

연구논문

## 하천 및 습지에서 유한요소 해석시 마름/젖음 처리를 위한 매개변수 평가

최승용\* · 한건연\* · 김병현\* · 김상호\*\*

경북대학교 건축·토목공학부\*, 상지대학교 토목공학과\*\*

(2009년 09월 15일 접수, 2009년 11월 15일 승인)

### Parameter Assessment for the Simulation of Drying/Wetting in Finite Element Analysis in River and Wetland

Choi, Seung Yong\* · Han, Kun Yeun\* · Kim, Byung Hyun\* · Kim, Sang Ho\*\*

School of Architecture & Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 702-701, Korea\*

Department of Civil Engineering, Sangji University, Wonjusi Gangwondo, 220-702, Korea\*\*

(Manuscript received 15 September 2009; accepted 15 November 2009)

### Abstract

The serious problem facing two-dimensional finite element hydraulic model is the treatment of wet and dry areas. This situation is encountered in most practical river and coastal engineering problems, such as flood propagation, dam break analysis and so on. Especially, dry areas result in mathematical complications and require special treatment. The objective of this study is to investigate the wet and dry parameters that have direct relevance to model performance in situations where inundation of initially dry areas occurs. Several numerical simulations were carried out, which examined the performance of the marsh porosity method of RMA-2 model to investigate for application of parameters. Experimental channel with partly dry side slopes, straight channel with irregular geometry and Han river were performed for tests. As a result of this study, effectively applied marsh porosity method provide a reliable results for flow distribution of wet and dry area, it could be further developed to basis for extending to water quality and sediment transport analysis.

Keywords : finite element model, dry/wet, marsh porosity method, RMA-2 model

## 1. 서론

자연하천은 저수시 및 평수시에 물을 소통시키는 주수로부와 홍수시 수위 상승에 따라 주수로부로부터 범람하게 되는 홍수터로 구성된다. 홍수터는 홍수류의 일시적인 저장이나 하류로 흐름을 전달하는 복합수로의 부분으로 사용되어진다. 자연하천에서 흐름구조는 불규칙한 지형형상이나 조도계수 등에 의해서 더욱 복잡하게 나타난다. 하천은 홍수시 수위 상승과 함께 범람되었다가 수위가 하강함에 따라 마른 하도상태가 되는 부분이 발생하게 된다. 자연하천 구간 내에 섬이나 마름조건이 존재하는 경우 수위의 상승과 하강에 따라 섬이나 마름조건이 출현 및 소멸 할 수 있는데 이를 모의하는 것은 매우 어렵다.

유한요소법에 의한 동수역학 모델에서는 마름과 젖음을 모의하는데 다양한 방법들이 사용되었다. 요소이동 알고리즘은 수위가 변함에 따라 요소의 가장자리는 수면경계에 맞춰지도록 이동하는 기법이다. 이 기법은 물선의 위치를 정확히 예측할 수 있다. 그러나 계산적인 진동이 생길 수 있고 수치적인 불안정을 이룰 수도 있는 문제점을 가지고 있다. 만약 물선의 위치 변화폭이 커지면 요소의 가장자리를 따라 요소들은 수치적으로 늘어날 수 있다 (Gopalakrishnam, 1989 ; Roig and Evans, 1993). 이 방법의 다양성에 대해 Hervouet and Janin(1994)는 부분적으로 마른 요소와 접촉하도록 자유수면을 다양화하는 방법으로 묘사하였다. 다른 기법으로는 요소제거 기법이 있다. 요소제거 기법은 안정적이며 간단한데 계산된 최소치 아래로 수위가 떨어질 때 요소들과 노드들은 제거되어지고 수위가 명기된 최고값보다 높아지면 다시 복구된다. 특정 최소 또는 최고 수심은 각각 다르므로 요소가 시스템으로부터 제거되거나 또는 요소가 시스템으로 다시 복구되면서 질량을 얻는 경우에 대해서 질량의 손실을 초래 할 수 있다(Bates and Hervouet, 1999).

국내에서는 마름/젖음을 모의하기 위해서 2차원 동수역학적 유한요소모델인 SMS의 RMA-2 모형

의 Marsh Porosity(MP) 기법이 널리 사용되고 있다. Marsh Porosity기법의 개념은 원래 홍수시에 습지에 대한 2차원 흐름 모의를 위해 개발되었다. 마름조건이 나타나는 영역을 모의하는 것은 Marsh Porosity기법과 연관된 모형의 매개변수에 민감하게 작용한다. 이러한 매개변수들은 여러 문헌(Balzano, 1998; King, 2000; Donnell, 2001) 등에서 다양한 범위의 값들을 권장 하고 있다. 그러나 이에 대해 모형에서는 상당히 다른 결과치를 나타내고 있다. 또한 마름/젖음 조건이 나타나는 영역을 모의하는 것은 MP기법과 연관된 모형의 매개변수에 민감하게 작용한다. 그러나 MP기법과 연관된 모형의 매개변수에 대한 검토가 이루어지지 않아 사용자들이 사용하는데 어려움이 있다.

이에 본 연구에서는 마름/젖음이 발생하는 가상 하도와 인공수로 및 자연하도에 대해 MP기법을 적용하여 매개변수에 대한 영향을 검토하고 향후 MP기법을 사용하는 사용자들에게 MP 매개변수의 적정 가이드 라인을 제시하고자 한다.

## II. 기본 방정식

### 1. 지배 방정식

본 연구에서 사용된 SMS의 RMA-2 모형은 2차원 흐름영역에서 자유수면, 상류흐름의 수평방향 유속성분과 수위를 계산하고, Navier-Stokes 방정식에 난류의 흐름을 고려한 Reynolds 방정식으로 유한요소해를 계산하며, 정상류 뿐 만 아니라 부정류에서의 모의도 실행 할 수 있다. 기본방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} + gh \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z_0}{\partial x} \right) + \frac{g}{C^2} u |V| + uq_s - \Omega v h \right) \quad (2)$$

$$-h \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - h \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_{yy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - W_x = 0$$

$$\begin{aligned} & \rho(h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} + gh(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial z_0}{\partial x})) \\ & + \frac{g}{C^2} u |V| + uq_s - \Omega v h \\ & - h \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_{xx} \frac{\partial v}{\partial x}) - h \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y}) - W_y = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

### III. 마름/젖음 해석

#### 1. 마름/젖음 해석

자연하천은 평수 시 물을 소통시키는 주수로부와 태풍이나 집중호우 등에 의한 홍수 시 하천의 수위 상승에 따라 주수로부에서부터 범람하게 되는 홍수터로 구성된다. 홍수터는 홍수류의 일시적인 저장이나 하류로 흐름을 전달하는 복합수로의 부분으로 나누어진다. 자연하천의 흐름구조를 해석하기 위해서는 실제지형의 반영에 따른 불규칙한 단면형상이나 조도계수 등을 고려하여야 한다. 자연하천은 Fig. 1에서와 같이 홍수시 수위 상승과 함께 범람되었다가 수위가 하강함에 따라 마른 하도 상태가 되는 현상이 반복적으로 발생한다. 또한 하도 구간 내에 섬이 존재할 경우 수위 상승과 하강에 따라 섬이 출현하거나 소멸할 수 있는데 이를 반영한 모형의 모의를 위해서는 마름/젖음 알고리즘을 사용하는 것이 필수적이다.

자연하천에서 반복적으로 발생할 수 있는 주수로부와 홍수터의 범람으로 발생하는 마름/젖음 영역에 대한 처리과정은 홍수터 흐름에 대한 적용 시 적절한 경계조건과 매개변수의 선정은 복잡한 유한요소망에 대해서 해의 안정성을 개선하기 위해서 중요한 사항이다. 본 연구에서는 2차원 유한요소모형에서 마름/젖음 상태를 처리한 기법으로 Marsh

Porosity기법을 소개하고 특히 Marsh Porosity기법을 인공하도와 자연하천에 적용하여 MP 매개변수에 대한 영향을 검토함으로써 효과적이고 정확한 모델링을 위한 매개변수에 대한 가이드라인을 제시하고자 하였다.

