



## Development and evaluation of a 2-dimensional land surface flood analysis model using uniform square grid

Choi, Yun-Seok<sup>a\*</sup> · Kim, Joo-Hun<sup>b</sup> · Choi, Cheon-Kyu<sup>c</sup> · Kim, Kyung-Tak<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Korea

<sup>b</sup>Senior Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Korea

<sup>c</sup>Research Specialist, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Korea

<sup>d</sup>Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Korea

Paper number: 19-020

Received: 27 March 2019; Revised: 18 April 2019; Accepted: 18 April 2019

### Abstract

The purpose of this study is to develop a two-dimensional land surface flood analysis model based on uniform square grid using the governing equations except for the convective acceleration term in the momentum equation. Finite volume method and implicit method were applied to spatial and temporal discretization. In order to reduce the execution time of the model, parallel computation techniques using CPU were applied. To verify the developed model, the model was compared with the analytical solution and the behavior of the model was evaluated through numerical experiments in the virtual domain. In addition, inundation analyzes were performed at different spatial resolutions for the domestic Janghowon area and the Sebou river area in Morocco, and the results were compared with the analysis results using the CAESER-LISFLOOD (CLF) model. In model verification, simulation results were well matched with the analytical solution, and the flow analyses in the virtual domain were also evaluated to be reasonable. The results of inundation simulations in the Janghowon and the Sebou river area by this study and CLF model were similar with each other and for Janghowon area, the simulation result was also similar to the flooding area of flood hazard map. The different parts in the simulation results of this study and the CLF model were compared and evaluated for each case. The results of this study suggest that the model proposed in this study can simulate the flooding well in the floodplain. However, in case of flood analysis using the model presented in this study, the characteristics and limitations of the model by domain composition method, governing equation and numerical method should be fully considered.

**Keywords:** Flood analysis model, 2-Dimensional, Uniform square grid, Finite volume method, Parallel computing

## 정형 사각 격자 기반의 2차원 지표면 침수해석 모형 개발 및 평가

최운석<sup>a\*</sup> · 김주훈<sup>b</sup> · 최천규<sup>c</sup> · 김경택<sup>d</sup>

<sup>a</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원, <sup>b</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원,

<sup>c</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구원, <sup>d</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원

### 요 지

본 연구의 목적은 운동량방정식에서 이송가속도항을 제외한 지배방정식을 이용하여 정형 사각 격자 기반의 2차원 지표면 침수해석 모형을 개발하는 것이다. 공간적 이산화는 유한체적법을 이용하였으며, 시간적 이산화는 음해법을 적용하였다. 모형의 실행시간을 단축하기 위해서 CPU를 이용한 병렬계산 기법을 적용하였다. 개발된 모형의 검증은 위해서 해석해와 비교하고, 가상 도메인에서 수치실험을 통해 모형의 거동을 평가하였다. 또한 국내의 장호원 지역과 모로코의 Sebou 강 지역에 대해서 각기 다른 공간해상도로 침수해석을 수행하고, 그 결과를 CAESER-LISFLOOD (CLF) 모형을 이용한 해석 결과와 비교하였다. 모형의 검증 결과 해석해와 잘 일치된 모의 결과를 나타내었고, 가상 도메인에서의 흐름 해석도 타당한 것으로 평가되었다. 장호원 지역과 Sebou 강 지역에 대한 본 연구와 CLF 모형의 침수모의 결과는 침수심과 침수범위에서 서로 유사하게 나타났으며, 장호원 지역의 경우 홍수위험지도의 침수범위와도 유사한 값을 보였다. 본 연구와 CLF 모형의 모의결과에서 상이한 부분에 대해서는 각각의 모의결과를 비교 평가하였다. 연구결과 본 연구에서 제시된 모형은 홍수터에서의 침수 양상을 잘 모의할 수 있는 것으로 평가되었다. 그러나 본 연구에서 제시된 모형을 이용하여 침수해석을 할 경우에는 도메인 구성 방법과 지배방정식 및 해석 방법에 의한 모형의 특징과 한계점을 충분히 고려해야 할 것이다.

**핵심용어:** 침수해석 모형, 2차원, 정형 사각 격자, 유한체적법, 병렬계산

\*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0590

E-mail: yschoi51@kict.re.kr (Y.-S. Choi)

## 1. 서론

홍수에 의한 침수해석 기법을 선택할 때 침수해석 목적과 계산 결과의 정확도 및 계산 실행 시간은 중요한 기준이 된다. 일반적으로 정확도가 높은 결과를 얻기 위해서는 동역학과 방정식과 같이 많은 외력을 고려한 지배방정식을 적용한 모형을 이용하게 되며, 계산 시간은 길어지게 된다. 반면에 계산 결과를 신속히 얻고자 할 경우에는 비교적 간단한 식으로 이루어진 침수해석 기법을 적용하게 되며, 지형 및 수리학적 조건에 따라서 정확도가 상대적으로 낮아질 가능성이 있다. 그러므로 일반적으로는 침수해석 목적에 따라서 정확성과 계산 시간을 적절히 만족시킬 수 있는 기법을 선정하게 된다.

2차원 침수해석 모형은 제어체적의 구성 측면에서 크게 비정형 격자를 이용하는 방법과 정형 사각 격자를 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. 비정형 격자를 이용하는 방법은 지표면 기복의 상세한 표현이 가능하기 때문에 복잡한 지형 및 구조물의 영향을 반영한 흐름해석이 가능하다(Di Giammarco *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 2006b). 그러나 비정형 제어체적의 경계면에서의 흐름을 x-y 평면의 직각좌표계 성분으로 재구성하는 과정이 필요하고, 급격히 변화하는 제어체적 부분의 해석과 고정확도 해석을 위한 계산식 작성이 비교적 복잡한 특성이 있다(Venkatakrishnan, 1995; WL Delft Hydraulics, 2007; Kim, 2008; Kim *et al.*, 2009).

정형 사각 격자를 이용하는 2차원 흐름해석은 제어체적이 정형화되어 있고, 한 격자에서의 지형 고도와 흐름해석에 사용되는 물리량 등이 평균값(대푯값)으로 사용되기 때문에 연속적인 지형 변화와 상세한 지형지물의 영향을 반영한 정밀한 흐름해석에 한계가 있다(Venkatakrishnan, 1995; Lee *et al.*, 2006b, Kim *et al.*, 2009). 그러나 비정형 격자를 이용하는 해석에 비해서 계산식 작성과 프로그램 개발이 용이하며, 침수해석을 위한 자료구축과 계산 결과의 후처리가 쉬운 장점이 있다(Kim *et al.*, 2009). 그러므로 정형 사각 격자를 제어체적으로 하는 침수해석 방법은 지형의 고도를 반영하여 지표면의 침수양상(침수범위, 침수심, 침수범위의 확산 및 축소 등)을 모의할 때 유용하게 활용될 수 있다(WL Delft Hydraulics, 2007).

정형 사각 격자를 이용한 2차원 침수해석에 대한 연구는 국내외에서 다수 진행 된 바 있다. 이 연구들을 흐름의 지배방정식을 이용해서 구분하면, 동역학과 방정식을 이용한 흐름해석(DHI, 2017a; FLO-2D Software, 2017)과 확산파 방정식을 이용한 흐름해석(Lee *et al.*, 2006a; Lee and Yoon, 2017)으로 분류될 수 있다. Henderson (1966)은 흐름의 Froude number가 작거나 지면 경사가 급하거나 완만한 자연하천에서 홍수파

를 해석할 때 관성항(국지가속도항과 이송가속도항)이 상대적으로 매우 작은 영향을 미치므로, 이를 무시한 확산파 방정식을 적용하여도 충분히 만족할 만한 결과를 얻을 수 있음을 입증한 바 있다. 이에 따라 확산파 방정식은 침수해석 뿐만 아니라 홍수터 및 유역의 2차원 수문해석에도 널리 이용되고 있다(Downer and Odgen, 2006; Lee and Yoo, 2011; DHI, 2017b). 한편, Hunter *et al.* (2007)과 Bates *et al.* (2010)은 대부분의 홍수터 흐름해석에서 이송가속도항이 상대적으로 영향이 작다는 것에 착안하여 동역학과 방정식에서 이송가속도항만을 제외한 방정식의 적용을 제시하였으며, 비정상류 흐름해석이 가능하면서도 방정식을 단순화할 수 있음을 입증하였다. 이 방법은 LISFLOOD-FP 모형의 개선에 적용되었으며(Bates *et al.*, 2010), CAESAR 모형과 결합된 CAESAR-LISFLOOD (CLF) 모형으로 개발되기도 했으나(Coulthard *et al.*, 2013; Choi *et al.*, 2015; Jeon *et al.*, 2016), 국내에서는 아직 침수해석 모형 개발에 적용된 바 없다.

