

유동모의에서 조간대 처리 효과 Effect of tidal flat in hydrodynamic simulation

서승원¹ · 김정훈¹ · 유시흥¹

Seung Won Suh¹, Jung Hoon Kim¹, Si Heung Yoo¹

1. 서 론

우리나라의 서해안은 많은 도서가 산재해 있고 지형이 복잡하며 조석의 간만의 차가 크게 나타나 연안을 따른 조간대가 폭 넓게 형성되어 있다. 연안해역에 대해 새만금과 시화호 같은 부영양화 환경문제나 군산지구 개발사업 같은 연안공사에 따른 퇴적물 이동 등 다양한 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 연구에는 기본적으로 해수유동의 모의가 필요하여 불규칙한 지형 및 수심을 용이하게 표현할 수 있는 유한요소법을 이용한 해석이 폭 넓게 이용되고 있으며(서, 1993; 서와 박, 1996), 최근에는 고해상도의 유한요소 모형에 병렬처리를 도입해 황해전체의 신속한 조석산정이 수행되고 있다(최 등, 2002). 그러나 대부분 고정경계를 이용하고 있어 복잡한 해안과 넓은 조간대를 가지는 서해안 및 남해안의 조류해석을 보다 합리적으로 하기 위해서는 이동경계 처리가 고려된 유한요소 모형의 적용이 검토되어야 할 것이다.

이동경계를 처리하기 위해 고려되는 방법은 시간에 따라 변화하는 영역을 격자를 이동시키거나 생성시켜 엄밀하게 표현하지만 계산상의 비효율성과 수치적 불안정을 내포하는 mesh adoption 알고리즘(Gopalakrishnan과 Tung, 1983)과 고정된 유한요소 격자망에서 육지경계를 그대로 이용하면서 시간에 따라 변화되는 침수선을 이동시키는 mesh reduction 알고리즘(Kawahara와 Umetsu, 1986)으로 대별된다. Kawahara와 Umetsu는 하천에서 이동경계문제를 격자의 변동없이 침수와 노출되는 영역을 구별하여 계산하는 방법으로 해결하였으며 King과 Roig(1988) 및 Roig와 Evans(1994)는 element volume coefficient를 도입하여 해수면 변위를 임의로 변화시켜가며 노출영

역을 처리하는 방법을 RMA2(King, 1992)에 적용하였고, Bates 등(1995)은 부분적으로 침수된 요소의 계산에서 노출된 절점의 수표면 변위값에 일정한 관계식을 도입하는 방법을 TELEMAC-2D 모형에 적용하였다. 국내에서는 유한차분법으로 staggered grid system을 이용하여 비교적 정확하게 시간에 따라 변화하는 해수유동현상을 계산하여 왔으며(Choi, 1980), 유한차분모형인 POM에서 지배방정식을 반음해법으로 차분화하여 mode splitting을 제거하고 조간대 처리 기법을 도입하여 빠르고 안정된 3차원 semi-implicit 모델도 발표되었다(이 등 2000). 한편 정과 김(1992)이 Kawahara와 Umetsu의 방법을 유한요소법에 적용하여 남해안의 마로해에 적용하였고 서와 박(1996)이 위와 비슷한 접근방법이나 조석모의시 장파의 특성을 고려한 파형경사를 계산에 도입하며 유한요소모형인 STEP-CM(Superior Two-step Explicit Program for Coastal Modeling)을 수립하여 천수만에 적용해 보다 효율적이고 현실적인 접근을 시도하였다.

본 연구에서는 정밀한 경계처리와 조간대를 반영할 수 있는 ADCIRC(Luetich et al., 1992) 모형을 군장지역과 전북해역에 적용하여 이의 특성을 살펴보도록 한다. 군장지역은 서(2002)에 의해서 유한요소모형의 적용으로 복잡한 해안과 구조물에 의한 조석파의 변화를 만족하게 재현하고 이에 따른 퇴적환경의 변화를 고려하여 해석한 바가 있으나, 이동경계를 고려한 해석은 이루어지지 않았다. 두 지역 모두 조간대를 반영하지 않고 적용하였던 유한요소모형인 TIDE3D의 수치모의 결과와 조간대 처리를 한 ADCIRC 모형결과를 비교하여 조간대 처리의 효율성과 특성을 분석한다.