#### 1) Marsh Porosity기법의 개념

Marsh Porosity기법은 완전히 범람한 흐름 영역에 대해 모의시간 동안 마른 요소, 젖은 요소, 부분적으로 젖은 요소의 질량 플럭스를 산정하기 위해서 개발되었다.

요소 상에서 흐름을 모의하는 방정식은 전체 요소 상에 분포되어 있는 유체체적이 부분적으로 젖은 요소에서의 실제 유체체적과 같도록 하는 영역계수를 포함한다. 천이 요소는 완전히 침수되어 나타나지만 영역계수( $\sigma$ )는 유체체적을 조정하는데 사용되기 때문에 질량은 보존되게 된다. 영역계수,  $\sigma$ 는 공간적으로 서로 다른 수면 표고의 함수라고 할 수 있다.

영역계수는 공간적으로 서로 다른 매개변수이며 각 절점마다 계산되는, 절점 매개변수로 정의될 수 있다. 각 절점과 연관시킨 투영 면적은 유체 흐름의 잠재 영역을 나타내는 수주의 단면으로 간주할 수 있다. 수주는 하도바닥 지형 변동을 고려하여 임의의 기준면으로부터 연직방향으로의 무한한 표고까지 확장할 수 있다. Fig. 2에서  $h$ 는 절대 기준면으로부터 수면까지의 거리를 나타내는 것으로 재정의 되었다. 만약  $a_{abs}$ 가 전체 계에 대하여 최저 수면고 이하이면  $h$ 는 항상 양의 값이고 이는 지배방정식의 수치해로 적합하다. 수심은  $h$ 의 일부분으로 나타나는  $h_\sigma$ 로 정의된다. 평균 하상고는  $a_m$ 으로 정의한다.  $h = a_m + h_\sigma$ 이고  $a_m$ 은  $a_0$ 로 표기된 실제 하도바닥지형에 가까워진다.  $a_m$ 과  $a_0$ 을 근사값을 찾기 위해서  $a_m$

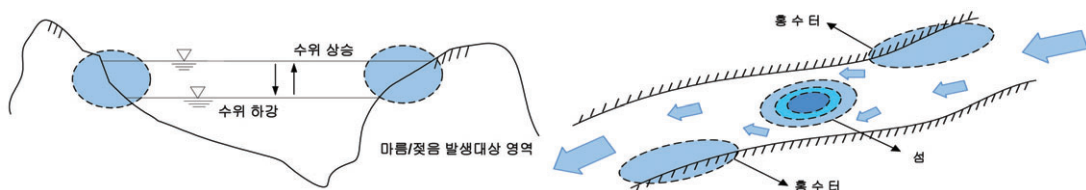


Fig. 1. Concept of Drying/Wetting in Natural River

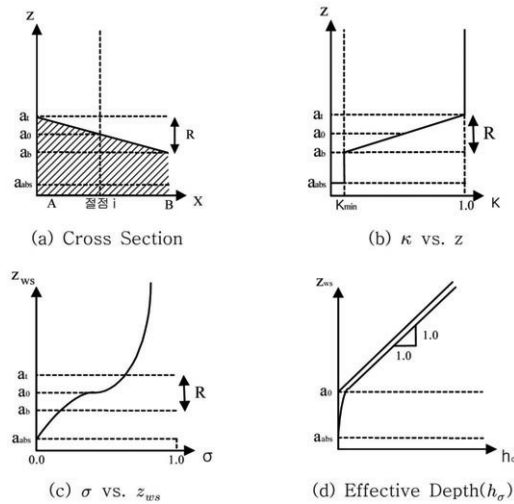


Fig. 2. Parameters of Drying/Wetting in Transition Element

과  $a_0$ 를 구분해야 한다.  $a_{abs}$ 에서  $a_m$ 까지의 거리를  $d_m$ 이라 정의한다.  $h$ 는 항상 양의 값이어야 하고  $h_\sigma$ 도 절점  $i$ 가 격자 내에 있는 한 항상 양의 값이어야 한다. 절점  $i$ 가 부분적으로 젖은 요소 상에서 마른 절점을 나타낼 때  $h_\sigma$ 는 작아지고  $a_m$ 은  $a_0$ 와 일치하지 않게 되는 반면 절점  $i$ 와 관련된 수주가 젖어있다면  $a_m$ 은  $a_0$ 와 일치할 것이다. 영역계수,  $\sigma$ 는 각 절점에서 수면고의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_\sigma = h_\sigma \text{ or } \sigma = \frac{h_\sigma}{h} \quad (6)$$

여기서  $h$ 는 기준면에서 수면까지의 거리,  $\sigma$ 는  $0.0 < \sigma < 1.0$ 의 범위 내에 있는 영역계수,  $h_\sigma$ 는 하도 바닥으로부터 수면까지의 거리를 나타낸다.  $\sigma$ 가 수면고  $z_{ws}$ 의 변동에 따라 어떻게 변하는지 알아보

기 위해서 수면고  $z$ 에서 물의 유동성을 나타내는 함수,  $\kappa(z)$ 를 정의해야 한다.  $h_\sigma$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_\sigma = \int_{a_{abs}}^{z_{ws}} \kappa(z) dz \quad (7)$$

여기서  $z_{ws}$ 는 수면고,  $a_{abs}$ 는 최저 수면고보다 낮은 값으로 설정되는 기준 표고를 나타낸다. 식 (6)과 (7)을 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{1}{h} \int_{a_{abs}}^{z_{ws}} \kappa(z) dz \quad (8)$$

$\kappa(z)$ 는  $z = [a_{abs}, \infty]$ 구간에서 연속이며 미분이 가능하다.  $\kappa_{min}$ 은 각 절점에서 얇은 흐름의 수심이 항상 유지되도록 정의된다. 다음에  $\kappa(z)$ 는  $z = a_0$ 에서 불연속성을 피하기 위해  $R$ 로서 정의된 작은 범위의  $z$ 에 걸쳐 마른 상태인  $\kappa(z) = \kappa_{min}$ 에서부터 완전히 젖은 상태인  $\kappa(z) = 1.0$ 까지 변경시킨다.  $a_r$ 와  $a_b$ 를 정의하면 다음과 같다.

$$a_r = a_0 + \frac{R}{2} \text{ and } a_b = a_0 - \frac{R}{2} \quad (9)$$

#### IV. 매개변수의 영향성 검토

MP기법에 사용된 매개변수의 영향을 검토하기 위하여 다양한 조합의 매개변수를 적용하여 가상하도에 대한 모의를 수행하였고 이를 바탕으로 실제로 관측한 자료를 가진 인공하도에 적용하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 MP기법의 매개변수를 나타내고 있다.

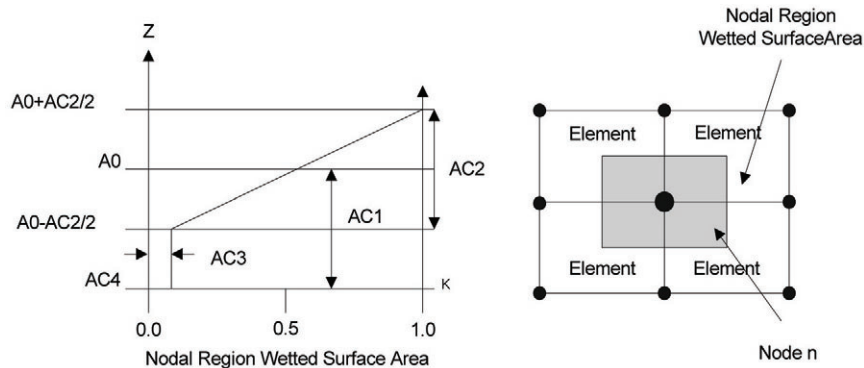


Fig. 3. Applied MP Parameters in This Study

### 1. 웨어 구조물이 있는 가상하도

본 연구에서는 매개변수의 영향을 검토하기 위하여 Table 1에서 보는 바와 같이 MP 매개변수를 다양화하여 모의를 실시하였다.

