

## 하천제방붕괴 해석모형의 개발

### Development of Numerical Model to Analyze Levee Break

박재홍\* / 한건연\*\* / 안기홍\*\*\*

Park, Jae Hong / Han, Kun Yeun / Ahn, Ki Hong

#### Abstract

Levee-break Analysis model is developed to predict the variation of breach width according to time and to estimate inundation area and depth in protected lowland. This Model calculate flood depth using 4 point implicit finite difference method in river channel and analyze breach flow based on physical theory introducing soil transport equation and erosion process. Breach analysis model and channel flood model are combined into Levee-Break Model and this model is applied to actual levee break case. Then, this model can simulate reasonably many levee-break parameters such as river stage, breach width, breach formation and so on. If the applicability of this model is proved through applications to more various actual levee-break cases, the suggested model is expected to do more accurate flood analyses on levee break site.

**keywords** : Levee break analysis, erosion process, inundation map, breach flow

#### 요 지

본 연구에서는 하천의 제방붕괴시 제방의 침식 및 세굴이론에 기초한 범람 홍수량 해석, 시간에 따른 제방붕괴폭의 변화, 침수범위 및 침수위의 추정, 침수 예상 피해규모를 예측할 수 있도록 하천의 유량변화를 고려한 제방붕괴모형을 개발코자 하였다. 하도구간에서는 홍수시 4점 음해 유한차분기법을 이용하여 하천 홍수위를 예측하며, 제방붕괴해석을 위해서 제방침식을 고려한 토사이동방정식을 도입하여 물리적 이론에 기초한 제방붕괴 모형을 개발하였다. 제방붕괴모형과 하천해석모형을 이용하여 제방붕괴해석모형으로 통합하였고 연구모형을 실제하도 붕괴사례에 본 모형을 적용한 결과 제방붕괴 기간중의 하천수위, 파제기간, 파제폭 등의 인자들을 합리적으로 모의하고 있었고 개발된 모형이 보다 다양한 실제 하천제방 붕괴사례에 도입되어 적용성 및 정확성이 증명된다면 앞으로 정확한 제방붕괴가 발생한 도시하천의 하천수위 해석, 파제유량 계산, 홍수지도 작성 및 침수위 해석 등에 본 모형이 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 제방붕괴해석, 세굴과정, 홍수지도, 붕괴유량

\* 세명대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Semyung Univ., Jecheon, 390-711, Korea

\*\* 교신저자, 경북대학교 토목공학과 교수

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook Univ., Daegu, 702-701, Korea  
(e-mail: kshanj@knu.ac.kr)

\*\*\* 한국수자원공사 댐유역관리처 공동연구원

Co-researcher, Dam & Watershed Dept., K-Water, Daejeon 306-711, Korea

## 1. 서 론

거의 해마다 되풀이되는 하천 제방의 붕괴 및 월류로 인해 제내지에서 많은 인명손실과 극심한 재산피해를 줄 뿐 아니라 사회적 문제를 야기하기도 한다. 특히, 도시하천과 같이 제방 인접한 곳에 주거, 산업시설 등이 밀집하고 있는 지역에서 불의의 제방 붕괴로 인한 홍수류의 범람은 막대한 인명 및 재산 피해를 발생시키는 큰 재해가 될 수 있으며, 실제로 최근의 홍수피해 양상을 조사해 보면 인구와 산업, 주거 및 사회기반시설 등이 밀집된 도시지역에서 피해가 집중되고 있음을 알 수 있다. 이처럼 홍수피해의 주된 원인이 되는 제방의 붕괴는 월류, 침식, 제체의 불안정 및 하천구조물에 의한 붕괴 등으로 구분되는데 주로 월류 및 파이핑으로 인해 발생한다. 하천제방이 붕괴되었을 때 발생하는 제방의 붕괴면을 통과하여 제내지로 유출되는 과제유량의 정확한 추정, 홍수범람 구역에 대한 침수범위 산정, 적절한 홍수 예·경보 및 피난대책의 수립을 가능케 하여 홍수피해를 저감하는 데 매우 중요한 역할을 할 수 있다. 그러나 국내에서의 범람 홍수의 예측은 해석상의 어려움으로 인하여 주로 과거 범람상황 및 제방붕괴 시나리오를 통한 경험적 추정 등에 의존해 오고 있는 실정으로 제방붕괴가 발생할 경우 과제유량 및 제외지 수위변화 예측을 제방재료에 따른 침식 및 세굴이론 등 물리적 이론에 근거하지 못하였으므로 제방붕괴의 결과를 정확하게 예측하기에는 미흡한 점이 많았다.

본 연구에서는 도시하천의 제방붕괴시 제방의 침식 및 세굴이론에 기초한 범람 홍수량 해석, 시간에 따른 제방붕괴폭의 변화, 침수범위 및 침수위의 추정, 침수 예상 피해규모를 예측할 수 있도록 하천의 유량변화를 고려한 제방붕괴 모형을 개발코자 하였다. 또한 최근 수년간 발생한 홍수피해 원인의 대부분이 하천제방의 붕괴와 관계하고 있음을 감안하여 본 모형의 제방의 월류 및 붕괴특성에 대한 보다 정교한 해석결과를 이용하여 홍수지도 작성 및 홍수보험에의 도입 등에 이용될 수 있도록 하였다.

