

# 격자유형과 해상도를 고려한 2차원 홍수범람 모델링

김병현\*

Kim, Byunghyun\*

## Two-Dimensional(2-D) Flood Inundation Modeling Considering Mesh Type and Resolution

### ABSTRACT

In this study, 2-D Godunov type finite volume model which can apply the mixed mesh including triangular and quadrilateral meshes for flood inundation modeling is used to compare and analyze the flood height, flood extent and model execution time according to mesh type and resolution. The study area is the Upton-upon Severn watershed in Great Britain, where the flood occurred for 22 days from October 29 to November 19, 2000. For the flood modeling, topographic data were constructed using high resolution LiDAR (Light Detection And Ranging). The results of the 2-D flood modeling by the mesh type and resolution were compared with four ASAR (Airborne Synthetic Aperture Radar) images captured during the flood period. This study has shown that flood height and extent can vary greatly depending on the mesh type and resolution, even if identical topography and boundary conditions are used, and that the selection of appropriate mesh type and resolution for the purpose and situation of the 2-D flood modeling is necessary.

**Key words :** Mesh type, Mesh resolution, ASAR, 2-D flood modeling, Finite volume model

### 초록

본 연구에서는 홍수모델링을 위해 삼각격자와 사각격자를 포함하는 혼합격자의 적용이 가능한 2차원 Godunov형 유한체적모형을 이용하여 격자형상과 해상도에 따른 홍수위, 홍수범람범위, 모형의 계산시간을 비교·분석하였다. 연구구역은 2000년 10월 29일부터 11월 19일까지 22일 동안 홍수가 발생한 영국의 Upton-upon Severn 유역이다. 홍수 모델링을 위해 고해상도 LiDAR (Light Detection And Ranging)를 이용하여 지형자료를 구축하였으며, 격자유형 및 해상도에 따른 2차원 홍수모델링 결과는 홍수기간 동안 촬영된 4개의 ASAR (Airborne Synthetic Aperture Radar) 영상자료와 비교하였다. 본 연구는 동일한 지형과 경계조건을 사용하더라도, 격자의 형상과 해상도에 따라 홍수위와 범람범위가 큰 차이를 가질 수 있음을 보여주었으며, 2차원 홍수모델링의 목적과 상황에 맞는 적절한 격자유형과 해상도의 선택이 필요함을 보여준다.

**검색어 :** 격자유형, 격자해상도, ASAR, 2차원 홍수모델링, 유한체적모형

## 1. 서론

Godunov형 유한체적모형은 충격파(Shock-wave)를 발생시키는 천이류 해석에 용이한 근사 Riemann 해법의 등장으로 댐 및 제방 붕괴(Begnudelli et al., 2008; Gallien et al., 2011; Liao et al., 2007; Toro, 2001; Kim and Sanders, 2016), 도시홍수(Horritt et al., 2007; Munson et al., 2006; Schubert et al., 2008; Testa et al., 2007; Kim et al., 2015), 연안홍수(Ern et al., 2008; George, 2010)와 같은 고관성(High-inertia) 흐름인 홍수류 해석에 많이 적용되고 있다. 또한, 근사 Riemann 해법(Toro, 2001)은 불연속 Galerkin 유한요소법(Bates et al., 2006; Ernst et al., 2010; Kesserwani and Liang, 2012)이나 비정수압 흐름을 해석할

\* 종신회원·교신저자·행정안전부 국가민방위재난안전교육원 교수 (Corresponding Author·Ministry of the Interior and Safety·bhkimc@korea.kr)

Received January 29, 2019/ revised February 12, 2019/ accepted February 18, 2019

수 있는 Boussinesq 모형(Kreibich et al., 2009)과도 함께 적용될 수 있어 최근 Godunov형 모형이 비약적인 발전을 이루는데 큰 기여를 하였다.

Godunov형 모형을 이용한 홍수모델링에서는 일반적으로 구조적 사각격자(Aizinger and Dawson, 2002; Gallegos et al., 2012; Guinot, 2003; Kelman and Spence, 2003)나 비구조적 삼각격자(Begnudelli and Sanders, 2007; Singh et al., 2011; Wang et al., 2011)가 주로 적용된다. 비구조적 격자는 구조적 격자와 다르게 지형이나 매개변수의 정보를 담고 있는 격자의 중심이나 노드(Node)의 위치가 규칙적이지 않게 때문에 계산격자의 인접격자에 대한 정보를 추적하거나, 계산격자에서 원하는 해(주로 수위와, 유속)의 변화를 계산하는데 더 많은 계산적 노력이 요구된다. 하지만, 비구조적 격자는 복잡한 지형형상도 쉽게 생성하고 조정할 수 있으며, 관심지역의 주변에 국부적으로 격자를 세분화하기도 용이하기 때문에 복잡한 지형에 대한 격자생성을 위해서는 매우 유용하다. 따라서, 구조적격자와 비구조적격자의 장점만을 가질 수 있는 격자 생성 및 적용성에 관한 연구가 수행되었으며, 적응형 격자(Adaptive mesh) (Kim et al., 2009; Liao et al., 2007), 분할격자(Cut-cell) (Causon et al., 2000), 혼합격자(Abderrezzak et al., 2009; Cea and Vázquez-Cendón, 2010; Munson et al., 2006; Kim et al., 2014)에 대한 연구가 대표적이다.

2차원 수치모형을 이용한 홍수모델링에서 적용구역의 속성(지형이나 매개변수 등)정보가 격자의 노드나 중심에 입력되므로 적용 격자의 유형과 생성방법에 따라 모형의 입력자료 오차에 영향을 줄 수 있다. 입력자료 오차는 모형의 초기조건, 경계조건 그리고 조도계수와 같은 매개변수, 지형자료로 인해 발생하는 오차를 모두 포함하는 오차를 말한다. 홍수모델링을 위한 적용구역이 지형 변동성이 심한 지역이라면, 하천과 같은 유로를 잘 표현하기 위해서는 고해상도 격자가 적절하며, 이러한 고해상도 격자를 통해 모형의 입력자료 오차를 최소화할 수 있다. 또한 도수와 같은 흐름형상이나 흐름변동이 심한 구간에 대한 입력자료 오차를 줄이기 위해서는 고해상도 격자의 적용이 필요하다.

본 연구에서는 삼각격자와 사각격자의 적용이 가능한 2차원 Godunov형 유한체적모형을 적용하여 홍수해석을 위한 2차원 모형의 격자형상과 해상도에 따른 홍수위 및 홍수범람범위를 비교·분석하는 연구를 수행하였다. 연구구역은 2000년 10월 29일부터 11월 19일까지 계절 평균 강수량을 초과하는 이상강우로 인해 제방이 월류하여 홍수가 10일 이상 동안 발생한 영국의 Severn 강 유역이다. 연구구역의 홍수 모델링을 위한 지형자료는 3 m 해상도의 LiDAR를 이용하여 구축하였으며, 격자유형 및 해상도에 따른 2차원 홍수위 및 홍수범람범위를 비교·분석하기 위해서 홍수 발생 기간 동안 촬영된 4개(2000년 8월 11, 14, 15, 17일)의 ASAR

영상자료를 활용하였다. 즉, ASAR 영상으로 촬영된 최대범람시기 및 홍수위의 배수기를 활용하여 최대범람범위뿐만 아니라 홍수가 증가하는 시기와 하류단 배수로 인해 홍수가 감소하는 시기를 모두 포함하는 홍수범람범위에 대한 격자유형별 2차원 홍수범람모형의 예측 결과에 대해 비교하였다. 본 연구의 결과는 동일한 지형과 경계조건을 사용하더라도, 격자의 형상과 해상도에 따라 홍수위와 범람범위가 큰 차이를 가질 수 있음을 보여주었으며, 2차원 홍수모델링의 목적과 상황에 맞는 적절한 격자형상과 해상도의 선택이 필요함을 보여준다.

