

# 홍수범람 모의를 위한 자유 소프트웨어 활용

## Application of free software for flood simulation

유순영\*, 안현욱\*\*  
Soonyoung Yu, Hyunuk An

### 요 지

최신의 수치 해석 방법을 적용하여 개발되고 있는 자유 유체역학 소프트웨어를 소개하고, 비교적 사용이 용이한 자유 소프트웨어 Gerris를 홍수범람 모의에 활용한 결과를 보여주고자 한다. 도시 지역 돌발 홍수 범람 모의를 위한 Gerris의 신뢰도 검증을 위해 Gerris를 유럽 IMPACT(Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty) 프로젝트에서 수행한 도시지역 홍수실험을 모의하는데 적용해 보았으며, 모의 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치하여 Gerris가 도시 지역 돌발 홍수 모의에 적합함을 보여주고 있다. 학교 및 연구기관을 중심으로 Gerris와 같은 자유 소프트웨어를 널리 활용하고 개발에 참여할 경우, 국내 홍수범람 수치모형의 개발 역량이 강화되는 토대를 만들 수 있을 것이며, 수공학 전문가의 최신의 소프트웨어를 저비용으로 하천 관리 및 홍수 관리에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어 : 자유 소프트웨어, Gerris, 홍수범람, 도시지역 돌발홍수, 적응적 메쉬 세분화**

## 1. 서론

홍수 관리를 위해 수치 모형이 널리 사용되고 있다. 물리적 현상을 기초로 개발된 수치 모형이 돌발 강우나 댐 붕괴와 같은 사건으로 인한 홍수 피해를 예측하는데 도움이 되기 때문이다. 2010년 대한토목학회 정기학술대회 발표 자료에 따르면, 국내에는 HEC-RAS와 함께 RMA2, TUFLOW, FLOW3D, CCHE2D 등이 사용되고 있다. 이들 소프트웨어는 사용자 인터페이스를 가지고 있으며, 입력값과 출력값을 쉽게 다룰 수 있도록 전처리 및 후처리 도구를 완비하고 있다. 그러나 이들 소프트웨어는 소스 코드가 공개되지 않아 지배 방정식 및 수치 해석 방법을 확인할 수 없고, 프로그램이 제대로 운영되기 위해서는 입력인자를 조절해야 하며, 프로그램의 실행 시간도 길다.

본 논문은 최신의 수치 해석 방법을 활용하여 지속적으로 개발되고 있는 자유 소프트웨어(free software)를 소개하고, 비교적 사용이 용이한 Gerris를 도시지역 홍수 범람 모의에 활용한 결과를 보여주고자 한다. 자유 소프트웨어 사용자는 과학적인 유체 전산 모사와 효율적인 지형 관리를 위해 소스 코드를 확인 및 수정할 수 있으며, 다양한 컴퓨팅 자원을 활용하여 프로그램의 실행 시간을 단축시킬 수 있다. Gerris는 유체 전산 모사를 위해 개발된 자유 소프트웨어로, 현재 최초 개발자(Stephane Popinet)와 함께 전 세계 많은 사용자들이 개발 및 버그 수정에 참여하고 있다. National Institute of Water and Atmospheric research(뉴질랜드)와 Institut Jean le Rond d'Alembert(프랑스)가 후원하는 Gerris는 Euler, Stokes, Navier-Stokes 방정식과 선형 및 비선형 천수방정식을 풀며, GNU Triangulated Surface Library를 사용하여 메쉬를 자동 생성한다. 적응적 메쉬 세분화(adaptive mesh refinement) 기능이 있으며, 복잡한 지형도 자동적으로 메쉬를 생성할 수 있다. MPI 병렬 라이브러리를 이용하여 병렬 연산 처리를

\* 정회원 · 국가수리과학연구소 계산수리과학연구부 연구원 · E-mail : [s7yu@nims.re.kr](mailto:s7yu@nims.re.kr)

\*\* 정회원 · 국가수리과학연구소 계산수리과학연구부 연구원 · E-mail : [hyunuk@nims.re.kr](mailto:hyunuk@nims.re.kr)

수행하고, Gfsview라는 시각화 도구와 함께 개발되고 있으며, ArcGIS와 파일 교환도 가능하다.