본 연구에서 수행된 모의는 마름/젖음 요소에서 발생하는 현상에 대해 알아보고 이를 바탕으로 MP 매개변수의 영향을 검토하기 위해 실시되었다. 모의에 적용된 가상하도의 제원은 길이가 1,500m이며 폭은 300m이다. 하도의 Manning의 조도계수는 0.010이며 하도 중앙에 높은 Weir구조의 구조물이 있는 것이 특징이다. 그 밖에 가상하도의 지형 조건과 경계조건에 대해서는 Fig. 4에 나타나 있다.

요소망은 1,685개의 노드와 550개의 요소로 구성되어 있으며 최고 하상고는 0m이며 최소 하상고는 -10m이다. Fig. 5는 모의에 적용된 요소망을 나타내고 있다.

매개변수의 영향을 검토하기 위해 Weir 전 부분(200m지점), 마름조건이 나타는 Weir부분(650m 지점), Weir 후 부분(1200m지점)의 3지점을 선택하여 수위를 비교하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

매개변수 AC1에 의한 수위의 변화는 조건 1과 조건 4, 그리고 조건 2와 조건 5를 비교함으로써 알 수 있다. AC1의 기본값이 0.91m이라고 볼 때 이 값

Table 1. Simulation Cases

매개변수 모의 CASE	마름/젖음	A0와 최소하상고 사이 거리	천이영역의 분포	최소 젖음 영역의 분포
		AC1	AC2	AC3
조건 1		2.5 (기본값=0.91)	0.67 (기본값=0.61)	0.04(기본값=0.02)
조건 2		2.5	0.67	0.30
조건 3		2.5	5.00	0.30
조건 4		5.5	0.67	0.04
조건 5		5.5	0.67	0.30
조건 6		5.5	5.00	0.30

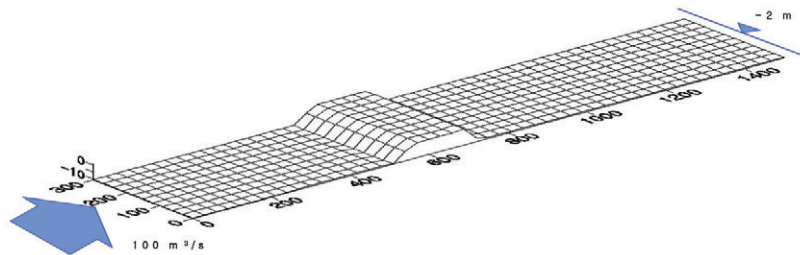


Fig. 4. Bed Elevation

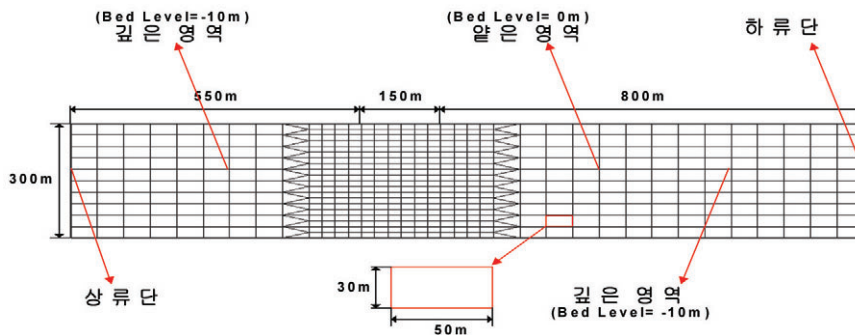


Fig. 5. Finite Element Grid for Simulation

Table 2. Simulation Results

모의 CASE	가상하도 수심에 대한 수치 계산 값			
	하도 거리	A영역 200m	B영역 650m	C영역 1200m
조건 1		10.357	0.189	8,000
조건 2		11.695	0.238	8,000
조건 3		1.453	0.252	8,000
조건 4		9.979	0.161	8,000
조건 5		11.389	0.229	8,000
조건 6		3.863	0.256	8,000

을 두 조건 모두 높은 값을 적용하였다는 것을 알 수 있다. 조건 1과 조건 4의 수위에 대한 값을 비교해보면 AC1의 값이 2.5에서 5.0으로 커짐에 따라 A영역에서는 수위가 10.357m에서 9.979m로 0.378m 감소하였고, B영역에서는 수위가 0.189m에서 0.161m로 0.028m 감소한 것을 확인할 수 있었다. 조건 2와 조건 5의 수위를 비교해보면 A영역과 B영역에서 수위가 각각 0.306m와 0.009m 감소한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 AC1의 증가로 인한 수위의 감소 정도는 미비함을 알 수 있다. 위의 모의 결과를 미루어볼 때 매개변수 AC1값은 수위변화에 직접적인 영향은 그리 크지 않은 것으로 판단된다.

매개변수 AC2에 의한 수위값의 변화는 조건 2와 조건 3, 그리고 조건 5와 조건 6을 비교함으로써 알 수 있다. 조건 2와 조건 3의 적용에 따른 수위를 비교해보면 A영역에서는 수위가 11.695m에서 1.453m로 급격히 낮아진 것으로 나타났다. 반면 마름영역인 B영역에서는 오히려 수위가 0.014m 높아진 것을 알 수 있다. 조건 5와 조건 6에서는 A영역에서는 7.526m의 급격한 수위의 감소가 나타났지만 B영역에서는 오히려 0.229m에서 0.256m로 0.027m정도 수위가 증가한 것을 알 수 있다. 이를 통해 매개변수 AC2의 값이 커질수록 젖은 영역에서는 수위가 급격히 감소함을 알 수 있고, 마름 영역에서는 수위가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

매개변수 AC3에 의한 수위의 변화는 조건 1과 조건 2, 그리고 조건 4와 조건 5를 비교함으로써 알 수 있다. 조건 1과 조건 2의 적용에 따른 수위를 비

교해보면 A영역에서는 수위가 10.357m에서 11.695m로 1.338m 증가하였고, B영역에서는 0.189m에서 0.238m로 0.049m 증가한 것을 확인할 수 있었다. 조건 4와 조건 5의 수위에 대한 값을 비교해보면 A영역에서는 수위가 9.979m에서 11.389m로 1.41m 증가하였고, B영역에서는 0.161m에서 0.229m로 0.068m 만큼의 수위가 증가한 것을 알 수 있다. 이를 통해 매개변수 AC3 값을 증가시키면 마름/젖은 영역 모두에서 수위가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

## 2. 하도 외측부에 마름영역을 갖는 실험하도

본 적용에서는 MP 매개변수의 보다 다양한 조건에 대해서 모의를 실시하였으며 이를 실제 관측데이터와 비교·검증하였다. 본 연구에서 수행된 모의는 AC1에 대해서 2~100까지 값 중 13가지 조건, AC2는 0.3~10까지 값 중 11가지 조건, AC3는 0.0001에서 1까지 값 중 11가지 조건에 대해 모의를 실시하였다. 모의에 적용된 인공하도의 제원은 전체길이 6.4m이고 폭은 0.4m이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 수로의 중앙 좌측부에는 높은 하상고를 갖는 구조물이 설치되어 있으며 최고 하상고는 0.34m이며 최소 하상고는 0m이다.

