

도시지역을 관통하는 홍수파의 특성에 관한 수치적 연구 (1) : 수치모형의 개발 및 검증

A Numerical Study on Characteristics of Flood Wave Passing through Urban Areas (1) : Development and Verification of a Numerical Model

정우창* · 이진우** · 조용식***

Jeong, Woo Chang · Lee, Jin Woo · Cho, Yong-Sik

Abstract

In this study, a two-dimensional unstructured finite volume model based on the shallow-water equations and well-balanced HLLC scheme is developed. The model is verified by applying to various one- and two-dimensional problems related to the analyses of dam-break wave. The predicted numerical results agree very well with available analytical solutions and laboratory measurements. The model provides slightly more accurate results compared with the existing models.

Key words : Shallow-water equations, Unstructured Finite Volume Model, Well-balanced HLLC scheme, Dam-break wave

요 지

본 연구에서는 도시지역을 관통하는 댐 붕괴파의 전파특성을 모의하고 분석하기 위한 선행 작업으로 천수방정식과 well-balanced HLLC 기법에 근간을 둔 2차원 비구조적 유한체적모형을 개발하였다. 개발된 모형은 다양한 1차원과 2차원의 댐 붕괴파 해석과 관련된 문제에 대해 검증되었으며, 검증결과 해석해 및 수리모형실험을 통한 실측자료와 매우 일치하는 경향을 나타냈다. 본 연구에서 개발된 수치모형은 현장에서 그리고 수리모형실험을 통해 관측된 수위자료와 잘 일치하였으며, 기존의 모형으로부터 계산된 수위결과에 비해 비교적 보다 정확한 결과를 나타내었다.

핵심용어 : 천수방정식, 비구조적 유한체적모형, Well-balanced HLLC 기법, 댐 붕괴파

1. 서 론

최근 전 세계적으로 지구 온난화, 엘리뇨 현상 등 범지구적 기후변화로 인해 홍수, 태풍 등 자연재해의 규모가 점차적으로 대형화되고 있는 실정이다. 특히 인구와 자산이 밀집된 도시지역에서의 홍수피해가 빈번히 발생하고 있으며, 그에 따라 막대한 인명과 재산피해를 입고 있는 실정이다. 본 연구에서는 도시지역을 관통하는 댐 붕괴파의 전파특성을 모의하고 분석하기 위한 선행 작업으로 수치모형의 개발과 검증을 수행하였다. 본 연구에서 개발된 수치모형의 지배방정식은 2차원 천수방정식으로 하천, 호소, 하구 그리고 해안지역에서의 흐름을 모의하는데 있어 광범위하게 적용되어 오고 있다. 천수방정식을 수치적으로 풀기 위해 대표적으로 다음과 같은 세 가지 방법이 적용된다: 유한차분법(Garcia and Kahawitha, 1986; Glaister, 1991; Cho, 1995), 유한요소법(Dhatt et al.,

1986; Akanbi와 Katopodes, 1988; 한 등, 2006) 그리고 유한체적법(Alcruco and Garcia-Navarro, 1993; Zhao et al., 1996; Anastasiou and Chan, 1997; 이와 이, 1998; Yoon and Kang, 2004; 김과 조, 2004, 2005).

최근 천수방정식에 유한체적법을 적용하여 비구조적 격자 시스템에서의 흐름을 모의하기 위한 많은 수치모형들이 개발되어 왔다. Anastasiou와 Chan(1997) 그리고 Sleigh 등 (1998)은 삼각형으로 이루어진 격자시스템에서 2차 정도의 유한체적법을 이용하여 2차원 천수방정식을 수치적으로 해석하였으며, Zhao 등(1994)은 비구조적 격자시스템에 대해 1차의 공간적 정확도를 가지는 유한체적모형을 개발하였다. 또한, Yoon과 Kang(2004)은 2차 정도의 upwind 유한체적법을 이용하여 삼각형 요소로 이루어진 비구조적 격자시스템에서 연속과 불연속 구간에서의 흐름 모의를 위한 모형을 개발하였으며, Kim(2008)은 분할격자체계를 이용한 천수흐름에 유한

*정회원 · 경남대학교 공과대학 토목공학과 조교수(E-mail: jeongwc@kyungnam.ac.kr)

**한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정

***정회원 · 한양대학교 공과대학 건설환경공학과 교수(교신저자)

체적법을 적용하여 수치적으로 해석하였다.

유한체적법의 기본적인 개념은 계산영역을 구성하는 검사체적(control volume) 또는 셀(cell)의 경계를 통한 흐름율(flux)을 계산하는 것이며, 불연속 흐름 구간에서의 흐름율을 계산할 때 주로 국부적인 1차원 Riemann 문제의 특별한 개념인 Godunov-type 유한체적법을 적용하여 수행된다(Godunov, 1959; MacCormack and Paullay, 1972). 이에 대한 적절한 수치해는 공간상으로 1차 정확도를 가지는 Roe 기법(Roe, 1981; 이와 이, 1998), flux vector splitting(FVS) 기법(Steger and Warming, 1981), Osher 기법(Osher와 Solomon, 1982), HLL 기법(Harten et al., 1983), HLLC 기법(Billet and Toro, 1997)과 시간과 공간상으로 2차 정확도를 가지는 TVD형 WAF(Weighted Average Flux) 기법(Toro, 1992; Kim et al., 2004)과 같은 approximate Riemann solver를 적용하여 얻어질 수 있다.

본 연구의 목적은 2차원 천수방정식에 유한체적법을 적용하여 비구조적 격자시스템에서의 상류(sub-critical flow) 및 사류(super-critical flow)를 포함한 점변류의 연속흐름 및 shock wave와 같은 급변류의 불연속 흐름을 모의할 수 있으며, 이를 통해 댐 붕괴로 인한 도시지역에서의 댐 붕괴파의 전파특성의 예측 및 분석할 수 있는 수치모형을 개발하는 것이다. 본 연구에서 개발된 수치모형의 특징을 요약하면 동적메모리 할당이 가능한 Fortran-90 언어를 사용하였으며, 격자시스템은 삼각형 또는 사각형의 비구조적 격자망과 이들 다각형을 혼합하여 적절하게 구성할 수 있다. 또한 불규칙한 하상지형으로 인한 수치진동(numerical oscillation)을 효과적으로 감소시키기는 것으로 알려진 well-balanced HLLC 기법을 적용하였으며, 마른 및 젖은 하상 조건에도 적용이 가능하다.