¹ 군산대학교 해양시스템공학과 (Department of Ocean System Engineering, Kunsan National University, Chonbuk 573-702, Korea)

2. 이동경계를 반영하는 유한요소 수동역학 모형

2.1 모형의 기본이론

ADCIRC(ADvanced CIRCulation model for oceanic, coastal and estuarine water)는 정밀한 경계 처리를 하며 장기간 동안 넓은 영역에서 해수순환을 모의할 수 있도록 개발된 유한 요소 모형이며 근간에는 넓은 영역을 처리하는데 있어 계산효율을 증진시키기 위해 병렬화를 구성하여 성공적으로 이용되어지고 있다 (Chipada et al., 1996).

ADCIRC모형은 수심 적분된 2차원 모형(2DDI)과 3차원 모형(3DVS)으로 구성되어 있다. 2DDI(two-dimension, depth-integrated)는 저면 마찰계수와 momentum dispersion 계수를 이용하는 수심 적분된 external mode equation만 풀게 되어 있고 3DL(three-dimensional, local)은 mode splitting 기법을 이용하여 2DDI에서처럼 external mode에서 자유수면에 대해서 수심적분된 연속방정식과 운동방정식을 풀고 internal mode에서 상대적으로 긴 time step 동안 3차원 방정식을 풀어 수치성분을 계산한다.

2.2 기본 방정식

2DDI 직교 좌표계 지배방정식

2DDI ADCIRC는 2차원 수심 적분된 천해방정식을 풀며 기본 연속방정식은 다음 식(1)과 같으며 비보존성의 기본 운동방정식은 아래 식 2,3 과 같다.

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_x}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fU = - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_x}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y \quad (3)$$

여기서,

$(\eta + \gamma)$: 기조력, 지구조석, 자기인력, 하중조석

$\tau_{sx}, \tau_{sy}, \tau_{bx}, \tau_{by}$: 표면 / 바닥의 응력

B_x, B_y : 2DDI 경압가속항

D_x, D_y : 2DDI 운동량확산항

$f \equiv 2\Omega \sin \phi$: Coriolis 인자

$H(x, y, t \text{ or } \lambda, \phi, t) \equiv h + \zeta$: 지오이드에 따른 수심

위의 일련의 방정식을 풀 때 Galerkin 유한 요소법을 사용하여 생기는 수치해석적 오류를 피하기 위해 연속방정식은 일반화된 파동연속방정식(GWCE, Generalized Wave Continuity Equation)으로 대체되며 공간적 변수의 수치해석 가중치인 τ_0 를 추가가하고 연쇄법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} - UH \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - VH \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

여기서, A_x, A_y 은 다음과 같이 표현할 수 있으며

$$A_x = U \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ -U \frac{\partial U}{\partial x} - V \frac{\partial U}{\partial y} + fV - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_x}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x + \tau_0 U \right\}$$

$$A_y = V \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ -U \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial V}{\partial y} + fU - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_x}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y + \tau_0 V \right\} \quad (5)$$

최종 형태의 GWCE로서 위의 A_x, A_y 가 식(4)에 대입되고, ADCIRC는 GWCE와 함께 비보존 운동 방정식(식 2,3)을 계산한다.

2.3 조건대 처리

조건대 처리가 고려된 유한요소모형인 ADCIRC를 적용함으로써 복잡한 해안과 넓은 조건대를 가지는 서해안에서의 보다 합리적인 유동을 재현할 수 있으나 time step 마다 침수/노출 상태를 판별해야 하며 GWCE system matrix를 재구성해야 하므로 수행시간이 길어지는 단점이 있다. 아울러 조건대의 발생시간과 범위가 정확히 자연현상과 일치하는 것에 대한 검증이 현실적으로 어렵다. 또한 mode splitting 기법을 사용하는 3차원 동수역학모델의 경우는 time step의

차이로 조간대 처리 기법을 합리적으로 도입하기가 어려운 점(이등,2000)과 mesh reduction 알고리즘을 적용하여 수치적 기법과 가정들에 있어서 질량보존이 완전히 만족되지 않은 단점이 발표되었다(서와 박,1996).

