

적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법을 이용한 극한 도시홍수 실험 모의

Numerical Simulation of Urban Flash Flood Experiments Using Adaptive Mesh Refinement and Cut Cell Method

안 현 옥* / 유 순 영**

An, Hyunuk / Yu, Soonyoung

Abstract

Two-dimensional shallow water model based on the cut cell and the adaptive mesh refinement techniques is presented in this paper. These two mesh generation methods are combined to facilitate modeling of complex geometries. By using dynamically adaptive mesh, the model can achieve high resolution efficiently at the interface where flow changes rapidly. The HLLC Riemann solver and the MUSCL method are employed to calculate advection fluxes with numerical stability and precision. The model was applied to simulate the extreme urban flooding experiments performed by the IMPACT (Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty) project. Simulation results were in good agreement with observed data, and transient flows as well as the impact of building structures on flood waves were calculated with accuracy. The cut cell method eased the model sensitivity to refinement. It can be concluded that the model is applicable to the urban flood simulation in case the effects of sewer and stormwater drainage system on flooding are relatively small like the dam brake.

Keywords : Shallow water equation, Adaptive mesh refinement, Cut cell method, Urban flash flood

요 지

적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법을 적용한 2차원 천수방정식모형을 활용하여 구조물을 고려한 극한 홍수 실험을 모의하였다. 본 연구에 사용된 모형은 두 격자생성 기법을 함께 사용함으로써 복잡한 경계를 보다 적은 격자로 효율적으로 표현하는 것이 가능하며, 동적 적응 메쉬세분화기법을 사용하여 흐름이 빠르게 변하는 영역에서 정확도를 유지하면서도 효율적으로 계산하는 것이 가능하다. HLLC 리만근사해법과 MUSCL 기법을 적용하여 시공간상에서 2차정도를 유지하며, 댐붕괴파와 같은 불연속적인 흐름을 정확하게 모의할 수 있다. 모형의 검증을 위해 IMPACT 프로젝트에서 수행한 도시지역 극한홍수실험을 모의하였다. 실험결과와 모의결과가 양호하게 일치하는 것을 확인하였으며, 천이류 현상과 함께 구조물에 의한 홍수와 전달 양상이 의미있는 수준으로 모의된 것을 확인하였다. 또한 분할격자기법의 사용으로 모델의 격자 민감도가 향상되었다. 본 모델은 댐붕괴와 같이 내수침수현상이 지배적이지 않은 도시범람을 모의하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 천수방정식, 적응적 메쉬세분화, 분할격자법, 극한 도시 홍수

* 국가수리과학연구소 계산수리과학연구부 수치프로그램연구팀 연구원

Researcher, Numerical Program Team, Division of Computational Sciences in Mathematics National Institute for Mathematical Sciences

** 교신저자, 국가수리과학연구소 계산수리과학연구부 수치프로그램연구팀 연구원

Corresponding Author, Researcher, Numerical Program Team, Division of Computational Sciences in Mathematics National Institute for Mathematical Sciences, KT Daeduk 2 Research Center, 463-1 Jeonmin-dong, Yuseung-gu, Daejeon 305-811, Korea. Tel: 82-42-717-5714, Fax: 82-42-864-5706, E-mail: s7yu@nims.re.kr

1. 서 론

유체의 흐름을 컴퓨터 자원을 활용하여 계산하고자 하는 수치모형은 오늘날의 수리 및 수문분야에서 중요한 역할을 하고 있으며, 특히 천수방정식을 기본으로 한 수치모형은 하천수리, 댐붕괴파, 해일, 홍수범람 등을 모의하는데 광범위하게 활용되고 있다. 또한 지속적인 컴퓨터의 발달로 계산자원이 증가하면서 1차원 모형으로는 표현하기 힘든 현상들을 2차원 모형을 이용하여 빠르고 정확하게 모의할 수 있게 되었다. 천수방정식의 수치해석 기법은 격자를 기반으로 하는 유한차분, 유한요소, 유한체적 모형을 중심으로 발전되어져 왔으며 최근 10여 년간은 불연속 단면에서도 고정확도를 유지하는 많은 수치기법들이 천수방정식의 수치모형에 적용되어지고 있다.

직교격자를 사용한 2차원 모형은 고정확도 수치기법이 비교적 쉽게 적용될 수 있다는 장점이 있는 반면, 복잡한 지형을 표현하기 어렵다는 단점이 있다. 이로 인해 최근의 2차원 수치모형들은 비구조격자 또는 곡선구조격자에 기초한 유한체적법 및 유한요소법을 채택하고 있다(김병현 등, 2011; 배용훈 등, 2005; 최승용 등, 2009). 하지만 이러한 모형들은 지형이 복잡해질수록 격자 생성에 많은 시간과 노력이 필요하게 된다. 이들과는 다른 접근방법으로 직교격자에 적응적 메쉬세분화기법(adaptive mesh refinement method)과 분할격자기법(cut cell method)을 적용하는 방법이 있다. 1990년대 주목받기 시작하여 2000년대 이르러 천수방정식에 적용되기 시작한 이 방법은 고정확도 수치기법들을 비교적 용이하게 모형에 적용할 수 있는 직교격자의 장점을 가지면서, 비구조격자 및 구조곡선격자와 비교하여 복잡한 지형의 격자를 쉽게 생성할 수 있다. 또한 모의 중에 격자를 재구성하여 정밀한 해상도가 필요한 영역만을 고해상도로 표현하는 동적 적응 메쉬세분화기법(dynamic adaptive mesh refinement method)을 활용하여 보다 효율적인 계산이 가능하다.

적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법은 상호 보완하는 성격이 있어 서로 같이 사용되면 더욱 효율적인 격자 생성이 가능하다. 이에 대기, 가스, 해양, 다상흐름(multiphase flow) 등 다양한 분야의 수치모의에 적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법이 함께 적용된 바 있다(Mampitayarachchi, 2006; Griessbaum & Schmidt, 2009; Popinet & Rickard, 2007; Popinet et al., 2010; Lopez-Herrera et al., 2011). 2차원 천수방정식에 메쉬세분화기법과 분할격자기법이 적용된 예는 Causon et al. (2000; 2001), Liang et al. (2004), Popinet (2011a) 등에서 찾아볼 수 있다. Causon et al. (2000; 2001)는 HLL 근사리만해법(Harten, 1984)과 MUSCL(Monotone Upstream centred Scheme

for Conservation Laws)-Hancock기법(van Leer, 1984)을 적용하여 2차원 천수방정식을 해석하는 모형을 제안하였다. Causon et al. (2000; 2001)의 모형은 적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법을 사용하여 복잡한 형상의 경계조건을 표현하였으나 실험결과 등과 비교한 모형의 검증은 이루어지지 않았다. Liang et al. (2004)은 HLLC(Harten-Lax-van Leer Contact) 근사리만해법(Toro et al., 1994)과 MUSCL 기법을 수치기법으로 사용하고 적응적 메쉬세분화기법을 적용하여 댐붕괴파를 정확히 모의하였다. 특히 Liang et al. (2004)은 모의 중에 격자를 재구성하는 동적 적응 메쉬세분화기법을 사용하여 효율적으로 고해상도의 수치모의를 수행하였다. Popinet (2011a)은 Liang et al. (2004)과 유사한 수치모형을 사용하여 해일을 모의하였고, 이와 같은 기법이 대양과 같이 넓은 스케일과 항만과 같은 좁은 스케일을 동시에 모의해야 하는 해일모형에 적합함을 보여주었다. 국내에서는 김형준 등 (2009)이 분할격자기법을 사용하여 댐붕괴파를 모의한 바 있다.

위 단락에서 인용하고 있는 적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법을 적용한 논문 중 다수는 소스코드를 공개하고 있는 자유 소프트웨어인 Gerris(Popinet, 2003)를 사용하여 연구가 수행되었다. 그 중 2차원 천수방정식을 해석하고 있는 Liang et al. (2004)과 Popinet (2011a)의 경우, 적응적 메쉬세분화기법을 적용하였지만 분할격자기법은 적용되지 않았고, 현재 공개되어 있는 Gerris의 천수방정식 계산 모듈의 경우에도 분할격자기법이 지원되지 않고 있다. 본 연구는 분할격자기법을 사용할 수 있게 Gerris의 천수방정식 계산 모듈을 수정하였으며, 수정된 모형의 신뢰성 검증을 위해 도시지역 극한홍수실험을 모의하고 모의결과와 실험데이터를 비교 분석하였다.

