

## 음해법을 이용한 천수방정식의 수치해석

### Numerical Analysis of Shallow Water Equation with Fully Implicit Method

강주환\* · 박상현\*\* · 이길성\*\*\*

Kang, Ju Whan · Park, Sang Hyun · Lee, Kil Seong

#### Abstract

Recently, ADI scheme has been a most common tool for solving shallow water equation numerically. But ADI models of tidal flow is likely to cause so called ADI effect in such a region of the Yellow Sea which shows complex topography and has submarine canyons especially. To overcome this, a finite difference algorithm is developed which adopts fully implicit method and preconditioned conjugate gradient squared method. Applying the algorithm including simulation of intertidal zone to Sae-Man-Keum, velocity fields and flooding/drying phenomena are simulated well in spite of complex topography.

#### 요 지

근래 천수방정식과 같은 2차원 수치해석에서 가장 널리 쓰이는 방법 중의 하나로 ADI 방법을 들 수 있다. 그러나 서해안과 같이 수심의 변화가 심하며 특히 해저협곡이 곳곳에 발달된 해역에서 조석에 관한 문제해결시 ADI 방법을 사용하면 소위 ADI 효과가 크게 우려된다. 이를 극복하기 위하여 완전 음해법으로 차분되고 CGS(conjugate gradient squared) 방법으로 해를 구하는 알고리즘을 개발하였다. 조건대 모의가 포함된 본 모형을 새만금 수역에 적용한 결과 지형의 복잡성에도 불구하고 유속장과 조건대 형성에 관한 수치적 모의가 만족스러운 결과를 보였다.

#### 1. 서 론

최근 서해안을 중심으로 대규모 간척사업이 계획되고 있는데 이러한 간척사업에 선행되는 방조제 시공시, 크게는 환경변화에 따른 영향평가 그리고 작게는 축조재료 유실량의 정확한 산정을 위해 수리모형실험과 더불어 수치모형실험도 병행하여야 한다. 수리모형실험시 유속과 수위 등 모형의 경계 조건 수립이 필수적인데 이는 수치모형에 의해 제

공될 수 있으며 수치모형의 결과는 수리모형실험을 통하여 입증되어야 하는 등 두 가지 모형은 상호 보완관계에 있어야 한다. 본연구는 복잡한 지형 및 급류속 체절구간에서 정확한 유속 및 수위를 산정할 수 있는 최신의 수치기법을 통한 수치해석 알고리즘을 개발하여 이를 체절구간 수리모형 실험시 경계조건 수립에 이용할 수 있게 하는 한편 간척 후 환경변화 예측을 위한 기초자료 제공에 그 목적이 있다.

본 연구에 적용된 수학적모형은 장파모형인 천수방정식(shallow water equation)인데 현재까지 조석과와 같은 장파의 해석에서 가장 널리 쓰이고 있는

\* 정희원 · 북포대학교 토목공학과 전임강사

\*\* 정희원 · 농어촌진흥공사 농어촌연구원 수석연구원

\*\*\* 정희원 · 서울대학교 토목공학과 교수

ADI(alternate direction implicit) 방법은 양해법의 안정성 한계와 음해법의 비경계성의 단점들이 모두 배제된 방법이지만 최근에는 정확도에서 그 한계가 드러나고 있는 실정이다. Weare<sup>(1)</sup>는 불규칙한 경계면에서 Courant수가 큰 경우 ADI 방법이 정확치 못한 결과를 보일 수 있음을 해석적으로 밝힌 바 있고 Benqué 등<sup>(2)</sup>도 직사각형 수로에서 S자형으로 주변보다 깊은 지역이 있는 가상적인 경우의 수치 해석에서 Courant수가 큰 경우 유향이 S자형과 무관하게 되고 그 크기도 주변에 비해 작게 되는 등 문제가 있음을 지적한 바 있다. 또한 Stelling 등<sup>(3)</sup>도 계단형의 수로에서 Courant수가 클 때 ADI 방법을 사용할 경우 매시간단계에서 x, y 각 방향으로만 파의 전달이 이루어진다는 단점이 있다는 소위 ADI 효과에 대해 밝힌 바 있다. 즉, ADI 방법은 한 방향으로만 파가 전달되므로 복잡한 지형에서 수치 종속영역이 제한되므로 수심이 불규칙한 해역이나 해저협곡이 발달된 곳에서는 정확한 결과를 기대하기 어려운 방법인 것이다.

