

FLUMEN 모형의 홍수범람 적용성 검토

Application of Numerical Model - FLUMEN to Inundation

배용훈*, 조용식**
Yong-Hoon Bae, Yong-Sik Cho

요 지

본 연구에서는 홍수범람지도 제작을 위해 사용되는 수치모형의 검증을 수행하고자 한다. 검증할 수치모형은 스위스의 Beffa에 의해 개발된 FLUMEN(FLUvial Modeling ENgine)으로서 수심 적분된 2차원 비선형 천수방정식에 불규칙 삼각망을 이용한 유한체적법(finite volume method)이 적용된 수치모형이며 스위스, 독일, 오스트리아 등에서 홍수범람해석에 사용된 바 있는 모델이다.

FLUMEN 모형의 검증을 위하여 범람해석시 가장 중요한 문제인 이동경계조건(moving boundary condition)을 포함하고 있는 원형섬에서의 고립파에 처오름높이를 계산하여 수리모형실험 결과와 비교한다. 수리모형실험은 미국 육군 공병단 산하의 해안공학연구소(CERC, Coastal Engineering Research Center)에서 수행되었으며(Liu 등, 1995) 수조의 중앙에 높이 0.625m, 해저지름 7.2m, 경사각 14.04°의 원형섬이 위치한다. 본 연구 결과, 수치해석으로 계산된 섬에서의 실제 처오름높이와 입사파의 파고의 비(R/A)는 수리모형실험의 결과와 어느 정도 일치하였다.

핵심용어 : 홍수범람해석, FLUMEN, 이동경계조건, 처오름

1. 서 론

우리나라는 최근 10년 간 매년 홍수로 인하여 연평균 106명의 인명피해와 6,811억원의 재산피해를 겪고 있다. 따라서, 반복되는 홍수를 대비하고 피해를 줄이기 위해 하천제방, 댐 및 저류지 계획 등 각종 홍수방어 대책을 지속적으로 수립하여 홍수에 대비해오고 있다. 그러나, 최근 대두되고 있는 환경문제와 생태계 보존과 같은 이유들로 인해 하천내의 대규모 수공구조물 건설은 점차 어려움에 직면해 가고 있으며, 구조물의 설계 빈도를 초과하는 홍수가 발생할 경우, 그대로 막대한 피해를 입게 되어 이러한 홍수가 발생할 때마다 복구공사 등이 반복되고 있는 실정이며 이에 막대한 비용이 소모되는 등 구조물만을 이용한 홍수 피해 저감 대책은 점차 한계를 보이고 있는 상황이다. 따라서 이러한 구조적 홍수피해 저감 대책의 한계를 극복하기 위한 비구조적인 대책의 일환으로서 수치해석을 통한 홍수범람지역 산정 및 홍수범람지도 제작이 미국과 일본 등지에서 이미 수행되고 있거나 완료한 상태이다.

본 연구에서는 이러한 홍수범람지도 제작을 위해 사용되는 수치모형의 검증을 수행하고자 한다. 검증할 수치모형은 스위스의 Beffa에 의해 개발된 FLUMEN(FLUvial Modeling ENgine)으로서 스위스, 독일, 오스트리아 등에서 홍수범람해석에 사용된 바 있는 모델이다. FLUMEN 모형의 검증을 위하여 범람해석시 가장 중요한 문제인 이동경계조건(moving boundary condition)을 포함하고 있는 원형섬에서의 고립파에 처오름높이를 계산하여 수리모형실험 결과와 비교한다.

* 정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정 · E-mail : brave79@ihanyang.ac.kr
** 교신저자 · 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수 · E-mail : ysc59@hanyang.ac.kr

2. 지배방정식과 수치모형

FLUMEN 모형은 수심 적분된 비선형 천수방정식에 불규칙 삼각망을 이용한 유한체적법(finite volume method)이 적용된 수치모형으로 하천의 합류점이나 만곡부분과 같이 수학적으로 복잡한 해석에 적합한 상용 모형으로 알려져 있다.