침수와 노출의 판단은 총수심에 의해서 판단한다. 총수심이 0보다 작으면 노출로 판단하나 계산의 안정을 위해 여기에선 $H_0=0.1m$ 를 기준으로 판별한다. 일반적으로 노출로 판정하는 최소 수심은 0.01~0.1 값을 갖는다. 수심에 의해서 판별되어도 원활한 조간대 처리를 위해 재침수가 되기 전까지 노출영역으로 계산하게 하는 최소 time step 인 NODEDRYMIN 값과 반대로 재노출이 되기 전까지 침수영역으로 계산하게 하는 최소 time step 인 NODEWETMIN 값에 의해 기존의 상태가 유지되며 인근 노드가 침수일 때 적합한 압력 경사를 위해 침수로 간주하기 위한 최소 유속인 VELMIN 값이 있다. 일반적으로 NODEDRYMIN 과 NODEWETMIN 값은 5-20 을 갖으며 VELMIN 값은 0.05m/s를 갖는다. 다시 말해서 수심이 H_0 보다 작을 때라도 NODEWETMIN 보다 작은 time step에서는 노출로 되지 않으며 침수로 유지된다. 또한 수위경사와 저면 마찰사이의 균형으로 인하여 VELMIN 값보다 큰 유속이 생기면 침수로 간주한다. 반대로 노출영역에서 VELMIN 값보다 큰 유속이 생겨도 NODEDRYMIN 값보다 작은 time step에서는 침수로 되는 것을 방지한다. 이때 유속에 영향을 미치는 저면 마찰계수는 Hybrid Friction 을 적용하는데 다음 식 (6)과 같다.

$$C_f = C_{f\min} \left[1 + \left(\frac{H_{break}}{H} \right)^\theta \right]^\gamma \quad (6)$$

여기서 θ 는 C_f 의 점근선한계에 도달하는 속도를 결정하고, γ 는 수심이 감소함에 따른 마찰계수의 증가 속도를 결정한다.

전처리 과정으로 해수면 0 인 침수지역으로 초기화되는 것 대신에 선택지역을 노출지역으로 초기화 시킬 수 있도록 만드는 입력파일을 만들 수도 있으며, 이를 위해서는 격자 정보와 유사한 형태로 대상영역을 지정해야 하는 작업을 필요로 한다. 대상영역은 간척지와 같이 물리적으로 변화된

특성을 지닌 곳과 해도에서 간사지로 표시되어 있는 곳 그리고 일정수심이하의 위치를 선정하여 해당 노드를 노출지역으로 초기화 할 수 있다. 전처리에 있어서 최대한 상세하고 정확한 수심자료가 요구된다. 이는 대상영역의 해수유동을 변화 시키는 간사지 생성에 있어서 큰 영향을 미치기 때문이다. 또한 전체해역에 대해 계산 효율을 위해 선택영역에서 수심에 따라 자동으로 노출지역으로 초기화하도록 전처리 하는 것이 필수적이다.

대부분의 비선형항은 양해법으로 처리하기 때문에 모델을 수행시 뿐만아니라 전처리시 가장 유의해야 하는 것은 $C_\#$ (Courant Number)이며 전처리 과정을 통하여 안정성이 보장되는 한계 내에서 가장 큰 Δt 값을 이용한다. Δt 는 식(7)의 CFL(Courant-Friedrichs-Lawy) 안정조건에 지배된다. 이중 모델 계산의 안정성에 있어서 수심이나 Δt 보다 유한요소의 격자 크기에 더욱 민감한 반응을 보이고 있다.

$$\Delta t \geq \frac{\Delta x}{\sqrt{2gh}} \quad (7)$$

또한 전처리 과정으로 대상해역을 이산화 시에 요소의 모양을 가급적 정삼각형에 가깝게 조정해야 하는 작업이 필요하다.

3. 대상 해역과 입력자료

군장해역에 대한 유한요소의 이산화는 Fig. 1과 같으며 이산화시 총절점수와 요소수는 각각 6721, 12591개 이며 군장항을 확대한 영역도 같이 도시하였다. 전북해역의 경우 Fig. 2에 도시하였으며 관심해역에 대해서는 70-80m로 해상하고 외해경계에서는 수Km가 되도록 유연한 격자구성을 하였으며 총절점수가 5577개이며 요소는 10338개이다. 입력자료는 과거의 연구성과 및 기타 각종 조화분해 측정자료를 이용하였으며 이중 군장해역에 대해서 표에 나타내었다. 조석의 여러분조 중 대표적인 분조로 주태음반일주조와 주태양반일주조를 이용하였는데 이유는 본 연구대상 해역의 조석형태수가 0.20로써 반일주조가 우세하기 때문이다.