이를 극복할 수 있는 방안으로 좌표변환을 통한 방법과 전체 영역을 x, y 양 방향 모두 음해법적으로 차분하여 동시에 해를 구하는 완전음해법을 이용하는 방법이 있는데<sup>(4)</sup>, 전자는 하도와 같은 곳에 적용할 경우 차분방향이 흐름방향과 일치한다는 장점이 있는 반면 조간대 처리가 쉽지 않고 해저협곡이 있을 경우 ADI 효과를 해결할 수 없다는 단점이 있다. 후자는 조간대 처리가 용이하며 해저협곡이 있는 곳에서도 ADI 효과를 극복할 수 있지만 계산시간이 다소 오래 걸리고 컴퓨터 용량이 문제될 수 있다는 단점이 있지만 최근 컴퓨터의 급속한 발달추세로 보아 가까운 장래에는 이러한 단점은 해결될 수 있을 것으로 보인다.

본 연구에서 천수방정식이 적용된 수역은 우리나라 서해안에 위치한 새만금수역<sup>(5)</sup>으로 방조제 건설 지점 주변의 수심이 매우 불규칙하고 조간대가 광범위하게 형성되어 있으며 해저협곡이 곳곳에 발달되어 있어 ADI 방법을 적용한다면 ADI 효과가 크게 나타나리라 예견되는 해역으로서 간척사업에 수반되는 최종제설시 정확한 유향과 수리모형실험의 외부경계조건 부여를 위해서도 정확한 수치해석이 필요한 실정이다. 이러한 배경하에 본 연구에서는

완전음해법으로 차분된 천수방정식을 CGS(conjugate gradient squared) 방법으로 해결하였으며 조간대의 수치적 모의에도 주안점을 두었다.

이 방법은 과량변형문제에 관한 완경사방정식(mild slope equation)의 유한차분해석에 먼저 도입되어 Bayliss 등<sup>(6)</sup>과 Panchang 등<sup>(7)</sup>이 CGS 방법을 이용하여 해를 구했으며 Wilders 등<sup>(8)</sup>도 천수방정식에 유사한 방법을 적용해 정확도를 높인 바 있다.

## 2. 수학적모형 및 적용차분법

### 2.1 수학적모형

비선형이송항, 중력항, 마찰항과 Coriolis항을 고려한 천수방정식의 형태는 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \lambda u - fv = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \lambda v + fu = 0 \quad (1c)$$

여기서 t, x, y는 시간과 공간에 대한 독립변수, η는 수면변위, u, v는 각각 x, y방향 유속, H(=η+h)는 총수심, h는 기준면으로부터의 수심, 마찰계수 λ=g(u<sup>2</sup>+v<sup>2</sup>)<sup>1/2</sup>/(C<sup>2</sup>H), g는 중력가속도, C=H<sup>1/6</sup>/n, n은 Manning의 조도계수, f(=2ωsinφ)는 Coriolis계수, ω는 지구의 자전각속도로 7.28×10<sup>-5</sup> rad/sec이며 φ는 위도이다.

### 2.2 적용차분법

전술한 수학적모형의 차분화는 Wilders 등<sup>(8)</sup>의 방법을 이용하여 매시간단계를 둘로 나누어 1단계에서는 연속방정식 (1a)를 양해법으로 차분하여 수면변위 η를 구하고 운동량방정식인 식 (1b)와 식 (1c)를 음해법으로 차분하여 u, v를 각각 구하게 된다. 2단계에서는 식 (1b), (1c)를 u 또는 v에 대한 양해법으로 차분하여 식 (1a)에 대입한 후 식 (1a)를 η에 대한 음해법으로 해를 구하게 되는데 질량보존을 위하여 반복법으로 해를 구한다.

격자망은 유속과 수면변위가 엇갈려 정의되며

(staggered grid) 수심이 유속과 동일한 격자점에서 정의되는 Falconer 등<sup>(9)</sup>이 제안한 격자망을 택하였다. 먼저 1단계에서 식 (1a)의 차분식은 다음과 같이 양해법으로 차분하였으며 모든 격자점에서 (n+1/2) 단계의 수면변위를 구할 수 있게 된다. 여기서 모든 차분식은 중앙격자점을 하첨자 C, 평면상의 우좌상하 주변격자점을 순차적으로 각각 하첨자 E, W, N, S, 중앙격자와 주변격자 사이의 반격자점을 e, w, n, s라 하고 시간단계 n, n+1/2, n+1를 각각 상첨자 n, n1, n2로 표시하기로 한다.

$$\eta_c^{n1} = \eta_c^n - \frac{\Delta t}{2\Delta x} ((\eta_e^n + h_e)u_e^n - (\eta_w^n + h_w)u_w^n) - \frac{\Delta t}{2\Delta y} ((\eta_n^n + h_n)v_n^n - (\eta_s^n + h_s)v_s^n) \quad (2a)$$

식 (1b)에 대한 차분식은 다음과 같다.

$$(1 + \lambda - k_u + k_d)u_c^{n1} + \frac{\Delta t}{4\Delta x} u_c^n (u_e^{n1} - u_w^{n1}) + \frac{\Delta t}{2\Delta x} v_c^n (u_n^{n1} - k_d u_s^{n1}) = f v_c^n - g \frac{\eta_e - \eta_w}{\Delta x} \quad (2b)$$

여기서  $k_u$ ,  $k_d$ 는 상류방향차분에 따른 계수로서  $v_c^{n1}$ 이 양수이면  $k_u=0$ ,  $k_d=1$ 이고 음수이면  $k_u=1$ ,  $k_d=0$ 가 된다. 또한 식 (1c)에 관한 차분도 식 (1b)와 유사하게 하였다.