본 연구에서 개발된 모형은 1차원 문제에 대해 전통적인 해석해과의 비교를 통해 검증되었으며, 2차원 문제의 경우 기존의 수치모형에 의한 수치해 및 수리모형실험을 통해 얻어진 관측자료와의 비교를 통해 검증을 수행하였다. 본 연구에서 적용된 비구조적 삼각형 격자시스템은 Triangle(Shewchuk, 1996) mesh generator를 적용하여 구축되었다.

2. 수치모형

2.1 지배방정식

본 연구에서 적용된 지배방정식은 2차원 천수방정식

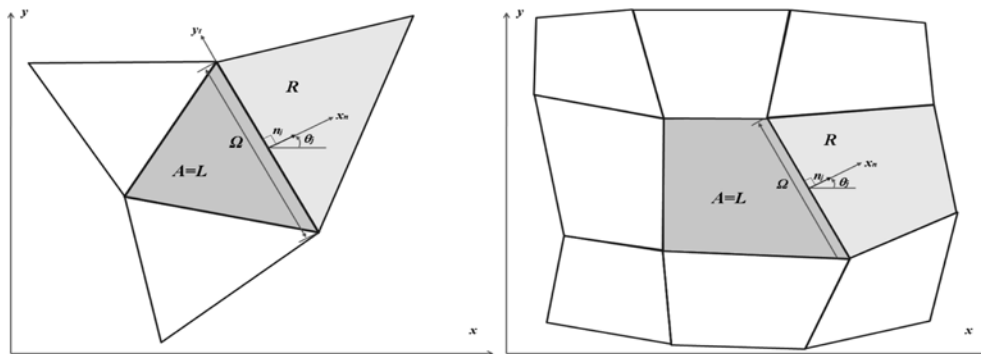


Fig. 1. Triangular (left) and quadrilateral (right) finite volume in the two-dimensional unstructured grid system.

(Shallow Water Equation, SWE)으로 Navier-Stokes 방정식을 다음과 같은 가정을 따라 수심방향으로의 적분을 통해 유도된다: 1) 비압축성 유체, 2) 정수압 분포, 3) 수심방향으로의 확일적인 유속분포, 4) 작은 하상경사, 5) 자유수면과 하상의 불투수성 바람에 의한 응력과 전향력을 무시할 때 유도된 천수방정식은 보존형 형태(conservative form)로 식 (1)과 같이 벡터형태로 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F(U) = S(U) \quad (1)$$

$$U = (h, hu, hv)^T \quad (1a)$$

$$F(U) = \begin{bmatrix} G(U) \\ H(U) \end{bmatrix}, S(U) = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - gh \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - gh \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \end{bmatrix} \quad (1b)$$

$$G(U) = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ huv \end{bmatrix}, H(U) = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{gh^2}{2} \end{bmatrix} \quad (1c)$$

여기서, h 는 수심, u 와 v 는 각각 x 와 y 방향으로의 유속, $F(U)$ 는 x 방향으로의 흐름율 벡터 $G(U)$ 와 y 방향에서으로의 흐름율 벡터 $H(U)$ 를 포함하는 흐름율 벡터, $S(U)$ 는 생성항, g 는 중력가속도 그리고 n 은 manning의 조도계수이다.

2.2 유한체적법(Finite Volume Method)

본 연구에서 적용된 수치기법은 유한체적법이며, 기본개념은 계산영역을 구성하는 검사체적(control volume) 또는 셀(cell) 경계를 통한 흐름율을 계산하는 것이다. Fig. 1에서처럼 삼각형 또는 사각형 형태의 임의의 셀 A 에 대해 식 (1)을 적분하면, 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_A U dA + \oint_{\Omega} F(U) \cdot n d\Omega = \int_A S(U) dA \quad (2)$$

여기서, Ω 는 셀 A 의 경계를 나타낸 것이며, n 은 outward 단위수직벡터이다.

식 (2)의 흐름율항인 $F(U) \cdot n$ 에 대해 rotational invariance

특성을 이용하면(Toro, 2001) 셀 경계면에서의 흐름을 계산은 1차원 문제로 축소되며 다음과 같이 표현된다.

$$F(U) \cdot n_j = T_j^{-1} G(T_j U) \quad (3)$$

여기서, T_j 는 변환행렬(transformation matrix)이며, 다음과 같다.

$$T_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_j & \sin \theta_j \\ 0 & -\sin \theta_j & \cos \theta_j \end{bmatrix}$$

식 (2)의 벡터 U 와 $S(U)$ 는 셀 A 의 중심에서 계산되며, 이는 셀 A 에 대한 평균값에 해당된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{|A|} \int_A U dA, \quad S(U) = \frac{1}{|A|} \int_A S(U) dA \quad (4)$$

여기서, $|A|$ 는 셀 A 의 면적이다.

식 (3)과 (4)를 식 (2)에 대입하면 식 (5)는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt} U + \frac{1}{|A|} \sum_{j=1}^{N_j} \oint_{\Omega} T_j^{-1} G(T_j U) d\Omega = S(U) \quad (5)$$

여기서, N_j 는 셀 A 의 모서리 수(삼각형일 경우 3 그리고 사각형일 경우 4)이다.

2.3 Well-balanced HLLC 기법

HLLC 기법은 Billett와 Toro(1997)가 제안한 Riemann 문제를 처리하기 위한 수치해석적 기법으로 Harten, Lax 그리고 Leer (1983)에 의해 제안된 HLL 기법을 개선한 것이다. HLLC 기법은 1차 정확도를 가지며, 상류와 하류 사이의 천이류(trans-critical flow)에 대한 수치모의를 동일한 1차 정확도를 가지는 Roe 기법(Roe, 1981)과 Osher 기법(Engquist and Osher, 1981; Osher and Solomon, 1982)에 비해 보다 정확하게 수치모의를 수행하는 것으로 알려져 있다(Zoppou and Roberts, 2003).

