

쿼드트리 격자기반 모형의 홍수범람해석 적용성 평가 Applicability Evaluation of Flood Inundation Analysis using Quadtree Grid-based Model

이 대 엽* / 안 현 옥** / 이 기 하*** / 정 관 수****

Lee, Dae Eop/ An, Hyun Uk / Lee, Gi Ha / Jung, Kwan Sue

Abstract

Lately, intensity and frequency of natural disasters such as flood are increasing because of abnormal climate. Casualties and property damages due to large-scale floods such as Typhoon Rusa in 2002 and Typhoon Maemi in 2003 rapidly increased, and these show the limits of the existing disaster prevention measures and flood forecasting systems regarding irregular climate changes. In order to efficiently respond to extraordinary flood, it is important to provide effective countermeasures through an inundation model that can accurately simulate flood inundation patterns. However, the existing flood inundation analysis model has problems such as excessive take of analysis time and accuracy of the analyzed results. Therefore, this study conducted a flood inundation analysis by using the Gerris flow solver that uses quadtree grid, targeting the Baeksan Levee in the Nakdong River Basin that collapsed because of a concentrated torrential rainfall in August, 2002. Through comparisons with the FLUMEN model that uses unstructured grid among the existing flood inundation models and the actual flooded areas, it determined the applicability and efficiency of the quadtree grid-based flood inundation model of the Gerris flow solver.

Keywords : quadtree grid, adaptive mesh refinement method, Baeksan Levee, flood inundation model, gerris, FLUMEN

요 지

최근 이상기후로 인해 홍수 등 자연재해의 강도 및 빈도가 증가하고 있다. 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미 등 집중호우에 따른 대규모 홍수로 인해 인명 및 재산피해의 급격한 증가가 나타났으며, 이는 불규칙한 기상변화에 대한 기존의 방재대책과 홍수예측시스템의 한계를 보여주고 있다. 이러한 이상홍수에 효율적으로 대응하기 위해서는 홍수범람 양상을 정확하게 모의할 수 있는 범람모형을 통해 효과적인 대응방안 마련하는 것이 중요하지만 기존의 홍수범람해석모형은 해석시간의 과다소요 및 해석결과의 정확성 등의 문제가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 2002년 8월 집중호우로 인해 붕괴된 낙동강 유역의 백산제를 대상으로 쿼드트리격자를 사용하는 Gerris모형을 이용하여 홍수범람해석을 수행하였으며, 기존의 홍수범람모형 중 비구조격자를 사용하는 FLUMEN모형 및 실제 범람지역과의 비교를 통해 쿼드트리 격자기반 홍수범람모형의 적용성 및 효율성을 판단하였다.

* 충남대학교 국제수자원연구소 연구원 (e-mail: hana@cnu.ac.kr)
Researcher, IWRRI, Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

** 교신저자, 국가수리과학연구소 계산수리과학연구부 수치프로그래밍연구팀 연구원 (e-mail: hanlight20@hotmail.com)
Corresponding Author, Researcher, Numerical Program Team, Division of Computational Sciences in Mathematics, National Institute for Mathematical Sciences, 305-811, Korea

*** 경북대학교 과학기술대학 건설방재공학부 교수 (e-mail: leegiha@gmail.com)
Assistant Professor, Dept. of Constructional Disaster Prevention Eng., Kyungpook National Univ., Sangju 742-711, Korea

**** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)
Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

1. 서론

매년 수해로 인해 많은 인명 및 재산피해가 발생하고 있다. 과학기술이 급속도로 발전하고 있음에도 불구하고, 기상변화는 예측하기 힘든 방향으로 진행되고 있으며, 이러한 이상기후로 인해 홍수 등 자연재해의 강도 및 빈도가 증가하고 있다. 우리나라의 물 관련 자연재해 피해액은 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미 등 집중호우에 따른 대규모 홍수로 인하여 재산피해가 급격히 증가되었으며, 이는 기존의 방재대책과 홍수예측 시스템으로는 불규칙한 기상변화에 의한 피해에 효율적인 대처가 어렵다 (Han, 2009).

Kim (2003)에 의하면 태풍 루사와 매미와 같이 최근 홍수피해의 주요원인은 국지성 집중호우로서 실제적으로 총량적 개념에서의 강수량의 변동성은 크지 않더라도 강우의 시·공간적 편향성으로 인해 대규모 홍수피해가 발생하는 것으로 나타났다. 최근 우리나라의 강수강도는 현저하게 강해져 강우일수는 감소하고 있으나, 집중호우의 빈도가 증가하는 추세이며, 이러한 추세는 당분간 지속될 것으로 전망되고 있어 홍수피해를 사전에 예방하고, 피해를 절감하기 위한 국가차원의 대응정책의 수립이 필요하며, 이를 위해 구조적 대책의 문제점을 보완하고 비구조적 대책들의 실효성을 높이기 위한 홍수 현상을 재현하고 예측하는 것이 무엇보다 중요하다.

국내·외로 홍수범람을 예측하기 위해서 천수방정식을 기본으로 한 수치모형이 광범위하게 활용되고 있으며, 효율적인 홍수 예·경보 시스템 구축을 위해서는 빠른 계산 시간에 홍수파의 범람양상을 모의하고, 정확한 범람구역 및 침수심 정보를 제공할 수 있도록 효율적이고 상세한 격자 생성 기술이 요구된다. 일반적으로 2차원 범람모의를 위해서는 대상지역을 직교구조(Cartesian Grid) 또는 비구조 격자(Unstructured Grid)로 분할하여 해석을 수행한다. DEM (Digital Elevation Model) 자료를 사용하여 범람모의를 함에 있어 직교구조 격자를 사용하는 경우 고정확도 수치기법이 비교적 쉽게 적용될 수 있으나 복잡한 지형을 표현하기 어렵다는 단점이 있으며, 비구조 격자를 사용하는 경우에는 격자망 생성에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 과도하게 생성된 격자수로 인하여 모의시간이 길어지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 이들과는

다른 접근방법으로 직교격자에 적응적 메쉬세분화기법 (Adaptive Mesh Refinement Method)를 적용하여 격자를 생성하는 쿼드트리격자(Quadtree Grid)를 이용하는 방법이 있다. 적응적 메쉬세분화기법은 1990년대 주목받기 시작하여 대기, 가스, 해양, 다상흐름 등 다양한 분야의 수치모의에 적용되었으며, 2000년대 이르러 천수방정식에 적용되기 시작하였다. 이 방법은 고정확도 수치기법들을 비교적 용이하게 모형에 적용할 수 있는 직교격자의 장점을 가지면서, 비구조격자 및 구조곡선격자와 비교하여 복잡한 지형의 격자를 쉽게 생성할 수 있다(An and Yu, 2011).

