

## 조석수동역학 모의에서 조간대 침수-노출 고려효과 비교연구 Comparative Study for dry-wet Treatment Effect in a Tidal Hydrodynamic Simulation

서승원\* · 김정훈\*

SeungWon Suh\* and JungHoon Kim\*

**要 旨** : 서해연안에 발달된 조간대의 효과가 수치모의에 미치는 영향을 평가하기 위하여 유한요소 조석수동역학 모형인 ADCIRC에 침수-노출을 적용하여 금강하구와 전북해역에서 특성을 살펴보았다. 전북해역에서 관측조류와 비교한 결과 RMS오차 분석으로 대조시 1 cm/sec 정도로 최대 조류속 대비 3% 이내에서 매우 잘 일치하고 있으나, 침수-노출 처리의 장점이 크게 부각되지 않는 것으로 나타났다. 금강하구에 대한 조랑평가는 조간대의 침수-노출 영향이 대체로 5% 내외에서 국한되지만 인근 특정 단면에서는 20% 이상의 차이를 보인다. 조석 잔차류 비교 평가에서 조간대 고려 유무 영향이 거의 나타나지 않으며, 전체적으로 조석수동역학 해석결과에 미치는 효과는 미미한 것으로 분석되었다. 조간대의 침수-노출 고려 유무는 연구목적에 따라 달리 취해야 되겠지만, 장기간의 확산모의와 결합되는 경우 등에는 조간대의 노출을 고려하지 않아도 충분할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 조간대, 침수-노출, 조석모의, 조랑, 잔차류

**Abstract** □ In order to evaluate the effect of dry-wet treatment on well developed tidal flats along the complex coastal line in the western part of Korean Peninsula, we adopted a finite element tidal hydrodynamic simulation model, ADCIRC incorporating newly suggested dry-wet option and applied it to Chonbuk coastal area and Keum river estuary. Model comparison with observed current data by RMS error in the Chonbuk area shows very good agreement within 1cm/sec of tidal velocity difference and 3% of error to maximum tidal currents. However there is not seen any significant advantages in dry-wet treatment. For the tidal volume tests in the Keum river estuary, the differences are satisfied within 5% nevertheless of dry-wet treatment but in a near cross section it marks over 20%. However both results are almost same in tidal residual tests. Thus it can be concluded that dry-wet option is not always necessary in the simulation of long-term dispersion analysis.

**Keywords** : tidal flats, dry-wet, tide simulation, tidal volume, residual currents

### 1. 서 론

연안수치모델링은 새만금과 시화호 같은 부영양화 환경문제나 군장지구 개발사업 같은 연안해역 관리 및 퇴적물 이동과 임해 발전소의 열확산 오염저감 방안 모색 등 다양한 해안공학적인 연구에 유용한 도구로써 활용되고 있다. 그러나 우리나라의 서해안은 많은 도서가 산재해 있고 지형이 복잡하며, 조석의 간만의 차가 크게 나타나고 연안을 따른 조간대가 폭 넓게 형성되어, 이에 대한 수치

모델링에 어려움이 따르고 있다. 퇴적 및 확산모델링에는 기본적으로 해수유동의 모의가 필요하며, 유한차분 방법과 불규칙한 지형 및 수심을 용이하게 표현할 수 있는 유한요소법을 이용한 접근이 활발히 이용되고 있다.

복잡한 해안과 넓은 조간대를 가지는 서해안 및 남해안의 조류해석을 보다 합리적으로 수행하기 위해서는 조간대의 침수-노출을 효율적으로 처리할 수 있는 이동경계 기법이 도입된 유한요소모형의 적용이 물리적 조건을 반영하는 접근방법이라고 사료되지만 이렇게 조간대 침수-

\*군산대학교 해양시스템공학과(Corresponding author: Seung Won Suh, Department of Ocean System Engineering, Kunsan National University, San 68, Miryong-dong, kunsan, Chonbuk 573-701, Korea. suh@kunsan.ac.kr)

노출 처리를 반드시 반영해야 하는지 여부를 면밀히 살펴보는 것이 필요하고 선행되어야 할 것이다. 근지에는 과거에 상상할 수 없었던 하드웨어의 눈부신 발전과 수치 해석 기법의 병렬화 등으로 슈퍼컴퓨터를 사용하지 않아도 매우 상세한 격자망을 취하면서 연안역의 모델링이 가능하게 되었다. 예를 들면 국내에서도 고해상도의 유한요소 모형에 병렬처리를 도입해 서해안의 조간대를 포함한 황해전체의 신속한 조석산정이 수행된 것이 보고되고 있다(최 등, 2001). 이처럼 하드웨어의 눈부신 발전과 연안역의 상세한 정보취득 욕구가 집중하지만 조석수치모델링에서 연안의 조간대의 침수-노출에 따른 최적의 해석결과를 얻기 위한 기본적인 노력도 경주되어야 할 것이다.

조간대를 포함한 연안 경계역에서 이동경계를 고려하는 방법을 대별하면 다음과 같다. 첫째로 시간에 따라 변화하는 영역을 표현하도록 격자를 생성시켜 엄밀하게 표현하지만 계산상의 비효율성과 수치적 불안정이 내포되는 mesh adoption 알고리즘(Gopalakrishnan and Tung, 1983)과 둘째로 고정된 유한요소 격자망에서 육지경계를 그대로 이용하면서 시간에 따라 변화되는 침수선을 이동시키는 mesh reduction 알고리즘(Kawahara and Umetsu, 1986)이 있다. Kawahara and Umetsu는 하천에서 이동경계문제를 격자의 변동 없이 침수와 노출 영역을 구별하여 계산하는 방법으로 해결하였으며, King and Roig(1988) 및 Roig and Evans(1994)는 element volume coefficient를 도입하여 해수면 변위를 임의로 변화시켜가며 노출영역을 처리하는 방법을 RMA2(King, 1992)에 적용하였다. Bates 등(1995)은 부분적으로 침수된 요소의 계산에서 노출된 점점의 수표면 변위값에 일정한 관계식을 도입하는 방법을 TELEMAC-2D 모형에 적용하였다. 국내에서는 정과 김(1992)이 Kawahara and Umetsu의 방법을 유한요소법에 적용하여 남해안의 마로해에 적용하였고, 서와 박(1996)이 위와 유사한 접근방법을 따랐으나, 조석모의시 장파의 특성을 고려한 파형경사를 계산에 도입한 유한요소모형 STEP-CM(Superior Two-step Explicit Program for Coastal Modeling)을 수립하여 침수만에 적용해 보다 효율적이고 현실적인 결과를 제시한 바 있다. 한편 유한차분모형인 POM에서 지배방정식을 반음해법으로 차별화하여 mode splitting을 제거하고 조간대 처리 기법을 도입하여 응용한 안정된 3차원 semi-implicit 모델의 결과가 발표되었다(이 등 2000). 이들은 mode splitting 기법을 사용하는 3차원 동수역학모델의 경우 time step의 차이로 조간대 처리 기법을 합리적으로 도입하기가 어려운 점이 있다고 지

적하였다.