Table 1. 수치모형의 외해개방경계조건

	M_2		S_2	
	조위(m)	위상각 (dgree)	조위(m)	위상각 (dgree)
우상	2.1290	92.00	0.7400	139.80
좌상	2.0620	90.90	0.7280	134.30
좌하	2.0248	89.20	0.7220	130.30
우하	2.1150	90.90	0.7690	141.80

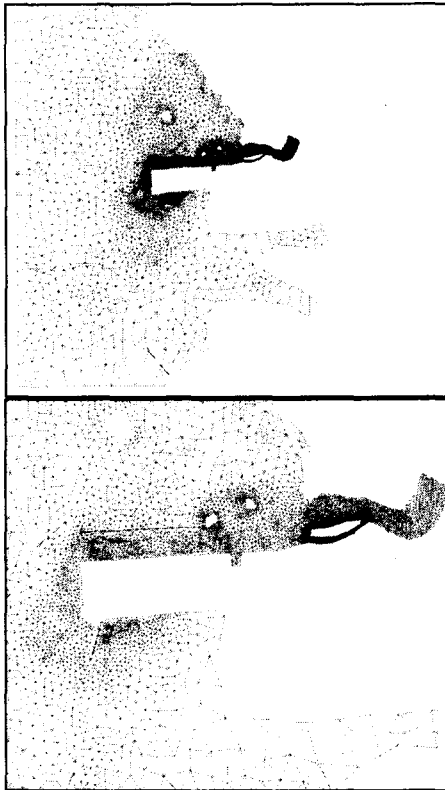


Fig. 1. 군장해역의 전체격자와 상세역.

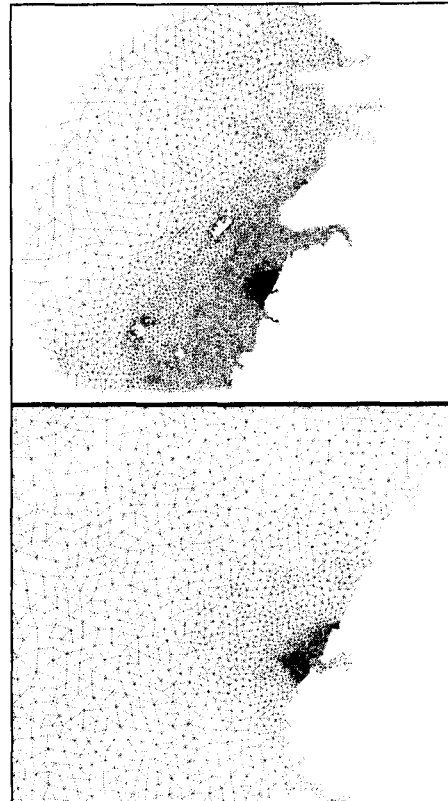


Fig. 2. 전북해역의 전체격자와 상세역.

4. 계산결과 및 토의

간사지 처리시 처리하지 않았을 때와의 조류속 계산의 비교를 위해 군장해역에 있어서 통수단면을 Fig.3 과 같이 설정된 단면에 직각방향의 조량을 산정하여 비교하였다.



Fig. 3. 군장해역에서 설정된 통수단면.

해당해역은 계산 수행시 Fig.3 과 같이 간사지가 나타나며 이를 둘러싸는 AA'단면은 폭이 1661m, BB'는 2495m이며 CC'는 5720m이다. 모델 수행결과, 간사지 처리와 처리하지 않았을 경우 해당 단면을 통과하는 조량을 하루동안 100분 간격으로 Table 2에 비교하였다.

간사지 처리를 할 경우 조량을 처리하지 않을 때와 비교하면 대체적으로 처리할 경우 조량이 작으나 최강 창조에서는 더 크게 나타났다. 간사지가 주로 나타나는 낙조에서 창조 사이에서는 간사지 처리할 경우 처음 창조시까지 계속 영향을 끼쳐 상대적으로 더욱 작은 조량이 통과하는 것을 볼 수 있다. 그러나 고조에서 낙조로 변할 때는 낙조 시작시 인근 조류보다 크게 빠져나가는 나가는 특이점이 보인다.

Fig. 4는 간사지 처리시 해수유동의 변화를 비교한 것이며, Table 2에서 각각 time step이 7과 14일 때의 모습이다. 간사지 형상에 기인되어 주수로 인근해역에서는 유속이 집중되는 모습이 보이나 일반적으로 간사지 근처에서 유속의 크기는 작다.