HLLC 기법은 Fig. 1에서처럼 U_L 은 셀 $L(=A)$ 에서 계산되는 평균값으로 $T_j U_L$ 이 되며, U_R 은 경계면 Ω 를 통해 셀 L 과

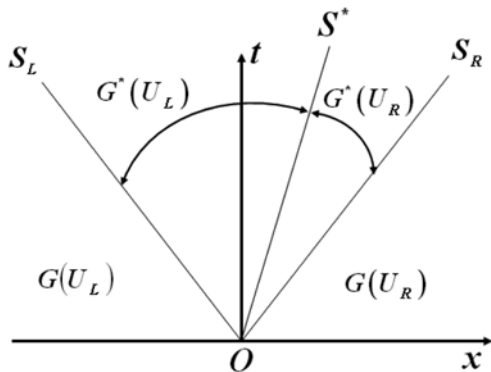


Fig. 2. Schematic illustration of HLLC flux approximation.

접해있는 셀(L)에 대한 평균값으로 $T_j U_R$ 이 된다면, 식 (5)의 흐름을향은 근사적으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\oint_{\Omega} G(T_j U) d\Omega \approx |\Omega| \overline{G}^{HLLC}(U_L, U_R) \quad (6)$$

여기서, $|\Omega|$ 는 경계면 Ω 의 길이를 나타낸다.

HLLC 기법은 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 파속 S_L 과 S_R 사이에 중간파속(intermediate wave speed)에 해당되는 S^* 를 고려하는 것이며, 식 (5)의 흐름을향은 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{G}^{HLLC}(U_L, U_R) = \begin{cases} G(U_L) & \text{if } S_L \geq 0 \\ G^*(U_L) & \text{if } S_L \leq 0 \leq S^* \\ G^*(U_R) & \text{if } S^* \leq 0 \leq S_R \\ G(U_R) & \text{if } S_R \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)에서 $G^*(U_L)$ 과 $G^*(U_R)$ 은 각각 다음의 식을 통해 계산된다.

$$\begin{aligned} G^*(U_L) &= G(U_L) + S_L(U_L^* - U_L) \\ G^*(U_R) &= G(U_R) + S_R(U_R^* - U_R) \\ U_{k=L,R}^* &= h_k \begin{pmatrix} 1 \\ S^* \\ \psi_k \end{pmatrix} \end{aligned}$$

여기서, $\psi_k = v_k$ 이며, S_L , S_R 그리고 S^* 는 다음과 같은 식을 통해 계산된다.

$$S_L = u_L - c_L p_L, \quad S_R = u_R + c_R p_R \quad (8)$$

$$S^* = \frac{S_L h_R (u_R - S_R) - S_R h_L (u_L - S_L)}{h_R (u_R - S_R) - h_L (u_L - S_L)} \quad (9)$$

여기서, $c_{k=L,R} = \sqrt{g h_k}$ 는 전파속도(wave celerity)이며, h_L 과 h_R 은 각각 셀 L 과 R 에서의 수심이다. h^* 가 셀 L 과 R 사이의 경계면에서의 수심이라 가정하면, 식 (8)의 $p_{k=L,R}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$p_k = \begin{cases} \frac{1}{h_k} \sqrt{\frac{1}{2} h^* (h^* + h_k)} & \text{if } h^* > h_k \\ 1 & \text{if } h^* \leq h_k \end{cases} \quad (10)$$

식 (10)에서 h^* 는 다음과 같은 절차를 통해 산정된다(Toro, 2001). 먼저 h^* 가 rarefaction wave 또는 shock wave에 해당되는지를 식 (11)을 통해 결정한다.

$$h_0^* = \frac{h_L + h_R}{2} \left[1 - \frac{u_R - u_L}{2(c_L + c_R)} \right] \quad (11)$$

만약 $h_0^* \leq \min(h_L, h_R)$ 이라면, rarefaction wave에 해당되며, h^* 는 식 (12)에 의해 계산되며, 만약 $h_0^* \geq \min(h_L, h_R)$ 이라면, shock wave에 해당되며, 식 (13)에 의해 계산된다.

$$h^* = \frac{1}{g} \left(\frac{c_L + c_R}{2} + \frac{u_R - u_L}{4} \right)^2 \quad (12)$$

$$h^* = \frac{h_L r_L + h_R r_R + u_L - u_R}{r_L + r_R} \quad (13)$$

여기서, r_L 과 r_R 은 다음과 같은 식에 의해 정의되는 계수이다.

$$r_{k=L,R} = \sqrt{\frac{g(h_0^* + h_k)}{2h_0^* h_k}} \quad (14)$$

만약 $\min(h_L, h_R) < h_0^* < \min(h_L, h_R)$ 있다면, $h^* = h_0^*$ 이 된다. 위와 같은 절차를 통해 식 (5)는 HLLC 기법이 고려된 식 (15)로 표현될 수 있다.

$$\frac{d}{dt} U + \frac{1}{|A|} \sum_{j=1}^{N_j} |\Omega T_j^{-1} \overline{G}^{HLLC}(U_L, U_R) = S(U) \quad (15)$$

생성항(source term) $S(U)$ 를 포함하고 있는 식 (15)를 수치적으로 풀기 위해서는 생성항을 양해적(explicit) 또는 반음해적(semi-implicit) 처리를 허용하는 fractional step method (김과 조, 2004) 또는 Strang splitting method(Strang, 1968) 등을 적용시킬 수 있다. 그러나 이들 방법을 불규칙한 하상지형에 적용하였을 때 수치진동(numerical oscillation)이 발생하며, 이로 인해 생성항과 셀을 통한 흐름을 경사와의 균형에 대한 문제가 발생하는 것으로 알려져 있다(LeVeque, 1998; Perthame and Simeoni, 2001). 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 Leveque와 George(2007)가 제안한 것으로 식 (7)의 $G^*(U_R)$ 를 계산할 때 하상지형경사를 직접 고려하는 것이며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$G^s(U_R) = G^*(U_R) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{2}g(h_L + h_R)(z_{b,R} - z_{b,L}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, $z_{b,R}$ 과 $z_{b,L}$ 은 각각 셀 L 과 R 에서의 하상고를 나타낸다. 급속히 변화하는 수심 또는 유속에 의해 발생하는 수치적 불안정성을 감소하기 위해 Loukili와 Soulaïmani(2007)은 생성항에 포함되어 있는 마찰항에 대해 공간적으로 반음해법(semi-implicit method)을 적용하였으며, 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$S^f(U) = -g \frac{n^2 u \sqrt{u_L^2 + v_L^2}}{h_L^{4/3}} \begin{bmatrix} 0 \\ u_L \\ v_L \end{bmatrix} \quad (17)$$

