

보 붕괴 영향 평가를 위한 고정확도 해석모형의 적용

Application of High Accuracy Model for Assessing Weir Failure Effect

김태형*, 한건연**, 손재경***, 곽영민****

Tae Hyung Kim, Kun Yeun Han, Jae Kyung Son, Young Min Kwak

요 지

4대강 살리기 사업에 있어 하천 준설 및 다목적 보 설치의 주요하천 상·하류의 일괄적인 준설을 통한 통수단면 확보로 홍수 소통능력을 극대화 하고, 친환경적 보설치를 통해 하도정비 실시 이후에도 현재의 갈수위 이상의 수위를 유지하면서 홍수피해저감효과를 극대화하는 것을 목표로 한다.

4대강 사업시 콘크리트 형식으로 건설될 다목적 보는 월류식 구조물이지만 보의 저부에서 발생하는 양압력이나 기타 재하 하중과의 조합으로 인해 전도나 활동을 일으킬 수 있는 가능성을 가질 수 있고, 보의 규모가 커지고 가동보 등의 복합적인 형태를 가질 경우 보의 붕괴는 콘크리트 중력식 댐의 붕괴와 비슷한 양상을 가질 것으로 판단된다.

본 연구에서는 월류 구조물이 붕괴되었을때 상·하류 하천에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 자연하천 내의 보 붕괴 및 그에 따른 수위상승으로 인한 제방 붕괴시 실제 범람원에 안정적으로 적용가능한 고정확도 2차원 홍수범람 모형을 평가하였고, 가상하도 및 실험하도에 대한 적용을 실시하였다.

핵심용어 : 보 붕괴, 유한체적법, 고정확도

1. 서 론

치수능력 부족과 기후변화에 대비한 치수안전도 증대 및 물확보 등을 가장 큰 목표로 하는 4대강 살리기 사업이 2012년 완공을 목표로 현재 공사중에 있다. 주요 사업의 하나인 하천 준설 및 다목적 보 설치 사업은 주요하천 상·하류의 일괄적인 준설을 통한 통수단면 확보로 홍수 소통능력을 극대화 하고, 친환경적 보설치를 통해 하도정비 실시 이후에도 현재의 갈수위 이상의 수위를 유지하면서 홍수피해저감효과를 극대화하는 것을 목표로 한다.

그러나 콘크리트 형식으로 건설된 보는 월류식 구조물이지만 그 규모가 커지고 가동보 등의 복합적인 형식을 가질 경우 보의 저부에서 발생하는 양압력이나 기타 재하 하중과의 조합으로 인해 전도나 활동을 일으킬 수 있는 가능성을 가질 수 있고, 보의 규모가 커지고 가동보 등의 복합적인 형태를 가질 경우 보의 붕괴는 콘크리트 중력식 댐의 붕괴와 비슷한 양상을 가질 것으로 판단된다.

* 정회원 · 경북대학교 건축토목공학부 박사과정 · E-mail: sunz3515@hotmail.com

** 정회원 · 경북대학교 건축토목공학과 교수 · E-mail : kshanj@knu.ac.kr

*** 경북대학교 건축토목공학부 석사과정 · E-mail: blackswan@knu.ac.kr

**** 경북대학교 건축토목공학부 석사과정 · E-mail: tofreeze@naver.com

본 연구에서는 월류 구조물이 붕괴되었을 때 상·하류 하천에 미치는 영향을 분석하기 위해 자연하도 및 하도 내 수위상승으로 인한 수공구조물 붕괴시 실제범람원에 안정적으로 적용가능한 고정확도 2차원 홍수범람 모형을 개발하였고, 가상하도 및 실험하도에 대한 적용을 실시하였다.

2. 보 붕괴영향을 고려하기 위한 고정확도 2차원 범람해석 모형의 개발

2.1 보 등의 월류 구조물의 붕괴원인 및 양상

보의 붕괴 원인은 보의 저부에서 발생하는 양압력이나 기타 재하 하중과의 조합으로 인한 전도나 활동에 의해 발생할 것으로 예측된다. 또한 보의 규모가 커지고 가동보 등의 복합적인 형태를 가질 경우 보의 붕괴는 콘크리트 중력식 댐의 붕괴와 비슷한 양상을 가질 것으로 판단된다.

