

동수압 및 분산 효과를 고려한 댐붕괴파와 범람 수치모의 Numerical Simulations of Dam-Break Flows and Inundation considering Nonhydrostatic Pressure and Dispersive Effects

김대홍*, 패트릭 라이넬**
Dae-Hong Kim, Patrick Lynett

요 지

댐붕괴파 (dam-break flow)나 지진해일에 의해 발생하는 undular bore와 충격파 (shock) 현상을 동수압 및 분산효과를 고려하여 수치모의를 수행하였다. 완전비선형 Boussinesq-type equations 모형을 이용하여, 동수압 및 분산 효과를 고려하였다. 방정식은 4차 정확도의 유한체적법을 이용하여 해석하였고, 시간적으로도 4차정확도의 기법을 이용하여 고차미분항에 대한 수치분산을 억제하였다. 다양한 경우의 1차원과 2차원 공간에서의 수치모의를 수행하고 검증을 수행하였다. 그 결과, 완전비선형 Boussinesq-type equations 모형은 천수방정식 (shallow water equations) 기반의 모형에서 재현이 불가능한 undular bore 등을 재현 하는 등, 전반적으로 천수방정식 기반의 모형 보다 물리적으로도 타당하고 정량적으로도 실험결과와 잘 일치하는 경향을 보였다. 즉, 댐붕괴파나 지진해일 등에 의한 범람 모의에 있어 동수압과 분산 효과의 중요성이 공학적으로도 매우 중요한 고려사항 임이 나타났다.

핵심용어 : Boussinesq-type equations model, nonhydrostatic pressure, dispersion, inundation, flooding, finite volume method

1. 서론

지속적으로 발생하는 홍수와 범람 등의 재해에 대비하기 위하여, 다양한 분야에서 기술개발이 이루어지고 있다. 이 중, 댐붕괴나 지진해일은 발생 시에 매우 큰 피해를 발생 시킬 수 있기 때문에, 이에 대한 활발한 연구가 수행 되고 있다. 댐붕괴파나 지진해일에 관한 수치해석 분야는 이들 현상으로 인한 흐름의 영역이 매우 넓고 이동경계(moving boundary)를 포함하고 있어, 계산을 효율적으로 수행하고, 수치적으로 안정적이며 물리적으로도 타당한 결과를 제공해주는 천수방정식을 기반으로 한 모형이 주로 개발되어 왔다.

1990년대부터 천수방정식을 수치적으로 해석함에 있어 상류와 하류를 동시에 안정적이고 정확하게 계산할 수 있는 다양한 수치해석 기법이 제시되었다. 또한 최근에는 상기 문헌에 제시된 다양한 수치해석 기법에 대하여, 지형경사와 같은 생성항(source term)을 포함한 경우에도, 물리적 및 수치적으로 타당한 해를 제공하는 수치해석기법에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다. Brufau 등(2004)은 Roe 기법을 이용하는 경우에 대하여 상기 주제에 대한 연구를 수행하였다. Crnjaric-Zic 등(2004)은 WENO 기법에 대하여 생성항과 플럭스항간의 균형을 이루는 해석기법을 제시하였고, Kim 등(2008)은 HLLC 기법과 MUSCL 기법을 이용하여, 임의의 지형에서 정상상태와 비정상상태에서 물리적으로 타당한 결과를 나타내는 수치모형을 제시하였다. 천수방정식을 보

* 정희원 · 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 조교수 · E-mail : dhkimhyd@uos.ac.kr

** Texas A&M University, Department of Civil Engineering, Associate Professor

다 정확히 풀기위한 수치해석기법 개발 이외에, 보다 다양한 침수양상을 해석하기 위하여, 제내지와 제외지 및 관망의 연계해석 등을 가능하게 하는 기능적 측면의 연구도 수행되고 있다(김지성 등, 2006). 또한 cut-cell 기법을 이용하여 적용상의 편의성을 높이고, 불규칙한 형상의 구조물 주변에서의 정확도를 높일 수 있는 연구 또한 수행되었다(김형준 등, 2009). 이와 같은 연구의 결과들은 보다 정확하고 타당한 흐름 예측 결과를 제공하였다.

