

범람홍수파의 접근각도에 따른 도시지역의 동수역학적 특성

Hydrodynamic Characteristic of Dam-break Wave in urban area for different Angles of Approach Flow

김수영*, 여창건**, 송재우***, 이승오****

Soo Young Kim, Chang Geon Yeo, Jai Woo Song, Seung Oh Lee

요 지

최근에 이상기후로 인해 예측하기 힘든 기상현상들이 돌발적이고 대규모의(또는 설계빈도를 초과하는) 집중호우를 야기하여 댐과 같은 수공구조물의 안전을 위협하고 있다. 그러므로 이러한 대규모의 집중호우로 발생하는 댐의 붕괴에 대한 대책을 수립하는 것이 매우 중요하다. 특히 댐의 붕괴가 도시의 침수로 이어지는 경우는 더욱 많은 인명과 재산피해를 발생시키므로 도시지역을 흐르는 범람홍수파의 특성에 대한 규명은 매우 중요하다. 본 연구에서는 홍수범람파의 특성을 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 이용하여 모의하였다. 저류수심 0.4m, 두께 0.8m의 댐이 붕괴하여 붕괴폭이 1m가 된다고 가정하였고, 도시지역은 댐으로부터 5m 거리에 위치한다고 가정하였다. 대상 도시지역은 0.3m×0.3m×0.6m(L×W×H)인 정사각형 블록들을 5×5 정방향으로 배치하였고, 수리실험 결과와 비교·검증하였다. 그리고 범람홍수파가 흐름방향과 일치하게 접근해오는 경우와 도시지역으로의 접근각도에 따른 범람홍수파의 변화를 보기위해 흐름방향에 대하여 각각 10°, 22.5°, 45° 회전시킨 경우에 대해 수치모의를 수행하였다. 그리고 각 경우의 침수영향들을 비교하여 그 차이점을 분석하였다. 모의 결과 범람홍수파의 접근각도가 흐름방향에 대해 커질수록 도시선단에서 도수는 적게 일어났고 유속도 감소하였으며, 수심은 증가하였다. 본 연구의 결과를 토대로 범람홍수파가 흐름방향과 일치하게 접근해올 때가 가장 위험한 case 라는 것을 알 수 있다. 이 결과는 추후 유체-구조물간의 연성해석을 통하여 범람홍수파의 흐름이 건물에 주는 영향까지 파악한다면 예방대책 수립의 보다 더 정확한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 댐 붕괴, FLOW-3D, 도시지역, 범람홍수파, 접근각도

1. 서 론

최근 기상이변으로 인해 국지적 집중강우현상이 점차 증가하고 있다. 또한 한반도의 강우패턴은 강우일은 줄고 강수량은 늘어나고 있다. 이는 이상기후로 인한 홍수가 극단적으로 발생하여 피해의 정도가 점점 심해질 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 설계 빈도를 초과하는 집중호우로 댐이 붕괴 되었을 때의 동수역학적 거동을 분석하여 대비하여야 한다. 게다가 도시지역의 홍수는 인명이나 재산피해에 있어서 일반 산지나 평야에 비해 현저히 크므로 도시지역의 홍수를 해석하는 것은 매우 중요하며, 보다 세밀하고 정확하게 분석해야 할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 수위와 유속분포양상을 보다 정밀하게 파악하기 위해 3차원 수치해석 프로그램인 FLOW-3D를 사용하여 도시지역으로의 홍수파의 접근각도에 따른 수치모의 실험을 수행 하였다.

* 비회원 · 홍익대학교 석사과정 · E-mail : freedance80@hate.com
** 정회원 · 홍익대학교 박사과정 · E-mail : gun1230@empal.com
*** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수 · E-mail : jwsong@hongik.ac.kr
**** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 조교수 · E-mail : seungoh.lee@hongik.ac.kr (교신저자)

2. 수치모형

1차원 및 2차원 모형은 시간에 따른 범람 확산양상을 모의하기 다소 어려우며, 균일화된 모양과 단순화된 방정식으로 일괄 적용하여 복잡한 형상을 모의하기에도 한계가 있어 도시지역 내의 홍수파의 특성을 파악하기 위해서는 3차원 수치모형이 요구된다. 본 연구에서 사용된 FLOW-3D는 미국 Flow Science사에서 개발한 상용 프로그램으로 연속방정식과 운동량 방정식을 지배방정식으로 사용하고 있으며 지배방정식인 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 방향의 유속, A_x, A_y, A_z 는 각 방향 요소면적이다. 운동량 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 다음 식(2) ~ (4)와 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, 식(5)는 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 $FDIF$ 는 Diffusion of Fluid Fraction이고, $FSOR$ 은 Fluid Source와 Sink 이다.

