

제방붕괴시 제내지의 범람홍수파 특성연구

A Study of the Flood Wave Propagation in the Flooded area due to Levee Breach

조환범*, 윤광석**, 이승오***, 송재우****

Hwan Beom Jo, Kwang Seok Yoon, Seung Oh Lee, Jai Woo Song

요 지

도시지역에서 하천제방의 붕괴로 인해 제내지 범람 홍수파가 발생하였을 경우에 적지 않은 인명 및 재산 피해가 발생할 수 있다. 피해를 줄이기 위해서는 제내지 범람 홍수파의 거동특성을 명확히 밝혀낸 후, 제방 붕괴에 의한 홍수범람에 대한 대피 체계를 설립하는 것이 바람직하다. 본 연구는 범람 홍수파가 발생하였을 경우에 제내지에서의 범람 홍수파의 영향을 3차원 수치모형인 Flow-3D를 이용하여 모의하였다.

또한 비교·검토를 위하여 구조물이 없는 평탄지형에 대해서도 수치모의를 수행하였다. 높이 0.6m의 제방이 붕괴되어 붕괴 폭 변화와 제내지의 구조물의 유무에 따른 제내지 범람 홍수파의 속도 및 수심의 변화를 분석 하였다. 모의 결과 제방 붕괴 시 붕괴 폭의 변화에 따른 홍수파 전파속도는 별 차이가 없는 걸로 나타났다. 수심의 변화는 제방붕괴지점으로부터 멀어질수록 낮아졌고, 수심 변화폭도 일정하게 유지되었다. 또한 구조물이 있는 경우가 그렇지 않는 경우에 비해 제방 붕괴부 주위에서의 수심은 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구결과를 비롯한 수치모의결과를 적절하게 활용하게 되면 제방붕괴에 의한 홍수범람에 대한 대피체계(EAP)를 수립하는데 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 제방붕괴, 범람 홍수파, FLOW-3D, 수치모의

1. 서론

최근 우리나라에서는 극한강우로 인하여 수공구조물의 피해가 급증하고 있다. 통계연보(시·도 통계연보, 2003~2007)를 보면 최근 5년간 홍수에 의한 수공구조물의 피해 중 제방붕괴에 의한 피해가 65%를 차지하고 있다. 제방붕괴에 의한 범람홍수파의 명확한 규명과 붕괴 후 대피체계를 확립할 필요성이 대두되고 있다. 제방붕괴에 의한 범람홍수파의 명확한 규명은 범람시에 신속한 대피와 극한강우에 대한 피해를 저감하는데 있어서 중요한 과제이다.

본 연구에서는 극한강우가 발생하였을 경우 범람홍수파의 거동을 명확히 규명하여 홍수범람지도 작성 및 비상대처계획(EAP)의 수립 등의 기초자료로 활용하기 위해서 3차원 수치해석 모델인 FLOW-3D를 이용하여 제내지 구조물의 위치 변화에 따른 범람홍수파의 특성을 비교, 검토하였다.

2. 기본이론

* 비회원 · 홍익대학교 석사과정 · E-mail : jhbkej@naver.com
** 정회원 · 한국건설기술연구원 하천·해안연구실 책임연구원 · E-mail : ksyoon@kict.re.kr
*** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 조교수 · E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr
**** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수 · E-mail : jwsong@hongik.ac.kr

1차원 및 2차원 모형은 시간에 따른 범람홍수과의 특성을 모의하기 어려우며, 범람홍수과의 특성을 파악하기 위해서는 3차원 수치모형의 도입이 적절하다고 판단된다. 본 연구에서는 미국 Flow 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, ρ 는 유체의 밀도, u, v, w 는 각 x, y, z 방향의 유속, A_x, A_y, A_z 는 각 방향 요소면적이다. 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 VOF 함수를 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 Sink이다.