Liang et al. (2004)은 HLLC (Harten-Lax-van Leer Contact; Fraccarollo and Toro, 1995; Billett and Toro, 1997) 근사 Riemann해법과 MUSCL (Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Laws; van Leer, 1979) 기법을 수치기법으로 사용하고 모의 중에 격자를 재구성하는 동적 적응 메쉬세분화기법을 적용하여 효율적으로 고해상도의 수치모의를 수행하였다. 이후 Popinet (2011)이 Liang et al. (2004)과 유사한 수치모형을 사용하여 해일을 모의하여 대양과 같이 넓은 스케일과 항만과 같은 좁은 스케일을 동시에 모의해야 하는 해일모형에 적합함을 보여주었다. 국내에서는 Lin et al. (2004)이 지진 해일에 의한 원형섬 주변에서의 범람영역의 산정을 위해 쿼드트리격자기법을 이용한 수치모형을 개발하여 해석을 수행하고, 계산된 수치해석결과의 검증을 위해 원형섬 주변의 처오름높이에 대한 수리실험 결과와 비교하였다. Kim et al. (2008)은 홍수범람 발생유무, 범람 면적 또는 최대수위를 예측 및 모의가 가능한 쿼드트리격자 기반의 2차원 수치모형을 개발하여 경상남도의 의령천을 대상으로 빈도별 홍수범람 모의를 수행하였다. An and Yu (2011)는 Gerris모형의 천수방정식 모듈에서 분할격자기법(Cut Cell Method)을 사용할 수 있도록 수정 및 확장하여 유럽 IMPACT 프로젝트에서 수행한 도시지역 돌발홍수 범람 실험을 모의하고, 모의결과 구조물에 의한 배수 (Backwater) 등의 현상이 실험결과와 잘 일치한다고 하였다.

상기 단락에서 인용하고 있는 적응적 메쉬세분화기법을 적용한 연구 중 다수는 오픈 소스 소프트웨어인 Gerris 모형(Popinet, 2003)을 사용하여 연구가 수행되었다. 국외

에서는 Gerris모형이 개발되면서 적응적 메쉬세분화 기법에 관한 연구가 활발히 진행되었으며, 다양한 기법을 접목시켜 효율적인 격자의 생성 및 해석방법에 대한 연구를 시도하고 있다. Gerris모형의 쿼드트리격자는 전형적인 벤치마크 문제나 극한홍수실험 등을 정확히 모의하였으나, 실제 과제 및 월류에 의한 홍수범람에 대한 검토가 이루어 지지 않아 실제 침수지역에 대한 적용을 통하여 적용성의 평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 적응적 메쉬세분화기법을 기반으로 쿼드트리격자 생성법을 사용하는 Gerris모형을 이용하여 2002년 낙동강유역 벽산제의 붕괴로 인한 실제 홍수범람해석을 수행하고, 모의된 결과를 바탕으로 기존의 비구조적격자를 사용하는 상용모형인 FLUMEN (FLUvial Modeling Engine)모형의 해석결과 및 실제 침수흔적 자료와의 비교를 통해 쿼드트리 격자를 이용한 홍수범람모의의 대한 적용성을 판단하였다.

2. 지배방정식과 수치해법

Gerris모형과 FLUMEN모형에 적용된 지배방정식은 천수방정식으로 연속방정식(Continuity Eq.)과 운동방정식(Momentum Eq.)으로 구성되어 있다. 천수방정식은 Navier-Stokes 방정식을 정수압 가정하에 수심적분하여 유도되며 점성, 전향력, 표면응력을 무시할 경우 보존형태의 2차원 천수방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial y} = \mathbf{s} \quad (1)$$

여기서, \mathbf{q} 는 보존변수들로 이루어진 물리적 벡터, \mathbf{f} 및 \mathbf{g} 는 각각 x 및 y 방향의 흐름률을 나타내고, \mathbf{s} 는 생성/소멸 벡터항으로 다양한 물리적 지형적 효과를 반영할 수 있으며 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} vh \\ vuh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix}, \mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{bmatrix}$$

여기서, h 는 수심, t 는 시간, g 는 중력가속도, u, v 는 x 와 y 방향으로 수심 평균된 유속을 나타내며, S_o 는 하상경사로 하상고(z)의 x, y 방향 변화량($S_{ox} = -\partial z / \partial x, S_{oy} = -\partial z / \partial y$)으로 계산되고, S_f 는 마찰경사를 나타낸다.

두 모형은 수치해법으로 유한체적법을 적용하고 있으며, 유한체적법의 적용을 위해 Eq. (1)을 공간 적분하여 Green의 정리를 적용하면 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 계산영역은 Fig. 1과 같이 삼각형 또는 사각형형태의 검사체적으로 이루어진 비구조적 격자시스템으로 분할되게 된다.

$$\int_{\Omega} \mathbf{q} d\Omega + \oint_{\partial\Omega} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} d\partial\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega \quad (3)$$

여기서, $\Omega, \partial\Omega$: 계산영역과 계산경계면, \mathbf{F} : 계산요소의 경계면에 연직한 흐름률의 벡터, \mathbf{S} : 생성/소멸항 벡터, \mathbf{n} : 경계면에 연직한 단위벡터이다.

Eq. (3)을 유한체적법에 의해 각 셀(Control Volume)에서 적분한 후 이산화 한다. 이 과정은 비구조적 격자를 사용하는 FLUMEN과 쿼드트리 격자를 사용하는 Gerris 두 모형이 대동소이 하나 체적의 모양에 따라 세부적인 해법이나 표기방법은 달라진다. 본 논문 목적은 Gerris 모형의 검증이므로 Gerris 모형의 수치해법을 중심으로 기술하였다. FLUMEN의 상세한 수치해법은 Beffa (2004)를 참조하길 바란다. 쿼드트리 격자를 기준으로 Eq. (3)을 이산화하면 다음과 같은 식이 성립한다.

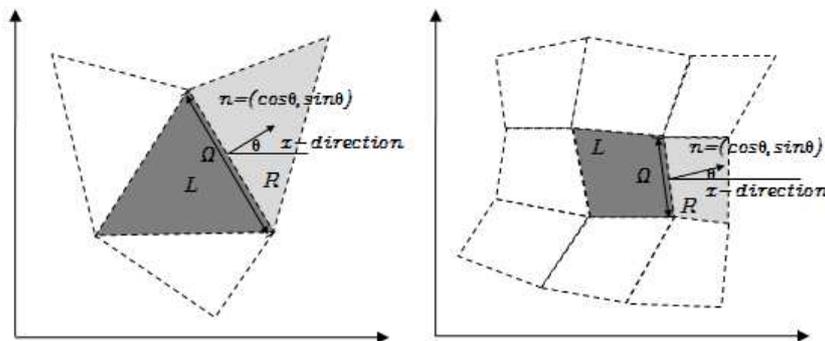


Fig. 1. Unstructured Finite Volume Model of a Triangle and a Rectangle Grid System

$$\frac{A_{i,j}}{\Delta t}(\mathbf{q}_{i,j}^{n+1} - \mathbf{q}_{i,j}^n) + \mathbf{F}_{i,j} = \mathbf{S}_{i,j} \quad (4)$$

