

# 3차원 수치모형을 이용한 점진적 제방붕괴 수치모의

## 3-D Numerical Simulations of Gradual Progress of Levee Break

조환범\*, 여창건\*\*, 이승오\*\*\*, 윤광석\*\*\*\*

Hwan Beom Jo, Chang Geon Yeo, Seung Oh Lee, Kwang Seok Yoon

### 요 지

현재 우리나라는 이상기후 현상이 발생하여 계획홍수위를 초과하는 극한홍수에 의한 피해가 심각해지고 있는 실정이다. 또한 도심지역에서 제방이 붕괴된다면 범람홍수과에 의해 적지 않은 인명 및 재산피해가 발생할 수 있다. 이와 같은 피해를 줄이려면 제방붕괴시 범람홍수과의 수리학적 거동특성을 명확히 규명하고 이에 따른 대피체계가 수립되어야한다. 이에 본 연구는 기존의 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 통한 범람홍수과 특성연구에 조도계수 및 GMO(General Moving Object)를 추가하여 점진적인 제방붕괴로 인한 제내지에서 범람홍수과의 수리학적 거동 특성을 모의하였다. 높이 0.6m의 제방붕괴 단면이 시간에 따라 일정하게 넓어지면서 제내지로 홍수과가 유입되어 들어오도록 모의하였다. 수치모의의 된 결과를 선행연구의 수리실험결과와 비교 검증을 수행하였다. 또한 수치모형 값에 조도계수를 입력하여 기존연구와 비교분석하였다.

GMO를 이용하여 붕괴속도( $v_0$ )에 변화를 준 경우, 유속( $v_{max}$ ) 및 수위( $h_{max}$ )변화에 큰 차이를 보이지 않았고, 초기 월류수심( $h_0$ ) 변화에 따른 범람홍수과의 영향을 분석한 결과 붕괴속도 보다 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 본 연구결과의 활용방안으로 제방붕괴시 홍수범람에 의한 비상대처계획(EAP) 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 제방붕괴, 범람홍수과, FLOW-3D, GMO(General Moving Object)

## 1. 서론

최근 우리나라에서는 지구 온난화로 인해 이상기후가 발생하여 계획 홍수위를 초과하는 극한홍수로 수공구조물의 피해가 급증하고 있는 실정이다. 특히 제방의 피해가 가장 큰 비율을 차지하고 있으며(풍수해 극복 사례집<2002~2009>), 제방붕괴로 인해 제내지 주민들의 피해가 심각하다. 제방붕괴로 인한 범람홍수과의 명확한 규명과 붕괴 후 대피체계를 확립시키는 것이 제방붕괴로 인한 피해를 저감시킬 수 있는 방법이다.

본 연구에서는 제방붕괴시 제내지에서 범람홍수과 거동 특성을 명확히 규명하여 차후에 홍수범람도 작성 및 비상대처계획(EAP)수립 등의 기초자료를 제공할 수 있으며, 명확한 규명을 위해 3차원 수치해석 모델인 FLOW-3D를 이용하여 제내지에서 범람홍수과의 수리학적인 거동 특성을 분석 및 검토하였다.

## 2. 기본이론

1차원 및 2차원 모형은 시간에 따른 범람홍수과의 특성을 모의하기 어려우며, 범람홍수과의 특성을 파악하기 위해서는 3차원 수치모형의 도입이 적절하다고 판단된다. 본 연구에서는 미국 Flow

\* 비회원 · 홍익대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : [jhbsmj@gmail.com](mailto:jhbsmj@gmail.com)  
\*\* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : [gun1230@empal.com](mailto:gun1230@empal.com)  
\*\*\* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 조교수 · E-mail : [seungoh.lee@hongik.ac.kr](mailto:seungoh.lee@hongik.ac.kr)  
\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 책임연구원 · E-mail : [ksyoon@kict.re.kr](mailto:ksyoon@kict.re.kr)

