이며, 그 증가폭은 Froude 수가 증가됨에 따라 감소되고 있었다. 특히, 사류상태인 경우에는 Froude 수가 커짐에 따라 그 증가폭이 비교적 작게 나타나는 특성을 보이고 있는데 이는 본 연구에서 나타난 새로운 결과 중 하나이다. 본 연구에서 새로이 유도한 무차원 홍수추적곡선은 국내 댐 및 저수지의 관련자료를 이용한 결과이므로 기존의 SMPDBK 모형의 입력자료로 활용된다면 보다 개선된 계산결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 무차원 홍수추적곡선을 이용하면 최소한의 자료인 댐 높이와 저류량, 하도단면의  $k$ 와  $m$ 의 값, 하상경사등의 자료만으로도 댐 하류부 각 지점별 첨두유량을 구할 수 있다.

## 5. 적용 및 비교검토

### 5.1 SMPDBK 모형과의 비교검토

본 연구에서 유도된 무차원 홍수추적곡선과 SMPDBK 모형에서 사용되는 기존의 무차원 홍수추적곡선에 의하여 산출된 결과를 비교한 결과는 표 5.1과 같다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 상류의 경우에 있어서  $Q_p/Q_{bmax}$ 의 값에 있어서 본 연구에서의 무차원 곡선이 기존의 값보다 약간 上廻하는 값을 보이고 있는데 이는 국내의 댐 및 저수지의 지형학적 특성이 반영된 결과로 판단된다.

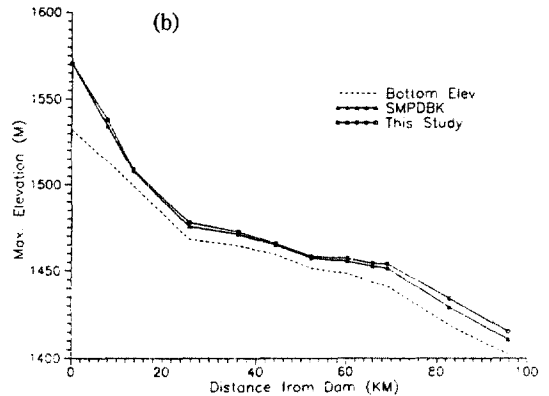
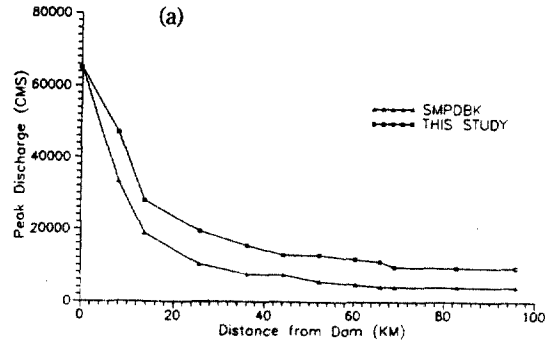


그림 5.1. Teton 댐에 대한 적용결과와의 비교  
(a) 첨두유량 (b) 최고수위

그림 5.1은 Teton 댐 붕괴에 따른 홍수와 해석 결과를 기존의 SMPDBK 모형과 본 연구결과를 도시한 것인데 이는 단순히 본 모형과 SMPDBK 모형의 계산결과를 비교하기 위한 목적으로 제시하였다. 그림에서 보는 바와 같이, SMPDBK 모형에 비하여 본 연구결과가 첨두유량 및 최고수위에 있어 약간 상회된 값을 보이고 있는데 이는 본 연구결과가 국내의 댐 및 저수지에 관한 자료를 기초로 하였기 때문인 것으로 판단되었다. 특히, 본 연구에서의 무차원 홍수추적곡선은 기존의 모형에서 다루지 못하였던 射流를 해석하여 그 결과를 제시함으로써 산지하천이 많은 국내 유역에 대한 모형의 적용성이 기대된다.

### 5.2 효기댐 붕괴에 대한 적용

본 연구에서 유도한 첨두유량 추정식과 무차원 홍수추적곡선을 국내 효기댐 붕괴의 경우에 대하여 적용하고 그 결과를 비교검토하였다. 한건연<sup>(16)</sup>의

표 5.1 본 연구와 SMPDBK 모형과의 계산결과치 비교  
 $Q_p/Q_{bmax}$  (%)

