

KU-RLMS 모형의 잠김-드러남 기법 적용성 평가

Applicability Test of a Wetting and Drying Scheme for KU-RLMS Model

이남주

경성대학교 공과대학 토목공학과

Nam-Joo Lee (njlee@ks.ac.kr)

요약

이 연구에서는 수심적분된 이차원 비정상 수치모형인 KU-RLMS 모형에 잠김/드러남 기법을 도입하고, 추가된 WAD 기법의 적용성 평가를 수행하였다. 이 모형에 사용된 WAD 기법은 수학적으로는 다소 불완전하지만 수치적으로는 손쉬운 방법으로써, 각 시간 단계에서 잠긴 격자 또는 드러난 격자를 시험하고, 각 격자의 경계에서 플럭스에 대한 개폐 조건을 적용하는 방법을 사용하였다. 모형에 도입한 잠김/드러남 처리 과정의 정확도 검증은 포물형 수조에 대한 해석해와 수치모형의 결과를 비교하는 방법을 사용하였다. 수치해와 해석해의 위상차가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 진폭은 조금씩 감소하는 현상이 나타났다. KU-RLMS 흐름모형의 잠김/드러남 처리 과정을 시험하기 위한 지형은 선형경사수로, 수평계단수로, 저류공간수로 선택하였다. 세 가지 시험수로에 대한 수치모의 결과는 Balzano[4]와 Oey[15]의 수치모의 결과와 유사한 거동을 보임을 확인할 수 있었다.

■ 중심어 : | 잠김/드러남 | KU-RLMS | 수치기법 | 창조/낙조 |

Abstract

A wetting and drying(WAD) scheme was introduced in KU-RLMS which is a two-dimensional depth-averaged unsteady model, and applicability tests for wetting and drying were performed in this study. WAD scheme in the model uses a mathematically less elegant but numerically easier method to test for dry or wet cells at each time step, then to apply blocking conditions for fluxes at cells' interfaces. WAD scheme introduced in the model was verified against an analytical solution in a frictionless parabolic basin. It was found that there occurs a little phase difference between analytical and numerical solution and little decrease of amplitude of numerical result. I used three test channels having a linear sloping bottom topography, a stepwise bottom topography, and a stepwise, a bumpy and bowl-shaped bottom topography. It could be found that numerical simulation results in test channels have similar shapes of Balzano[4] and Oey[15].

■ keyword : | WAD(wetting and drying) | KU-RLMS | Numerical Scheme | Flood/Ebb |

I. 서론

조석현상이 나타나는 연안 해역에서 잠김-드러남

(wetting and drying; WAD)은 일반적이고 중요한 물리적 현상이다. 조간대를 포함한 해역의 흐름을 수치모의할 때 WAD는 필수적인 요소이며, POM(Princeton

* 이 연구는 2002학년도 경성대학교의 지원(연구년)에 의하여 연구되었음.

접수번호 : #100802-004

접수일자 : 2010년 08월 02일

심사완료일 : 2011년 04월 19일

교신저자 : 이남주, e-mail : njlee@ks.ac.kr

Ocean Model)을 비롯한 많은 해양 모형에서 다양한 WAD 기법이 사용되고 있다. 따라서 평면 이차원 및 삼차원 모형에 대한 WAD 기법의 개발 및 적용은 전통적으로 해양 흐름 모형 개발자들[5-7][9][12][15][19]이 주도하여 왔다. Balzano[4]는 평면 이차원 천수방정식을 사용하는 모형들에 적용된 13개의 WAD 기법의 적용성 및 정확도에 대한 비교 연구를 수행한 바 있다.

고정된 격자계에서 잠김/드러남을 수학적으로 모형화할 때 두 가지 어려움이 있다: 1) 불규칙한 지표면 위의 얇은 수막이 나타나는 상황에 적용되는 적합한 마찰 법칙에 대한 불충분한 지식에 의한 물리적인 부분[10][17], 2) 고정된 격자에 기초한 계산 과정에서 질량 불균형, 수치 진동 또는 불안정이 나타나는 현상에 관련된 수치적인 부분[12][19]. 반면에, 특히 환경 문제의 경우와 같은 장기 모의를 수행할 경우, 가변격자법(adaptive grid method)도 역시 계산시간에 따른 어려움이 존재한다[4]. 해양 모형에 적용되는 대부분의 WAD 기법의 기본 개념은 큰 차이가 없으며, WAD 기법들에 대한 포괄적인 요약 문헌으로는 [20]이나 [4]의 논문 등이 있다.

지금까지 WAD 기법이 주로 적용된 대표적인 분야는 해안 조간대에서의 흐름 및 수질 모델링이었지만, 하천 및 하구역의 흐름, 토사이동, 수질 모델링 분야에 있어서도 그 필요성이 점차 증가하고 있다. 최근 생태 하천으로의 복원 및 보전에 관한 관심이 커짐에 따라, 홍수터 흐름, 점사주 이동, 하안 안정, 하도 변화, 제내지 범람 해석 등에 대한 수치해석에 있어 WAD 기법은 필요성이 증가하고 있는 상황이다.

이 연구는 하상변동모형에 WAD 기법을 도입함으로써 하천 홍수터와 사주 등의 미지형 변화를 비정상 흐름으로 해석하고, 이 결과를 미지형 변화 예측에 활용함으로써 하상변동 예측의 정확도를 제고할 목적으로 수행하였다. 이 연구에서는 평면 이차원 비정상 하상변동 예측모형인 KU-RLMS 모형[2][3]의 흐름 해석을 위해 WAD 기법을 도입하였다. 도입된 WAD 기법은 Thaker(1981)의 해석해를 이용하여 검증하였으며, [15]의 연구 결과와의 비교를 통해 적용성을 분석하였다.