Science사에서 개발한 상용 프로그램인 FLOW-3D를 이용하였다. 이 수치모형은 연속방정식과 운동량 방정식을 기본 지배방정식으로 사용하고 있고 연속방정식은 다음과 같다.(Flow Science, 2003)

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = 0 \quad (1)$$

여기서  $V_F$ 는 유체의 요소체적,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $u, v, w$ 는 각  $x, y, z$  방향의 유속,  $A_x, A_y, A_z$ 는 각 방향 요소 면적 이다.  $x, y, z$  방향에 대한 운동량 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 다음 (2)~(5) 식과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (4)$$

여기서  $G$ 는 체적력이고  $f$ 는 점성력을 나타낸다. 자유표면의 해석을 위한 한 격자 내의 단위체적당 유체의 체적은 VOF(Volume of Fluid)함수,  $F(x, y, z, t)$ 로 표현되며, 다음 (5)식은 일반적인 VOF함수를 나타낸다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial}{\partial x}(Fu) + \frac{\partial}{\partial y}(Fv) + \frac{\partial}{\partial z}(Fw) \right\} = FDIF + FSOR \quad (5)$$

여기서 FDIF는 Diffusion of Fluid Fraction이고, FSOR은 Fluid Source와 Sink 이다.

### 3. 수치모형의 적용

본 연구에서는 3차원 수치모의를 수행하여 범람홍수과의 수리학적 거동 특성 해석(윤광석, 2008)결과와 비교검증 후, 월류수심(0.35, 0.45, 0.55m)과 GMO를 이용한 붕괴속도(0.06, 0.12, 0.18m/s)변화에 따른 범람홍수과의 3차원 최대 유속( $V_{max}$ ) 및 수위( $h_{max}$ ) 변화를 분석하였다.

제내지에서 범람홍수과의 거동 특성을 규명하기위해 가상 하도 및 제내지를 설치하여 3차원 수치모의를 수행하였다. 하도는 폭이 5m, 길이는 28m이고, 제방의 붕괴폭은 2.0m로 고정시켰으며, GMO(General Moving Object)를 이용하여 실제 제방이 붕괴되는 메커니즘을 모의하였다.

GMO(General Moving Object) 모델은 유체유동과 물체가 서로 힘을 주고받는 상호작용에 의해 발생하는 물체의 운동 또는 물체의 운동에 의해 발생하는 유체 유동 등의 물리적인 현상을 해석하고자할 때 쓰이는 방법이며, 그 중 물체의 운동에 의해 유동이 변하는 현상을 해석할 때 주로 쓰이는 'Prescribed motion'을 사용하였다.

#### 3.1 경계조건 및 입력자료

FLOW-3D의 격자망 형태는 직육면체형 격자를 사용하였으며, 다중블록격자(Multi-block mesh)을 이용하여 범람홍수과에 의한 영향을 세밀하게 분석하였고, 총 2,439,360 개의 격자가 사용되었다. 수치모의상의 입력조건은 표 1과 같다. 수치모의 상의 적용수로는 그림 1에 나타내었으며, GMO를 이용한 홍수과의 전과과정은 그림 2와 같다.

표 1. 수치모의 입력 조건

구분	월류수위( $h_0$ ) <m>	붕괴단면 개방속도( $v_0$ ) <m/s>	붕괴폭( $b$ ) <m>
CASE 1	0.35, 0.45, 0.55	0.18	2.0
CASE 2	0.55	0.06, 0.12, 0.18	2.0