## 2. Gerris의 수치해법

천수방정식은 레이놀즈(Reynolds) 방정식을 수심 적분하여 유도되며, 질량 보존과 운동량 보존을 나타낸다. 와점성(Eddy viscosity), 전항력, 표면응력(surface stress)을 무시할 경우, 보존형태의 2차원 천수방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = \frac{-\tau_{bx}}{\rho} - gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} = \frac{-\tau_{by}}{\rho} - gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (3)$$

여기서  $h$ 는 수심,  $\zeta(=h+z_b)$ 는 수위,  $z_b(=-h_s)$ 는 하상고,  $u$ 와  $v$ 는  $x$ 와  $y$  방향으로 수심 평균된 유속,  $t$ 는 시간,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho$ 는 물의 밀도이고,  $\tau_{bx}$ 와  $\tau_{by}$ 는 하상마찰응력(bed friction stress)으로 하상의 거칠기가 흐름에 미치는 영향을 표현, 다음과 같은 경험식으로 추정될 수 있다.

$$\tau_{bx} = \rho C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \quad \text{and} \quad \tau_{by} = \rho C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

여기서 조도계수(bed roughness coefficient)  $C_f$ 는 Chezy friction law ( $C_f = g/C^2$  여기서  $C$ 는 Chezy coefficient) 또는 Manning coefficient,  $n$ 을 이용한  $C_f = gn^2/h^{1/3}$ 를 이용하여 산정한다.

방정식 (1)-(3)의 천수방정식을 풀기 위해 finite volume Godunov type 기법이 널리 쓰이고 있으며, 이 과정에서 근사 리만 해법(approximate Riemann Solver)이 흐름률(flux) 평가에 사용될 수 있다. 1990년 초 불연속면을 가지는 천수 흐름을 모사하는데 있어 리만 해법의 이점은 분명해졌으나, 리만 해법 사용하기 위해서는 방정식 (1)-(3)을 hyperbolic 방정식 시스템으로 재정리하여야 하며, 이를 위해 일반적으로  $gh\partial\zeta/\partial x$ (수면경사항)을 아래와 같이 인위적인 flux gradient와 생성항으로 나누게 된다.

$$gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} gh^2 \right) + ghS_{ox} \quad (5)$$

여기서  $S_{ox}$ 는  $x$ 방향으로의 하상경사, 식 (5)와 유사한 과정이  $y$  방향으로도 이루어진다. 하상 지형이 불균일할 경우 식 (5)의 과정으로 인해 수치적 불균형이 발생한다. 간단한 예를 들면 수면이 평평하면서 하상경사가 불규칙하다면, 당연히 식(5)의 좌변의 값은 0이 되어야 하지만 우변의 값은 첫 번째 항과 두 번째 항의 수치적인 해석기법이 다를 경우 그 합이 0이 되지 않을 수도 있다. Rogers et al.(2001)은 이러한 수치적인 불균형을 해소하기 위해 수면경사항을 아래와 같이 처리하였다.

$$gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} g(\zeta^2 + 2\zeta h_s) \right) + g\zeta S_{ox} \quad (6)$$

식 (6)의 우변을 살펴보면 식(5)와는 다르게 흐름이 수심이 아니라 수위에 의해서 자연스럽게 표현된다는 이점이 있다. 식 (6)를 이용하면 Roe의 근사 리만 해법에서 발생할 수 있는 수치적 불균

형이 완전히 제거되는 것이 확인되었으며, Gerris는 HLLC 근사 리만 해법과 MUSCL-Hancock 기법에 기초한 2차 정확도의 Godunov type 수치 기법을 이용하여, 식 (6)를 이용하여 천수방정식을 계산한다(Liang et al., 2004).

