동수역학적 홍수범람 수치모형 선정의 고려사항

김 대 홍 |
서울시립대학교 토목공학과 조교수
dhkimhyd@uos.ac.kr

1. 머리말

수치모형을 선정하고 사용하는 모든 경우에 해당되는 것이겠지만, 홍수범람을 위한 수치모형의 선정 역시, 사용목적에 따라 사용자가 모의하고자 하는 현상이 무엇인지, 현상해석을 위하여 필요한 기능은 무엇인지, 요구되는 정확도와 확보가능한 자료를 우선적으로 생각하고, 그를 바탕으로 후보 수치모형이 사용자가 필요로 하는 각각의 기능을 갖추었는지, 주어진 자료를 이용하여 얼마나 타당한 모의결과를 제공할 수 있는지 따져보며 최적의 수치모형을 선정하는 것이 가장 기본적인 선정 과정일 것이다.

이와 같은 내용을 자세히 다루는 것은 그 양이 너무 방대하고 경우의 수도 너무나 복잡하므로, 최근 개발이 매우 활발히 진행 중인, 평면공간에서의 수심적분형 동수역학적 수치모형을 이용하여 범람모의를 하는 경우에 한정하여, 일반적으로 고려해야할 사항에 대하여 간략히 기술하였다.

2. 범람모의시 고려사항

(1) 모형의 안정성

최근 들어 매우 활발히 연구개발이 진행되고 있는 분야로 홍수범람해석을 위해서는 댐붕괴파와 같은 충격파나 천이류를 수치적 발산 없이 안정적으로 해석할 수 있어야 한다. 반드시 순간적인 댐붕괴와 같은 극단적인 경우가 아니라 하여도, 복잡성을 지니는 실제 지형에서는 극부적으로 천이류 등이 발생할 가능성이 있기 때문이다.

(2) 각 항간의 수치해석적 균형

위에서 다룬 충격파와 천이류의 해석을 위하여 많이 쓰이는 유한체적기법은 주로 쌍곡선형의 Shallow Water Equations 또는 Saint-Venent Equations을 기반으로 하고 있다. 이는 Euler Equations를 해석하기 위한 기법에서 차용된 것으로, 이상적인 문제 특히 지형이 평평하거나 경사가 일정한 경우 매우 우수한 해석결과를 제공한다. 그러나 반드시 해결되야 하는 중요한 문제 또한 존재한다. 바로 임의의 지형상에서 물리적 특성을 나타내는 각 항간의 수치적 균형을 이루게 하는 것이 용이하지 않다는 것이다. 예를 들어, 수표면이 평평하면서 바닥이 계단형 지형을 이루는 경우, 특별한 외력이 작용하지 않는다면, 당연히 물은 정지 상태를 이룰 것이다. 그러나 쌍곡선

형의 천수방정식은, 같은 현상을 플럭스항은 평평한 바닥위에 높이가 다른 물기둥이 존재하는 것처럼 이해하고, 생성항은 원래의 상태와 같이 현상을 이해한다. 즉 평평한 바닥에 높이가 다른 두 개의 물기둥이 존재하는 현상과 바닥 경사에 의해 작용하는 힘에 의한 흐름을 해석하게 된다. 이 때, 두 가지 경우에 대하여 사용하는 수치해석 기법이 다른 경우, 수치적인 불균형이 발생한다. 일반적으로 쌍곡선형 편미분방정식을 푸는 방법으로 충격파 해석을 하는 경우, 이와 같은 불균형을 해결하는 것은 쉬운 문제가 아니다. 현재 매우 잘 알려진 기법 대표적인 것으로 SGM (Zhou et al., 2001)과 Gaarcia-Navarro 등(2000a, b)이 제시한 기법이 있다.

그러나 SGM 기법을 비롯한 대부분의 기법이 단점을 지니는데, 바로 지형의 불규칙도가 매우 클 경우나, 계단식 지형과 같은 불연속 구간이 존재하는 경우에는 여전히 비 물리적인 진동을 발생시킨다는 것이다. 이를 해결하기 위하여, Zhou 등(2002)과 Kim 등(2008)은 SGM을 개선한 수치기법을 제시하였다. 예를 들어 이들은 SGM과 달리, 그림 1에 나타난 바와 같이 지형에 계단과 같은 불연속 구간이 존재하는 경우에도 비물리적 수치진동의 발생 없이 물리적인 수치해석 결과를 제공한다. 범람구역 대상내에 제방이나 건물 등과 같은 불연속성이 심한 수중에 잠긴 구조물이 나타나는 경우, 이들의 처리 능력은 매우 중요한 인자가 된다.