경계조건으로 상류단은 0.016 m<sup>3</sup>/sec 유량조건이 주어졌고 하류단 경계조건은 0.29m의 수위조건이 주어졌다. 본 모의에서는 매개변수의 적용 사례를 다양화하였으며 하나의 매개변수에 대한 민감도를 알아보기 위해 모의 적용 매개변수 외의 나머지 매개변수에 대해서는 기본값을 사용하였다. 수치모



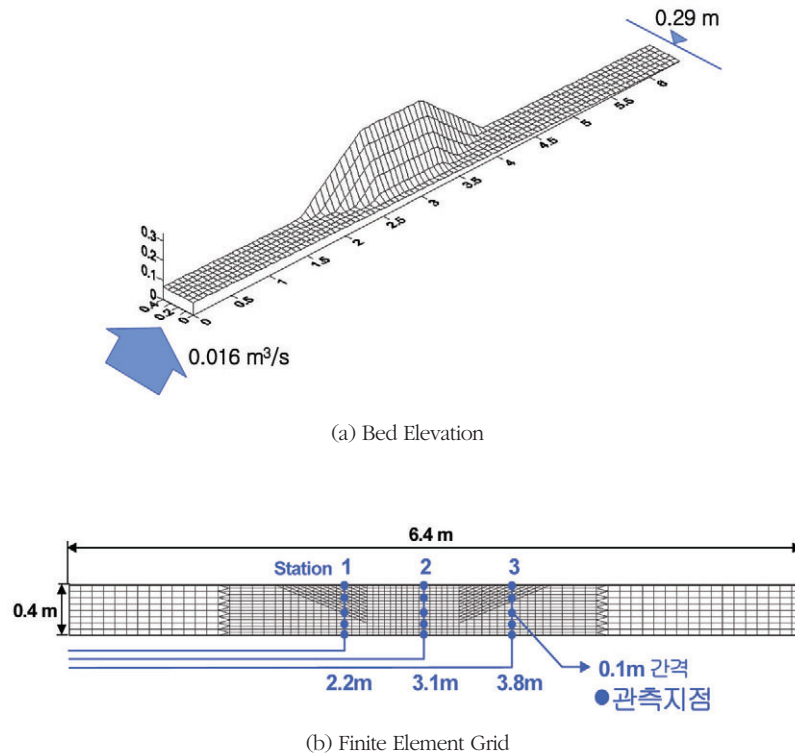


Fig. 6. Bed Elevation and Finite Element Grid

의 정확성을 알아보기 위해 하도 내 세 곳의 관측 지점에서 관측을 실시하였다. Fig. 7~Fig. 9는 각 관측 지점에서 매개변수에 따른 모의 결과를 나타내고 있다. Fig. 7은 AC1의 수위에 대한 영향을 검토하기 위해 Station1, 2, 3에 대해 2~100 범위의 값으로 모의를 진행하여 실측치와 비교한 결과이며, 그림에서 보는 바와 같이 AC1의 변화에 따른 수위의 차이가 0.002m 정도로 수위에 대한 AC1의 영

향은 거의 없는 것으로 나타났다. AC1 값이 클수록 안정적인 모의를 수행하므로 마름/젖음을 모의하고자 할 때는 수치해가 발산하지 않는 범위에서 큰 값을 사용하는 것이 적정할 것으로 판단된다. Fig. 8은 AC2의 수위에 대한 영향을 검토하기 위해 Station1, 2, 3에 대해 0.3~10 범위의 값을 모의를 진행하여 실측치와 비교한 결과로, 그림에서 보는 바와 같이 AC2가 1 이하인 값에 대해서는 AC2

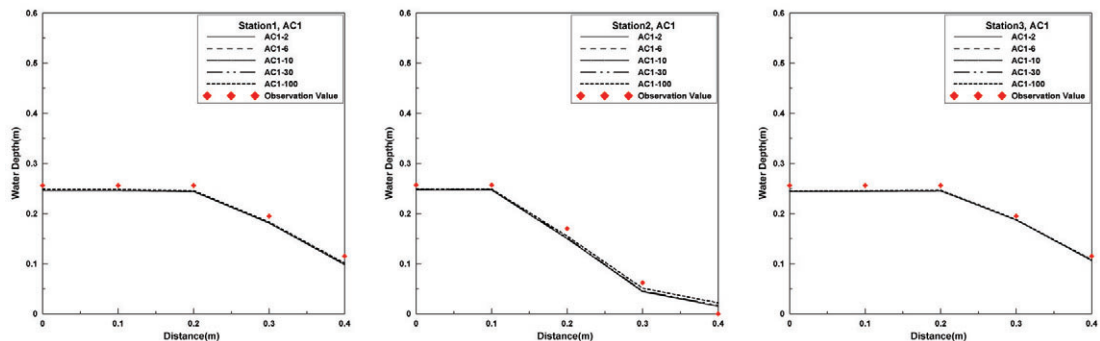


Fig. 7. Depth Profile for AC1 at Station 1, 2, 3

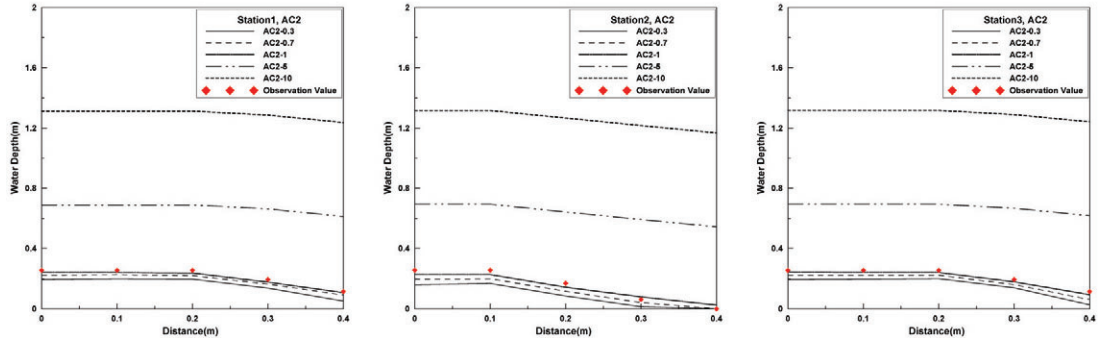


Fig. 8. Depth Profile for AC2 at Station 1, 2, 3

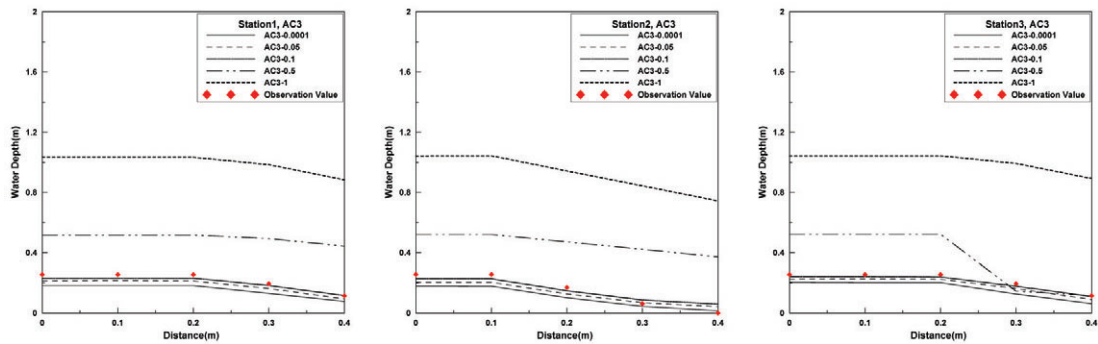


Fig. 9. Depth Profile for AC3 at Station 1, 2, 3

의 변화에 따른 수위의 변화가 적고 또한 실측치에 근접한 수위를 나타내고 있으나 AC2가 1보다 큰 값에 대해서는 마름 발생영역에서 수위의 증가 현상을 확인할 수 있었다. AC3값은 반드시 0과 1사이의 값을 써야하며 본 연구에서는 AC3값에 따른 수위에 대한 민감도를 분석하기 위해 Station1, 2, 3에 대해 0.0001~1까지 값에 대해 모의를 진행하였다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 매개변수 AC3의 값이 커질수록 수위가 증가하는 것을 알 수 있었고 실측치와의 비교를 통해 검증한 결과 AC3의 값은 최대 0.2를 넘지 않는 것이 안정된 해석 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 3. 실제유역에 대한 적용

가상하도와 인공하도에 대한 다양한 경우에 대한 모의를 통해 마름/젖음 알고리즘에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 본 절에서는 가상하도에 적용하여 얻은 매개변수의 민감도 분석 자료를 활용하여 자연하천에 대한 보다 효과적이고 정확한 모의를

실시하였다. 가상하도와 인공하도의 관측치를 비교하여 얻은 자료를 바탕으로 자연하천의 적용성을 우선으로 살펴보았으며 마름/젖음 현상을 보다 효과적이고 정확한 모의를 실시하고자 하였다. 실제 홍수사상을 선정하여 경계조건을 부여하였으며 이를 수위관측자료와 비교함으로써 모의 결과를 비교 검증하였다.