2. 2차원 천수 방정식

천수방정식은 레이놀즈(Reynolds) 방정식을 수심 적분하여 유도되며, 질량 보존과 운동량 보존을 나타낸다. 점성, 전향력, 표면응력을 무시할 경우, 보존형태의 2차원 천수방정식은 아래와 같다.

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

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

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

여기서, h 는 수심, $\zeta(=h+z_b)$ 는 수위, $z_b(=-h_s)$ 는 하상

고, u 와 v 는 x 와 y 방향으로 수심 평균된 유속, t 는 시간, g 는 중력가속도, ρ 는 물의 밀도, τ_{bx} 와 τ_{by} 는 하상마찰응력이다. 하상마찰응력은 하상의 거칠기가 흐름에 미치는 영향을 표현하는 것으로, Eq. (4)와 같은 경험식으로 추정될 수 있다.

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

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

여기서, C_f 는 Chezy의 공식($C_f = g/C^2$ 여기서 C 는 Chezy 계수) 또는 Manning 계수(n)을 이용한 $C_f = gn^2/h^{1/3}$ 을 이용하여 산정한다.

방정식 (1)~(3)을 계산하는 과정에서 Gerris는 Godunov-type의 수치해법인 HLLC 근사리만해법을 사용하여 흐름 물질을 평가한다. 댐붕괴파 등의 불연속면을 가지는 흐름을 모의하는데 있어 리만 해법의 이점은 분명하나, 리만 해법을 적용하기 위해서는 방정식 (1)~(3)을 쌍곡선 편미분 방정식 시스템으로 재정리하여야 하며, 이를 위해 일반적으로 $gh\partial\zeta/\partial x$ (수면경사항)을 아래와 같이 인위적인 흐름 물 경사항과 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 하상경사로, Eq. (5)와 동일한 과정이 y 방향으로도 적용된다. 하상 지형이 불균일할 경우 Eq. (5)의 과정으로 인해 수치적 불균형이 발생할 수 있다. 예를 들면 수면이 평평하면서 하상의 경사가 불규칙하다면, Eq. (5)의 좌변값은 0이 되지만 우변값은 첫 번째 항과 두 번째 항의 수치적인 해석기법이 다를 경우 그 합이 0이 되지 않을 수도 있다. 이러한 수치적인 불균형을 없애기 위해 Rogers et al. (2001; 2003)은 수면경사항을 아래와 같이 처리하였다.

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

Eq. (6)의 우변을 살펴보면, Eq. (6)은 Eq. (5)와는 다르게 수심이 아니라 수위에 의해서 표현되었음을 알 수 있다. Eq. (6)을 이용하면 Roe의 근사 리만 해법(Roe, 1981)에서 발생할 수 있는 수치적 불균형이 완전히 제거되는 것이 확인되었다(Rogers et al. 2003). 이와는 다른 방법으로 Gerris에서는 Audusse et al. (2004)가 제안한 기법을 사용하여 이 문제를 해결하였다. "hydrostatic reconstruction" 이라고 불리는 이 기법은 1차 및 2차 정도의 수치기법에 광범위하게 적용이 가능하며 마름/젖음 상태에서도 수치적인 불균형이 효과적으로 제거된다(Audusse et al. 2005;

Popinet, 2011a). 방정식 (1)~(3)을 수심 h 에 기초하여 쌍곡선 방정식 시스템으로 정리하면 Eq. (7)과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} = \mathbf{s} \quad (7)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix}, \mathbf{f} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}g(h^2 + 2gh) \\ uwh \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} vh \\ vwh \\ u^2h + \frac{1}{2}g(h^2 + 2gh) \end{bmatrix}, \mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{bx}/\rho - g\zeta S_{ox} \\ -\tau_{by}/\rho - g\zeta S_{oy} \end{bmatrix}.$$

Gerris는 위 Eq. (7)의 방정식에 HLLC 리만근사해법과 MUSCL 기법을 적용하여 시간 및 공간상에서 2차정도를 가지는 모형이다. 국내에는 김대홍과 조용식(2004)이 HLLC 리만근사해법을 1차원 천수방정식에 적용한 바 있다. 본 논문에서 비록 고정확도 수치기법이 적용된 모형을 사용하고 있으나 이러한 기법들을 천수방정식에 적용하는 것은 위에 언급한 연구들을 포함하여 기존의 많은 학술논문들에서 검증된 바 있고, 또한 본 논문에서 말하고자 하는 핵심내용이 아니므로 상세한 이산화 전개과정은 생략하기로 한다.

3. 적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법

본 연구에 사용된 Gerris는 쿼드 트리(Quadtree) 격자 생성법을 사용하여 자동적으로 빠르고 안정적으로 격자를 생성한다. Gerris의 적응적 메쉬세분화기법과 쿼드 트리 격자 생성규칙을 간단히 정리하면 다음과 같다(Liang et al., 2004):

- 1) 계산 영역을 단위 크기의 정사각형에 맞게 크기를 조정한다.
- 2) 정사각형을 4개의 셀로 4분한다.
- 3) 특정 세분 조건에 의해 세분화가 필요하다면 개별 셀을 다시 4분한다.
- 4) 셀을 세분화하되, 이웃한 셀과의 길이 차이가 2배 이상 되지 않도록 한다.

격자의 세분화 조건으로 경계면의 형태, 지형 경사, 고도 등이 사용될 수 있으며, 동적 적응 메쉬세분화기법도 사용 가능하다.

분할격자기법은 하나의 셀을 유체부분과 고체부분으로 나누어 표현함으로써 복잡한 형상의 경계면을 보다 적은 격자 또는 직교격자를 이용해서 표현할 수 있도록 해주는 기법이다. 분할격자기법을 이용하기 위해서는 격자상에서 고체 경계면을 재구성하여야 하며, 새로 만들어진 경계면에서의 흐름물이 적절히 계산되어야 한다. 본 모형

은 Quirk (1994)와 같은 방법으로 고체 경계면을 재구성 하며, 작은 분할 격자로 인해 시간 격자 (Δt)가 작아지는 문제는 Quirk (1994)에 의해 제안된 셀 병합 방식을 이용하여 해결한다. 이와 함께 위에서 언급한 Liang, et al. (2004)의 쿼드 트리 격자 생성규칙에 cut셀과 이웃한 셀은 cut셀과 같은 해상도로 세분화된다는 조건을 추가하여 흐름률 계산이 원활하게 되도록 하고 있다. 분할격자기법이 적용되면 셀은 Fig. 1과 같이 유체셀 (flow cell), cut셀, 고체셀 (solide cell)로 구분되며, 유체셀의 경우에는 일반적인 유한체적법에서와 같은 방법으로 흐름이 계산된다. cut셀의 경우, 실제 유체의 체적은 셀의 체적과 셀에서 유체가 차지하는 비의 곱으로 계산되며 셀 간의 흐름률은 유체부분들 사이에서만 발생하는 것으로 가정하여 유한체적법으로 근사하여 계산을 수행한다 (Popinet, 2003). 본 모형은 셀 경계면에서의 흐름률 평가를 위해 HLLC 리만근사해법과 함께 MUSCL 기법을 사용하여 공간상 2차정도를 유지한다. MUSCL 기법은 predictor step과 correction step을 통해 Eq. (8)과 같이 셀 경계면의 변수벡터 u_k 를 보정하는데,

$$u_k = u_{i,j} + r_k \cdot \nabla u_{i,j} \quad (8)$$

여기서, $u_{i,j}$ 는 셀 중심에서 정의된 변수벡터이고, $\nabla u_{i,j}$ 는 셀 중심의 기울기벡터이며, r_k 은 셀 중심에서 셀 경계 k 로의 연직 거리벡터이다. cut셀의 기울기벡터 $\nabla u_{i,j}$ 을 평가함에 있어서 Causon et al. (2000; 2001)과 김형준 등 (2009)은 경계면을 중심으로 cut셀과 대칭으로 존재하는 가상격자를 고려하여 Causon et al, 2000의 Eqs. (19)~(22)와 같이 2차정도를 유지하는 기법을 사용하였다. 그러나 본 논문에서 사용된 방법은 주변 유체셀의 $u_{i,j}$ 정보만을 고려하여 cut셀의 $\nabla u_{i,j}$ 를 산정하여, cut셀 부근에서 수치해법의 공간정도는 1차정도가 된다 (Popinet, 2003). 또한 유체와 고체의 경계면에서 convective flux를 없애기 위해 cut셀 내 고체와 유체의 경계면에 대하여 연직방향의 속도성분을 0으로하여 흐름률을 계산하였다(Liang et al., 2007). 분할격자기법은 embedded boundary 기법으로도 불리며 이 기법에 관한 일반적인 논의는 Quirk (1994), Johansen & Colella (1998), Colella et al. (2006), Liao et al. (2010) 등에 잘 정리되어 있다.