보 붕괴는 콘크리트 댐 붕괴와 같은 순간적인 붕괴의 특성을 가지고, 보 자체의 부적절한 설계나 지진, 기초부 및 접합부의 결함으로 인한 과도한 힘이 보 구조물에 커다란 응력을 작용시켜 구조물을 전도시키거나 밀어냄으로써 발생하는데 이 경우는 보 체체의 상당부분이 붕괴부가 되며 수학적 해석에 있어서도 점차적인 붕괴에 비하여 단순한 특성을 가진다.

보의 파괴양상은 콘크리트 댐의 파괴양상과 비슷할 것으로 판단되므로, fill 댐의 파괴양상과는 상반되는데, 단지 몇분만에 보의 최종 형태에 도달하는 급격한 붕괴부 발달과정을 나타낸다. 보 파괴의 최종 형태는 거의 연직하는 측벽면 경사를 가진 사다리꼴 형상을 가진다. 콘크리트 댐의 구조적인 지지 특성 때문에 파괴가 거의 보 체체의 상당부분 또는 체체의 완전한 붕괴를 나타내기도 한다.

2.2 고정확도 해석모형을 이용한 홍수범람모형의 개발

보존변수로 이루어진 2차원 천수방정식을 차원에 대해 Fractional Step Method를 적용하기 위한 형태로 나타내면 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} U_t + F(U)_x &= S(U)_x \\ U_t + G(U)_y &= S(U)_y \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 U 는 보존변수들로 이루어진 물리적 벡터이며, $F(U), G(U)$ 는 x, y 방향의 흐름률, 그리고 $S(U)$ 는 다양한 물리적, 지형적 효과를 반영하는 생성/소멸 벡터항으로 식 (2)와 같다.

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, F(U) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + 1/2(gh^2) \end{bmatrix}, G(U) = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + 1/2(gh^2) \end{bmatrix}, S(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 S_0 는 하상경사로 각각 $S_{0x} = -\partial z_b / \partial x$, $S_{0y} = -\partial z_b / \partial y$ 인 하상고(z)의 x 방향, y 방향 변화량으로 계산되고, S_f 는 마찰 경사를 나타내는 것으로 본 모형에서는 Manning의 조도계수 n 을 사용하여 $S_{fx} = n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} h^{-4/3}$ 및 $S_{fy} = n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} h^{-4/3}$ 으로 나타내었다.

식(1)을 x 방향 및 y 방향의 유한체적 V 에 대해서 적분하여 상미분 방정식으로 나타내고 적분항을 Green 정리에 의해 선적분으로 변환한 후 시간 미분항으로 이산화하면 식 (3)과 같이 완전

이산화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 U_{i,j}^{n+1} &= U_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[F_{i+\frac{1}{2},j} - F_{i-\frac{1}{2},j} \right] + \Delta t \bar{S}_i \\
 U_{i,j}^{n+1} &= U_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[G_{i,j+\frac{1}{2}} - G_{i,j-\frac{1}{2}} \right] + \Delta t \bar{S}_j
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

식 (3)에서 보이는 바와 같이, 시간경과 후의 흐름변수 $U_{i,j}^{n+1}$ 는 단지 유한체적의 경계면을 수직으로 가로지르는 흐름률 F 와 G 에 의존하고 있으므로, 인접한 두 격자의 상태에 따른 흐름률이 계산되어야 하는 Riemann의 문제는 유한체적법에 의해 그 해를 구할 수 있다.

3. 모형의 적용 및 검증

3.1 2차원 댐 붕괴 해석

2차원 댐 붕괴 모의는 Fennema와 Chaudhry(1990)에 의해 도입된 부분적인 댐 붕괴에 대해서 적용하였다. Chaudhry는 이차원의 댐 붕괴 모의를 위하여 비대칭의 댐 붕괴를 MacCormack 기법을 사용하여 모의하였다. 초기조건으로 댐 좌측의 수심이 10.0m이고, 댐 우측의 수심이 5.0m인 젖은하도의 경우와 0.0m 마른하도인 경우로 각각 가정하였다. 경계조건으로 댐 상류와 하류에는 반사하지 않은 경계조건을 주었고, 댐에 의한 내부경계와 좌우 측면은 반사경계조건으로 가정하였다. 조도계수는 0.05이고, 0.025의 하상경사를 가지는 가상하도에 대해 모의를 실시하였으며, 출력시간은 7.2초로 모두 같게 하였다.