조석수동역학 해석에서 조간대 처리 유무에 대한 필요성은 연구목적에 따라 충분히 검토하여 평가되어야 할 것이다. 즉, 조석수동역학 모의만 단독으로 수행하여 조석 예보나 해황의 변화를 살펴보는 경우, 연안에서 단기간의 제방축조나 준설매립공사로 인한 부유사 또는 소류사 이동기작과 이로 인한 침퇴적 및 사주형성 예측의 경우 그리고 해양방류구를 통한 오염물질의 확산과 임해발전소로부터 배출되는 열오염으로 온배수확산 등 연안오염과 결부된 경우 등에 대하여 해당해역이 조간대를 포함하는 경우에 이를 수동역학에 반드시 반영해야 할 것인지 여부를 모델링 이전에 충분히 검토하여야 할 것이다.

본 연구에서는 복잡한 해안경계의 처리와 조간대의 침수-노출을 반영할 수 있는 ADCIRC(Luetlich *et al.*, 1992) 모형을 조간대가 발달된 군장지역과 전북해역에 적용하여 이들의 특성을 비교하면서 살펴보도록 한다. 군장지역은 김(2002)이 수년에 걸쳐 침퇴적 및 항로 매몰로 인한 해안 수동역학을 심도있게 연구한 바 있으며, 서(2002)가 유한요소모형을 적용한 것 등 복잡한 해안과 인공 구조물에 의한 조류의 변화를 만족하게 재현하고 이에 따른 퇴적환경의 변화를 심도 있게 해석한 여러 연구가 있으나, 조간대의 침수-노출을 고려한 비교 평가 해석은 충분하게 이루어지지 않았다. 전북해역은 영광원자력 발전소 이북의 전북지역으로, 이 일대 해안에 대한 조석 모델링에 연안의 조간대 고려여부가 결과에 여하히 영향을 미치는지를 평가하기 위하여 실시한다. 본 연구에서는 조간대의 침수-노출 처리 특성과 모형의 적용성을 평가함과 동시에 이에 따른 필요성을 함께 검토하도록 한다.

## 2. 이동경계를 반영하는 유한요소 수동역학 모형

### 2.1 ADCIRC모델

조간대의 침수-노출 고려효과를 분석하기 위하여 고려하는 유한요소 수치 모델로 국내외에서 활용예가 많은 모델 중 하나인 ADCIRC 모델을 선정하여 평가하도록 한다. ADCIRC(ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine water)는 유한요소법의 특성을 충분히 이용하는 모델로 복잡한 육지경계를 정밀하게 처리하며, 장기간 광역에서 해수순환을 모의할 수 있도록 개발된 모형이다. 근간에는 광역을 처리하는데 있어 계산효율을 증진시키기 위해 영역분할 및 집합방법을 이용한 계

산의 병렬화가 추가되어 이를 이용한 연구결과가 제시되고 있다(Chipada *et al.*, 1996; 최 등, 2001). ADCIRC 모형은 수심 적분된 2차원 모형(2DDI; two-dimension, depth-integrated)과 3차원 모형(3DVS)으로 구성되어 있다. 2DDI는 해저 마찰계수와 운동량 확산(momentum dispersion) 계수를 이용하는 수심 적분된 external mode equation 만 풀게 되어있고, 3DL(three-dimensional, local)은 mode splitting 기법을 이용하여 2DDI에서처럼 external mode 에서 자유수면에 대해서 수심적분된 연속방정식과 운동방정식을 풀고 internal mode에서 상대적으로 긴 time step 동안 3차원 방정식을 풀어 수직성분을 계산한다. 본 연구에서는 2차원 ADCIRC모형을 적용하여 조간대의 침수-노출 처리효과를 평가하도록 한다.

### 2.2 기본 방정식

2차원 ADCIRC는 수심 적분된 천수방정식을 풀며 연속방정식은 다음 식 (1)과 같고, 보존성의 운동방정식은 아래 식 (2), (3)과 같다(Luettich *et al.*, 1992).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial UH}{\partial t} + U \frac{\partial UH}{\partial x} + V \frac{\partial UVH}{\partial y} - fVH \\ = -H \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta \right] + D_x + B_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VH}{\partial t} + U \frac{\partial VUH}{\partial x} + V \frac{\partial VVH}{\partial y} + fUH \\ = -H \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta \right] + D_y + B_y - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\zeta$ =지오이드를 고려한 해수면,  $U, V$ =수심적분된 수평방향 유속,  $H=\zeta+h$ =총수심,  $\rho_0$ =물의 밀도,  $p_s$ =압력,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ = $x, y$ 방향의 바닥마찰응력,  $B_x, B_y$ = $x, y$ 방향의 경압 가속항,  $D_x, D_y$ = $x, y$ 방향의 운동량확산항,  $f=2\Omega \sin\phi$ =Coriolis 인자 그리고  $H(x,y,t)=h+\zeta$ =지오이드를 고려한 수심이다.

질량보존법칙의 원시적 형태인 기본방정식을 적용할 때 발생하는 수치적 오차를 줄이기 위해 ADCIRC에서 연속 방정식을 일반화된 파동연속방정식(GWCE, Generalized Wave Continuity Equation)으로 대체한다. GWCE는 식 (1)의 수심적분된 연속방정식과 식 (2)와 식 (3)의 운동 방정식이 기본이 된다. 연속방정식을 시간에 대하여 미분하고 운동방정식을 각각  $x$ 와  $y$ 에 대하여 미분한 후 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 UH}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 VH}{\partial t \partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 UH}{\partial t \partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ -\frac{\partial UUH}{\partial x} - \frac{\partial UVH}{\partial y} + fVH - H \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta \right] \right. \\ \left. + D_x + B_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 VH}{\partial t \partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ -\frac{\partial UVH}{\partial x} - \frac{\partial VVH}{\partial y} - fUH - H \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta \right] \right. \\ \left. + D_x + B_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (4)에 식 (5)와 식 (6)을 대입시킨 후 안정성을 증가시키기 위하여 수치해석 가중치인  $\tau_0$ 를 곱하고 이송항을 비보존성 형태로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ U \frac{\partial \zeta}{\partial t} - UH \frac{\partial U}{\partial x} - VH \frac{\partial U}{\partial y} + fHV \right. \\ \left. - H \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta \right] + D_x + B_x - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + \tau_0 UH \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V \frac{\partial \zeta}{\partial t} - UH \frac{\partial V}{\partial x} - VH \frac{\partial V}{\partial y} - fUH - H \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta \right] \right. \\ \left. + D_y + B_y - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + \tau_0 VH \right\} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$\tau_0$ 는 저면 마찰계수가 선형일 경우 영역내의 값 중에서 가장 큰 값이 이용되지만, 저면 마찰이 비선형인 경우는 마찰계수를 수심으로 나눈 값에 유속을 곱하고 그 중 가장 큰 값을 사용하는 것이 권장된다(Luettich *et al.*, 1992).  $\tau_0$ 는 일반적으로 0.001~0.1 사이의 값을 갖는다. 민감도 분석은 추후의 연구로 남거나 본 연구에서는 0.0025의 값의 범위를 적용하면서 수치실험한다. 상기 기본식에 대한 수치근사화는 Galerkin의 가중잔차 유한요소법을 적용하여 weak solution을 구하게 된다