(3) 일차원/이차원 공간 특성

일반적으로 하천에서는 일차원 모형을 주로 이용하고, 공학적 측면에서 볼 때, 그 정확도 또한 매우 우수한 것이 사실이다. 그러나 EAP 및 범람해석 등에서 기술자들은 극한의 현상과 결과치를 찾고 있으며 이를 예비하기 위한 수단을 강구하게 된다. 그러므로 일차원 모형과 이차원모형의 해석결과가 상이할 것으로 예상되는 경우에는 이차원 수치모형을 이용하여한다. 직사각형 단면의 하천을 따라 흐르는 댐붕괴파의 매우 상이한 수치해석결과를 보여주는 좋은 예가 Journal of Hydraulic Engineering에 발표된 바 있다. (Soares and Zech, 2002a). 해당 논문의 그림 17에 나타난 바와 같이, 일차원 모형과 이차원 모형은 만곡부의 영향으로 발생하는 흐름의 변화를 예측함에 있어 매우 큰 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 맥락에서, 비록 하천이지만 일차원과 이차원모형을 이용하여 동일한 대상을 모의하였을 경우, 그 결과가 상이할 것으로 판단된다면, 당연히 이차원모형을 이용하여야 할 것이다.

(4) 이동경계 기법

이상적인 흐름해석과 범람해석의 가장 큰 차이는 범람구역이 변화한다는 것이다. 일차원모형의 경우 유량과 흐름면적의 관계를 미리 정함으로써 간접적으로 이동경계현상을 모의할 수 있다. 그러나 이차원모형의 경우에는 이와 같은 관계가 성립하지 않으므로,

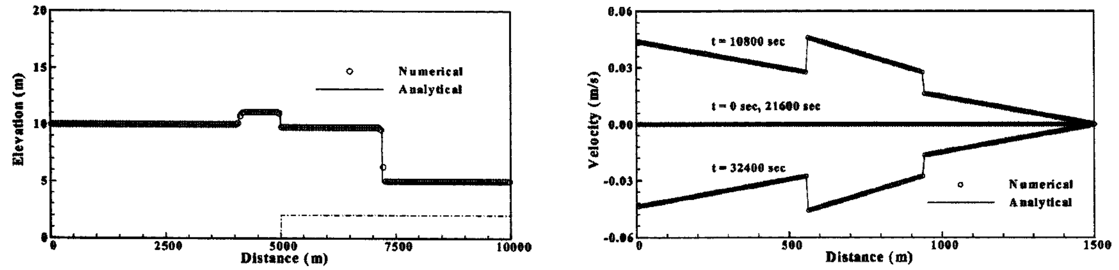

그림 1. 불연속 지형상의 수치해석 결과 (Kim et al., 2008)

물의 이동을 직접 해석하여야만 하며, 일반적으로 이를 이동경계기법(moving boundary technique)이라고 부른다. 이동경계 문제는 매우 다양한 기법을 이용하여 해석이 가능하며, 일반적으로 수위와 이웃격자의 바닥표고의 관계를 이용하는 기법과, 수치해석을 위한 격자망 자체를 변환하는 기법으로 분류될 수 있다. 모든 기법이 장단점을 지니고 있으므로, 모든 경우에 대하여 우위를 보이는 기법은 존재하지 않는다. 그러므로 일반적으로 해석적 또는 실험적으로 검토된 바 있는 자료 중 몇몇 특징적인 문제에 적용하여 기법의 타당성을 검토할 수 있을 것이다. 이동경계기법 검증에 대한 전형적인 예는 Dodd (1998)과 Kim and Lynett (submitted)에 자세히 수록되어 있다.

이 중에서, Dodd (1998)는 월류된 물이 제방의 반대편으로 재유입하며 수면을 교란하여 다시 전파되는 양상에 대한 수치모의를 수행하였다. 이는 범람 모의시에 매우 빈번히 나타날 수 있는 현상이다. 그러나 Shallow Water Equations를 기반으로 하는 수치모형을 이용하는 경우, 수치기법에 관계없이 흐름의 분산성을 모의 할 수 없음을 지적하였고 이는 실험 결과와 수치해석 결과 사이에 상이한 차이를 나타나게 하는 요인이다. 이와 관련된 내용을 다음 장에 다루었다.