3. 수치모형 실험의 실행

3.2 입력자료 및 경계조건

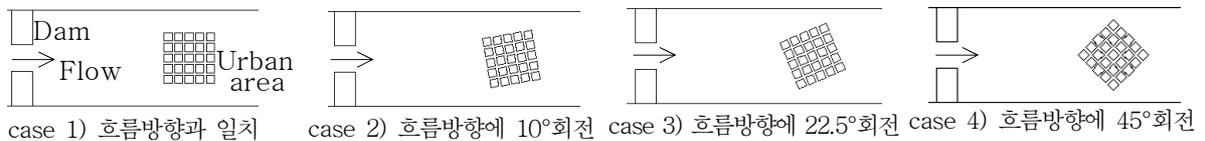


그림 1. case별 평면도

본 연구에서 도시지역은 높이 0.6m이고, 가로, 세로가 각 0.3m인 정사각형 블록들을 0.1m 간격으로 5×5 정방향으로 배치하여 전형적인 격자형 도시형태로 가정하였다. 범람홍수파의 도시지역으로의 접근각도에 따른 변화를 보기위하여 접근하는 범람홍수파의 흐름방향과 일치하는 경우와 흐름방향에 대하여 각각 10°, 22.5°, 45° 씩 회전시킨 경우에 대하여 수치모의를 수행하였다(그림 1 참조). 댐은 저류수심이 0.4m 이고, 두께가 0.8m인 댐이 1m의 폭으로 붕괴가 된다고 가정하였다. 도시지역은 댐으로부터 5m 거리에 위치하고 도시의 흐름방향에 대한 회전은 도시지역의 정중앙을 축으로 하여 회전 시켰다. 각 수치모의는 도시지역 내의 확산양상을 정밀하게 분석하기 위하여 조밀하게 1,470,000개로 짜여진 격자를 사용하였다.

3.2 모형의 검증

본 연구에서는 본격적인 수치모의 실험에 앞서 경계조건과 입력값들에 대한 수치모의를 Sandra Soares-Fraza와 Yves Zech(2008)의 실험 결과와 비교 검토하여 본 연구에서의 3차원 수치모형에 대한 검증을 수행하였다. Sandra Soares-Fraza와 Yves Zech(2008)의 논문에서 제시된 case 1(흐름방향)과 case 3(22.5° 회전)에 대한 수리실험결과와 2차원 수치모의 결과에 대하여 3차원 수치모의 결과와 비교하였다(그림2 참조).