### 2.3 조간대 처리기법

복잡한 해안과 넓은 조간대를 가지는 서해안에서 조석과 흐름을 보다 합리적으로 재현하기 위해 조간대의 침수-노출을 고려할 수 있는 ADCIRC 유한요소모형이 적용되는데, 침수-노출 처리 때 몇 가지 제한사항이 내포된다. 조간대를 포함한 대상영역에서 매 시간단계 마다 침수-노출 상태를 판별하여 GWCE system matrix를 재구성해야 하므로 필연적으로 모의 수행시간이 증가한다. 그

의 대두되는 문제점으로 mesh reduction 알고리즘을 적용할 경우 수치적 기법과 가정들에 있어서 질량보존이 완전히 만족되지 않는다는 것이고, 모의 결과를 시간 및 공간적으로 변화되는 자연현상과 비교 검증하는 것이 어렵다.

ADCIRC 모형에서 침수와 노출의 판단은 총수심에 의해서 결정한다. 총수심이 0보다 작으면 노출로 판단하는 것이 물리적으로 타당하지만 계산의 안정을 위해 노출로 판정하는 최소 수심은 일반적으로 0.01~0.1값을 사용하는 데, 본 연구에서는  $H_0=0.1$  m를 기준으로 적용한다. 그렇지만 수심에 의해서 침수-노출이 결정되어도 원활한 조건대 처리를 위해 다음과 같은 절차에 따라 제어하여 모델의 안정성을 높이도록 하였다.

모델 내의 변수로 노출된 상태에서 재침수가 되기 전까지 노출영역으로 지속하게 하는 최소 time step인 NODEDRYMIN과 반대로 재노출이 되기 전까지 침수영역으로 유지하게 하는 NODEWETMIN이 있으며, 인근 노드가 침수일 때 원활한 압력 경사를 위해 침수로 처리하도록 하는 최소 유속인 VELMIN이 있다. 일반적으로 NODEDRYMIN과 NODEWETMIN값은 5~20초를 가지며 VELMIN 값은 0.05 m/s가 사용된다. 즉, 간사지 발생 초기에 수심이  $H_0$ 보다 작게 되더라도 NODEWETMIN보다 작은 time step 안에서 계산되거나 영역에 VELMIN보다 큰 유속이 있는 경우는 노출로 계산하지 않는 조건을 두었다. 아울러 제어인자 중 적분시간 간격 영향이 지배적으로 작용하여 만약 노출영역에서 VELMIN보다 큰 유속이 생겨도 NODEDRYMIN보다 작은 time step에서는 노출에서 침수로 변환하여 계산하지 않도록 하였다.

대부분의 비선형항이 모형 내에서 양해법으로 처리되기 때문에 전처리에는  $Cr$ (Courant number)가 모형에서 권장하는 최대 값인 1.5를 넘지않도록 유의하면서 전처리 과정에서 대상해역을 이산화 시켜야 한다. 이를 만족시키기 위해서는 연안수동역학 모의시 유한요소망을 다양하게 구축하는데 활용되는 유용한 도구 중의 하나인 AceGredit (Turner and Baptista, 1992)을 이용하였다. 모형은 안정성이 보장되는 한계 내에서 가장 큰  $\Delta t$  값을 이용하는데,  $\Delta t$ 는 식 (8)의 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 안정조건에 지배된다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2gh}} \quad (8)$$

실제 모델링에서는 간사지를 표현하기 위해 특정 대상 영역을 노출지역으로 초기화하는 전처리 과정이 전체 수

치해석 결과에 영향을 크게 미치게 되므로 세심한 주의가 요구된다. 초기 수심은 평균 해수면을 기준으로 입력되며 조건대를 포함한 특정 영역에서는 전처리 과정에서 노출지역으로 초기화시켜 격자과일로부터 모델에 정보를 제공한다.

#### 2.4 모형수립 및 개방경계

간사지 처리 효과와 적용성을 비교 검토하기 위해 군장해역과 전북해역에 ADCIRC 모형을 적용한다. 전북해역은 Fig. 1에 도시하였는데, 이 일대의 조석수동역학 모의를 위해 영광원전을 중심으로 북측연안의 발달된 조건대를 포함하는 관심해역에 대해서는 70~80m로 해상하고 외해 경계에서는 수 km가 되도록 유연한 격자구성을 하

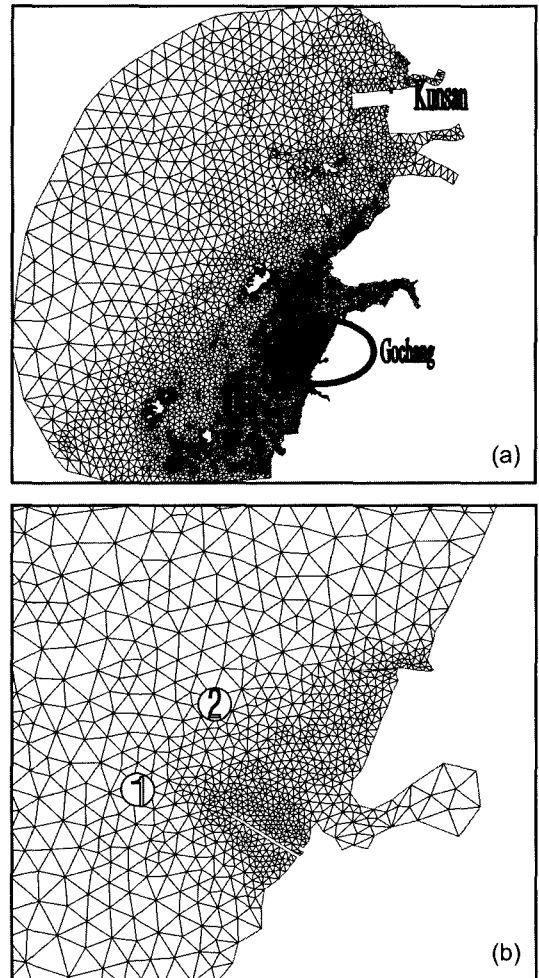


Fig. 1. Model domain for (a) Chonbuk coastal area and (b) in the vicinity of Kusipo.

