

자연하천에서 마름/젖음 처리를 위한 격자재구성 기법의 개발 (II): 모형의 적용 및 비교·검토

Development of Grid Reconstruction Method to Simulate Drying/Wetting in Natural Rivers (II): Model Application and Comparison

최 승 용* / 김 상 호** / 황 재 홍*** / 한 건 연****

Choi, Seung Yong / Kim, Sang Ho / Hwang, Jae Hong / Han, Kun Yeun

Abstract

The objective of this study is to examine validation of Grid Reconstruction Method, which is developed to simulate drying/wetting in complex natural rivers with wetting and drying domain areas. To verify application of the developed model, the model was applied to natural rivers with wetting and drying domain areas such as Han river and Nakdong river. The simulation results have shown good agreements with observed data and the results for the developed model were more accurate and improved stability of numerical computation than those of RMA-2 model. If the analysis of contaminant advection-diffusion and sediment transport are performed with the study results, the results can be effectively applied to river flow analysis and ecological hydraulics.

Keywords : wetting and drying, Grid Reconstruction Method, finite element model, RMA-2

요 지

본 연구의 목적은 마름/젖음 영역을 가지는 복잡한 자연하천에 대해 마름/젖음 처리를 위해 개발된 격자재구성 기법의 적용성을 검토하는 것이다. 자연하천에 대한 모형의 적용성과 검증을 위해 개발된 모형을 마름/젖음 영역을 갖는 한강 구간과 낙동강 구간에 적용하였다. 모의 결과를 실측치와 비교한 결과 실측치와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었고 상용 모형인 RMA-2 모형의 모의결과와 비교해서도 안정되고 정확한 해를 주는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구결과를 오염물질의 이송-확산해석, 토사이송해석 등과 연계되어 해석된다면 하천에서의 흐름 해석 및 생태 수리 분야에 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 마름/젖음, 격자재구성 기법, 유한요소모형, RMA-2

* 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 박사과정수료
Ph.D. Candidate, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea

** 교신저자, 상지대학교 건설시스템공학과 부교수
Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sangji Univ., Wonjusi Gangwondo, 220-702, Korea
(e-mail: kimsh@sangji.ac.kr)

*** 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 석사과정
Master Course, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea

**** 경북대학교 공과대학 건축·토목공학부 교수
Professor, School of Archi. & Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu, 702-701, Korea

1. 서 론

흐름에 대한 2차원 모의를 위해 대상하도는 일반적으로 가상하도와 실제 자연하도에 대한 적용으로 구분할 수 있다. 가상하도의 경우 경계면에 연직벽 개념을 적용하여 모의를 수행하지만, 자연하도의 경우 불규칙하게 형성된 하도모양을 따라 경계면은 한 단면 내에서도 수면 아랫부분과 윗부분이 공존하게 된다. 수면의 위치가 일정할 경우는 크게 문제가 되지 않지만, 흐름 해석이 요구되는 많은 경우에 수면의 위치가 지속적으로 변하게 된다.

자연에서의 유체흐름은 대부분 이동경계문제들이며, 유한요소법(FEM)이나 유한체적법(FVM)과 같은 2차원 흐름해석모형이 가지고 있는 가장 큰 난점이라고 할 수 있다. 수면의 상·하 이동과 같은 이동경계로 인해 발생하는 대상구간의 마름과 젖음 과정을 나타내기 위한 기법들이 개발되는 동안 기법에 대한 평가와 기법간의 비교는 자연적 환경의 복잡성과 양질의 검증자료 부족으로 인해 어려움을 겪고 있다.

유한요소모형에서 마름/젖음을 모의하기 위해 다양한 방법이 적용되고 있지만, 일반적으로 계산격자가 고정되었는지 아니면 이동하는지에 따라 분류될 수 있다. 이동격자법은 계산망의 격자를 수면경계와 일치시키기 위해 이동망(moving mesh)을 사용함으로써 마름 그리고 젖음문제와 관련된 수많은 문제들을 효과적으로 제거하게 된다(Lynch and Gray, 1978). 이 방법은 수면선의 위치를 정확하게 예측하여 수치적 해를 제시하는 반면에 계산상의 부담과 수치적 불안정을 유발할 수 있다. Gopalakrishnan (1989) 그리고 Roig and Evans *et al.* (1993)이 이동격자법을 이용하여 단순 응용 예에 적용하였지만, 이 기법은 이동격자법과 관련된 계산상의 불이익이 제시되었고 또한 지형이 불규칙한 자연하천에 적용이 어려운 점이 있다. 따라서 대부분의 모형들은 수면선에서 발생하는 동수역학적 거동의 불연속이 고정된 요소들 내에서 다루어지게 되는 고정격자법을 사용하였다. 이 방법은 요소와 절점들이 해로부터 일시적으로 제거되지만, 요소와 절점의 위치가 변하지 않는 고정망을 사용한다. 따라서 이동격자법보다 더 안정적이고 단순하기 때문에 널리 사용되고 있다(Balzano, 1998).

이 외에도 자연하천에서의 마름/젖음 처리를 위해서 Benque *et al.* (1982)은 ADI (Alternating Direction Implicit)를 이용한 유한차분법을 개발하였으나 이 기법은 유속과 수위가 급격히 변하는 경우에는 부정확한 해를 도출하였다(Kawahara and Umetsu, 1986).

Samuels (1985)는 홍수터에서의 부정류 해석을 위해서 유한요소기법을 이용하였고, Katopodes (1987)는 가상제내지 상에서 제방과피에 대한 영향을 검토하였고, Froehlich (1990)는 댐 파괴로 인한 홍수파 해석을 위하여 Hermitian 식을 이용하여 해석하였으나, 이 또한 실제 하천에 적용하는 데에는 한계를 가지고 있었다. Jenkins and Keller (1990)는 홍수터를 갖는 가상하도의 흐름 모의를 위해 마름영역에서 요소망을 이동시킴으로써 계산을 수행하는 유한차분기법을 개발하였다. 그러나 이 기법은 정형격자만을 사용해야 하며, 불규칙적인 지형을 갖는 자연하도에서는 적용에 제한을 받는다(Ghanem, 1995). Alam and Bhuiyan (1995)는 collocation 기법에 의한 마름하도로의 댐 파괴류 해석을 실시하였으나, 수치 불안정의 문제로 인해 단순하도의 적용에 국한되어 있다.