(5) 동수압 및 분산성

많은 수리학 문헌에 기술 되어 있듯이, 점변류와 급변류의 가장 큰 차이중의 하나는 정수압분포의 가정여부일 것이다. 전형적인 예로, Soares and Zech (2002b)는 수리실험을 통하여 댐에서 방류된 물이 하천을 흘러가며, 매우 큰 Undular Bore를 발생시키며, 이는 Shallow Water Equations를 이용하여 해석할 수 없음을 보여주었다. 또한 위에 간략히 기술하였듯이, 분산성 (dispersion relation) 또한 흐름 양상 특히 수면 변화에 큰 영향을 줄 수 있다. 일반적으로 이와 같은 현상은 장파와 정수압 분포를 가정하는 모형으로는 해석을 할 수 없다. 즉 일반적으로 많이 이용되는 Shallow Water Equations 또는 Saint-Venent Equations 모형 또는 보다 단순화된 모형은 이와 같은 물리현상을 예측할 수 없으며, 수심적분 모형으로는 Boussinesq-Type Equations 모형과 같이 분산과 동수압의 영향을 고려할 수 있는 방정식을 기반으로 하는 동수역학 모형을 이용 하여야 한다. 당연히, 해안지역의 범람모의에 이들의 영향은 더욱 커지게 된다. 보다 자세한 내용은 Kim and Lynett (submitted)에 자세히 기록되어 있다.

(6) 수면위의 연직 구조물

절벽이나 매우 표고가 높은 연직한 방파제 또는 제방과 같은 수리 구조물이 있는 경우, 구조물에 접근하고 있는 흐름이나 파랑은 구조물에 반사된다. 예를 들면, 그림 2와 같이 방파제의 좌측부분은 직립제이며, 우측부분은 경사제로 구성되어 있는 경우가 해당될 것이다. 이 때, 구조물 위에 매우 작은 깊이라도 물이 존재하는 경우, 물리적으로 구조물 위의 물은 구조물 아래쪽으로 흘러내리는 등, 영향을 미칠 수 있다. 그러나 접근류는 접근류의 수위와 구조물의 바닥표고의 차이가 충분히 큰 경우에는, 구조물 위의 흐름에 영향을 미칠 수가 없다. 즉 구조물과 접근류의 경계면을 통과하는 플럭스를 두가지 경우로 구분하여 흐름을 해석하여야 한다. 그러나 일반적인 수치

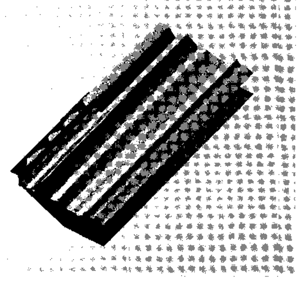

그림 2. 수면위의 연직구조물 월류 해석

모형을 이용하는 경우, 물리적으로 적절한 해석을 위한 플럭스를 구분하지 못한다. 이는 이동경계의 오차로 이어지거나, 경사아래 방향으로 흐르는 흐름의 연산을 불안정하게 만들 수 있다. 자세한 내용은 Kim (2009)에 수록되어 있다.

(7) 지형변동

정량적 측면에서, 가장 예측하기 어려운 것은 아마도 지형변동일 것이다. 특히, 급변류로 인하여 매우 단시간내에 좁은 구역내에서 발생하는 지형변화는 현재까지도 명확한 해석기법이 존재하지 않는다. 그러나 최근 들어 급변류와 지형변동을 연계하는 연구성과가 발표되고 있으며, 실무적으로 적용을 하기 위해서는 지속적인 연구가 필요한 분야로 판단된다.

(8) breaking-energy dissipation

댐붕괴파나 천이류에서 breaking 현상이 자주 관찰 되지만, 이를 정확히 모의하는 것은 매우 어려운 과제이다. 삼차원 현상인 물의 흐름을 수평의 일차원 또는 이차원공간으로 변환하는 과정은 많은 가정을 바탕으로 하고 있다. 따라서 많은 한계가 존재하게 되는데, 이 중에서 일반적으로 많이 무시되는 것이 breaking과 이로 인한 에너지 소산이다. 이와 같은 현상들은 작지 않은 차이로 수위를 변화시킬 수 있다. 그러나 breaking 등은 연직방향의 흐름성분이 상대적으로 큰 경우에 발생하게 되므로, 그 영향을 정확히 모의 하는 것은 매우 어려운 문제이다.

(9) 격자체계

수치해석을 수행하는 경우, 효율적 측면에서 보았을 때, 관심지역의 격자수는 증가시키고 그 이외의 지역의 격자수는 감소시키는 것이 바람직하다. 수치해석적 관점에서는, 수치확산을 최대한 감소시키는 방향으로 격자계를 구성시키는 것이 바람직하다. 이들은 불규칙격자계(unstructured grid system) 또는 곡선좌표계(curvelinear coordinate grid system)를 이용함으로서 가능하다. Cut-cell 또는 AMR을 이용하는 방법도 보다 효율적이고 물리적인 수치모의를 가능하게 할 수 있다.