본 연구는 홍수터에서의 침수양상을 모의하기 위해서 동역학과 방정식에서 이송가속도항을 제외한 식과 DEM (Digital Elevation Model)을 기본 자료로 이용하는 정형 사각 격자 기반의 침수해석 모형(Grid based 2-Dimensional land surface flood model, G2D)을 개발하는 것을 목적으로 하였다. 본 논문의 구성은 2장에서 지배방정식과 해석 방법을 설명하고, 3장에서는 개발된 모형의 계산 결과를 해석해와 비교하고, 가상 도메인에 대해서 평가함으로써 검증하였다. 4장에서는 실제 하천 지역에서의 침수해석 결과를 CLF 모형을 이용한 모의 결과와 서로 비교 평가하였으며, 5장에서 결론 및 향후 연구 방향에 대해 기술하였다.

## 2. 지배방정식과 해석 방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 지표면에 넓게 분포하고 있는 홍수터에서의 침수현상을 모의하기 위한 2차원 침수해석 모형을 개발하고자 한다. Hunter *et al.* (2007)은 계산 거리 간격( $\Delta x$ )이 작고 수심, 유속 등과 같은 흐름 특성 값이 상대적으로 큰 경우에는 이송가속도항이 지배적일 수 있으나, 대부분의 홍수터 흐름에서는 이송가속도항의 영향이 작을 수 있음을 기술하고 있다. 지표면의 실제 침수현상은 파제부나 댐 붕괴 지점 인근 등과 같이 작은 거리 간격에서 급격한 흐름 변동이 있는 지역을 포함하고 있으므로, 침수 도메인 전체에서의 흐름을 정확하게 모의하기 위해서는 이송가속도항까지 포함된 동역학과 방

정식을 이용해서 고해상도 침수모의를 해야 한다. 그러나 본 연구에서는 침수 현상이 발생하는 전체 홍수터에서의 침수 양상을 신속하게 모의할 수 있는 모형을 개발하는데 목적이 있으므로, 상대적으로 저해상도로 도메인을 구성하고 이송 가속도항을 제외한 운동량방정식을 적용하고자 한다. 이와 같은 방법은 급격한 흐름 변동이 발생하는 부분에서의 흐름 해석의 정확도가 낮아지는 원인이 될 수 있으나, 대부분의 경우에서는 홍수터의 침수 양상을 모의한 결과에는 큰 영향을 미치지 않는다(Hunter *et al.*, 2007). 그러므로 본 연구에서는 2차원 연속방정식과 운동량방정식을 이용하였으며, 이때 운동량방정식의 단순화를 위해서 이송가속도항을 제외하였다.

운동량방정식에서 공간차원의 분리 여부에 따라서는 각 방향(x 방향 및 y 방향)으로 분리한 흐름 해석(Downer and Odgen, 2006; Bates *et al.*, 2010; Lee and Yoo, 2011; DHI, 2017b; FLO-2D Software, 2017; Lee and Yoon, 2017)과 차원을 분리하지 않은 해석(DHI, 2017a)으로 구분할 수 있다. 운동량방정식에서 차원을 분리하는 기법은 비정형 제어체적을 사용하는 수치 모형에는 사용할 수 없는 한계가 있으나, 정형 사각 격자를 이용하는 수치 모형에서는 2차원 문제를 1차원으로 나누어서 해석할 수 있으므로, 모형을 좀 더 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있다(Kim, 2008). 그러므로 본 연구에서는 운동량방정식에서 공간차원을 분리하여 적용하였다. 본 연구에서 적용된 연속방정식과 운동량방정식은 Eqs. (1)~(3)과 같다.

$$\frac{dh}{dt} + \frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} = s \tag{1}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh(S_{bx} - S_{fx}) = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh(S_{by} - S_{fy}) = 0 \tag{3}$$

여기서,  $q_x$ 와  $q_y$ 는 각각 x와 y 방향의 단위 폭 당 유량,  $t$ 는 시간,  $s$ 는 생성 항,  $g$ 는 중력가속도,  $h$ 는 수심,  $S_{bx}$ 와  $S_{by}$ 는 각각 x와 y 방향의 지면경사,  $S_{fx}$ 와  $S_{fy}$ 는 각각 x와 y 방향의 마찰경사를 나타낸다. 수심을 이용한 x 방향 운동량방정식(Eq. (2))을 수위를 이용해서 다시 작성하고, 마찰경사 계산에 Manning 식(Eq. (4))을 적용하면, x 방향 운동량방정식은 Eq. (5)와 같고, y 방향 운동량방정식도 같은 방법으로 작성할 수 있다.

$$S_{fx} = \frac{u^2 n^2}{h^{4/3}} \tag{4}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{gh \partial z}{\partial x} + \frac{gn^2 q_x^2}{h^{7/3}} = 0 \tag{5}$$

여기서,  $u$ 는 x방향 유속,  $z$ 는 수위(=  $h+b$ ),  $b$ 는 지면고도,  $n$ 은 조도계수를 나타낸다.

### 2.2 해석 방법

본 연구에서는 지배방정식의 해석을 위해서 공간차분은 정형 사각 격자를 기반으로 하였으며, 유한체적법을 이용하여 이산식을 작성하였다. 공간차분을 위한 격자 번호는 Fig. 1과 같이 부여하였으며, 제어체적 ( $i, j$ )와 ( $i+1, j$ )에 대한 연속방정식과 운동량방정식의 이산식은 각각 Eqs. (6) and (7)과 같다. 시간차분은 수렴성 향상을 위해서 음해법을 적용하였으며, Eq. (7)에서는  $(q_i^{t+\Delta t})^2$  대신에  $q_i^{t+\Delta t} |q_i^t|$  을 적용하였다. 침수모의 대상 모든 격자에 대한 수렴을 위해서는 Gauss-Seidel 방법으로 반복계산을 수행하였고, 비선형 방정식의 수렴을 위한 반복계산은 Newton-Raphson 방법을 적용하였다.

$$h_{i,j}^{t+\Delta t} - h_{i,j}^t + \{q_{xe} - q_{xw}\}^{t+\Delta t} \frac{1}{\Delta x} \Delta t + \{q_{ys} - q_{ym}\}^{t+\Delta t} \frac{1}{\Delta y} \Delta t - s^{t+\Delta t} \Delta t = 0 \tag{6}$$

$$q_i^{t+\Delta t} - q_i^t + \frac{gh_i \Delta t (z_{i+1} - z_i)^{t+\Delta t}}{\Delta x} + \frac{gn^2 \Delta t q_i^{t+\Delta t} |q_i^t|}{h_i^{7/3}} = 0 \tag{7}$$

여기서,  $\Delta x = \Delta y$ 이고,  $\Delta t$ 는 계산 시간 간격을 나타낸다. 흐름 계산에서 수심( $h$ )이 0 일 경우 대상 격자는 마름 상태가 되며 계산은 발산을 하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 임계수심 값을 지정하고, 이 값과 같거나 작은 수심이 계산될 경우에는 대상 격자를 마름 상태로 분류하여 흐름 계산에서 제외하였다.