자연하천에서 유한요소법에 대해 마름/젖음 처리를 위한 국내 연구는 거의 이루어지지 않았으며 현재 국내에서 마름/젖음을 갖는 실제하천에서의 흐름 모의는 미국 EMS-I사의 전·후처리과정을 GUI 시스템으로 통합한 SMS (Surface Water Modeling System)의 RMA-2 모형이 주로 사용되고 있다. 하지만, 마름/젖음 모의를 위해서는 몇 가지 매개변수에 대한 값을 선정해야 하는데, 이러한 매개변수들은 명확한 물리적 의미를 가지고 있지 않기 때문에 매개변수에 대한 검토가 선행되지 않고서는 사용자가 적정 매개변수 값을 선정하는 것은 매우 어려우며 신중히 선택해야 하는 문제가 따른다. 마름/젖음 처리과정과 홍수터 흐름에 대한 적용시 적절한 경계조건과 매개변수의 선정은 복잡한 유한요소망에 대해서 해의 안정성을 개선하기 위해서 중요한 사항이다.

이에 본 연구에서는 고정격자망을 이용하여 마름/젖음을 처리하기 위해 개발된 격자재구성 기법(Grid Reconstruction Method)을 자연하천에 적용하고 이를 기존 상용모형인 SMS의 RMA-2 모형 및 실측값과 비교하여 본 개발모형의 적용성 및 우수성을 검증하였다.

2. 기존 모형과의 마름/젖음 기법 비교

본 연구에서 개발된 모형의 적용성을 살펴보기 위하여 비교·검토의 대상 모형으로 현재 실무에서 널리 사용되고 있는 SMS의 RMA-2 모형을 선정하였으며, 마름/젖음 기법과 관련된 내용을 비교·검토 하였다.

2.1 격자재구성 기법

마름/젖음을 처리하기 위해 본 연구에서 개발된 격자재구성 기법은 요소의 중심이 마름 상태가 되었을 경우

에 해당요소를 제거하여 새로운 지형경계를 가지게 한 후 실행이 가능하도록 하는 기법으로 계산 시간 동안에 수위의 상승 및 하강 속도를 계산하여 마른 요소에 대해서는 요소를 제거하고 젖은 요소에 대해서는 격자를 자동으로 재생성하는 기법이다. 이 기법은 기존의 마름/젖음 기법에서는 모의를 위한 매개변수를 도입하고 또한 지배방정식을 변형해야 하는 다소 복잡한 과정을 거쳐 마름/젖음을 처리한 반면 본 연구의 개발 기법은 어떠한 매개변수의 도입이나 처리 없이 시간의 변화에 따른 마름/젖음 현상을 좀 더 실제적으로 표현할 수 있도록 개발되었다.

본 연구에서 사용된 격자재구성 기법의 적용과정은 다음과 같다. 먼저, 하천의 수위 상승 및 하강속도를 고려하여 마른 절점과 젖은 절점을 결정한 후 마른 절점이 포함된 요소를 찾아 전체 요소망에서 제거하고, 새로이 젖게 된 절점을 포함하는 요소는 전체 요소망에 포함시킨다. 새로이 형성된 요소망에 최적의 매트릭스 크기와 계산수행시간을 위해 매트릭스의 bandwidth가 최소가 되도록 renumbering 과정을 수행한다. 다음은

요소망 내 모든 절점에 대해 내부절점과 외부경계절점을 자동으로 판단하고, 외부경계절점의 경우 자유도(Degree of Freedom)를 자동으로 계산하여 모형의 입력자료로 사용된다. 이 때 적용 가능한 요소형태는 삼각형, 사각형 및 혼합요소에 대해 적용가능하며, 선형요소와 2차 요소에 대해서도 적용가능하다. Fig. 1은 사각-선형요소로 구성된 요소망에 경계면과 내부에 마른 절점이 있을 경우에 대해 격자재구성 기법을 적용한 결과를 나타내고 있다. Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 마른 절점이 포함된 요소가 제거된 후 나머지 요소들에 대해 절점 번호가 적절하게 부여된 것을 확인할 수 있다. Fig. 2에서는 요소제거 후 renumbering을 하기 전과 후의 절점 매트릭스를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 renumbering 후의 bandwidth가 19에서 7로 줄어든 것을 확인할 수 있다. Fig. 3은 삼각형과 사각형이 함께 있는 혼합된 2차 요소에 대한 요소제거 및 renumbering 전과 후의 결과를 나타내고 있으며, Fig. 4는 renumbering에 따라 매트릭스의 bandwidth가 51에서 16으로 줄어들어든 결과를 나타내고 있다.

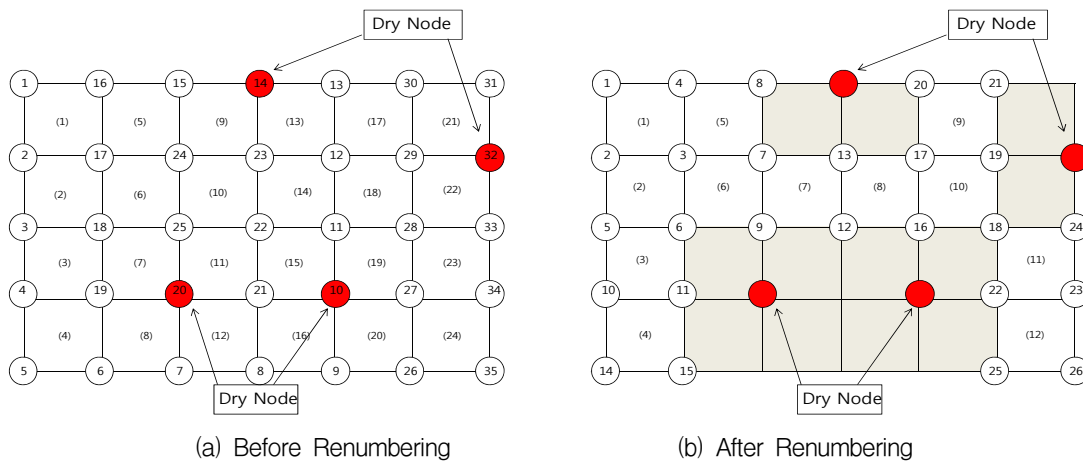


Fig. 1. Renumbering for Dry Nodes and Elements(Case-1)