그러나, Soares-Frazao와 Zech(2002)가 밝힌 바와 같이, 댐붕괴파는 정수압 분포를 가정하는 천수방정식으로 예측할 수 없는 secondary wave를 발생시킬 수 있다. 즉 수리구조물의 붕괴 등으로 인한, 순간적인 방류가 하천에 발생하는 경우, 정수압 분포를 가정하는 천수방정식은 그림 1(b)와 같이 하류단에 surge만을 발생시킨다. 그러나 Carmo (1993) 등이 수행한 실험에서는 그림 1(c)와 같이 surge이외에 secondary wave도 관측 되었다. 이와 같은 현상은 Matsuyama등 (2007)이 실험으로 재현한 지진해일에서도 관측되었고, 이와 같은 현상의 해석을 위해서, 동수압 효과와 분산 효과를 고려하여야 한다.

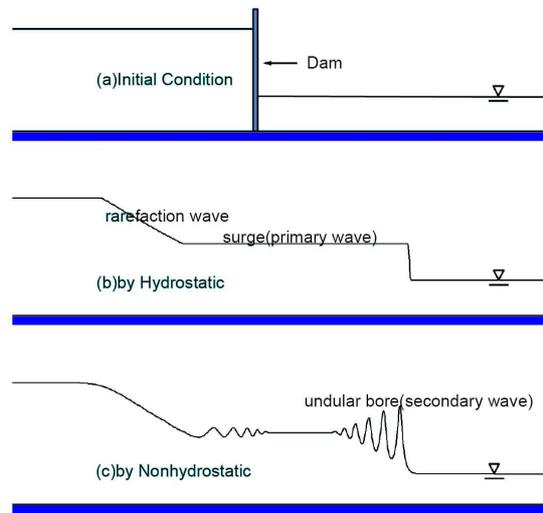


그림 1. 전형적인 댐붕괴파 문제의 수면곡선 양상

2. 지배방정식

2.1 Fully nonlinear Boussinesq equations

보존형의 비선형 Boussinesq-type 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} + H_c = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial HU}{\partial t} + \frac{\partial HU^2}{\partial x} + \frac{\partial HUV}{\partial y} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + HH_m^x + UH_c \\ = H\nabla \cdot (\nu_t^h \nabla \mathbf{U}) - H\nu_t^v \nabla S - \frac{\tau_x^b}{\rho} + R_b^x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial HV}{\partial t} + \frac{\partial HUV}{\partial x} + \frac{\partial HV^2}{\partial y} + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + HH_m^y + VH_c \\ = H\nabla \cdot (\nu_t^h \nabla \mathbf{U}) - H\nu_t^v \nabla S - \frac{\tau_y^b}{\rho} + R_b^y \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서, t 는 시간, x 와 y 는 공간을 나타낸다. $H = \zeta + h$ 는 총수심(total water depth)이며, ζ 는 수위, h 는 수심이다. $\mathbf{U} = (U, V)$ 는 유속벡터이며, U 와 V 는 각각 x 와 y 방향의 유속을 나타낸다. $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 이고, $S = (\partial U/\partial x + \partial V/\partial y)$ 로 정의되며, g 는 중력가속도이다. H_c , H_m^x 및 H_m^y 는 고차항(higher-order terms)으로 분산과 와도(vorticity)와 관련된 항이다. 고차항에 대한 보다 자세한 설명은 Kim 등(2009)에 기술되어 있다.

2.2 수치해석기법

기본적으로 유한체적법 (finite volume method)을 이용하여 방정식을 해석하였다. 구체적으로 이송항의 해석을 위해서는 4차정확도의 MUSCL TVD scheme을 이용하였다. 확산항의 해석을 위해서도 4차정확도와 2차정확도의 유한체적 기법을 이용하였다. 시간항에 대하여는 3차정확도의 Adams-Bashforth predictor 기법과 4차정확도의 Adams-Moulton corrector 기법을 이용하였다.