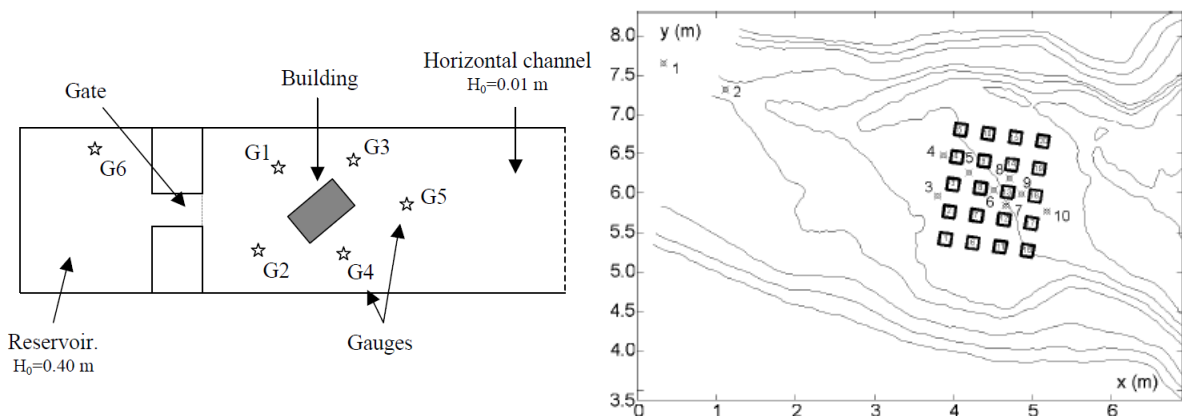
### 3. 모델 검증

모델 검증을 위해 Gerris를 유럽 IMPACT 프로젝트에서 수행한 도시지역 돌발홍수 범람 실험을 모의하는데 이용하여 보았다. 리눅스 기반의 Gerris를 윈도우 체계에서 사용하기 위해 VMware를 설치하여 가상 PC를 만들었다. 가상 PC에 리눅스 배포판 우분투를 설치하고 Gerris를 인터넷에서 다운받아 설치한 후, 리눅스 기반의 Gerris를 윈도우 운영체제에서 사용하였다.

#### 3.1 IMPACT 프로젝트

도시지역의 홍수 시나리오를 이해하고 수치적으로 모델링하기 유럽 10개국의 연구진들이 유럽 위원회의 지원 아래 IMPACT 프로젝트를 실시한 바 있다(2001년-2005년). IMPACT 프로젝트는 다양한 홍수 사건을 실제 발생시켜봄으로써 홍수 패턴을 이해하고자 하였으며, 특히 도시 구조물의 영향을 살펴보고자 하였다. 또한 모델의 신뢰도를 비교 검증하기 위해 전 세계 많은 모델러와 동시에 pilot scale의 홍수 사건을 모델링하였으며 일부 모델링은 블라인드 테스트로 이루어졌다.

본 논문에서는 도시지역 홍수 모의를 위한 Gerris의 신뢰도를 검증하기 위해 IMPACT 프로젝트에서 실시한 두 가지 실험을 활용하였다. 첫 번째 실험은 도시 건축물이 댐붕괴시 발생할 수 있는 사류(supercritical flow)에 미치는 영향을 살펴본 것으로 isolated building 실험이라 불린다(그림 1(좌)). 두 번째 실험은 이탈리아 Torc River Valley을 축소하여 실시한 실험으로 model city라 불린다(그림 1(우)). 흐름방향에 경사를 두고 위치한 빌딩이 댐붕괴시 발생하는 사류에 미치는 영향을 정밀히 관찰하기 위해 세밀한 격자 정보가 필요하였으며, 수치 모의시에는 구조물 주변으로 adaptive mesh를 생성하였다. model city 모의에 입력되는 지형 자료를 만들기 위해서는 ArcGIS 10에서 표고점을 활용하여 지형 래스터 파일을, 빌딩 정보를 활용하여 도시정보 래스터 파일을 각각 생성한 후 두 정보를 합하여 지형정보와 도시정보가 모두 들어있는 Digital Surface Model을 생성하였다.



**그림 1. IMPACT 프로젝트의 도시지역 홍수 실험: (좌) isolated building (Mignot and Paquier, 2009; 별표는 수심 관측지점); (우) model city (Testa et al., 2007; 숫자는 수심 관측지점)**