FLUMEN의 지배방정식은 수심 적분된 비선형 천수방정식으로서 보존형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \mathbf{S} = 0 \quad (1)$$

방정식 (1)에서 보존형 변수 벡터 \mathbf{U} 는 수심 h 와 비유량 q 와 r 의 향으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (2)$$

한편 x 및 y 축의 flux 벡터 \mathbf{E} , \mathbf{G} 와 source 벡터 \mathbf{S} 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} \frac{q^2}{h} + \frac{g}{2} h^2 \\ \frac{qr}{h} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \frac{r}{h} \\ \frac{qr}{h} \\ \frac{r^2}{h} + \frac{g}{2} h^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho} \\ gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 g 는 중력가속도, ρ 는 유체의 밀도, z_b 는 하상고도, τ_b 는 하상전단력이다. 비선형 천수방정식들은 정수압 분포가 가정된 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도되었다.

하상전단력을 평균흐름속도에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{c_f}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{c_f} \quad (4)$$

식 (4)에서 $u = q/h$, $v = r/h$ 이다. 마찰계수 c_f 는 Manning-Strickler의 경험적인 마찰법칙에 의해서 다음과 같이 정의된다.

$$c_f = \frac{h^{1/6}}{n\sqrt{g}} = \frac{k_s h^{1/6}}{\sqrt{g}} \quad (5)$$

식 (5)에서 n 은 Manning의 조도계수이고 k_s 는 k-Strickler 계수이다.

FLUMEN 모형은 전체 계산영역에서 불규칙 삼각망을 적용한다. 지배방정식 (1)을 임의의 i 번째 삼각망에 대하여 식 (6)처럼 적분하여 유한체적법을 이용할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{A_i} \frac{dU}{dt} d\Omega = - \int_{A_i} (E_x + G_y) d\Omega + \int_{A_i} S(U) d\Omega \quad (6)$$

식 (6)에서 A_i 는 삼각형의 면적이다.

FLUMEN 모형에서는 홍수범람과 같은 충격파를 모의하기에 적합한 Roe(1981)의 FDS(flux difference

scheme)가 사용되어 수치해의 진동을 크게 완화시킨다. FDS는 원래 Euler 방정식의 적용에서부터 발전되었으며 쌍곡선형 천수방정식에도 적용이 가능하며(Glaister, 1988), 특히 충격파나 점성흐름의 계산에 있어서 기존의 방법들에 비해 보다 뛰어난 모의를 수행한다(van Leer et al., 1987).

3. 수치해석

FLUMEN 수치모형의 적용성을 검증하기 위하여 원형섬에서의 고립파에 처오름높이를 계산하여 수리모형실험 관측결과와 비교하였다. 수리모형실험은 미국 육군 공병단 산하의 해안공학연구소(CERC, Coastal Engineering Research Center)에서 수행되었으며(Liu 등, 1995), 그림 1과 같이 가로 폭이 30m이고 측벽의 길이가 26m인 직사각형 수조의 중앙에 높이 0.625m, 해저저를 7.2m, 비탈면 경사각 14.04°의 원형섬이 위치한다. 수리실험에서 사용된 입사파는 파봉선(wave crest length)이 6.041m, 13.256m, 20.117m 및 27.432m인 고립파였으며 비선형성의 크기를 나타내는 ϵ 은 수심(0.32m)에 대한 입사파의 파고비로 0.1이다. 또한, 원형섬을 중심으로 $\pi/8$ 간격으로 파고계를 설치하여 처오름높이를 계측하였다.

본 연구에서는 27.432m의 파봉선에 대한 수치모의 수행하여 실험결과와 비교하였다. 수치모형의 격자는 그림 2와 같이 하나의 면적이 0.1m²인 삼각망으로 구성하였고 계산간격은 0.05초로 하였다. FLUMEN 모형은 실제 하천의 적용에 최적화되어 있기 때문에 초기입력조건은 수위나 수심이 아닌 유량으로 정의되어야 한다. 따라서 본 수치모형에서는 입사파인 단일 고립파를 144개의 구간으로 나누어 구분구적법으로 산출한 유량을 입력조건으로 부여하여 모의를 수행하였다. 또한, 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 수조의 크기를 가로 길이 50m, 측벽 길이 150m로 변환하여 모의를 수행하였다.