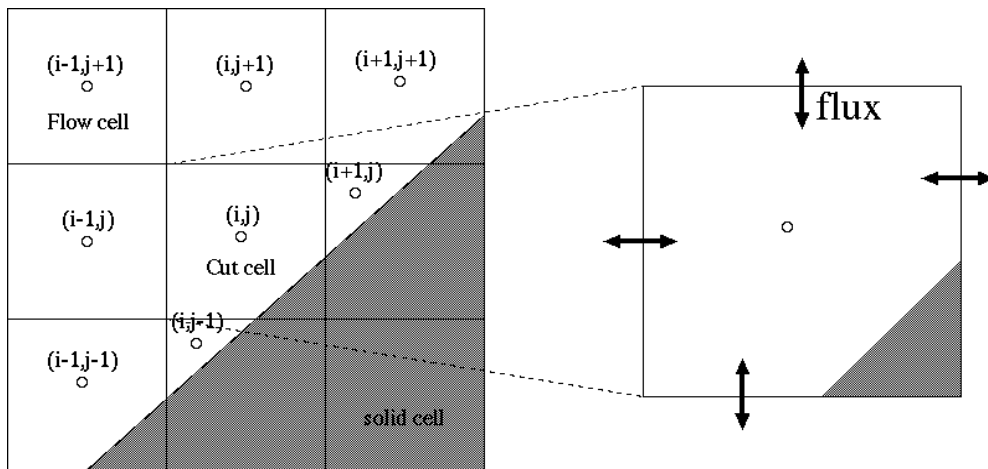


Fig. 1. Simple Description of Cut Cell Method

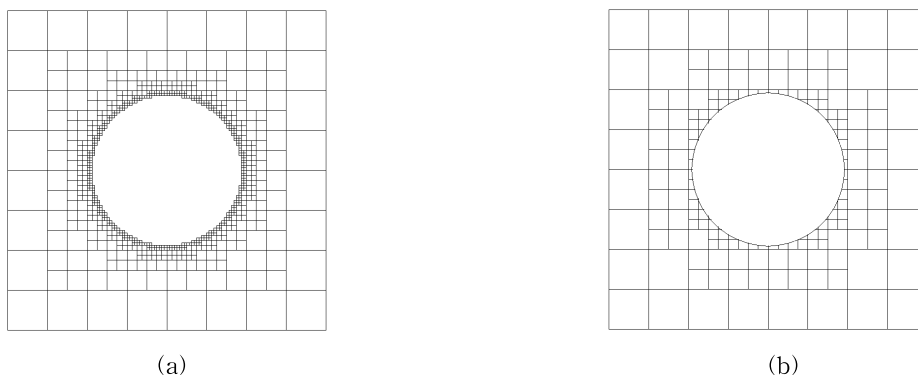


Fig. 2 Construction of Grids for a Circle Using (a) Only Adaptive Mesh Refinement Method (796 cells) or (b) Adaptive Mesh Refinement and Cut Cell Method (184 cells)

분할격자기법은 적응적 메쉬세분화기법과 함께 사용함으로써 보다 효율적인 격자 생성이 가능하다. 예를 들면, 단순한 직교격자만을 이용하여도 Fig. 2와 같은 원을 표현하는 것이 가능하나 많은 수의 격자가 필요하게 된다. 그에 반해 Fig. 2(a)에서처럼 적응적 메쉬세분화기법을 사용하면 보다 적은 격자(796개)로도 원과 같은 형상을 표현하는 것이 가능하고, Fig. 2(b)와 같이 분할격자기법과 적응적 메쉬세분화기법을 함께 활용하면 더 적은 수의 격자(184개)로도 직교격자로는 표현하기 힘든 경계면을 효율적으로 표현할 수 있다.

4. 실험 모의 및 모델 검증

분할격자기법과 적응적 메쉬세분화기법을 적용한 2차원 모형의 검증을 위하여 유럽 IMPACT 프로젝트 (Soares Frazão et al., 2003)에서 수행한 두 종류의 실험을 모의하였다. IMPACT 프로젝트는 도시 홍수를 이해하고 수치적으로 모델링하기 위해 유럽 10개국의 연구진들이 유럽 위원회의 지원 아래 수행한 것으로, 실험을 통해 다양한 홍수 사건을 실제 발생시켜봄으로써 돌발 홍수 패턴을 이해하고자 하였으며, 특히 도시 홍수에 있어서 도시 구조물의 영향을 살펴보고자 하였다.

4.1 isolated building 실험 모의

첫 번째 실험은 건축물이 댐붕괴파에 미치는 영향을 살펴본 것으로 isolated building 실험이라고 한다. 길이 35.8

m, 폭 3.6m의 직사각형 수로에 블록을 설치하여 1m 폭의 수문을 만들고, 설치한 수문을 빠르게 열어 댐붕괴파를 발생시키는 실험이다 (Fig. 3). 수문의 하류에 0.4×0.8 m의 블록을 흐름방향에 64도 경사지게 설치하여 건축물이 댐붕괴파를 만났을 때 발생하는 현상을 표현하려 하였다. 초기조건으로 수문의 상류수심은 0.4m, 수문의 하류수심은 0.01 m로 두었고, 실험에서 측정된 Manning 계수는 $n = 0.01 \text{sm}^{-1/3}$ 이다. 실험시간은 총 30초로 수로의 하류단은 열려있는 상태로 두었다. 실험수로가 충분히 긴 수로임을 고려할 때 실험시간 동안 하류단의 영향이 대상 영역에 미치는 영향은 없는 것으로 보인다. Soares Frazão et al. (2003)은 Fig. 4에서 보이는 것처럼 총 6지점에서 수심 및 유속을 측정하였다.

모형의 격자 민감도를 분석하기 위해 적응적 메쉬세분화기법을 적용하여 Fig. 5와 같이 네 단계의 격자를 생성하였다. 또한 분할격자기법의 유효성을 확인하기 위하여 적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법을 동시에 사용한 모형과 적응적 메쉬세분화기법만을 사용한 모형을 각각 이용하여 모의를 수행하였다. 모든 모의에서 수면의 경사와 속도의 분포에 따라 격자를 실시간으로 재생성하는 동적 적응 메쉬세분화기법을 적용하였다.

Fig. 5의 mesh4 격자에 분할격자기법을 적용한 모형의 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 시간에 따른 수심 변화와 격자 세분화 과정을 보여주고 있다. 댐붕괴파가 발생한 후 2초 무렵부터 홍수파가 건물을 만나 건물 부근에서 도수 (hydraulic jump)가 발생하는 과정이 전반적으로 잘 모의

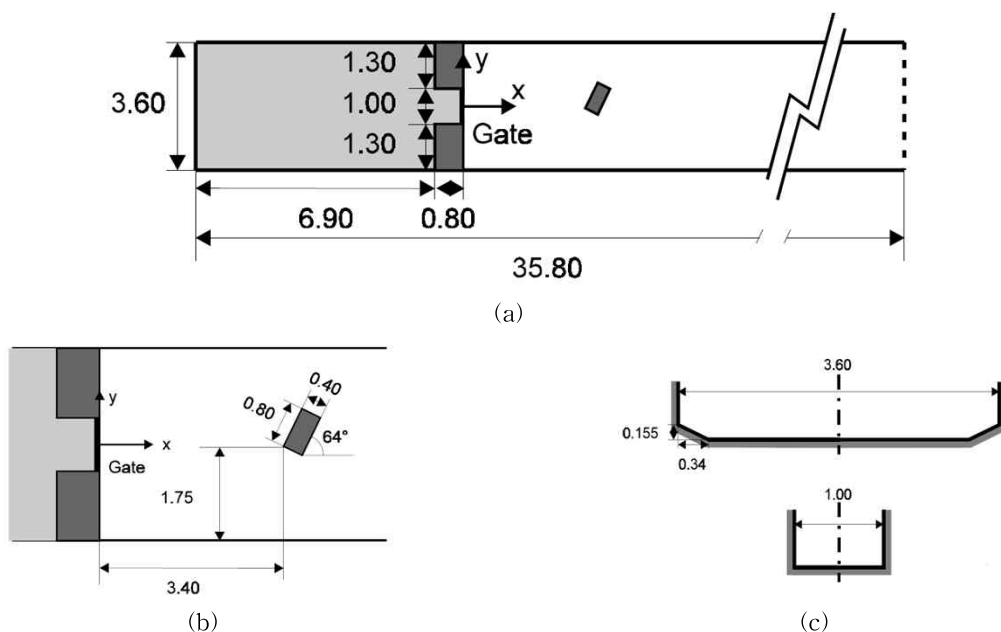


Fig. 3. Experimental Set-up for Isolated Building Experiment (Soares Frazão et al., 2003). (a) Entire Setting, (b) Location and Dimensions of the Building, (c) Channel Cross Section in the Main Channel (upside) and at the Dam Location (downside)