따라서 well-balanced HLLC 기법이 적용된 식 (15)는 식 (18)과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{d}{dt} U + \frac{1}{|A|} \sum_{j=1}^{N_j} |\Omega T_j^{-1} \overline{G}^s(U_L, U_R) = S^f(U) \quad (18)$$

시간에 따라 변화하는 수심 및 유속을 계산하기 위해 본 연구에서는 simple explicit Euler 기법을 적용하였으며, 적용 결과는 식 (19)와 같다.

$$U^{n+1} = U^n - \frac{\Delta t}{|A|} \sum_{j=1}^{N_j} |\Omega T_j^{-1} \overline{G}^s(U_L^n, U_R^n) + \Delta t S^f(U) \quad (19)$$

여기서, U^n 과 U^{n+1} 은 각각 시간 t^n 과 t^{n+1} 에서 계산된 U 의 근사값이며, $S^f(U)$ 는 시간 t^n 에서 $S^f(U)$ 를 계산한 값이 된다. Simple explicit Euler 기법은 비선형 방정식계에서 수반되는 반복적인 계산에 매우 효율적인 것으로 알려져 있으나 수치적 안정성을 확보하기 위해서는 다음과 같은 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건을 만족시킬 필요가 있다(Loukili and Soulaïmani, 2007).

$$CFL = \Delta t \frac{\max(\sqrt{gh} + \sqrt{u^2 + v^2})}{\min(d_{L,L,R})} \quad (20)$$

여기서, $d_{L,L,R}$ 은 셀 L 의 중심과 셀 L 과 R 을 분리하는 경계면의 중심 사이의 거리이다.

2.4 젖은/마른 하상 조건의 처리

본 연구에서 젖은/마른 하상 조건을 처리하기 위해 Toro(2001)가 제안한 해석적 기법을 적용하였다. HLLC 기법에서 만약 셀 L 에서의 수심인 h_L 이 0이라면 식 (21)로부터 파속이 계산되며, 반면 셀 R 에서의 수심인 h_R 이 0이라면 식 (22)로부터 파속이 계산된다.

$$S_L = u_R - 2\sqrt{gh_R}, S_R = u_R + \sqrt{gh_R}, S^* = S_L \text{ if } h_L = 0 \quad (21)$$

$$S_L = u_L - \sqrt{gh_L}, S_R = u_L + 2\sqrt{gh_L}, S^* = S_R \text{ if } h_R = 0 \quad (22)$$

위의 식 (21)과 (22)는 하상지형경사인 ∇ 의 항이 존재하지 않을 때 매우 유용하나 만약 존재할 경우 수치적으로 매우 불안정해 질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 0 보다 큰 최소 수심인 h_ϵ 을 적용하였다. 만약 어떤 셀에서의 수심이 h_ϵ 보다 작을 경우 마른 하상 조건과 유속이 0인 조건이 부여된다. 일반적으로 h_ϵ 을 적용범위는 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-10}$ m이며, 본 연구에서는 평탄하지 않은 불규칙한 하상에 대해 1.0×10^{-3} m를 적용하였다.

3. 수치모형의 검증

3.1 변화하는 하상지형을 통과하는 조석파(tidal wave) 흐름의 경우

본 모의에서는 보다 불규칙적으로 변화하는 하상지형에서의 흐름방향과 생성항 간의 수치적 균형을 검증하기 위해 Bermudez와 Vázquez(1994)에 의해 수행된 변화하는 하상지형에서의 1차원 조석파 흐름문제에 적용하였다. 하상경사가 변화하는 지형은 다음과 같은 식에 의해 결정된다.

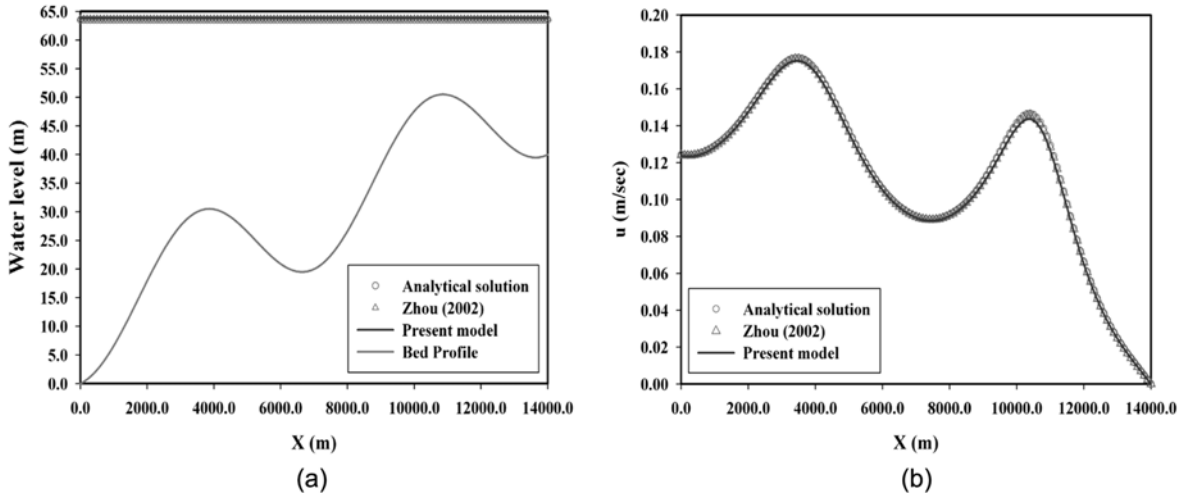


Fig. 3. Comparison between numerical and analytical solutions for (a) water level and (b) velocity at 9117.5 seconds.

$$H(x) = 50.5 - \frac{40x}{L} - 10 \sin \left[\pi \left(\frac{4x}{L} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (29)$$

여기서, $L=14000$ m인 하상의 길이이며, 하상 z_b 는 $H(0)-H(x)$ 로 구해진다. 초기조건과 경계조건은 다음과 같다.

$$\text{초기조건 : } h(x, 0) = H(x), u(x, 0) = 0 \quad (30)$$

$$\text{경계조건 : } h(0, t) = H(0) + 4 - 4 \sin \left[\pi \left(\frac{4t}{86400} + \frac{1}{2} \right) \right], u(L, t) = 0 \quad (31)$$

여기서, t 는 시간이다.