2단계의 차분을 위하여 연속방정식 (1a)는 다음 식 (3)과 같은 비보존형으로 전개하였다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \eta \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \eta \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

식 (3)에 대한 차분식을 반복법에 의한 정확도 제고를 위하여 다음과 같이 차분하였다. 여기서 q는 반복지수이다.

$$\frac{\eta_c^q - \eta_c^{q-1}}{\Delta t/2} = - \left[ \eta_c^{q-1} \left( \frac{u_e^q - u_w^q}{\Delta x} + \frac{v_n^q - v_s^q}{\Delta y} \right) + \frac{1}{2} \left( u_e^{q-1} \frac{\eta_e^q - \eta_c^q}{\Delta x} + u_w^{q-1} \frac{\eta_c^q - \eta_w^q}{\Delta x} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{2} \left( v_n^{q-1} \frac{\eta_n^q - \eta_c^q}{\Delta y} + v_s^{q-1} \frac{\eta_c^q - \eta_s^q}{\Delta y} \right) + \frac{h_e u_e^q - h_w u_w^q}{\Delta x} + \frac{h_n v_n^q - h_s v_s^q}{\Delta y} \quad (4a)$$

여기서  $u^q$ 는 다음 식 (4b)로 표시할 수 있고  $v^q$ 도 유사한 식으로 표시할 수 있다.

$$\left( 1 + \frac{\Delta t}{4\Delta x} (u_e^{n1} - u_w^{n1}) \right) u_c^q = u_c^{n1} - \frac{\Delta t}{2} \left( v_c^{n1} \frac{u_n^{n1} - u_s^{n1}}{2\Delta y} + \lambda u_c^{n1} - f v_c^{n1} \right) - \frac{g\Delta t}{2\Delta x} (\eta_e^q - \eta_w^q) \quad (4b)$$

즉,  $u^q$ 와  $v^q$ 를 q로 나타낼 수 있으므로 식 (4a)는  $\eta^q$ 만 미지수로 남게 된다. 식 (4a)에서  $\eta^q$ 를 구한 후 이를 식 (4b)에 대입하면  $u^q$ 를 구할 수 있고  $v^q$ 도 유사하게 구할 수 있다. 이렇게 구한  $\eta^q$ ,  $u^q$ ,  $v^q$ 를  $\eta^{q-1}$ ,  $u^{q-1}$ ,  $v^{q-1}$ 로 하여 다시 식 (4a)에 대입하면 동일한 방법으로  $\eta^q$ ,  $u^q$ ,  $v^q$ 를 역시 구할 수 있으며 이들이 수렴할 때까지 q=1, 2, 3,...의 과정을 반복하여 계산한다.

### 2.3 CGS 방법

1단계에서 u와 v를 구하는 경우와 2단계의  $\eta$ 를 구하는 경우에 완전음해법이 도입되었기 때문에 각각에 대한 행렬식 (5)를 풀어야 한다.

$$[A]\{x\} = \{b\} \quad (5)$$

여기서 [A]는 (n×n)행렬, {b}는 (n×1)벡터로 기지이고 x는 (n×1)으로 미지벡터이다. 이러한 행렬식은 CG(conjugate gradient)방법<sup>(10)</sup>을 이용하여 곱셈연산만으로 이루어진 반복법을 사용하면 효율적으로 해를 구할 수 있다. 즉, 격자수가 아무리 많다고 하더라도 구성된 행렬식은 각 행마다 5개의 영이 아닌 열이 존재하므로 그 열의 위치만 알게 되면 매 행마다 5번의 곱셈만 하면 되므로 연산시간은 격자수에 선형적으로 비례하게 된다. 그러나 CG방법은 [A]행렬이 대칭일 경우에만 수렴성이 보장되므로 본 연구에 직접 적용될 수는 없으며 식 (5)를 다음과 같이 변형시켜 대칭행렬로 만들어야 한다.

$$[A]^T[A]\{x\} = [A]^T\{b\} \quad (6)$$

이렇게 변형시키면 원래의 CG 방법을 2번 적용한

것과 유사하게 되며 이러한 방법을 CGS 방법이라 한다. 이러한 CGS 방법은 비대칭행렬식에도 수렴성이 보장되지만 [A]행렬의 형태에 따라 수렴속도는 크게 차이가 난다. 1단계의 u, v를 구할 경우 CGS 방법의 적용은 수렴속도에 큰 문제점을 보이지 않고 있으나 2단계의 η를 구할 경우에는 수렴속도가 현저히 떨어지게 된다.