된 것을 알 수 있다. 또한 수로단면의 영향으로 (Fig. 3(c)) 수로의 양벽면 부근에도 도수가 일어나고 있다. 격자를 살펴보면, 수심이 급격히 변하는 부분과 속도의 변화가 심한 영역에서 세밀한 격자가 사용되었고 변화가 완만한 영역에서 비교적 큰 격자가 사용되어 효율적으로 계산이 수행된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 지점 G1, G2, G6에서 모의된 수심과 관측된 수심을 비교하고 있다. isolated building 실험의 경우, 관측 자료의 원본을 구할 수 없어, Soares Frazão et al. (2003)의 결과 그림을 참조하였다. Fig. 7(a)의 G1 지점 수심 비교를 보면 분할격자기법을 이용한 경우 전반적인 수심 변화 경향이 의미있는 수준으로 모의된 것을 알 수 있다. 관측 수심을 보면, 1~2초경 댐붕괴파가 벽면부근의 경사에 부딪혀 작은 충격파가 발생하였고, 2~3초경 벽면에 부딪힌 파로 인해 다시 수심이 급격히 상승하였다. 이러한 경향들은 모의된 수심값에서도 나타나고 있으나 충격파의 파형이 관측과 비교하여 완만하게 모의되었다. Abderrezzak et al. (2009)는 천수방정식에 기초한 2차 정도의 수치모형으로

동일한 실험을 모의하였으며, 모의결과는 본 논문의 경우와 유사하게 2~3초경의 충격파를 완만하게 표현하고 있다. 3차원 형상을 모의하는데 있어 2차원 천수방정식의 한계는 모의결과와 실험결과와의 비교가 끝나는 부분에서 다시 언급하겠다. 분할격자기법 적용유무에 따른 모의의 결과값을 비교해 보면, 분할격자기법이 적용된 경우 격자의 크기에 따른 G1에서의 수심값의 변동은 비교적 작으나, 분할격자기법이 적용되지 않은 경우 격자의 크기가 달라질 때 G1에서의 전체적인 수심의 양상이 많이 달라지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 mesh1이나 mesh2와 같이 격자의 크기가 큰 격자를 사용할 경우, 분할격자기법이 사용되지 않으면 건물의 형상이 제대로 표현되지 않기 때문이다. isolated building 실험과 같이 모의 영역이 복잡하지 않은 경우는 굳이 mesh1이나 mesh2와 같이 적은 수의 격자를 사용할 필요가 없으나, 건물이 많은 도시 지역과 같은 영역을 모의 대상으로 할 경우에는 계산자원을 고려할 때, 건물주변을 가능한 한 적은 수의 격자로 표현할 필요가 있는데, 이런 경우 분할격자기법을 활용하면 보다 적은 수의 격자를 사용하여 복잡한 경계를 처리할 수 있다.

Fig. 7(b)의 G2 지점 수심을 보면 2초경 건물과 부딪힌 충격파로 인해 작은 수면 진동이 일어나고 있고 이 현상은 모형에서 잘 모의되었다. 하지만 15초경에 발생하는 급격한 수위상승은 모의에서는 나타나지 않거나 정확히 재현하지 못하였다. 분할격자기법이 사용된 경우, 해상도가 높은 mesh3, mesh4의 경우에는 이러한 현상이 관찰되지 않았으나, 오히려 적은 수의 격자를 사용한 mesh1의 경우에 15초경 수심상승이 일어나고 있다. Fig. 6의 15, 20

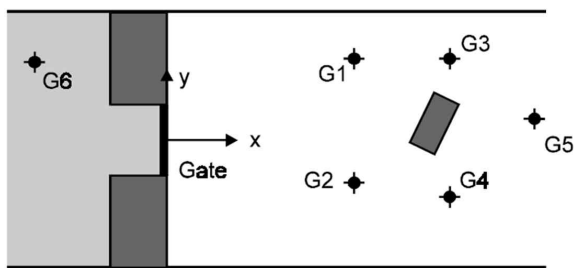


Fig. 4. The Position of the Gauging Points in Isolated Building Experiment (Soares Frazão et al., 2003)

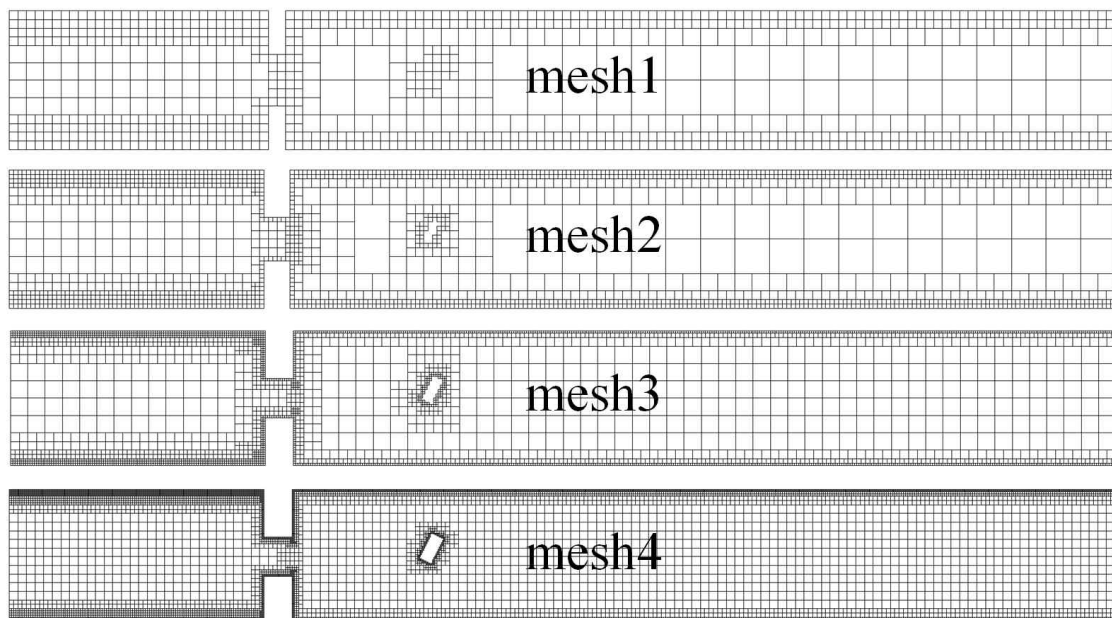


Fig. 5. Four Types of Initial Meshes in Isolated Building Simulation (max level=7, 8, 9, 10 from the top).