$X_c/X_c$	0		0		3		5		10		20	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
0.25	100	100	83	56	58	32	43	20	26	12	19	7
	100	100	90	74	73	49	60	35	41	24	27	13
	100	100	93	85	80	64	69	50	51	35	40	20
	100	100	94	90	84	74	75	62	58	45	40	26
	100	100	95	93	86	81	79	71	64	53	46	31
0.50	100	100	84	73	62	53	50	43	37	30	29	20
	100	100	92	93	78	66	68	57	53	42	41	28
	100	100	94	92	84	79	76	70	63	54	49	36
	100	100	96	95	87	86	81	79	68	64	55	43
	100	100	96	97	90	90	84	84	73	71	59	50
0.75	100	100	87	78	71	58	60	47	46	34	34	24
	100	100	95	91	85	75	77	62	63	48	48	34
	100	100	96	94	89	83	83	74	72	60	57	44
	100	100	97	95	91	87	87	81	77	69	64	53
	100	100	98	97	93	91	89	86	80	76	68	60
1.25	100	.	96	.	86	.	76	.	58	.	41	.
	100	.	98	.	94	.	90	.	77	.	59	.
	100	.	99	.	96	.	93	.	85	.	70	.
	100	.	99	.	97	.	95	.	89	.	77	.
	100	.	99	.	97	.	96	.	91	.	82	.
1.50	100	.	96	.	88	.	78	.	59	o	41	.
	100	.	98	.	95	.	96	.	91	.	59	.
	100	.	99	.	96	.	94	.	86	.	71	.
	100	.	99	.	97	.	95	.	90	.	78	.
	100	.	99	.	98	.	96	.	92	.	83	.

a : This Study, / b : SMPDBK

효기댐에 관한 입력자료로서 댐 높이 15 m, 댐 제체의 길이 115 m, 저수용량  $2.7 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 붕괴부의 폭 60 m, 붕괴시간 6분, 12분 등을 사용하였다. 효기댐의 붕괴는 점진적 붕괴의 경우이므로 (2.16)식을 이용하여 붕괴지점에서의 침투유량을 계산할 수 있다. 표 5.2는 효기댐 붕괴시의 침투유량치를 붕괴시간 6분, 12분에 대하여 계산하고 그 결과를 한건연, (16) 오남선 등(23)의 계산결과와 비교하였다.

본 연구에서 근사적으로 계산된 침투유량값은 붕괴시간 6분의 경우 기발표된 침투값과 비교적 잘

일치되고 있었으나, 붕괴시간 12분의 경우 차이를 보이고 있으므로 본 연구에서는 붕괴시의 침투유량치 중에서 합리적인 범위에 속하는 붕괴시간 6분의 경우를 택하여 하류부에서의 홍수와 전달양상을 해석하였다.

본 연구에서는 SMPDBK 모형(1989)을 Metric 단위로 처리할 수 있도록 관련 식들을 변환시켰고, 수정된 모형을 효기댐 붕괴의 경우에 대하여 적용하였다. 1989년에 개선된 SMPDBK 모형에서 특기할만한 사항은 하도면단자료를 貯溜斷面積(inactive

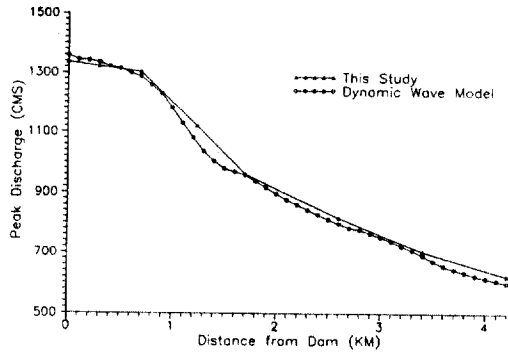


그림 5.2. 효기댐 붕괴에 따른 하류부의 침두유량

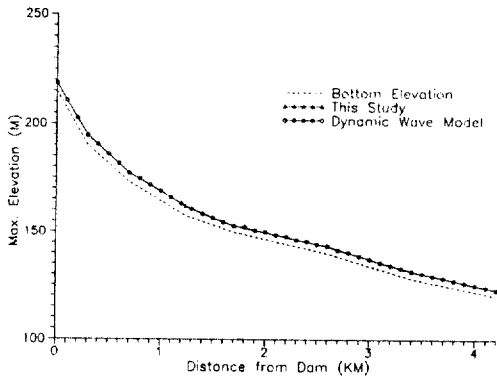


그림 5.3. 효기댐 붕괴에 따른 하부류의 최고수위

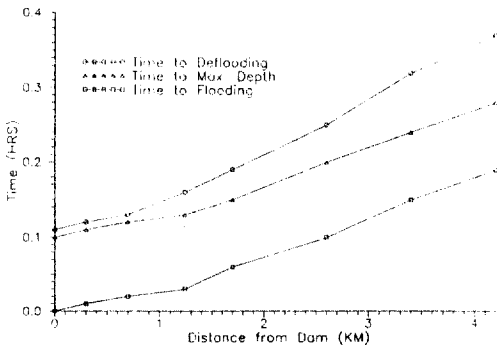


그림 5.4. 효기댐 붕괴에 따른 홍수파의 도달시간

area)과 流動斷面積(active area)으로 구분하여 처리할 수 있고, 저류단면에 대한 흐름의 저항을 Manning의  $n$ 값과 상응한 값으로 처리하도록 구성되어 있다. Fread(1989)는 그 값을 0.1에서 0.5까지의 범위에서 적절한 값을 사용하도록 제안하였고, Teton 댐의 경우에 0.5의 값을 이용하여 적용한 바 있다.