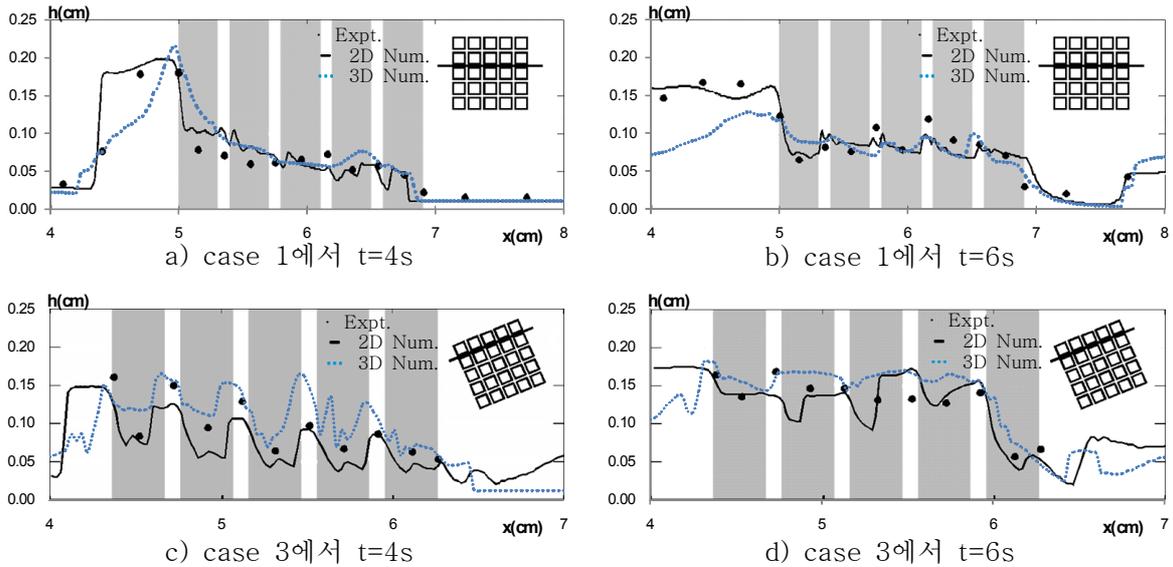


그림 2. case 1(흐름방향)과 case 3(22.5°회전)에 대한 실험값, 2차원 및 3차원 수치모의 값의 비교

case 1과 case 3의 경우 모두 t=4s에서 건물 선단과 건물 내 도로에서 모두 실험값과 수치모의 값이 거의 일치하는 양상을 보였고 2차원에 비해 3차원이 모의가 더 잘 된 것으로 판단되었다. 그리고 t=6s에서는 case 1 과 case 3 모두 선단 수위는 실험값이나 2차원 수치모의 결과보다 3차원 수치모의 값이 조금 낮게 나오는 양상을 보였다. 그러나 본 연구에서는 도시 내부에서의 수위 및 유속의 변화 양상에 초점을 맞추었으므로 복잡한 형상이나 폭이 좁은 도로에서는 2차원 수치모의 보다는 3차원으로 수치모의를 하는 것이 더 적절하다.

3.3 결과의 분석

본 연구에서의 4가지 case 별로 수위와 유속분포의 양상을 비교하여 범람홍수파가 도시지역에 접근하는 경로에 따라 가장 위험한 case를 도출할 수 있을 뿐만 아니라 유속과 수위의 분석을 통하여 안전한 대피경로를 파악할 수 있을 것이다.

3.3.1 각 case 별 수위

그림 4에서와 같이 범람홍수파의 도시지역으로의 접근각이 흐름방향과 일치한 case 1 일 때 선단의 수위가 가장 높았고, 흐름방향과의 회전각도가 크면 클수록 선단수위는 낮아졌다. 그러나 선단에서의 수위가 높을수록 도수에 의한 에너지 소산의 결과로 도시 내부도로에서의 수위는 오히려 낮아졌다. 하지만 시간이 흐름에 따라 수위의 고저차는 점점 줄어들고 안정된 흐름을 보였으며 각 case 간의 수위의 차이도 감소하는 양상을 보였다.

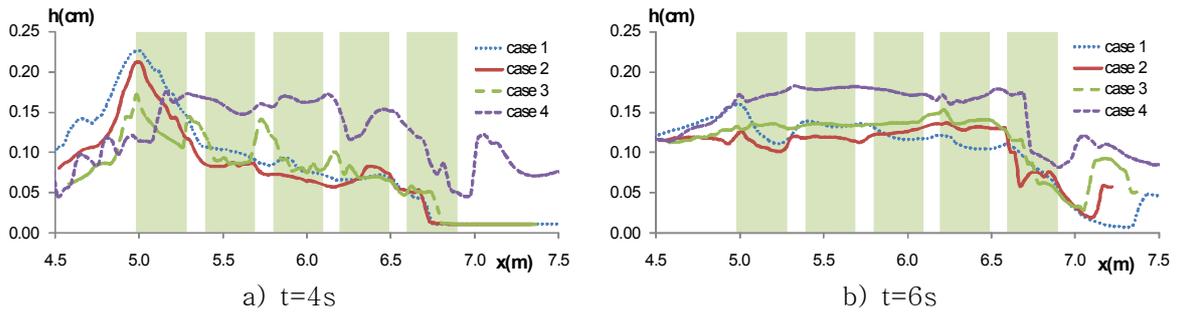


그림 3. t=4s 와 t=8s 에서의 case별 수위 값의 비교

case 4가 case 3보다 수위가 높게 나왔다. 이는 홍수파의 고유한 특성이라기보다는 case 4의 경우가 벽면에 더 가까이 있고 반사파의 방향이 수로의 방향과 일치하여 수로의 벽면효과에 의한 수위상승으로 볼 수 있으며 상대적으로 다른 case 들은 벽면효과의 영향이 적다.

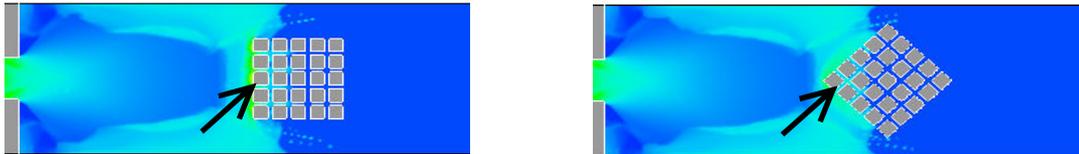


그림 4. 벽면효과에 의한 반사파의 영향 비교(case 1와 case 4)

3.3.2 각 case 별 유속

각 case 별로 비교할 유속은 표면유속으로서 그림 5에서 제시한 바와 같이 도시내부의 도로방향에 대한 유속을 산정하여 비교하였다.