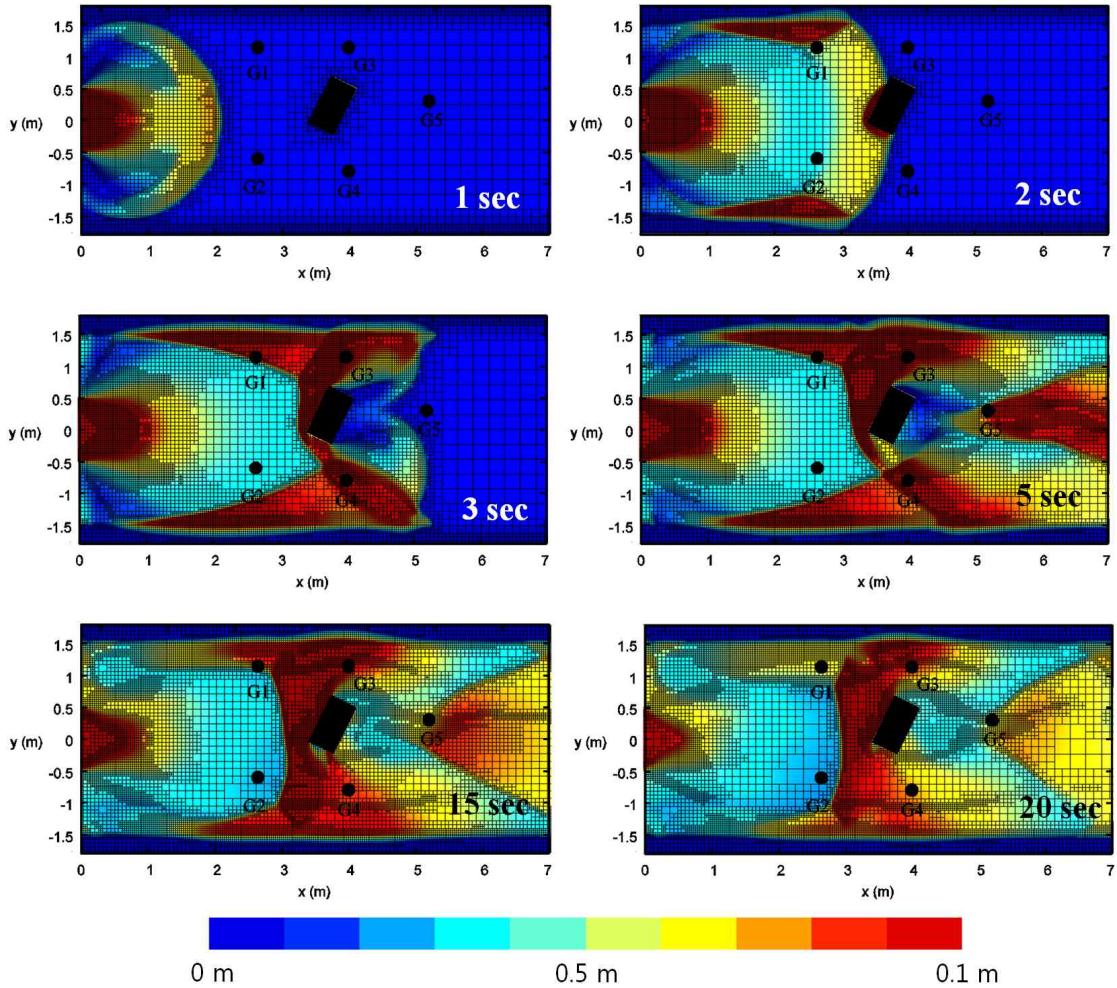


Fig. 6. Simulated Water Depth and Dynamically Adapted Mesh in Isolated Building Simulation when the Cut Cell Method was Applied to the Mesh4 of Fig. 5

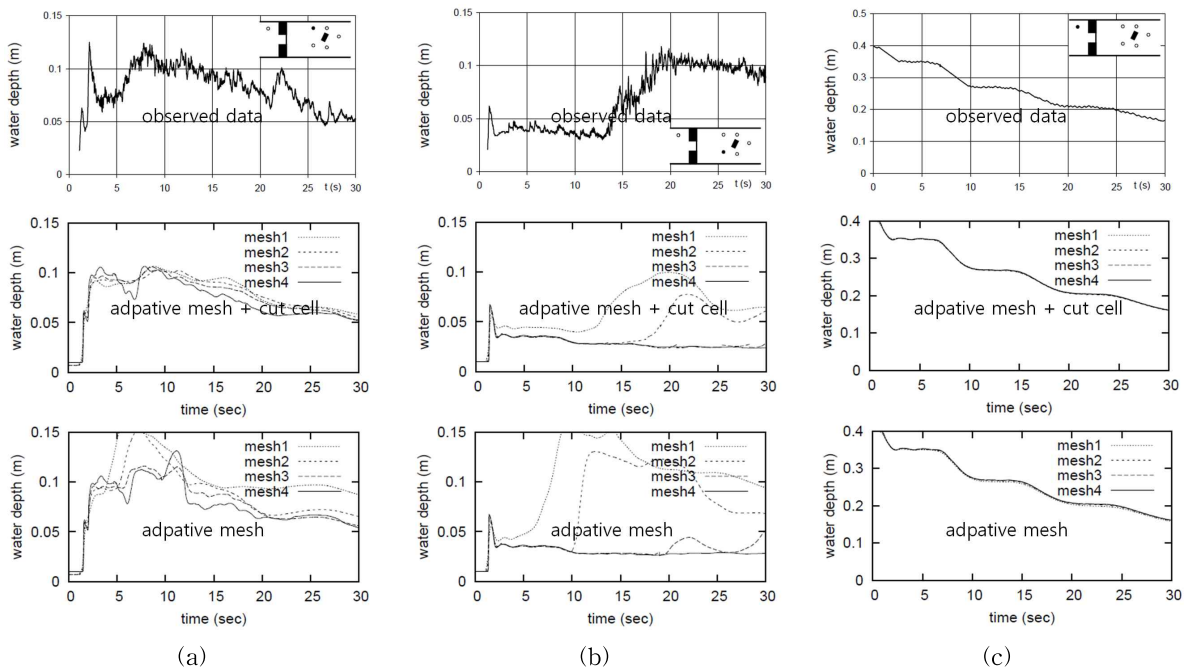


Fig. 7. Observed and Simulated Water Depth at (a) G1, (b) G2, and (c) G6 in Isolated Building Simulation

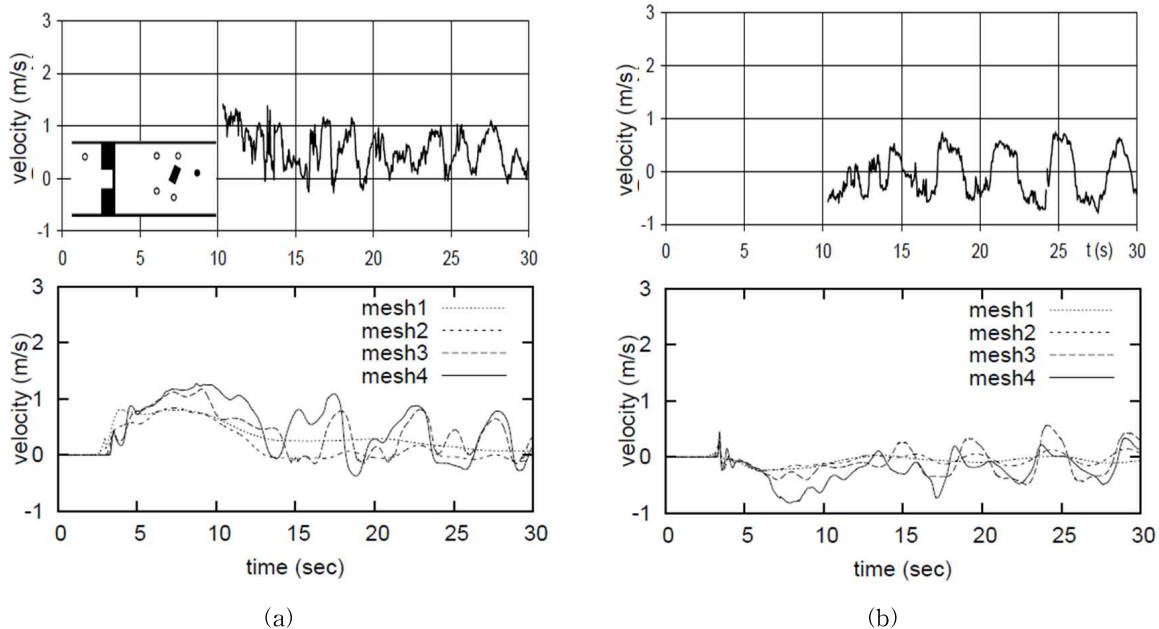


Fig. 8. Observed and Simulated (a) x- and (b) y-direction Velocities at G5 in Isolated Building Simulation with the Cut Cell Method Applied