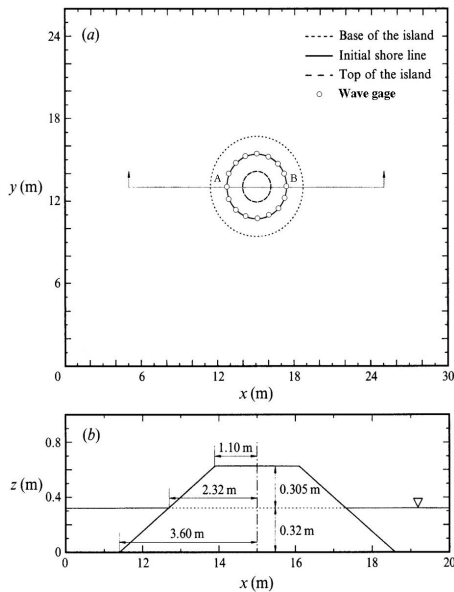


그림 1. 수리실험 모형장치 :
(a) 평면도 (b) 원형섬의 단면도

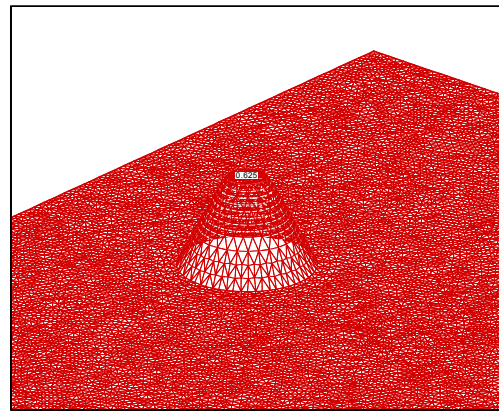


그림 2. FLUMEN 수치모형의 삼각망

그림 3은 본 연구에서 모의된 최대 처오름을 삼각망과 함께 도시한 것으로 입사하는 파가 중앙부에서 처오른 후, 섬으로 인하여 섬 양쪽으로 파가 분리되어 진행하면서 섬 주변에 계속해서 처오름을 발생시키다가 분리된 파가 섬 후면에서 다시 만나 뒤처오름을 크게 일으키는 양상을 잘 보여준다.

그림 4는 원형섬 주변에서의 유속 벡터를 도시한 것으로서 본 연구의 FLUMEN 수치모형이 섬으로 파가 입사한 후, 섬 주변에서 갇힌 파가 발생하여 섬 주변을 따라 진행하다가 분리되었던 파가 뒤처오름을 일으킨

후, 후면에서부터 입사해오는 간헐 파와 만나 반사하여 섬 주변을 빠져나가는 흐름 양상을 상당히 양호하게 재현하고 있다. 또한 벡터의 크기를 비교하여 보았을 때, 섬 후면에서 분리된 파의 충돌로 인한 처오름이 전면에서의 처오름보다 더 높은 처오름을 형성한다는 것을 알 수 있다.

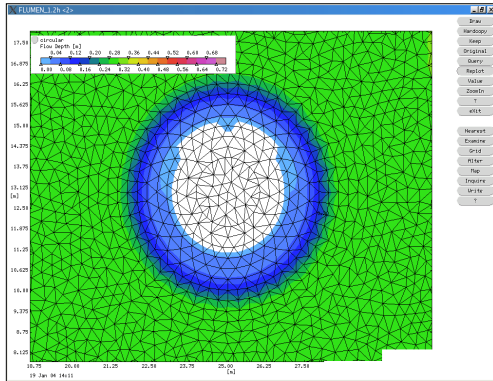


그림 3. 수치모의된 최대 처오름높이

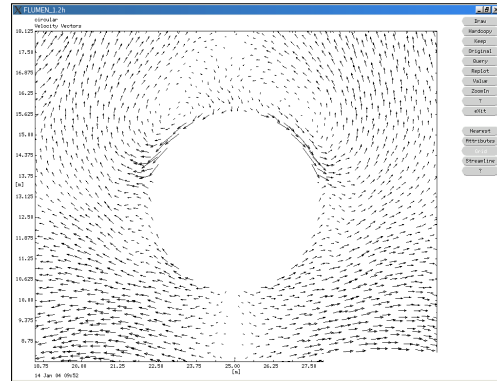


그림 4. 원형섬 주변의 흐름 벡터도

본 수치모형에서 계산한 최대 처오름높이를 수리모형실험에서 측정한 자료와 비교하여 그림 5에 도시하였다. x 축은 섬의 앞면 중앙으로부터 반시계 방향으로 $\pi/4$ 간격마다 측정한 각도로써 $x=0$ 은 섬의 전면 중앙부를, $x=\pi$ 는 섬의 후면 중앙부를 의미한다. 또한 R 은 섬에서의 실제 처오름높이이며 A 는 입사파의 파고로 0.032m이다.