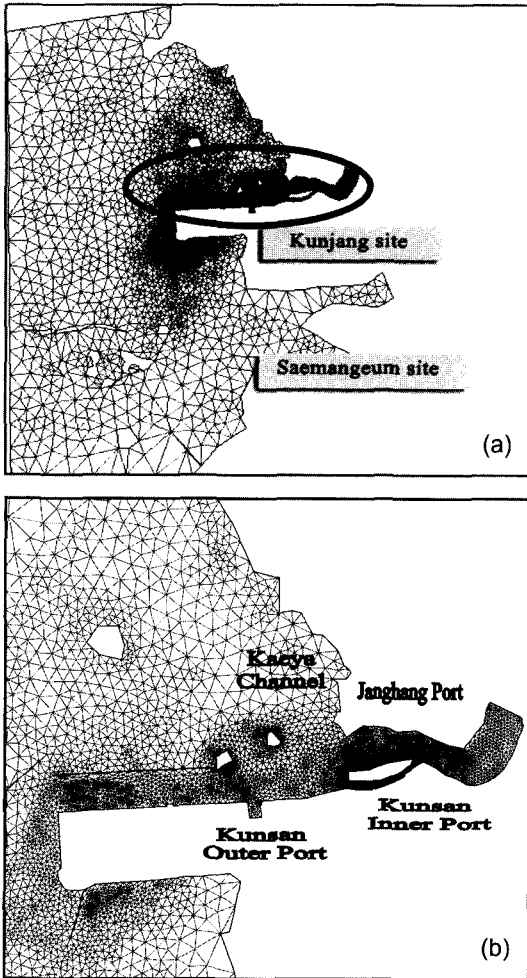


Fig. 2. FEM meshes for (a) the Kunjang harbor and (b) Keum river estuary.

였다. 전북해역은 대상해역 전체의 면적이 8275 km<sup>2</sup>이며, 평균해면 이하의 영역은 16.04 km<sup>2</sup>, 그리고 간사지는 3.82 km<sup>2</sup>으로써 주로 연안을 따라 분포한다. 이때의 총 절점수는 5577개이며 요소는 10338개이다. 군장해역에 대한 유한요소의 이산화를 포함하여 본 연구에서 중점을 두는 간사지 처리가 포함되는 상세화된 금강하구의 격자체계가 Fig. 2에 도시되었다. 전체 해역의 면적은 1963 km<sup>2</sup>이며, 이 중에서 평균해면 3.49m 이하의 영역이 차지하는 면적은 15.54 km<sup>2</sup>이며, 간사지는 4.39 km<sup>2</sup>를 차지하여 평균해면 이하에서 차지하는 비중은 28%에 달한다. 이산화시 총절점수와 요소수는 각각 6721, 12591개이다. 모델의 주요 구동력은 모형의 개방경계에서의 조위와 위상각인데 본 연구대상 해역의 조석형태수가 0.2로써 만일주

조가 우세하기 때문에 조석분조 중에서 황해전체의 모델 결과(서, 1999)로부터 추출한 M<sub>2</sub> 및 S<sub>2</sub> 분조 두 가지의 조위와 위상각을 사용하여 개방경계에 선형 보간하여 적용하였다. 아울러 타 연구기관에서 발표한 조화분해 측정 자료(한국해양연구소, 1996)는 모형의 보정에 적용하였다.

### 3. 계산결과 및 토의

조간대가 발달된 연안역에서 조석수동역학 모의시 침수-노출 처리가 반드시 필요한 것인가라는 기본적인 점을 검토하고, 침수-노출을 처리한다면 적용하는 기법에 대한 적합성과 효율성이 여하히 영향을 미치는지를 평가하기 위해 ADCIRC 모형을 군장해역과 전북해역에 적용하여 실측치와 비교 및 특정 통수단면에서 조랑 비교 등을 수행하였다. 모형의 수월성과 현장 적용성을 포함한 객관적 타당성을 제시하기 위해 기존의 관측자료 및 본 연구기간 중 실측한 값들을 이용한 모형의 보정과 검증을 실시한 후 평가에 적용하였다. 모형의 검증 후 평가에서 전북해역의 경우는 조간대를 고려하지 않은 조화함수를 이용한 3차원의 조석 수동역학 모형인 TIDE3D와 수치해석 결과를 상호 비교하였다. 군장해역의 경우는 조간대를 처리한 결과와 처리를 하지않은 수치적 결과를 상호 비교 평가하였다

대부분의 연안 수동역학 모델링에서는 불규칙한 수심의 분포가 계산격자망에서 제대로 해상되지 않는 경우에 수치적 진동이나 발산을 나타내기도 한다. 그러므로 모델링 단계에서는 인위적인 평활화(smoothing) 등을 통해 수치적인 안정을 꾀하기도 하나, 본 연구의 목적은 최근의 축적된 자료를 바탕으로 조간대의 처리효과를 평가하는 것이므로 인위적인 평활화는 고려하지 않았다. 그러나 정확한 수심자료의 확보는 조간대의 침수-노출 영향을 평가하는데 기초적으로 구비되어야 하는 필수 조건 중의 하나이다.

#### 3.1 전북해역에서의 모형검증

본 연구에서 적용하는 ADCIRC 모형의 객관적 적용성을 입증하기 위하여 실측조류와의 비교를 전북해역에서 우선적으로 실시하였다. 전북해역은 전라남도와의 도계를 이루는 영광원전 배출구 이북 해역으로서 주변의 방류제 및 들제 등의 인공 구조물 축조로 인하여 인위적인 해안선의 변화가 있었으며, 고창 전면해역으로는 조간대가 연안을 따라 좁게 띠를 이루며 분포되어 있다. 본 절에서는 이

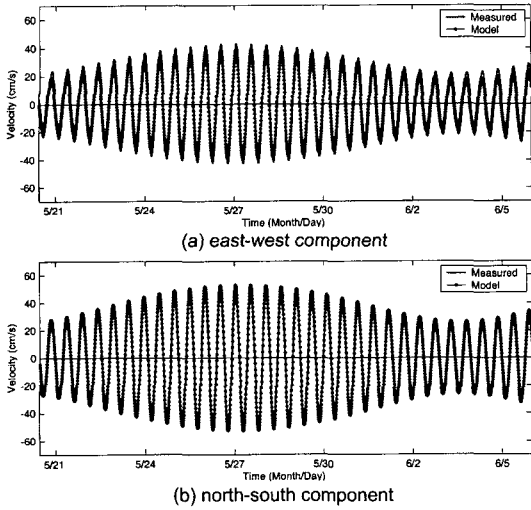


Fig. 3. Comparison between ADCIRC results for east-west and north-south components of tidal velocities with observed data of May, 2002.

러한 변화된 육지 경계를 갖는 지역에서 고정격자 체계 상에서 시간에 따라 변화되는 행렬을 새로 구성하면서 전 북해역의 조류를 재현하고 관측치와 비교평가를 수행하고자 한다.