여기서, $A_{i,j}$ 는 (i, j) 셀의 면적, Δt 는 이산화된 시간간격이며, $\mathbf{F}_{i,j}$ 는 수치흐름률(Numerical Flux)이다. 쿼드트리 격자도 비구조격자의 일종이나 직교격자의 수치해법이 손쉽게 적용가능하므로 편의상 (i, j) 인덱스를 사용하여 표기하였다. 쿼드트리 격자상에서 수치흐름률 $\mathbf{F}_{i,j}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{F}_{i,j} = l_y \mathbf{F}_{i+1/2,j} - l_y \mathbf{F}_{i-1/2,j} + l_x \mathbf{F}_{i,j+1/2} - l_x \mathbf{F}_{i,j-1/2} \quad (5)$$

여기서, l_x, l_y 는 x, y 방향의 셀 길이이다. 격자 경계를 통해 출입하는 수치흐름률 $\mathbf{F}_{i+1/2,j}$ 등의 계산을 위해서는 수치해석기법이 적용되어야 하며, 천수방정식과 같은 쌍곡선형 방정식과 단일한 도약에 의해 불연속인 어떤 점의 좌우에서 상수인 자료로 구성되는 초기치 문제인 Riemann 문제에 대한 해법이 필요하다. Gerris모형에서는 Toro et al. (1994)에 의해 제안된 HLLC 근사 Riemann해법을 사용한다. HLLC기법은 엔트로피 조건을 만족하며 (Leveque, 2002), 하류부로 파가 전파될 때 발생할 수 있는 마른하도에 대한 계산도 용이하게 처리할 수 있는 장점이 있다(Fraccarollo and Toro, 1995). 또한 마른하도를 젖은하도와 마찬가지로 해석적으로 처리함으로써 마른바닥에도 항상 일정깊이 이상의 수심이 존재한다는 비물리적인 가정을 기반으로 하는 Roe기법보다 정확한 계산결과를 제공하고(Kim et al., 2003), 특히 2차원문제의 해석에 있어서 더 높은 정확도를 제공한다(Valiani et al., 2002).

Gerris에서는 2차 공간정확도를 위해 흐름률 계산 이전에 자료를 재구성하는 MUSCL기법(Van Leer, 1979)이 적용되었다. 셀 내부 또는 경계에서의 값은 선형함수를 통해 재구성되고 수치흐름률 계산에 재구성된 값들이 사용됨으로서 공간 2차정확도를 유지한다. 선형함수의 경사를 구할 때는 수치적 진동을 회피하기 위하여 제어자가 사용되게 되는데 Gerris에서는 mindod, superbee, Sweby, van Leer 등의 제어자를 사용할 수 있고, 최근 An and Yu (2012)에 의해 MLP제어자가 추가되었다. 본 논문에서는 안정적인 minmod 제어자가 사용되었다.

수치해법상 또 하나 언급하고 넘어가야 될 문제는 흐름률항과 생성항간의 수치적 불균형 문제다. 정지 상태($u, v = 0$)를 정확하게 해석하기 위해서는 이 문제를 필수적으로 해결해야 하며, 이 문제를 적절히 해결하지 않으면 마름/젖음 상태가 교차될 때 수치적으로 불안정한 상황이 발생

하기도 한다. 일반적으로 모든 형태의 생성항을 안정적으로 처리하는 기법은 아직 없으나 하상경사의 생성항을 처리하는 기법은 여러 종류 알려져 있다(Rogers et al., 2001; Audusse et al., 2004). 그 중 Gerris는 Audusse et al. (2004)이 제안한 "Hydrostatic Reconstruction"기법을 사용하여 수치적 불균형 문제를 처리하고 있다. 상세한 사항은 Popinet (2011) 또는 An and Yu (2012)를 참고하기 바란다.

본 논문에서 비록 고해상도 수치기법이 적용된 모형을 사용하고 있으나 이러한 기법들을 천수방정식에 적용하는 것은 위에 언급한 연구들을 포함하여 국내외 많은 학술논문들에서 상세하게 다루고 있고, 또한 본 논문의 목적은 Gerris모형의 적용성 평가에 있으므로 보다 자세한 수치해법에 관한 해설은 생략하기로 한다. 참고를 위해 FLUMEN모형에서는 Flux 항의 처리를 위해 물리차분 분할기법(Flux Difference Splitting; Roe, 1981)을 사용하며 공간 2차정확도의 수치해법을 사용한다.

3. 적응적 메쉬세분화기법과 쿼드트리격자

Gerris모형은 효율적인 격자의 생성을 위하여 적응적 메쉬세분화기법을 적용하여 유체의 흐름변화에 따라 자동적으로 빠르고 안정적으로 격자를 생성하는 쿼드트리격자 생성법을 사용하고 있다. Gerris의 적응적 메쉬세분화기법과 쿼드트리격자 생성규칙은 다음과 같다(Popinet, 2003; An and Yu, 2011).

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

적응적 메쉬세분화가 적용된 쿼드트리격자 생성기법은 Fig. 2(a)와 같은 개념으로 설명할 수 있다. 상위격자는 4개로 분할된 하위격자를 가질 수 있으며, 분할된 하위격자는 다시 4개로 분할된 하위격자를 갖는 상위격자가 될 수 있다. 구성의 기본은 Fig. 2(b)와 같다. 셀의 단계(Level)가 0인 셀을 Root셀이라고 하며, 가장 상위의 셀인 Root셀에서 하위격자가 순차적으로 생성된다. 격자의 세분화조건으로 경계면의 형태, 지형경사, 고도 등이 사용될 수 있으며, 시간에 따라 셀이 바뀌는 동적 적응 메쉬세분화기법도 사용 가능하다.

예를 들어 Fig. 3(a)와 같이 단위크기의 정사각형 내에 데이터가 존재할 경우 이를 4등분하여 격자를 생성하면서 세분화를 진행하게 된다. Fig. 3(b)는 생성된 쿼드트리 격자를 계층적인 구조로 나타낸 것으로, 최상위 셀인 A셀에서 분할되어 각 단계별로 더 이상의 분할이 필요 없는 Leaf셀과 하위셀로의 분할이 필요한 상위셀을 판단하여 세분화를 진행한다. 이를 통해 계산이 불필요한 격자를 제외시키거나 동일한 데이터 값을 갖고 있는 격자를 통합시켜 해석시간을 단축할 수 있게 된다.

Fig. 4는 쿼드트리 격자 생성법을 이용하여 하천범람을 모의한 것으로 제내지로의 범람 전과 1시간 후의 쿼드트리 격자의 변화를 나타내고 있으며, 흐름의 변화에 따라 격자의 구성이 변하는 것을 확인 할 수 있다.