#### 1) 대상유역의 선정

본 연구에서 사용한 수치모형의 적용구간은 Fig. 10에서와 같이 팔당댐 직하류를 상류단으로 하고 하류단은 영동대교 직상류부로 결정하였다. 팔당댐 직하류부에서부터 영동대교에 이르는 유역에 걸쳐 높은 지형에 의해 자연적으로 하천 유량에 의한 마름/젖음 현상이 발생하기 때문에 본 연구에서 사용한 모형의 적용성을 검토하기에 타당한 구간으로 판단되었다. 뿐만 아니라 구간 내 팔당대교 수위관측소와 광장수위관측소의 두 지점의 수위 관측소가 위치하고 있어 모의를 통해 얻은 결과를 실제 관측





Fig. 10. Study Area

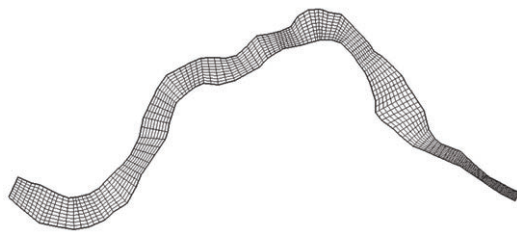


Fig. 11. Computational Mesh

수위 값과 비교하여 정확성을 검증할 수 있는 요건을 갖추고 있다.

Fig. 10에서 나타난 바와 같이 대상구간을 선정한 다음 GIS 작업을 통하여 입력자료의 구축을 위한 수치지도를 작성하여 2차원 유한요소망을 구성하였다. 모의에 사용된 노드 수는 4,427개, 요소 수 1,368개이며 이 유역에 대해 부정류 상태의 하천 흐름을 2차원 모형인 RMA-2 모형을 활용하여 해석하였다. Fig. 11에서는 본 연구에서 활용한 유한요소망에 대해 자세히 나타내고 있다.

## 2) 입력조건의 결정

자연하천에서의 마름/젖음 현상을 반영한 하천 흐름 해석에는 지형적인 특성을 정확하게 반영하여 모의가 실시되어야하며 신뢰할 수 있는 상·하류단 경계조건에 대한 자료를 조사하여 선정하는 것이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 실측자료를 바탕으로 경계조건에 대한 입력자료를 선정하였다. 본 연구에서 적용한 한강유역의 팔당댐 직하류~영동대교 직상류 구간을 2002년 루사 내습시인 8월 31일 09시부터 9월 3일 21시까지의 홍수사상에 대해 84시간과 2003년 8월 6일 01시부터 2003년 8월 10일 04시까지의 사상을 99시간 동안에 대해 부정류 모의를 실시하였다. 상류단 경계조건은 팔당

댐 방류량으로 선정하였으며 하류단 경계조건은 영동대교 수위관측소의 수위자료를 사용하였다.

### (1) 경계조건의 결정

본 연구에서는 한강유역의 팔당댐 직하류에서부터 영동대교 직상류에 이르는 약 25.7km에 대해 모의를 실시하였다. 경계조건은 태풍 '루사' 내습시의 팔당댐 방류량을 상류단 경계조건으로 하였으며 하류단 경계조건은 영동대교 수위관측소의 수위관측값을 적용하였다. 태풍 '루사'는 대한민국 건국 이래 최악이라 할 만한 피해를 낸 태풍으로 한반도에 상륙한 최강의 태풍으로 꼽히는 2003년의 14호 태풍 '매미'나 1987년의 5호 태풍 '셀마'의 수준에는 다소 미치지 못하였으나 당시 평년보다 높았던 해수 온도 등이 태풍의 쇠약을 저지하면서 대단히 오랜 기간 동안 세력을 유지하였다. 태풍 루사는 당시 한반도 주변의 기상 상황에 의해 전향 시점이 늦어졌고, 이는 태풍의 이동속도를 늦추는 효과를 가져와 전향을 시작한 2002년 8월 31일 자정 즈음 이후에는 태풍의 이동속도는 약간 빨라졌으나 이미 태풍이 한반도에 상륙한지 10시간가량이 지난 뒤였다. 이 때문에 태풍이 9월 1일 오전 9시경 강원도 속초 부근에서 열대저압부로 약화될 때까지 한반도 내륙에 머무른 시간은 약 18시간 정도이며 전국 대부분의 지방에서 강풍과 폭우가 장시간 지속되는 결과로 이어졌다. 이에 본 연구에서는 태풍 '루사' 내습시의 한강유역에 대해 2002년 8월 31일 09시부터 2002년 9월 3일 21시까지 84시간에 걸쳐 부정류모의를 실시하였다. 이를 위해 가상하도와 인공하도 모의를 실시하여 얻은 데이터를 활용하여 마름/젖음 알고리즘의 매개변수를 자연하천에 적용하여 보다 효과적이고 정확하게 마름/젖음 현상을 처리하고자 하였다. 상류단 경계조건과 하류단 경계조건에 대한 입력 값은 Fig. 12에 나타나 있다. 입력 최대 유량은 6,926m<sup>3</sup>/s로 태풍 '루사' 내습 이전인 2002년 8월 1일 01시의 팔당댐 방류량이 122m<sup>3</sup>/s인 것을 감안하며 엄청난 양의 유량이 방류된 것을 알 수 있다. 계산시간 간격은 0.5시간으로 결정하였으며 조도계수는 Table 3에서 제시한

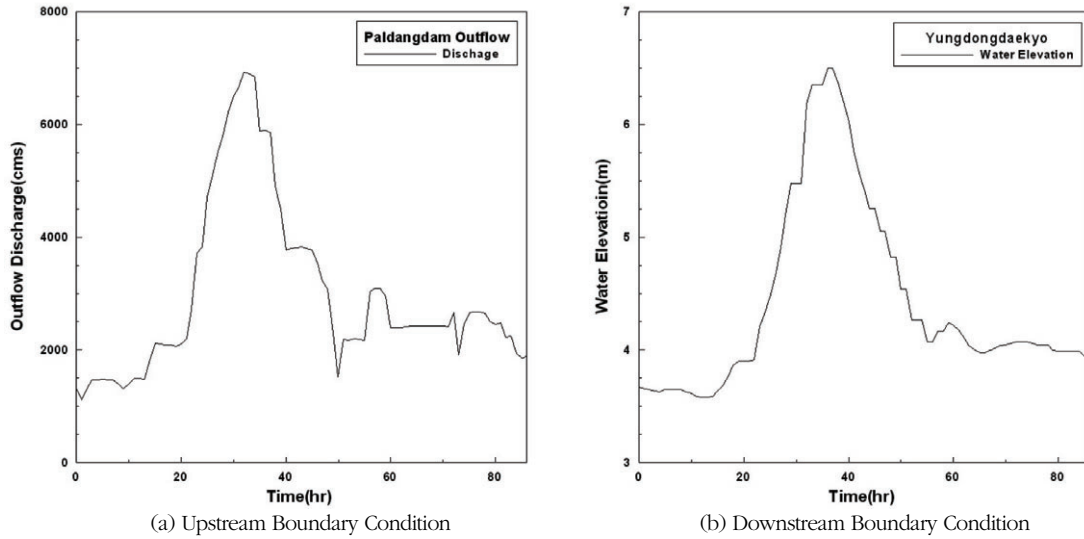


Fig. 12. Boundary Condition in 'RUSA'

흐름특성과 하천주변 조건을 고려한 조도계수 값과 하천정비기본계획 상의 조도계수를 고려하여 0.035를 적용하였다.