모형의 검증은 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 전북해역 정점 ①, ②에서 2002년 3월과 5월 각각 15일 동안 Aanderra RCM9를 계류하여 매 10분 간격으로 유황유속을 관측 후 남북방향 및 동서방향에 대해 조화분해한 조류를 이용하여 비교하였다. 조간대의 침수-노출을 고려하면서 실험한 결과를 5월 관측값과 비교하여 Fig. 3에 도시한 바 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 정량적인 평가를 위해 RMS 오차분석을 실시하였으며, 대조시 조석 1주기간 계산된 조류의 비교에서는 3월의 경우 동서방향으로  $U_{RMS}=1.3$  cm/sec, 남북방향으로는  $V_{RMS}=0.4$  cm/sec로 최대 조류속과 비교하면 0.8~3% 이내에서 만족하고 있다. 5월 자료와의 비교는 각각 1.0 cm/sec, 0.9 cm/sec로 나타나고 있으며, 최대 조류속 대비 1.6~2.5% 이내에서 만족한다. 이처럼 관측치의 조류속과 1 cm/sec 이내로 매우 잘 일치하고 있어 조간대의 침수-노출을 고려하는 ADCIRC 수치실험은 전북해역의 조석현상을 만족스럽게 재현하고 있는 것으로 판단된다.

수치모형 결과는 Fig. 4에서와 같이 돌제나 방류제 등 일종의 headland 선단부 주위에서 창낙조시 강한 와동(eddy) 현상을 잘 재현하고 있다. 그렇지만 오차분석을 통해서 알 수 있듯이 조간대의 침수-노출을 고려한 영향이

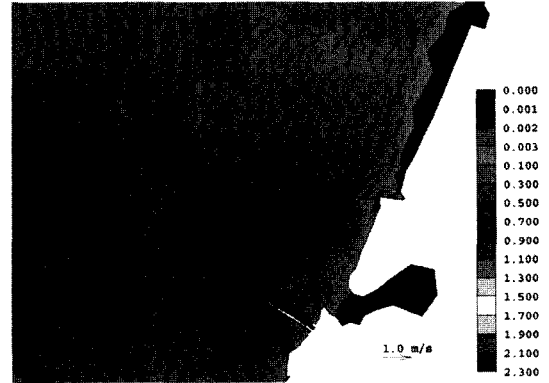


Fig. 4. Model results with dry-wet treatment on tidal flats for the Chonbuk area with well developed eddies in front of dike.

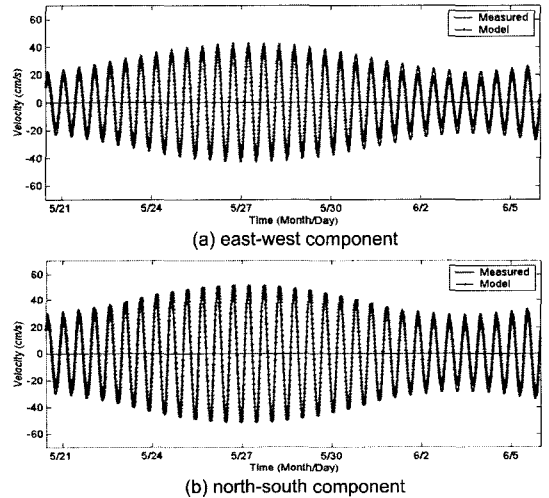


Fig. 5. Comparison between TIDE3D incorporating no dry-wet treatment with observed data of May, 2002.

수치해에 미치는 영향은 크지 않는 것으로 판단된다. 한편 조간대를 고려하지 않는 모델의 재현성을 평가하기 위해 TIDE3D모형을 적용하였으며, 수심적분된 조류속 결과를 Fig. 5에 도시하였다. RMS 오차 분석에 의하면 3월과 5월 각각의 동서방향  $U_{RMS}=1.6$  cm/sec, 1.2 cm/sec이며, 최대 조류속 대비 3.2~4.2% 이내에서 만족되고, 남북방향의  $V_{RMS}=0.4$  cm/sec, 0.7 cm/sec이고, 최대치와 비교하면 0.8~1.4% 이내에서 만족된다. 이 결과는 TIDE3D를 통한 모의 결과 ADCIRC 보다는 다소 정도가 떨어지나 이 역시 대체로 매우 만족스러운 결과를 제시하는 것으로 평가된다. 수치모형 결과는 동서방향이 남북방향에 비해 다소 일치하지 않으나 전체적으로 조류의 크기와 지

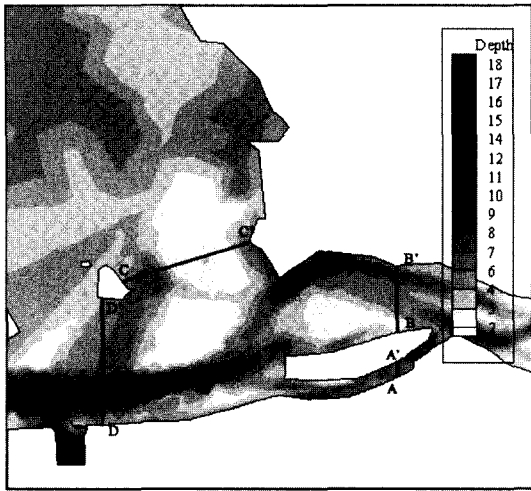


Fig. 6. Cross sections for tests of tidal volume evaluation.

각이 수치모형에서 매우 잘 재현되고 있다.

### 3.2 금강하구역에 대한 실험분석

본 연구에 적용한 수심자료는 입수 가능한 자료 중 가장 최근의 자료인 2001년의 측심자료(군산지방해양수산청, 2001)를 원시자료 형태로 제공받아 사용하였다. 조간대 평가에서는 동등한 정확도의 수심자료를 갖는 것이 전제된 경우에 모델의 특장점 비교를 목적으로 하고 있다. 실제 지형자료의 입력이 수동역학모형을 포함한 모델링에서는 가장 중요한 입력자료이다.