3. 모형의 적용

본 연구에서는 붕괴폭(0.5, 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0m) 변화에 따른 범람홍수과의 수심 및 유속변화를 3차원 수치모의를 수행하여 제방 붕괴 시 제내지에서 범람홍수과의 거동특성을 분석하였다. 제방 붕괴에 의한 제내지에서의 범람홍수과 거동 실험(윤광석, 2005)과 건물의 유무에 따른 범람홍수과 특성 실험을 비교, 검토하였다. 제내지의 구조물에 의한 범람홍수과의 영향을 알아보기 위해 그림 1과 같은 제내지위에 구조물을 설치하고 3차원 수치모의를 수행하였다. 폭 5m, 길이 28m인 하도에 붕괴폭을 0.5m~3m로 변화를 주었고, 제내지에는 높이 0.8m, 가로 및 세로 길이가 0.2m 인 구조물들을 0.2m 간격으로 배치하였다. 제방의 붕괴 폭은 1.0, 2.0, 3.0m로 변화시키며 모의하였고, 붕괴부와 건물간의 간격은 1m, 2m, 3m로 변화를 시키며, 이에 따른 범람홍수과의 영향을 모의 하였다.

3.1 경계조건 및 입력자료

FLOW-3D의 격자망 형태는 직육면체형 격자를 사용하였으며 다중블록방법(multiblock)을 이용하여 구조물 주위의 범람홍수과에 의한 영향을 세밀하게 분석하였고, 총 2,276,600 개의 격자가 사용되었다. 범람홍수과 수치모의에 적용된 수로 및 건물의 제원과 제방붕괴 모의를 위한 실험조건은 표 1 및 그림1과 같다.

표 1. 수치모의 적용 수로의 제원

| | 초기하도수위(h) (m) | 붕괴부폭(B) (m) | 건물규격 (m^2) | 붕괴부와 건물거리(m) | 건물간격 (m) |
|-------|------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|-------------|
| case1 | 0.85 | 0.5,1.0,1.5 2.0,2.5,3.0 | . | . | . |
| case2 | 0.90 | 0.5,1.0,1.5 2.0,2.5,3.0 | 0.2×0.2 | 1.0,2.0,3.0 | 0.2 |

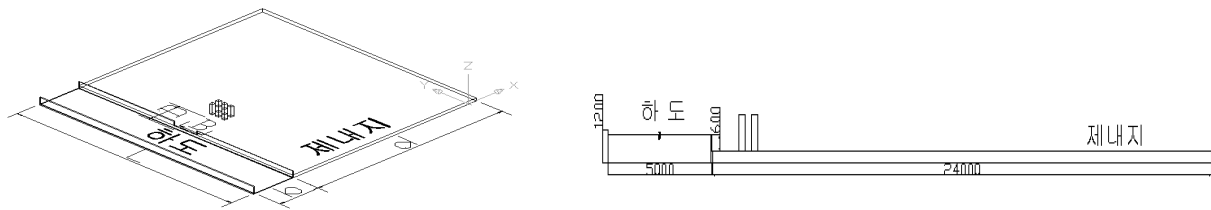
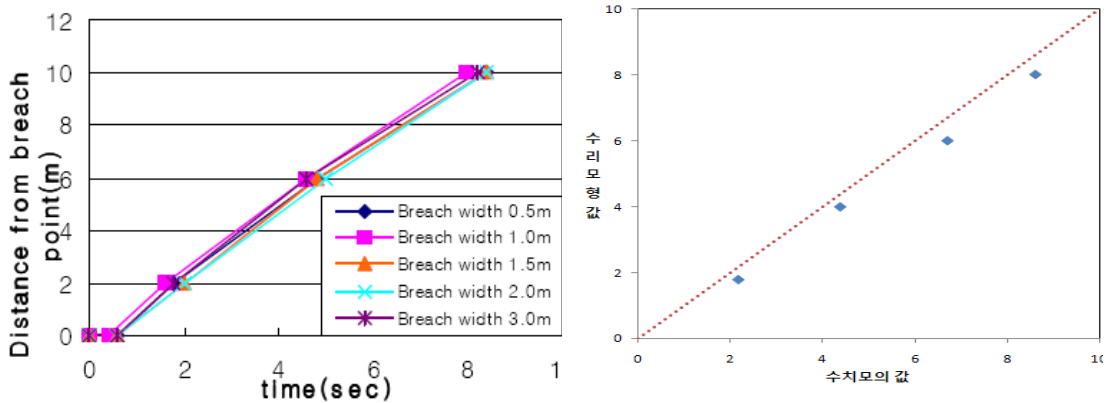