(a) Original Matrix (b) Final Matrix

Fig. 2. Bandwidth of Matrix(Case-1)

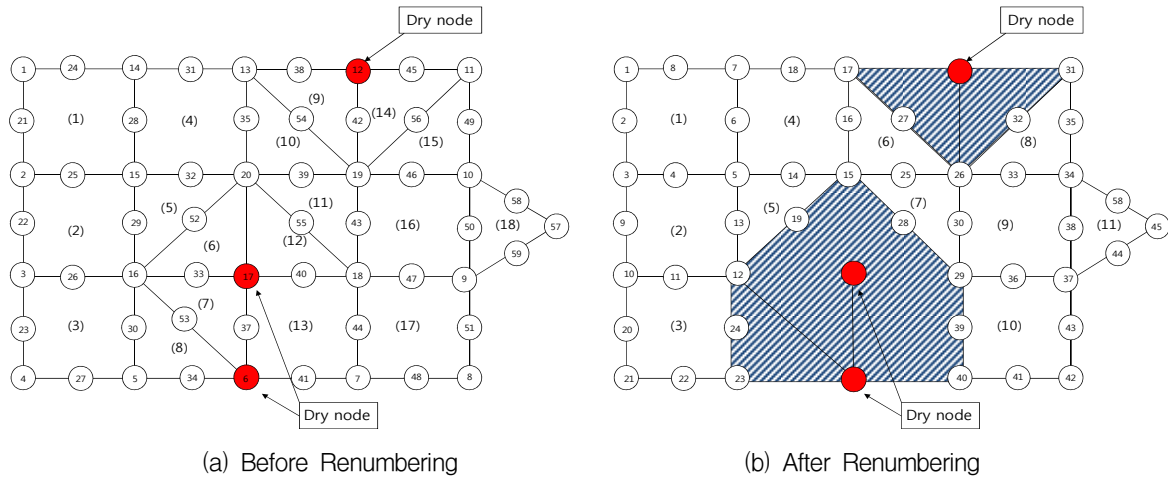


Fig. 3. Renumbering for Dry Nodes and Elements(Case-2)

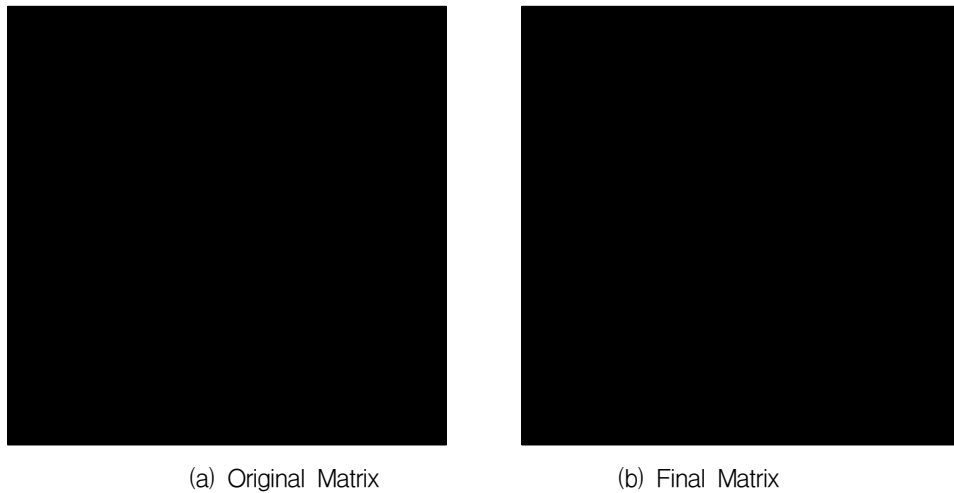


Fig. 4. Bandwidth of Matrix(Case-2)

2.2 RMA-2 모형의 MP 기법

RMA-2 모형에서는 대상구간에 대한 마름/젖음 처리를 위해 완전히 범람한 흐름 영역에 대해 모의시간 동안 마른 요소, 젖은 요소, 부분적으로 젖은 요소의 질량 플럭스를 산정하기 위해서 개발된 MP (Marsh Porosity) 기법을 주요 해석기법으로 사용하고 있다.

요소 상에서 흐름을 모의하는 방정식은 전체 요소상에 분포되어 있는 유체체적이 부분적으로 젖은 요소에서의 실제 유체체적과 같도록 하는 영역계수(σ)를 포함한다. 천이 요소는 완전히 침수되어 나타나지만 영역계수(σ)는 유체체적을 조정하는데 사용되기 때문에 질량은 보존되게 된다. 마름/젖음 상태에서 천이영역의 요소에 대한 영역 계수(σ)는 각각의 시간간격 동안 부분적으로 젖은 요소에 남아 있는 물의 실제 체적을 모의 수행하기 위한 크기로서 정의되고, σ 는 요소에서 물이 제거될 때 '0'의 값을 가지게 된다.

이 기법의 경우 두 가지 수치적 난점이 나타나는데,

첫 번째는 '0'의 수심을 가진 절점들이 유한요소 연속체로 합쳐질 때 해의 안정성이 줄어드는 것이고, 두 번째는 수위 h 가 바닥 z_0 와 같을 때 영역계수(σ)가 불연속이라는 것이다. 결과적으로 미분항 $\partial\sigma/\partial h$ 는 그 지점에서 정의되지 않으며, 부가적인 수치적 난점을 초래한다. 하지만, 이러한 문제들은 σ 의 최소값 σ_{\min} 을 정의함으로써 해결될 수 있는데, 이것은 작은 양의 값이며, 거의 마름 조건을 나타낸다(Roig, 1989).

마른 절점은 표고 a_0 가 인접한 절점의 수면표고 z_{us} 보다 클 때로 정의된다. 절대표고 a_{abs} 는 절점에서의 측정된 표고 a_0 와 다른 어떤 절점에서의 하상표고보다도 낮은 곳에 위치한다. 이때 a_{abs} 에서 수면표고까지의 수직거리는 절대표고 \bar{h} 이고 $\bar{h} = z_{us} - a_{abs}$ 이다. 또한 a_0 에서 수면표고까지의 거리를 관측표고 h 라 하고 $h = z_{us} - a_0$ 이다.