전북해역에 대한 수치모델 결과로 해안을 따라 넓은 간사지가 나타나는 Fig. 5에서는 군장지역처럼

방조제나 방류제등에 의한 강한 와동현상이 잘 나타나고 있다. 그러나 조간대가 충분히 발달되어 있지 않은 관계로 조간대 처리 유무에 의한 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

5. 결 론

서해 중부연안에 대하여 조간대의 영향을 고려한 해수유동을 모의한 결과, 관측치와 잘 일치하는 만족할 만한 결과를 얻었다. 방조제나 방류제로 인한 와(eddy)현상을 비교적 잘 모의하고 있는 등 비선형 효과가 잘 나타나며 계산해역내의 조간대를 비교적 잘 재현하였다.

기본적으로 격자 크기와 time step 설정에 있어서 CFL 안정조건에 만족시키는 전처리가 필요하였으며 격자크기에 보다 민감하게 작용하였다. 보다 정확히 조간대의 영향을 반영하는 모의를 위해서는 관심해역에 보다 상세하고 정확한 수심의 입력, 조건에 따라 자동적으로 노출지역을 초기화하는 등의 전처리가 필요하였다.

Table 2. 간사지 처리시와 미처리시 조량비교

(단위: m^3/s)

Time Step	A-A'		B-B'		C-C'	
	With dry/wet	Without dry/wet	With dry/wet	Without dry/wet	With dry/wet	Without dry/wet
1	4614	5287	6779	7090	7149	8385
2	4037	4062	5288	5160	7529	7398
3	718	686	1027	1032	1681	1586
4	-2705	-2643	-3330	-3167	-4556	-4438
5	-4237	-4317	-5659	-5619	-7211	-7357
6	-3097	-3282	-4942	-4910	-4543	-5191
7	-1022	-1248	-1523	-1667	-372	-912
8	3094	3829	4980	5503	4995	6258
9	5105	4646	6623	6123	8558	8290
10	1912	2106	2578	2766	3901	3086
11	-1608	-1492	-1837	-1687	-2499	-2416
12	-3627	-3730	-4662	-4703	-6285	-6456
13	-3628	-3660	-5330	-5233	-5931	-6157
14	-1925	-2081	-3128	-3207	-2194	-2809
Sum	-2369	-1837	-3136	-2329	222	-733

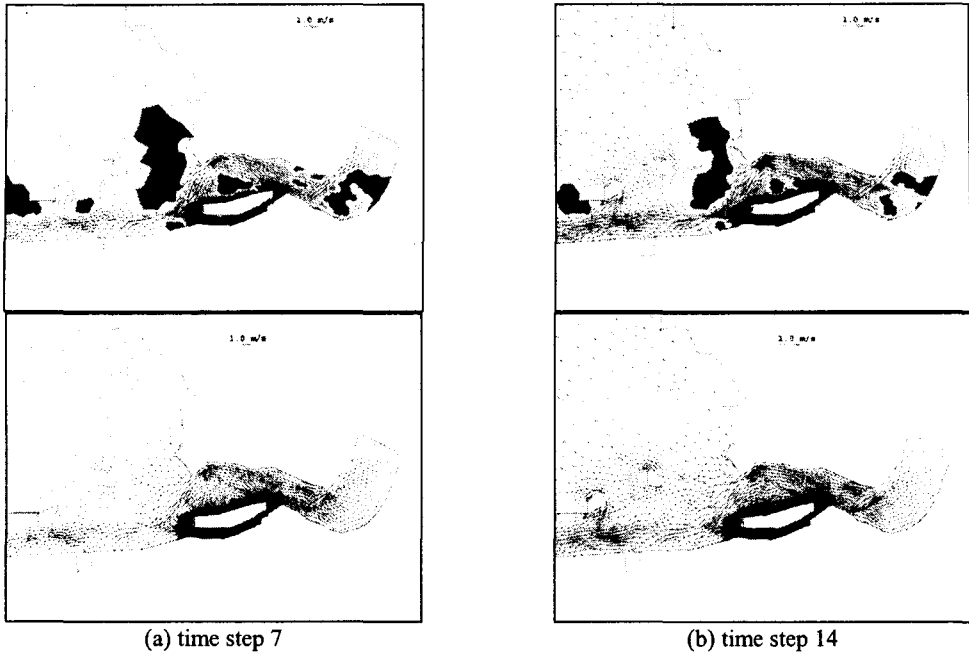


Fig. 4. 간사지 처리시 유동변화 비교.