## 2. 적용 모형

### 2.1 지배방정식

본 연구에서 적용한 Godunov형 유한체적모형은 2차원 천수방정식을 지배방정식으로 하며, Eq. (1)과 같이 지배방정식을 벡터형태로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{U}_t + \mathbf{F}(\mathbf{U})_x + \mathbf{G}(\mathbf{U})_y = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{U}$ 는 보존변수,  $\mathbf{F}(\mathbf{U})$  및  $\mathbf{G}(\mathbf{U})$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 방향의 흐름율(Flux),  $\mathbf{S}(\mathbf{U})$ 는 하상경사 및 마찰경사항이다.

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + 1/2(gh^2) \\ huv \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + 1/2(gh^2) \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}(\mathbf{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$u$ 와  $v$ 는 각각  $x$ 와  $y$  방향의 속도,  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심,  $S_0$ 는 하상경사로  $x$  및  $y$  방향에 대해 각각  $S_{0x} = -\partial z_b / \partial x$ ,  $S_{0y} = -\partial z_b / \partial y$ 로 표현되며,  $S_{fx}$ 와  $S_{fy}$ 는 각각  $x$  및  $y$  방향의 마찰경사이다.

### 2.2 수치기법

본 연구에서는 현재 시간단계( $n$ )에서 계산된 격자 중심에서의 보존변수  $\mathbf{U}_j$ 를 다음 시간단계( $n+1$ )에 업데이트하기 위해서, 2단계 시간분할기법(Fractional method)을 적용하였다(Begnudelli and Sanders, 2008; Kim et al., 2014). 첫 번째 단계( $n$ 과  $n^*$ )에서는  $\mathbf{F}(\mathbf{U})$ 와  $\mathbf{G}(\mathbf{U})$ 가 고려되고, 두 번째 단계( $n^*$ 과  $n+1$ )에서는

$n^*$  단계에서 계산된 보존변수  $\mathbf{U}_j^*$  ( $\mathbf{U} = (h, hu, hv)^T$ )와 하상경사 및 마찰경사항  $\mathbf{S}(\mathbf{U})$ 가 고려되어 다음 시간단계( $n+1$ )에서의 보존변수( $\mathbf{U}_j^{n+1}$ )가 계산된다. 먼저 첫 번째 단계는 Eq. (3)으로 업데이트된다.

$$\mathbf{U}_j^{n+1} = \mathbf{U}_j^n - \frac{\Delta t}{A_j} \left( \sum_{k=1}^{K_j} w_{j,k} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n})_{j,k}^n - \sum_{k=1}^{K_j} w_{j,k} (\mathbf{G} \cdot \mathbf{n})_{j,k}^n \right) \quad (3)$$

두 번째 단계에서 연속방정식(Eq. (4a))은 모든 격자에서 업데이트가 이루어지지만, 운동량 방정식(Eqs. (4b) and (4c))은 격자중심에서의 수심( $d$ )이 허용수심( $\delta_w$ )보다 큰 경우( $d > \delta_w = 10^{-6}$  m이면 젖은바닥으로 가정)에만 업데이트가 이루어진다.

$$h_j^{n+1} = h_j^{n*} - \frac{\Delta t}{A_j} \mathbf{S}_j^{n*} \quad (4a)$$

$$(hu)_j^{n+1} = \frac{(hu)_j^{n*}}{1 + \Delta t V_j^n / h_j^n} \quad (4b)$$

$$(hv)_j^{n+1} = \frac{(hv)_j^{n*}}{1 + \Delta t V_j^n / h_j^n} \quad (4c)$$

여기서,  $A_j$  및  $K_j$ 는 각각 계산격자( $j$ )의 면적 및 격자를 둘러싸고 있는 경계면의 수,  $k$ 는 경계면 인덱스 그리고  $w_{j,k}$ 는 격자  $j$ 의  $k$ 번째 경계면 길이,  $V = (u^2 + v^2)^{1/2}$ 을 나타낸다.

### 3. 연구유역 및 자료

#### 3.1 연구유역

2000년 10-11월 계절 평균을 훨씬 상회하는 양의 강우로 인해 영국 전역에 걸쳐 광범위하고 장기간의 홍수가 발생하였고(Wright et al., 2008), Severn, Thames 그리고 Ouse 강 등에서 제방의 월류로 인한 홍수가 발생하여 10,000 여채의 가옥이 침수되고, £1Bn의 재산피해가 발생하였다(Bates et al., 2006). Severn 강은 웨일즈 동쪽의 산악지역에서 시작해서 잉글랜드 방향으로 흐르다가 남쪽과 서쪽 방향으로 굽이쳐 브리스톨 하천으로 연결되는 영국에서 가장 긴 강이다. 긴 구간 중에서 Upton-upon Severn(줄여서 Upton) 지역 인근을 흐르는 구간은 지형 및 수문자료 그리고 검증자료가 잘 갖춰진 지역으로 이미 여러 연구자들(Néelz et al., 2006; Bates et al., 2006; Horritt et al., 2007; Wright et al., 2008; Schubert 2009; Kuiry et al., 2010)이 홍수모델링을 위한 연구유역으로 적용하였다. 본 연구에서는 기존 연구와는 다르게 홍수해석을 위해 적용한 격자의 형태가 모형의 성능에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 본 연구유역을 선정하였다. Fig. 1은 전체 Severn 강의 일부인 홍수범람이 발생한 Upton 지역의 모식도

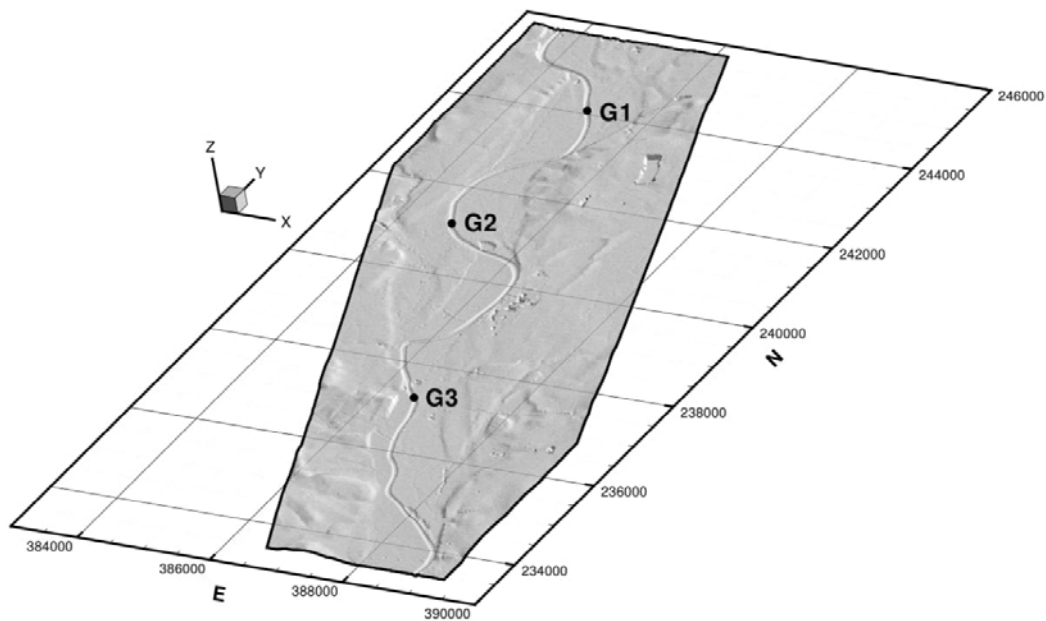


Fig. 1. Isometric View of Topography and Monitoring Stations in Severn River Test Site