$\kappa(z)$ 를 젖은 면적에서 절점 k 와 관련된 $a_{abs} \leq z < \infty$ 인 표고 z 의 함수로 표현하면 Eq. (1)과 같다.

$$\begin{aligned} z \leq a_0, \quad k(z) &= 0 \\ z > a_0, \quad k(z) &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

한편 유효깊이 h_0 는 Eq. (2)와 같이 정의될 수 있다.

$$h_0(z_{us}) = \int_{a_{obs}}^{z_{us}} k(z) dz \quad (2)$$

함수 $k(z)$ 는 수위에 의해서 결정되지만, z_{us} 는 흐름에 따라 급격하게 변화한다. 이는 절점 k 의 수심 적분되는 흐름영역에서 역학적으로 표현되는 영역계수를 정의하는데 유용하다.

$$\alpha(z_{us}) = \frac{h_0}{h} = \frac{h_0(z_{us})}{(z_{us} - a_{obs})} \quad (3)$$

본 알고리즘에서는 수치적인 불안정성을 피하기 위해서 두 개의 가정이 적용되었다. 첫 번째는 반드시 마른 절점보다 아래에 있는 각각의 절점에 물의 최소깊이를 지정하는 것이다. 계산에 의해 최소 규정수심보다 아래로 떨어진 요소와 관련되어 있는 모든 절점의 수심은 적어도 최소수심을 유지하거나 부분적으로 젖은 요소와 관련되어 있는 절점은 강제로 보장하는 것이다. 두 번째는 절점 k 의 흐름범위는 급작스러운 전환보다는 수면표고의 작은 범위에 걸친 젖은 부분에서 마른 부분의 변화를 추측할 수 있다. 이는 절점 k 에서의 하상표고가 대표 표고이므로 물리적으로 뒷받침될 수 있으나 절점 주변의 sub-grid scale의 수심변화는 설명할 수 없다(Roig, 1989).

3. 실제하천에 대한 모형의 적용

자연하천에 대한 본 연구모형의 적용성을 검토하기

위해 마름/젖음 영역을 가지는 한강유역에 대해 2008년 7월 홍수사상과 2002년 태풍 ‘루사’ 때의 홍수사상 그리고 낙동강 구간에 대해 2006년 태풍 ‘애위니아’ 때의 홍수사상을 선정하여 모의를 실시하고 실측치 및 범용 2차원 모형인 RMA-2 모형과 비교하였다.

3.1. 한강에 대한 적용

한강에 대한 적용구간은 한강 본류의 중랑천 합류부 직하류부터 안양천 합류전까지로 선정하였다. 하도 내부에 노들섬, 밤섬, 선유도 등의 높은 지형에 의해 자연적으로 하천 유량에 의한 마름/젖음 현상이 발생하기 때문에 본 연구에서 개발한 모형의 적용성을 검토하기에 타당한 구간으로 판단되었다. Fig. 5(a)는 대상지역의 평면도를 나타내고 있으며 모의를 위한 2차원 격자의 구성을 위해 한강하천정비기본계획(2002)의 측량 자료를 이용하여 Arc GIS 및 SMS 8.1을 이용하여 Fig. 5(b)와 같은 요소망을 구성하였다. 모의에 사용된 절점 수는 4,262개, 요소 수는 3,995개, 경계 절점의 수는 557개로 구성하였다.

3.1.1 2008년 7월 사상

자연하천에서의 흐름해석을 위해서는 지형적인 특성을 정확하게 반영하여야 하며, 상·하류단 경계조건에 대한 신뢰할 수 있는 자료를 선정하여야 한다. 대상구간에서 상·하류단 경계조건 선정을 위해 2008년 7월 30일 13시부터 24시까지 한강 상류부인 팔당댐에서부터 하류부인 행주대교 지점까지를 대상구간으로 HEC-RAS 모의를 수행하고, 모의결과를 실측치와 검증한 후 중랑천 직하류부터 안양천 합류점에 해당하는 상·하류단 경계자료를 HEC-RAS 모의결과로부터 추출하였다. Fig. 6은 HEC-RAS 모의에 사용된 상·하류단 경계조건이며, Fig. 7은 팔당대교, 잠수교, 한강대

(a) Study Area

(b) Computation Element Mesh

Fig. 5. Computation Element Mesh for Han River

Fig. 6. Boundary Conditions for HEC-RAS

대교 지점에서 실측수위와 HEC-RAS 모의 결과를 도시한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 모의결과와 실측수위가 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

대상유역에 대한 초기유속은 '0'인 정적계산 조건으로부터 시작하였으며 Fig. 8은 HEC-RAS 모의를 통해 계산된 결과 중 상·하류단 경계에 해당하는 유량과 수위를 나타내고 있다. 2차원 모의를 위한 계산 시간 간격은 1시간, 총 모의시간은 11시간으로 하였으며, 기존 모형과의 비교를 위해 같은 경계조건을 이용하여 RMA-2 모형을 추가적으로 모의하였다.

Fig. 9는 잠수교와 한강대교 수위관측소 지점에서의 실측수위를 본 연구에서 개발된 모형과 RMA-2 모형의 모의 결과와 비교하기 위해 도시한 그림으로 전체 모의 시간에 대해 본 연구에서 개발된 모형이 RMA-2 모형의 모의결과보다 실측수위와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

본 연구 모형의 결과를 정량적으로 판단하기 위해 실측 수위가 있는 한강대교와 잠수교 지점에 대해 선행

Fig. 7. Comparison of the Computed Solution and Observed Data

연구에서 사용된 오차를 계산하여 나타내었다.