하류단에 수위가 존재하는 젖은하도의 경우와 마른하도의 경우에 대해서 계산된 수면형을 및 등수위선과 유속분포도를 그림 1에 나타냈다.

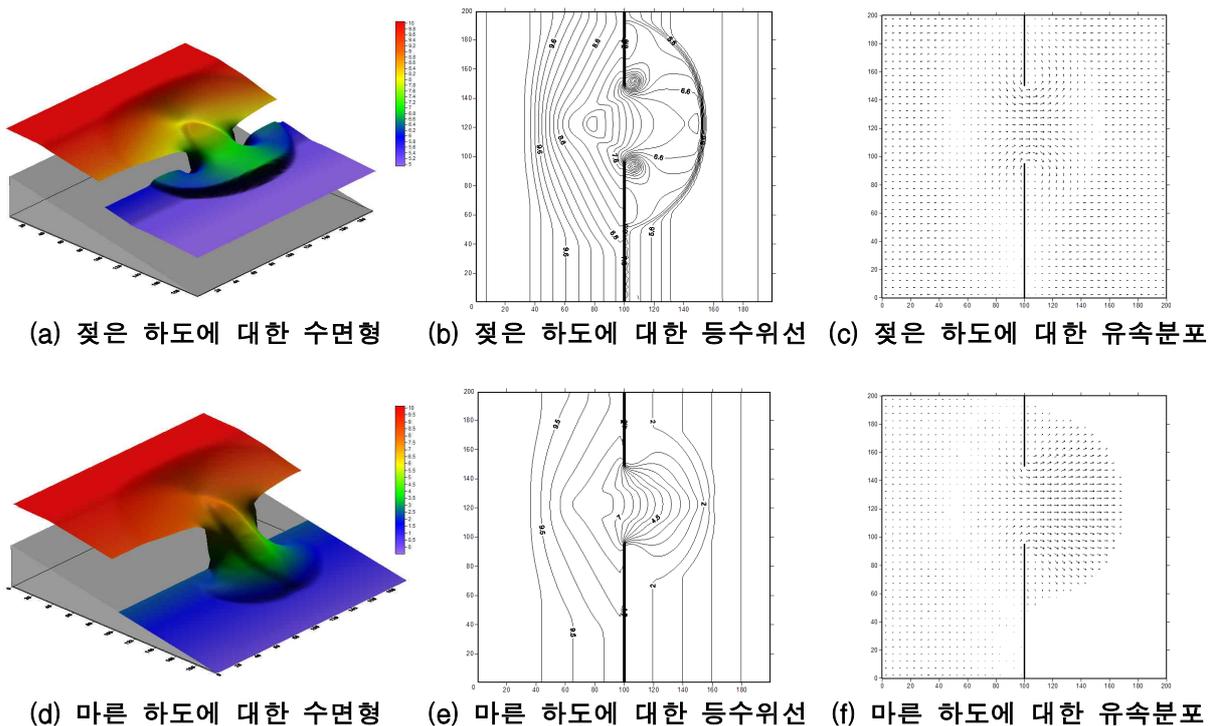


그림 1. 모의 결과에 대한 수면형, 등수위선, 유속분포도

3.1 2차원 보 붕괴 해석

2차원 보의 붕괴에 의한 모의를 위해 실측치가 존재하는 2차원 보 붕괴 모의와 충격파를 모의하였다. G. S. Stelling 과 S. P. A. Duinmeijer는 댐 상류부 및 하류부에 초기 수심이 존재하는 경우에 대해서 붕괴실험을 실시하였다.

본 연구모형을 이용하여 실험과 같은 조건으로 모의를 실시하였다. 초기조건으로 보 상류부의 수심을 0.6m, 하류부 수심은 0.05m로 부여하였으며, 0.4m 길이의 붕괴가 제방 중심부에서 일어난 것으로 가정하였다. 보 중앙부가 갑작스럽게 붕괴되기 전의 초기 유속을 0.0m/s로 가정하였고, 경계는 모두 반사경계조건으로 처리하였다. 제내지의 조도계수는 매끄러운 콘크리트 바닥의 경우로써 $0.012ms^{-1/3}$ 로 가정하였다.