물리적인 이론에 기초한 제방붕괴 및 유출에 관한 연구는 몇몇 연구자들이 수행되었다. Cristofano(1965)는 세굴수로를 통하여 흐르는 물의 힘과 세굴수로의 바닥에서의 흙 입자들의 전단강도를 연계하는 방정식을 유도하였다. Harris and Wagner(1967)는 Schoklitsch 유사 이동 방정식을 사용하여 세굴수로를 월류가 발생함과 동시에 아래쪽으로 진행이 시작된다고 고려하였다. Ponce and Tsivoglou(1981)는 Meyer-Peter와 Muller 유사이송방정식을 1 차원 부정류 방정식과 연계하여 연

구하였으나 사용되어지는 계수들의 결정방법이 명확하지 못하였다. Fread(1980)에 의해 개발된 수치모형은 붕괴된 흙댐으로부터 유출되는 유량수문곡선을 예측하기 위해 저수지 유입, 여수로 유출, 그리고 세굴로 형성된 붕괴부의 유출량들로 인한 연속방정식을 적용하였다.

국내에서는 한건연 등(1985)이 흙댐의 붕괴로 인한 유출수문곡선의 해석을 저수지의 특성에 따라 4가지 유형으로 구분하고, 각각에 대한 수위-수표면적 관계식을 도출한 후 임의의 댐 높이와 파괴지속시간에 대한 침투 유출량 및 유출수문곡선을 구할 수 있는 도표를 제시하였다. 이종태와 한건연(1989)은 가상 수치실험을 통한 월류 및 제방의 붕괴에 의한 하도-제내지 간의 흐름의 특성을 해석하여 붕괴부의 폭이 유출량에 미치는 영향이 가장 큰 것으로 나타났었다. 한건연 등(2002)은 제방 월류 또는 붕괴에 의해 발생한 홍수파로 인한 제내지 침수위, 침수시간, 침수범위 등의 예측을 위해 하도구간에서는 1차원 부정류를 이용하여 하천 홍수위를 예측하고 제내지에서는 제방붕괴로 인한 범람홍수류의 시간별 수문곡선을 유입수문곡선으로 하는 2차원 수치해석모형을 개발하였으나 제방붕괴 해석을 위한 세굴식의 도입은 이루어지지 못하였다.

본 연구에서는 국내의 홍수특성 및 이로 인해 발생하는 제방붕괴로 인해 발생하는 피해를 저감하기 위해 이를 효과적으로 모의할 수 있는 물리적 이론에 기초한 제방붕괴 모의 컴퓨터 모형을 개발코자 하였다. 즉 하도구간에서는 홍수시 흐름의 시간변동성을 고려하기 위해 하천 홍수해석을 위해 가장 널리 이용되고 있는 4점 음해 유한차분기법을 이용하여 하천 홍수위를 예측하며, 제방붕괴해석을 위해서 제방침식을 고려한 토사 이동방정식을 도입하여 물리적 제방붕괴 모형을 개발하여 시간에 따른 제방월류 유량, 그에 따른 제방붕괴폭, 제방월류 유량을 산정하고 월류유량으로 인한 본류에서의 흐름양상 변화 등을 고려할 수 있게 하였다. 하천 흐름 해석과 제방붕괴 해석모형을 완전히 통합시킨 하천제방 붕괴 해석모형을 통해서 하천에서의 홍수위 예측은 물론 제내지에서의 범람 홍수량을 정확히 예측할 수 있도록 하여 하천 제방붕괴시 제내지 침수범위 및 침수위 해석, 홍수파의 도달시간, 제방붕괴로 인한 본류의 흐름 양상의 변화 등을 보다 정교하게 예측하고자 하였다.

## 2. 모형의 개발

하천제방은 홍수시 유수의 원활한 소통을 유지시키고 제내지를 보호하기 위하여 하천을 따라 토질재료 등으로 축조한 공작물이라고 일반적으로 정의된다. 이러한 제방이 유수 등에 의해 그 기능을 잃어버린 경우를

제방붕괴라고 하며 제방에 의해 보호되던 제내지는 범람된다. 이러한 제방붕괴는 매우 복잡한 토질역학 및 수리학적으로 매우 복잡한 현상이며 그 진행과정을 설명하는 것은 쉽지 않다. 본 연구에서는 제방붕괴에 영향을 미치는 하천수위의 영향과 제방붕괴 단면을 따라 발생된 파제유량으로 기인된 제방재료의 세굴 및 침식 영향을 고려할 수 있는 제방붕괴 해석 방법을 Fig. 1 과 같이 도입하였다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 하천 흐름 해석 모형에서 하천수위를 계산하여 하천수위 즉 제외지 수심을 제방붕괴 해석모형으로 전달하면 제방붕괴모형은 전달된 제외지 수심을 이용하여 붕괴면을 통과하는 파제유량을 산정하고 산정된 파제유량을 하천모형으로 넘겨준다. 하천모형은 돌려받은 파제유량을 횡유출·입 유량으로 고려하여 하천 수위를 다시 해석한다. 이와 같이 하천 해석모형과 제방붕괴모형이 서로 결합되어 모의시간 동안 계속적으로 수위자료와 파제유량자료를 상호 교환하면서 제내지 수위 및 파제유량을 계산한다.