이러한 현상을 극복하기 위하여 다음과 같은 preconditioned CGS 방법을 도입하였다. 즉 식 (5)의 양변에 적절한 실수행렬 [Q]<sup>-1</sup>를 곱하면

$$[Q]^{-1}[A]\{x\}=[Q]^{-1}\{b\} \quad (7a)$$

또는

$$([Q]^{-1}[A][Q]^{-T})([Q]^T\{x\})=[Q]^{-1}\{b\} \quad (7b)$$

와 같이 되며 이는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[A']\{x'\}=\{b'\} \quad (7c)$$

여기서 [A']=[Q]<sup>-1</sup>[A][Q]<sup>-T</sup>, {x'}≡([Q]<sup>T</sup>{x}), {b'}=[Q]<sup>-1</sup>{b}이고 양변에 [A']<sup>T</sup>를 곱하면 식 (6)과 유사한 형태인 다음 식 (7d)를 얻을 수 있다.

$$[A']^T[A']\{x'\}=[A']^T\{b'\} \quad (7d)$$

식 (7d)를 푸는 알고리즘은 다음과 같다<sup>(7)</sup>.

- 1) 초기값 {x<sub>0</sub>}를 임의로 가정한다.
- 2) 모든 격자점에서 R<sub>0</sub>=A<sup>T</sup>M<sup>-1</sup>(b-Ax<sub>0</sub>)와 P<sub>0</sub>=M<sup>-1</sup>R<sub>0</sub>를 계산한다. 여기서 M=QQ<sup>T</sup>이다.
- 3) 매 반복상태(i)에서 다음을 계산한다.

$$\alpha_i = \frac{(R_i, M^{-1}R_i)}{(AP_i, M^{-1}AP_i)}$$

- 4) x<sub>i+1</sub>=x<sub>i</sub>+α<sub>i</sub>P<sub>i</sub>를 계산한다.
- 5) 해의 수렴성을 확인한다.
- 6) R<sub>i+1</sub>=R<sub>i</sub>-α<sub>i</sub>A<sup>T</sup>M<sup>-1</sup>AP<sub>i</sub>를 계산한다.
- 7) 다음을 계산한다.

$$\beta_i = \frac{(R_{i+1}, M^{-1}R_{i+1})}{(R_i, M^{-1}R_i)}$$

- 8) P<sub>i+1</sub>=M<sup>-1</sup>R<sub>i+1</sub>+β<sub>i</sub>P<sub>i</sub>를 계산한다.
  - 9) i=i+1로 하고 단계 3)으로 간다.
- preconditioner [Q]는 다음 식 (8)과 같이 정의<sup>(7)</sup>

되는 식을 사용하였으며 이 식에서 ω는 SOR(successive over-relaxation)의 relaxation parameter와 유사한 것이고 D<sub>0</sub>, L<sub>0</sub>, U<sub>0</sub>는 각각 [A<sub>0</sub>]의 대각행렬, 하삼각행렬, 상삼각행렬이며 [A<sub>0</sub>]는 유속이 0, 수심이 일정한 상태의 [A]로서 discrete Laplacian이라 불리며 대칭행렬이다.

$$[Q]=\{(2-\omega)\}^{-1/2}(D_0+\omega L_0)D_0^{-1/2} \quad (8)$$

상기 알고리즘은 세가지 주요연산, 즉 [A]{r}, [A]<sup>T</sup>

{r}, [M]<sup>-1</sup>{r} 등과 같이 행렬과 벡터의 곱셈연산으로 이루어져 있다. 앞의 두 연산에는 별 문제가 없으나 세번째 연산은 [Q]<sup>-1</sup>를 포함하므로 쉽게 구할 수 없으며 다음과 같은 SSOR(symmetric SOR) 방법을 이용하여 연산이 가능해진다. 즉, [Y]=[M]<sup>-1</sup>{r}이라 하고 식 (8)을 대입하면

$$[Y]=(D_0+\omega U_0)^{-1}D_0(2-\omega)(D_0+\omega L_0)^{-1}\omega\{r\} \quad (9a)$$

와 같이 되고

$$[Y']=(D_0+\omega L_0)^{-1}\omega\{r\} \quad (9b)$$

라 하면

$$[Y]=(D_0+\omega U_0)^{-1}D_0(2-\omega)[Y'] \quad (9c)$$

의 식이 성립한다. 식 (9b)와 식 (9c)를 각각 변형시키면

$$[Y]=D_0^{-1}\omega(\{r\}-L_0[Y']) \quad (9d)$$

$$[Y]=(2-\omega)[Y']-D_0^{-1}\omega U_0[Y] \quad (9e)$$

와 같이 되는데 두 번의 연속된 SOR 방법으로 [Y]를 계산할 수가 있다.