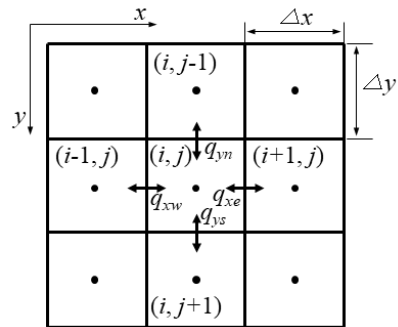


Fig. 1. Grid indices of spatial discretization

### 2.3 계산 시간 간격

수치해석 모형에서 계산 시간 간격( $\Delta t$ )은 모형의 안정성과 해의 정확성, 계산 소요시간에 중요한 영향을 미친다 (Hulbert and Jang, 1995; Kim *et al.*, 2011).  $\Delta t$ 는 지배방정식의 시간차분 간격으로서 입력자료 및 출력자료의 시간 간격보다는 작은 값을 사용한다. 본 연구에서는  $\Delta t$ 를 결정하기 위해서 Courant-Friedrich-Lewy (CFL) 조건 (Courant *et al.*, 1956; Scott and Brett, 2002)을 적용하였다. CFL 조건에서  $\Delta t$ 는 임의 상태의 파가 검사체적의 특정 구간을 이동하는데 소요되는 시간보다 작아야 한다는 의미를 내포하고 있다. CFL 조건은 Eq. (8)과 같고, 검사체적의 크기와 전체 검사체적에서의 최대 유속( $u_{max}$ )을 이용하여 Eq. (8)을 만족하는  $\Delta t$ 의 최댓값을 계산에 적용한다. 이때 흐름해석이 진행되면서  $u_{max}$ 의 값이 바뀌므로,  $\Delta t$  또한 변경된다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u_{max}} \tag{8}$$

## 3. 모형 검증

### 3.1 해석해와 비교

Hunter *et al.* (2005)은 경사가 0 m/m인 표면에서 유속이 일정한 경우에 Eqs. (1) and (2)에 대한 해석해로 Eq. (9)를 제시하였다. Eq. (9)에서  $C$ 는 적분상수로서 초기조건에 의해서 결정되며,  $u$ 에 일정한 값을 대입하면,  $t$  시간에서의  $x$  지점의 수위를 계산할 수 있다. 본 연구에서는  $u = 1$  m/s와  $u = 0.03$  s/m<sup>1/3</sup>을 적용하였다. 그리고  $x=0$  위치에서  $t=0$  시간의 초기 조건 수위를 0 m로 하였으며, 이에 따라  $C=0$ 을 적용하였다.

수치 모형과 해석해를 비교하기 위한 조건은 Table 1과 같다. 수치모형의 도메인은 100 m × 100 m 해상도의 정형사각 격자 51 개를 1 행으로 구성(51 × 1)하였으며, 지면 경사는 0 m/m로 하였다. 수치모형의 경계조건은 Eq. (9)를 이용해서 계산된  $x=0$  위치(0, 0)에서의 수위와  $t=1$  시간에서 Eq. (9)로부터 계산된 수위가 0이 되는 위치(36, 0)에 수위 0.00 m를 적용하였다. 모의 기간은 1시간으로 하였다.

$$h(x,t) = \left[ \frac{7}{3} \{ C - n^2 u^3 (x - ut) \} \right]^{3/7} \tag{9}$$

해석해와 본 연구의 수치 모형에 의해서 계산된 값을 비교하면 Table 2 및 Fig. 2와 같다. Table 2에서 평균제곱근오차 (RMSE), Nash-Sutcliffe efficiency 계수 (NSE), 상관계수 (CC)는 Eqs. (10)~(12)를 이용하여 계산하였다. 개발된 수치모형에 의한 계산 값을 해석해와 비교했을 때 모의 1시간에서의 수면 종단 곡선의 RMSE는 1 cm, NSE와 CC는 1로 나타났다. 그리고 0.5 km와 2 km에서의 시간에 따른 수심의 변화에서는 RMSE는 최대 2 cm, NSE와 CC는 1로 나타나 두 값이 잘 일치하는 것으로 평가되었다.

$$RMSE = \left\{ \sqrt{\sum_{i=1}^N (X_a^i - X_{sim}^i)^2} \right\} / N \tag{10}$$

$$NSE = 1 - \left\{ \sum_{i=1}^N (X_a^i - X_{sim}^i)^2 \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^N (X_a^i - \bar{X}_a)^2 \right\} \tag{11}$$

$$CC = \left[ \sum_{i=1}^N (X_a^i - \bar{X}_{sim})(X_{sim}^i - \bar{X}_a) / N \right] / (\sigma_{sim} \sigma_a) \tag{12}$$

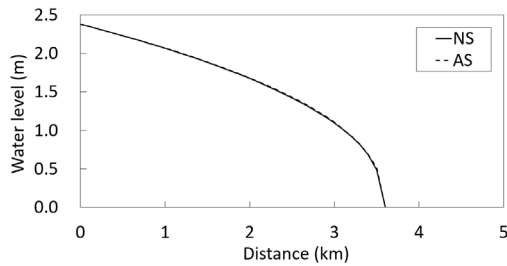
Table 1. Conditions of the numerical model

Domain size (column number × row number)	Grid size (m)	Surface slope (m/m)	Roughness coeff. (s/m <sup>1/3</sup> )	Simulation time (minute)	Boundary conditions	
					Position of cells	Water level boundary conditions
51 × 1	100	0	0.03	60	(0,0)	Water level (z) calculated by Eq. (9)*
					(36,0)	0.00 m

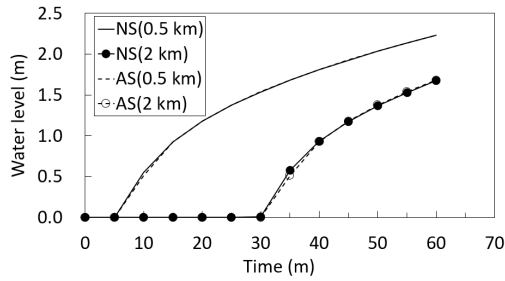
\* For example, when t is 0 min, z is 0.00 m and when t is 60 min, z is 2.38 m

Table 2. Comparison of the calculation results with analytical solutions

Comparison contents	Cell position	Distance from the left side (0, 0) (km)	Simulation output time (minute)	RMSE (m)	NSE	CC
Water surface profile	All	All	60	0.01	1.00	1.00
The changes of water depth in a cell	(5, 0)	0.5	From 0 to 60	0.01	1.00	1.00
	(20, 0)	2.0		0.02	1.00	1.00



(a) Water surface profile at 60 minutes



(b) The changes of water depths at 0.5 km (5, 0) and 2 km (20, 0) during simulation

Fig. 2. Comparison of the numerical solution (NS) with analytical solution (AS)

여기서,  $N$ 은 전체 자료의 수,  $X_a^i$ 는 해석해 계산값,  $X_{sim}^i$ 는 수치모형 계산값,  $\bar{X}_a$ 는 해석해 계산값의 평균,  $\bar{X}_{sim}$ 는 수치모형 계산값의 평균,  $\sigma_a$ 는 해석해 계산값의 표준편차,  $\sigma_{sim}$ 는 수치모형 계산값의 표준편차를 나타낸다.

### 3.2 가상 도메인에서의 평가

수치모의 조건을 완전하게 조절할 수 있는 가상의 도메인에서 주어진 조건에 대한 계산 결과를 평가하였다. 계산 결과의 평가는 두 가지로 구분하였다. 첫 번째는 단순화된 가상의 수로에서 CLF 모형과 본 연구로부터 계산된 수면 종단곡선을 서로 비교 평가하였고, 두 번째는 가상의 도메인에서 본 연구로부터 계산된 결과의 타당성을 평가하였다.

첫 번째 평가에 사용된 CLF 모형은 지표면 흐름해석시 정형 사각 격자 기반의 침수해석 모형인 LISFLOOD-FP 모형을 이용하고 있으며, 본 연구에서 사용한 지배방정식과 같은 지배방정식을 유한차분법과 양해법으로 해석한다. 평가에 사용된 모의 조건은 Table 3의 CASE1과 같고, 이를 위한 도메인의 구성은 Fig. 3과 같다. 100 m × 100 m 크기와 고도 10 m를 가지는 정형 사각 격자 52 개를 3 행으로 구성하였으며, 두 번째 행의 두 번째 열 (1, 1)부터 마지막 열 (1, 51)까지의 고도를 1 m로 낮게 하여 수로를 만들었다. (1, 1) 격자에 유량 1 m<sup>3</sup>/s를 경계조건으로 1 시간 동안 부여하였고, 지면 경사는 0 m/m, 조도계수는 0.03 s/m<sup>1/3</sup>을 적용하였다.