4. 모형의 적용

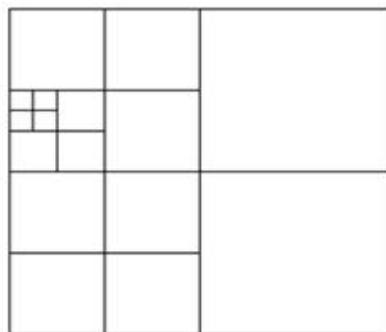
4.1 대상유역

본 연구의 대상유역인 백산제는 경상남도 함안군 범수

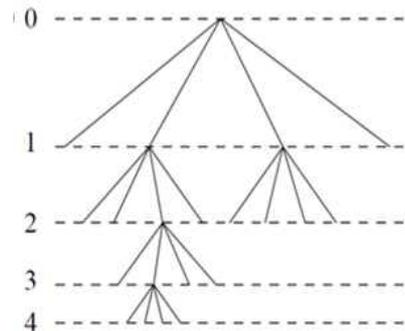
면 백산리에 위치하고 있고, 남강댐 하류의 정암 수위표 지점으로부터 하류측으로 10.21 km 떨어져 있다. 백산제 붕괴지점으로부터 하류로 16.48 km 지점에서 낙동강 본류와 남강이 합류하고 있기 때문에, 백산제 지점은 홍수기에 낙동강 본류의 배수(背水) 영향을 충분히 받을 수 있는 수취약 지역으로(Kim, 2004), 2002년 8월 6일부터 시작한 집중호우로 인해 8월 10일 16:10경 붕괴되었으며, 8월 10일부터 8월 20일까지 11일간 침수되었다. 제방의 붕괴 길이는 약 15 m 정도이며 붕괴 후 제방높이는 EL.10.3m로 조사되었다(Ministry of Construction and Transportation, 2007).

4.2 경계조건

본 연구에서는 2002년 8월 백산제의 붕괴에 따른 홍수 범람 모의를 위해 집중호우 기간의 3개의 수위관측소(정암, 적포교, 진동) 자료를 사용하였다. 상·하류 경계조건 산정에 있어 FLUMEN의 경우 격자망수의 제한으로 수위 관측소 범위에 해당되는 모든 하도 구간을 포함해서 해석

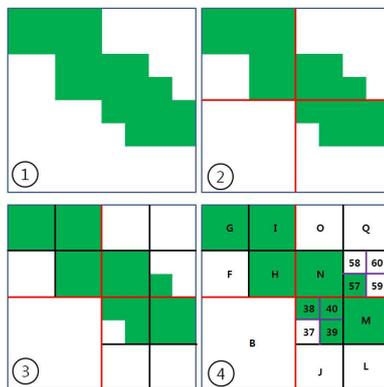


(a) Quadtree Mesh

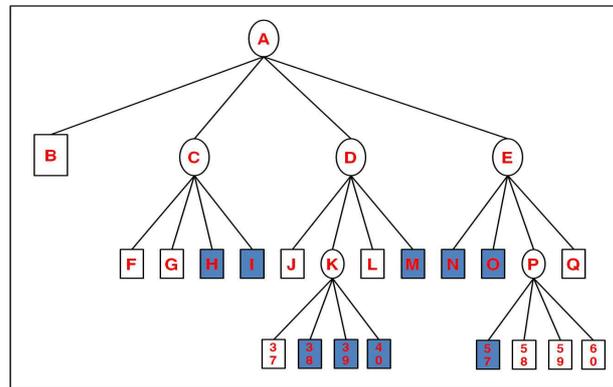


(b) Logical Structure

Fig. 2. Concept of Quadtree Grid Structure



(a) Grid Refinement Process



(b) Logical Structure

Fig. 3. An Example of Adaptive Mesh Generation

하기에 어려움이 있어 HEC-RAS를 통하여 해석에 필요한 일부구간의 홍수위와 유량을 산정하여 경계조건으로 사용하였다. Fig. 5는 대상구역의 초기조건 및 경계조건 산정을 위하여 사용된 수위관측소의 위치 및 해석구간을 나타내며, Ministry of Construction (1992, 1993)의 낙동강의 측량자료를 기준으로 하도망을 구성하고, Ministry of Construction and Transportation (2002)의 각 수위관측소의 수위 및 유량자료를 사용하여 모의구간에 대한 홍수위를

를 산정하였다. 상류 경계조건은 유량을, 하류 경계조건으로 수위를 적용하였으며 산정된 수위 및 유량조건은 Fig. 6과 같다.

4.3 지형

입력자료의 구축 시 많은 시간을 소요하는 부분이 지형 자료의 구축이다. FLUMEN의 경우 수치지형도 바탕으로 격자의 구성을 위하여 지형의 좌표 및 경계라인을 텍스트