### 3. 모형의 적용

#### 3.1 적용대상수역

본 연구를 통해 개발된 수치모형을 우리나라 서해안에 위치한 새만금지구에 적용하였다. 새만금지구는 그림 1에 나타난 바와 같이 변산해수욕장과 고군산열도, 그리고 군산항을 잇는 40,100 ha의 간척지가 조성될 대규모 간척사업 대상지구로서 최대 조차는 약 8m 정도이다. 수치실험 대상수역을 그림

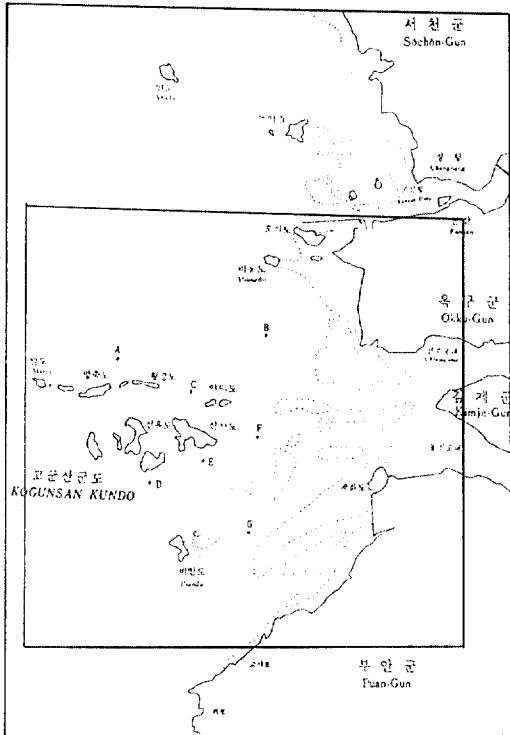


그림 1. 적용대상수역

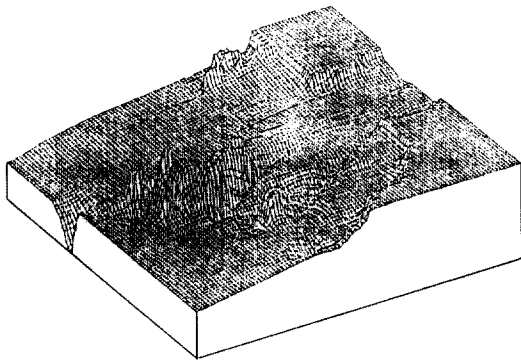


그림 2. 바닥의 형상

1의 내부에 도시하였으며, 방조제 건설예정지점 부근인 지점 A부터 지점 G까지 7개 지점에서 유속에 대하여 계산치와 관측치를 비교하게 된다. 또한 적용수역의 바닥형상을 그림 2에 도시하였는데 방죽도 남안, 신시도 남안, 그리고 비안도 동쪽 등에 해저협곡이 크게 발달되어 있음을 확인할 수 있으며 여기 저기 흩어져 있는 섬과 함께 수심도 매우 불규칙

적이며 조간대가 널리 퍼져 있는 수역이어서 ADI 수치모형을 적용할 경우에는 ADI 효과가 크게 우려되며 공간적 불안정성 등 적지 않은 오차가 수반될 것으로 예견된다.

### 3.2 입력자료의 선정

원활한 간척사업을 위해서는 간척예정지의 유황 파악이 매우 중요한 문제이며 이를 위해서는 특히 외해경계조건의 영향을 극소화시키는 동시에 격자간격을 최소화할 필요가 있다. 그러나 이 두 문제는 서로 상충되기 때문에 주어진 컴퓨터 용량을 감안하여 공간 격자간격과 공간 격자갯수를 양방향 공히 700m와 50개로 하였으며 시간 격자간격은 경제성을 고려하여 2분으로 하였다. 폐경계조건으로는 육지 경계에 수직한 유속이 0이라는 조건을 부여하였고 개경계조건은 실시간 예측이 가능하도록 4개의 모서리 지점에서 4개의 주요분조( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )<sup>(6)</sup>로 부여한 후 이를 개경계를 따라 선형보간하였다.