그림2는 3초와 18초에 계산된 수면형을 나타낸 그림이고, 그림3은 각 수위측정 지점에서 계측된 수위와 모의된 결과를 비교한 그래프이다. 모의 결과는 실측치와 비교하여 합리적 결과를 나타낸다고 볼 수 있으며, 붕괴부에서 수위가 실측치보다 높게 모의된 것은, 인위적 조작에 의한 수문의 개방시 나타날 수 있는 수심방향으로의 흐름 발생 등의 영향을 고려하지 못하는 2차원 모형의 한계 때문인 것으로 판단된다.

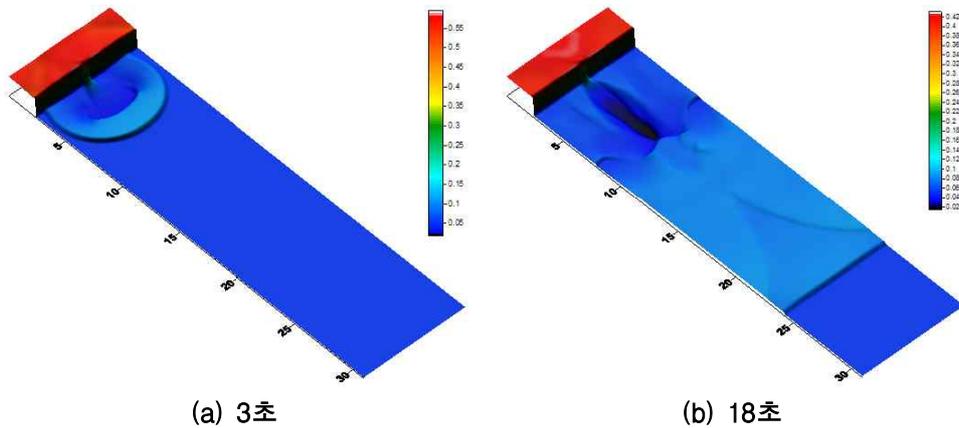


그림 2. 젖은 하도의 수면형

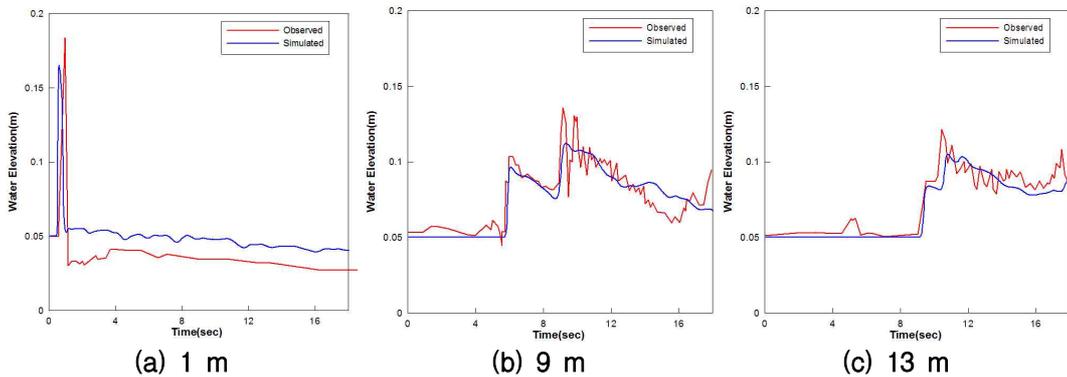


그림 3. 젖은 하도의 지점별 실측치 및 모의결과의 비교

4. 결 론

본 연구모형은 보 붕괴해석을 위한 2차원 하천범람 해석을 위해 개발되었으며, 모의결과는 해석해 및 기존의 연구결과와 일치되고 있어 적용성을 입증할 수 있었으며, 하천에서 발생할 수 있는

다양한 조건을 모의할 수 있어 향후 실제하천의 2차원 해석 및 범람모의에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나, 실제하천의 적용에 있어서 비구조적 격자 및 복잡한 지형의 효과적인 처리를 위해서는 여러 가지 제약조건들이 따른다. 또한 생성항의 효율적인 처리를 위한 추가의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Toro, E.F. (1999). *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*, 2nd Ed., pringer-Verlag, Berlin, Germany.
2. Q. Liang, A. G. L. Borthwick, G. Stelling, "Simulation of dam- and dyke-break hydrodynamics on dynamically adaptive quadtree grids", *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, vol. 46, No. 2, pp.127-162.