Table 1은 수위 관측값과 모형결과와의 오차를 나타내고 있는데 표에서 보는 바와 같이 본 연구모형이 RMA-2 모형에 비해 오차가 상당히 작게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 8. Boundary Conditions for 2-D Model

(a) Jamsu Bridge

(b) Hangang Bridge

Fig. 9. Comparison of Computed and Measured Stage Hydrograph

Table 1. Error of Computed Solution and Measured Data

	$L_1 Error$	$L_2 Error$	$L_\infty Error$	RMS Error	Mean Error	Site
This Model	7.8×10^{-3}	9.5×10^{-2}	1.64×10^{-2}	3.00×10^{-2}	3.64×10^{-2}	Jamsu Bridge
RMA-2	9.35×10^{-2}	9.39×10^{-1}	1.164×10^{-1}	4.00×10^{-1}	4.02×10^{-1}	
This Model	4.1×10^{-3}	5.9×10^{-3}	1.35×10^{-2}	2.13×10^{-2}	1.41×10^{-2}	Hangang Bridge
RMA-2	1.147×10^{-1}	1.147×10^{-1}	1.224×10^{-1}	4.699×10^{-1}	4.701×10^{-1}	

Figs. 10 and 11은 본 연구에서 개발된 모형과 RMA-2 모형에 대해 모의 시작 후 5시간 때의 유속 벡터도와 등수심도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 개발된 모형의 경우 한강 본류 중심부에 위치한 노들섬, 밤섬늘, 선유도의 높은 하상고를 가지는 부분에서 수심과 유속이 '0'으로 계산되어 마름현상이 합리적으로 재현되고 있었으나 RMA-2 모형의 경우 MP 기법을 통해 마름 조건을 처리하고 있어 하천수위보다 높은 지형에 대해서도 수심과 유속이 '0'으로 계산되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 또한 하도 외측부의 높은 지형에서도 본 연구모형의 경우는 수심과 유속이 '0'으로 계산됨으로써 마름 현상이 명확히 나타나는 반면 RMA-2 모형의 경우에는 수심과 유

속이 존재함으로 인해 높은 지형에서의 마름에 대한 흐름양상을 합리적으로 재현하지 못하고 있음을 확인할 수 있었다.

마름이 나타나는 부근에서 모의결과를 좀 더 자세하게 살펴보기 위해 Fig. 12와 같이 확대하여 도시하였다. Fig. 12(a)는 본 연구개발 모형의 결과로 마름이 나타나는 구간의 좌·우측과 내부의 섬에서 유속이 '0'으로 나타났으나 RMA-2 모형의 경우에는 Fig. 12(b)에서 보는 바와 같이 마름이 나타나는 구간에서도 유속이 '0'으로 계산되지 않고 흐름이 존재하는 것으로 나타났다. 이를 통해 본 연구개발 모형이 RMA-2 모형보다 완전 마름구간에서 마름현상을 합리적으로 재현하고 있음을 확인할 수 있었다.

(a) Velocity Vectors (b) Depth Contours
 Fig. 10. Velocity Vector and Depth Contour of This Study (5hr)

(a) Velocity Vectors (b) Depth Contours
 Fig. 11. Velocity Vector and Depth Contour of RMA-2 Model (5hr)

(a) Developed Model

(b) RMA-2 Model

Fig. 12. Comparison of Developed Model and RMA-2 Model

대상구간 내 섬 단면에서의 마름에 대한 모의 결과를 좀 더 자세하게 비교하기 위해 Fig. 5(a)와 같이 섬을 통과하는 단면 3개를 선정하였다. Fig. 13(a)에서 보는바와 같이 본 연구에서 개발된 모형의 경우 노들섬이 존재하는 마름 구간과 우안의 홍수터 부분에서 수심이 '0'으로 계산되어 마름현상이 잘 나타나는 반면 RMA-2 모형의 모의 결과는 젓음 구간에서는 본 연구모형과 20cm 정도의 수위차로 비교적 비슷하게 나타나고 있었으나 마름이 나타나는 구간에서는 마름/젓음 매개변수의 작용으로 인해 수심이 4m 정도 발생하는 비정상적인 계산결과가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 B-B 단면 결과인 Fig. 13(b)와 C-C 단면 결과인 Fig. 13(c)에서도 유사하게 나타나고 있었다.

이와 같이 RMA-2 모형의 마름에 대한 모의 결과가 본 연구모형에 비해 정확하지 못한 이유는 마름처리를 위해 물리적인 의미를 가지고 있지 않은 매개변수가 도입되기 때문에 실제 지형을 제대로 반영할 수 없는 한

계를 가지고 있는 것으로 판단된다. 반면 본 연구모형은 마름/젓음 처리를 위해 어떠한 매개변수의 도입도 없이 계산된 수위결과를 가지고 요소의 재구성과 제거를 통해서만 모의를 수행하기 때문에 실제 지형을 좀 더 정확하게 반영하여 모의를 할 수 있는 것으로 판단된다.

(a) A-A Cross Section

(b) B-B Cross Section

(c) C-C Cross Section

Fig. 13. Comparison of This Study and RMA-2 Model (5hr)

Fig. 14. Boundary Conditions for HEC-RAS

Fig. 15. Comparison of the Computed Solution and Observed Data

HEC-RAS 모의를 수행하고 모의결과를 실측치와 검증하여 HEC-RAS 모형에 대한 정확성을 검증하였다. Fig. 14는 HEC-RAS 모의에 사용된 상·하류단 경계 조건이며, Fig. 15는 팔당대교, 잠수교, 한강대교 지점에서의 실측수위와 HEC-RAS 모의 결과를 도시한 것으로 모의결과와 실측수위가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

2차원 격자의 구성은 앞선 모의와 동일하며 계산 시간 간격은 1시간으로 총 21시간을 모의하였다. 대상 유역에 대한 초기유속은 '0'인 정적계산 조건으로부터 시작하였으며, Fig. 16과 같이 HEC-RAS 모의를 통해 계산된 결과를 상·하류단 경계조건으로 사용하였다. 본 연구모형과 RMA-2 모형의 모의 결과를 비교하기 위해 Fig. 17과 같이 잠수교와 한강대교 수위관측소 지점의 실측수위와 함께 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 한강대교 지점의 초반부에서 실측값과 조금 차이를 보이고 있으나 전체적으로 본 연구모형이 RMA-2 모형의 모의결과보다 실측수위와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 16. Boundary Conditions for 2-D Model