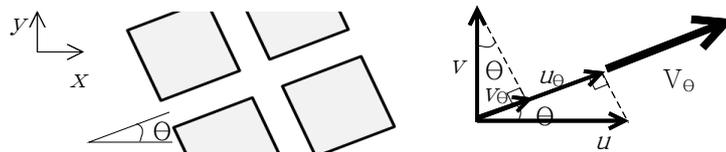


그림 5. 도로방향에 대한 유속벡터

$$V = \sqrt{V_{\theta}^2 + w^2}$$

여기서, $V_{\theta} = u \cos \theta + v \sin \theta$, u, v, w : x, y, z 방향 유속, θ : 회전각도

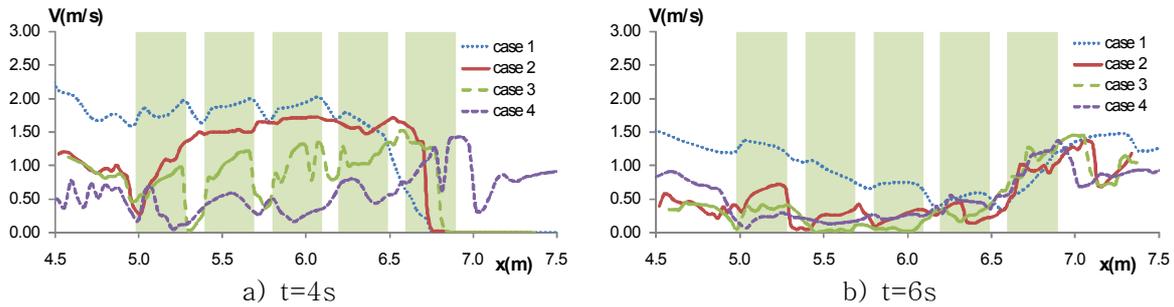


그림 6. t=4s 와 t=8s 에서의 case별 유속 값의 비교

그림 6에서와 같이 case 1일 때 선단 및 도시내에서 모두 유속이 최대가 되고 t=4s에서 흐름방향에 회전각이 증가할수록 유속은 감소하였다. 시간이 지남에 따라 case 1을 제외한 나머지 case에서는 비슷한 양상을 띄고 있다. 그림 3과 그림 6에서와 같이 범람홍수과의 접근각에 따른 수위 변화에 비해 상대적으로 유속의 변화는 적으므로 따라서 대피경로의 수립에는 유속보다는 수위에 대한 고려에 중점을 두어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구는 도시형상에 따른 범람홍수과의 변화양상을 보기위해 접근해오는 범람홍수과의 흐름방향과 일치하는 경우와 흐름방향에 각각 10°, 22.5°, 45°씩 회전시킨 경우에 대해 수치모의를 수행하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 건물이 범람 홍수과의 흐름방향과 일치하는 경우가 선단에서의 수위가 가장 높으며, 흐름방향에 많이 회전할수록 선단수위는 낮아지고 도시내 수위는 높아졌다.
- 건물이 범람 홍수과와 흐름방향이 일치하는 경우에 선단 및 도시내에서 유속이 최대가 되어 가장 위험한 case가 된다.

본 연구는 홍수시 비상대처 계획의 수립시 대피로의 결정에 대한 판단의 기초자료로 사용될 수 있을 것이다. 추후 유체-구조 연성해석을 통해 범람 홍수과에 의한 구조물의 영향까지 파악한다면 다양한 용도로 활용될 수 있을 것이며 수치모의 자료에 대한 수리모형 실험을 통해 보완한다면 보다 정확한 기초자료로서의 역할을 할 수 있을 것이다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 여창진, 진지용, 송재우, 이승오(2009). 3차원 수치 모형을 이용한 댐 붕괴시 도시지역 침수 특성에 관한 연구, **한국방재학회 2009년도 학술발표대회 논문집**, pp. 147
2. Sandra Soares-Frazao and Yves Zech (2008). Dam-break flow through an idealized city,

Journal of Hydraulic Research Vol. 46, No. 5, pp. 648-658.

3. Flow Science, (2003). *FLOW-3D User's Manual*, Los Alamos, NM, USA.
4. Groeneveld, J. Teklemariam, E.(1999). Hydraulic applications of Flow-3D, *ANNUAL CONFERENCE-CANADIAN SOCIETY FOR CIVIL ENGINEERING*, Vol.2 No.-[1999], pp 69-78