표 5.2 효기댐 붕괴에 따른 침두유량치 비교

(단위 : CMS)

붕괴시간	본 연구	한건연(1987)	오남선 등(1989)
6분	1338	1359	1364-1512 의 범위값
12분	496	721	

표 5.3 효기리 마을에 대한 홍수파의 예측치

	최고수위 (m)	최대수심 (m)	침두유량 (CMS)
본 연구	162.00	4.50	1121
동역학적 모형	162.02	4.52	1064

효기댐 붕괴의 경우 댐 하류부 4.2 km 구간내에서의 8개 지점의 하도단면 자료가 이용되었는데, 하류부 0.7~1.7 km에 이르는 구간에서는 하도의 좌우안에 넓은 홍수터가 형성되어 있어 이에 대한 홍수파의 減衰效果도 클 것으로 판단되었다. 하도부의 평균하상경사는 0.0226으로 댐 직하류부에서는 급경사를 이루다가 구간 하류부로 갈수록 경사가 조금 완만해지고 있다. 흐름의 상태는 사류로 나타나, 본 연구에서 유도된 홍수추적곡선의 적용성을 증명할 수 있는 구간으로 판단되었다. Manning의 조도계수는 유동단면에 대하여 0.035, 저류단면에 대하여 0.20의 값을 적용하였다. 그림 5.2~5.3는 하도부 각 단면에서의 침두유량 및 최고수위를 나타낸 것이고, 그림 5.4는 최고수위의 도달시간과 각 하도단면에서의 홍수위 1m에 대한 범람시간을 도시한 것이다. 그림 5.2~5.3에서는 본 연구에 의한 계산결과를 동역학적 모형에 의한 결과와 비교한 것인데 그림에서 보는 바와 같이 두 결과치는 합리적인 범위내에서 잘 일치되고 있었다.

효기리 마을에 대한 홍수파의 예측치는 표 5.3에 정리하였다.

효기리 마을에서 계산된 침두유량과 최고수위는 동역학적 모형에 의하여 계산된 값과 잘 일치되고 있어 본 연구에서 유도된 무차원 추적곡선의 적용성은 우수한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 유도된 무차원 홍수추적곡선은 비교적 짧은 시간내에서 최소한의 수리특성자료를 이용하여 댐 붕괴에 따른 홍수파의 전파양상을 근사적으로 예측할 수 있으므로 댐 붕괴로 인한 재난시 피난대책 및 홍

수범람구역의 추정 등에 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 6. 결 론

1) 댐 붕괴의 유형을 순간적 붕괴와 점진적 붕괴로 구분하였고 각각의 경우에 대하여 붕괴시의 침투유량을 예측할 수 있는 식을 Metric 단위로 유도하였다. 또한 하도부에서의 홍수파 해석을 위한 기본 방정식의 해를 상류 및 사류 하도구간에 대하여 해석하는 알고리즘을 기술하였다.

2) 기존의 SMPDBK 모형에서 사용된 거리매개 변수의 개념을 도입하고 국내 댐 및 저수지의 자료를 기초로 한 새로운 무차원 홍수추적곡선을 유도하였다. 새로운 추적곡선은 기존의 SMPDBK 모형에서 다루지 않은 射流상태의 경우도 포함하고 있으므로, 산지하천이 많은 국내 유역에 적용성이 크다고 판단된다.

3) 본 연구에서 유도된 무차원 홍수추적곡선의 특성은 Froude 수가 증가됨에 따라 유량감쇠비도 증가하고 있는 경향을 보여주었으며, 그 증가율은 Froude 수가 커짐에 따라 감소하고 있었다. 특히, 사류인 경우에는 Froude 수가 커짐에 따라 그 증가율이 상류의 경우보다 작아지는 특성을 보였다.

4) 효기댐 붕괴의 경우에 대하여 본 연구에서 유도한 무차원 홍수추적곡선을 적용한 결과치를 동역학적 모형에 의한 계산결과치와 비교할 때, 댐 붕괴 지점에서의 침투유량 및 하도부 각 지점에서의 침투유량, 최고수위 및 홍수파의 도달시간 등에 있어 비교적 잘 일치되고 있어 본 연구 결과의 적용성을 입증하였다.