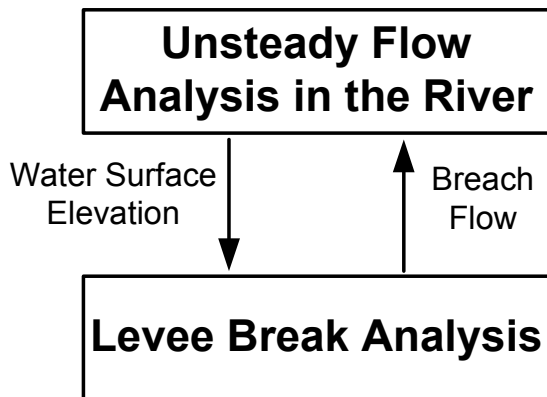


Fig. 1. Schematic Diagram of Studied Model

### 2.1 하천흐름 해석모형

하천의 홍수시 부정류 해석을 위해 1차원 Saint-Venant 방정식을 도입하였다. 도입된 질량보존의 식과 운동량보존의 식은 각각 다음과 같다(Fread, 1985).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A+A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_c\right) + L + W_f B = 0 \quad (2)$$

여기서,  $Q$ 는 유량,  $A$ 는 흐름단면적,  $A_0$ 는 저류단면적,  $q$ 는 측방유입량,  $x$ 는 거리,  $t$ 는 시간,  $h$ 는 수위,  $S_f$ 는 마찰경사,  $S_c$ 는 단면 확대·축소에 의한 손실경사,  $B$

는 하폭,  $n$ 는 조도계수,  $W_f$ 는 바람에 의한 응력,  $L$ 는 지류에 의한 운동량의 변화를 각각 나타낸다.

비선형 쌍곡선형 편미분방정식인 Saint-Venant 방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 가중 4점 음해 유한차분 근사해법을 도입하면 Eq. (1), (2)는 시간대  $(j+1)$  에서  $(i)$  및  $(i+1)$  점에 대한 미지수  $h, Q$ 의 비선형 방정식이 된다. 시간대  $(j)$  와 관련된 모든 항들은 초기조건에 의하거나 바로 이전 시간단계로부터 구해진 기지의 값이 되며 시간대  $(j+1)$ 에서는  $(i)$  및  $(i+1)$  점에서  $h, Q$ 가 4개의 미지수로 존재하여 두 개의 식만으로는 직접적으로 그 해를 구할 수 없는 두 개의 비선형 대수방정식이 된다.

이렇게 구해진 대수방정식을 상류 및 하류경계간의  $(N-1)\Delta x$ 개의 구간 각각에 대하여 적용하고 상류단 경계조건과 하류단 경계조건식을 도입하면  $2N$ 개의 미지수를 가진  $2N$ 개의 비선형식이 구성되어 해가 구해지게 된다.

### 2.2 제방붕괴 해석모형

제방붕괴 해석모형은 토사로 이루어진 제방이나 댐의 붕괴 과정을 모의할 수 있도록 구성하였다. 만약 월류 붕괴가 모의된다면 하류사면에서 침식이 발생하기 위해 저수지나 하천 수위( $H$ )가 제방 정상부를 초과해야 한다. 침식의 첫 번째 단계는 Fig. 2에서 선 A-A의 해 나타나 있는 것처럼 오직 제방의 하류사면에서 발생한다. 여기서 만약 초기에 식생 피복이 존재하지 않는다면 작은 사각형태의 초기수로가 하류면을 따라 존재하는 것으로 가정한다. 시간이 지남에 따라 세굴수로로 점차 제방의 하류사면 속으로 파고 든다. 세굴수로로 흐르는 유량은 Eq. (3)과 같은 넓은 마루 웨어 공식에 의해 결정되었다.

$$Q_b = 3B_o(H - H_c)^{1.5} \quad (3)$$

여기서  $Q_b$ 는 세굴수로로 통하여 흐르는 유량,  $B_o$ 는 초기 사각형 수로의 순간 폭, 그리고  $H_c$ 는 붕괴면 저면의 높이이다. 제방의 하류사면 내부로 세굴수로가 세굴됨에 따라 세굴수로 상류단 저면높이( $H_c$ )는 제방의 정부( $H_t$ )에 초기에는 남아 있게 된다. 세굴수로의 상류지점은 제방의 정부를 가로질러 제방의 상류사면으로 점차침식이 계속되면서 이동하게 된다. 침식 수로의 저면이 Fig. 2에서의 선 B-B의 위치를 가지면 세굴수로 저면( $H_c$ )는 수직하게 아래쪽으로 침식하기 시작한다. 세굴수로 저면은 제방의 저면높이  $H_L$ 에 도달할 때 까지 계속될 수 있다.