3.1.2 2002년 태풍 '루사' 사상

Fig. 5와 같은 한강 본류 구간에 2002년 태풍 '루사'가 발생한 2002년 9월 1일 11시부터 9월2일 8시까지의 사상에 대해 모의를 실시하였다. 대상구간의 상·하류단 경계에 대한 실측값이 존재하지 않기 때문에 한강 상류부인 팔당댐에서부터 하류부인 행주대교 지점까지

(a) Jamsu Bridge (b) Hangang Bridge
Fig. 17. Comparison of Computed and Measured Stage Hydrograph

Table 2. Error of Computed Solution and Measured Data

	L_1Error	L_2Error	$L_\infty Error$	RMS Error	Mean Error	Site
This Model	9.2×10^{-3}	1.13×10^{-2}	2.30×10^{-2}	5.70×10^{-2}	6.95×10^{-2}	Jamsu Bridge
RMA-2	2.77×10^{-2}	2.82×10^{-2}	3.48×10^{-2}	1.76×10^{-1}	1.79×10^{-1}	
This Model	1.24×10^{-2}	1.98×10^{-2}	6.83×10^{-2}	7.27×10^{-2}	1.16×10^{-1}	Hangang Bridge
RMA-2	4.69×10^{-2}	4.79×10^{-2}	8.56×10^{-2}	2.86×10^{-1}	2.93×10^{-1}	

본 연구 모형의 모의결과와 RMA-2 모형의 모의 결과를 정량적으로 비교하기 위해 앞서 제시한 5가지 오차를 Table 2에 제시하였다. 표에서 보는 바와 같이 5가지의 오차는 실측수위에 대한 본 연구모형의 오차가 RMA-2 모형의 오차보다 두 지점 모두 작게 나타나고 있었다.

Figs. 18 and 19는 본 연구모형과 RMA-2 모형의 모의 시작 후 9시간 때의 유속 벡터도와 등수심도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 개발된 모형의 경우 한강 본류 중심부의 높은 하상고를 가지는 섬 부분과 하도 외측부에서 수심과 유속이 '0'으로 계산되는 마른 영역이 합리적으로 나타나고 있었으나 RMA-2 모형의 경우는 마른 영역에서도 수심과 유속이 계산된 것을 확인할 수 있었다.

마름이 나타나는 부근에서 모의결과를 좀 더 자세하

게 살펴보기 위해 Fig. 20과 같이 확대하여 도시하였다. 앞선 모의 결과와 마찬가지로 본 연구개발 모형의 경우 마름이 나타나는 구간의 좌·우측과 내부의 섬에서 유속이 '0'으로 나타난 반면 RMA-2 모형의 경우에는 마름이 나타나는 구간에서도 유속이 '0'으로 계산되지 않고 흐름이 존재하는 것으로 나타났다. 이를 통해 본 연구개발 모형이 RMA-2 모형보다 완전 마름구간에서 마름현상을 합리적으로 재현하고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 21은 앞서 선정된 각 단면에서의 본 연구모형과 RMA-2 모형의 모의결과를 나타내고 있다. Fig. 21(a)에서 보는 바와 같이 본 연구모형의 경우는 노들섬이 존재하는 마름 구간과 우안의 높은 지형에서 수심이 '0'으로 계산되었으나, RMA-2 모형의 경우에는 전체적으로 수심이 매우 높게 계산되며, 마름 영역이 나타나는

(a) Velocity Vectors (b) Depth Contours
 Fig. 18. Velocity Vector and Depth Contour of This Study (9hr)

(a) Velocity Vectors (b) Depth Contours
 Fig. 19. Velocity Vector and Depth Contour of RMA-2 Model (9hr)

(a) Developed Model

(b) RMA-2 Model

Fig. 20. Comparison of Developed model and RMA-2 Model

(a) A-A Cross Section

(b) Zoom A

(c) B-B Cross Section

(d) Zoom B

(e) C-C Cross Section

(f) Zoom C

Fig. 21. Comparison of This Study and RMA-2 Model (9hr)

지형이 높은 부분에서 지면보다 수위가 상승하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 21(b)는 Fig. 21(a)의 마름영역을 확대한 그림으로 젖은 영역에서는 본 연구모형과 RMA-2 모형 모두 수위의 상승 및 하강이 잘 재현되고 있었으나 마름영역에서는 RMA-2 모형의 경우 시간에 따른 수위의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 B-B 단면과 C-C 단면의 결과인 Figs. 21(c)~21(f)에서도 유사하게 나타나고 있었다.

3.2 낙동강에 대한 적용

대상구간 내 섬이 존재하는 한강과 달리 하도 좌·우안에 사구가 발달한 낙동강 구간에 대해 본 연구모형의 적용성을 살펴보았다. 낙동강 본류의 왜관 수위관측소를 중심으로 Fig. 22와 같이 상류 2 km 지점부터 하류로 3 km까지를 대상 모의구간으로 선정하였으며, 하도를 따라 좌·우 외측부에 부분적으로 높은 지형을 형성하고 있어 자연적으로 하천 유량에 의한 마름/젖음 현상이 발생하고 있다. Fig. 22(a)는 대상지역의 평면도를 나타내고 있으며 모의를 위한 2차원 격자의 구성을 위해 낙동강하천정비기본계획(2006)의 측량 자료를 이용하여 Arc GIS 및 SMS 8.1을 이용하여 Fig. 22(b)와 같은 요소망을 구성하였다. 모의에 사용된 절점 수는 2,175개, 요소 수는 2,096개, 경계 절점의 수는 316개로 구성하였다.

3.2.1 2006년 태풍 ‘애위니아’ 사상

2006년 7월 11일 2시부터 12일 3시까지의 사상에 대한 모의를 위해 대상구간의 상·하류단 경계에서 유량과 수위자료와 같은 실측값이 존재하여야 한다. 하지만, 상·하류단에서 실측자료가 없기 때문에 낙동강 본류의 구미대교 지점에서 성주대교 지점을 대상구간으로 HEC-RAS 모의를 수행하고 모의결과를 실측치와 검증함으로써 대상구간의 상·하류단 경계자료를

HEC-RAS 모의결과로부터 추출하였다. Fig. 23은 HEC-RAS 모의에 사용된 상·하류단 경계조건이며, Fig. 24는 모의 구간 내에 존재하는 왜관수위관측소 지점에서 실측수위와 HEC-RAS 모의 결과를 도시한 것으로 모의결과와 실측수위가 잘 일치하는 것으로 나타났다.