II. KU-RLMS 흐름 모형

1. 지배방정식

KU-RLMS 모형은 1996년에 하상변동 예측을 위해 개발된 이후 다양하게 적용된 바 있는 모형이다. KU-RLMS 모형의 흐름 계산에는 다음과 같은 수심적분된 천수방정식을 사용한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hU) + \frac{\partial}{\partial y}(hV) = 0 \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t}(hU) + \frac{\partial}{\partial x}(hU^2) + \frac{\partial}{\partial y}(hUV) \\ &= FhV - gh \frac{\partial}{\partial x}(h + z_b) + \frac{1}{\rho}(\tau_{w1} - \tau_{b1}) \\ &+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{11}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{12}) \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t}(hV) + \frac{\partial}{\partial x}(hUV) + \frac{\partial}{\partial y}(hV^2) \\ &= -FhU - gh \frac{\partial}{\partial y}(h + z_b) + \frac{1}{\rho}(\tau_{w2} - \tau_{b2}) \\ &+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{12}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{22}) \end{aligned} \quad (1c)$$

여기서, x, y 는 수평면상의 공간좌표, t 는 시간, F 는 Coriolis 상수, g 는 중력가속도, h 는 수심, z_b 는 하상고, ρ 는 물의 밀도이며, U 와 V 는 방향의 수심평균 유속 성분, τ_{b1} 과 τ_{b2} 는 각각 방향의 바닥 전단응력, τ_{w1} 과 τ_{w2} 는 각각 방향의 바람에 의한 응력, T_{11}, T_{12}, T_{22} 는 유효응력이다. 유체의 난류유동에 기인한 난류 확산항은 Ponce and Yabusaki[16] 방법을 사용하여 유효전단응력을 간접적으로 고려한다.

2. 직교곡선격자 생성

격자생성은 다음과 같은 타원형 격자생성 Poisson 방정식을 사용한다.

$$\begin{aligned} \xi_{xx} + \xi_{yy} &= P(\xi, \eta) \\ \eta_{xx} + \eta_{yy} &= Q(\xi, \eta) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ξ 와 η 는 계산좌표축이며, P 와 Q 는 제어함수이다. 식 (2)를 좌표변환한 변환결과는 다음과 같다

[8].

$$g_{22}x_{\xi\xi} - 2g_{12}x_{\xi\eta} + g_{11}x_{\eta\eta} = -J^2(\mathbf{P}x_{\xi} + \mathbf{Q}x_{\eta}) \quad (3a)$$

$$g_{22}y_{\xi\xi} - 2g_{12}y_{\xi\eta} + g_{11}y_{\eta\eta} = -J^2(\mathbf{P}y_{\xi} + \mathbf{Q}y_{\eta}) \quad (3b)$$

여기서, g_{11}, g_{12}, g_{22} 는 메트릭 텐서 \mathbf{g} 의 성분이며, J 는 변환 자코비안이다. 유연성과 직교성을 고려하기 위해 다음과 같은 Ryskin-Leal[18]의 제어함수를 사용한다.

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\sqrt{g_{11}g_{22}}} \frac{\partial f}{\partial \xi}, \quad \mathbf{Q} = \frac{1}{\sqrt{g_{11}g_{22}}} \frac{\partial f}{\partial \eta} \quad (4)$$

여기서, f 는 비틀림함수(distortion function)로 다음과 같다.

$$f = \sqrt{g_{22}/g_{11}}$$

Poisson 방정식 (4)에 직교성을 도입하면 직교격자생성 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sqrt{g_{11}g_{22}} \text{DEL}^2 x &= 0 \\ \sqrt{g_{11}g_{22}} \text{DEL}^2 y &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 2차원 covariant Laplace 연산자 ∇^2 은 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla^2 \equiv \frac{1}{\sqrt{g_{11}g_{22}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(f \frac{\partial}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(f^{-1} \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \right\}$$

직교격자생성 지배방정식의 해는 point SOR 기법을 사용하여 구하였다.

3. 지배방정식 좌표변환

실제영역(t, x, y)과 계산영역(τ, ξ, η)의 좌표축 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$t = t(\tau), \quad x = x(\tau, \xi, \eta), \quad y = y(\tau, \xi, \eta) \quad (6)$$

여기서, τ 는 계산영역의 시간축이다. 직교곡선 좌표계

에서 정의되는 변수를 위첨자 \sim 를 사용하여 표시하고 경계밀착좌표계로 지배방정식을 좌표변환하면 다음과 같다[1].

연속방정식

$$\frac{\partial h}{\partial \tau} + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} (\sqrt{g_{22}} h \tilde{U}) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} (\sqrt{g_{11}} h \tilde{V}) = 0 \quad (7)$$

ξ 와 η 방향 운동량방정식

$$\frac{\partial (h \tilde{U})}{\partial \tau} + \Phi_3 \tilde{U}^\xi + \Psi_3 \tilde{V}^\eta \quad (8a)$$

$$= Fh \tilde{V} - \frac{gh}{\sqrt{g_{11}}} \frac{\partial (h + z_b)}{\partial \xi} + \frac{\tau_{w4} - \tau_{b4}}{\rho} + \tilde{T}_4$$

$$\frac{\partial (h \tilde{V})}{\partial \tau} + \Phi_4 \tilde{U}^\xi + \Psi_4 \tilde{V}^\eta$$

$$= -Fh \tilde{U} - \frac{gh}{\sqrt{g_{22}}} \frac{\partial (h + z_b)}{\partial \eta} + \frac{\tau_{w5} - \tau_{b5}}{\rho} + \tilde{T}_5$$