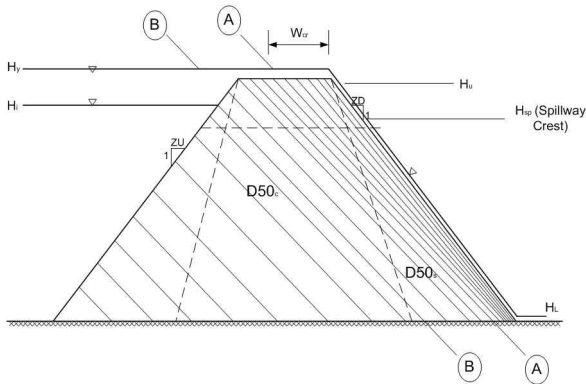


Fig. 2. Side View of Dam Showing Overtopping Failure Sequence

만약 파이핑으로 인한 붕괴면이 모의된다면 저수지에서의 수위는 붕괴관(breach pipe)의 크기가 침식을 통해 증가하기 위해 초기 사각형 붕괴관 가운데 높이 (\$H\_p\$)보다 커야 한다. 붕괴관의 저면이 연직방향으로 아래쪽으로 침식될 동안 붕괴관의 정부도 같은 이유로 위쪽방향으로 침식된다. 붕괴관내의 유량은 오리피스 유량에 의해 계산될 수 있으며 Eq. (4)와 같다.

$$Q_b = A \left( \frac{2g(H - H_p)}{1 + fL/D} \right)^{0.5} \quad (4)$$

여기서 \$Q\_b\$는 붕괴관을 통한 유량(\$m^3/sec\$), \$g\$는 중력가속상수, \$A\$는 붕괴관의 단면적(\$m^2\$), \$(H - H\_p)\$는 붕괴관 위의 정수압 수두(\$m\$), \$L\$은 붕괴관의 길이(\$m\$), \$D\$는 붕괴관의 직경 혹은 폭(\$m\$)이고 \$f\$는 다음의 Moody곡선의 수학적 표현식(Morris and Wiggert, 1972)으로부터 계산된 마찰계수이다.

### 2.2.1 세굴수로의 폭

세굴수로(breach channel)의 폭을 결정하는 방법은 제방 붕괴해석을 위한 핵심적인 요소이다. 본 모형에서는 세굴수로의 폭은 두가지 메카니즘에 의해 결정하였다. 먼저 초기의 붕괴면은 Fig. 3에서 보여지는 것처럼 사각형 형상을 가진다. 세굴수로의 폭(\$B\_o\$)는 Eq. (5)에 의해 결정되어진다.

$$B_o = B_r y \quad (5)$$

여기서, \$B\_r\$은 수리학적 최량단면에 기초한 인자이고 \$y\$는 붕괴면의 흐름깊이다. 파이핑 붕괴에서는 \$B\_r\$이 1.0으로 설정되는 것에 반해 월류붕괴시 \$B\_r\$ 값은 2.0이다.

붕괴면의 폭을 제어하는 두 번째 역학적 과정은 사

다리꼴 단면의 측면경사의 안정성해석으로부터 유도되어졌다(Spangler, 1984). 초기 사각형태의 수로는 세굴수로 수로의 측벽들의 활동이 시작되면서 수직면에 대한 경사각(\$\alpha\$)을 형성하고 사다리꼴 수로로 변화한다. 측벽들의 붕괴는 붕괴단면의 깊이(\$H'\_k\$)가 댐 재료의 내부마찰각(\$\phi\$), 점착력(\$C\$), 제방재료의 단위중량(\$\gamma\$)의 함수인 한계수심(\$H'\_k\$)에 도달할 때 일어난다.

$$H'_k = \frac{4C \cos \phi \sin \theta'_{k-1}}{\gamma [1 - \cos(\theta'_{k-1} - \phi)]} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (6)$$

여기서, \$\theta\$는 수평면과 붕괴수로와 이루는 각, \$\theta'\_k = (\theta'\_{k-1} + \phi)/2\$, 침자 \$k\$는 계속해서 연쇄되는 붕괴를 나타낸다.