Bermudez와 Vázquez(1994)에 의해 제안된 수심과 유속에 대한 해석식은 각각 다음과 같다.

$$h(x, t) = H(x) + 4 - \sin \left[\pi \left(\frac{4t}{86400} + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (32)$$

$$u(x, t) = \frac{(x-14000)\pi}{5400h(x, t)} \cos \left[\pi \left(\frac{4t}{86400} + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (33)$$

적용된 절점의 수는 1000×2 개이며, 셀의 수는 999개이다. 모의시간간격은 0.1초이며, 총모의시간은 10000초이다. Fig. 3은 $t=9117.5$ 초에서 수위($h+z_b$)(a)와 유속(b)에 대한 해석해 그리고 본 연구에서 개발된 수치모형과 Zhou(2002)에 의해 개발된 Lattice Boltzmann 모형으로부터의 수치해를 비교한 것이며, 비교결과 본 연구에서 개발된 모형으로부터의 결과는 해석해에 매우 정확하게 일치하는 경향을 나타내었다.

3.2 L자 형태로 굴곡진 수로에서의 댐 붕괴파 문제

Soares Frazão 등(1998)은 CADAM(Concerted Action on Dam Break Modelling) 유럽연합 프로젝트의 일환으로 L자 형태로 굴곡진 수로에서의 댐 붕괴파의 전파특성을 분석하기 위해 수치모형실험을 수행하였다. Fig. 4에서와 같이 상류부의 저수조의 크기는 $2.44 \text{ m} \times 2.39 \text{ m}$ 이며, 수로의 총길이는 6.345 m이다. 또한 적용된 격자시스템은 7392개의 절점과 14285개의 셀로 이루어진 비구조적 삼각형 격자망이며, 수로

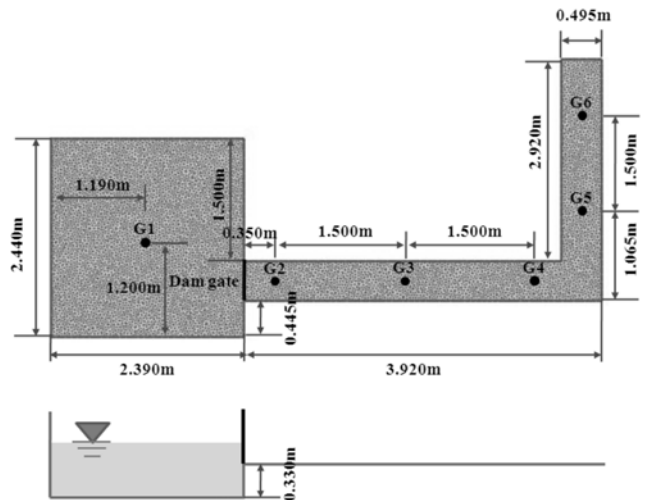


Fig. 4. Geometry of the reservoir and L-shaped channel.

바닥의 Manning 조도계수로 0.0095를 부여하였다. 초기조건으로 저수조의 수심은 0.53 m이며, 댐 하류부의 수로는 다른 바닥조건으로 0 m의 수심을 부여하였다. 또한 경계조건으로는 댐 하류부 끝단에는 transmissive 경계조건을 부여하였으며, 저수지와 수로측벽에 대해서는 닫힌 경계조건을 부여하였다.

Fig. 5는 6개 지점 중 4개 지점(G1, G2, G4, G5)에 대해 수치모형실험을 통해 측정된 수심결과와 Soares Frazão 등(1998)에 의해 개발된 2D Boltzmann 모형에 의한 수심결과 그리고 본 연구에서 개발된 모형에 의한 수심결과를 비교한 것이다. 비교결과 본 연구에서 개발된 모형에 의한 수심결과는 측정결과와 비교적 잘 일치하는 경향을 나타냈으며, 2D Boltzmann 모형에 의한 수심결과보다 전반적으로 관측결과에 더 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3.3 댐 하류부 단일 구조물에 영향을 미치는 댐 붕괴파 문제