(8b)

여기서, 좌표변환된 ξ 와 η 방향의 이류가속도항은 각각 다음과 같다.

$$\Phi_3 \tilde{U}^\xi = \frac{x_\xi}{J\sqrt{g_{11}}} \left\{ \left(y_\eta \tilde{U} - \frac{\sqrt{g_{22}}}{\sqrt{g_{11}}} y_\xi \tilde{V} \right) h \tilde{U} \right\}_\xi$$

$$- \frac{y_\xi}{J\sqrt{g_{11}}} \left\{ \left(x_\eta \tilde{U} - \frac{\sqrt{g_{22}}}{\sqrt{g_{11}}} x_\xi \tilde{V} \right) h \tilde{U} \right\}_\xi$$

$$\Phi_4 \tilde{U}^\xi = \frac{x_\eta}{J\sqrt{g_{22}}} \left\{ \left(y_\eta \tilde{U} - \frac{\sqrt{g_{22}}}{\sqrt{g_{11}}} y_\xi \tilde{V} \right) h \tilde{U} \right\}_\xi$$

$$- \frac{y_\eta}{J\sqrt{g_{22}}} \left\{ \left(x_\eta \tilde{U} - \frac{\sqrt{g_{22}}}{\sqrt{g_{11}}} x_\xi \tilde{V} \right) h \tilde{U} \right\}_\xi$$

$$\Psi_3 \tilde{V}^\eta = \frac{x_\xi}{J\sqrt{g_{11}}} \left\{ \left(\frac{\sqrt{g_{11}}}{\sqrt{g_{22}}} y_\eta \tilde{U} - y_\xi \tilde{V} \right) h \tilde{V} \right\}_\eta$$

$$- \frac{y_\xi}{J\sqrt{g_{11}}} \left\{ \left(\frac{\sqrt{g_{11}}}{\sqrt{g_{22}}} x_\eta \tilde{U} - x_\xi \tilde{V} \right) h \tilde{V} \right\}_\eta$$

$$\Psi_4 \tilde{V}^\eta = \frac{x_\eta}{J\sqrt{g_{22}}} \left\{ \left(\frac{\sqrt{g_{11}}}{\sqrt{g_{22}}} y_\eta \tilde{U} - y_\xi \tilde{V} \right) h \tilde{V} \right\}_\eta$$

$$- \frac{y_\eta}{J\sqrt{g_{22}}} \left\{ \left(\frac{\sqrt{g_{11}}}{\sqrt{g_{22}}} x_\eta \tilde{U} - x_\xi \tilde{V} \right) h \tilde{V} \right\}_\eta$$

좌표변환된 ξ 와 η 방향의 전단응력항은 각각 다음과 같다.

$$\tilde{\tau}_{b4} = \frac{\rho g \tilde{U}}{C_z^2} \sqrt{\tilde{U}^2 + \tilde{V}^2}, \quad \tilde{\tau}_{b5} = \frac{\rho g \tilde{V}}{C_z^2} \sqrt{\tilde{U}^2 + \tilde{V}^2}$$

$$\tilde{\tau}_{w4} = \rho_a C_D \tilde{W}_4 \tilde{W}, \quad \tilde{\tau}_{w5} = \rho_a C_D \tilde{W}_5 \tilde{W}$$

여기서, 하첨자 4와 5는 ξ 와 η 방향 성분임을 의미한다. 좌표변환한 지배방정식을 [그림 1]에서 도시한 것과 같은 Arakawa-C 형태의 엇갈린 격자계(staggered grid)에서 Leendertse 방법[11]을 이용하여 유한차분 하였으며, ADI 방법으로 해를 구한다.

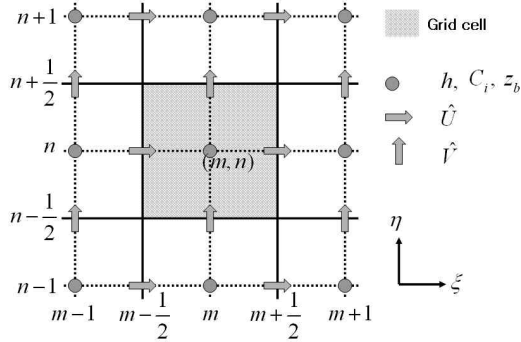


그림 1. Finite difference grid cell.

4. WAD 기법 도입

잠김/드러남을 논의할 때 지형과 표고를 분명히 정의할 필요가 있으며, [그림 2]는 수위 변화에 따른 잠김/드러남 개념도이다. 수로의 바닥표고가 최저수위보다 낮은 지역은 그림에서와 같이 항상 수심이 영보다 크지만, 최저수위에서 최고수위 사이의 영역(WAD 영역)은 수위변화에 따라 수심이 음수가 될 수 있다. 그림 2를 보면 쉽게 다음과 같은 조건을 생각할 수 있다.

$$h \leq 0; (x, y, t) \text{에서 드러남일 경우} \quad (9a)$$

$$h > 0; (x, y, t) \text{에서 잠김일 경우} \quad (9b)$$

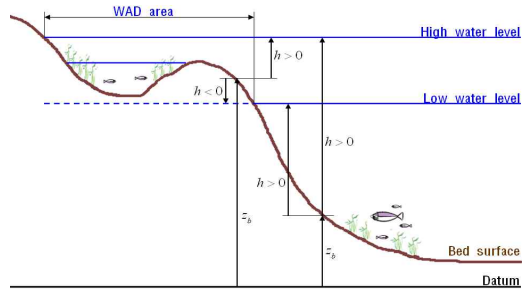


그림 2. Definitions of variables used in WAD scheme.