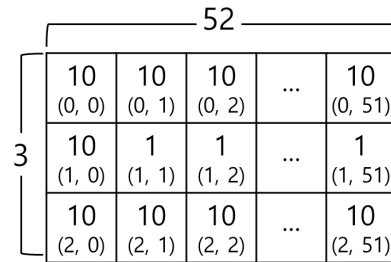


Fig. 3. Domain composition and the elevation (m) of each grid for CASE1

모의 기간 1시간에서의 계산 결과는 Fig. 4(a)에서와 같이 (1, 1) 격자에서만 서로 다른 수심을 나타내었고, 이를 제외한 구간에서 유사한 값을 나타내었다. 또한 두 모형의 계산 결과는 RMSE는 1 cm 미만, NSE와 CC는 모두 0.99를 나타내어 (CASE1 of Table 3) 서로 잘 일치하는 것으로 평가되었다. Fig. 4(a)에서 (1, 1) 격자에서 두 모형의 계산 결과가 다른 것은 지배방정식의 해석 방법과 경계부의 처리 방법의 차이로 인한 것으로 판단된다. 즉, CLF 모형은 좌측에 있는 제어체적에서 시작하여 좌측(-x 방향)으로의 흐름을 양해적으로 먼저 계산하고, 우측 방향(+x)에 있는 제어체적에 대해서 같은 방법으로 계산을 진행한다. 그러므로 경계조건이 부여된 격자의 좌측에 높은 지면 고도를 가지는 격자가 있어서 좌측으로의 흐름이 발생하지 않을 경우에는, 경계조건이 부여된 격자는 인접한 우측 격자의 수위의 영향이 반영된 흐름 계산을 할 수 없다. 반면에 본 연구의 수치모형은 음해법을 적용함으로써 도메인 내부의 전체 제어체적에 대해서 반복계산에 의해 수위의 수렴해를 도출한다. 그러므로 도메인 경계부 및 경계조건이 부여된 격자의 수위 계산시 주변 격자의 수위의 영향을 충분히 반영할 수 있다. 이러한 차이는 수심이 있는 격자를 둘러싼 높은 고도의 격자 주변에서 국지적으로 발생할 수 있으며, 경계부를 제외하고는 서로 유사한 계산결과를 도출할 수 있는 것으로 평가되었다.

두 번째로 본 연구에서는 가상 도메인에서 다양한 수치실험(대칭성, 지면 경사 영향, 조도계수 영향, 지면 장애물에서의 안정성 등)을 수행하고 계산 결과를 검토하였으며, 그 중 대칭성 평가 결과는 Fig. 4(b)와 같다. 대칭성 평가는 수치모형의 공간적 계산 진행 방향이 좌우(+x, -x) 방향과 상하(-y, +y) 방향의 계산 결과에 영향을 미치지 않아서 각 방향에 대해서 서로 같은 결과를 산출하는지를 평가하기 위한 것이다. 본 연구에서는 Table 3의 CASE2 조건을 이용하였다. 즉 0.5 m × 0.5 m 크기의 사각형 격자 1001 × 1001 개로 구성된 도메인에서 중심(500, 500)에 위치한 격자에 수심 1 m의 경계조건을 모의 기간 1분 동안 일정하게 부여하였다. 도메인의 지면 경사는

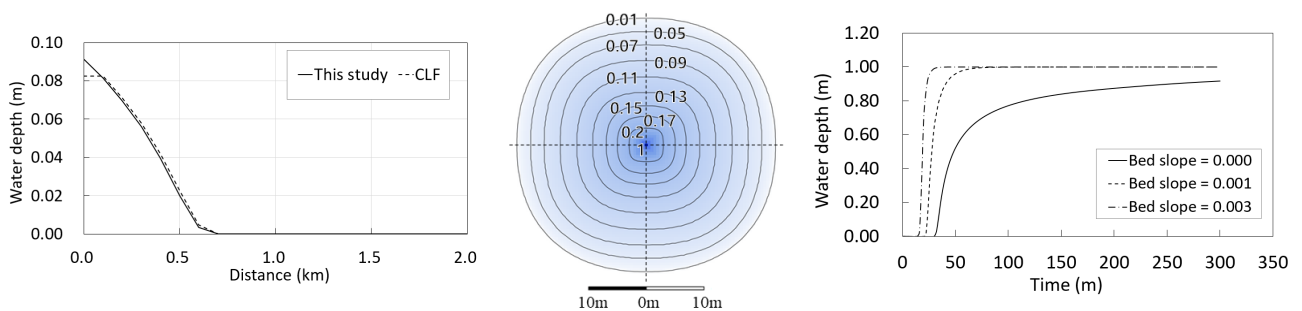
0 m/m, 조도계수는  $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$ 을 적용하였다. Fig. 4(b)는 모의 기간 1분에서의 계산 결과를 등수심선으로 나타낸 것으로, 4 방향(+x, -x, +y, -y)에 대해서 모두 대칭성을 보였다. 그러므로 본 연구에서 개발된 모형은 4 방향에 대해서 모두 일관된 계산 결과를 나타내는 것으로 평가되었다.

지면 경사, 조도계수, 지면 장애물의 영향에 대해서 검토된 결과를 개략적으로 기술하면 다음과 같다. 지면 경사의 변화에 따른 모형의 거동 평가에서는 지면 경사가 커질수록 수심의 전파가 빨라졌으며, 같은 값의 경계조건을 지속적으로 부

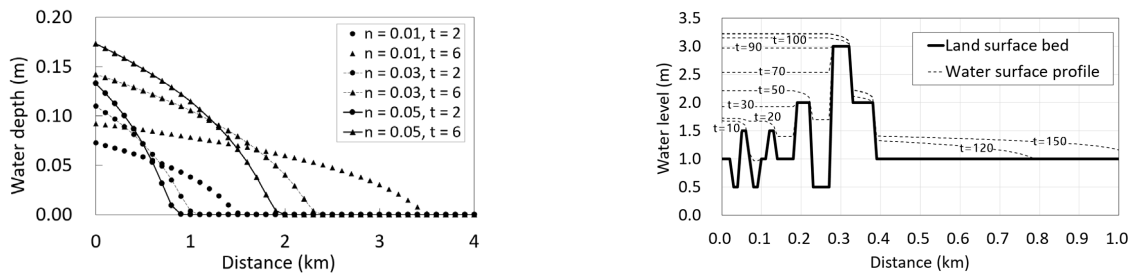
여 하였을 때 최종적으로는 수심의 평형상태를 나타내었다 (CASE3 of Table 3 and Fig. 4(c)). 조도계수의 변화에 따른 모형의 거동 평가에서는 조도계수가 커질수록 수심의 전파가 늦어지는 특성을 나타내었다(CASE4 of Table 3 and Fig. 4(d)). 따라서 지면 경사 및 지표면 조도계수의 변화에 따른 모형의 거동 또한 타당한 것으로 평가되었다. 지표면 장애물에 대한 모형 안정성 검토에서는 Fig. 4(e)에서와 같은 지면고 상승과 하강에서 모두 안정적으로 모의를 할 수 있었다(CASE5 of Table 3 and Fig. 4(e)).

**Table 3.** Conditions of the simulations and comparison of the calculation results from this study and CLF model

Case	Domain size (column number × row number)	Grid size (m)	Surface slope (m/m)	Roughness coeff. ( $\text{s/m}^{1/3}$ )	Boundary condition and the position	Simulation duration	RMSE (m)	NSE	CC
CASE1	52 × 3	100	0.000	0.03	1 m <sup>3</sup> /s, (1, 1)	1 hour	0.004	0.99	0.99
CASE2	1001 × 1001	0.5	0.000	0.03	1 m, (500, 500)	1 minute	-	-	-
CASE3	51 × 1	100	0.000 0.001 0.003	0.03	1 m, (0, 0)	5 hours	-	-	-
CASE4	51 × 1	100	0.000	0.01 0.03 0.05	1 m <sup>3</sup> /s, (0, 0)	6 hours	-	-	-
CASE5	101 × 1	10	0.000	0.03	1 m <sup>3</sup> /s, (0, 0)	2.5 hours	-	-	-



(a) Comparison of the calculation results from this study and CLF model using the CASE1 of Table 3. The distance of (1, 1) grid in Fig. 3 was set to 0 km (b) The result of symmetry test using the CASE2 of Table 3. Circle lines are the contour lines of water depth in meter unit (c) The result of land surface bed slope (m/m) test using the CASE3 of Table 3. The changes of water depth at 2 km (20,0) from left side (0,0)