#### 3.2.1 조랑비교

전북해역에서 검증용 거친 수치모형을 조간대가 광범위하게 분포된 금강하구 일대의 조석수동역학 평가를 위해 주수로와 개야수로를 통과하는 조랑 검토에 이용하도록 한다. 조간대 인근과 관심영역에서 침수-노출 처리효과를 비교 평가할 목적으로 Fig. 6과 같이 임의의 4개의 통수단면을 설정하였다. 조간대 침수-노출을 고려한 경우와 그렇지 않았을 때의 비교단면을 통과하는 조랑을 평

균 대조시에 산출하여 Table 1에 수록하였다. 여기에서는 각 단면 마다 간사지의 침수-노출을 처리한 결과와 처리하지 않았을 때의 비율을 표시하여 상호간 차이점에 대한 평가를 실시하였다. 결과를 분석하면 간사지 처리시 전체적으로 조랑이 작게 나타나나 간사지의 침수-노출 영향이 고려하는 단면마다 서로 다르게 나타남을 알 수 있다. 간사지가 단면 내에 직접 포함되는 C-C'의 경우는 간사지 처리후 조랑이 처리전의 22% 정도로 나타나 매우 큰 차이를 보이지만, 단면 B-B'와 D-D'의 경우 5% 이내의 차이를 나타내고 단면 A-A'의 경우는 처리 후에도 변화가 거의 없다. 따라서 간사지의 침수-노출 영향이 주변 해역에 미치는 영향은 그리 크지 않으나 개야수로와 같이 간사지를 포함하게 되어 통수 단면적이 크게 줄어드는 경우(Fig. 7 참조) 국부적인 흐름의 변화가 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

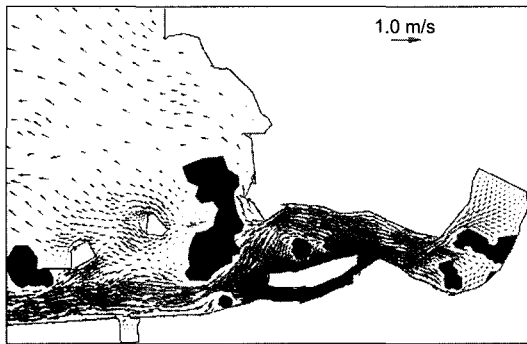
금강하구에서 조간대를 포함한 영역은 계산 수행시 저조를 중심으로 Fig. 7(a)와 같이 개야수로에 넓은 간사지로 나타난다. 이를 둘러싸는 비교단면 폭은 A-A'단면이 310m, B-B'는 1330m, C-C'는 2910m 그리고 D-D'는 2523m이다. 계산결과를 비교한 표에서 알 수 있듯이 간사지 침수-노출처리와 상관없이 단면 B-B', D-D'에서는 낙조류가 약간 우세하나 개야수로를 통과하는 단면 C-C'에서는 낙조량이 현저히 크게 나타난다. 모의 결과 창조시 최강 유속이 낙조시 최강 유속보다 크게 나타나지만 전체적으로 창조 시간보다 낙조시간이 길게 나타난다. 이와 같은 결과는 금강하구의 수리현상조사를 보고한 자료(군산지방해양수산청, 2001)의 결과와 유사하게 금강하구 해역이 낙조 우세임을 보이고 있다. 본 연구결과를 기존에 검토된 자료와 비교하기 위해 해양수산청의 관측치 및 실험치 중 내항수로와 단면 C-C'를 통과하는 개야수로의 두 곳을 본 연구의 수치모형 결과와 비교하여 Table 2에 나타내었다. 내항수로는 단면 B-B' 동측에 위치하므로 내항수로 조랑은 인근 단면인 B-B'의 조랑과 간접비교를 하였다.

Table 1. Comparison of tidal prism volumes for cross-sections near tidal flat ( $10^6 \text{ m}^3$ )

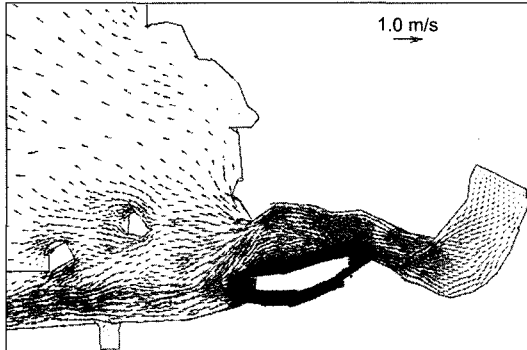
Cross Section	Flood		Ebb		Ratio of total volume Dry-wet/No treatment
	Dry-wet	Wet	Dry-wet	Wet	
A-A'	15.71	15.62	13.04	13.01	28.8/28.6 (100.4%)
B-B'	46.06	47.45	49.87	51.69	95.6/99.3 (96.3%)
C-C'	20.70	71.14	32.18	150.29	52.9/221.4 (23.9%)
D-D'	100.54	102.09	106.89	108.45	207.4/210.5 (98.5%)

**Table 2.** Comparison of tidal volumes ( $10^6 \text{ m}^3$ ) reported in previous study(군산지방해양수산청, 2001) and present study

Comparing cross section		Previous study		Present study using ADCIRC	
		Measured data (2001.7~8)	Calculated results	With dry/wet treatment	Without dry/wet treatment
Inner Channel (section B-B')	Flood	40.4	44.6	46.1	47.5
	Ebb	40.7	44.6	49.9	51.7
Kacya Channel (section C-C')	Flood	18.3	16.5	20.7	71.1
	Ebb	33.3	30.0	32.2	147.2



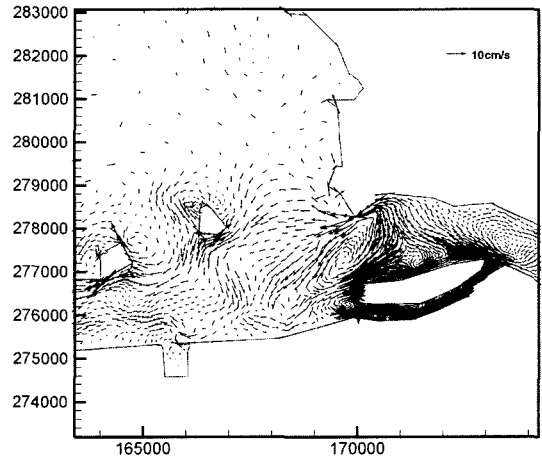
(a) With dry-wet treatment



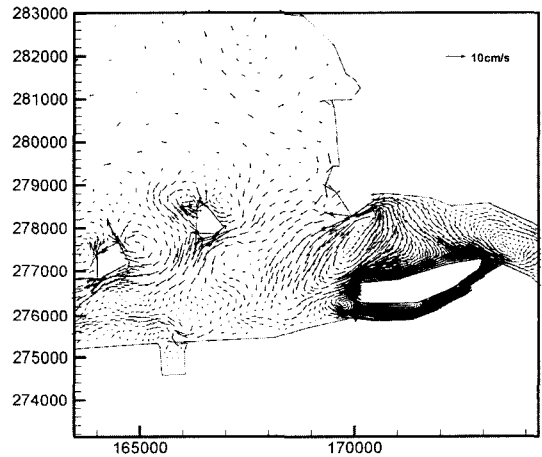
(b) Without dry-wet treatment

**Fig. 7.** Computed results (a) with dry-wet option and (b) without treatment.

개야수로를 통과하는 유량의 경우 간사지의 침수-노출을 처리한 결과는 기존연구(군산지방해양수산청, 2001)의 관측치와 상당히 근접한 것으로 나타나고 있으며, 특히 이전 연구의 계산치 보다도 관측치에 근접한 결과를 제공한다. 그러나 간사지 처리를 하지 않았을 경우에는 현저히 큰 값이 나타나는데 이는 시주가 발달된 개야수로 같은 경우 이에 대한 물리적인 고려가 모형 내부에서 재현되지 않아 단면 전체의 폭으로 조량의 유출입이 있게 되어 이에 기인된 결과로 판단된다.