WAD를 처리하는 방법 중에 많이 사용되는 방법은 두 가지가 있다. 하나는 Lynch and Gray의 방법[13]처럼, 각 시간에서 잠김 또는 드러남으로 바뀐 셀의 경계를 바꾸는 방법이다. 다른 하나는 수학적으로는 다소 불완전하지만 수치적으로는 손쉬운 방법인 각 시간 단계에서 식 (11)을 사용하여 잠긴 격자 또는 드러난 격자를 시험하고, 각 격자의 경계에서 플럭스에 대한 개폐 조건을 적용하는 것이다[5-7][9]. 이 논문에서는 KU-RLMS의 흐름모형에 두번째 방법을 사용하여 WAD를 처리하는 기법을 개발하였다.

KU-RLMS의 흐름모형에는 잠김/드러남을 처리하는 기법으로써 각 계산격자에서 아래의 과정을 수행하는 연산을 내장하고 있다.

Step-1 수심 격자에 대하여 잠김/드러남을 판별한다.

1-1) 잠김일 경우($h_{m,n} > WAD$): Step-4로 진행

1-2) 드러남일 경우($h_{m,n} \leq WAD$): Step-2로 진행

Step-2 동서남북 네 방향으로 잠김 상태인 격자가 있는지 검색한다.

2-1) 잠김 상태인 격자가 없을 경우: Step-4로 진행

2-2) 잠김 상태인 격자가 있을 경우: Step-3로 진행

Step-3 상하좌우의 격자 중 잠김 상태인 격자의 평균 수위를 이용하여 수심을 다시 지정한다.

$$h_{m,n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tilde{h}_i + \tilde{z}_{bi}) - z_{b,m,n} \quad (10)$$

Step-4 수심 $h_{m,n}$ 을 사용하여 유속점의 수심을 지정한다.

$$h_{m+1/2,n} = -z_{b_{m+1/2,n}} + \frac{h_{m,n} + z_{b_{m,n}} + h_{m+1,n} + z_{b_{m+1,n}}}{2} \quad (11a)$$

$$h_{m,n+1/2} = -z_{b_{m,n+1/2}} + \frac{h_{m,n} + z_{b_{m,n}} + h_{m,n+1} + z_{b_{m,n+1}}}{2} \quad (11b)$$

Step-5 드러남($h_{m,n} < WAD$)인 모든 격자점에서 유속을 영으로 설정한다.

이상의 잠김/드러남 처리 과정에서 WAD 는 드러남 상태가 되는 최소수심(이 연구에서는 0.01 m를 사용), $\tilde{h}_i, \tilde{z}_{b_i}$ 는 각각 잠김 상태인 인접 격자의 수심과 하상고, N 은 잠김 상태인 인접 격자의 개수이다.

III. 수치모형의 검증

KU-RLMS 모형에 도입한 잠김/드러남 처리 과정의 정확도 검증은 포물형 수조에 대한 Thacker(1981)의 해석해와 수치모형의 결과를 비교하는 방법을 사용하였다. Thacker[21]는 마찰이 없는 포물형 수조에 불록하게 유체가 정지상태(초기조건; [그림 3] 참조)로 있다가 중력에 의해 유체가 무한진동하는 현상을 나타내는 해석해를 제시하였다. 수조 중심점의 표고가 $z_0 (= -h_0)$ 일 때, 포물형 수조의 바닥표고는 식 (14)와 같이 표현되며, 등고선은 원형이 된다.

$$z = -h_0 \left(1 - R^2/a^2\right) \quad (12)$$

여기서, R 은 반지름, a 는 수조에서 표고가 영인 원의 반지름이다. Coriolis를 고려하지 않을 경우 Thacker[21]의 수위에 대한 해석해는 식 (15)와 같다.

$$\eta = h_0 \frac{(1 - A^2)^{1/2}}{1 - A \cos \omega t} - h_0 - h_0 \frac{r^2}{a^2} \left\{ \frac{1 - A^2}{(1 - A \cos \omega t)^2} - 1 \right\} \quad (13)$$

여기서, 초기상태의 해안선의 반지름을 r_0 라 하면 무차원 매개변수 A 와 진동수 ω 는 다음과 같다.

$$A = (a^4 - r_0^4)/(a^4 + r_0^4) \quad (14)$$

$$\omega = (1/a)(8gh_0)^{1/2} \quad (15)$$

초기상태의 수위는 식 (15)에서 시간을 영으로 설정하여 구할 수 있다. 원형의 해안선의 반경은 다음과 같다.

$$r = a \left[\frac{1 - A \cos \omega t}{(1 - A^2)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (16)$$

KU-RLMS 모형에 도입한 잠김/드러남 처리 과정의 정확도 검증에 사용한 기하학적 조건은 아래와 같다.

$$h_0 = 50.0 \text{ m}$$

$$a = 430.620 \text{ m}$$

$$\omega = 1.45 \times 10^{-4} \text{ rad/sec}$$

$$A = 0.0392$$

계산에 사용한 수치격자 및 시간간격은 아래와 같다.