### 3.3 적용결과

본 연구의 초점은 해저협곡 등지에서 ADI 효과를 극복할 수 있는가의 여부인데 이는 수위보다 유속의 정확성 검토로 파악되어야 한다. 수위는 분조별 해석을 통해 계산치와의 비교가 가능하지만 유속은 그렇지 않기 때문에 실시간 모의가 요구된다. 따라서 모형의 검증용을 위하여 대조기에 해당되는 1990년 8월 20일부터 22일까지를 해석기간으로 택하였다. 모든 지점에서 수위와 유속이 영이라는 초기조건으로부터 계산이 시작된 후 이러한 초기조건의 영향이 미미해지는 세 주기 후에 그림 1의 7개 지점에서 시간에 따른 지점별 유속의 계산치와 관측치를 비교하였다. 여기서 관측치라 함은 실제 관측자료. 획득이 용이치 않아 차선책으로 지점별 상대적 유속 크기가 중요시 되는 본 연구의 특성을 고려하여 건설부 수로국에서 발행하는 조류도를 참고로 한 값을 말한다. 이들을 그림 3부터 그림 9에 도시하였는데 동향과 북향을 각각 x, y좌표계의 양의 방향으로 택하여 성분별 유속과 성분유속의 벡터합을 나타내는 유속을 동시에 나타내었다. 이 그림을 보면 지점 C를 제외하고는 각 유속성분 및 총유속의 크기가 근사적인 일치를 보이고 있다. 즉 유속의 크

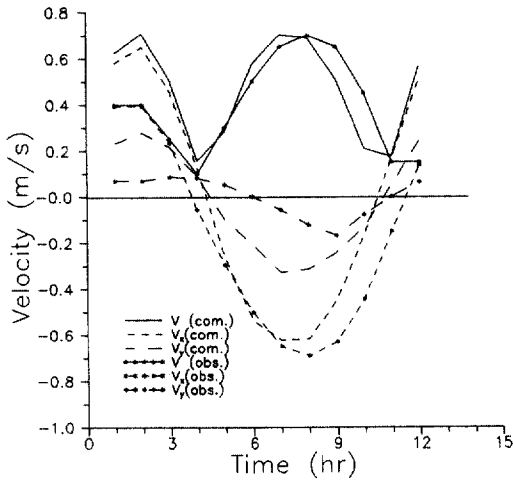


그림 3. 계산유속과 관측유속 (지점 A)

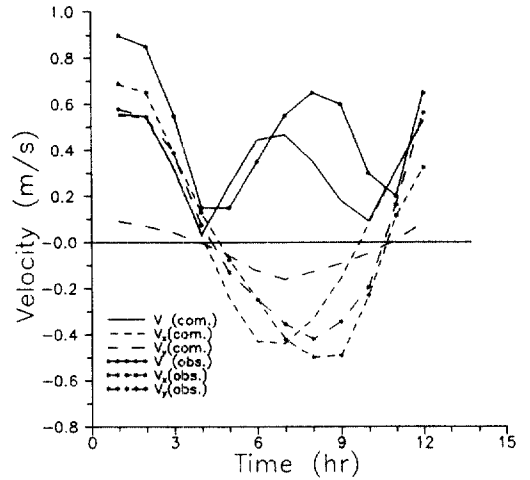


그림 5. 계산유속과 관측유속 (지점 C)

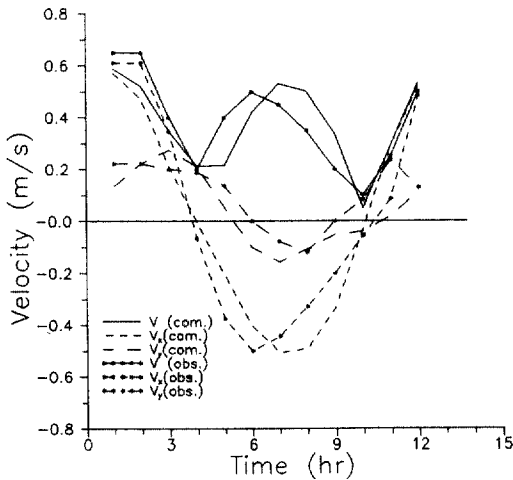


그림 4. 계산유속과 관측유속 (지점 B)

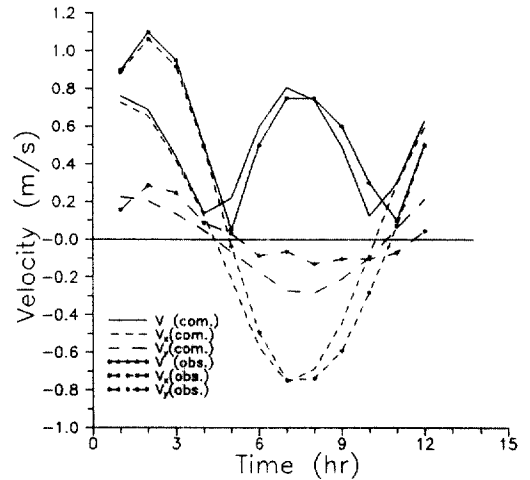


그림 6. 계산유속과 관측유속 (지점 D)