그림 1. 수치모의 적용 수로 및 제내지의 형태

3.2 수치모의 결과

3.2.1 건물이 없는 경우

그림 2는 제방붕괴에 의한 제내지에서의 범람홍수와 거동실험결과(윤광석, 2005)를 수치모의 결과와 비교하였다.



(a) 홍수와 전파거리 (윤광석, 2005)

(b) 수리모형과 수치모의 값 비교

그림 2. 수리모형 및 수치모의 값

홍수와의 시간별 전파거리는 제방붕괴폭이 클수록 동일시간에 홍수파 전면의 이동 거리가 증가하는 경향을 보이며, 시간이 지남에 따라 전파거리는 점차 감소하는 경향을 보인다. 수심이 비교적 낮은 바닥에서는 바닥 마찰력에 의해 홍수파의 속도가 감소하기 때문이다.

위의 두 결과를 비교, 분석한 결과 약 10% 정도의 오차가 나왔으며, FLOW-3D를 통한 수치모의 결과는 어느 정도 신뢰성을 가지고 있는 것으로 판단된다. 오차원인은 하도 및 제내지 바닥면의 마찰이라고 사료된다.

3.2.2 건물이 있는 경우

건물이 있는 지역에서 제방붕괴로 인한 범람홍수파의 영향을 분석하기 위해서 제내지 붕괴 폭과 붕괴부와 건물사이의 거리를 변화시켜 수치모의를 수행하였다. 각 case 별로 범람홍수파의 붕괴 폭과 건물거리에 따른 수심 및 유속변화 양상은 그림 3~6과 같다.

붕괴 폭 변화에 따른 범람홍수파의 수심변화 양상은 붕괴부에서 급격하게 감소하다가 건물 전면부에서 도수에 의해 급상승한 후, 건물 통과 후 감소하여 일정해진다. 건물 전면부에서 발생하는 급격한 수위 상승은 붕괴폭 1m 일 때가 가장 낮았으며, 붕괴폭 2m와 3m는 비슷한 경향을 보였다. 붕괴폭 변화에 따른 유속변화 양상은 그림 4에 나타낸 바와 같이 붕괴폭이 좁은 경우 높게 나타났으며, 건물을 통과한 후에는 붕괴 폭이 넓은 경우 높게 나타났다.

붕괴부로부터 건물까지 거리의 변화에 따른 범람홍수파의 수심변화 양상은 붕괴부로부터의 거리가 1m인 건물에서 건물의 영향에 의한 도수의 발생으로 수위가 상승한 후, 건물 통과 후 하강하는 양상을 보였다. 붕괴부로부터 건물까지의 거리에 따른 건물 전면부에서의 급격한 수위상승은 그림 5에서 보인 바와 같이 건물까지의 거리가 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 유속변화 양상은 붕괴부로부터의 거리가 1m인 경우 건물에 의한 유속변화 영향이 장시간 지속됐으며, 2m와 3m인 경우에는 건물에서의 영향은 비교적 적게 나타났다.