$$\Delta x = \Delta y = 2379.12 \text{ m}$$

$$\Delta t = 150.0 \text{ sec}$$

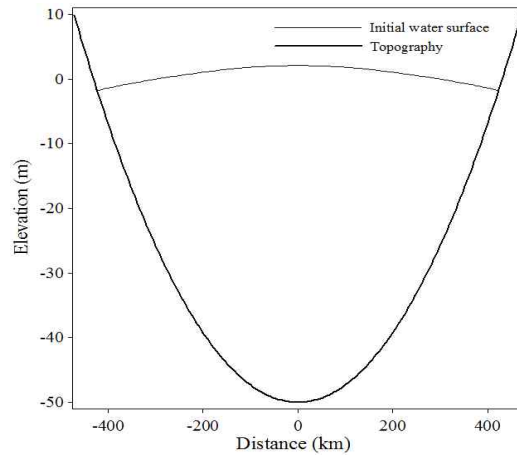


그림 3. Topography and initial water surface

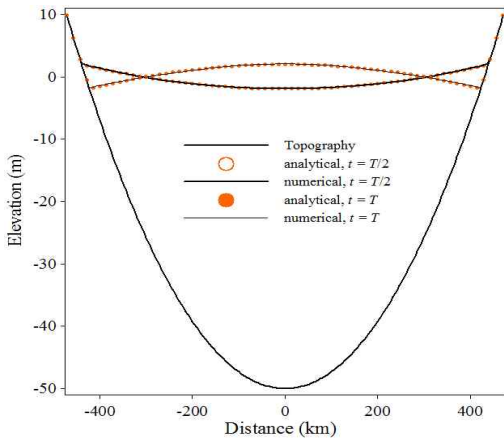


그림 4. Comparison of calculated and analytical free surface

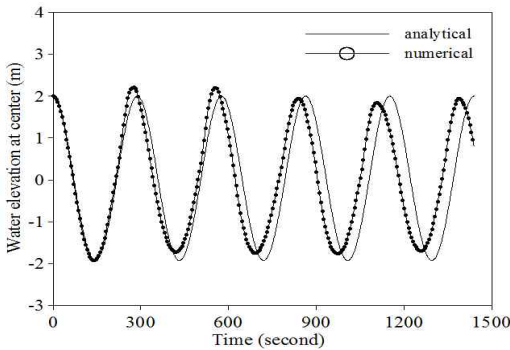


그림 5. Time history of water surface at center

[그림 4]는 초기상태로부터 한 주기(T)동안 시간에 따른 자유수면의 변화를 Thacker[21]의 해석해와 개발한 모형의 계산결과를 비교하여 도시한 것이다. 중앙의 수위가 하강하는 반주기 동안과 상승하는 반주기 후에 정확해와 수치해가 거의 일치하는 것으로 나타났다. [그림 5]는 포물형 수조의 중앙에서 수위와 해석해의 시간에 따른 변화를 비교하여 도시한 것이다. 수위가 처음 하강하는 반주기 동안은 해석해와 상당히 잘 일치하는 결과를 보이지만 상승하는 반주기 이후에는 진폭이 증가하는 현상과 수치해의 주기가 해석해보다 짧아지는 현상이 나타났다. 전체적으로 수치해와 해석해의 위상차가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 진폭은 조금씩 감소하는 현상이 나타나고 있다. 이런 현상에 대

해서 Marche and Bonneton은 직각좌표계에 대한 적용성 관점에서 방사 대칭을 표현할 수 있는 구조적 격자를 구축할 수 없기 때문에 수치모형에서 방사형 영역에 대한 Thacker[21]의 해석해를 처리하는 것은 아주 어려운 문제임을 지적[14]한 바 있다.

IV. 수치 모의 실험

KU-RLMS 흐름모형의 잠김/드러남 처리 과정을 시험하기 위한 지형은 선형경사수로, 수평계단수로, 저류공간수로를 선택하였다(그림 6 참조). KU-RLMS 흐름모형은 사류를 모의할 수 있는 기능을 가지고 있지 않기 때문에 사류가 발생하지 않는 지형으로 구성하였다. 적용영역은 $20,000 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ 이며, 계산 격자간격은 50 m 로 격자의 수는 x 방향으로는 400개, y 방향으로는 3개를 사용하였다. 계산시간간격은 1.0초, Manning 계수는 0.02, Ponce-Yabusaki 상수는 0.1을 사용하였다. 초기조건으로써 수위는 2 m, 유속은 0 m/s를 사용하였다.

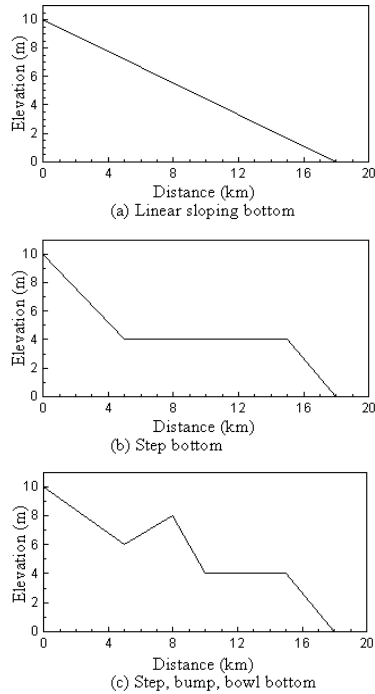


그림 6. Test channel topography.

1. 선형경사수로

선형경사수로의 지형은 그림 3(a)와 같고, 경계조건은 다음과 같다.

$$H(t) = 2.0 + D_0 |\sin(\omega t)| \quad ; \text{ at } x = 20 \text{ km} \tag{14}$$

여기서, D_0 는 8 m, ω 는 $\pi / (0.5 \text{ day})$ 를 사용하였으며, 0.5 day 동안 수치모의하였다.