초 수심분포를 보면 이 시각 G2 지점은 건물로 인해 도수가 발생하고 있는 지점 부근으로, 모형이 도수가 발생하는 위치상의 오차에 민감하게 반응하여 이러한 현상이 나타난 것으로 보인다. 또한 모의에 사용된 모형은 불규칙한 수심을 가파르게 모의하는 2차정도의 수치모형으로 격자가 조밀할수록 이러한 모형상의 위치오차가 더욱 확연히 드러난 것으로 보인다. 분할격자기법이 사용되지 않은 경우를 보면 mesh4의 경우는 수심상승이 일어나지 않고 있고, mesh3의 경우는 수심의 상승폭이 아주 작으며, mesh1, mesh2의 경우에는 수심상승이 일어나고 있으나 관측보다 빠른 시각에 더 높게 수심이 상승하고 있다. mesh3, mesh4의 경우는 높은 해상도로 건물은 제대로 표현되었으나 분할격자기법이 사용된 경우와 같이 모형이 위치상의 오차에 민감하게 반응하여 수위의 상승이 일어나지 않은 것으로 보인다. mesh1과 mesh2의 경우는 G1 지점에서와 같이, 건물의 형상이 정확히 표현되지 못한 것이 모의 결과가 좋지 못한 이유로 보인다. 수치 모의시 도수 현상의 정확한 위치 파악의 어려움은 Soares Frazão et al. (2003)에서 논의된 바 있다. Soares Frazão et al. (2003)는 Rubar20 모형을 사용하여 동일한 실험을 모의하였으며, 본 논문에서 분할격자기법과 적응적 메쉬 기법 (mesh2, mesh3)을 모두 사용한 경우와 유사한 결과를 보여주고 있다. 본 모의에 사용된 모형 및 Rubar20의 지배방정식은 수심적분된 2차원 천수방정식으로 연직방향의 압력분포가 정수압인 것을 가정하고 있다. 이 가정은 파의 길이가 수심에 비해 충분히 큰 대개의 경우에는 무리가 없으나

본 모의처럼 건축물 주변으로 복잡한 흐름이 발생하는 경우 이러한 가정으로 인해 모의 결과가 영향을 받은 것으로 추측된다.

Fig. 7(c)의 지점 G6은 상류지역에 위치하는 지점으로, 수심이 감소하고 있는 경향이 잘 모의되었다. 건물의 영향을 받지 않는 지역에 존재하기 때문에 모의 결과도 분할격자기법의 사용유무 또는 격자크기의 영향을 거의 받지 않고 모든 경우에 관측데이터와 유사한 수심분포를 보였다.

Fig. 8은 분할격자기법이 적용된 모형이 지점 G5에서 x방향과 y방향의 속도성분을 모의한 값을 측정값과 비교하고 있다. 관측 데이터를 보면 양 방향의 속도가 짧은 주기로 진동하고 있어 지점 G5 부근에서 와류가 형성된 것을 알 수 있다. 모의된 값을 보면, mesh3과 mesh4의 격자를 사용하였을 경우, 진동주기는 관측과 다르나 진폭은 관측과 비슷하게 양방향의 속도가 진동하고 있는 것이 확인된다. mesh1과 mesh2의 경우는 속도가 진동하는 현상이 모의되지 않았다. 본 모의에 사용된 모형은 난류항이 포함되지 않은 지배방정식을 사용하기 때문에 일정 길이 이상의 파장을 가지고 있는 와류는 모의하고 있는 것으로 보이나, 안정적으로 와류 현상을 모의하기에는 한계가 있는 것으로 보인다.

4.2 Model city 실험 모의

두 번째 실험은 이탈리아 Torc River Valley의 지형을 축소하여 실시한 실험으로 model city라고 한다 (Testa et

al., 2007). 첫 번째 실험과는 다르게 하나의 건물군이 아니라 건물군을 하류에 배치하여 극한 홍수시 건물군의 영향과 건물군 내부 홍수파의 전파 양상을 관찰하고자 하였다. 지형정보 및 건물군의 배치정보와 수심 및 유량의 관측지점 위치는 Fig. 9와 같으며 상류 ($x = -2\text{m}$) 지점에서 Fig. 10과 같은 유량이 공급되었다. 실험에서 측정된 Manning 계수는 $n = 0.0162\text{sm}^{-1/3}$ 이며 실험시간은 총

60초였다. 본 연구는 model city 모의를 위해 모든 영역에서 수심이 0인 상태를 초기조건으로 설정하였으며, 분할 격자기법과 동적 적응 메쉬세분화기법을 사용하여 격자를 생성하고 모의를 수행하였다.

시간에 따른 수심분포를 Fig. 11에 도시하였다. 상류로부터 발생한 흐름이 건물군과 만나면서 건물군 앞에서 정체되는 현상이 잘 모의되고 있다. 또한 건물군 주변과 같