2.3 이동경계 기법

본 논문에서는 매우 간단한 물리적 조건을 이용한 이동경계기법을 이용하였다. 기본적으로 Liu 등 (1995)이 제시한, 수위와 지표 고도간의 상하 관계를 이용한 이동경계 기법을 이용하였다. 즉, 그림 2(a)와 같은 이동경계 지점에서, 계산체적 i 에서의 수위가 인접한 지표고보다 낮은 경우, 반사가 되며, 그림 2(b)와 같이, i 에서의 수위가 인접한 지표고 보다 높은 경우 인접 계산체적으로 흐름이 유입된다.

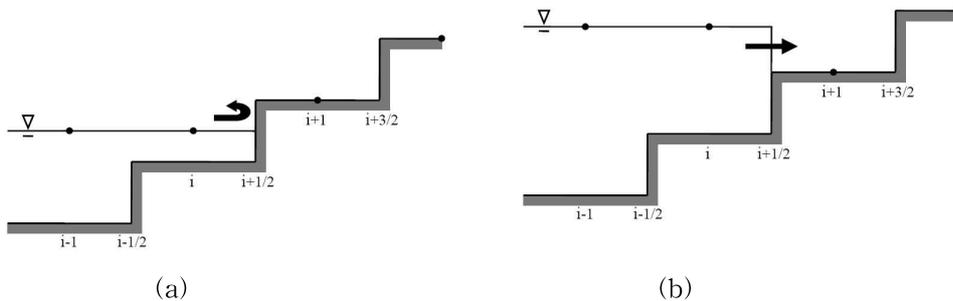


그림 2. 이동경계기법 개념도

그러나 그림 3에 도시된 바와 같은 특수한 경우의 지형상에서 수치계산을 수행하는 경우, 비물리적인 결과를 얻을 수 있다. 그림 3의 경우, $\Delta\zeta$ 가 충분히 큰 경우, 계산체적 i 의 물은 $i+1$ 체적의 흐름에 영향을 미치지 않는 반면, 체적 $i+1$ 상의 물은 체적 i 의 흐름에 영향을 미칠 수가 있다. 따라서 이러한 경우에는 두 계산체적을 분리한 다음, $i+1/2$ 을 통과하는 플럭스를 각각 계산한 후, 두 가지 경우의 계산 결과를 합산하였다. 보다 자세한 설명은 Kim (2009)에 수록되어 있다.

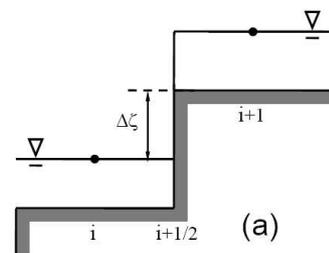


그림 3. 불연속한 비이동경계 조건

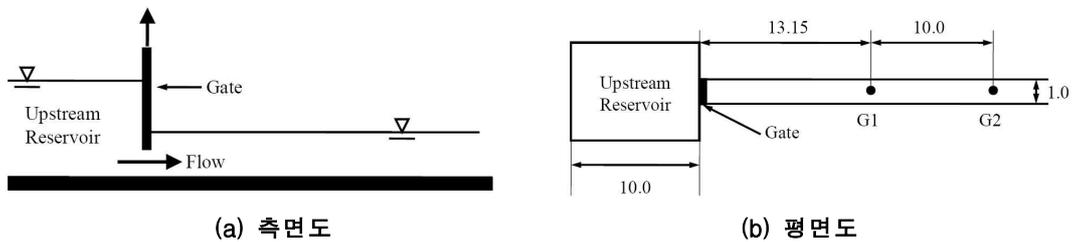
3. 수치모의 결과

3.1 순간적인 방류에 의한 Undular bore 발생 해석

본 절에서는 Boussinesq-type 방정식을 기반으로 하는 수치모형의 undular bore의 발생과 전파 과정 모의에 대한 적합성에 대한 검토를 하였다. 검증을 위하여, Soares-Frazao와 Zech (2002)가