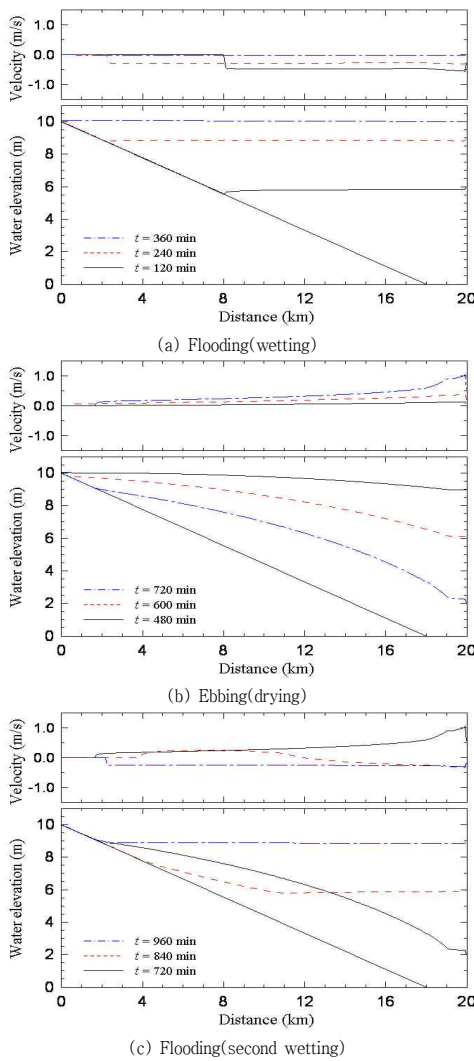


그림 7. WAD simulation in a channel with linear sloping bottom topography.

[그림 7](a)는 선형경사수로에서 창조 흐름(잠김 과정)에 대한 수위 및 유속 변화를 2시간 간격으로 도시한 것이다. 창조시 수위는 수평에 가깝게 높아지는 현상을 보이고 있다. 고조시($t = 360 \text{ min}$)에 달한 경계에서 수위가 하류경계의 수위(10 m)보다 0.076 m 높아지는 현상은 운동량이 압력수두로 바뀌기 때문에 발생하는 현상이다. [그림 7](b)는 낙조 흐름(드러남 과정)에 대한 모의결과를 도시한 것으로 창조 흐름과는 달리 큰 수면 경사를 보이고 있다. 드러나는 상태인 격자 주변(예를 들면, 수심이 0.1 m인 격자)에서의 유속을 Manning 공식으로 계산하면 약 0.25 m/s 이하다 된다. 따라서 6시간 동안 수심이 0.1 m 이하인 상태로 바뀌는 격자의 길이는 약 5 km가 된다. 따라서 드러남 상태로 바뀌는 영역은 5 km보다 훨씬 짧으며, [그림 7](b)에서 보는 바와 같은 창조보다 수면이 천천히 하강하는 것은 물리적으로 타당한 현상으로 생각할 수 있다. [그림 7](c)는 두 번째 창조 흐름을 보여주는 그림이다. 창조 시작 2시간 후($t = 840 \text{ min}$)의 상태를 보면, 드러남 영역은 약 4 km까지 확장되었으며, 하류쪽의 수위 상승으로 인해 약 9 km 지점에서 유속의 방향이 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 선형경사수로에서 잠김/드러남 수치시험은 Balzano[4]와 Oey[15] 등이 수행한 바 있으며, 이들의 결과와 비교할 때 상당히 유사한, 합리적인 거동을 보임을 확인할 수 있었다.

2. 수평계단수로

수평계단수로의 지형은 [그림 6](b)와 같고 경계조건은 식 (14)를 사용하였다. [그림 8](a)는 수평계단수로에서 창조 흐름에 대한 수위 및 유속 변화를 특징이 나타나는 시간에서 도시한 것이다. 창조시 수평부분에서 해일 형태의 흐름이 진행하며, 잠김 영역이 전파되는 속도는 약 2 m/s로 나타났으며, 이는 Oey[15]와 유사한 결과를 보이고 있다. [그림 8](b)는 낙조에 대한 수위 및 유속 변화를 도시한 것이며, [그림 8](c)는 두 번째 창조 흐름을 보여주는 그림이다. 첫 창조시 수평부를 통과($t = 155 \text{ min}$)한 이후의 흐름 특징은 선형경사수로와 같은 경향을 보인다. 수평계단수로에 대한 수위 및 유속 형태 역시 Oey[15]의 결과와 흡사한 경향을 보이고 있다.

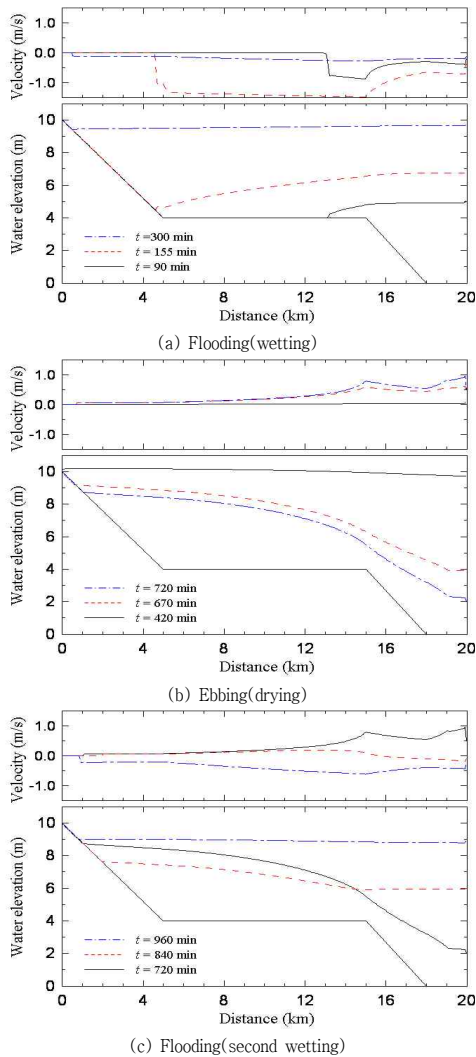


그림 8. WAD simulation in a stepwise, a bumpy and bowl-shaped bottom topography.