Soares Frazão 등(2004)은 댐 하류부에 건물 등과 같은

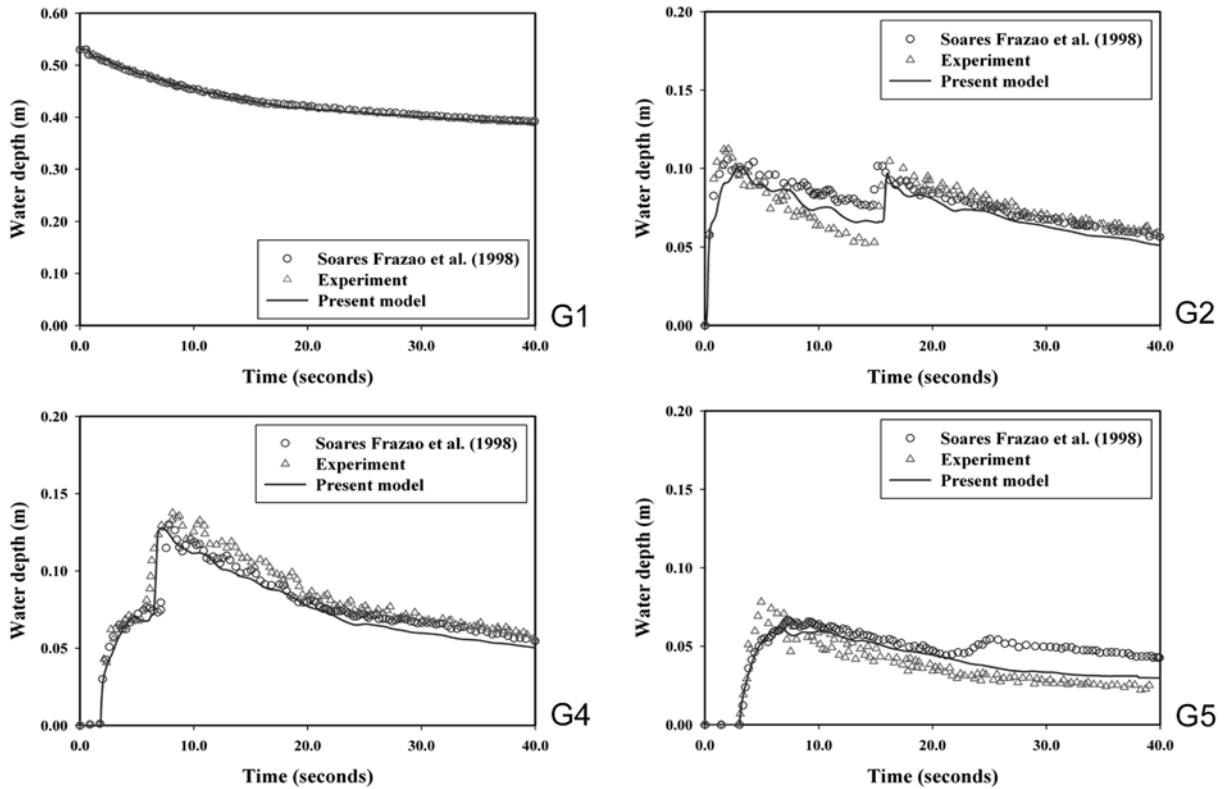


Fig. 5. Comparison between simulated and measured water depths at 6 gages.

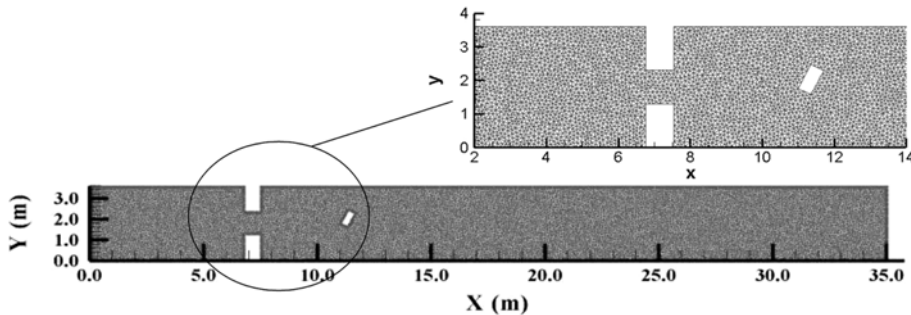


Fig. 6. Grid system for two-dimensional dam break simulation with a single isolated structure.

단일 구조물이 존재할 경우 댐 붕괴에 따른 흐름의 영향을 분석하기 위해 35.8m와 폭 3.6 m의 평탄한 하상을 가진 개수로에서 수리모형실험을 수행하였다. Fig. 6은 본 연구에서 적용된 비구조적 삼각형 격자시스템을 나타낸 것이며, 9869개의 절점과 19023의 셀로 이루어져 있다. 초기조건으로 댐 상류부에 0.4 m 그리고 댐 하류부에 0.1 m의 수심을 부여하였으며, 경계조건으로 상류경계와 수로측벽에는 닫힌 경계조건 그리고 하류경계에는 transmissive 경계조건을 부여하였다. 수로 바닥의 Manning 조도계수로 0.01을 부여하였다. CFL 조건으로 0.9를 적용하였으며, 총모의시간은 30 초이다.

Fig. 7은 모의경과시간 $t=1.0$, 5.0 그리고 10초일 때 단일 건물 주위에 대해 모의된 수심(a)과 속도($V = \sqrt{u^2 + v^2}$)(b) 그리고 측정된(c) 속도의 공간적 분포를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서처럼 $t=1.0$ 초일 때 수축부를 통과하는 댐 붕괴파는 하류방향으로 넓게 퍼지면서 전파되어 간다. $t=5$ 초일 때 댐

붕괴파는 건물의 전반부로부터 반사되어 수심이 급격히 증가하는 도수가 형성되며, 수로측벽으로부터 반사된 댐 붕괴파는 경사도수(oblique hydraulic jump)를 형성한다. $t=10$ 초일 때 건물에 의해 반사되어 형성된 도수는 상류방향으로 이동하며, 또한 Fig. 7(b)의 유선장(streamline field)에서 볼 수 있듯이 건물 후반부에서 흐름이 분리되어 회전류가 발생한다. Fig. 7(b)와 (c)는 시간에 따라 변화되는 모의된 속도장과 측정된 속도장을 비교한 것으로 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 6개의 관측지점 중 G1, G2, G4 그리고 G6 지점에서 관측된 수심결과와의 비교를 나타낸 것이다. 비교 결과 본 연구에서 개발된 모형에 의한 수심결과는 시간과 위치에 관계없이 관측자료와 매우 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 건물 주위에서 발생하는 경사도수(G2와 G4의 경우)와 같은 급변류에 대해 거의 정확하게 모의되는 것을 알 수 있다.