대상유역에 대한 초기유속은 ‘0’인 정적계산조건으로 시작하였으며, Fig. 25는 HEC-RAS 모의를 통해 계산된 결과 가운데 상·하류단 경계에 해당하는 유량과 수위를 나타내고 있다. 2차원 모의를 위한 계산 시간 간격은 1시간, 총 모의시간은 25시간으로 하였으며, 기존 모형과의 비교를 위해 같은 경계조건을 이용하여 RMA-2 모형을 추가적으로 모의하였다.

Fig. 26은 모의 대상구간 내 실측수위가 있는 왜관대교 지점에서 실측수위와 모의 결과를 도시한 그림으로

(a) Study Area (b) Computation Element Mesh

Fig. 22. Computation Element Mesh for Nakdong River

Fig. 23. Boundary Conditions for HEC-RAS

Fig. 24. Comparison of the Computed Solution and Observed Data

Fig. 25. Boundary Conditions for 2-Dim. Model

Fig. 26. Comparison of Computed and Measured Stage Hydrograph

Table 3. Error of Computed Solution and Measured Data

	$L_1 Error$	$L_2 Error$	$L_\infty Error$	RMS Error	Mean Error	Site
This Model	3.10×10^{-3}	3.7×10^{-3}	6.80×10^{-3}	7.37×10^{-2}	8.68×10^{-2}	Waegwan Bridge
RMA-2	6.50×10^{-3}	7.30×10^{-3}	1.07×10^{-2}	1.55×10^{-1}	1.74×10^{-1}	

본 연구모형이 RMA-2 모형의 모의결과보다 실측수위와 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있었다. 본 연구모형의 모의결과와 RMA-2 모형의 모의 결과를 실측자료와 정량적으로 비교하기 위해 왜관대교 지점에서 실측수위에 대한 오차를 Table 3에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 5가지 오차 모두 본 연구모형의 오차가 RMA-2 모형의 오차보다 작게 나타나고 있었는데, 평균 오차의 경우 RMA-2 모형의 오차가 본 연구모형의 오차보다

약 2배 이상 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 27은 본 연구에서 개발된 모형과 RMA-2 모형을 이용하여 모의 시작 후 12시간에서의 유속 벡터도와 등수심도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에서 개발된 모형의 경우 하도의 좌우측의 지형이 높은 부분에서 수심과 유속이 '0'으로 계산되는 마름영역을 합리적으로 재현하였으나 RMA-2 모형의 경우는 마름 영역에서도 수심과 유속이 나타나고 있었다.

(a) Results of Developed Model

(b) Results of RMA-2 Model

Fig. 27. Comparison of Velocity Vector and Depth Contour of This Study and RMA-2 Model (12hr)

(a) Developed Model (b) RMA-2 Model

Fig. 28. Comparison of Developed Model and RMA-2

(a) A-A Cross Section

(b) B-B Cross Section

(c) C-C Cross Section

Fig. 29. Comparison of This Study and RMA-2 Model (12hr)

Fig. 28는 모의구간 하류단의 마름 부근 모의결과를 확대한 그림으로 본 연구개발 모형은 유속이 '0'으로 계산되어 완전한 마름현상이 나타났으나 RMA-2 모형의 경우에는 마름이 나타나는 구간에서도 유속이 '0'으로 계산되지 않고 흐름이 존재하는 것으로 나타났다.

모의 결과를 좀 더 자세하게 비교하기 위해 Fig. 22(a)와 같이 하도 외측에 마름이 나타나는 단면 3개를 선정하였다. Fig. 26은 선정된 각 단면에서 본 연구 개발 모형과 RMA-2 모형의 모의결과를 나타내고 있다. Fig. 29(a)에서 보는 바와 같이 본 연구모형의 경우는 좌안의 높은 지형에서 수심이 '0'으로 계산되었으나 RMA-2 모형의 경우에는 좌안의 높은 지형에서 수심이 약 0.8 m 정도로 높게 계산된 것을 알 수 있었다. B-B 단면과 C-C 단면에서도 본 연구모형의 경우는 마름 구간에서 마름 현상을 잘 모의하고 있는 반면 RMA-2 모형의 경우는 하상이 비교적 높은 좌·우안의 마름영역

에서 수위가 발생하는 비정상적인 결과가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 기존 모형과의 비교 검토

연구결과를 통하여 본 연구에서 개발한 마름/젓음 기법인 격자재구성 기법과 현재 실무에서 널리 쓰이고 또한 본 연구에서 비교 대상으로 선정한 SMS의 하천흐름해석 모형인 RMA-2 모형을 비교하면 Table 4와 같다. Table 4에서 보는 바와 같이 RMA-2 모형의 경우 마름/젓음 처리를 위해서 비물리적인 매개변수를 도입 하는데 반해 본 개발 모형의 경우 어떠한 매개변수의 도입 없이 실제하천에서의 수위 변화만을 고려하여 마름/젓음을 처리한다. 따라서 RMA-2 모형의 경우 비물리적인 매개변수에 대한 적정값의 선정에 많은 어려움이 있다. 마름/젓음 처리시 수치적 안정성 확보 측면에서는 본 연구 개발 모형의 경우 Courant 수를 고려한

Table 4. Comparison of Developed Model and RMA-2 Model

	Strength	Weakness
Developed Model	<ul style="list-style-type: none"> ·Treatment of wetting and drying without non-physical parameters ·Automatic computational time adjustment ·Reduction of computational time through renumbering ·Simulated depth in fully dry area is zero ·Unuse of artificial viscosity parameters 	<ul style="list-style-type: none"> ·Convergency is worse than RMA-2 model
RMA-2 Model	<ul style="list-style-type: none"> ·Good convergency(due to use of artificial viscosity parameters) 	<ul style="list-style-type: none"> ·Use of non-physical parameters to simulate wetting and drying ·Use of artificial viscosity parameters ·Simulated depth in fully dry area is not zero ·Difficulty in determination of parameters to simulate wetting and drying ·Inaccurate computation due to introduction of non-physical parameters