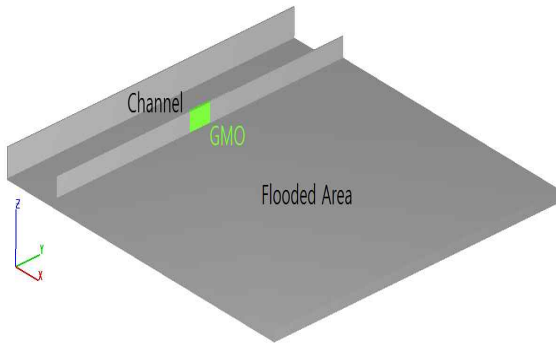


그림 1. 수치모의 적용수로

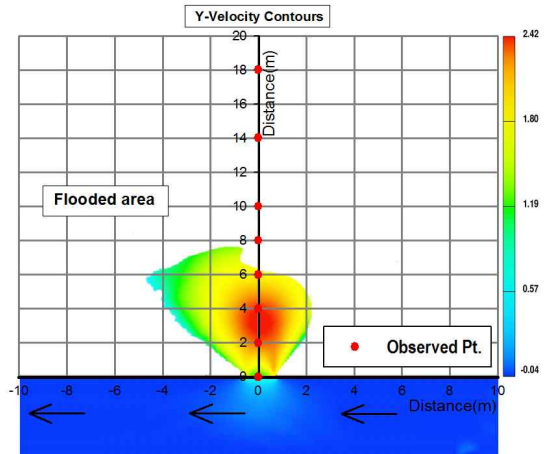
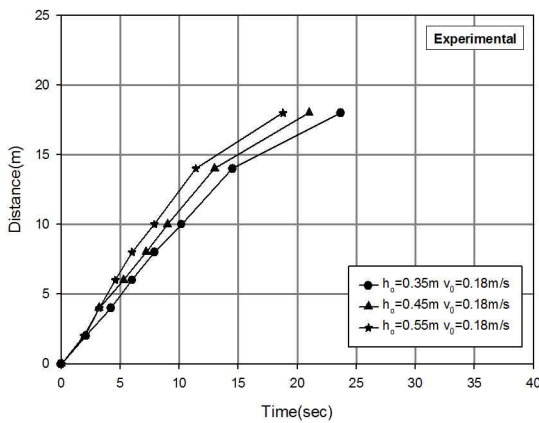


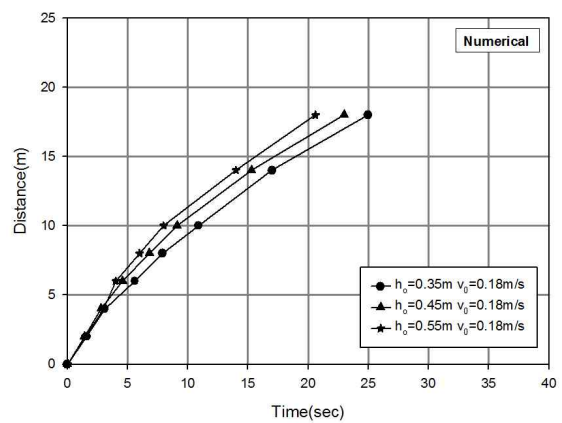
그림 2. 홍수파 진행 과정(t=10.2s) 및 측정

### 3.2 수치모형 검증

본 연구에서 측정된 유속 및 수심 측정지점과 하도에서 제내지쪽으로 유입되는 홍수파의 진행과정을 그림 2에 도시하였다. 수치모의에 앞서 3차원 수치모형의 적용성 및 타당성을 검토하기 위해 수리모형실험을 수행한 범람홍수파의 수리학적 거동 특성 해석(윤광석, 2008)과 비교하여 검증하였다. 그림 3은 제방붕괴시 범람홍수파의 이동거리와 시간 관계를 수리실험 및 수치모의 값을 각각 도시하였다. 초기에 범람홍수파의 전파속도는 수치모의 값이 조금 크게 나타났고, 거리가 멀어짐에 따라 수치모의 값이 수리실험 값보다 작은 값을 가지지만, 전체적인 경향이 비슷하다는 것을 알 수 있다. 오차는 대략 5% 정도 발생하였으며, 오차의 원인은 표면 장력 및 조도 값의 차이 때문에 발생한 것으로 사료된다.