기는 물론 유속의 방향도 합당하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한 각 지점의 낙조시 계산유속과 관측유속의 최대값을 표 1에 나타내었으며 이를 토대로 각 지점의 유속을 횡축은 계산치, 종축은 관측치로 하여 도시한 그림이 그림 10이다. 이 그림을 보면 계산치와 관측치가 일치하는 선인 실선 주변에 모든 지점의 값이 몰려 있는 것을 알 수 있으며, 특히 해저협곡에 위치하여 관측유속도 빠르게 나타나고 있는 지점인 E지점에서 계산치도 크게 나오고 있으며 관측유속이 느리게 나타나고 있는 B, C지점

에서는 계산치도 작게 나타나고 있는 등 전체적으로 지역적 흐름특성을 매우 잘 재현시키고 있는 것으로 사료된다.

한편 한 주기동안 계산된 유속장 중 최강창조시, 만조시, 최강낙조시, 저조시 유속장을 각각 그림 11부터 그림 14에 도시하였다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이 유효점성항이 포함되어 있지 않음에도 불구하고 복잡한 지형에서 안정한 결과를 얻을 수 있었다. 시간에 따라 폐경계가 변하는 모습이 잘 재현되고 있으며 개경계 부근을 제외하고는 유속의 크기와 방향도 합당하게 나타나고 있다. 특히 최강창조시와

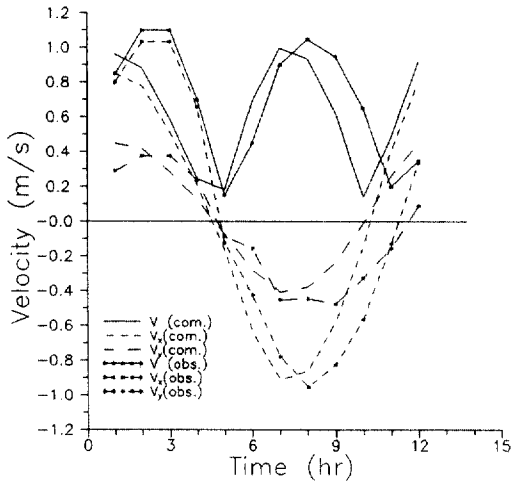


그림 7. 계산유속과 관측유속 (지점 E)

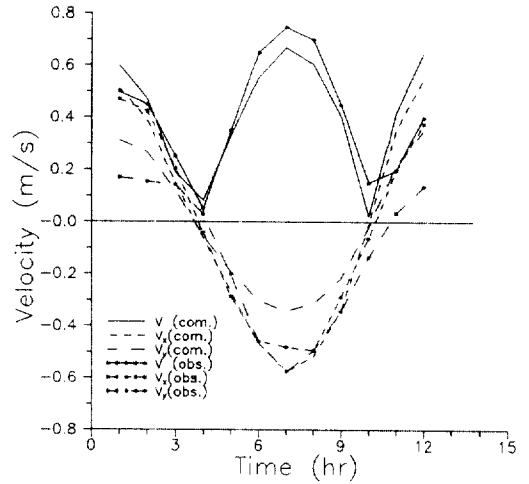


그림 9. 계산유속과 관측유속 (지점 G)

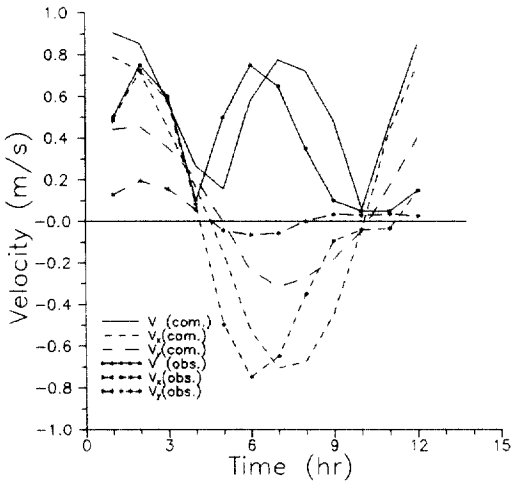


그림 8. 계산유속과 관측유속 (지점 F)

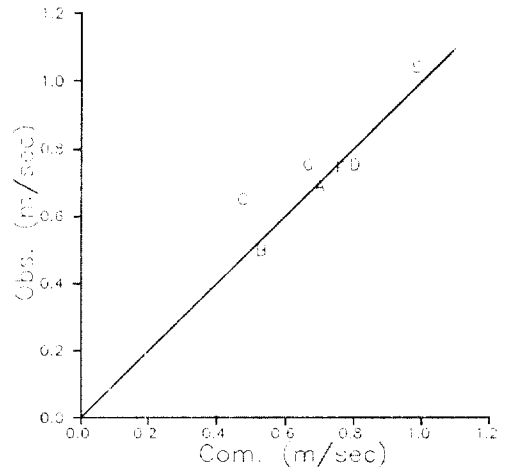


그림 10. 유속비교도

표 1. 계산유속과 관측유속 (단위 : m/sec)