계산시간 간격을 자동으로 설정하도록 개발하였으며, 이때 예측된 수위로 인해 판단된 마름/젖음 절점이 실제 계산된 수위에 의해 판단된 마름/젖음 절점과 다를 경우에는 계산 시간간격을 자동으로 조정하여 계산을 수행하도록 하였다. 그러나 RMA-2 모형의 경우에는 인공점성항을 도입하여 처리하는데 이 경우 모의의 수렴성은 우수하나 ‘convection-dominated flow’를 ‘diffusion-dominated flow’로 해석하는 모순을 범하여 해의 정확성에 관한 문제점을 내포하고 있다 (Katopodes, 1987). 그러나 본 연구 개발모형의 경우에는 이러한 부가적인 인공 점성항 자체를 도입하지 않으며, 실제 지형과 수위의 변화만을 고려하여 마름/젖음을 처리함으로써 마름 구간에서 수심이 ‘0’으로 계산되어 명확하게 마름 현상이 나타나는 반면 RMA-2 모형의 경우에는 마름 구간에서도 일정 수심이 존재함으로써 합리적으로 마름현상을 재현하지 못하는 문제점이 발생하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 자연하천에서 마름/젖음 현상을 모의하기 위해 개발된 격자재구성 기법을 실제하천에 적용하여 실측치 및 기존 모형과 비교하여 적용성을 검증하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 개발된 모형의 자연하천에 대한 적용성을 검토하기 위해 마름/젖음 영역을 가지는 한강 및 낙동강 유역에 모의를 실시하였다. 모의

결과 본 연구에서 개발된 모형의 모의결과가 RMA-2 모형의 결과에 비해 실측수위와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구개발 모형은 섬이 존재하는 마름 구간과 좌·우안의 높은 지형에서 수심이 ‘0’으로 계산됨으로써 마름현상이 분명하게 나타나는 반면 RMA-2 모형의 경우는 마름영역에서도 수심이 발생함으로써 마름현상을 적절하게 재현하지 못하고 있음을 확인할 수 있었다.

- (2) MP 기법을 이용한 RMA-2 모형의 모의 결과가 본 연구모형에 비해 정확하지 못한 이유는 마름 처리를 위해 인위적인 매개변수를 도입함으로써 실제 지형을 제대로 반영할 수 없는 한계를 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다. 반면 본 연구모형은 마름/젖음 처리를 위해 어떠한 매개변수의 도입도 없이 계산된 수위결과를 가지고 요소를 재구성하여 모의를 수행하기 때문에 실제 지형을 좀 더 정확하게 반영하여 모의를 수행하는 것으로 판단된다.
- (3) 본 연구에서 개발된 모형은 하천의 수위변동에 따른 대상수역 범위를 자동 산정하여 흐름해석을 수행함으로써 2차원 동수역학적 유한요소모형의 활용성을 크게 향상시켰으며, 향후 오염물질의 이송-확산해석, 토사이송해석과 연계되어 해석된다면 하천에서의 흐름 해석 및 생태 수리 분야에 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 수자원의 지속적 확보기술개발사업단에서 위탁 시행한 21세기 프론티어 연구개발사업중 “RAM2 모형의 확장개발 및 상용화” (과제번호2-3-3)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

건설교통부 (2002). 한강 수계 하천정비기본계획(팔당댐-한강하구), pp. 420-423.

국토해양부 (2006). 낙동강(상류) 하천정비기본계획(부도), pp. 2-300.

Alam, M.M. and Bhuiyan, M.A. (1995). “Collocation finite element simulation of dam-break flows.” *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 2, pp. 118-128.

Balzano, A. (1998). “Evaluation of methods for numerical simulation of wetting and drying in shallow water flow models.” *Coastal Engineering*, 34, pp. 83-107.

Benque, J.P., Cunge, J.A., Feuillet, J., Hauguel, A. and Holly, F.M. (1982). “New method for tidal current computation.” *Journal of the Waterway*, ASCE, Vol. 108, No. WW3, pp. 170-185.

Froehlich, D.C. (1990). “Hermite-Galerkin model for dam-break floods.” *Proceeding of 1990 National Conference on Hydraulics Engineering*, ASCE, pp. 557-562.

Ghanem, H.M. (1995). *Two-dimensional finite element modeling of flow in aquatic habitats*. Ph.D. dissertation, University of Alberta Edmonton, Alberta, Canada, pp. 1-38.

Gopalakrishnan, T. (1989). “A moving boundary circulation model for regions with large tidal flats.” *International Journal for Numerical Method in*

Fluids, Vol. 28, pp. 245-260.

Jenkins, G.A. and Keller, R.J. (1990). “Numerical Modelling of Flows in Natural Rivers.” *Proceeding of Conference on Hydraulics in Civil Engineering*, Sydney, 35-43.

Katopodes, N.D. (1987). “Analysis of transient flow through broken levees.” *Turbulence Measurements and Flow Modeling*, Hemisphere Publishing Corp., Washington, D. C., pp. 301-310.

Kawahara, M. and Umetsu, T. (1986). “Finite element method for moving boundary problems in river flow.” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 6, pp. 365-386.

Lynch D.R. and Gray, W.G. (1978). “Finite element simulation of shallow water problems with moving boundaries.” *Proceedings of the 2nd International Conference on Finite Elements in Water Resources*. Pentech: London, pp. 223-243.

Molls, T., Zhao, G. and Molls, F. (1988). “Friction Slope in Depth-Averaged Flow.” *Journal of Hydraulics Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 1, pp. 81-85.

Roig, L.C. (1989). *A finite element technique for simulating flow in tidal flats*. Master. dissertation, University of California, Davis, pp. 2-123.

Roig, L.C. and Evans, R.A. (1993). “Environmental modeling of coastal wetlands.” *Proc., 3rd Int. Conf. on Estuarine and Coastal Modeling III*, ASCE, New York, 0-87262-975-9, pp. 522-535.

Samuels, P.G. (1985). “*Modeling of river and floodplain flow using the finite element method*.” Research Report, No. SR 61, pp. 1-198.

논문번호: 09-082	접수: 2009.07.15
수정일자: 2009.08.27/09.15	심사완료: 2009.09.15