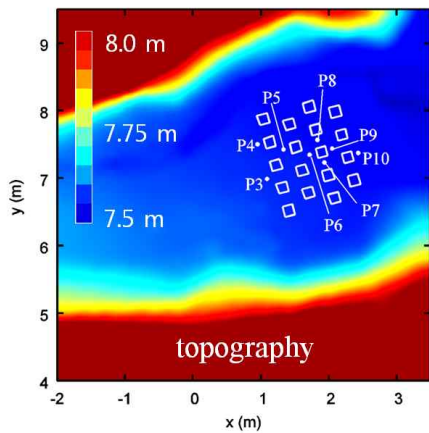


Fig. 9. Topography of Model City Experiment

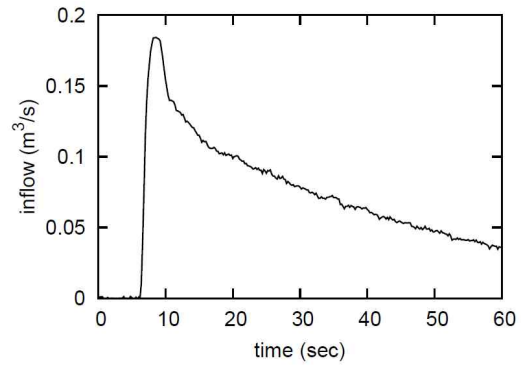


Fig. 10. Inflow from the Upstream of the Flow Domain in Model City Simulation

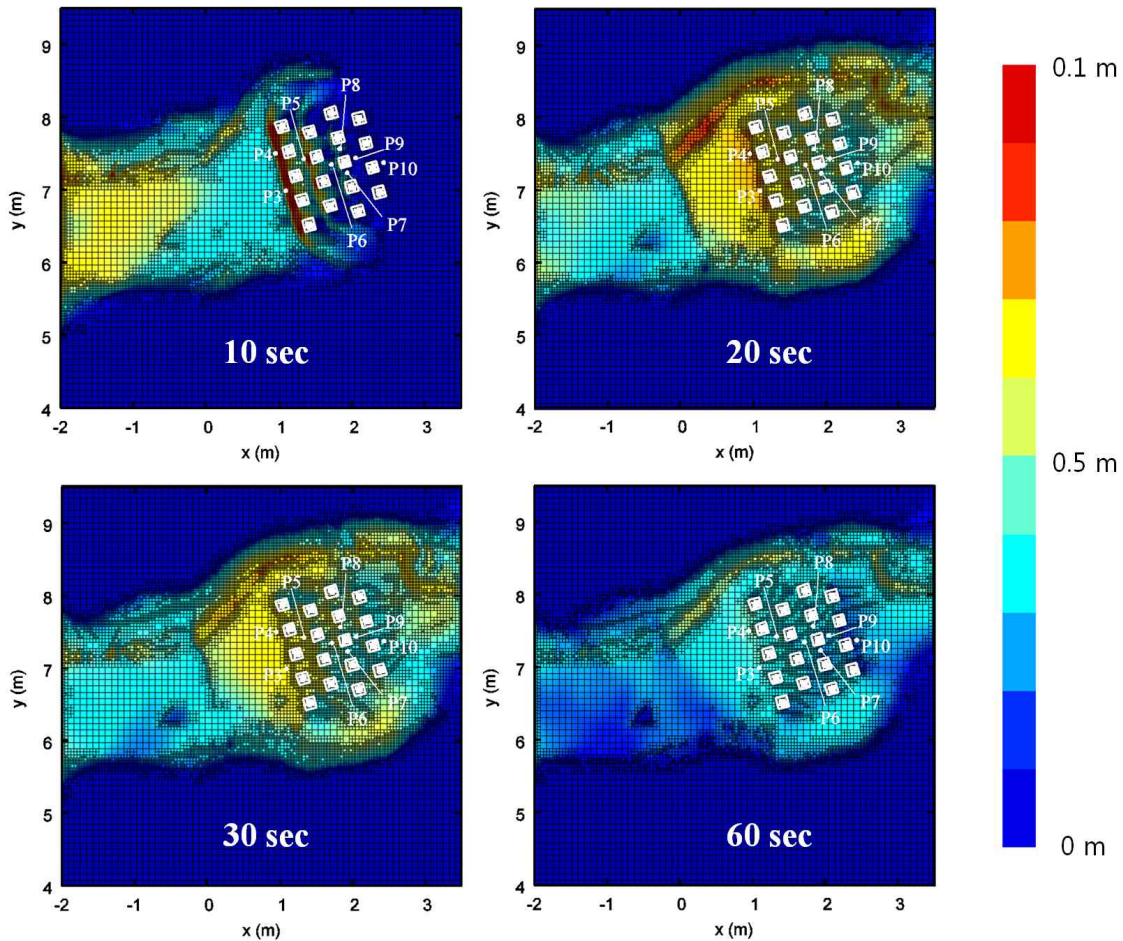


Fig. 11. Simulated Water Depth and Dynamically Adapted Mesh in Model City Simulation

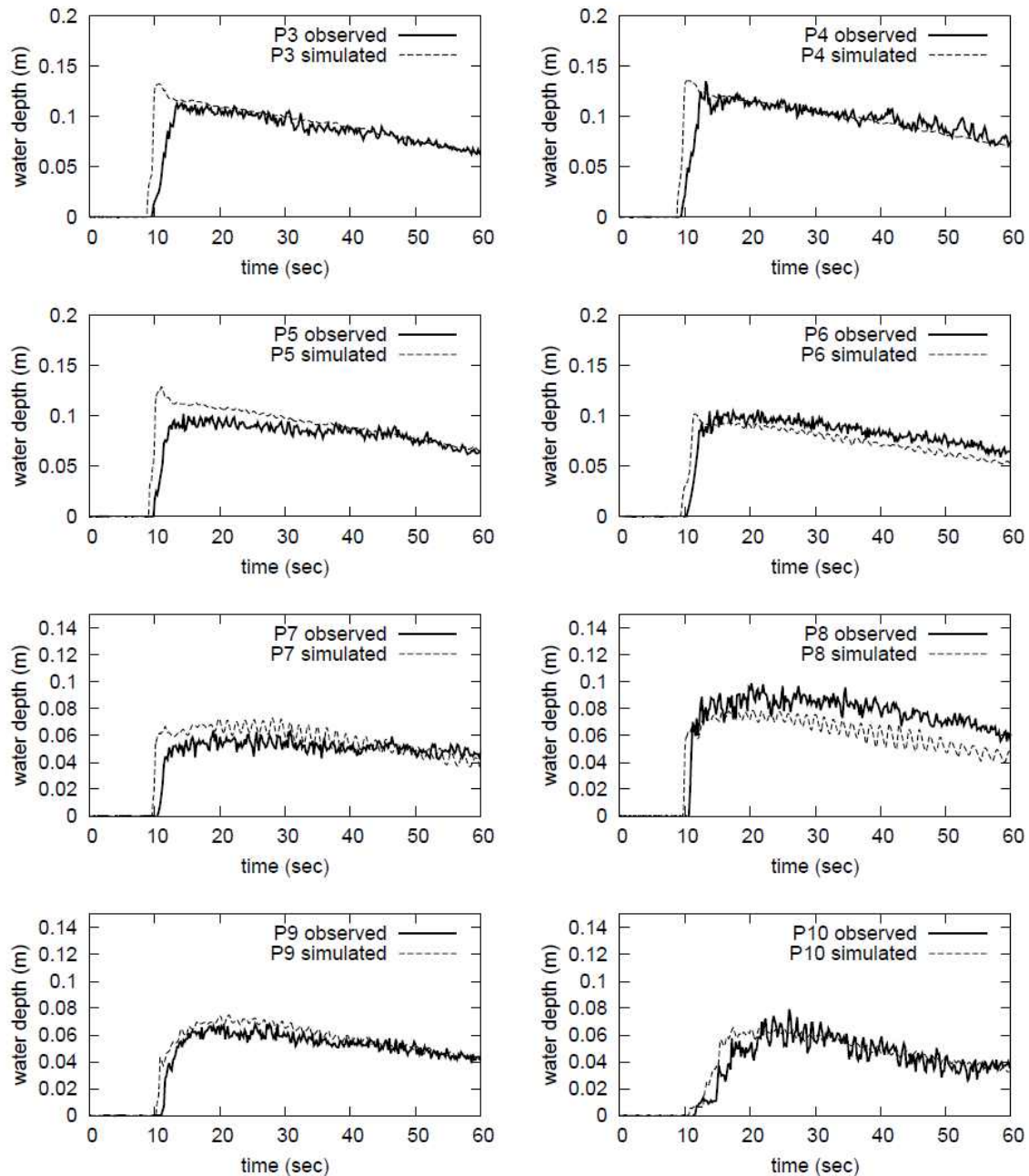


Fig. 12. Observed and Simulated Water Depth at the Gauged Points in Model City Simulation

이 지형과 수심 변화가 심한 영역은 세밀한 격자가 사용되었고 비교적 변화가 완만한 영역은 큰 격자를 사용해서 효율적으로 계산이 수행된 것을 확인할 수 있다.

관측지점에서 측정된 수심과 모의에서 얻어진 수심을 Fig. 12에서 비교하였다. 전반적으로 모든 지점에서 모의 결과와 관측값이 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 모의 결과의 경우, 초기에 수심이 상승하는 현상이 관측데이터보다 1~2초 가량 빠르게 나타나고 있으나, 모든 지점에서 관측데이터와 모의 결과가 1~2초 가량의 시간 차이가 나는 것으로 보아, 이는 유입량을 관측하고 변환하는 과정에서 생긴 오차일 것으로 추측된다. 상류에서 공급된 유입량은

공급 탱크의 수위를 측정하여 얻어진 값으로, 탱크의 물이 실험유역에 도달하기까지의 시간이 오차에 반영된 것으로 보인다 (Testa et al., 2007). 건물군 내부 및 뒤편의 관측지점인 P5-P10에서 모의된 수심을 보면, 수심이 진동하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 건물의 영향으로 건물들 사이 또는 뒤편에서 작은 와류들이 모의된 것으로 판단된다. 모의에 사용된 모형은 난류항을 포함하지 않은 지배방정식을 사용하고 있으므로 와류를 정확히 모의하는 데는 한계가 있다. 그러나 모의 결과에서 나타난 진동 폭은 상류쪽 (P3-P6)보다 하류쪽 (P7-P10)에서 커지고 있으며, 이는 관측치에서도 나타나는 현상이다. 이에 모의

결과에서 나타난 수심의 진동은 수치진동이라기보다는 물리적 진동으로 보이며, 모델이 어느 정도의 물리적 진동은 모의 가능함을 알 수 있다. 모델이 관측치의 수심 및 진동폭과 진동주기를 정확히 모의하지 못하는 이유는 모델이 사용하는 지배방정식의 한계로 인한 것으로 보인다. 앞서 서술한 것처럼 모의에 사용된 모형은 난류항을 포함하지 않은 지배방정식을 사용하고 있으므로 짧은 파장의 난류영향을 모의할 수 없다. 또한 건물군 주변에서 일어나는 홍수파의 변화는 3차원 현상으로 정수압 상태를 가정한 2차원 천수방정식으로 표현하는 데는 한계가 있을 수 있다. 마지막으로 하상의 마찰력을 표현하는 Manning 공식은 정류상태에서 유도되는 것으로 극한 홍수와 같은 부정류 상태를 모의하는 데는 부적절할 수 있다. 천수방정식을 이용한 와류 모의의 불안정성에 대해서는 Gerris의 선형 및 비선형 천수방정식을 이용하여 비교 연구된 바 있다 (Popinet, 2011b).