를 보여준다. 연구유역에 위치한 Severn 강의 폭은 50~70 m, 깊이는 7~10 m, 홍수터는 하천에서 약 2 km 정도의 폭으로 뻗어있다. 지형은 비교적 평평하고 범람이 위치에 따라 2000년 11월 홍수 시 몇 시간에서 수일간 지속되었으며, 흐름의 형태는 상류(subcritical flow)만 발생하였다(Bates et al., 2006; Néelz et al., 2006). Fig. 1에서 보여주는 3개의 지점(G1, G2 and G3)은 격자의 유형과 해상도에 따라 계산된 홍수모델링 결과(홍수위)를 비교하기 위한 지점을 나타낸다.

### 3.2 적용자료

#### 3.2.1 지형자료

본 연구에서는 영국 환경청(EA, Environmental Agency)에서 제공하는 3가지 지형자료를 이용하였다. 3가지 자료로는 전체 연구유역에 대해 제공하는 3 m 해상도의 DTM (Digital Terrain Model), 연구유역의 중간 일부분에 대해 제공하는 1 m 해상도의 DTM 그리고 하천 지형자료이며, 이 자료들은 2002년 항공 LiDAR 측량을 통해 조사되었다. 3 m 해상도 DTM의 지형오차는 0.25 m 미만, 1 m DTM은 이와 비슷하거나 더 정확한 정도이며, 하천 지형자료는 15~100 cm 정도의 평균제곱근오차(RMSE)를 가지는 것으로 보고되었다(Bates et al., 2006; Néelz et al., 2006). 연구유역 내의 하천의 중심표고는 2.8~4.4 m 정도로 변하고 있으며, 하천 제방의 높이는 가파른 경사와 울창한 식생분포로 인해 DTM이 실제지형이 정확하게 반영하지 못할 수도 있어, 2차원 모형이 제방 월류량 및 홍수범람범위를 정확하게 예측하는데 한계가 있을 수도 있다.

#### 3.2.2 수문 및 ASAR 자료

2000년 10~11월 22일 동안 발생한 홍수를 2차원 홍수모델링을 위해 연구유역에서 이용 가능한 수문곡선은 Fig. 1에서 보여주는 유역의 상류단으로부터 약 3 km 정도에 위치한 Diglis 수위관측소에서 관측한 자료가 유일하다. 본 연구에서는 다른 연구자들(Néelz et al., 2006, Bates et al., 2006, Wright et al., 2008)과 마찬가지로 Diglis 관측소에서 측정된 수위와 수위-유량관계곡선 그리고 Diglis 관측소와 연구유역의 거리에 따른 홍수류의 유하시간을 고려하여 산정된 유량 수문곡선(Fig. 2)을 상류단 경계조건으로 적용하였다. 하류단 경계조건으로는 연구유역 내에서 관측된 수문 자료가 존재하지 않아, 기존 연구의 조건과 동일하게 5.5 m의 일정수위 조건을 적용하였다.

적용격자 유형에 따른 모형의 정확성 평가를 위해 2000년 11월 홍수사상 동안 관측한 4개의 ASAR 영상을 이용하였다(Fig. 3). 영상이 관측된 시간은 각각 11월 8일 12:18, 14일 12:42, 15일 16:48, 17일 13:44 이며, Fig. 2에서 보여주는 4개의 점선이 ASAR

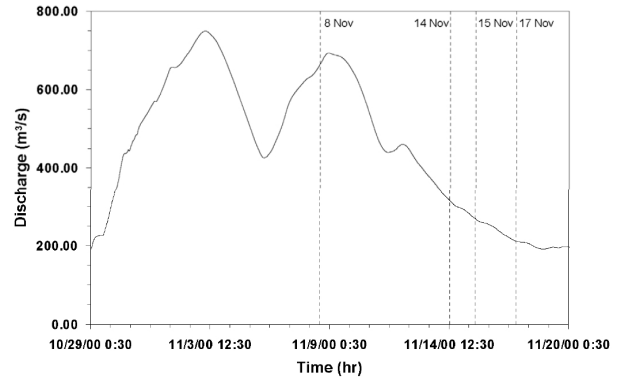


Fig. 2. Hydrograph of the November 2000 Flood Event

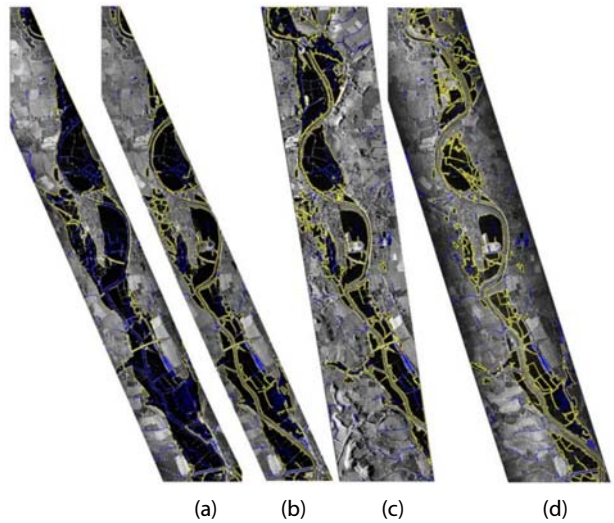


Fig. 3. ASAR Images of (a) 8 Nov 2000., (b) 14 Nov., (c) 15 Nov., (d) 17 Nov. (Bates et al., 2006)

영상이 관측된 시간을 나타낸다. Fig. 3에서 보여주는 ASAR 영상에서 파란색 부분은 배수 네트워크를 노란색 부분은 홍수범람범위를 나타내며, 처음 2개의 ASAR 영상 해상도는 3 m인 반면, 나머지 2개의 해상도는 1 m이다. 이 4개의 ASAR 영상은 Bates et al. (2006)에 의해 소개되었으며, 여러 홍수 모델링 연구에 활용되었다.

### 3.3 오차 및 적합도 지표

본 연구에서는 격자유형에 따른 모형의 정량적인 오차분석을 위해 몇 가지 지표를 사용하였다. 먼저,  $L_1$  오차는 자료의 수가  $N$ 개인 예측치와 관측치( $w_1, w_2$ ) 사이의 차이를 산정하는데 사용하였다.

$$L_1(w_1, w_2) = \sum_{j=1}^N \frac{|(w_1)_j - (w_2)_j|}{N} \quad (5)$$

적합도( $F_A$ , Agreement)는 모형의 예측 홍수범람범위( $D_p$ )와 관측 홍수범람범위( $D_m$ )사이의 일치성 정도를 판단하기 위해 사용되었다.

$$F_A = \frac{D_p \cap D_m}{D_p \cup D_m} \quad (6)$$

그리고 실제 홍수가 발생하였지만 모형에서는 예측하지 못한 홍수 범람범위를 산정하기 위한 과소범람( $F_{UP}$ , Under-prediction)와 이와 반대인 현상을 측정하기 위해 과대범람( $F_{OP}$ , Over-prediction)를 Eqs. (7) and (8)을 각각 적용하여 계산하였다.

$$F_{UP} = \frac{D_m - D_p \cap D_m}{D_p \cup D_m} \quad (7)$$

$$F_{OP} = \frac{D_p - D_p \cap D_m}{D_p \cup D_m} \quad (8)$$

격자유형에 따른 모형의 계산시간 또한 측정하여 비교하였다. 모형은 8 GB RAM이 장착된 3.07 GHz Intel Core™ i7 CPU를 사용한 PC에서 모의하고 그 시간을 측정하였다.