또한 일반적인 여름철 홍수사상에 대해 모의를 실행하기 위해 2003년 8월 6일 01시에서 2003년 8월 10일 04시까지 99시간에 걸쳐 부정류모의를 실시하였다. 마름/젖음 알고리즘의 매개변수를 선정함에 있어서도 태풍 '루사' 사상에 대한 모의와 마

찬가지로 가상하도와 인공하도에 대한 모의자료와 실측자료를 비교하여 결정하였다. 상류단 경계조건과 하류단 경계조건에 대한 입력값은 Fig. 13에서 나타내고 있다. 입력 최대 유량은  $5,594\text{m}^3/\text{s}$ 이며 계산시간간격은 0.5시간으로 결정하였으며 조도계수는 앞선 모의와 마찬가지로 Table 3에서 제시한 흐름특성과 하천주변 조건을 고려한 조도계수 값과 하천정비기본계획 상의 조도계수를 고려하여

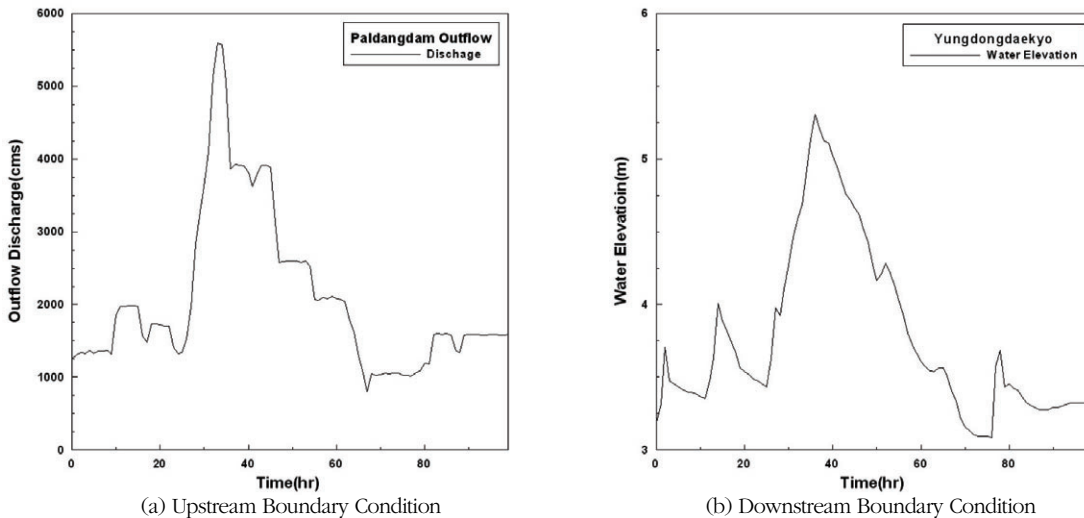


Fig. 13. Boundary Condition in '2003'

Table 3. Manning Coefficient According to Flow Condition

흐름 조건	n 값
하상조건이 양호한 하천	0.025~0.035
수심이 깊은 하천	0.018~0.025
식생이 없는 해안	0.020~0.030
식생피복이 많은 습지	0.050~0.100

0.035를 적용하였다.

### 3) 매개변수의 선정

가상하도와 실험하도에 대한 모의를 통해 영향성을 검토한 매개변수에 대한 적용 가능 범위를 설정하고 이를 토대로 마름/젖음이 발생하는 자연하천인 한강유역에 적용하고 이를 유역 내 수위관측소의 실측치와 비교함으로써 모의의 정확성을 검증하였다.

매개변수 AC1은 인공하도를 모의하는 과정에서 2~100까지 수 중 13가지 경우에 대해 적용하였다. 이 과정에서는 AC1값은 수심의 변화에는 거의 영향을 끼치지 않는 것으로 드러났으며 2~30까지는 모형에 의한 수치계산 값이 거의 일치하는 것으로 드러났으며 50이나 100정도의 값을 적용하였을 때 0.001~0.002m 정도의 차이가 나타났으나 그 차이는 미미하였다. 이것으로 보아 자연하천에서도 AC1값은 기본 값인 0.91m~100m사이의 값을 넣을 경우 수심의 변화에 영향을 끼치지 않을 것으로 보인다. 매개변수 AC1값은 모의의 안정성을 높이는 역할을 함으로 수치적으로 발산이 일어날 경우 적절히 AC1값을 높이는 방법을 사용하면 유용할 듯하다. 하지만 너무 작은 값의 AC1값은 유량을 줄이는 현상을 유발한다. 매개변수 AC2는 인공하도를 모의하는 과정에서 0.3~10까지 수 중 11가지 경우에 대해 적용하였다. 이 과정에서는 AC2값은 기본 값인 0.61m을 사이에 두고 0.3m와 2m사이의 값을 적용할 경우 수심변화에 큰 변화를 일으키지 않는 것으로 보인다. 특히 관측 값이 Station1의 중심 관측점인 0.2m지점에서 AC2값이 1.0m가 적용될 때 0.185m로 관측값 0.256m와 6.9cm의 근소한 차이를 보였지만 AC2값을 3m로 주었을 때는 18cm, 5m로 주었을 때는 43.3cm의 차이를 보이는 것을

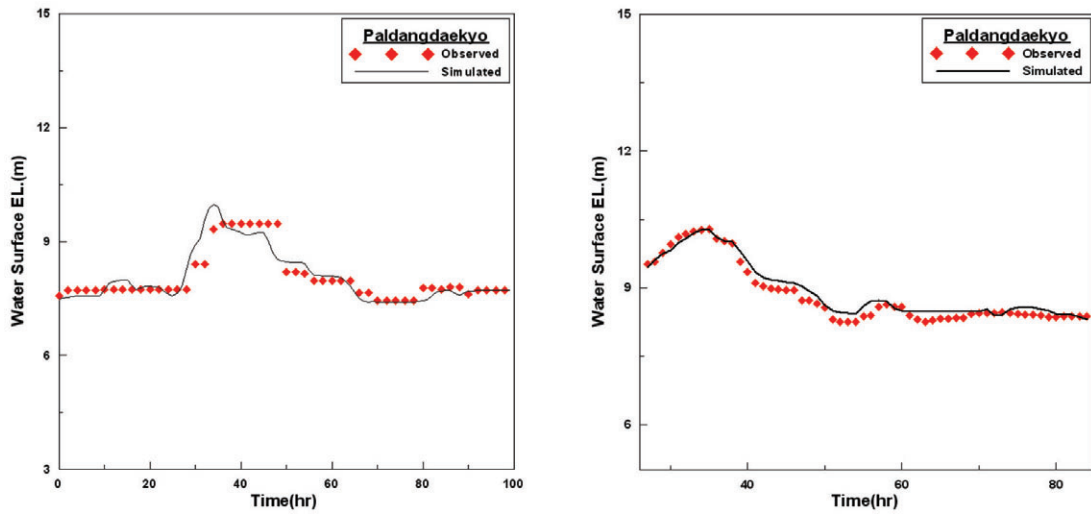
알 수 있다. 이를 통해 볼 때 AC2값은 0.3~2사이의 값을 넣는 것이 적절할 것으로 판단된다. 수심 변화에 가장 민감한 매개변수는 AC3이다. 매개변수 AC3는 반드시 0과 1사이의 값을 적용하여야 하며 일반적으로 기본 값인 0.02를 적용하는 것이 권장된다. 본 연구에서는 가상하도에서는 AC3값으로 0.04와 0.005값을 적용하였으며 인공하도에서는 0.0001~1사이의 값 중 11가지 경우에 대해 모의를 적용하였다. AC3를 0~0.1 사이의 값을 적용할 경우에는 관측 값과 유사한 패턴을 나타냈으며 계산 수심 역시 비슷한 양상을 나타내었다. 하지만 0.5이상의 값을 적용할 경우에는 급격히 수위 값이 늘어남을 볼 수 있었다.