5. 결론

2차원 천수방정식 해석 모형에 적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법을 적용하여 극한 도시홍수 실험을 모의하였다. 모의에 사용된 모형은 자유 소프트웨어인 Gerris로, Gerris의 천수방정식 해석 모듈은 HLLC기법과 MUSCL기법을 사용하여 시간과 공간상에서 2차 정도를 유지하기 때문에 불연속적인 흐름 거동을 가지는 극한홍수 등을 모의하는데 적합하다. 그러나 Gerris의 천수방정식 모듈은 현재, 적응적 메쉬세분화기법은 지원하고 있으나 분할격자기법은 지원하지 않아 도시 구조물과 같은 지형물을 표현하는데 한계가 있다. 이에 본 논문에서는 Gerris의 천수방정식 모듈에서 분할격자기법을 사용할 수 있도록 수정, 확장하였고, 모델 검증을 위해 유럽 IMPACT 프로젝트에서 실시한 극한 도시 홍수 실험을 모의하였다. 검증에 사용된 IMPACT 프로젝트는 극한 홍수시 발생하는 충격파가 건물과 같은 구조물과 만났을 때 보이는 거동 특성을 연구하고, 실험과 모델의 비교를 통해 홍수 범람 모형을 검증하고자 실시되었다. 본 연구에서 개발된 Gerris의 천수방정식 계산 모듈을 검증하기 위해 하나의 건물을 수로 내에 배치한 isolated building 실험과 다수의 건물을 실험 유역에 배치한 model city 실험이 활용되었다. 모의 결과, 도수 현상이 발생하는 부근에서 도수 지점의 위치와 수치적 오차에 민감하게 반응하는 등 수치적 한계를 보이기는 하였으나, 전반적으로 모의결과는 실험결과와 양호하게 일치하였다. 댐붕괴파와 같은 불연속적인 흐름과 사류와 상류가 혼재하는 천이류가 안정적으로 모의되는 것이 확인되었다. 또한 적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법

을 함께 사용한 방법과 적응적 메쉬세분화기법만을 사용한 방법을 비교하여, 분할격자기법이 함께 활용되었을 때, 모델의 격자 민감도가 낮아지고 보다 적은 수의 격자로도 복잡한 경계에서의 유체 모의가 가능한 것을 확인하였다. 다만 난류항을 포함하지 않은 지배방정식을 사용하여 와류와 같은 현상을 표현하는 데는 한계가 있었다.

Gerris는 지형 및 경계정보가 입력되면 적응적 메쉬세분화기법을 적용하여 쿼드 트리 격자를 자동적으로 생성해 준다. 본 연구를 통해 Gerris의 천수방정식 계산 모듈은 분할격자기법을 함께 사용할 수 있게 되었고, 더욱 효율적인 수치모의가 가능해졌다. 적응적 메쉬세분화기법과 분할격자기법은 직교격자생성법에 기초하기 때문에 격자생성이 쉽고, 관심 영역만 세분화할 수 있으므로 효율적인 계산이 가능하며, 불규칙한 구조물도 비교적 쉽게 표현이 가능하다. 본 연구를 통해 확장된 Gerris의 천수방정식 모형은 복잡한 형상을 모의해야 하는 하도의 합류부나 도시지역의 홍수범람모의 등에 광범위하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김대홍, 조용식 (2004). "HLLC Approximative Riemann Solver를 이용한 천수방정식 해석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제10호, pp. 845-855.
- 김병현, 한건연, 손아롱 (2011). "혼합격자의 적용이 가능한 2차원 유한체적모형의 개발." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제2호, pp. 109-123.
- 김형준, 김정민, 조용식 (2009). "분할격자기법을 이용한 실험수조 댐붕괴파의 수치모의." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제29권, 제2 B호, pp. 121-129.
- 배용훈, 고덕구, 조용식 (2005). "FLUMEN 모형을 이용한 홍수범람모의." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제5호, pp. 355-364.
- 최승용, 김병현, 김상호, 한건연 (2009). "2차 요소를 이용한 2차원 상향가중 유한요소모형." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제12호, pp. 1053-1067.
- Abderrezzak, K.E.K., Paquier, A., and Mignot, E. (2009). "Modelling flash flood propagation in urban areas using a two-dimensional numerical model." *Nat Hazards*, Vol. 50, pp. 433-460.
- Audusse, E., Bouchut, F., Bristeau, M.O., Klein, R., and Perthame, B. (2004). "A fast and stable well-balanced scheme with hydrostatic reconstruction for shallow water flows." *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 25, No. 6, pp. 2050-2065.

- Audusse, E., and Bristeanu, M.O. (2005) "A well-balanced positivity preserving "second-order" scheme for shallow water flows on unstructured meshes." *Journal of Computational Physics*, Vol. 206, pp. 311-333.
- Causon, D.M., Ingram, D.M., Mingham, C.G., Yang, G., and Pearson, R.V. (2000). "Calculation of shallow water flows using a Cartesian cut cell approach." *Advances in Water Resources*, Vol. 23, pp. 545-562.
- Causon, D.M., Ingram, D.M., and Mingham, C. (2001). "A cartesian cut cell method for shallow water flows with moving boundaries." *Advances in Water Resources*, Vol. 24, pp. 899-911.
- Griessbaum, G., and Schmidt, A. (2009). "Advanced tilt correction from flow distortion effects on turbulent CO₂ fluxes in complex environments using large eddy simulation." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 135, pp. 1603-1613.
- Harten, A. (1984). "On a class of high resolution total variation stable finite difference schemes." *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-23.
- Liang, Q., Borthwick, A.G.L., and 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.
- Lopez-Herrera, J.M., Popinet, S., and Herrada, M.A. (2011). "A charge-conservative approach for simulating electrohydrodynamic two-phase flows using Volume-Of-Fluid." *Journal of Computational Physics*, Vol. 230, pp. 1939-1955.
- Mampitiyarachchi, S. (2006). "3D flow Visualisation of a micro air vehicle with winglets." Technical report, University of Sydney, October, <http://gfs.sf.net/papers/mampiti2006.pdf>.
- Roe, P.L. (1981). "Approximate riemann solvers, parameter vectors and difference schemes." *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357-372.
- Rogers, B., Fujihara, M., and 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.
- Rogers, B.D., Borthwick, A.G.L., and Taylor, P.H. (2003) "Mathematical balancing of flux gradient and source terms prior to using Roe's approximate Riemann solver." *Journal of Computational Physics*, Vol. 192, No. 2, pp. 422-451.
- Popinet, S. (2003). "Gerris: a tree-based adaptive solver for the incompressible Euler equations in complex geometries." *Journal of Computational Physics*, Vol. 190, No. 2, pp. 572-600.
- Popinet, S., and Rickard, G. (2007). "A tree-based solver for adaptive ocean modelling." *Ocean Modelling*, Vol. 16, pp. 224-249.
- Popinet, S., Gorman, R.M., Rickard, G.J., and Tolman, H.L. (2010). "A quadtree-adaptive spectral wave model." *Ocean Modelling*, Vol. 34, pp. 36-49.
- Popinet, S. (2011a) "Quadtree-adaptive tsunami modelling." *Ocean Dynamics*, accepted.
- Popinet, S. (2011b). "River vertex test modelling." <http://gfs.sourceforge.net/wiki/index.php/RiverVertexTest>.
- Quirk, J.J. (1994). "An alternative to unstructured grids for computing gas dynamic flows around arbitrarily complex two-dimensional bodies." *Journal of Computers and Fluids*, Vol. 23, pp. 125-142.
- Soares Frazão, S., Noël, B., Spinewine, B., and Zech, Y. (2003). "Flood propagation-The isolated building test case-Results from the benchmark. In EC Contract EVG1-CT-2001-00037 IMPACT Investigation of Extreme Flood Processes and Uncertainty." *Proceedings 3rd Project Workshop*, Louvain-la-Neuve, Belgium 6-7 November 2003 (CD-ROM).
- Testa, G., Zuccala, D., Alcrudo, F., Mulet, J., and Soares Frazão, S. (2007). "Flash flood flow experiment in a simplified urban district." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, Extra Issue, pp. 37-44.
- Toro, E.F., Spruce, M., and Speares, W. (1994). "Restoration of the contact surface in the HLL Riemann solver," *Shock Waves*, Vol. 4, pp. 25-34.
- van Leer, B. (1984). "On the relation between the upwind-differencing schemes of Godunov, Engquist-Osher and Roe." *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, Vol. 5, pp. 1-20.

논문번호: 11-056	접수: 2011.05.30
수정일자: 2011.06.07/06.13	심사완료: 2011.06.13