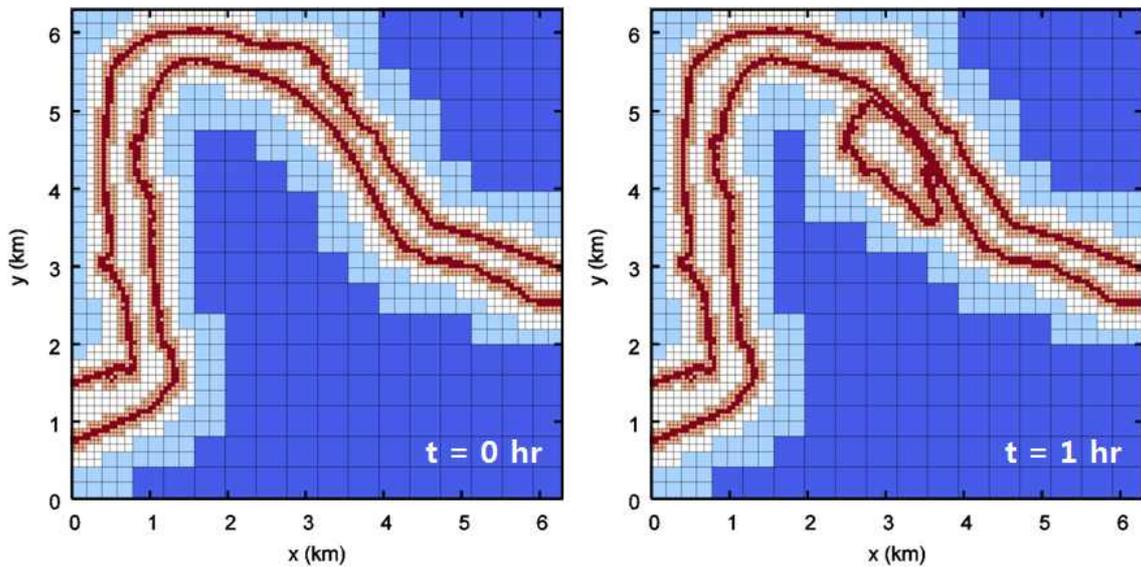


Fig. 4. Change of Grid Refinements with Time

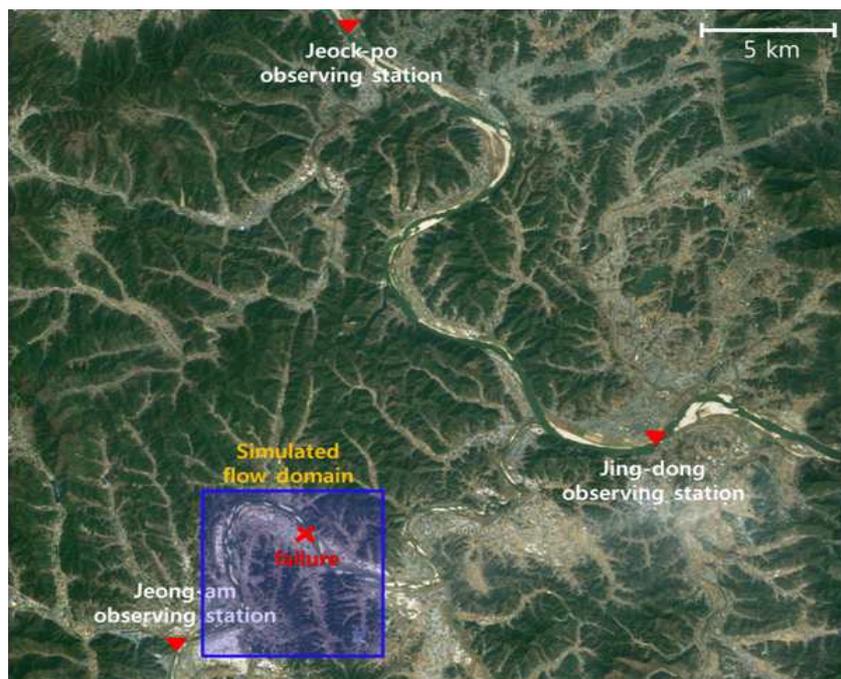


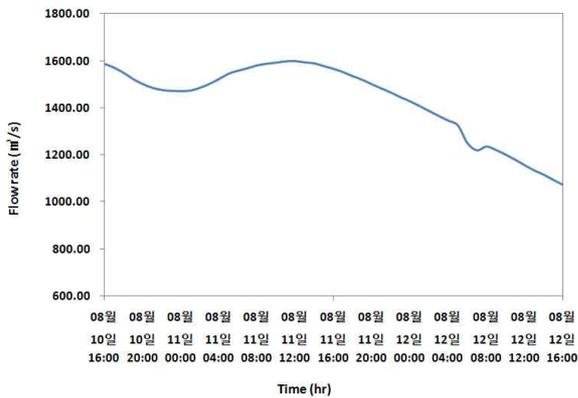
Fig. 5. Simulated Flow Domain of Nakdong River Basin

형식으로 구분하여 생성해 주거나 다른 모형에서 격자를 생성하여 적용시켜야 하는데 반해 Gerris는 DEM으로부터 자동적으로 격자를 생성하기에 지형자료 구축에 있어 상당한 시간을 절약할 수 있다. 본 연구에서는 1:5000 수치지도로부터 지형자료를 구축 하였으며, 각각의 모형에서 생성된 격자는 Fig. 7과 같다. Gerris에서는 일단 조밀한 격자를 사용하여 지형자료를 구축 후 메쉬 세분화기능을 이용하여 격자를 다시 재구축한다. 격자를 세분화하는 기준은 수위나 속도의 기울기가 일정 기준 이상이 되면 격자를 세분화하게 되는데 이 때 민감도는 매개변수로 주어지며, 모의크기에 따라 적절히 정해 줄 필요가 있다. 본 모의에서는 수위를 기준으로 격자를 세분화 했으며, 격자간의 기울기는 0.1을 기준으로 수위변화가 큰 영역은 세밀한 격자가 수위변화가 적은 곳은 비교적 조밀한 격자가

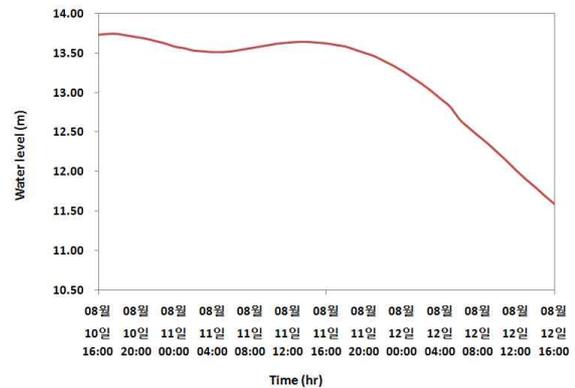
사용되었다. 또한 모의를 진행해 감에 따라 추가적으로 필요한 부분은 다시 세분화가 진행되고 흐름이 일정해져 가는 영역은 다시 큰 격자로 통합되어 매우 효율적인 모의가 가능하다.

4.4 조도계수

하천의 조도계수는 하상재료 및 식생, 하천구조물, 하도의 불규칙성, 하도정비 상태 등에 따라 변하는 특성을 지닌 수리학적 주요 변수 가운데 하나이다. 하도의 거친 정도를 표시하는 정도를 나타내는 조도(Roughness)는 유출특성에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이며, 지표면의 표면류(Overland Flow)의 흐름속도를 완만하게 하여 침투능을 증가시키는 반면에 토양침식을 완화시킨다. 제외지의 조도계수는 Ministry of Construction (1991)에서 제

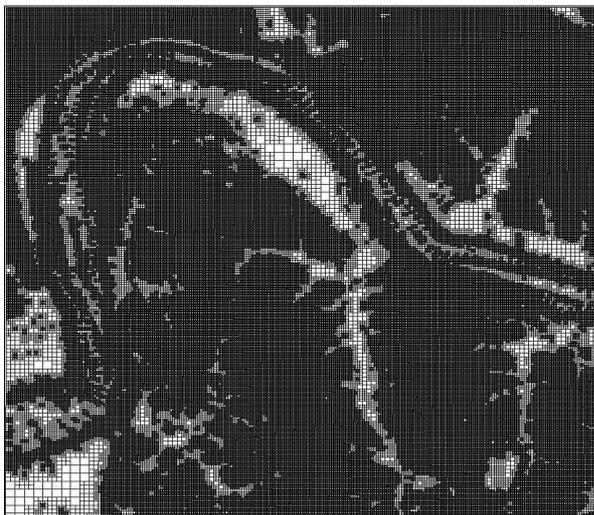


(a) Upstream Boundary Conditions

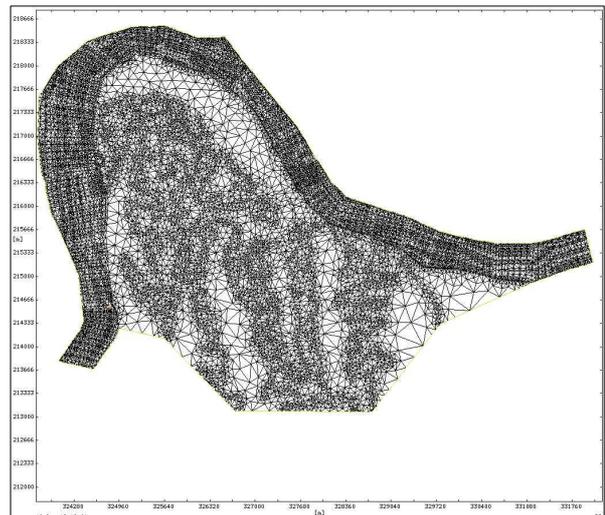


(b) Downstream Boundary Conditions

Fig. 6. Computed in HEC-RAS through the Boundary Conditions



(a) Grid Generation of Gerris



(b) Grid Generation of FLUMEN

Fig. 7. Grid Generation of Gerris Model and FLUMEN Model

시하고 있는 0.023을 적용하였으며, 제내지의 조도계수는 MLTM (2008)의 범람모형 매개변수 산정절차에 의거 Fig. 8과 같이 대상유역의 토지이용도상에서 토지이용면적을 구하고, 이를 Eq. (6)에 적용 후 산정된 합성등가조도계수 0.58을 제내지의 조도계수로 적용하였다.