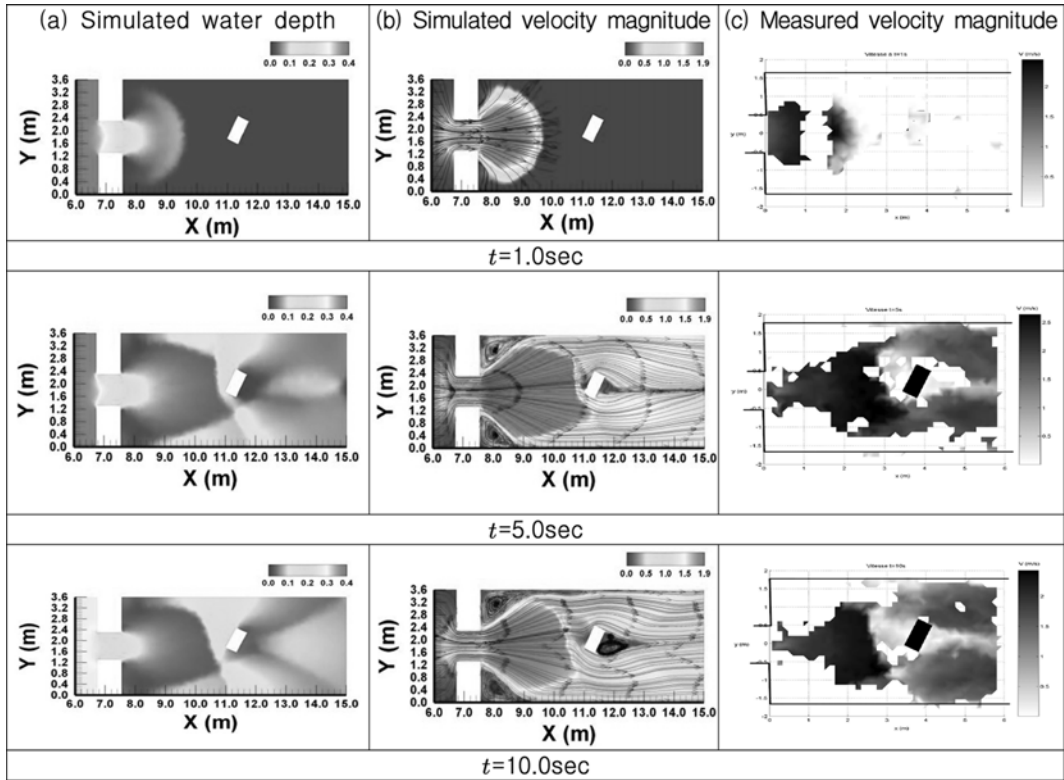


Fig. 7. Illustration of spatial distributions of (a)water depth, (b)simulated and (c)measured velocity fields for 1.0, 5.0 and 10.0 seconds

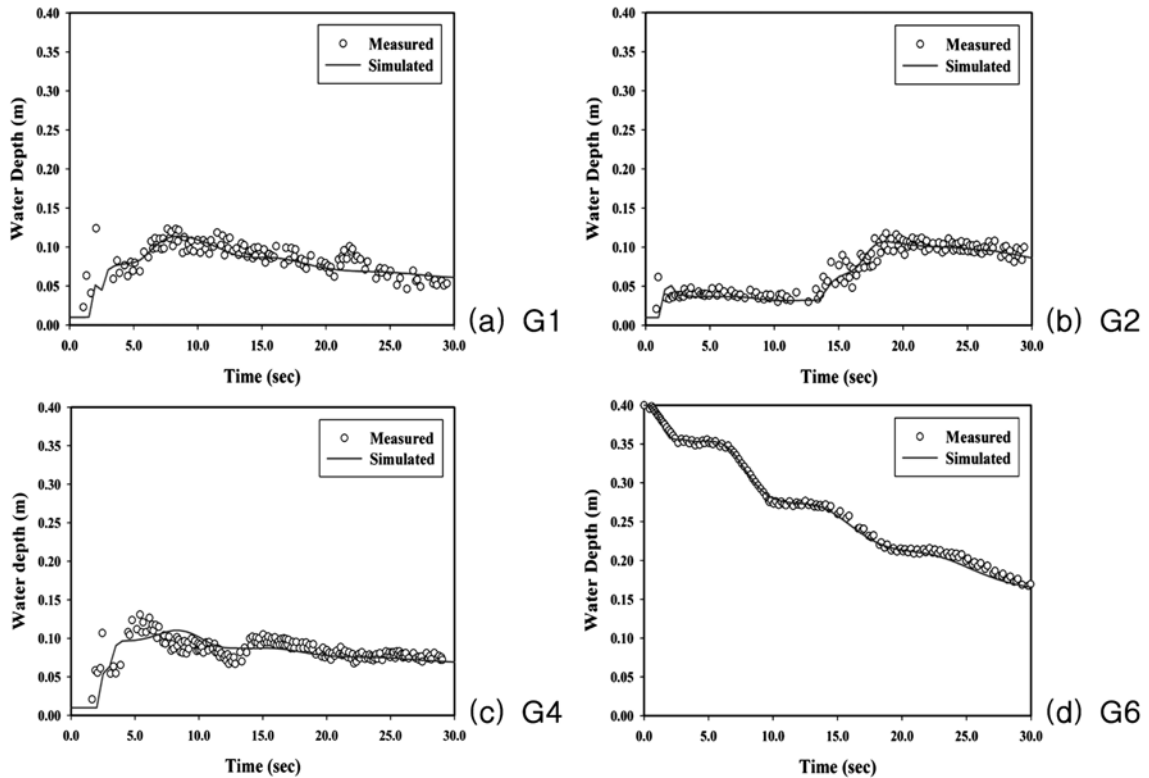


Fig. 8. Comparison of temporal variation of water depth measured and simulated at four different positions.

4. 결 론

본 연구에서는 도시지역을 관통하는 댐 붕괴로 인한 댐 붕괴파의 전파특성을 모의하고 분석하기 위한 선행 작업으로

수치모형의 개발과 검증을 수행하였다. 본 연구에서 개발된 수치모형은 2차원 천수방정식에 유한체적법을 적용한 것으로 비구조적 격자시스템에서의 점변류의 연속흐름 및 급변류의 불연속 흐름을 모의할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 실제

자연 하천의 불규칙한 하상지형으로 인한 수치진동(numerical oscillation)을 효과적으로 감소시키기 위한 기법으로 well-balanced HLLC 기법을 적용하였다.

본 연구에서 개발된 모형은 다양한 1차원과 2차원 문제에 대해 해석해, 수치해 그리고 수리모형실험을 통한 관측결과와의 비교를 통해 검증을 수행하였으며, 검증결과 해석해, 수치해 그리고 관측결과와 매우 잘 일치하였다. 본 논문의 후속편에서는 댐 붕괴로 인한 건물군으로 이루어진 도시지역 내에서의 댐 붕괴과 전파특성에 대한 수리모형실험 및 실제 자연하천에의 적용을 통한 모의 및 분석결과를 제시할 것이다.