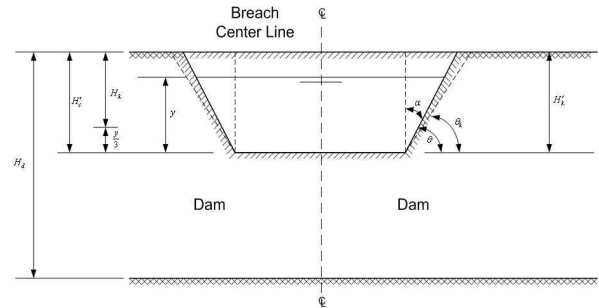


Fig. 3. Front View of Dam with Breach

침식은 파제단면의 측벽이 붕괴되었을 경우를 제외하고 파제단면의 바닥과 측면에서 동일하게 발생한다고 가정한다. 그러므로 파제순간에는 파제면의 바닥은 측벽을 따라 붕괴된 토사의 체적이 수로의 유사이송 능력의 비율로 완전하게 제거될 때까지 하부방향으로의 침식은 계속되지 않는 것으로 역시 가정된다. 이런 과정을 마치기 위한 비교적 짧은 시간 후에 세굴수로의 바닥과 측면은 계속해서 침식된다. 일단 기존의 하상바닥까지 침식이 이루어지면 더 이상의 하부방향 침식은 모형내에서는 일어나지 않는다. 그러나 붕괴면의 측면은 계속해서 침식하고 하도의 폭은 계속해서 확장된다. 파제면의 유출 침투유량의 발생은 저수지나 댐의 경우 붕괴면의 바닥이 기존 수로의 바닥에 도달하였거나 파제단면 측벽이 계속해서 침식이 이루어지면서 기존 수로 바닥 도달 후 얼마의 시간이 지난 후에 나타난다. 하천 제방인 경우 하천의 부정류성으로 인해 하천 침투유량의 발생과 파제단면의 붕괴폭과 깊은 연관이 있다. 그러므로 파제단면을 통한 최대 유출량은 침식을 통한 붕괴면의 확대에 의해 증가되는 파제단면 개방도와 제외지에서의 침투유량이나 침투수위 및 제내지에서의 침수위에 달려있다.

### 2.2.2 유사이동 해석

파제단면의 침식율은 침식되는 토사를 유송하는 흐르는 일반적으로 유량에 달려 있다. 파제면의 유사이동량을 산정하기 위해 Meyer-Peter와 Muller 유사이동식을 급경사 하천을 대해 개선한 Eq. (7)을 이용하였다 (Smart,1984).

$$Q_s = 3.64 (D_{90}/D_{30})^{0.2} P \frac{D^{2/3}}{n} S^{1.1} (DS - \Omega) \quad (7)$$

여기서,  $Q_s$  는 유사이동율(cms),  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$ (mm) 은 각각 총 무게 30, 50, 90 % 의 크기에 해당하는 입자의 크기,  $D$  는 유량의 수리수심(m),  $S$ 는 댐의 하류경사면의 경사,  $\Omega$  는 토사의 점착력에 따라 결정되는 전단응력값이다.

### 2.2.3 계산 알고리즘

붕괴면의 크기는 붕괴면으로 유입되는 유량의 함수이고 유사이동량은 붕괴면의 크기와 유량의 함수인 반면에 붕괴면으로 유입되는 유량은 제외지의 수위와, 붕괴면의 을 바닥높이 및 폭에 달려 있기 때문에 본 모형의 하천수위 해석모형과 제방붕괴 해석모형의 상호간 반복적인 작업을 통해 해석하였다. 그러나 하천의 경우 직접적으로 하천수위를 계산할 수 없어 특별한 해석기법이 필요하며 Preissmann 기법을 이용한 유한차분기법을 이용하여 매 계산단계마다 하천수위 해석모형을 불러 하천수위를 계산하여 이 값을 제외지 수위로 이용하였다.

약간의 단계를 거치는 반복기법이 유량, 침식, 그리고 붕괴면의 크기의 상호의존성을 해석하기위해 이용되었다. 가정된 제방세굴심( $\Delta H_c$ )이 반복 계산을 시작하기 위해 각 시간단계에서 사용되어진다. 이 가정된 값은 이전의 계산단계에서 산정된 제방세굴심의 세굴값이로부터 첫 번째 시간단계 후에 외삽되어진다. 이와 같은 알고리즘은 기존의 BREACH 모형(Fread, 1982)으로부터 참고되었으며 기존의 BREACH 모형은 저수지와 댐 같이 제외지의 수위가 연속방정식으로부터 간단하게 산정되는 곳에서만 가능하였으나 본 연구에서는 하천 제방에서도 제방붕괴 해석을 가능하게 하기 위해 1차원 부정류 해석기법을 제방붕괴 알고리즘과 결합시켜 도시 하천의 제방해석 모형으로 개선하였다. 본 모형의 계산 알고리즘은 Fig. 4과 같다.