5) 본 연구에서 새로이 유도한 무차원 홍수추적곡선은 비교적 짧은 시간내에 최소한의 수리특성자료를 이용하여 댐 붕괴에 따른 홍수파의 전달양상을 근사적으로 예측할 수 있으므로 중소댐 붕괴로 인한 하천에서의 방재대책 수립에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 1990년도 한국과학재단의 연구비 지원

(과제번호/901-1302-006-1)으로 수행되었으며, 지원 당국에 깊이 감사사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Ritter, A., "Die Fortpflanzung der Wasserwallen", *Zeitschrift des vereines deutscher ingenieure*, Vol. 36, No. 33, 1892, pp.947-954.
2. Dressler, R.F., "Comparison of theories nad experiments for the hydraulic dam-break wave", Publ. No. 38, International Association of Scientific Hydrology, 1954, pp.319-328.
3. Whitham, G.B., "The effects of hydraulic resistance in the dam break problem", *Proc. of Royal Society of London*, Series A, 227, London, England, 1955, pp.399-407.
4. U.S. Army Corps of Engineers, "Flood resulting from suddenly breached dams", Misc. Paper No. 2-374, Waterways Experiment Station, 1960 & 1961.
5. Sakkas, J.G., and Strelkoff, T., "Dam-break flood in prismatic dry channel", *J. HY Div., ASCE*, Vol. 99, No. 12, 1985, pp.2195-2216.
6. Rajar, R., "Mathematical simulation of dam-break flow", *J. Hy. Div., ASCE*, Vol. 104, No. 7, 1978, pp.1011-1026.
7. Katopodes, N.D., and Strelkoff, T., "Computing two-dimensional dam-break flood wave", *J. Hy. Div., ASCE*, Vol. 109, No. 9, 1978, pp.1269-1288.
8. Chen, C.L., and Armbruster, J.T., "Dam-break wave model: Formulation and verification", *J. Hy. Div., ASCE*, Vol. 106, No. 5, 1980, pp.747-767.
9. Ponce, V.M., and Tsivoglou, A.J., "Modeling gradual dam breaches", *J. Hy. Div., ASCE*, Vol. 107, No. 7, 1981, pp.829-838.
10. Fread, D.L., "DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model", NWS Report, NOAA, Silver Springs, Md., 1985.
11. Wetmore, J.N. and Fread, D.L., "The NWS dam break flood forecasting model for desk-top and hand-held calculators", NWS Report, NOAA, Silver Springs, Md., 1983, 1988, 1989.
12. U.S. Department of Agriculture, "Simplified dam-breach routing procedure", Technical Release No. 66, Soil Consevation Service, 1979.
13. Sakkas, J.G., "Dimensionless graph of floods from ruptured dams", HEC reprot No. 8, U.S. Army Corps of Engineers, 1980.

14. 이종태, 한건연, 이정식, "Earth dam의 가상파괴로 인한 홍수파의 예측모형" **대한토목학회 논문집**, 제 6권, 제 4호, 1986, pp.69-78.
15. 한건연, 이종태, 이원환, "Earth dam 파괴로 인한 유출수문곡선의 유도", **대한토목학회 논문집**, 제 5권, 제 2호, 1985, pp.41-50.
16. 한건연, "하천에서의 홍수파 해석을 위한 수치모형의 개발", **한국수문학회 논문집**, 제 20권, 제 4호, 1987, pp.285-294.
17. 한건연, "댐의 파괴형태와 하도부 양상에 따른 홍수파의 전달특성 해석에 관한 연구", **한국수문학회 논문집**, 제 23권, 제 4호, 1990, pp.467-476.
18. 이기영, "댐 파괴에 따른 무차원 홍수추적곡선의 유도", 경북대학교 대학원 공학석사 학위논문, 1988, p.54.
19. 이종태, "댐의 파괴원인과 침투홍수량의 예측", **대한토목학회지**, 제 35권, 제 1호, 1987, pp.59-68.
20. Fread, D.L., *Personal communications*, 1988-1990.
21. French, R.H., "*Open channel hydraulics*", McGraw-Hill, New York, 1985, pp.596-619.
22. Fread, D.L., "Channel routing", in Anderson, M. G. and Burt, T.P. (eds), *Hydrological Forecasting*, John Wiley & Sons, New York, 1986, pp.405-524.
23. 오남선, 선우중호, "홍담의 점진적 파괴에 관한 연구", **한국수문학회 논문집**, 제 22권, 제 2호, 1989, pp.213-221.

(接受 : 1992. 1. 24)