수행한 실험 결과와 수치모의 자료를 비교하였다. 실험에서는 그림 4(a)에서와 같이, 상류 저수조와 하류 수로 사이에 위치한 수문의 하단부를 순간적으로 개방하였다. 그 결과 발생하는 하류 구간 수위변화를 그림 4(b)와 같은 위치에서 계측하였다. 하류 구간의 초기수심은 $h = 0.251m$ 이며, 수문을 통하여 방류된 단위폭당 유량은 $q = 0.059m^2/s$ 이다. 수치모의를 위하여, 격자의 크기는 $\Delta x = 0.05m$, $C_r = 0.5$ 및 $k_s = 0.0003m$ (roughness height)를 이용하였다.

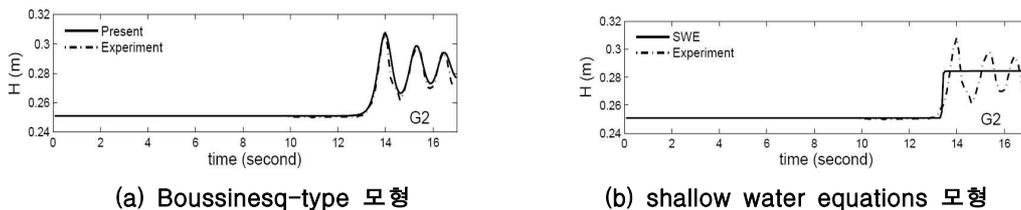
그림 5는 수위계 위치에서의 시간에 따른 수위 변화를 나타낸다. 실험결과와의 비교를 통하여 알 수 있듯이, 비선형 Boussinesq-type 방정식을 이용한 수치해석 모형이 undular bore의 물리적 특성을 타당하게 모의하고 있음을 알 수 있다. 반면, 천수방정식으로 해석한 결과에서는 undular bore의 발생이 관측되지 않았고, ζ 를 기준으로 실험결과와 최대 40% 정도의 오차를 발생시켰다. 이는 수치모형을 범람 등의 예측에 적용할 경우, 제방이나 방과제의 월류 양상에 매우 큰 변화를 줄 수 있는 양으로, 그 중요성이 매우 클 것으로 판단된다. 참고로, 그림 5에 도시된 천수방정식 해석 결과는, Boussinesq-type 방정식을 해석하기 위한 수치해석기법과 동일한 방법을 이용하여 구하였다.



(a) 측면도

(b) 평면도

그림 4. Soares-Frazao와 Zech(2002)의 수리실험 제원



(a) Boussinesq-type 모형

(b) shallow water equations 모형

그림 5. 시간에 따른 수위 변화 비교

4.2 댐붕괴파 해석

전형적인 댐붕괴파 흐름에 발생하는 undular bore 해석의 적정성 검증을 위하여 Carmo et al. (1993)이 수행한 실험에 대한 수치모의를 수행하였다. 상류부 저수지의 초기수위는 0.099m 였고, 하류단 하천의 수위는 0.051m로 주어졌다. 기타 자세한 실험에 대한 내용은 참고 문헌에 수록되어 있다. 그림 6은 순간적으로 발생한 댐붕괴파를 완전비선형의 Boussinesq-type equations 모형으로 해석한 결과로써, 동수압의 효과에 의해 undular bore의 발생을 물리적으로 타당하게 모의하고 있다. 그러나 천수방정식을 이용하는 경우 undular bore가 발생되고 있지 않아 정확한 수위변화 및 유속의 예측이 어렵다.