3. 저류공간수로

저류공간수로의 지형은 [그림 6](c)와 같고 경계조건은 식 (14)를 사용하였다. [그림 9](a)는 저류공간수로에서 창조 흐름에 대한 수위 및 유속 변화를 특징이 나타나는 시간에서 도시한 것이다. 창조시 230분에서 해일 형태의 흐름이 아래로 진행하고 있는 형태를 보이고 있으며, 이 부분의 바닥 경사는 1/1,500으로 흐름은 상

류 상태로 모의되었다. Oey[15]의 경우는 급경사 부분을 포함시켜서 사류 흐름까지 모의를 수행하였으나, 창조시 움푹 파인 지형(bowl) 내부에서의 흐름은 비현실적으로 예측되었다. [그림 9](b)는 낙조에 대한 수위 및 유속 변화를 도시한 것이며, [그림 9](c)는 두 번째 창조 경우를 도시한 것이다. [그림 9](d)는 다음 식과 같은 경계조건을 사용한 수치해석 결과를 도시한 것이다.

$$H(t) = \begin{cases} 2.0 + D_0 |\sin(\omega t)|; & \omega t \leq \pi \\ 2.0; & \omega t > \pi \end{cases} \quad (17)$$

낙조 이후 충분한 시간이 지난 후($t = 18,000$ min)의 경우 저류공간 내에 물이 고여는 현상이 나타나고 있으며, 수평부는 수심과 유속이 작아서 아직도 하류 방향으로 흐름이 나타나고 있음을 볼 수 있다.

V. 결론

연안 해역에서 잠김-드러남은 일반적이고 중요한 물리적 현상이며, 조간대를 포함한 해역의 흐름을 수치모의할 때 WAD는 필수적인 요소이다. 하천 및 하구역의 흐름, 토사이동, 수질 모델링 분야에 있어서도 그 필요성이 점차 증가하고 있다. 최근 생태하천으로의 복원 및 보전에 관한 관심이 커짐에 따라, 홍수터 흐름, 점사주 이동, 하안 안정, 하도 변화, 제내지 범람 해석 등에 대한 수치해석에 있어 WAD 기법은 필요성이 증가하고 있다. 이 연구는 하상변동모형에 WAD 기법을 도입하여 홍수터와 사주 등의 미지형 변화를 비정상 흐름으로 해석하고, 이 결과를 미지형 변화 예측에 활용함으로써 하상변동 예측의 정확도를 제고할 목적으로 수행하였다. 이 연구에서는 평면 이차원 비정상 하상변동 예측모형인 KU-RLMS 모형의 흐름 해석을 위해 WAD 기법을 도입하였다.

KU-RLMS 모형에 도입한 잠김-드러남 처리 과정의 정확도 검증은 포물형 수조에 대한 Thacker[21]의 해석해와 수치모형의 결과를 비교하는 방법을 사용하였다. 한 주기 동안 자유수면의 변화는 Thacker[21]의 해석해

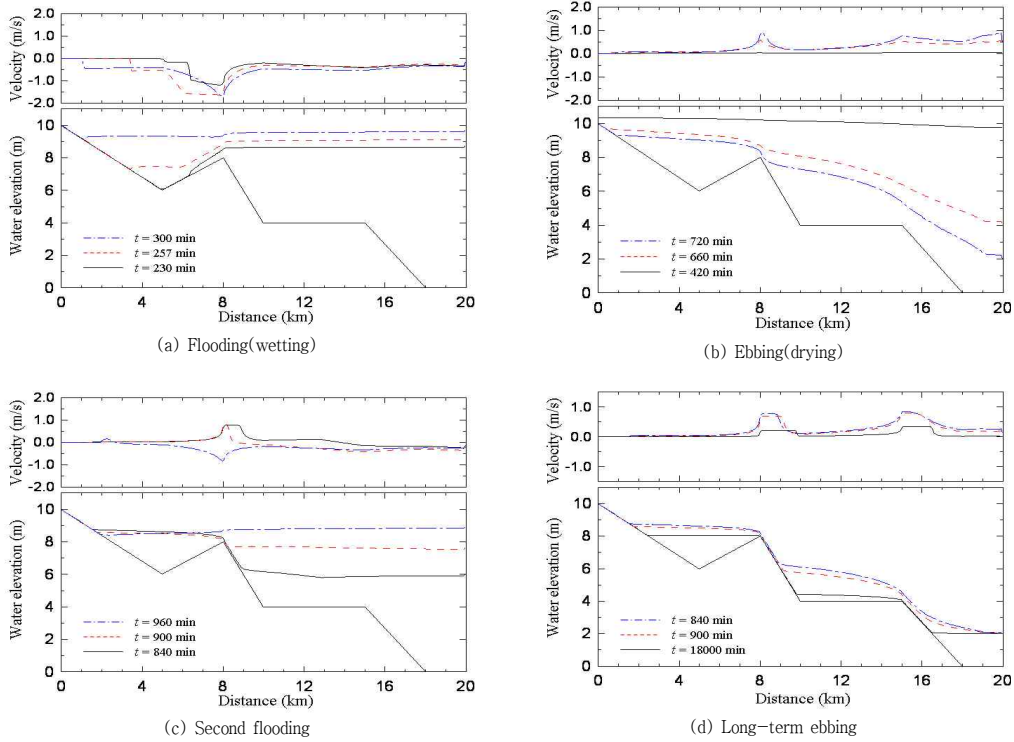


그림 9. WAD simulation in a channel with a step, a bump and a bowl bottom topography.