(a) With dry-wet treatment



(b) Without dry-wet treatment

**Fig. 8.** Comparison of tidal residual currents between (a) with dry-wet (b) without treatment.

3.2.2 유속, 잔차류 비교

간사지 침수-노출을 고려한 조류의 계산결과는 저조시 유속을 비교한 Fig. 7과 잔차류를 도시한 Fig. 8를 통해 확연히 구분된다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 조간대의 침



수-노출을 고려하면 고려하지 않았을 때보다 전체적으로 유속이 작게 나타나나 개야수로와 주수로에서 특정시간대 인 낙조시에 유속이 집중되는 현상이 나타나고 있다. 잔차류의 계산결과는 간사지 처리시 조금 더 발달된 와류가 나타나지만 이 경우에도 개야수로 입구에서 조간대를 고려하면 잔차류가 11.9 cm/sec로 침수-노출을 고려하지 않았을 경우의 10.8 cm/sec 보다 약간 크게 난다. 이러한 결과는 앞서의 금강하구 수리현상보고서(군산지방해양수산청, 2001)에 근거한 관측값인 11.0 cm/sec와 비교하여 거의 같은 값을 나타내고 있다. 군산내항입구의 경우는 간사지 처리시 5.0 cm/sec, 처리하지 않았을 경우 4.5 cm/sec로 처리시가 관측값 5.0 cm/sec과 일치함을 보이고 있다. 즉, 금강하구역에서 계산된 잔차류는 조간대의 침수-노출을 고려한 것에 영향을 크게 받지 않고, 거의 같은 크기의 정도로써 무시할 수 있는 정도이며, 조간대 고려 유무가 잔차류에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 판단된다. 결론적으로 조간대 침수-노출 효과를 고려한 처리와 비처리 결과 모두 잔차류 관측치와 잘 일치하며 금강하구의 조석 수동역학을 만족스럽게 재현하는 것으로 판단된다.

3.2.3 조량의 시간별 변화

간사지의 침수-노출 고려 유무에 따라 조량을 시간별로 분석하면 공통된 특성이 나타난다. 해석을 돕기 위해 이중 대표적으로 단면 A-A'에 대하여 Fig. 9에 조량과 조위를 동시에 도시하여 비교 평가하도록 한다. 상단 그림은 단면 A-A'를 통과하는 조량을 나타내며 하단그림은 동일 시간대에 변화하는 조위의 변화를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분의 구간에서는 간사지의 침수-노출을 처리한 경우와 처리하지 않았을 때 대체적으로 모든

시간대에 비슷한 조량이 통과하는 것을 보여주고 있다. 그러나 간사지의 침수-노출을 고려하게 되면 창조시작부터 유량이 상대적으로 작게 나타나기 시작하여 최강창조에서 그 차이가 가장 많이 벌어지는 것으로 분석되었다. 이때의 조량은 1184 m<sup>3</sup>/s이며 처리하지 않았을 경우는 1368 m<sup>3</sup>/s로 180 m<sup>3</sup>/s 정도(13.4%)의 차이를 나타낸다. 그러나 최강창조 이후 한시간 동안은 침수-노출을 고려한 평균조량이 1384 m<sup>3</sup>/s로 처리하지 않았을 경우의 1245 m<sup>3</sup>/s 보다 10% 크게 나타나게 되어 Fig. 9에 보는 바와 같이 최강 유속이 한시간 정도 지체되어 나타나는 결과를 보이고 있다. 조간대의 침수-노출을 고려하는 것과 관련하여 이처럼 특정시간별로 조량이 달라지는 문제점 등은 조석수동역학 변화해석에 있어 향후 보다 상세한 연구가 필요한 것으로 지적된다.

3.3 조간대 처리의 필요성

수치모의 결과 조간대 침수-노출을 고려하면 전반적으로 유속이 작게 나타나나, 간사지 형상에 따라 일부 특정 지역에서는 유속이 집중이 되어 더 크게 나타나는 양상을 보인다. 이처럼 간사지에 의한 흐름의 비선형적 변화는 국부적으로 해당지역에서 부유사 또는 소류사 이동기작을 평가하는데 직접적 영향을 미칠 것으로 판단되며, 장기간의 조류 비대칭에 기인되어 침퇴적 및 사주형성에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 예측을 실시하는 경우 조간대의 침수-노출 처리가 반드시 필요할 것으로 고려된다. 이러한 조류 비대칭은 해당지역의 물리적 환경인 지형과 수심에 우선적으로 지배받게 된다. 그러나 조간대의 침수-노출을 고려하는 효과는 수치해 전반에 걸쳐 크게 영향을 미치지 않는 것으로 평가된다. 이와 같은 추론은 관측값을 기준으로 조간대의 침수-노출을 처리한 결과와 처리를 하지 않은 결과를 비교하여도 그 차이가 크게 나지 않는 것을 통해 알 수 있다. 따라서 조석수동역학 모형을 단독으로 수행하여 조간대의 침수-노출을 고려하면서 모형을 수행하는 것은 계산 수행시간의 증가와 전처리 작업 등을 고려했을 때 효율성이 현저히 떨어지고 전반적으로 계산 결과에 있어서는 크게 차이나지 않으므로 실험 목적에 부합되는 모델링이 고려되어야 한다고 판단된다. 특히 전북해역에서 적용하는 바와 같이 연안오염확산 예측 및 임해발전소 온배수 확산과 결부된 수동역학 모형의 활용시에는 시간적분 모델을 이용하여 시시각각으로 변화되는 조석수동역학을 반영하는 것 보다는 1년 이상의 장기간 수치모의를 해야 하므로 이에 합당한 수동역학적

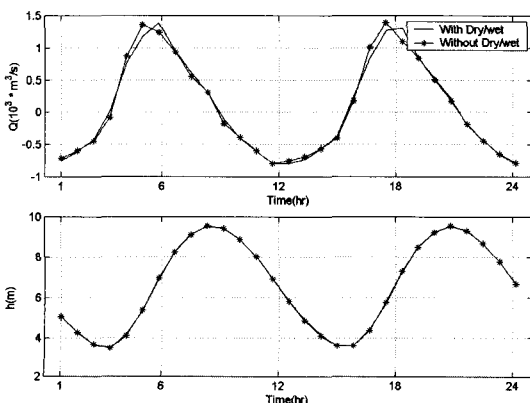


Fig.9. Tidal volume through cross section A-A' and elevation variations for a day in a spring tide.