(d) The result of roughness coefficient ( $n, \text{s/m}^{1/3}$ ) test using the CASE4 of Table 3. t is the simulation time in hour (e) Water surface profiles using the CASE5 of Table 3. Bold solid line shows the land surface bed and t is the simulation time in minute

**Fig. 4.** Calculation results in virtual domains

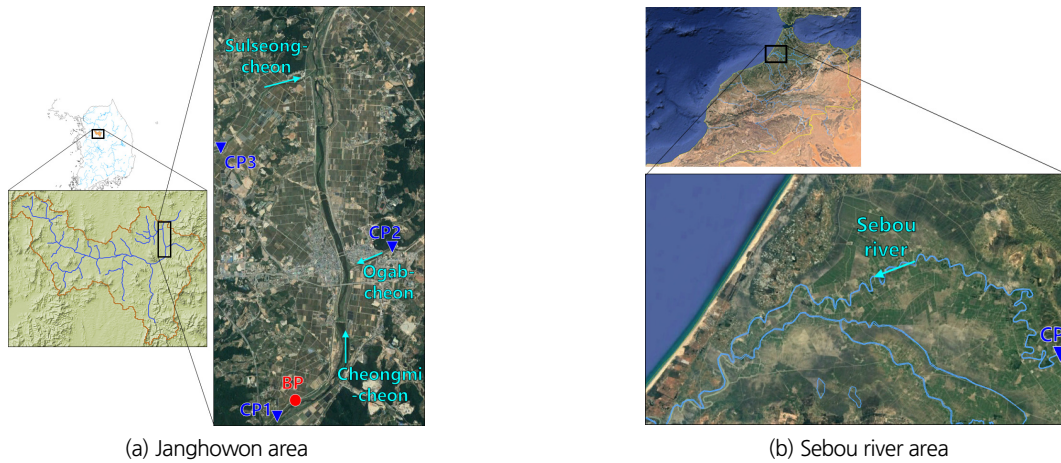


Fig. 5. Study area

## 4. 실제 지역에서의 침수해석 평가

### 4.1 연구 대상 지역 및 지형자료

본 연구에서 개발된 모형의 적용성을 평가하기 위해서 우리나라 청미천 유역에 있는 장호원 지역과 모로코의 Sebou 강 지역에 대해서 침수해석을 수행하였다. 장호원 지역은 국가하천 홍수위험지도가 제작된 지역으로 FLUMEN 모형을 이용하여 계산된 침수범위를 참고할 수 있다. 본 연구에서는 국가하천 홍수위험지도 제작 대상 지역인 청미천 장호원 지구의 파제 1지점(BP)(Fig. 5(a))을 대상으로 침수해석을 수행하였다(MLTM, 2012). 침수해석 지역으로는 본류인 청미천이 흐르고 주요 지류인 오갑천과 설성천이 유입된다. 본 연구에서는 각 하천의 유량을 경계조건으로 입력하였으며, 경계조건 설정 지점은 Fig. 5(a)에서 각각 CP1(청미천 본류), CP2(오갑천), CP3(설성천)이다. 장호원 지역의 침수해석 영역의 유효 면적은 약 18 km<sup>2</sup>이며, Lidar 측량에 의해서 구축된 DEM(Digital Elevation Model)과 MLTM(2011)에서 제시된 대상 구간간의 하천단면 자료를 이용하여(Choi *et al.*, 2014) 10 m × 10 m 해상도의 격자 182,253개로 도메인을 구성하였다.

모로코의 Sebou 강은 모로코 북부에 있는 강으로 하류에 있는 Gharb 평야를 관류하고 있다. Sebou 강 하류 지역은 제내지가 제외지 보다 낮은 지대가 많고, 하상경사가 작아서 상류 우심지역의 강우로 인해서 빈번히 홍수가 발생하는 지역으로 한국국제협력단(KOICA)에서는 2018년에 이 지역에 대한 홍수방지 마스터플랜을 수립한 바 있다(Isan and Dongbu, 2018). 본 연구에서는 Sebou 강 하류 지역(Fig. 5(b))에서 발생한 2009년 12월 ~ 2010년 1월의 홍수에 대해서 침수해석을 수행하였다. Sebou 강 지역의 침수해석에는 본류로 유입되는 유량을 경계조건으로 사용하였으며, 그 위치는 Fig. 5(b)

의 CP와 같다. Sebou 강 지역의 침수해석 영역의 유효 면적은 약 2,955 km<sup>2</sup>이며, 미국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에서 제공되는 90 m × 90 m 해상도의 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DEM을 이용하여 364,795개의 격자로 도메인을 구성하였다.

### 4.2 모의 조건

장호원 지역과 Sebou 강 지역에 대해서 본 연구에서 제시된 침수해석 모형에 의한 모의 결과와 CLF 모형의 모의 결과를 상호 비교하였으며, 장호원 지역의 경우 국가하천 홍수위험지도에서의 FLUMEN 모형을 이용한 모의 결과와 추가적으로 비교하였다. Choi *et al.* (2014)은 국가하천 홍수위험지도 제작(MLTM, 2012)에서 적용한 장호원 지역의 경계조건과 파제 시나리오를 이용해서 침수해석을 수행한 바 있다. 본 연구에서는 MLTM(2012)과 Choi *et al.* (2014)의 연구를 참고하여 장호원 지역의 침수해석 조건을 설정하였다. 즉, 청미천 본류, 오갑천, 설성천(각각 Fig. 5(a)의 CP1, CP2, CP3 지점)에 유량 경계조건을 적용하고, BP(Fig. 5(a)) 지점에 파제 시나리오를 적용하였다. 유량 경계조건은 국가하천 홍수위험지도 제작에 사용된 청미천 본류, 오갑천, 설성천의 100년 빈도의 계획홍수량(Fig. 6(a))을 사용하였으며, 하류단은 자유수면 유출 조건을 적용하였다. 경계조건의 시간 간격은 60분이다. 파제 시나리오에서 파제 폭은 직선거리 90 m이며, 파제후의 지반고는 제내지의 지반고와 같다. 파제 시간은 본류에서 첨두홍수량이 발생하는 때로 모의 시작 후 10시간이 경과한 시점이다. 모형의 매개변수는 장호원 지역에 대해서 국가하천 홍수위험지도의 모의 결과와 유사한 침수면적을 모의하기 위해서 시행착오법으로 보정하였다. CLF 모형의 매개변수

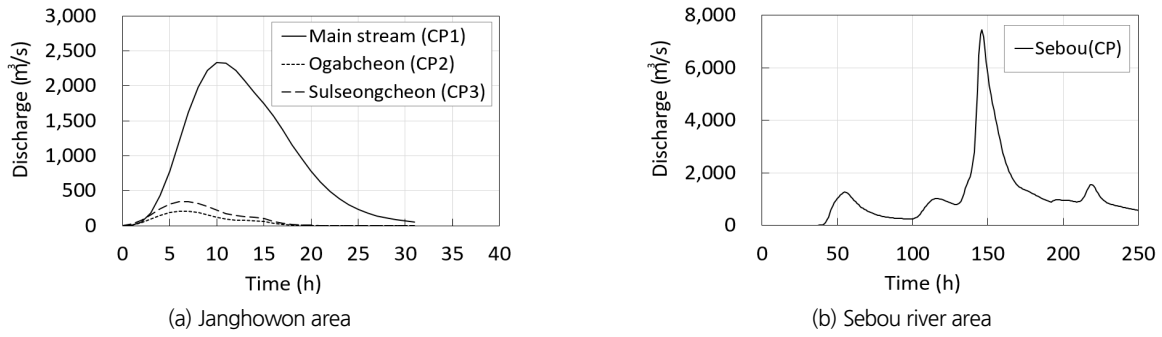


Fig. 6. Discharge boundary condition for each study area

는 이 모형에서 권장하는 매개변수의 범위를 고려하여 Courant number 0.2와 Froude number 0.8을 적용하였고(Choi *et al.*, 2014), 본 연구의 모형을 이용한 모의에서는 Courant number 0.7과 Froude number 1을 적용하였다. 조도계수는 두 모형 모두  $0.03 \text{ s/m}^{1/3}$ 을 적용하였다.