$$n_o^2 = \frac{n_1^2 A_1 + n_2^2 A_2 + n_3^2 A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \quad (6)$$

여기서, $n_1 = 0.060$, $n_2 = 0.047$, $n_3 = 0.050$ 으로 각 항에 대한 조도계수이며, A_1 =농지, A_2 =도로, A_3 =기타면적이다. 농지는 논, 밭 및 과수원 등이고, 도로면적은 연선의 보도면적을 포함하여 국도, 주요지방도를 포함한다. 황무지, 초지 및 습지 등은 그 외의 토지이용으로 간주한다.

5. 홍수범람해석 결과분석

앞 장에서 구축된 자료들을 바탕으로 Gerris모형과

FLUMEN모형을 이용하여 홍수범람해석을 수행하였다. 해석결과의 추출면에서 FLUMEN의 경우 수위, 수심등의 각 항목에 대하여 시간별로 결과를 도출해야 하며, 이를 정리하는데 상당한 시간이 소요되나 Gerris의 경우 지점을 선택하여 해당지점에 대한 시간단계, 항목들에 대한 모든 정보를 텍스트형식으로 불러올 수 있다는 차이가 있다. 동일한 해석구간에 대한 홍수범람 해석시간은 Gerris의 경우 약 30분의 시간이 소요되었으며, FLUMEN은 약 7시간이 소요되었다. 시간별 제외지-제내지 수위는 Fig. 9와 같이 변화하였다. 제내지의 수위변화는 최초 제방이 붕괴된 시점으로부터 수위상승이 시작하여 Gerris모형은 붕괴발생 약 24시간 후에 최대 수위인 EL.14.59 m에 도달하였고, FLUMEN모형은 22시간 후에 최대 수위인 EL. 14.63 m에 도달하였다. 이후 제내지에서 제외지로 역유입 현상이 발생하여 모의종료시간까지 계속되었다. 제외지와 제내지의 수위차의 변화로 제방붕괴 후 제내지로의 유입은 급격히 이루어진 반면에 역유입이 발생한 이후로

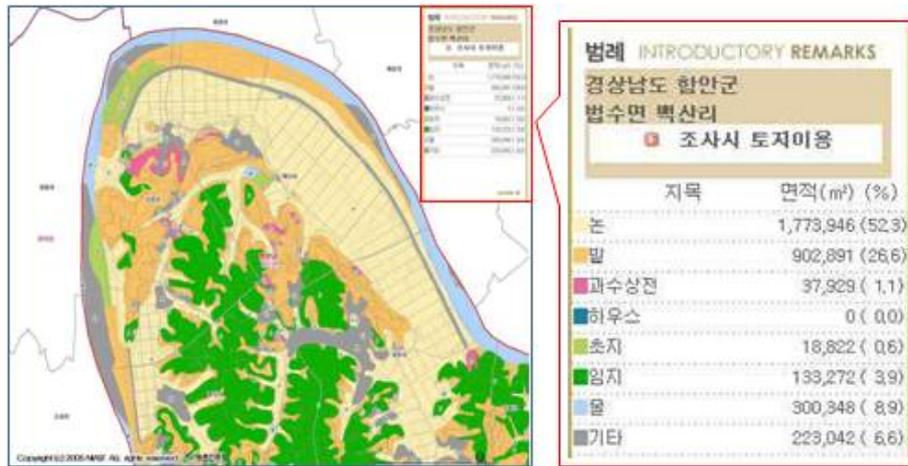
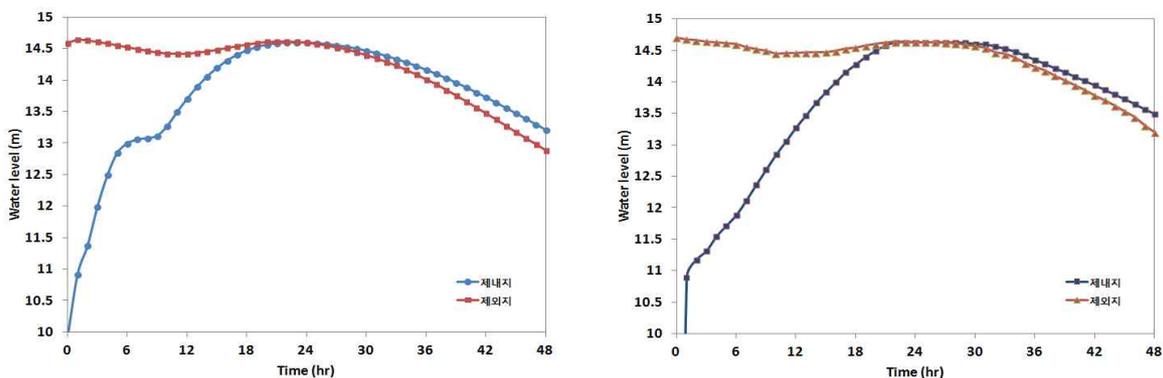


Fig. 8. Land Use Map of Beaksan-ri



(a) Waterlevel Change of Gerris

(b) Waterlevel Change of FLUMEN

Fig. 9. Waterlevel Change of Protected Lowland Area and Riverside Land Area

제외지로 역유입은 점진적으로 진행되고 있음을 알 수 있다.

침수면적의 변화는 Fig. 10에서 확인할 수 있다. Gerris 모형은 제방 붕괴 후 8시간이 지나서 최대 침수면적의 약 97%에 해당하는 면적에 침수가 일어났으며, 이후 서서히 침수면적이 증가하여 최대 침수면적인 약 3.51 km²에 이르기까지 약 21시간이 소요되었다. 이후 32시간까지 일정하게 유지되다가 모의종료시간까지 약간 감소되었다. FLUMEN모형은 제방붕괴 후 5시간이 지나서 최대 침수면적의 약 95%에 면적에 침수가 일어났으며, 이후 서서히 침수면적이 증가하여 최대 침수면적인 약 3.13 km²에 이르기까지 약 22시간이 소요되었다. 이후 모의종료시간까지 침수면적은 일정하게 유지되었다. 제방 붕괴 후 6시간