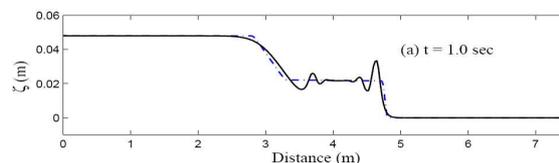


그림 6. 댐붕괴파 비교 결과. 실선: Boussinesq-type 모형, 점선: 천수방정식 모형

4.3 제방 월류와 월류로 인한 수위변화 모의

본 절에서는 범람 과정에 발생할 수 있는 제방의 월류와 월류된 물로 인하여 발생될 수 있는 수위 변화에 대한 모의를 수행 하였다. 검증은 위하여 Saville (1955)에 보고된 실험결과를 이용하였다. 즉 그림 6에 나타난 바와 같이 제방의 좌측에서 접근해 오는 흐름이 제방을 월류하고 있는 양상에 대한 검증과정으로, 그림 7은 제방 후면부에 위치한 수위계로 측정된 수치모의 결과와 실험치를 비교한 결과이다. 단순히 천수방정식을 이용하는 경우, 제방 후면부에서 재 발생된 파의 분산특성을 모의 할 수가 없어, 정확한 범람예측이 어렵게 된다(Dodd, 1998).

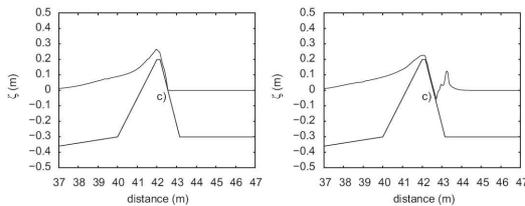


그림 6. 계산 수위곡선

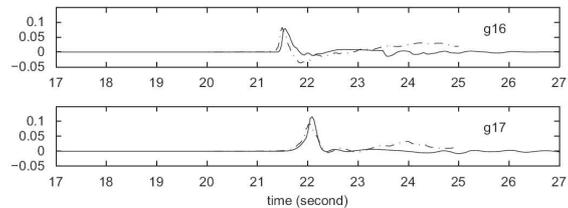


그림 7. 수위 결과 비교. 실선: 계산결과, 점선: 실험결과

참 고 문 헌

1. 김지성, 한건연, 이창희 (2006), 도시배수체계와 연계한 내수침수모형의 개발 및 검증. 한국수자원학회논문집, 39권, 12호, pp.1013-1022.
2. 김형준, 김정민, 조용식 (2009), 분할격자기법을 이용한 실험수조 댐붕괴파의 수치모의. 대한토목학회논문집, 29권, 2B호, pp.121-129.
3. Brufau, P., Garca-Navarro, P. and Vazquez-Cendon, M.E. (2004), Zero mass error using unsteady wetting - drying conditions in shallow flows over dry irregular topography. International Journal of Numerical Methods in Fluids, vol.45, pp.1047 - 1082.
4. Carmo, J.S., Santos, F.J., and Almeida, A.B. (1993). Numerical solution of the generalized Serre equations with the MacCormack finite difference scheme, International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol.16, pp.725-738.
5. Crnjaric-Zic, N., Vukovic, S. and Sopta, L. (2004), Balanced finite volume WENO and central WENO schemes for the shallow water and the open-channel flow equations. Journal of Computational Physics, vol.200, no.2, pp.512 - 548.
6. Dodd, N. (1998) Numerical model of wave run-up overtopping and regeneration. ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 124, 73 - 81.
7. Kim, D.H. (2009) Turbulent Flow and Transport Modeling by Long Waves and Currents, Thesis, Texas A&M University, USA.
8. Kim, D.H., Lynett, P.J., and Socolofsky, S. (2009). A Depth-Integrated Model for Weakly Dispersive, Turbulent, and Rotational Fluid Flows, Ocean Modelling, vol.27, pp.198-214.
9. Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Briggs, M.J., Kanoglu, U., Synolakis, C.E., 1995. Runup of solitary waves on a circular island. Journal of Fluid Mechanics 302, 259 - 285.
10. Matsuyama, M., Ikeno, M. Sakakiyama, T., and Takeda, T. (2007), A study of tsunami wave fission in an undistorted experiment. Pure and Applied Geophysics, vol.164, pp.617-631.
11. Soares-Fraza, S. and Zech, Y (2002b) Undular Bores and Secondary Waves Experiments and Hybrid Finite-Volume Modelling. Journal of Hydraulic Research, vol.40, no.1, pp.33-43.