와 수치해가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그렇지만, 수치해와 해석해의 위상차가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 진폭은 조금씩 감소하는 현상이 나타났다. KU-RLMS 흐름모형의 잠김/드러남 처리 과정을 시험하기 위한 지형은 선형경사수로, 수평계단수로, 저류공간수로를 선택하였다. 세 가지 시험수로에 대한 수치모의 결과는 Balzano[4]와 Oey[15]의 수치모의 결과와 상당히 유사한 거동을 보임을 확인할 수 있었다. 이 논문은 WAD 기법의 개선이 아니라, 기존의 유사이동모형의 적용성을 제고하기 위해 WAD 기법 도입을 통한 유사이동모형 개선을 목적으로 하였으며, 향후 흐름모형 분야에서 WAD 기법의 정확도 개선을 위한 연구가 추가로 필요하다.

참고 문헌

- [1] 이남주, “좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형의 개발 및 적용”, 공학박사 학위논문, 서울대학교, 1966.
- [2] 이남주, 이길성, “좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형(I) - 모형의 개발”, 대한토목학회논문집, 제18권, 제II-5호, pp.407-412, 1998a.
- [3] 이남주, 이길성, “좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형(II) - 모형의 적용”, 대한토목학회논문집, 제18권, 제II-5호, pp.423-436, 1998b.
- [4] A. Balzano, “Evaluation of methods for numerical simulation of wetting and drying in shallow water flow models,” Coastal Engineering, 34, pp.83-107, 1998.
- [5] V. Casulli and R. Cheng, “Semi-implicit finite

- difference methods for three-dimensional shallow water flow," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 15, pp.629-648, 1992.
- [6] R. T. Cheng, V. Casulli, and J. W. Gartner, "Tidal, residual, intertidal mudflat(TRIM) model and its application to SanFrancisco Bay, California," *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 36, pp.235-280, 1993.
- [7] R. A. Flather and K. P. Hubbert, "Tide and surge models for shallow-water-Morecambe Bay revisited," In: Davies, A. M.(Ed.), *Modeling Marine Systems*, Vol.1. CRC Press, pp.135-166, 1990.
- [8] K. A. Hoffmann and S. T. Chiang, (Computational Fluid Dynamics for Engineers, Vol. I, Engineering Education System, 1993.
- [9] Z. G. Ji, M. R. Morton, and J. M. Hamrick, "Wetting and drying simulation of estuarine processes," *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 53, pp.683-700, 2001.
- [10] Z. Kowalik and T. S. Murty, *Numerical Modeling of Ocean Dynamics*. World Scientific, Singapore, 1993.
- [11] J. J. Leendertse, *Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation*, U. S. Air Force Project, RAND Memorandum RM 5294, The Rand Cooperation, 1967.
- [12] J. J. Leendertse, *Aspects of SIMSYS, A System for Two-Dimensional Flow Computations*. RAND Publication R-3572-USGS, 1987.
- [13] D. R. Lynch and W. G. Gray, "Finite element simulation of shallow water problems with moving boundaries," *Finite Elements in Water Resources*. Pentech Press, London, pp.2.23-2.42, 1978.
- [14] F. Marche and P. Bonneton, "A simple and efficient well-balanced scheme for 2D bore propagation and run-up over a sloping beach," *Proc. 30th Int. Conf. on Coastal Eng.*, 1, pp.998-1010, 2006.
- [15] L. Y. Oey, "A wetting and drying scheme for POM," *Ocean Modelling*, 9, pp.133-150, 2005.
- [16] V. M. Ponce and S. B. Yabusaki, "Modeling circulation in depth-averaged flow," *J. of the Hydraulics Div. ASCE*, Vol.107, No.HY11, pp.1501-1518, 1981.
- [17] R. O. Reid and R. E. Whitaker, "Wind-driven flow of water influenced by a canopy," *J. Waterways, Harbors Coastal Eng. Division, ASCE*, 102, WW1, pp.61-77, 1976.
- [18] G. Ryskin and L. G. Leal, "Orthogonal mapping," *J. of Computational Physics*, Vol.50, pp.71-100, 1983.
- [19] G. S. Stelling, *On the construction of computational methods for shallow water equations*. Rijkswaterstaat communication No. 35, 1984.
- [20] G. S. Stelling, A. K. Wiersma, and J. B. T. M. Willemse, "Practical aspects of accurate tidal computations," *J. of Hyd. Eng.*, ASCE, No.112, Vol.9, pp.802-817, 1986.
- [21] W. C. Thacker, "Some exact solutions to the nonlinear shallow-water wave equations," *J. Fluid Mechanics* 107, pp.499-508, 1981.

저 자 소 개

이 남 주 (Nam-Joo Lee)

정회원



- 1987년 2월 : 연세대학교 공과대학 토목공학과(공학사)
 - 1989년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 토목전공(공학석사)
 - 1993년 8월 : 서울대학교 대학원 토목공학과 토목전공(공학박사)
 - 1997년 3월 ~ 현재 : 경성대학교 토목공학과 교수
- <관심분야> : 하천공학, 수치모델링