모로코 Sebou 강 지역에서는 2009년 12월에서 2010년 3월의 기간에 대규모 홍수가 발생한 바 있으며(Isan and Dongbu, 2018), Kim *et al.* (2017)은 이 기간 중 2009년 12월 19일 ~ 26일에 대해서 위성영상으로부터 유도된 강우자료를 이용하여 Sebou 강 지역의 홍수량 해석에 대한 연구를 수행한 바 있다. 본 연구에서는 이 연구에서 제시된 홍수량 자료(Fig. 6(b))를 CP (Fig. 5(b))에서의 유량 경계조건으로 적용하였으며, 자료의 시간 간격은 60분이다. Sebou 강 지역의 침수해석에는 파제 조건을 적용하지 않았으며, 하류단은 자유수면 유출 조건을 적용하였다. Courant number, Froude number, 조도계수는 장호원 지역의 모의에서 사용된 두 모형의 매개변수와 같은 값을 각각 적용하였다.

### 4.3 모의 결과 평가

모의 결과 평가는 침수면적과 평균 침수심, 최대 침수심에 대해서 본 연구과 CLF 모형을 이용한 모의 결과를 서로 비교하였다. 이 중 장호원 지역의 침수면적 비교에서는 국가하천 홍수 위험지도에서 작성된 침수범위를 함께 비교 하였다. Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)는 각각 장호원 지역에 대한 본 연구의 모의 700분에서의 침수범위와 CLF 모형을 이용한 690분에서의 침수범위이고, Fig. 7(c)는 국가하천 홍수 위험지도에서 FLUMEN 모형을 이용한 모의 결과이다. 장호원 지역의 침수모의에서는 우선 하도에서 흐름이 발생 한 후 CPI에서의 경계조건이 최댓값을 나타내는 10시간에서 파제 시나리오가 적용되었으며, 파제된 이후에는 산, 도로 등과 같은 상대적으로 높은 고도의 지형으로 둘러싸인 농경지로 수심이 전파되는 양상을 나타내었다. 제외지(하천 내부)와 BP 지점의 파제에 의한 제내지(하천

외부)의 침수면적은 본 연구에서는  $3.22 \text{ km}^2$  (Fig. 7(a)), CLF 모형은  $3.26 \text{ km}^2$  (Fig. 7(b))로 모의 되었으며, 이는 홍수 위험 지도에서 모의된 침수면적인  $3.21 \text{ km}^2$  (Fig. 7(c))와 유사한 값을 나타내었다.

Figs. 7(d) and 7(e)는 각각 Sebou 강 지역에 대한 모의 240 시간에서의 본 연구의 침수범위와 CLF 모형의 침수범위를 나타낸 것이다. Sebou 강 지역에서는 하천의 통수능을 초과하는 홍수량이 유입되므로 인해서, 제내지의 저지대가 광범위하게 침수(Isan and Dongbu, 2018)되는 것으로 모의되었다. 침수면적은 본 연구에서는  $947 \text{ km}^2$  (Fig. 7(d)), CLF 모형에서는  $934 \text{ km}^2$  (Fig. 7(e))로 모의 되었으며, CLF 모형의 결과를 기준으로 약 1.4%의 상대오차를 보임으로써 유사한 결과를 나타내었다.

그러나 침수영역의 위치를 볼 때 Figs. 7(d) and 7(e)의 A 영역에서는 본 연구가 CLF 모형에 비해서 침수범위가 작게 모의 되었고, B 영역에서는 CLF 모형에 비해서 큰 침수범위를 나타내었다. 이러한 차이가 발생된 원인은 두 모형에서 각기 다른 시간차분 기법을 사용하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 본 연구의 침수해석에서는 음해법을 사용하기 때문에 반복 계산에 의해서 수심이 CLF 모형에 비해서 많은 인접 격자로 넓게 확산되었다. 반면에 CLF 모형은 양해법을 사용하기 때문에 임의 격자에서 한번 계산된 수심은 그 후에 계산된 주변 격자의 변화된 수심 값의 영향을 반영하지 못한다. 그러므로 본 연구의 모형에 비해서 계산 방향( $\pm x$  방향 혹은  $\pm y$  방향)으로의 수심의 전파는 더 빠르나, 도메인 일부분의 제한된 영역에서 비교하였을 때 침수된 격자의 개수는 작게 나타났다. 이로 인해서 넓은 평지에서 수심이 초기에 전파되는 것은 CLF 모형이 빠르게 나타났으며(A 영역), 그 외의 저지대 영역(B 영역)에서는 본 연구의 모형이 더 넓은 확산 범위를 모의하였다. 장호원 지역의 Figs. 7(a) and 7(b)에서 CLF 모형이 10분 정도 빠르게 서로 유사한 침수범위를 모의한 것 또한 같은 이유인 것으로 판단된다.



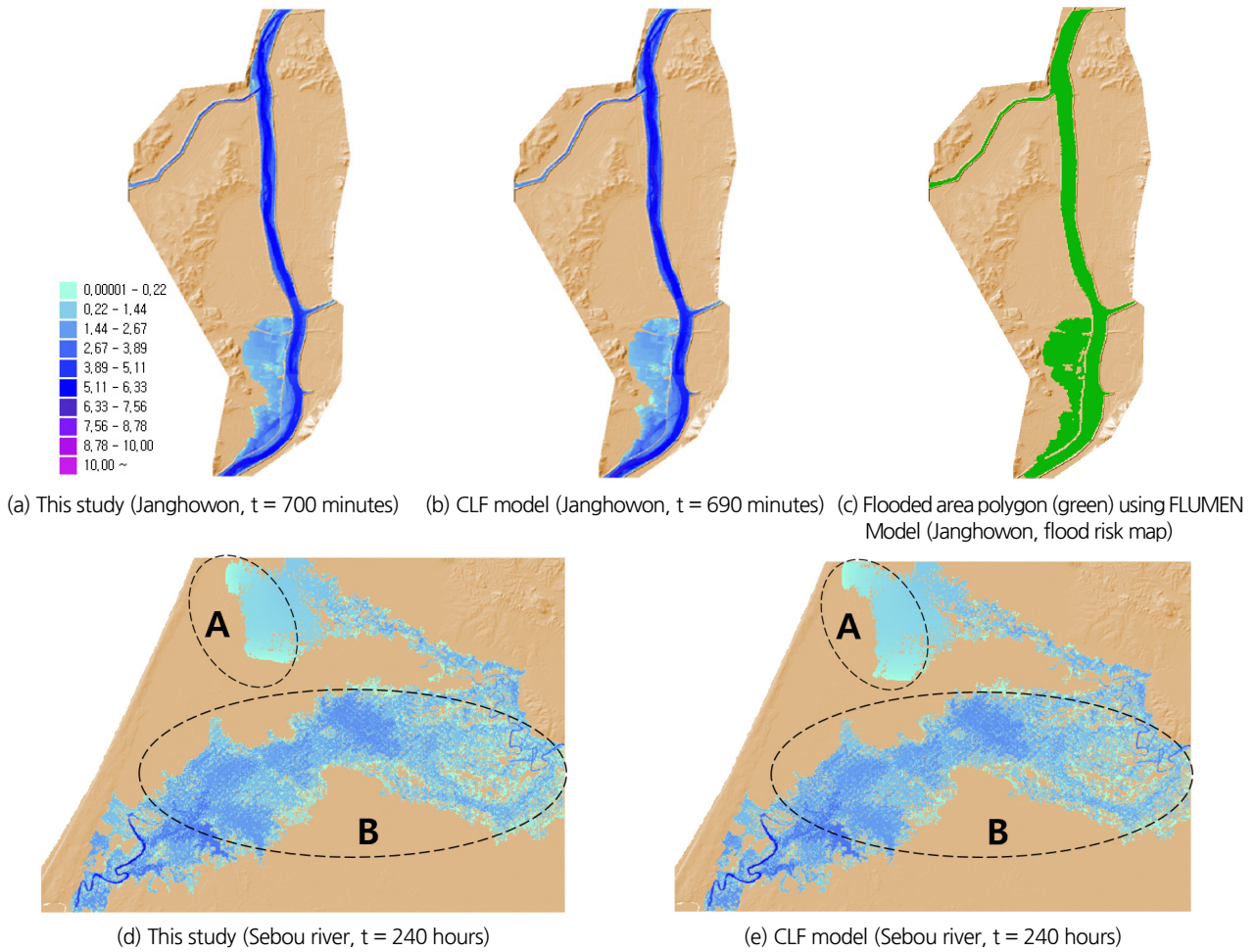


Fig. 7. Comparison of flood areas from CLF model and this study

Fig. 8은 장호원 지역과 Sebou 강 지역에 대해 CLF 모형과 본 연구의 모형을 이용하여 모의 하였을 때, 모의 진행에 따른 최대 침수심, 평균 침수심, 침수면적을 비교하여 나타낸 것이다. 장호원 지역의 경우 Figs. 8(a)~8(c)에서와 같이 최대 침수심과 평균 침수심은 모의 시작 후 10시간에서 가장 큰 차이를 나타내었으며, CLF 모형의 모의 결과를 기준으로 했을 때 각각 10% 미만, 14% 미만의 범위에서 작게 산정되었다. 침수면적은 전 기간(20시간)에 대해서 유사하게 나타났다. Sebou 강 지역의 경우 Figs. 8(d)~8(f)에서와 같이 최대 침수심, 평균 침수심, 침수면적이 전 기간(240시간)에 대해서 유사한 값을 나타내었다.