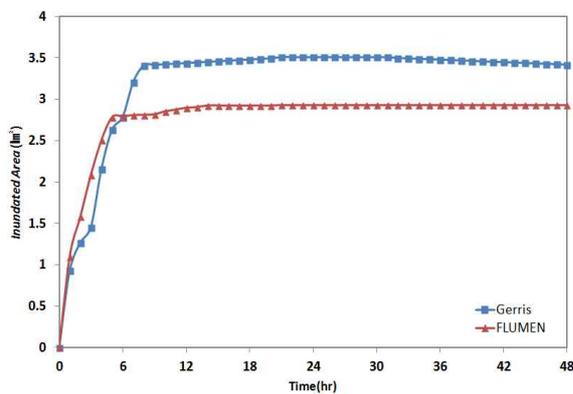
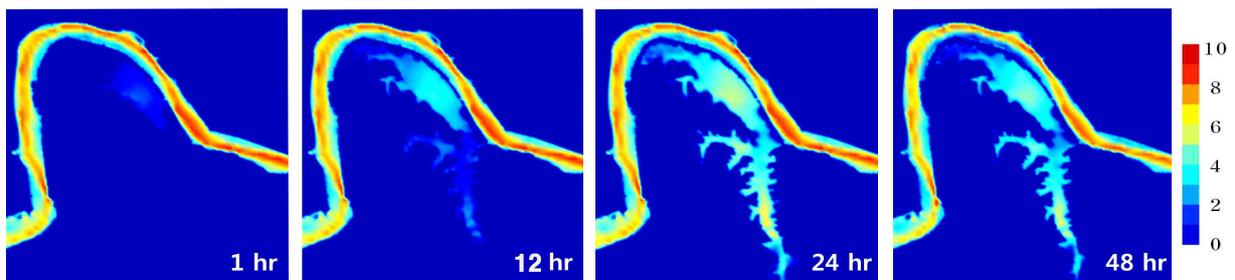


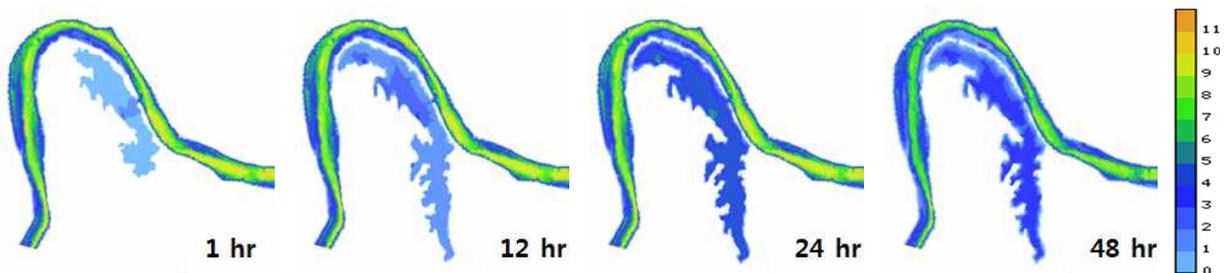
Fig. 10. Comparison of Flooded Area Change

이전의 침수면적의 증가는 FLUMEN모형이 Gerris모형에 비해 급격히 진행되었으나, Gerris모형은 6시간 이후에도 약 8시간까지 급격히 침수면적의 증가가 발생했다. 이러한 차이는 지형자료구축 및 격자생성방법의 차이에 의한 모형에 적용되는 지형적 특성의 차이에 의한 것으로 격자생성방법의 차이가 홍수범람해석 결과에 많은 영향을 준다는 것을 나타낸다. Gerris모형과 FLUMEN모형의 최대침수심은 각각 5.84 m와 6.4 m로 기존 침수면적 내에 범람수의 저류에 의한 침수심의 증가가 Gerris모형에 비해 침수면적이 적은 FLUMEN모형에서 깊게 나타나는 것으로 두 모형의 해석결과에 있어 지형에 의해 차이가 발생함을 다시 확인할 수 있다. 각 모형의 주요 시간별 침수심의 변화는 Fig. 11에서 확인할 수 있다.

Fig. 12는 각 모형의 최대 침수면적과 실측침수도를 비교하여 도시한 것으로서 Gerris의 경우 실측침수도에 비해 약 0.31 km² 과다 산정되었고, FLUMEN의 경우 약 0.27 km² 과소 산정되었다. 두 모형 모두 실측침수도의 침수면적과 차이를 보였으며, 면적의 차이만으로는 FLUMEN모형이 Gerris모형보다 실제침수면적에 근접한 값을 보였으나, Gerris의 경우 FLUMEN에 비해 실제 지형의 형상을 잘 반영하였으며, 실제 침수된 형상을 잘 나타내었다. 그리고 실측침수도의 면적에 비해 과다 산정된 약 0.31 km²의 침수면적은 지형의 형태를 살펴본 결과 침수면적과 비슷한 고도로 인접하여 분포되어 잠재적인 침수위험이 있는 지역이며, 수치지도상에 포함되어있지 않은 구조물 또

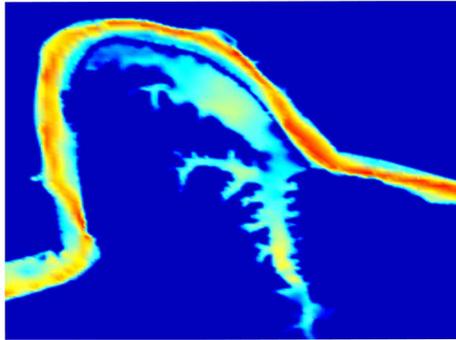


(a) Water Depth Changes of Gerris Model

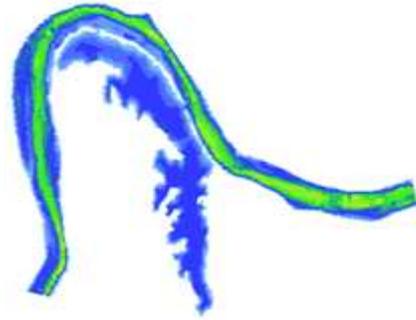


(b) Water Depth Changes of FLUMEN Model

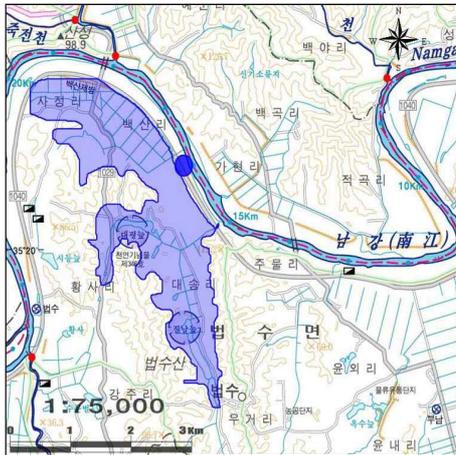
Fig. 11. Simulated Water Depths in the Beaksan Levee Failure Case



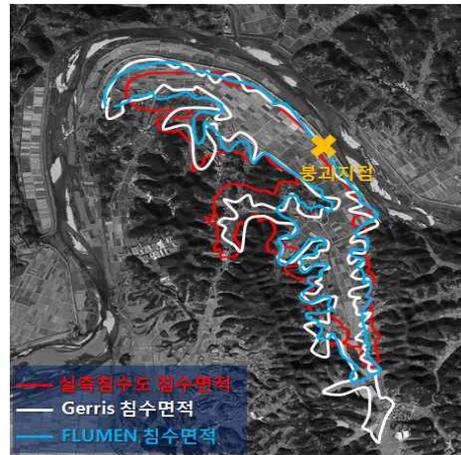
(a) Simulated Inundation Areas of Gerris