해석이 필요하고 여기에서 도출된 정보가 결합되는 확산 모델과 효율적으로 접합되어야 한다. 즉, 시간 적분모형을 이용하여 장기간 동안 매 time step 마다 간사지를 처리하고 그 결과를 일 단위 혹은 월 단위의 입력 값을 갖는 결합된 확산모형에 적용한다는 것은 컴퓨터 저장용량의 한계와 연산시간의 방대함으로 비합리적이다. 이러한 경우 조화함수를 이용한 모델인 TIDE3D 모델 등을 이용하거나 ADCIRC와 같은 time stepping 모형의 경우도 계산결과의 조화분해가 가능한 기간동안 모의 후 주요 분조를 추출하여 장기간 동안 합성해서 사용하는 것이 보다 합리적인 방법으로 판단된다.

#### 4. 결과 및 고찰

조석수동역학 모델링에서 해당해역이 조간대를 포함할 때 여러 가지 상황에 대하여 이를 수동역학에 반영해야 할 것인지 여부가 모델의 수립과정과 수치해 결과에 중대한 영향을 미칠 수 있어, 본 연구는 이에 대한 면밀한 비교평가를 조간대의 침수·노출을 효율적으로 처리할 수 있는 유한요소 모형인 ADCIRC를 채택하여 실시하였다.

조간대 영향에 대한 평가 전에 관측치와 비교평가를 통해 모형의 검증을 실시하였으며, 매우 잘 일치하는 만족스러운 결과를 얻었다. 특히 본 모형은 불규칙한 육지경계를 효과적으로 표현할 수 있으며, 방조제나 방류제 주위의 와(eddy)현상을 포함하여 인공구조물 주위의 현상을 잘 모의하고 있는 등 비선형 효과를 잘 재현하며 계산해역내의 조간대의 침수·노출을 만족스럽게 재현하는 것으로 판단된다. ADCIRC 모형에서 노출로 판정하는 최소 수심, 침수상태로 판정하는 최소 유속, 그리고 급격한 재침수나 재노출을 방지하는 time step 등을 설정하여 원활한 조간대 처리를 돕도록 하였다.

모델수립 전처리 단계에서 자동화된 유한요소 격자망의 생성시 격자 크기와 시간적분간격 설정에 있어서 CFL 안정조건에 만족시키는 전처리 조건이 절대적으로 필요하고 계산결과는 격자크기에 매우 민감하게 작용하고 있다. 즉, 안정된 결과를 얻기 위해서는 위의 조건식을 만족시키는 수심별로 충분한 크기의 격자해상이 선행되어야 한다.

대상 해역에서 간사지의 침수·노출을 고려한 결과에서 보이는 유동특성은 이를 고려하지 않을 경우와 비교하면 대체적으로 유속의 크기가 작으나 최강창조 때 유속이 크게 나타나며 고조에서 낙조로 변하면서 인근 조류보다 상대적으로 빠르게 빠져나가는 특성을 보인다. 조량의 비교

실험을 실시한 결과, 조간대의 노출을 고려한 경우에 특정비교단면에서는 조량의 차이를 보이고 낙조우세의 특성을 보이고 있다. 조석주기를 평균한 조석 잔차류의 비교 평가에서는 전반적으로 조간대의 침수·노출을 고려한 경우나 그렇지 않고 조간대를 최소한의 수심이 유지되는 침수구역으로 해석한 경우 결과 값이 거의 유사하게 나타난다. 즉, 이러한 평가 결과는 조간대가 국부적으로는 영향을 미치지 않지만 전체 해역의 조석수동역학 해석결과에 미치는 영향이 크지 않음을 시사하는 것이다. 따라서 오염물 확산이나 장기간의 해저지형의 변화추이를 가능할 수 있는 지표로 이용되는 잔차류의 비교나 조류 및 조량의 변화를 통해 도출된 결론은, 특이 사상에 대한 단기간의 수동역학적 변화를 상세히 살펴보는 목적을 제외하고는 대부분의 경우에 조간대를 고려하지 않고 해석을 하여도 전체적인 수동역학적 해석이나 이와 결합된 확산방정식의 해석에서 무난할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 해양개발연구소의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- 군산지방해양수산청, 2001. 금강하구의 수리현상변화 조사보고서.
- 김태인, 2002. 금강하구의 해수유동과 퇴적과정, 박사학위논문, 성균관대학교 대학원.
- 서승원, 1993. 연안수동역학 모의를 위한 시간진행 및 조화 유한요소모형 특성, 한국해양·해양공학회지, 5(4): 406-413.
- 서승원, 1999. 비선형 3차원 조화유한요소모형을 이용한 황해의 천해조석 발생, 대한토목학회논문집, 19(II-3): 389-399.
- 서승원, 2002. 군장항의 매물 원인 연구, 군장수로 매물경감을 위한 Workshop, 25-42.
- 서승원, 박원경, 1996. 조간대 모의를 위한 2차원유한요소 해석, 한국해양·해양공학회지, 8(1): 103-113.
- 이경선, 박경, 오정환, 2000. 조간대 처리 기법을 포함한 3차원 Semi-Implicit 수역학모델 개발, 한국해양·해양공학회지, 12(2): 70-80.
- 정태성, 김창식, 1992. 이동경계를 고려한 유한요소 천수유동모형, 한국해양·해양공학회지, 4(3): 146-155.
- 최병호, 변상신, 김경옥, 2001. 병렬유한요소 모형에 의한 황해의 조석산정, 한국해양·해양공학회지 12: 108-118.

- 한국해양연구소, 1996. 한반도 주변 조석 조화상수 자료집.
- Bates, P.D. et al., 1995. Initial comparison of two-dimensional finite element codes for river flood simulation, *Proc. Int. Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy*, **112**: 238-248.
- Chipada S., Dawson, C.N., Martinez, M.L., and Wheeler, M.F., 1996. Parallel computing for finite element models of surface water flow, *Computational Methods in Water Resources XI*, **2**.
- Gopalakrishnan, T.C. and Tung, C.C., 1983. Run-up of non-breaking waves: A finite element approach, *Coastal Engineering*, **4**: 3-22.
- Kawahara, M. and Umetsu, T., 1986. Finite element method for moving boundary problems in river flow, *Int. J. for Num. Methods in Fluids*, **6**: 365-386.
- King, I.P., 1992. *User's Manual for RMA Model*.
- King, I.P. and Roig, L.C., 1988. Two-dimensional finite element models for flood plains and tidal flats, *Computational Methods in Flow Analysis*, **2**: 711-718.
- Luetlich, R.A., Jr., Westerink, J.J., and Scheffner, N.W., 1992. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries, report 1: theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL, *Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6*, U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 137p.
- Roig, L.C. and Evans, R.A., 1994. Environmental modeling of coastal wetlands, *Estuarine and Coastal Modeling III*, ASCE, 522-534.
- Turner, P.J. and Baptista, A.M., 1992. *ACE/gredit user's manual*, Oregon Graduate Institute of Science and Technology.

---

Received March 3, 2003

Accepted April 22, 2003