Fig. 8에서 본 연구의 침수해석 모형과 CLF 모형을 이용한 모의 결과를 비교하였을 때 장호원 지역의 모의 결과가 Sebou 강 지역에 비해서 더 큰 차이를 보였다. 특히 본 연구의 모형으로 계산한 장호원 지역의 수심이 CLF 모형을 이용한 수심에 비해 작게 산정되었으며, 파제 이전에 하도에서의 수심이 깊

은 기간(5시간~10시간)에서 더 큰 차이를 보였다. 이는 두 모형 간의 수치계산 방법 중 유량 제한 기법의 차이가 장호원 지역에서 좀 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 즉, CLF 모형은 두 격자 간의 흐름을 계산할 때, 안정적인 수치계산을 위해서 흐름수심(유량을 수심으로 환산한 값)이 대상 격자의 수심의 1/4을 초과할 경우, 대상 격자 수심의 1/5 만큼 흐르도록 제한하고 있다. 이러한 유량 제한 방법은 정형 사각형 격자를 이용하는 2차원 흐름해석에서 양해법을 적용할 경우, 4방향에 대해서 유량의 역류 없이 확산 계산을 안정적으로 수행하기 위함이다(Hunter *et al.*, 2005). 그러므로 수심이 깊거나 두 격자 간의 수위차가 커서 유량이 큰 흐름해석에서 수심의 확산이 늦어지는 특징이 있다. 이에 비해 본 연구에서는 두 격자 간의 최대 흐름 수심을 대상 격자 간의 흐름 가능 깊이(두 격자의 수위의 최댓값과 지면고의 최댓값의 차)의 1/2로 제한하고 있다. 본 연구에서는 음해법에 의해서 도메인 전체 격자의 수심을 반복계산으로 수렴 시키므로, 이러한 흐름 제한 기법은 과

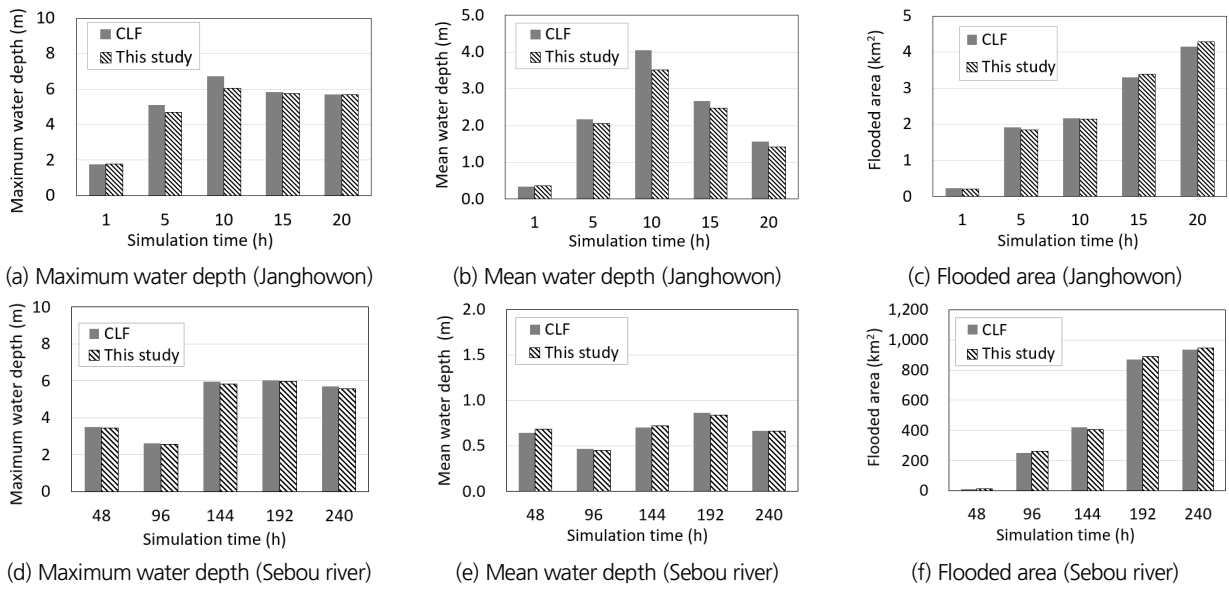


Fig. 8. Comparisons of maximum water depth, mean water depth, and flooded area from this study and CLF model

도한 유량 제한 없이도 4 방향으로의 흐름 확산을 안정적으로 계산할 수 있다. 장호원 지역의 모의해서 5시간 ~ 10시간의 기간은 파제가 시작되기 전의 기간으로, 경계조건에 의해서 하도에서 1,000 m<sup>3</sup>/s 이상의 큰 유량이 흐르는 기간이다. 그러므로 CLF 모형은 흐름 제한에 의해서 수심의 확산이 늦어지고, 이로 인해서 높은 수심을 가지는 격자가 다수 발생됨으로 인해서 최대 수심과 평균 수심에서 본 연구의 결과보다 큰 값을 나타낸 것으로 판단된다. Sebou 강 지역의 경우, 경계조건으로 큰 유량이 유입되지만, 격자의 크기가 상대적으로 크고, 유입량이 저지대에 넓게 확산됨으로 인해서 두 격자 간의 흐름은 완만한 양상을 나타낸다. 그러므로 Sebou 강 지역의 모의에서는 흐름제한 기법의 영향이 상대적으로 작게 작용한 것을 알 수 있다.

본 연구에서 제시된 모형을 이용한 침수모의 실행시간은 장호원 지역은 20시간 모의에 약 26분(CLF 모형은 약 35분), Sebou 강 지역은 240시간 모의에 약 59분(CLF 모형은 약 90분)으로 측정되었다. 실행시간 측정에 사용된 장비의 CPU (Central Processing Unit)는 Intel Core i9-7900X 3.3 GHz (10 Cores, 20 threads)이고, OS (Operating System)는 Windows 10 Enterprise (64 bit)이다. 본 연구의 G2D 모형은 Microsoft .NET의 C#으로 개발되었으며, .NET의 병렬계산 라이브러리에 포함되어 있는 Parallel.ForEach()와 Parallel.For() 문을 이용하여 CPU를 이용한 병렬계산을 수행하였다. 이 방법에서는 최대 병렬화 정도를 매개변수로 하여 계산 작업에 자동으로 CPU를 할당하며, 각 방법의 상세한 설명은 .NET의 사용 방법을 참고할 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 연속방정식과 이송가속도항을 제외한 운동량방정식을 이용하여 정형 사각 격자 기반의 2차원 지표면 침수해석 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 해석해와 비교하고, 가상의 도메인에서 계산 결과의 타당성을 평가하였다. 실제 지역에 대한 평가를 위해서 청미천의 장호원 지역과 모로코 Sebou 강 하류 지역을 대상으로 침수모의를 수행하였다. 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 제시된 모형은 해석해와의 비교, 가상 도메인에서의 거동 평가, CLF 모형과의 상호 비교에서 모두 타당한 결과를 나타내었다. 그러므로 본 연구에서 제시한 모형은 지배방정식의 구성과 해석 방법이 타당한 것으로 판단된다. 이와 더불어 가상 도메인에서의 거동 평가결과, 수심이 있는 격자 영역의 경계부에서는 CLF 모형에 비하여 좀 더 합리적인 계산 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 장호원 지역과 Sebou 강 지역의 모의에서는 침수면적, 최대 침수심, 평균 침수심에서 본 연구와 CLF 모형 모두 유사한 결과를 나타내었다. 또한 장호원 지역의 경우, 홍수위험 지도의 침수범위와도 유사한 침수범위를 모의할 수 있었다. 장호원 지역에서는 파제 전에 하도에서 큰 유량이 흐르는 기간에서 CLF 모형은 수치계산의 안정성을 위해서 수심의 1/5로 유량을 제한함으로써 수심의 전파가 상대적으로 늦게 모의되었으나, 본 연구에서는 과도한 유량 제한 없이도 안정적으로 수심 전파를 모의할 수 있었다. Sebou 강