## 4. 모형의 적용

### 4.1 격자 생성

Fig. 4에서 보여주듯이, 본 연구에서는 격자유형에 따른 홍수모델링 결과를 비교하기 위해서 4가지 유형의 격자를 생성하였다. 먼저 4가지 격자 모두 공통적으로 홍수터에 대해서는 25 m의 해상도를 가진 비구조적 삼각격자로 생성하였으며, 제방을 따라 폴리라인(Polyline)을 적용하여 하천과 홍수터를 명확히 구분하여 제방을 월류하는 홍수량에 대한 정확성을 높이고자 하였다.

Mesh 1과 2 (Figs. 4a and 4b)는 하천과 홍수터를 포함하는 전체 연구유역에 대해 12 m 해상도의 비정형 삼각격자를 생성하였다. 두 격자 모두 하천에서의 격자 평균 해상도는 12 m로 흐름방향의 가로방향으로는 5개의 격자가 구성되도록 하였다. 차이점은

Mesh 1은 하천 바닥면과 측면 경사면의 경계에 파단선(Breakline)을 사용하지 않고 격자를 구성한 반면, Mesh 2는 하천 중심에서 3개의 격자를 구성한 후, 바깥쪽 양방향으로 나머지 2개의 격자는 파단선을 적용하여 격자를 구성하였다. Fig. 4에서 보여주듯이, 이 2개의 파단선을 사용한 Mesh 2는 동일한 해상도와 격자형태를 적용한 Mesh 1보다 상대적으로 하천이 더 부드럽게 표현되고, 바닥면의 폭이 더 넓게 생성된다.

Mesh 3과 4 (Figs. 4c and 4d)는 하천에서는 사각격자를, 홍수터에서는 삼각격자를 생성하였다. Mesh 3은 하천의 흐름방향의 가로방향으로 12 m, Mesh 4는 20 m의 해상도를 적용하였다. 그리고 흐름방향의 해상도는 두 격자 모두 30 m로 동일하게 적용하였다. Fig. 4에서 보여주듯이, 고해상도를 적용한 격자(Mesh 3)가 하천 바닥폭이 더 넓은 반면, 윗부분의 폭은 Mesh 3과 Mesh 4가 동일하므로, 하천의 전체 단면적은 더 넓음을 알 수 있다.

Table 1은 하천과 홍수터를 표현하기 위해 생성한 격자유형과 해상도, 그리고 격자의 개수를 포함한 격자정보를 보여준다. 추가적으로 Table 1에서는 격자의 구성 방법에 따라 계산된 연구유역내의 하천의 단면적을 보여준다. 하천의 단면적은 ArcGIS를 활용하여

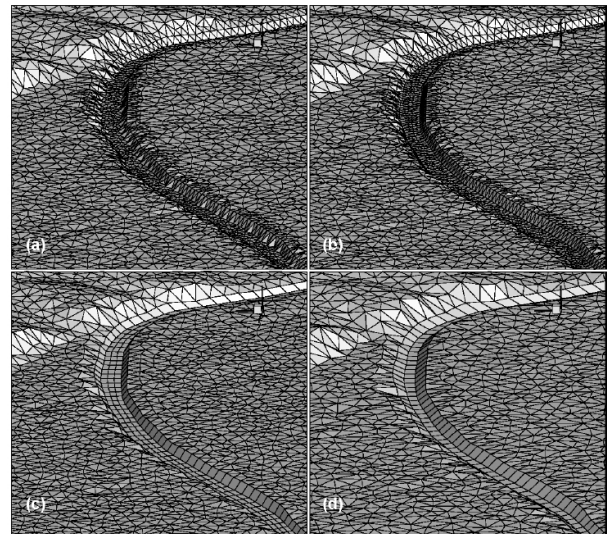


Fig. 4. Close-Ups of Considered Meshes for the Severn River Flood Modeling; (a) Mesh 1, (b) Mesh 2, (c) Mesh 3, (d) Mesh 4

Table 1. Properties of Meshes and Run Times in Severn River Flood

Mesh	Channel		Floodplain		Num. of node	Num. of Mesh		Avg. x-s area (m <sup>2</sup> )	Runtime (min)
	Type	Res.(m)	Type	Res.(m)		Tri.	Quad.		
Mesh 1	Unconstrained Tri.	12	Tri.	25	63,667	126,410	0	275.65	857.8
Mesh 2	Constrained Tri.	12	Tri.	25	63,724	126,525	0	283.29	899.1
Mesh 3	Quad.	12×30	Tri.	25	59,429	112,574	2,685	277.29	623.4
Mesh 4	Quad.	20×30	Tri.	25	41,176	78,309	1,611	240.38	430.7

산정한 하천의 체적에 길이를 나누는 방법으로 계산하였다. 격자유형에 따라 산정된 단면적은 240~283 m<sup>2</sup>이며, 이 값은 다른 연구자들(Bates et al., 2006; Néelz et al., 2006)이 하천의 지형이 부실한 구간을 근사화하여 적용한 하천 폭 50~70 m와 깊이 7~10 m로 산정되는 단면적보다는 더 작은 값이다. 이러한 차이가 발생하는 원인으로서는 앞서 언급하였던 울창한 식생분포로 인해 DTM이 제방의 높이와 위치에 일부 오차를 가질 수 있고, 이러한 오차는 본 연구에서 하천과 홍수터의 경계를 표현하기 위해 격자생성에서 사용한 폴리라인(Fig. 1)이 실제 하천 폭보다 더 좁게 표현하게 할 수 있기 때문으로 분석되었다.

또한, 연구구역에는 실제로 존재하여 홍수터의 범람 후 홍수류의 배수에 큰 역할을 하는 작은 규모의 지류나 배수로, 암거 그리고 플랩게이트(Flap gate)를 본 연구에서는 이전 연구들(Néelz et al., 2006; Bates et al., 2006; Horritt et al., 2007; Wright et al., 2008; Schubert, 2009; Kuiry et al., 2010)과 마찬가지로 반영을 하지 않았다.

### 4.2 조도계수

공간 분포된 Manning 조도계수는 마스터맵(MasterMap®), Fig. 5)으로부터 추출된 토지이용 분류와 기존 연구자들(Chow, 1973; Engman, 1996; Woolhiser et al., 1990)이 각 분류에 해당하는 값들로 제시한 전형적인 Manning 조도계수 값을 각 격자의 중심에 할당하였다. 본 연구에서는 Fig. 5에서 보여주듯이, 건물, 목초지, 도로, 산림, 하천에 대한 5가지의 요소에 대해 공간 분포된 Manning 조도계수를 적용하였다.