이를 바탕으로 본 모의에서는 2002년 태풍 '루사' 사상에 대해서는 AC1값은 52m, AC2값은 1.00m 그리고 AC3값은 0.09를 적용하여 모의를 수행하였으며 2003년 8월초 홍수사상에 대해서는 AC1값은 49m, AC2값은 1.00m 그리고 AC3값은 0.09를 적용하여 모의를 수행하였다. 이를 검증하기 위해 모의 유역 내 수위관측소인 팔당대교 수위관측소의 시관측자료를 활용하여 모의의 적절성과 정확성을 비교하였다.

### 4) 모의 결과

Fig. 14는 태풍 '루사' 사상과 2003년 홍수사상에 대한 모의 결과와 실측치를 도시한 그림이다.

그림에서 보는 바와 같이 산정된 MP 매개변수를 적용한 모의결과는 팔당대교 수위관측소의 수위 관측 값과 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 산정된 매개변수를 적용한 모의가 적절히 수행되었음을 판단 할 수 있었으며 이는 본 연구에서 마름/젖음을 모의하기 위해 산정된 MP 매개변수가 타당한 것으로 판단된다. 수심에 민감한 AC2와 AC3값을 적절히 적용하지 못 할 경우 수심 값이 급격히 증가하거나 모의의 수행 시 계산이 발산하기 때문에 AC1값을 적절히 적용하여 모의의 안정성을 높이고 가상하도와 인공하도의 모의에서 얻은 데이터를 활용하여 논리적으로 타당한 값을 제시하였다.



(a) Result for 'RUSA'

(b) Result for 2003

Fig. 14. Simulation Results for Water Surface Elevation

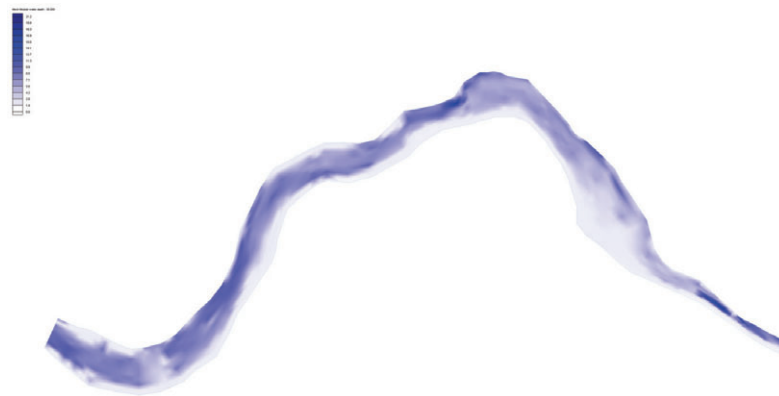


Fig. 18. Depth Contour '2002/9/1/21:00

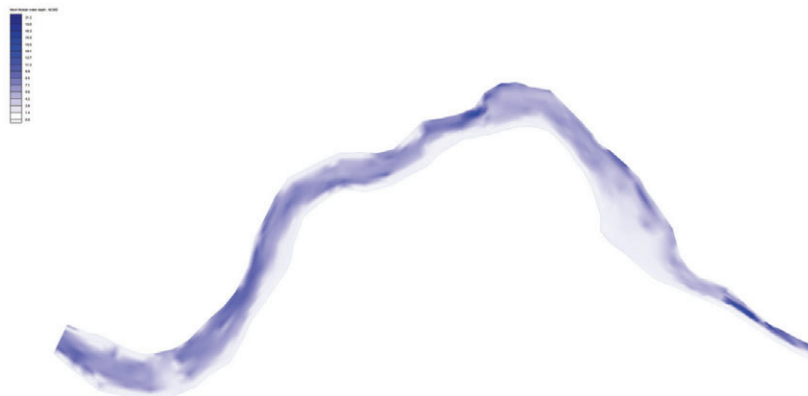


Fig. 19. Depth Contour '2003/9/1/09:00

지점에서 모의 결과 비교 뿐만 아니라 전체영역에서 등수심도를 비교함으로써 마름/젖음 현상이 발생하고 이를 효과적으로 모형이 처리함을 그림 Fig. 18과 Fig. 19를 통해 확인해 보았다. Fig. 18은 '루사' 사상에 대한 모의결과를 도시한 것이며 Fig. 19는 2003년 8월초의 홍수사상에 대한 모의결과를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 하도의 양안의 높은 지형을 갖는 마름부근에서 마름/젖음 현상이 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 본 논문에서 수행된 모의를 통해 마름/젖음 알고리즘의 매개변수를 적절히 제시하여 마름/젖음 현상을 효과적으로 처리하였음을 확인할 수 있었다.

Table 4와 Table 5는 각각의 홍수사상에 대해 마름/젖음 알고리즘의 매개변수를 적용하여 모의를

수행한 결과들을 나타내고 있다. 표에서 보는 바와 같이 산정된 MP 매개변수를 적용한 모의결과는 팔당대교 수위관측소의 수위관측 값과 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 마름/젖음을 모의하기 위해 산정된 MP 매개변수가 타당한 것으로 판단된다.

또한 모의의 정확성을 정량적으로 파악하기 위해 Table 6과 같이 평균제곱근 오차(Root-Mean-Square-Error)와 상관계수(Correlation coefficient)를 제시하였다. 표에서 보는 바와 같이 두 사상에 대해 평균제곱근 오차는 각각 0.16, 0.32로 나타났고 관측치와 모의치의 상관계수는 각각 0.99와 0.90로 나타났다. 이를 통해 모의가 성공적으로 수행되었음을 알 수 있었다.

Table 4. Simulation Results for 'RUSA'

관측시각(년-월-일-시)	수위관측값(m)	모의결과(m)	관측시각(년-월-일-시)	수위관측값(m)	모의결과(m)
2002-09-01-12	9.530	9.446	2002-09-02-09	8.730	8.926
2002-09-01-13	9.580	9.612	2002-09-02-10	8.650	8.834
2002-09-01-14	9.770	9.742	2002-09-02-11	8.560	8.614
2002-09-01-15	9.950	9.811	2002-09-02-12	8.300	8.494
2002-09-01-16	10.110	9.998	2002-09-02-13	8.260	8.454
2002-09-01-17	10.190	10.071	2002-09-02-14	8.250	8.437
2002-09-01-18	10.240	10.191	2002-09-02-15	8.250	8.420
2002-09-01-19	10.270	10.265	2002-09-02-16	8.370	8.598
2002-09-01-20	10.290	10.272	2002-09-02-17	8.390	8.711
2002-09-01-21	10.080	10.109	2002-09-02-18	8.580	8.729
2002-09-01-22	10.020	10.031	2002-09-02-19	8.640	8.697
2002-09-01-23	9.980	10.007	2002-09-02-20	8.580	8.555
2002-09-01-24	9.580	9.804	2002-09-02-21	8.580	8.493
2002-09-02-01	9.340	9.597	2002-09-02-22	8.390	8.482
2002-09-02-02	9.110	9.341	2002-09-02-23	8.300	8.482
2002-09-02-03	9.030	9.221	2002-09-02-24	8.250	8.485
2002-09-02-04	8.980	9.175	2002-09-03-01	8.290	8.483
2002-09-02-05	8.960	9.153	2002-09-03-02	8.330	8.480
2002-09-02-06	8.950	9.130	2002-09-03-03	8.330	8.477
2002-09-02-07	8.940	9.110	2002-09-03-04	8.340	8.475
2002-09-02-08	8.730	9.037	2002-09-03-05	8.340	8.474