(a) 측정별 홍수파 도달 시간 (윤광석, 2008)



(b) 수치모의 값

그림 3. 수리실험 및 수치모의 값 비교

### 3.3 수치모의 결과

#### 3.3.1 월류수위( $h_0$ )에 따른 범람홍수파의 거동 특성

제방붕괴시 하도 내의 월류수위가 범람홍수파에 미치는 영향을 파악하기 위하여 제방붕괴시 GMO를 이용한 붕괴속도( $v_0$ )를 0.18m/s로 고정시키고, 월류수위 값을 0.35, 0.45, 0.55m로 변화를 주어 월류수위가 홍수파에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 4는 월류수위 변화에 따른 3차원 최대 유속( $V_{max}$ ) 및 수심( $h_{max}$ )값을 도시하였다. 유속값은 월류수위가 높아짐에 따라 크게 나타났고, 초기에는 거의 모두 동일하게 유속이 증가하였으며, 붕괴부로부터 2m지점에서 모두 최대 유속값을 나타냈다. 이는 0~2m 구간에서 갑작스런 수심의 감소로 인하여 유속이 증가된 것으로 판단된다. 수심값은 6m~8m 지점에서 가장 낮은 값을 갖으며, 이는 도수에 의한 결과로 사료된다.

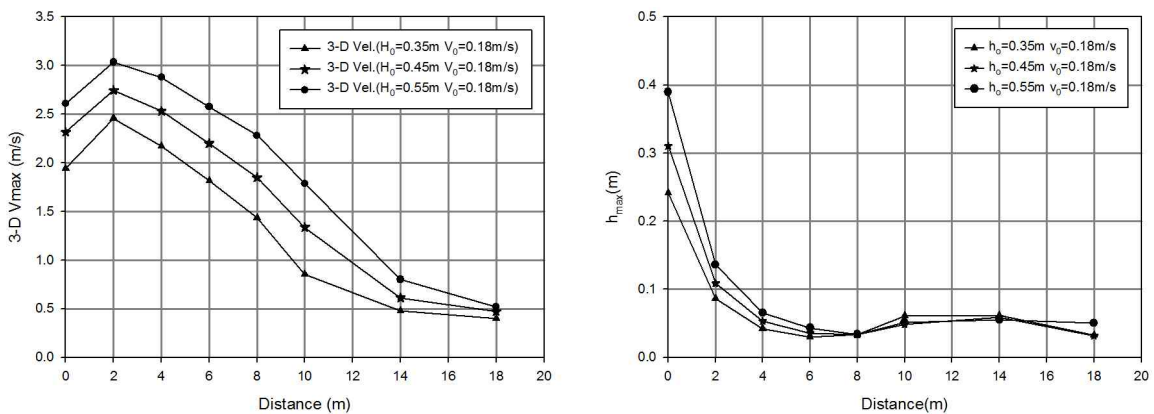


그림 4. 월류수위 변화에 따른 최대 유속 및 최대 수심

#### 3.3.2 붕괴속도( $v_0$ )에 따른 범람홍수파의 거동 특성

제방붕괴시 붕괴속도가 범람홍수파의 거동 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 제방붕괴시 하도 내 월류수위( $h_0$ )값을 0.55m로 고정하고, GMO를 이용한 붕괴속도를 0.06, 0.012, 0.018m/s로 변화를 주어 홍수파의 거동 특성을 분석하였다. 그림 5는 붕괴속도에 따른 3차원 최대 유속( $V_{max}$ ) 및 최대 수심( $h_{max}$ )값을 도시하였다. 최대 유속값은 그림 4와 비슷한 경향을 보이고 있으나, 변동폭과 초기 유속값의 차이가 크지 않다. 최대 수심 역시 월류수위의 영향에 따라 붕괴부에서 가장 크게 나타났고, 6~8m 구간에서 최소 수심값을 갖으며, 이는 도수의 영향으로 판단된다.