본 연구에서는 공간 분포된 조도계수에 따라 2가지 경우로 구분하여 격자의 유형과 해상도에 따른 홍수모델링 결과를 비교하였다. 먼저, 첫 번째 경우는 5개의 요소에 대해 건물( $n_m = 0.015$ ), 목초지 ( $n_m = 0.035$ ), 도로( $n_m = 0.015$ ), 산림( $n_m = 0.115$ ), 하천( $n_m =$

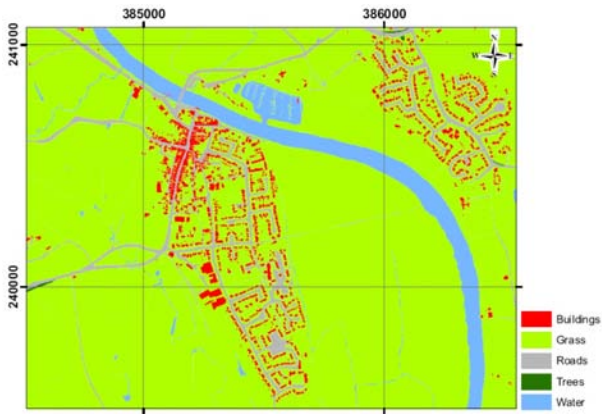


Fig. 5. OS MasterMap™ for Upton Site (Crown Copyright Ordnance Survey; Southampton, UK)

0.03)으로 조도계수를 고려하였다. 두 번째 경우는 홍수시 하천 바닥의 조도계수 영향이 다른 4개 요소의 조도계수 영향보다 크다고 판단되어 하천바닥의 조도계수 영향을 조사하기 위해 Bates et al.(2006)에서 적용한  $n_m = 0.018$ 보다 더 작은 값인  $n_m = 0.115$ 를 적용하고, 하천을 제외한 나머지 4가지 요소 조도계수는 앞서 설명한 조도계수와 동일한 값을 적용하였다.

### 4.3 적용 결과

Fig. 6은 본 연구에서 고려한 각 시나리오(격자형태와 하천바닥 조도계수)에 대해 Fig. 1에서 보여주는 3개의 비교 지점(G1, G2, G3)에서 계산된 수위를 보여준다. 예상 할 수 있듯이, 조도계수가

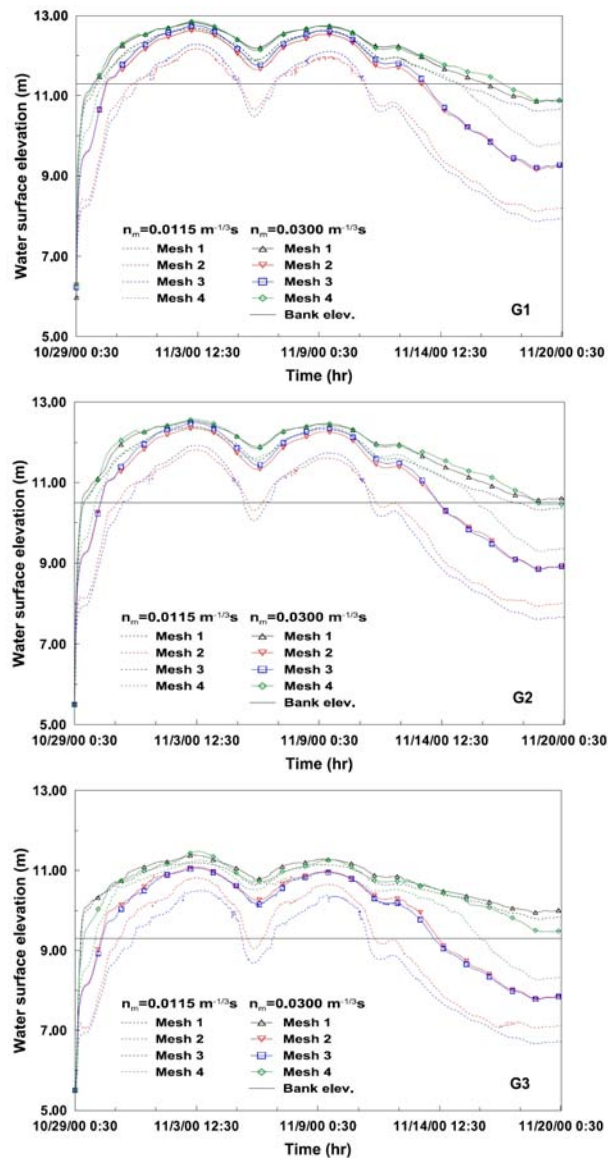


Fig. 6. Water Surface Elevations at Three Monitoring Stations



$n_m = 0.0115$ 에서 0.030로 증가함에 따라 예측 홍수위도 증가하였다. 하지만, 격자유형에 따른 홍수위의 변동 효과는 일정하게 나타나지 않았다. 또한, 계산수위는 수위의 상승과 하강이 Fig. 2에서 보여준 상류단 경계조건과 패턴이 대체적으로 일치하고 있다. 그러나 동일한 격자를 적용한 경우에도 하천의 조도계수에 따라 침투 홍수시에는 약 1 m, 배수기에는 약 3 m 정도의 차이를 가지는 큰 변동성을 보여주었다. Fig. 6에는 3개의 비교 지점과 인접한 곳의 제방고를 점선으로 나타내었으며, 침투 홍수기에는 하천수위가 제방고보다 약 2 m 정도 더 높음을 보여주었다. 그리고 하천수위가 제방고보다 낮을 때 가장 큰 홍수위 차이가 발생하였다.

Table 2는 조도계수에 따라 3개의 비교 지점에서 계산된 수위에 대해 각 격자사이의 오차를 보여준다. 연구구역 내에는 실측된 수위자료가 없어 실측 및 계산수위와의 오차를 비교하기는 어렵다. 본 연구에서는 다른 대안으로 각 격자를 하나씩 기준(Reference)으로 하여 기준격자에서 계산된 수위와 나머지 격자에서 계산된 수위를 비교하여 오차를 산정하였다. 이 방법은 각 격자사이의 유사성과 민감성 파악에 유용할 것으로 판단되었다. 첫 번째 구역,

첫줄의 예를 들어보면,  $n_m = 0.115$ 를 적용하여 계산된 수위에서 Mesh 1 (Reference)으로 계산된 수위와 Mesh 2, 3, 4 격자에서 계산된 수위와의  $L_1$ 오차는 각각 1.42, 1.59, 0.28 m를 의미한다.

조도계수를 다르게 하여 적용한 경우를 비교해보면, Mesh 1의  $L_1=0.19$  m와 Mesh 4의  $L_1=0.42$  m는 Mesh 2의  $L_1=0.85$  m와 Mesh 3의  $L_1=1.05$  m으로 Mesh 1과 4가 Mesh 2와 3에 비해서 상대적으로 조도계수에 덜 민감함을 보여준다. 또한, Mesh 1과 4 사이의  $L_1=0.09-0.28$  m와 Mesh 2와 3 사이의  $L_1=0.08-0.23$  m는 Mesh 1과 3, Mesh 2와 4의 차이인  $L_1=0.71-1.59$  m와 비교해서 각각 두 격자 사이의 계산값이 큰 차이를 보이지 않음을 보여준다. 즉, Mesh 1과 4 그리고 Mesh 2와 3이 유사한 홍수모델링 경과를 보여줄 수 있다.