Table 5. Simulation Results for '2003

관측시각(년-월-일-시)	수위관측값(m)	모의결과(m)	관측시각(년-월-일-시)	수위관측값(m)	모의결과(m)
2003-08-06-01	7.580	7.484	2003-08-07-08	8.410	9.063
2003-08-06-02	7.720	7.510	2003-08-07-09	8.410	9.572
2003-08-06-03	7.720	7.535	2003-08-07-10	9.320	9.871
2003-08-06-04	7.720	7.550	2003-08-07-11	9.320	9.980
2003-08-06-05	7.720	7.567	2003-08-07-12	9.480	9.897
2003-08-06-06	7.720	7.565	2003-08-07-13	9.480	9.530
2003-08-06-07	7.720	7.566	2003-08-07-14	9.480	9.364
2003-08-06-08	7.720	7.572	2003-08-07-15	9.480	9.317
2003-08-06-09	7.720	7.576	2003-08-07-16	9.480	9.289
2003-08-06-10	7.720	7.565	2003-08-07-17	9.480	9.246
2003-08-06-11	7.740	7.721	2003-08-07-18	9.480	9.167
2003-08-06-12	7.740	7.903	2003-08-07-19	9.480	9.177
2003-08-06-13	7.740	7.953	2003-08-07-20	9.480	9.226
2003-08-06-14	7.740	7.971	2003-08-07-21	9.480	9.244
2003-08-06-15	7.740	7.982	2003-08-07-22	9.480	9.235
2003-08-06-16	7.740	7.990	2003-08-07-23	9.480	9.033
2003-08-06-17	7.740	7.853	2003-08-07-24	9.480	8.699
2003-08-06-18	7.740	7.733	2003-08-08-01	9.480	8.536
2003-08-06-19	7.740	7.773	2003-08-08-02	8.200	8.496
2003-08-06-20	7.740	7.820	2003-08-08-03	8.200	8.472
2003-08-06-21	7.740	7.819	2003-08-08-04	8.200	8.459
2003-08-06-22	7.740	7.808	2003-08-08-05	8.200	8.445
2003-08-06-23	7.740	7.804	2003-08-08-06	8.170	8.446
2003-08-06-24	7.740	7.707	2003-08-08-07	8.160	8.421
2003-08-07-01	7.740	7.612	2003-08-08-08	7.970	8.236
2003-08-07-02	7.740	7.580	2003-08-08-09	7.970	8.122
2003-08-07-03	7.740	7.628	2003-08-08-10	7.970	8.108
2003-08-07-04	7.740	7.820	2003-08-08-11	7.970	8.096
2003-08-07-05	7.740	8.279	2003-08-08-12	7.970	8.093
2003-08-07-06	8.410	8.662	2003-08-08-13	7.970	8.084
2003-08-07-07	8.410	8.905	2003-08-08-14	7.970	8.070

Table 6. RMSE and CC for the Simulation

사상 \ 오차	RMSE	CC
2002년	0.16	0.99
2003년	0.32	0.90

## V. 결론

본 연구에서는 자연하천 및 습지에 대해 2차원 유한요소모형을 활용하여 모의함에 있어 마름/젖음 알고리즘(MP기법)을 적용하여 보다 효과적이고 정

확한 모의가 가능하도록 하기 위해서 매개변수에 대한 영향을 검토하였다. 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. Marsh Porosity의 매개변수 AC1, AC2, AC3에 대한 영향을 검토하기 위해 마름/젖음이 나타나는 가상하도와 실험하도에 적용하여 모의를 실시하였다. 가상하도에 대해서 총 6가지 경우의 모의를 실시하였고 실험하도에 대해서는 AC1에 대한 영향을 알아보기 위해 13가지 경우의 모의를 실시하였고 AC2와 AC3에 대해서는 각각 11가지 경우에 대



해서 모의를 실시하여 매개변수를 적용함에 있어 적절한 범위를 제시하고자 노력하였다.

2. 모의결과 매개변수 AC1은 수심의 변화에는 거의 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났으며 50~100 정도의 값을 적용하였을 때 0.001~0.002m 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 다만 AC1값이 작은 경우보다 큰 경우 안정적인 모의를 수행하므로 마름/젖음을 모의하고자 할 때에는 수치해가 발산하지 않는 범위에서 큰 AC1 값을 선택하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 매개변수 AC2는 기본 값인 0.61m을 사이에 두고 0.3m와 2m사이의 값을 적용할 경우 수심변화에 큰 변화를 일으키지 않는 것으로 확인되었다. 이를 통해 볼 때 AC2값은 0.3~2사이의 값을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

3. AC3는 수심의 변화에 가장 민감한 매개변수로서 반드시 0과 1사이의 값을 적용하여야 한다. AC3를 0~0.1 사이의 값을 적용할 경우에는 수심의 변화가 작게 나타났으며 관측 값과도 비교적 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 0.5이상의 값을 적용할 경우에는 급격히 수위가 증가함을 볼 수 있었다. 이를 통해 볼 때 AC3는 0~0.1의 값을 사용하되 되도록 작은 값을 사용하는 것이 안정적인 모의를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 이를 바탕으로 2002년 태풍 '루사' 사상에 대해서는 AC1값은 52, AC2값은 1.00, AC3값은 0.09를 적용하여 모의를 수행하였으며, 2003년 8월초 홍수사상에 대해서는 AC1값은 49, AC2값은 1.00, AC3값은 0.09를 적용하여 모의를 수행하여 관측치와 비교한 결과 본 연구에서 산정된 매개변수를 적용한 모의가 적절히 수행되었음을 판단 할 수 있었으며 이는 본 연구에서 마름/젖음을 모의하기 위해 산정된 MP 매개변수가 타당한 것으로 판단 된다. 또한 자연하천 및 습지에서 빈번히 발생하는 마름/젖음 현상에 대하여 본 연구를 통해 제시된 MP 매개변수를 적용함으로써 좀 더 안정적이고 정확한 모의를 수행할 수 있을 것으로 판단되며 또한 RMA-2 모형을 사용하여 하천정비기본계획이나 환경영향평가를 수행하는 사용자들이 본 연구결과

를 이용한다면 좀 더 안정적이고 정확한 모의를 수행할 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.

## 참고문헌

- 건설교통부, 2002, 한강 수계 하천정비기본계획(팔당댐-한강하구), 420-423.
- 국토해양부, 2006, 낙동강(상류) 하천정비기본계획(부도), 2-300.
- Bates, P. D. and Hervouet, J. M., 1999, A new method for moving boundary hydrodynamic problems in shallow water, *Proceeding. R. Soc. London, Ser. A*, 455, 3107-3128.
- Balzano, A., 1998, Evaluation of methods for numerical simulation of wetting and drying in shallow water flow models, *Coastal Engineering*, 34, 83-107.
- Donnell, B. P., *et al.*, 2001, User's guide for RMA2 version 4.5, U.S. Army, Engineer Research and Development Center, Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, Miss, 42-86.
- Gopalakrishnan, T., 1989, A moving boundary circulation model for regions with large tidal flats, *International Journal for Numerical Method in Fluids*, 28, 245-260.
- Hervouet, J. M. and Janin, J. M., 1994, Finite element algorithms for modeling flood

- propagation, *Modeling of Flood Propagation over Initially Dry Areas, Proc., Specialty Conf. Co-sponsored by ASCE-CNR/GNDCI-ENEL spa*, Milan, Italy, ASCE, New York, 102-113.
- King, I. P., 2000, RMA2 Version 6.6 User Manual, Publication of Resource Management Associates, Inc., Suisun, Calif., 26-56.
- Roig, L. C., 1989, A finite element technique for simulating flow in tidal flats. Master. dissertation, University of California, Davis, 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, 522-535.

최종원고채택 09. 11. 17