(b) Simulated Inundation Areas of FLUMEN



(c) Surveyed Areas



(d) Surveyed and Simulated Inundation Areas

Fig. 12. Comparison of Survey and Simulated Inundation Area

는 지형의 영향에 의해 실제 침수량상과는 약간의 오차가 발생할 수 있다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 Gerris모형의 쿼드트리격자의 홍수범람모의에 대한 적용성 판단을 위하여 2002년 8월 집중호우로 인한 제방붕괴 홍수피해가 발생한 백산제를 대상으로 홍수범람모의를 수행하였다. 해석 값의 검증을 위하여 입력자료 가공에서부터 결과 값의 획득 및 비교까지의 일련의 과정들에 대하여 Gerris모형과 사면구조격자의 홍수범람해석 및 치수경제성분석에 대한 적용성을 판단하였다. 이상의 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 연구대상지역인 백산제를 대상으로 Gerris와 FLUMEN을 이용하여 홍수범람해석을 수행한 결과 입·출력 데이터의 가공이 Gerris가 FLUMEN에 비해 용이하였고, 홍수범람 해석시간에 있어 Gerris의 경우 약 30분, FLUMEN은 약 7시간이 소요되어 기존의 비구조삼각형격자에 비해 쿼드트리격자에 의한 홍수범

람해석이 많은 시간을 단축시키는 것을 확인하였다.

- 2) 홍수범람 해석결과 Gerris모형과 FLUMEN모형의 침수면적과 침수심 결과에 차이가 발생하였다. 면적의 차이만으로는 FLUMEN모형이 Gerris모형보다 실제침수면적에 근접한 값을 보였으나, Gerris모형이 실제 침수된 지형의 형상을 잘 반영하였다. 실측 침수도의 면적에 비해 과다 산정된 Gerris모형의 침수면적은 지형의 형태상 침수면적과 비슷한 고도로 인접하여 분포되어 잠재적인 침수위험이 있는 지역이며, 수치지도상에 포함되어있지 않은 구조물 또는 지형의 영향에 의해 실제 침수량상과는 오차가 발생할 수 있다고 판단하였으며, 이에 Gerris모형의 쿼드트리격자를 활용한 홍수범람해석 결과는 타당하다고 평가하였다.

이와 같이 Gerris모형의 쿼드트리격자는 입·출력자료의 가공 및 홍수범람해석에 있어 시간을 단축할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있고, 본 연구대상지역의 홍수범람해석에 있어 기존의 2차원 모형인 FLUMEN에 비해 지형을 비교적 정확히 표현하는 것으로 나타났다. 그리고 격

자수에 제한이 있는 FLUMEN모형에 비해 넓은 지역을 대상으로도 해석을 수행할 수 있는 장점이 있어 홍수범람 모의에 적합하여 홍수범람예측시스템의 구축에 활용도가 높을 것으로 판단된다. 하지만 해석대상 지역이 너무 넓어질 경우 모의 시간이 길어져 비효율적인 결과가 나올 수 있으므로 실제 홍수범람예측시스템에 적용하기 위해서는 유역을 효율적으로 분할하여 해석을 수행할 수 있도록 다양한 지역 및 홍수사상을 대상으로 충분한 모의가 수행된다면 실시간 홍수범람예측 시스템의 구축에 있어 Gerris모형과 쿼드트리격자는 유용하게 사용될 수 있을 것이라 기대한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- An, H., and Yu, S. (2011). "Numerical simulation of urban flash flood experiments using adaptive mesh refinement and cut cell method." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 228, pp. 511-522.
- An, H., and Yu, S. (2012). "Well-balanced shallow water flow simulation on quadtree cut cell grids." *Advances in Water Resources*, Vol. 39, pp. 60-70.
- Audusse, E., Bouchut, F., Bristeau, M., 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, pp. 2050-2065.
- Beffa, C. (2004). *FLUMEN user manual*. Fluvial.ch.
- Billett, S.J., and Toro, E.F. (1997). "On waf-type schemes for multidimensional hyperbolic conservation laws." *Journal of Computational Physics*, Vol. 130, pp. 1-24.
- Fracarollo, L., and Toro, E.F. (1995). "Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, pp. 843-864.
- Han, K.H. (2009). "Flood defense project for the next generation considering climate change." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 57, No. 3, pp. 10-11.
- Kim, I.H. (2004). *Flood inundation analysis due to levee failure in Nakdong-River in 2002*. M.S. dissertation, University of Kyungpook.
- Kim, J.H., Lee, S.O., Yoon, K.S., and Cho, Y.S. (2008). "Application of a two-dimensional flood inundation model based on quadtree grid." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 8, No. 3, pp. 129-136.
- Kim, W.G., Jung, K.S., and Kim, J.H. (2003). "Weighted averaged flux method for computation of shallow water equations." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 5, pp. 777-785.
- Kim, Y.S. (2003). *Korea flood disaster characteristics and countermeasures*. National Disaster Management Institute.
- Leveque, R.J. (2002). *Finite volume methods for hyperbolic problems*, Cambridge University Press.
- 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.
- Lin, T.H., Park, K.Y., and Cho, Y.S. (2004). "Inundation of tsunamis based on quadtree grid system." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 4, No. 2, pp. 71-76.
- Ministry of Construction. (1991). *Fundamental planning report for Nakdong River improvement (supplement)*.
- Ministry of Construction. (1992). *Fundamental planning report for Nakdong River improvement (supplement II)*.
- Ministry of Construction. (1993). *Fundamental planning report for Nakdong River improvement (supplement III)*.
- Ministry of Construction and Transportation. (2002). *Flood forecasting and warning system in Nakdong river*.
- Ministry of Construction and Transportation. (2007). *Development and operation of sluice gate management system*.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2008). *Guidelines for creating a flood risk map*.

Popinet, S. (2003). "Gerris: A tree-based adaptive solver for the incompressible euler equations in complex geometries." *Journal of Computational Physics*, Vol. 190, pp. 572-600.

Popinet, S. (2011). "Quadtree-adaptive tsunami modelling." *Ocean Dynamics*, Vol. 61, pp. 1261-1285.

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.

Toro, E.F., Spruce, M., and Speares, W. (1994). "Restoration of the contact surface in the HLL Riemansolver." *Shock Waves*, Vol. 4, pp. 25-34.

Valiani, A., Caleffi, V., and Zanni, A. (2002). "Case study: Malpasset dam-break simulation using a two-dimensional finite volume method." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, pp. 460-472.

van Leer. (1979). "Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to godunov's method." *Journal of Computational Physics*, Vol. 32, pp. 101-136.

논문번호: 13-015	접수: 2013.02.13
수정일자: 2013.03.20/03.28/03.29	심사완료: 2013.03.29