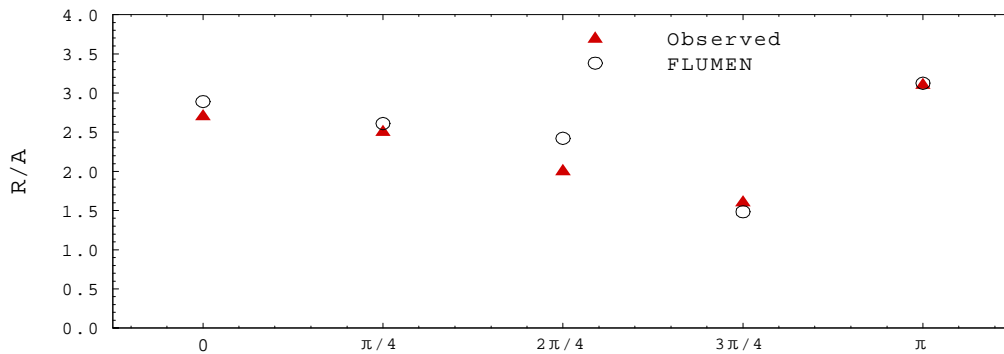


그림 5. 원형섬 주변에서의 최대 처오름 높이 비교

그림 5에서 FLUMEN 수치모형의 처오름높이가 수리모형실험의 관측치보다 전반적으로 다소 크게 나타났으나 큰 오차 없이 비슷한 양상을 보여주고 있다. 수치모형에서 발생한 오차의 가장 큰 원인은 입력조건으로서의 입사파인 단일 고립파의 유량을 정확하게 산출하지 못한 데에 있다. 또한 FLUMEN 수치모형이 삼각형 격자의 변의 중점에서 계산을 수행하여 그 값을 도시하기 때문에 유체와 원형섬의 경계에서 보다 정확한 결과가 도시되지 못한 점도 비교 결과의 오차에 영향을 주었다.

4. 결 론

본 연구에서는 비선형 천수방정식을 지배방정식으로 하고 불규칙 삼각망에서 유한체적법을 사용하는 홍수범람해석 수치모형인 FLUMEN의 적용성을 검증하였다. 모형의 검증을 위하여 원형섬에서의 처오름높이를 계산하여 그 결과를 수리모형실험(Liu 등, 1995)의 계측결과와 비교한 결과, 어느 정도 일치하였다.

아울러 입력조건인 입사파의 유량을 보다 정확하게 산출하고, 유체와 원형섬의 경계에서는 세밀한 삼각형 격자망을 구성하여 수치모의를 수행한다면 더 나은 결과를 예측할 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2002). 홍수지도제작(한강유역권 시범제작).
2. 김양수 (2002). “2002년 홍수 피해원인과 대책.” 한국수자원학회지, v.035, n.006, pp.11-19.
3. 인태훈, 이봉희, 조대회, 조용식 (2003). “범람 모의를 위한 이동경계조건.” 한국수자원학회논문집, 제36권, 제6호, pp. 937-947.
4. Beffa, C. (2003). FLUMEN User Manual v1.2.
5. Cho, Y.-S. (1995). “Numerical simulations of tsunami propagation and run-up.” Ph.D. Thesis, Cornell Univ., Ithaca, N.Y.
6. Glaister, P. (1988). “Approximate Riemann solution of the shallow water equations.” *Journal of Hydraulic Research*, 26(3), pp. 293-306.
7. Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Briggs, M.J., Synolakis, C.E. and Kanoglu, U. (1995). “Run-up of solitary wave on a circular island.” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 302, pp. 259-285.
8. Roe, P.L. (1981). “Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes.” *Journal of Computational Physics*, 43, pp. 357-372.
9. van Leer, B., Thomas, J.L. and Roe, P.L. (1987). “A comparison of numerical formulas for the Euler and Navier-Stokes equations.” AIAA 8th Computational Fluid Dynamics Conference, June 9-11, Honolulu, Hawaii. Paper AIAA-87-1104-CP.