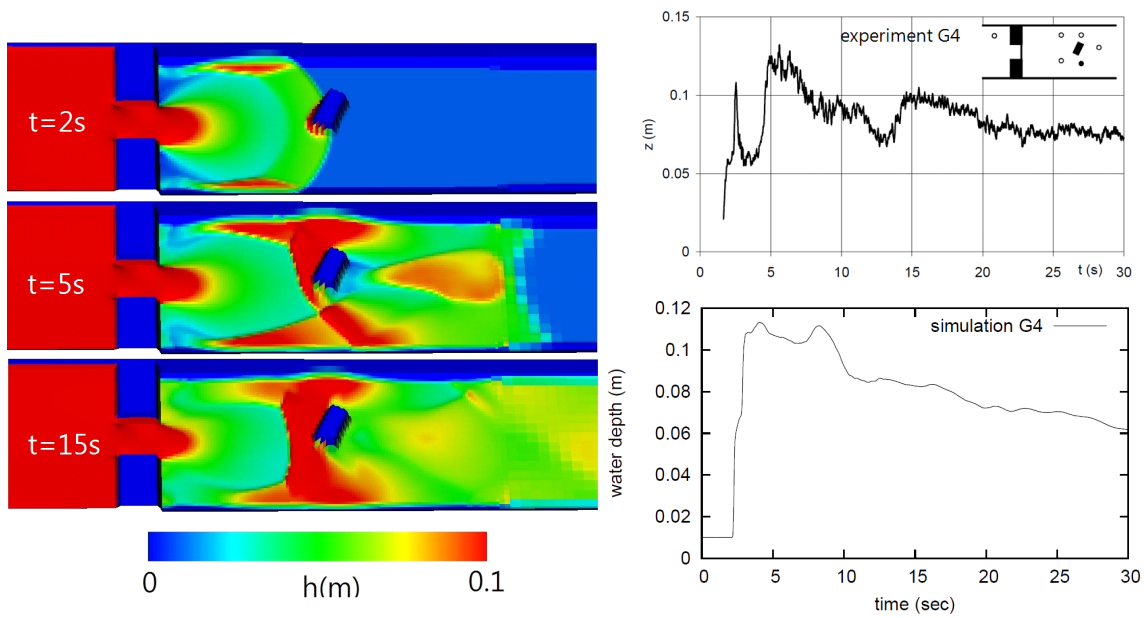


그림 2. Isolated building 모사 결과: (좌) 댐 붕괴 2, 5, 15초 후 수심 분포; (우) G4에서 수심 비교

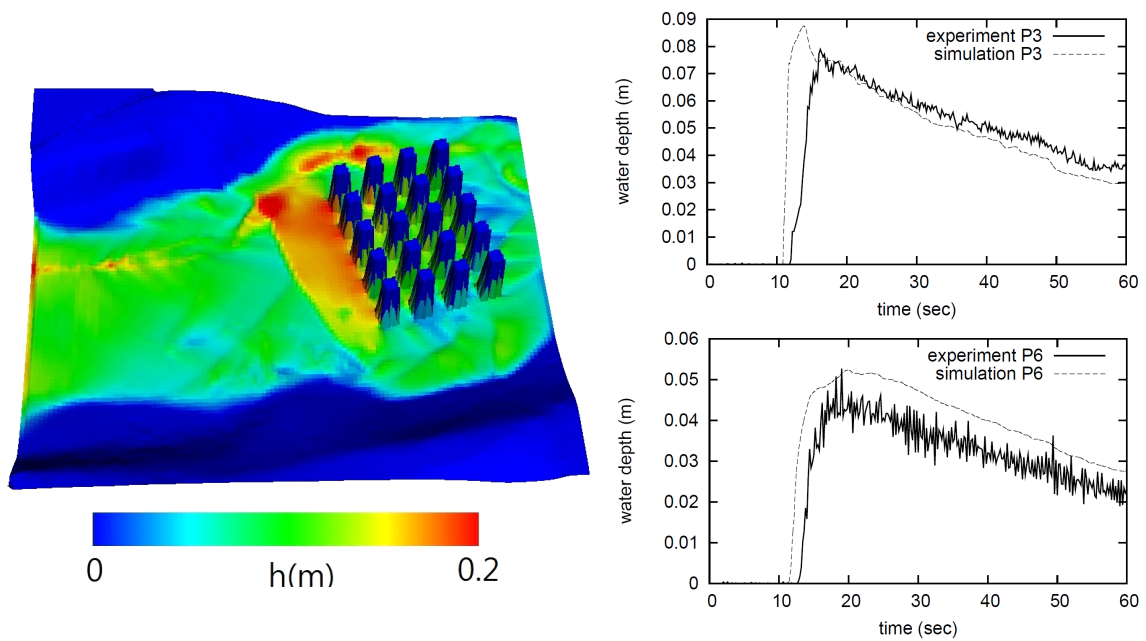


그림 3. model city 모사 결과: (좌) 유량 주입 후 15 초 후 수심 분포; (우) P3, P6에서 수심 비교

### 3.2 모델 검증 결과

Gerris를 이용해 isolated building 실험을 재현한 결과는 그림2과 같다. 댐붕괴파가 안정적으로 모사되었으며, 댐붕괴시 발생한 사류가 구조물(건물모형)과 만나면서 배수(backwater)되는 현상과 구조물 주변으로 상류와 사류가 혼재된 천이류가 성공적으로 모사된 것을 확인할 수 있다. 또한