## 3. 개발모형의 적용

개발된 연구모형을 2000년 9월 12일 00시~18일 23시 동안 낙동강 유역의 홍수로 인한 제방 붕괴상황에 대해

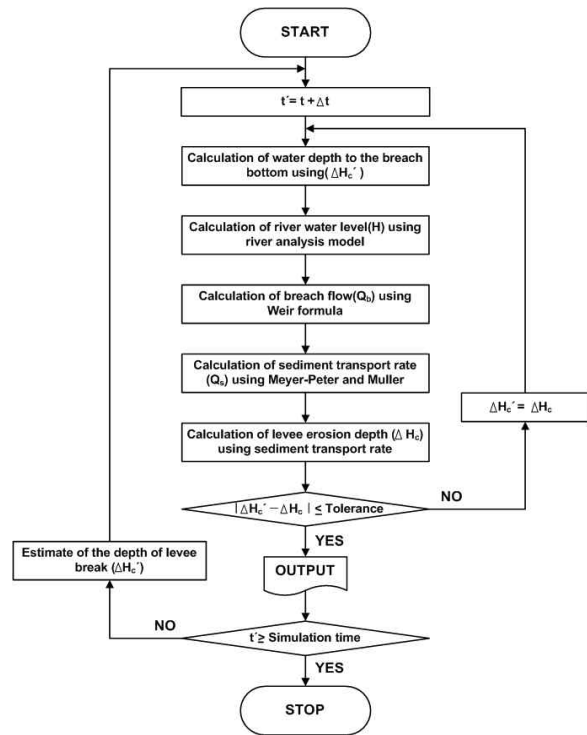


Fig. 4. Algorithm of the Developed Model

적용하였다. 낙동강 본류 우안에 위치하고 있는 실제 적용대상 제방은 2000년 9월 15일 07:40분경에 파이핑으로 인한 붕괴가 시작되었고 파이핑공(piping hole)의 크기가 증가하면서 파이핑 지점 상부의 토사의 무게로 인해 토사가 무너져 내렸고 이 토사로 인해 일시적인 붕괴지점의 누수의 차단(blocking)이 발생하였으며 이후 제외지 하천수위의 증가로 인해 붕괴지점에서 월류가 발생하였다. 사고 후 빠른 제내지 배수를 위해 인위적 제방의 붕괴를 유도하였으며 최종적인 붕괴폭은 110 m 에 이르렀다. 붕괴지점의 제방고는 22.80 m 이며 계획 홍수위는 20.26 m , 사고당시 하천의 수위는 17.10 m , 제내지 수위는 9.80 m 로서 제내지와 제외지의 수위차는 7.3 m 였다. 제방 붕괴로 인한 여러 피해중 농경지 침수는 150ha 에 이르렀다. 본 사례에 연구모형의 적용을 위해 Fig. 5에서 보는 바와 같이 현풍~적포교의 33.55 Km 구간을 계산단면 개수 67개로 나누어 평균적인 계산거리간격은  $\Delta x = 500 m$  로 하였고 계산 시간간격은 모형내 제방세굴심의 계산수렴을 위해 비교적 단시간으로 설정하여 계산하였다. 상류단 경계조건으로서는 현풍 수위표지점의 유량 수문곡선을 사용하였고, 하류단 경계조건으로서는 적포교 수위표지점의 수위 수문곡선을 사용하였다(Fig. 6). 이 구간에서의 주요 지류로서는 회천과 황강이 고려되었다(Fig. 7). 본 모형에 적용된 조도계수는 이전의 홍수조건으로부터 검증된 0.020~0.033의 범위를 이용하였다.

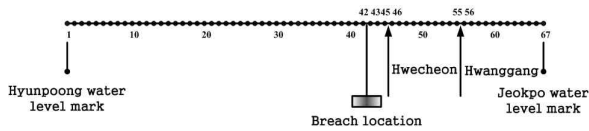


Fig. 5. Channel Network for Numerical Analyzing Levee Breach Case in Nakdong River

본 연구모형을 이용하여 실제 제방붕괴 사례에 적용한 결과는 Fig. 8~11과 같다. 본 연구에서는 붕괴된 제방이 파이핑공을 폐쇄한 후 수위상승으로 인해 월류붕괴가 시작되는 시점부터 모의 하였으며 그 결과는 다음과 같다. Fig. 8은 파제면을 통하여 유출되는 유량 및 붕괴단면 직상, 하류에서의 유량을 계산시간 50 hr부터 나타내었다. 그림에서 보여지듯이 하천수위의 상승으로 월류가 시작되면서 파제면 직상류와 직하류에서의 유량이 차이가 나고 있으며 그 차이가 난 유량만큼 가장 아래 곡선의 파제유출량에서 나타내고 있다.

Fig. 9은 붕괴지점에서의 시간별 수위를 상류경계지점보다 상류지점인 고령교 및 모형의 하류경계조건인 적포교 수위와 비교하였다. 비교결과 붕괴지점에서의 수위는 고령교 및 적포교에서의 수위변동양상과 유사한 형태를 나타내고 있었다. 본 모형의 계산결과를 통한 붕괴지점의 수위변화가 기지점인 고령교 및 적포교의 수위변화 형태와 유사한 형태로 보임으로 본 모형이 제

방붕괴로 인한 하천의 흐름변동 양상을 비교적 정확하게 모의할 수 있는 것으로 간접적으로 판단하였다. 붕괴단면의 수위변동 추세가 상류단에 있는 고령교와 좀더 일치하는 것은 붕괴단면의 하류에 횡방향 유입유량으로 고려된 황강과 회천이 존재하고 있어 이 둘 두 하천의 유량유입으로 인해 하류단 수문곡선의 추세가 변화된 것으로 판단된다.