Mesh 2와 3을 적용하여 계산된 결과의 유사성은 Fig. 6과 Table 2 (283 vs. 277 m<sup>2</sup>)에서 보여주는 것처럼 두 격자사이의 크기 않은 하천의 단면적 차이(2 %)로 설명될 수 있다. 반면에 Mesh 1과 4 사이의 결과의 유사성은 Table 2 (276 vs. 240 m<sup>2</sup>)에서 보여주는 것처럼 13 % 정도의 단면적 차이가 있기 때문에 Mesh

Table 2.  $L_1$  Norms of Water Surface Elevation at Three Monitoring Stations

$n_m$	Reference	$L_1(m): n_m=0.0115$				$L_1(m): n_m=0.030$				$n_m$	$L_1(m): n_m=0.030$			
		M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4		M1	M2	M3	M4
0.0115	Mesh1(M1)	O	1.42	1.59	0.28	0.19	X	X	X	0.030	O	0.76	0.73	0.09
	Mesh2(M2)	X	O	0.23	1.17	X	0.85		X		X	O	0.08	0.74
	Mesh3(M3)	X	X	O	1.34	X	X	1.05	X		X	X	O	0.71
	Mesh4(M4)	X	X	X	O	X	X	X	0.42		X	X	X	O

Table 3.  $F_{UP}$ ,  $F_{OP}$ , and of Predicted Versus ASAR Observed Flood Extents

$F_{UP}, F_{OP}, F_A(\%): n_m=0.0115$												
Mesh	08 Nov.			14 Nov.			15 Nov.			17 Nov.		
	$F_{UP}$	$F_{OP}$	$F_A$	$F_{UP}$	$F_{OP}$	$F_A$	$F_{UP}$	$F_{OP}$	$F_A$	$F_{UP}$	$F_{OP}$	$F_A$
Mesh 1	3.59	11.52	84.89	10.71	20.57	68.72	14.85	18.89	66.26	5.96	34.88	59.16
Mesh 2	14.28	9.44	76.27	19.56	16.94	63.51	21.75	14.7	63.54	10.09	29.99	59.92
Mesh 3	17.93	9.01	73.06	18.67	18.11	63.22	19.90	15.66	64.44	7.45	32.34	60.21
Mesh 4	3.58	12.23	84.18	9.88	22.04	68.08	16.45	19.94	63.62	9.05	35.18	55.76

$F_{UP}, F_{OP}, F_A(\%): n_m=0.030$												
Mesh	08 Nov.			14 Nov.			15 Nov.			17 Nov.		
	$F_{UP}$	$F_{OP}$	$F_A$	$F_{UP}$	$F_{OP}$	$F_A$	$F_{UP}$	$F_{OP}$	$F_A$	$F_{UP}$	$F_{OP}$	$F_A$
Mesh 1	2.46	12.17	85.36	7.81	21.54	70.65	11.13	19.86	69.02	5.30	35.72	58.99
Mesh 2	6.20	10.91	82.89	14.94	18.84	66.22	17.76	17.41	64.83	7.54	33.5	58.97
Mesh 3	5.75	11.32	82.94	16.26	18.51	65.23	17.61	18.18	64.20	6.62	34.7	58.68
Mesh 4	1.95	13.17	84.88	7.21	23.37	69.42	9.13	21.59	69.28	5.73	37.23	57.04

2와 3과 같이 하천의 단면적으로는 설명이 되지 않는다. Mesh 1과 4 사이의 유사성은 Fig. 4(a)에서 보여주듯이 하천지형의 심한 변동성으로 인한 단면의 국부적인 수축현상이 마치 단면적이 더 작아지는 것과 같은 효과가 발생하기 때문으로 설명되어질 수 있다. 이러한 효과로 인한 유사한 결과는 다른 연구(Kim et al., 2014)에서도 보여주었다. 이 연구에서는 하천단면의 심한 변동성은 국지화 된 수축 및 팽창 효과를 일으켜 Manning 조도계수에 의한 영향 이상의 추가 에너지를 분산시켜 보다 높은 홍수위를 계산하게 할 수 있다고 보고하였다.

적용격자 유형에 따른 모형의 결과 비교를 위해 2000년 11월 홍수사상 동안 관측한 4개의 ASAR 영상을 이용하였다. Fig. 7은 4개의 ASAR 영상이 측정된 시간대에 대해 Mesh 1과 Mesh 3에서 계산된 홍수범람범위를 비교하여 산정된  $F_{UP}$ ,  $F_{OP}$  그리고  $F_A$ 의 도시를 보여준다. Mesh 2와 4에서 산정된  $F_{UP}$ ,  $F_{OP}$  그리고  $F_A$ 는 각각 Mesh 1과 3에서의 결과와 유사하므로 본 연구에서 따로 구분하여 도시하지는 않았다. Table 3은 4가지 격자유형에 대해 Eqs. (4~6)으로 계산된  $F_{UP}$ ,  $F_{OP}$  그리고  $F_A$ 를 보여준다.

Table 3에서는 하천에서의 조도계수  $n_m = 0.0115$ 를 적용했을 때 격자유형에 따라  $F_A$ 가 가장 큰 차이가 있으며, 그 크기는 최대 12 % (85 vs. 73 %) 정도임을 보여주었다. 또한,  $F_A$ 는 격자유형에 따라 홍수의 두 번째 상승기(11월 8일, Fig. 2)에는 73~85 %, 최저홍수기(11월 17일)에는 55~60 %에 이른다. 반면 하천바닥 조도계수  $n_m = 0.030$ 을 적용하였을 경우는  $F_A$ 가 동일한 날짜에 83~85 % (11월 8일), 57~59 % (11월 17일)의 적합도를 보여주어, 낮은 조도계수( $n_m = 0.0115$ )를 적용한 경우보다 격자유형에 크게 덜 민감한 결과를 보여주었다. 하천에서의 낮은 조도계수를 적용한 경우 11월 8일에 Mesh 2와 3의  $F_A$ 가 가장 낮은 원인으로 Fig. 6에서 보여주는 것처럼, 하천에서의 수위가 높은 조도계수에서 계산된 것 보다 약 1 m 정도 더 낮은 수위를 예측함으로써 홍수터에서의 범람이 Mesh 1과 3보다 덜 이루어져,  $F_{UP}$ 가 각각 14 %와 18 %로 높게 산정되기 때문이다. 또한 4개의 격자유형에 모두 고려한  $F_A$ 의 최대 차이는 앞서 설명하였듯이  $n_m = 0.0115$ 을 적용한 Mesh 1과 3 사이에서 발생하는 약 12 %인 반면, 동일 격자만을 고려한  $F_A$ 의 최대차이는 28 % (84 vs. 56 %)로  $n_m = 0.0115$ 를 적용한 Mesh 4에서 나타났다. 홍수류의 배수기에 유독 심하게 적합도가 감소하는 이유로는 이전 연구(Bates et al., 2006; Horritt et al., 2007)에서도 이미 보여주었듯이 홍수터에서의 홍수류가 암거나 소규모의 배수로를 통해 하천으로 재유입되는 현상 등의 배수과정을 지형을 포함한 연구구역의 이용 가능한 정보 및 자료의 한계로 수치모형에서 완벽하게 재현하는데 어려움이 있었기 때문이다.