감사의 글

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

참고문헌

김대홍, 조용식 (2005) 불규칙 지형에 적용가능한 쌍곡선형 천수방정식을 위한 개선표면경사법. **대한토목학회논문집**, 제25권, 제3B호, pp. 223-229.

김대홍, 조용식 (2004) HLLC Approximate Riemann Solver를 이용한 천수방정식 해석. **한국수자원학회 논문집**, 제37권, 제10호, pp. 845-855.

이길성, 이상태 (1998) 충격과 모의를 위한 이차원 유한체적 비정상 흐름 모형. **한국수자원학회 논문집**, 제31권, 제3호, pp. 279-290.

한건연, 김상호, 김병현, 최승용 (2006) 유한요소법에 의한 2차원 하천 흐름 모형의 개발. **한국수자원학회 학술발표 논문집**, pp. 425-429.

Akanbi, A. A., and Katopodes, N. D. (1988) Model for flood propagation on initially dry land. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No.7, pp. 689-706.

Alcrudo, F., and Garcia-Navarro, P. (1993) High-resolution Godunov-type scheme in finite volumes for the 2D shallow-water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, Vol. 16, pp. 489-505.

Anastasiou, K., and Chan, C.T. (1997) Solution of the 2D shallow water equations using the finite volume method on unstructured triangular meshes. *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, Vol. 16, pp. 489-505.

Billet, S.J. and Toro, E.F. (1997) On WAF-type schemes for multi-dimensional hyperbolic conservation laws. *Journal of Computational Physics*, Vol. 130, No. 1, pp. 1-24.

Cho, Y.S. (1995) *Numerical simulations of tsunami propagation and run-up*. Ph.D. thesis, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca. pp. 1-250.

Dhatt, G., Soulaïmani, A., Ouellet, Y. and Fortin, M. (1986) Development of new triangular elements for free surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, Vol. 6, pp. 895-911.

Engquist, B. and Osher, S. (1981) One sided difference approximations for nonlinear conservation laws. *Mathematics of Computation*, 36(154), pp. 321-351.

Soares Frazão, S., Noël, B. and Zech, Y. (2004) Experiments of dam-break flow in the presence of obstacles. *Proceedings of*

River Flow 2004 Conference, Naples, Italy, June 2004, Vol. 2, pp. 911-918.

Garcia, R. and Kahawitha, R. (1986) Numerical solution of the St. Venant equations with the MacCormack finite difference scheme. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 6, pp. 507-527.

Glaister, P. (1991) Solution of a two-dimensional dam break problem. *International Journal on Engineering Science*, Vol. 29, No. 11, pp. 1357-1362.

Godunov, S. (1959) difference scheme for numerical computation of discontinuous solution of hydrodynamic equations. *Math. Sbornik*, Vol. 43, pp. 271-306.

Harten, A., Lax, P. and van Leer, A. (1983) On upstream differencing and Godunov-type scheme for hyperbolic conservation laws. *Society for Industrial and Applied Mathematics, Review*, Vol. 25, No. 1, pp. 35-61.

Kim, D.H., Cho, Y.S. and Kim, W.G. (2004) Weighted Averaged Flux-Type Scheme for Shallow-Water Equations with Fractional Step Method. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130, No. 2, pp. 152-160.

Kim, H.J. (2008) *Numerical simulation of shallow-water flow using cut-cell system*, Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Korea, pp. 1-142.

LeVeque, R.L. (1998) Balancing source terms and flux gradient in high-resolution Godunov methods: the quasi-steady wave-propagation algorithm. *Journal of Computational Physics*, Vol. 146, pp. 346-365.

LeVeque, R.L. and George, D.L. (2007) High-resolution finite volume methods for the shallow water equations with bathymetry and dry states. *Advanced Numerical Models for Simulationg Tsunami Waves and Runup*, Advanced in Coastal and Ocean Engineering, Vol. 10, pp. 1-31.

Loukili, Y. and Soulaïmani, A. (2007) Numerical Tracking of Shallow Water Waves by the Unstructured Finite Volume WAF Approximation. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, Vol. 8, pp. 1-14.

MacCormack, R.W. and Paullay, A.J. (1972) Computational efficiency achieved by time splitting of finite difference operators. *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Paper*, pp. 52-64.

Osher, S. and Solomon, F. (1982) Upwind difference schemes for hyperbolic conservation laws. *Mathematics of Computation*, Vol. 38, No. 158, pp. 339-374.

Perthame, B. and Simeoni, C. (2001) A kinetic scheme for the Saint-Venant extended Kalman Filter for data assimilation in oceanography. *Calcolo*, Vol. 38, No. 4, pp. 201-231.

Roe, P.L. (1981) Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes. *Journal of Computational Physics*, 43(2), pp. 357-372.

Shewchuk, J.R. (1996) Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator. *Lect. Notes Comput. Sci.*, 1148, pp. 203-222.

Sleigh, P.A., Gaskell, P.H., Berzins, M. and Wright, N.G. (1998) An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries. *Computational Fluids*, Vol. 27, No. 4, pp. 479-508.

Steger, J.L. and Warming, R.F. (1981) Flux vector splitting of the inviscid gas dynamic equations with application to finite-difference methods. *Journal of Computational Physics*, Vol. 40, pp. 263-293.

Strang, G. (1968) On the construction and comparison of difference schemes. *SIAM, Numerical Analysis*, Vol. 5, pp. 506-517.

Toro, E.F. (2001) Shock-capturing methods for free-surface shallow

flows, Wiley, New York.

Yoon, T.H. and Kang, S.K. (2004) Finite Volume Model for Two-Dimensional Shallow Water Flows on Unstructured Grids. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 130, No. 7, pp. 678-688.

Zhao, D., Shen, H., Lai, J. and Tabios, G. (1996) Approximate Riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modelling. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 12, pp.

692-702.

Zoppou, C. and Roberts, S. (2003) Explicit schemes for dam-break simulations. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 129, No. 1, pp. 11-34.

◎ 논문접수일 : 09년 09월 01일

◎ 심사의뢰일 : 09년 09월 03일

◎ 심사완료일 : 09년 10월 26일