Fig. 10는 시간에 따른 파제단면의 저면폭을 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와같이 월류가 시작되면서 처음에는 서서히 붕괴폭이 증가하다가 어느시점에 이르러 본격적으로 붕괴가 시작되어 이때부터는 거의 2~3 시간 내에 최대 붕괴폭에 도달하는 것으로 나타났다. 붕괴단면 저면과 최대하폭의 차이는 크게 나타나지 않아 파제단면은 사각형 단면형상을 나타내었고 이것은 실제 제방고가 충분히 높지 않아 파제 측벽이 활동을 일으킬 수 있는 높이보다 낮고 제방의 재료도 마찰각이 큰 재료로 구성되어 측벽의 활동이 크게 발생하지 않은 것으로 판단되었다.

Fig. 11은 계산시간 84.5 시간에서의 전 계산구간에 걸친 유량 및 수위변화를 도시하였다. 붕괴지점에서 파제면을 통한 유출유량으로 인해 급격하게 유량이 본류에서 감소하였으며 이로 인해 붕괴지점의 상류지점에서 수위가 저하곡선을 나타내어 감소하고 있음을 알 수 있었다.

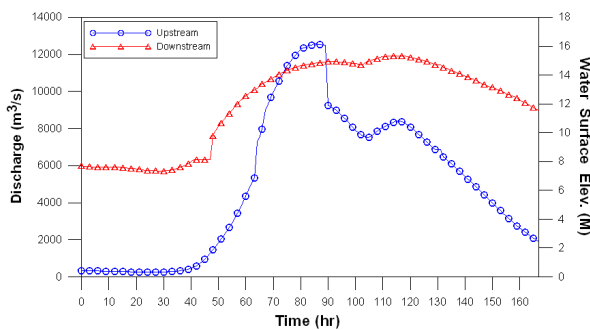


Fig. 6. Upstream and Downstream Condition Applied to this Model

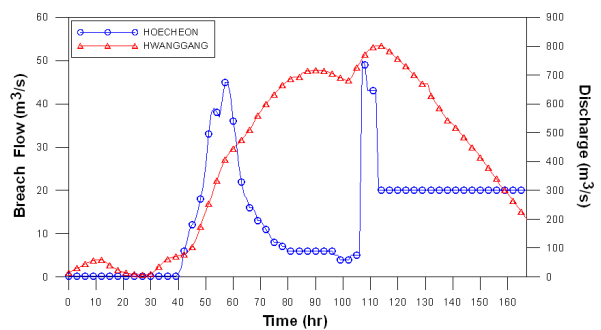


Fig. 7. Lateral Inflow Hydrograph in Hoecheon and Hwanggang

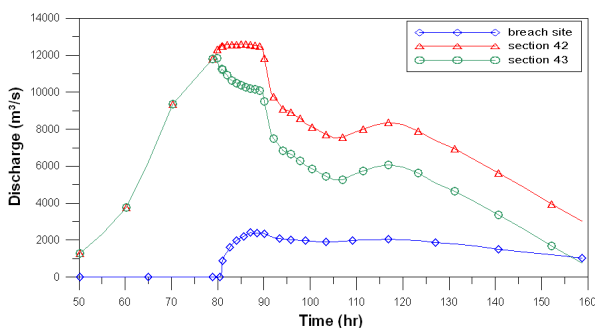


Fig. 8. Discharge Hydrograph at Breach Site and Nearby Section

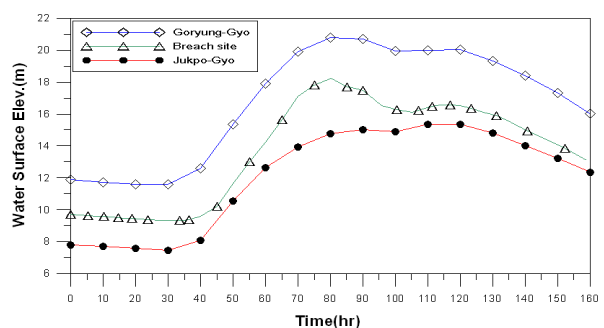


Fig. 9. Stage Hydrograph at Breach Site, Goryung-Gyo and Jukpo-Gyo

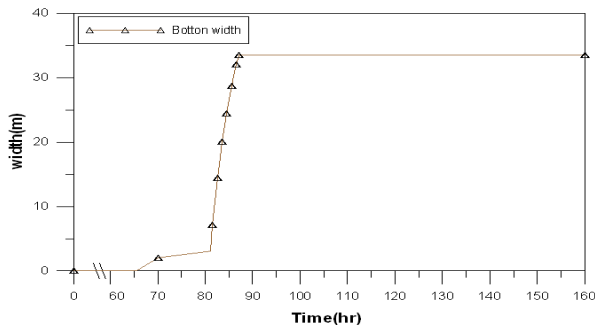


Fig. 10. Variation of Bottom Width at Breach Section

본 연구모형을 실제 하도의 제방붕괴에 적용한 결과 본 모형은 하천의 제방붕괴로 인한 하천에서의 수위변동을 실제 수위수문곡선과 비교하여 잘 모의하고 있었다. 또한 시간에 따른 제방붕괴 형상, 파제폭, 제외지 수위, 침수위 등이 물리적인 이론에 근거하여 산정이 가능하였다.