Table 3에서 보여주듯이,  $F_{OP}$ 는 ASAR 영상이 관측된 4개의 시간대 중에서 최고 홍수기(11월 8일)에서는 9~13 %이지만,

최저홍수기(11월 17일)에서는 30~37 %로 증가하였다. 또한, Table 3은 각 시나리오에 대해 홍수가 감소하는 중간 시기인 11월 14, 15일에서의  $F_{UP}$ 가 11월 8일이나 17일 보다 더 높음을 보여준다. 이 시기(홍수감소 중간시기)에서는 하천수위가 제방고와 근접하게 되어(Fig. 6), 하천과 홍수터 사이의 홍수류 교환이 활발하게 이루어져, 홍수 모델링에서 제방고의 높이가 범람유량 및 범람범위에 큰 영향을 미치는 시기이다. 홍수모델링에서 이 시기에서의 제방고의 영향에 대한 유사한 연구결과도 있다(Bates et al., 2006; Gallien et al., 2011). 따라서, 하천과 홍수터 사이의 홍수류 교환에

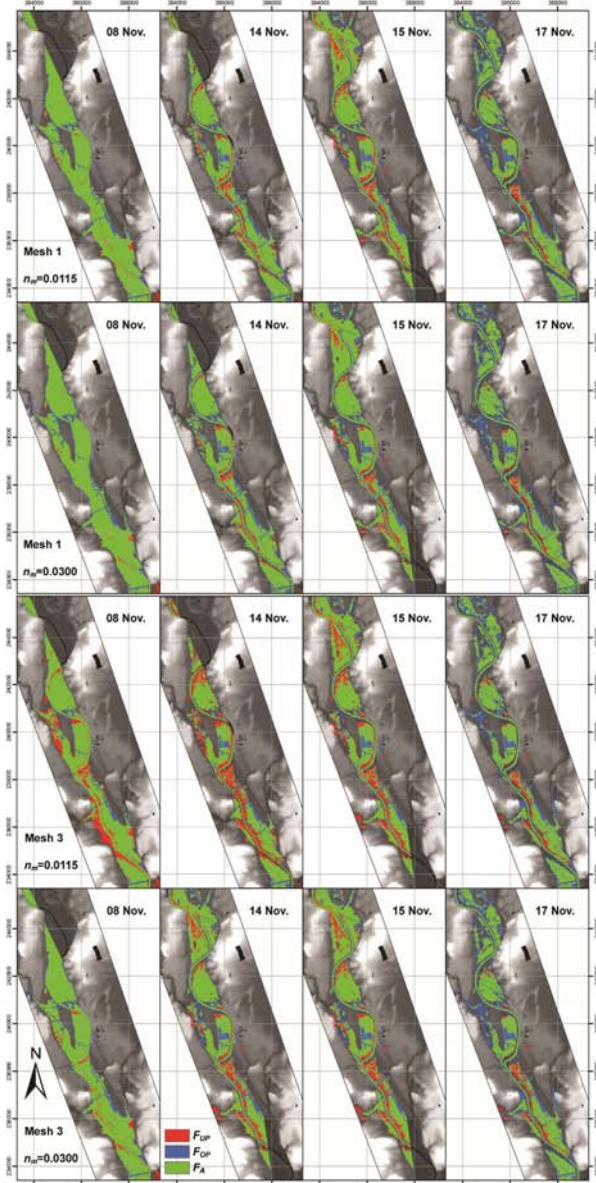


Fig. 7. Comparison of Predicted Versus ASAR Observed Flood Extents



대해 좀 더 개선되고 정확한 2차원 홍수모델링을 위해서는 암거와 같은 저수위일 때의 배수시설을 고려해야 할 뿐 아니라 고해상도 지형자료와 같은 실제의 정확한 제방고를 반영할 수 있는 더 개선된 방안이 필요하다.

마지막으로, Table 3에서는 추가적으로 하천에 대해 사각격자로 구성한 경우가 삼각격자로 구성한 경우보다 모형의 계산시간이 상당히 줄어들었음을 보여준다. 홍수가 발생한 22일 동안에 대한 모의를 위해, 본 연구에서 Mesh 4는 7시간 조금 넘게 소요된 반면, Mesh 1과 2는 각각 14, 15시간이 소요되어, 총 소요시간이 절반정도로 줄었다. 또한 Mesh 3은 Mesh 1과 2에 비해 약 3/4의 시간만 소요되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 2차원 홍수해석을 위해 적용한 격자의 유형 및 해상도가 하천 홍수위 및 제방 월류로 인해 발생하는 홍수터에서의 범람에 어떠한 영향을 주는지 조사하였다. 이를 위해, 2000년 10-11월에 걸쳐 22일 동안 홍수가 발생한 영국의 Upton-upon-Severn 유역을 연구유역으로 선정하였다. 이 유역은 LiDAR를 포함한 고해상도 지형자료와 홍수기간 동안 홍수범람범위가 촬영된 ASAR 영상이 존재한다. ASAR 영상자료는 홍수 발생기간 동안 4개(8월 11, 14, 15, 17일)가 촬영되어 홍수가 증가하는 시기 및 분류나 하류단 배수로 인해 홍수가 감소하는 시기(배수기)를 모두 포함하고 있으며, 이 자료를 홍수범람범위에 대한 격자유형별 2차원 홍수범람모형의 예측 결과 비교에 활용하였다. 본 연구에 대한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 하천에 대해 동일 해상도를 가진 삼각격자와 사각격자로 각각 구성한 경우(Mesh 2와 3), 홍수터에서의 홍수범람범위의 적합도( $F_A$ )는 유사한 결과가 산정되었으나, 하천에서의 홍수위와 모의시간에서는 큰 차이를 가졌다. 또한, 동일한 형태의 격자가 사용되었다 하더라도 해상도에 따라 홍수해석 결과(적합도, 하천홍수위, 홍수범람범위)의 차이가 있었다(Mesh 3와 4). 즉, 격자유형에 따라 하천 수위가 큰 차이를 가질 수 있고 이것은 제방 월류 지점이나 홍수범람지역이 적용 격자유형에 따라 달라질 수 있음을 의미한다. 또한 격자해상도에 따라서도 하천 홍수위, 홍수범람범위 등이 차이를 가질 수 있음을 보여주었다.
- (2) 사다리꼴 형상의 하천지형을 비정형 삼각격자로 구성한다면, 파단선(breakline)의 사용유무에 따라 동일 해상도에서도 홍수 해석 결과에서 큰 차이를 보여주었다(Mesh 1과 2). 사다리꼴 하천을 비정형 삼각격자로 구성하는 경우, Mesh 2와 같이 제방선 및 하천 하단의 모서리를 따라 파단선을 적용한다면

하천의 통수능과 직접 관련이 있는 하천 단면적을 좀 더 정확하게 반영할 수 있음을 보여주었다.

- (3) 하천지형을 사각격자로 반영한 모형은 동일 해상도로 삼각격자를 적용한 모형보다 약 50 % 정도의 계산시간을 줄일 수 있음을 보여주었다.
- (4) 본 연구에서는 동일한 지형과 경계조건을 사용하더라도, 격자의 형상과 해상도에 따라 큰 차이의 홍수해석 결과(홍수위, 범람범위, 계산시간)를 가질 수 있음을 보여주었으며, 2차원 홍수모델링 시 목적과 상황에 맞는 적정 격자형상과 해상도의 선택이 필요함을 보여주었다.

## References

Abderrezzak, K. E., Paquier, A. and Mignot, E. (2009). "Modelling flash flood propagation in urban areas using a two-dimensional numerical model." *Natural Hazards*, Vol. 50, pp. 433-460.

Aizinger, V. and Dawson, C. (2002). "A discontinuous Galerkin method for two-dimensional flow and transport in shallow water." *Adv. Water Resour.*, Vol. 25, No. 1, pp. 67-84.