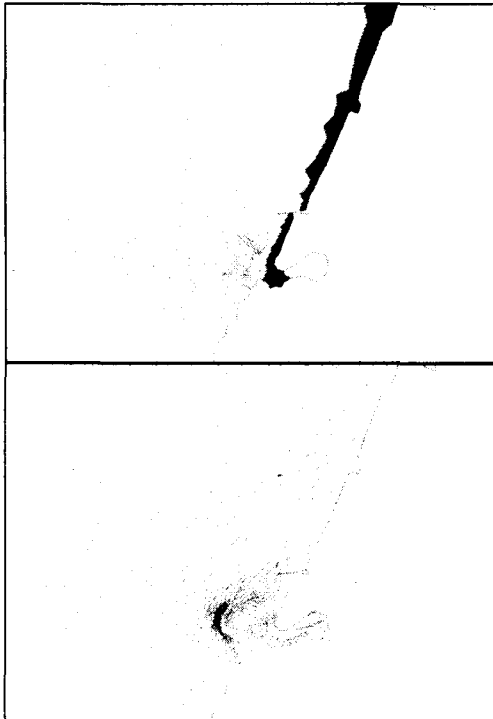


Fig. 5. 전북해역의 간사지를 고려한 해수유동결과.

적용된 대상 해역에서 간사지를 고려한 모형에서 나타나는 유동특성을 고려하지 않을 경우와 비교하면 일반적으로 작은 유속이 나타났으나 최강창조 때 유속이 컸으며 고조에서 낙조로 변하기 시작할 때 인근 조류보다 크게 빠져나가는 나가는 특이점이 보인다.

모형실험에서는 고정된 육지경계를 이용하며 시간에 따라 변하는 수심에 의하여 노출지역과 침수지역을 결정하나, 수위경사와 저면 마찰의 변화에 의해 발생하는 일정 값 이상의 유속에서는 침수지역으로 처리하며 설정된 일정한 time step동안은 재침수나 재노출을 방지하는 기법을 채택한다. 이러한 방법은 안정적 결과를 나타내나, 매시간마다 외적인 조건에 따라 상태를 판별하여 GWCE system matrix를 재구성하는 수행시간의 증가와 조간대 근역에서 질량보존 문제 등에 대해서는 이어지는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 서승원, 1993. 연안수동역학 모의를 위한 시간진행 및 조화유한요소모형 특성, 한국해안해양공학회지 5(4): 406-413.
- 서승원, 2002. 군장수로 매물경감을 위한 Workshop 2002.

- 서승원, 박원경, 1996. 조간대 모의를 위한 2차원 유한 요소해석, *한국해양해양공학회지*, 8(1) : 103-113.
- 이경선, 박경, 오정환, 2000. 조간대 처리 기법을 포함한 3차원 Semi-Implicit 수역학모델 개발, *한국해양공학회지*, 12(2) : 70-80.
- 정태성, 김창식, 1992. 이동경계를 고려한 유한요소 천수유동모형, *한국해양해양공학회지*, 4(3) : 146-155.
- 최병호, 변상신, 김경옥, 2001. 병렬유한요소 모형에 의한 황해의 조석산정, *한국해양해양공학발표논문집*, 12 : 108-118.
- Bates, P.D. et al., 1995. Initial comparison of two-dimensional finite element codes for river flood simulation, *Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy*, 112, pp. 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, *Water Resources XI*, Vol.2.
- Choi, B.H., 1980. Tidal computations for Inchon Bay, *J. of the Oceanological Society of Korea*, Vol. 15, No. 2, pp. 112-122.
- Gopalakrishnan, T.C., and Tung, C.C., 1983. Run-up of non-breaking waves : A finite element approach, *Coastal Engineering*, 4, pp. 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, pp. 365-386.
- 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, pp. 711-718.
- King, I.P., 1992. User's Manual for RMA Model.
- Luetich, R.A., Jr., J.J. Westerink., and N.W. Scheffner., 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 Evan, R.A., 1994. Environmental modeling of coastal wetlands, *Estuarine and Coastal Modeling III*, ASCE, pp. 522-534.