앞으로 본 모형을 하천제방 붕괴 해석을 위해 다양한 경우에 도입되어 적용성이 확보된다면 제방붕괴로 인한 홍수예측을 위해 활용성이 큰 것으로 생각되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 하천에서의 제방붕괴해석을 위해 하천의 동역학적 흐름특성을 고려한 수학적 모형과 제방의 세굴을 계산할 수 있는 모형을 결합하였다. 개발된 모형은 NWS의 BREACH 모형을 기초로 국내의 하천붕괴에 적용가능한 모형으로 발전시켰다. 개발된 모형을 이용하여 가상하도 및 실제 제방붕괴사례에 본 모형을 적용하였고 이를 통한 요약된 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 홍수시 하천의 부정류를 고려한 제방붕괴 해석을 위해 기존의 모형에서 이용되던 붕괴시나리오에 기반된 해석방법을 지양하고 제방재료를 바탕으로 제방붕괴 예측모의가 가능한 물리학적 해석모형을 개발하였다.
- 2) 개발된 제방붕괴 모형을 하천에 적용하기 위해 1차원 홍수해석을 실시하여 붕괴지점의 하천수위를 제외지 수위로 도입하는 기법을 도입함으로 제방붕괴해석모형과 하천수위해석 모형이 결합되어 해석하였다.
- 3) 제방붕괴모형과 하천해석모형을 이용하여 실제하도 붕괴사례에 본 모형을 적용한 결과 제방붕괴 기간중의 하천수위, 파제기간, 파제폭 등의 인자들을 합리적으로 모의하고 있었고 특히 붕괴지점

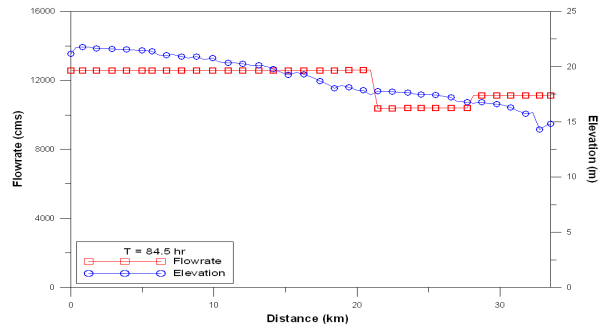


Fig. 11. Flowrate and Stage Values at Time-step 84.5 hr

의 수위수문곡선 등이 적용 하천 상하류지점 수문곡선의 변동양상과 일치하고 있어 모형의 합리성을 파악할 수 있었다.

- 4) 개발된 모형이 보다 다양한 실제 하천제방 붕괴사례에 도입되어 적용성 및 정확성이 증명된다면 앞으로 정확한 제방붕괴가 발생한 도시하천의 하천수위 해석, 파제유량 계산, 홍수지도 작성 및 침수위 해석 등에 본 모형이 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설기술혁신사업(산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

#### 참 고 문 헌

- 도시홍수재해관리기술연구단 (2002). 국내 도시홍수 침수원인 조사 및 분석.
- 이종태, 한건연 (1989). “하천제방의 붕괴로 인한 제내지의 침수 예측모형.” **한국수문학회 논문집**, 한국수문학회, 제22권, 제2호, pp. 223-231
- 한건연, 이종태, 이원환 (1985). “Earth Dam 파괴로 인한 유출수문곡선의 유도.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제5권, 제2호, pp. 41-50
- Cristofano, E.A. (1965). Method of computing erosion rate for failure of earthfill dams. United States Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- Fread, D.L. (1980). Capabilities of NWS model to forecast floods caused by dam failures. Proceedings of the Second Conference on Flash Floods. American Meteorological Society, pp. 171-178.

- Fread, D.L. (1982). DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model. Hydrologic Research Laboratory, National weather Service, Silver Spring, Maryland, p. 56
- Fread, D.L. (1985). "Channel Routing.", in Anderson, M.G., and Burt, T.P.(eds), *Hydrological Forecasting*, John Wiley & Sons, New York, pp. 437-503.
- Harris, G.W., and D.A. Wagner. (1967). Outflow from breached earth dams. University of Utah, Salt Lake City, Utah.
- Morris, H.M., and J.M. Wiggert. (1972). *Applied Hydraulics in Engineering*. The Ronald Press Co., New York, 69-70, 290, pp. 451-452.
- Ponce, V.M., and A.J. Tsivoglou. (1981). "Modeling of gradual dam-breaches." *Journal of Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, 107(HY6): pp. 829-838.
- Smart, G.M. (1984). "Sediment transport formula for Steep Channels." *Journal of Hydraulics Division*, American Society of Civil Engineers, 110(HY3): pp. 267-276.
- Spangler, M.G. (1984). *Soil Engineering*. 4th Ed. Harper & Row Publishers, New York, pp. 482-484.

(논문번호:09-017/접수:2009.02.06/심사완료:2009.06.12)