지역에 있는 넓은 홍수터에서의 침수모의에서, 본 연구에서는 CLF 모형에 비해 계산 방향( $\pm x$  방향 혹은  $\pm y$  방향)으로의 전파는 상대적으로 느리게 진행되었으나, 침수셀 주변으로의 수심 확산은 상대적으로 빠르게 모의되었다. 이러한 차이의 원인은 시간차분 기법 등과 같은 수치계산 방법의 차이로 인한 것으로 판단된다.

- 3) 본 연구에서 제시된 침수해석 모형은 광범위한 홍수터에서의 지표면 침수모의를 목적으로 하고 있다. 도메인 구성에서는 정형 사각 격자를 이용하고 있으므로 DEM을 이용하여 비교적 손쉽게 도메인을 구성할 수 있다. 그러나 이 방법은 비정형 격자 구조에서 구현 가능한 정밀한 도메인의 구성 및 이를 반영한 침수해석이 어려운 한계가 있다. 지배방정식에서는 국지가속도항을 이용하여 흐름의 관성을 일부 모의할 수 있으나, 이송가속도항을 고려하지 않고 있기 때문에 댐붕괴에 의한 흐름, 급격한 처오름, 도수 등과 같은 국지적인 급변류와 이송가속도의 영향이 큰 흐름을 정확히 모의할 수 없는 한계가 있다. 그러므로 본 연구에서 제시된 모형을 이용하여 침수모의를 할 경우에는 이와 같은 특성이 고려되어야 할 것이다.
- 4) 본 연구에서 사용된 지배방정식은 이송가속도의 영향이 작은 흐름을 대상으로 한다. 정형 사각형 격자를 이용하는 제어체적에서 이러한 흐름은 격자의 해상도, 인접한 격자와의 지면고도의 차이, 지표면의 조도, 흐름 특성(유량, 수심, 유속 등) 등과 같은 복잡한 요인에 의해서 결정된다. 그러므로 다양한 도메인과 흐름 특성을 대상으로 본 연구의 지배방정식과 수치해석 방법을 평가함으로써, 모형의 정확성과 안정성을 지속적으로 향상시키기 위한 추가 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(위성자료를 이용한 북한 홍수범람 분석 기술 개발)과 환경부의 물관리연구사업(과제번호:RE201901061)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Bates, P. D., Horritt, M. S., and Fewtrell, T. J. (2010). "A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling." *Journal of Hydrology*, Vol. 387, No. 1-2, pp. 33-45.
- Choi, C. K., Choi, Y. S., and Kim, K. T. (2014). "Comparison and evaluation of the inundation areas by levee breaching using LISFLOOD." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 383-392.
- Choi, C. K., Kim, J. H., Kim, K. H., and Kim, G. H. (2015). "Spatial analysis of flood inundation for ensuring stream space." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 2, pp. 341-351.
- Coulthard, T. J., Neal, J. C., Bates, P. D., Ramirez, J., de Almeida, G. A. M., and Hancock, G. R. (2013). "Integrating the LISFLOOD-FP 2D hydrodynamic model with the CAESAR model: implications for modelling landscape evolution." *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 38, No. 15, pp. 1897-1906.
- Courant, R., Friedrichs, K., and Lewy, H. (1956). *On the partial difference equations of mathematical physics*. AEC Research and Development Report, NYO-7689, New York. AEC Computing and Applied Mathematics Centre, pp. 63-76.
- DHI (2017a). *MIKE 21 Flow Model & MIKE 21 Flood Screening Tool: Hydrodynamic module scientific documentation*. Danish Hydraulic Institute, pp. 2-51.
- DHI (2017b). *MIKE SHE Volume 2: Reference guide*. Danish Hydraulic Institute, pp. 2-51.
- Di Giammarco, P., Todini, E., and Lamberti, P. (1996). "A conservative finite elements approach to overland flow: the control volume finite element formulation." *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 267-291.
- Downer, C. W., and Ogden F. L. (2006). *Gridded surface subsurface hydrologic analysis (GSSHA) user's manual*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, pp. 362-375.
- FLO-2D Software (2017). *Flo-2D reference manual*. FLO-2D Software, Inc., pp. 2-16.
- Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. MacMillan Publishing Co., New York, NY, pp. 362-375.
- Hulbert, G. M., and Jang, I. (1995). "Automatic time step control algorithms for structural dynamics." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 126, No. 1-2, pp. 155-178.
- Hunter, N. M., Bates, P. D., Horritt, M. S., and Wilson, M. D. (2007). "Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review." *Geomorphology*, Vol. 90, No. 3-4, pp. 208-225.
- Hunter, N. M., Horritt, M. S., Bates, P. D., Wilson, M. D., and Werner, M. G. F. (2005). "An adaptive time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation." *Advances in Water Resources*, Vol. 28, No. 9, pp. 975-991.
- Isan Corp., and Dongbu Eng. (2018). *Flood protection and control master plan in Sebou river, Morocco*. KOICA, pp. 1.1-1.5.
- Jeon, H. S., Kim, J. S., Kim, K. H., and Hong, I. (2016). "Application of the LISFLOOD-FP model for flood stage prediction on the lower Mankyung river." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 6, pp. 459-467.
- Kim, B. H. (2008). *Two-dimensional finite volume model using high*

- resolution Godunov method for simulating extreme flows in natural channels.* Ph. D. dissertation, Kyungpook National University, pp. 14-46.
- Kim, H. J., Kim, J. M., and Cho, Y. S. (2009). "Numerical analysis of dam-break flow in an experimental channel using cut-cell method." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 2B, pp. 121-129.
- Kim, J. H., Choi, Y. S., and Kim, K. T. (2017). "Estimation of flood discharge using satellite-derived rainfall in abroad watersheds - a case study of Sebou watershed, Morocco." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 20, No.3, pp. 141-152.
- Kim, K. S., Kim, J. S., and Kim, W. (2011). "Estimation technique of computationally variable distance step in 1-D numerical model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 5, pp. 363-376.
- Lee, B. J., and Yoon, S. S. (2017). "Development of grid based inundation analysis model (GIAM)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 3, pp. 181-190.
- Lee, C. H., Han, K. Y., and Choi, K. H. (2006a). "DEM based urban inundation analysis model linked with SWMM." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 7, pp. 441-452.
- Lee, C. H., Han, K. Y., and Kim, J. S. (2006b). "Development of urban flood analysis model adopting the unstructured computational grid." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 5B, pp. 511-517.
- Lee, M. H., and Yoo, D. H. (2011). "Development and application of diffusion wave-based distributed runoff model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 7, pp. 553-563.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011). *Cheonmicheon (Riv.) river maintenance master plan report.* Ministry of Land, Transport and Maritime, Korea.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2012). *Flood risk map report-Hangang Basin.* Ministry of Land, Transport and Maritime, Korea, pp. 2.124-5.31.
- Scott, F. B., and Brett, F. S. (2002). "Finite-Volume Model for Shallow-Water Flooding of Arbitrary Topography." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 3, pp. 289-298.
- Venkatakrishnan, V. (1995). *A perspective on unstructured grid flow solvers.* ICASE Report No. 95-3, National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, Hampton, VA, USA, pp. 1-14.
- WL Delft Hydraulics (2007). *Evaluation of inundation models: Limits and capabilities of models.* HR Wallingford, UK, pp. 1-7.