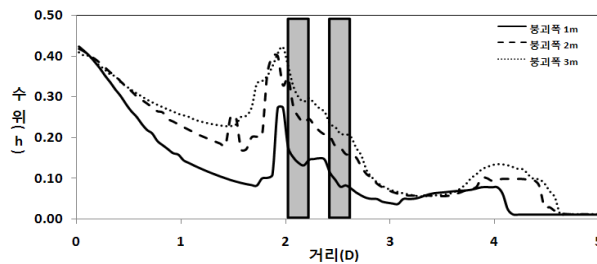


그림 3. 붕괴폭 변화에 따른 수위변화(t=2s, 거리 2m)

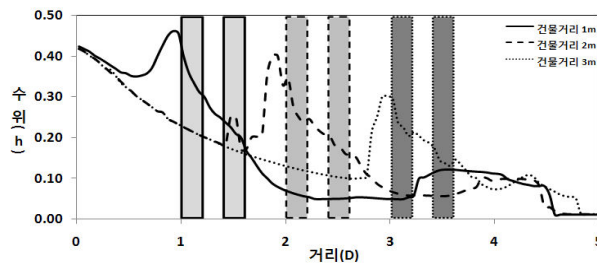


그림 4. 건물의 거리변화에 따른 수위변화(t=2s, 붕괴폭 2m)

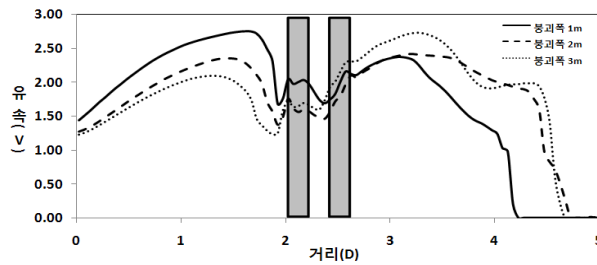


그림 5. 붕괴폭 변화에 따른 유속변화(t=2s, 건물거리 2m)

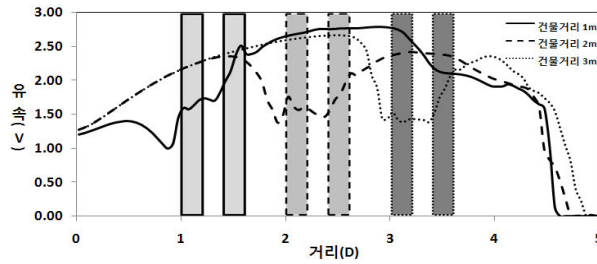


그림 6. 건물의 거리변화에 따른 유속변화(t=2s, 붕괴폭2m)

4. 결론

본 연구는 제방 붕괴폭과 붕괴부로부터 건물거리의 변화에 따른 수심 및 유속변화 양상을 3차원 수치모형을 통하여 수행하였고, 결과는 다음과 같다.

- 수위의 변화는 붕괴 폭의 영향보다는 붕괴부로부터 건물까지의 거리에 의한 영향이 상대적으로 더 컸다.
- 범람홍수파는 건물 전면부에 급격한 수위 상승을 가져오고, 상승고는 붕괴부로부터 건물까지의 거리가 멀어질수록 감소하였다.
- 유속의 변화는 건물이 있는 곳에서 정체기를 갖고, 통과하면 유속이 증가하였다.

본 연구는 극한강우시 제방붕괴로 인한 범람홍수파의 거동을 규명하기 위한 연구이며, 홍수범람지도 작성이나 비상대처계획(EAP)을 수립 시 보다 정확한 기초자료를 제공할 수 있을 것이며, 차후 검토를 통하여 추가적인 수치모의와 수리모형실험을 수행하여 범람홍수파의 거동을 더욱 명확히 할 수 있을 것으로 판단된다.

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(2007), 제내지구조물 설치에 따른 제방붕괴의 범람홍수파 특성 분석, 한국수자원학회 학술발표회, pp.904~908
3. 윤광석 (2008), 범람홍수파의 수리학적 거동 특성 해석, 박사학위논문(한양대학교)
4. 여창진, 진지웅, 송재우, 이승오(2009), 3차원 수치모형을 이용한 댐 붕괴시 도시지역 침수특성에 관한 연구, 방재학회 학술발표대회, 고려대학교, pp.128
5. 시·도 통계연보(2003~2007)
6. Flow Science, (2003), Flow-3D User's Manual, Los Alamos, NM, USA