Bates, P. D., Wilson, M. D., Horritt, M. S., Mason, D., Holden, N. and Currie, A. (2006). "Reach scale floodplain inundation dynamics observed using airborne Synthetic Aperture Radar imagery: data analysis and modeling." *Journal Hydrol.*, Vol. 328, pp. 306-318.

Begnudelli, L. and Sanders, B. F. (2007). "Conservative wetting and drying methodology for quadrilateral grid finite-volume models." *Journal Hydraul. Eng.*, Vol. 133, No. 3, pp. 312-322.

Begnudelli, L., Sanders, B. F. and Bradford, S. F. (2008). "An adaptive Godunov-based model for flood simulation." *Journal Hydraul. Eng.*, Vol. 134, No. 6, pp. 714-725.

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." *Adv. Water Resour.*, Vol. 23, No. 5, pp. 545-562.

Cea, L. and Vázquez-Cendón, M. E. (2010). "Unstructured finite volume discretization of two dimensional depth-averaged shallow water equations with porosity." *Int. Journal Num. Meth. Fluid.*, Vol. 63, pp. 903-930.

Chow, V. T. (1973). *Open-channel hydraulics*. International ed. Singapore: McGraw-Hill.

Engman, E. T. (1996). "Roughness coefficients for routing surface runoff." *Journal Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 112, No. 1, pp. 39-53.

Ern, A., Piperno, S. and Djadel, K. (2008). "A well-balanced Runge-Kutta discontinuous Galerkin method for shallow-water equations with flooding and drying." *Int. Journal Num. Meth. Fluid.*, Vol. 58, No. 1, pp. 1-25.

Ernst, J., Dewals, B. J., Detrembleur, S., Archambeau, P., Epicum, S. and Pirotton, M. (2010). "Micro-scale flood risk analysis based on detailed 2D hydraulic modelling and high resolution geographic data." *Nat. Hazards*, Vol. 55, pp. 181-209.

- Gallegos, H. A., Schubert, J. E. and Sanders, B. F. (2012). "Structural damage prediction in a high-velocity urban dam-break flood: field-scale assessment of predictive skill." *Journal Engineering Mechanics*, Vol. 138, No. 10, pp. 1249-1262.
- Gallien, T. W., Schubert, J. E. and Sanders, B. F. (2011). "Predicting tidal flooding of urbanized embayments: a modeling framework and data requirements." *Coastal Eng.*, Vol. 58, pp. 567-77.
- George, D. L. (2010). "Adaptive finite volume methods with well-balanced riemann solvers for modeling floods in rugged terrain: application to the malpasset dam-break flood (France, 1959)." *Int. Journal Numer. Meth. Fluids*, Vol. 66, No. 8, pp. 1000-1018.
- Guinot, V. (2003). *Godunov-type Schemes (An introduction for engineers)*. Elsevier Science, p. 508.
- Horritt, M. S., Di Baldassarre, G., Bates, P. D. and Brath, A. (2007). "Comparing the performance of a 2-D finite element and a 2-D finite volume model of floodplain inundation using airborne SAR imagery." *Hydrol. Process.*, Vol. 21, No. 20, pp. 2745-2759.
- Kelman, I. and Spence, R. (2003). "A flood failure flowchart for buildings." *Proc. Inst. Civ. Eng.-Municipal Engineer.* Vol. 156, No. 3, pp. 207-214.
- Kesserwani, G. and Liang, Q. H. (2012). "Dynamically adaptive grid based discontinuous Galerkin shallow water model." *Adv. Water Resour.*, Vol. 37, pp. 23-39.
- Kim, B. and Sanders, B. F. (2016). "Dam-break flood model uncertainty assessment: a case study of extreme flooding with multiple dam failures in Gangneung, South Korea." *Journal Hydraul. Eng.-ASCE*, Vol. 142, No. 5. pp. 1-18.
- Kim, B., Sanders, B. F., Schubert, J. E. and Famiglietti, J. S. (2014). "Mesh type tradeoffs in 2D hydrodynamic modeling of flooding with a Godunov-based flow solver." *Adv. Water Resour.*, Vol. 68, pp. 42-61.
- Kim, D. H., Lynett, P. J. and Socolofsky, S. A. (2009). "A depth-integrated model for weakly dispersive, turbulent, and rotational fluid flows." *Ocean Modelling*. Vol. 27, No. 3-4, pp. 198-214.
- Kim, B., Sanders, B. F., Famiglietti, J. S. and Guinot, V. (2015). "Urban flood modeling with porous shallow-water equations: A case study of model errors in the presence of anisotropic porosity." *Journal Hydrol.*, Vol. 523, pp. 680-692.
- Kreibich, H., Piroth, K., Seifert, I., Maiwald, H., Kunert, U., Schwarz, J., Merz, B. and Thieke, A. H. (2009). "Is flow velocity a significant parameter in flood damage modelling?" *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 9, pp. 1679-1692.
- Kuiri, S. N., Sen, D. and Bates, P. D. (2010). "Coupled 1D-Quasi-2D Flood Inundation Model with Unstructured Grids." *Journal Hydraul. Eng.* Vol. 136, No. 8, pp. 493-506.
- Liao, C. B., Wu, M. S. and Liang, S. J. (2007). "Numerical simulation of a dam break for an actual river terrain environment." *Hyd. Proc.*, Vol. 21, No. 4, pp. 447-460.
- Munson, B. R., Young, D. F. and Okiishi, T. H. (2006). *Fundamentals of fluid mechanics*, 5<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, p. 769.
- Néelz, S., Pender, G., Villanueva, I., Wilson, M., Wright, N. G., Bates, P., Mason, D. and Withlow, C. (2006). "Using remotely sensed data to support flood modelling." *Proc. Inst. Civ. Eng.-Water Manag.*, Vol. 159, No. 1, pp. 35-43.
- Schubert, J. E. (2009). *Landscape Characterization for Flood Inundation Modelling [dissertation]*. Nottingham: University of Nottingham.
- Schubert, J. E., Sanders, B. F., Smith, M. J. and Wright, N. G. (2008). "Unstructured mesh generation and landcover-based resistance for hydrodynamic modeling of urban flooding." *Adv. Water Resour.*, Vol. 31, pp. 1603-1621.
- Singh, J., Altinakar, M. S. and Ding, Y. (2011). "Two-dimensional numerical modeling of dambreak flows over natural terrain using a central explicit scheme." *Adv. Water Resour.* Vol. 34, No. 10, pp. 1366-1375.
- Testa, G., Zuccala, D., Alcrudo, F., Mulet, J. and Soares-Frazão, S. (2007). "Flash flood flow experiment in a simplified urban district." *Journal Hydraul. Res.*, Vol. 45(Extra Issue), pp. 37-44.
- Toro, E. F. (2001). *Shock-capturing methods for free-surface shallow flows*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, p. 309.
- Wang, Y., Liang, Q., Kesserwani, G. and Hall, J. W. (2011). "A 2D shallow-water model for practical dam-break simulations." *Journal Hydraul. Res.* Vol. 49, No. 3, pp. 307-316.
- Woolhiser, D. A., Smith, R. E. and Goodrich, D. C. (1990). *KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. No. 77*, ARS-Publication, USDA-ARS, Tucson, Ariz.
- Wright, N. G., Villanueva, I., Bates, P. D., Mason, D. C., Wilson, M. D., Pender, G. and Néelz, S. (2008). "Case study of the use of remotely sensed data for modeling flood inundation on the river Severn, U.K." *Journal Hydraul. Eng.* Vol. 134, No. 5, pp. 533-540.