(10) 편의성: GUI

정확한 추정은 할 수 없겠으나, 범람모의가 가능한 동수역학 모형은 수백가지 이상일 것이다. 그러나 가장 흔히 이용되고 있는 모형은 몇 가지에 지나지 않는다. 아마도 가장 큰 이유는 모형 이용측면에서의 편이성이 상당히 제약적이기 때문일 것이다. 복잡한 소스코드를 전부 이해해 가며, 이를 바탕으로 수치모의를 수행하는 것이 바람직하겠으나, 이는 실무적으로 매우 비효율적인 방법이다. 따라서 여러 가지 GUI 등을 이용하여, 작업의 효율을 높이고 사용자계층을 충분히 확보한 모형을 이용하는 것도 매우 현명한 방법중 하나일 것이다.

(11) 다양한 수리현상 모형화

홍수범람의 양상은 반드시 자유수면을 지니는 흐름만이 중요한 것이 아니다. 예를 들어 우수관거 흐름이 중요한 경우, 강우와 지하수 유입 등과 저류조 및 펌프장의 역할이 중요한 경우 등, 하나의 지배방정식과 해석체계로 모든 현상을 처리하기 어려우나 경우에 따라 그 비중이 매우 큰 현상이 존재한다. 이외에도 매우 다양하고 복잡한 현상이 존재하는데, 이들을 적절히 처리해 줄 수 있는 기능 여부 또한 범람모형 선정의 기준이 될 것이다. 또한 대규모 영역내에 건물군이나 수목군이 계산영역내에 포함되어 있는 경우, 모든 형상을 격자로 표현하여 흐름 구조를 파악하는 것이 보다 정확한 결과를 보장하겠지만, 실무적으로 이는 매우 어렵고, 대부분의 공학적 문제의 경우 비효율적인 방법이 될 것이다. 이 때, 효율적인

방법 중의 하나가 이들의 효과를 운동량방정식의 외력항으로 표현하는 것이다. 이 외에도 모의하고자 하는 대상 흐름의 특성에 맞는 다양한 기능을 얼마나 잘 갖추었는지도 고려할 만한 사항일 것이다.

3. 맺음말

상기한 바와 같이 몇몇 가지 동수역학적 홍수범람 모형의 선정시에 고려할 사항에 대하여 살펴보았으나, 모든 조건을 만족하는 수치해석 모형은 현재까지 존재하지 않으며, 앞으로도 그와 같은 모형개발은 현실적으로 어려울 것이다. 따라서 글 머리에 밝힌 바와 같이, 대상지 특성을 파악하고 사용자가 반드시 필요로 하는 기능의 우선순위를 적절히 선별한 후, 최적의 모형을 선정하거나 개발하는 것이 원칙이자 현실적인 방법일 것이다.

참고문헌

1. Dodd, N. (1998) “Numerical Model of Wave Run-up, Overtopping and Regeneration.” Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 124, 73-81.
2. Kim, D.H. (2009) Turbulent Flow and Transport Modeling by Long Waves and Currents, Thesis, Texas A&M University, USA.
3. Kim, D. H. and Lynett, P. (submitted) "Dispersive and Nonhydrostatic Pressure Effects at the Front of a Nonlinear Long Wave."
4. Kim, D.H., Cho, Y.S., and Kim, H.J. (2008) “Well Balanced Scheme between Flux and Source Terms for Computation of Shallow-Water Equations over Irregular Bathymetry.” Journal of Engineering Mechanics, 134, 277-290.
5. Soares-Frazao, S. and Zech. Y. (2002a) “Dam Break in Channels with 90° Bend.” Journal of Hydraulic Engineering, 128, 956-968.
6. Soares-Frazao, S. and Zech. Y. (2002b) “Undular Bores and Secondary Waves Experiments and Hybrid Finite-Volume Modelling.” Journal of Hydraulic Research, 40, 33-43.
7. Zhou, J.G., Causon, D.M., Mingham, C.G., and Ingram, D.M. (2001) “The Surface Gradient Method for the Treatment of Source Terms in the Shallow Water Equations.” Journal of Computational Physics, 168, 1-25.
8. Zhou, J. G., Causon, D. M., Ingram, D. M., and Mingham, C. G.(2002) “Numerical solutions of the shallow water equations with discontinuous bed topography."Int. J. Numer. Methods Fluids, 38, 769-88.
9. Garcia-Navarro, P. and Hubbard, M.E. (2000a) “Flux Difference Splitting and the Balancing of Source Terms and Flux Gradients” J. Comput. Phys. 165, 89-25.
10. Garcia-Navarro, P. and Vazquez-Cendon, M.E. (2000b) “On Numerical Treatment of the Source Terms in the Shallow Water Equations” Computers Fluids 29, 951-79.