지점 G4에서 실험 결과 얻어진 수심과 모의에서 얻어진 수심이 비교적 잘 일치하는 것이 확인된다. 비록 지면관계상 지점 G4의 결과만 비교하여 보여주고 있으나, 다른 다섯 지점에서도 모의 결과의 수심은 실험에서 얻은 수심과 비슷한 값을 보여주고 있었다.

model city를 모의한 결과는 그림 3과 같다. 왼쪽 경계면에서 유입된 유량으로 인해 생성된 빠른 흐름이 구조물(건물모형군)과 만나면서 배수(backwater)되고, 이 후 구조물 상류에 쌓인 물이 서서히 구조물을 지나 하류쪽으로 흘러가는 현상이 모사되고 있다. 실험결과 얻어진 수심과 모의 결과 얻어진 수심을 비교해 보면, 건물모형군 밖의 지점 P3뿐만 아니라 건물모형군 내의 지점 P6에서 얻어진 수심도 비교적 양호하게 일치하고 있다. 그 밖의 다른 지점에서도 전반적으로 모의결과와 실험값이 잘 일치하는 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

홍수 범람 모의에 활용할 수 있는 자유 소프트웨어 Gerris를 IMPACT 프로젝트의 도시지역 홍수 실험 모사에 적용하여 보았다. 홍수 범람 모의 결과는 실험 결과와 잘 일치하였으며, 이에 Gerris는 국내 도시 홍수 범람 모의 평가에 활용할 수 있을 것으로 보인다.

계산 수리 과학 분야는 리눅스를 기반으로 급속히 발전을 하고 있다. 그러나 국내 과학계는 수치프로그램의 개발에 취약하며 자유 소프트웨어의 활용도 적다. 대부분의 상용 소프트웨어가 자유 소프트웨어 또는 오픈소스 소프트웨어를 기반으로 개발되고 있음을 고려할 때, 최신의 수치 해석 방법을 활용하여 개발되고 있는 자유 소프트웨어를 널리 사용하고 개발에 적극 참여하면서 국내 과학계의 계산 수리 역량을 강화할 필요가 있다. 한편 MS 윈도우에 익숙해진 과학자들에게 리눅스 기반의 수치 계산이 어렵고 복잡하다는 고정관념이 지배적이다. 그러나 현재 다양한 리눅스 배포판이 사용하기 쉽게 제공되고 있으며, X 윈도우를 통해 MS 윈도우와 같은 사용자 편의 인터페이스도 제공한다.

홍수 범람 분야의 경우, 방재정책수립, 하천관리, 실시간 홍수예경보 등에 수치계산모델이 크게 요구되고 있다. 실무에 적용되는데까지는 시간이 걸릴 수 있으나, 학교 및 연구기관을 중심으로 리눅스 기반의 자유 소프트웨어를 널리 사용하고 개발에 적극 참여함으로써 국내 홍수 모형의 수치 계산 역량을 강화할 수 있는 기회를 마련하기 기대한다.

#### 참 고 문 헌

1. Liang, Q., Borthwick, A.G.L., Stelling, G. (2004), Simulation of dam- and dyke-break hydrodynamics on dynamically adaptive quadtree grids. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 46, pp. 127-162.
2. Mignot, E. and Paquier, A. (2003) Impact-Flood propagation The isolated building test case Cemagref's modelling, *Proceedings of the 3rd IMPACT Workshop*, Louvain La Neuve, BEL, 2003.
3. Rogers, B., Fujihara, M., Borthwick, A.G.L. (2001), Adaptive Q-tree Godunov-type scheme for shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 35, pp. 247-280.
4. Testa, G., Zuccala, D., Alcrudo, F., Mulet, J., Soares-Fraza, S. (2007) Flash flood flow experiment in a simplified urban district, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45 Extra Issue, pp. 37-44.