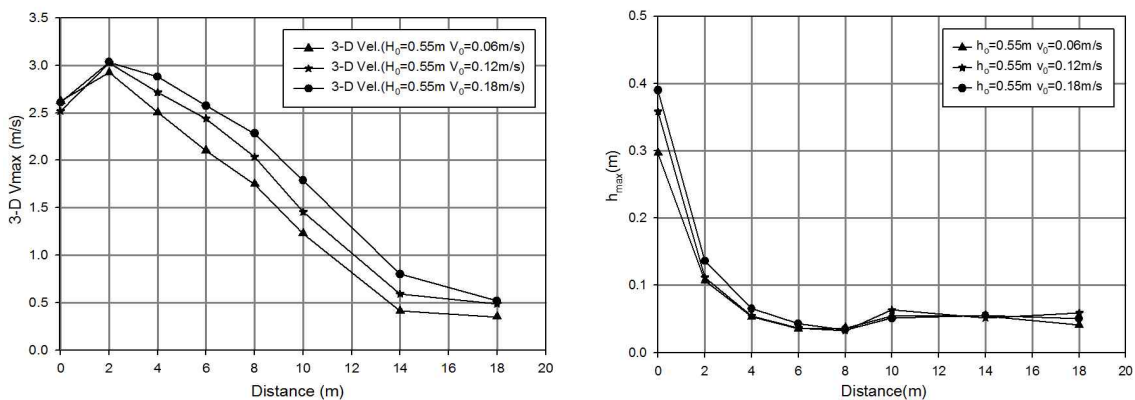


그림 5. 붕괴속도에 따른 최대 유속 및 최대 수심

#### 4. 결론

본 연구에서는 하도 내 월류수심과 제방의 붕괴속도 변화에 따른 범람홍수파의 거동특성을 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 통해 수행하였고, 그 결과는 다음과 같다.

- 제내지에서 범람홍수파의 최대 유속값은 초기 월류수위( $h_0$ )가 높고, 붕괴속도( $v_0$ )가 빠른 조건에서 나타났으며, 거리가 2m지점에서 유속값이 모두 크게 나타났다. 또한, 붕괴부와 홍수파의 선단 거리가 멀어짐에 따라 일정한 유속값을 지닌다.
- 범람홍수파의 최대 수심( $h_{max}$ )위치는 붕괴부이며, 붕괴부로부터 6~8m 구간 사이에서 최소 수심값을 가진다.
- 제방붕괴로 인한 범람홍수파는 붕괴속도( $v_0$ ) 보다는 하도 내 초기 월류수위( $h_0$ )에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

본 연구는 계획홍수위를 초과하는 극한홍수시 제방붕괴로 인한 피해를 저감시키고자, 범람홍수파의 거동을 규명하기 위한 연구이다. 위의 자료는 범람홍수파 발생시 최대 유속과 최대 수심 위치를 미리 예측하여 인명 및 재산 피해를 최소화 할 수 있을 것으로 예상되며, 홍수범람도 작성과 비상대처계획(EAP)수립 시에 정확한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 차후에 붕괴 단면 형상과 제내지 경사 변화에 따른 수치모의와 수리모형 실험이 수행된다면, 범람홍수파 규명에 중요한 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁·시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 윤광석, 여규동 (2005), 제방붕괴에 의한 제내지에서의 범람홍수파 거동 실험, 한국수자원학회 학술발표회, pp.1 ~ 5
2. 윤광석 (2008), 범람홍수파의 수리학적 거동 특성 해석, 박사학위논문(한양대학교)
3. 여창건, 진지웅, 송재우, 이승오 (2009), 3차원 수리모형을 이용한 댐 붕괴시 도시지역 침수특성에 관한 연구, 방재학회 학술발표대회, 고려대학교, pp.128
4. 조환범, 윤광석, 이승오, 송재우 (2009), 제방붕괴시 제방붕괴의 특성 연구, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp.869~873
5. 풍수해 극복 사례집 (2002 ~ 2009), 한국농어촌공사
6. Flow Science (2003), Flow-3D User's Manual, Los Alamos, NM, USA
7. Shige-eda, M. and Akiyama, J. (2003), " Numerical and Experimental on Two-Dimensional Flood Flows with and without Structures ", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 10, pp.817~821