	Computed	Observed	Ratio
A	0.70	0.69	1.02
B	0.53	0.50	1.06
C	0.47	0.65	0.72
D	0.80	0.75	1.07
E	0.98	1.04	0.94
F	0.76	0.74	1.03
G	0.66	0.75	0.88

최강낙조시 해저협곡 부근의 유속이 주위에 비해 크게 나타나는 등 실제현상과 부합되는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구를 통해 개발된 모형을 새만금수역에 적용한 결과 지형의 복잡성에도 불구하고 유속장 및 조간대가 매우 잘 재현되었으며 관측치와 비교한 결과 정확성도 입증되었다. 이러한 정확도의 증진은

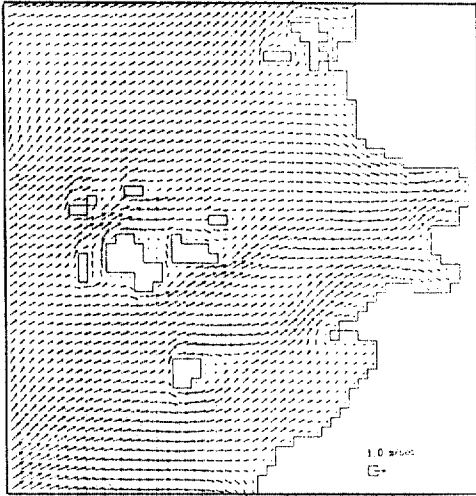


그림 11. 최강창조시 유속장

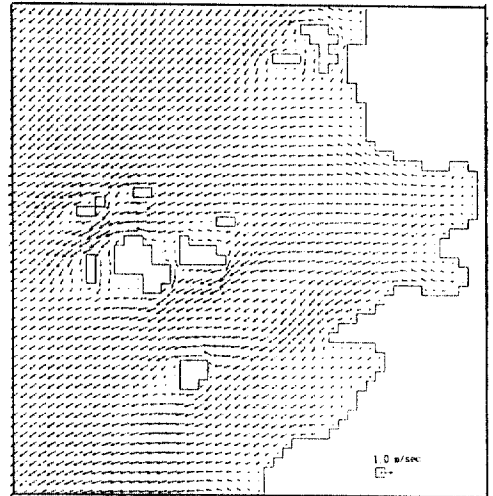


그림 13. 최강낙조시 유속장

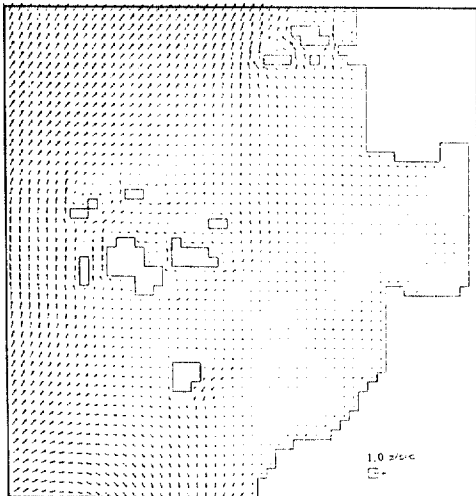


그림 12. 만조시 유속장

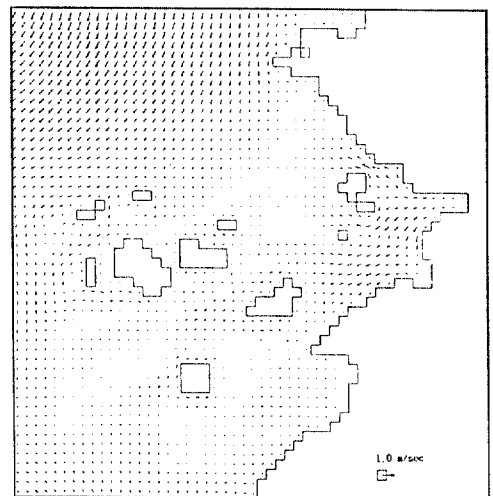


그림 14. 저조시 유속장

완전음해법의 도입에 기인한 것으로서 유효점성항 없이도 안정한 결과를 보이며 공간격자 크기가 작으면 작을수록 Courant수의 제약을 받게 되는 양해법에 비해 경제성도 증진될 수 있을 것이다. 또한 본 모형을 이용해 수리모형실험 및 방조제 유실과 관련된 세부 수치모형의 경계조건도 취득할 수 있으며 새로운 경계조건 하에서 방조제 건설시의 유속산정에도 사용할 수 있다.

### 참 고 문 헌

1. Weare, T.J., "Errors Arising from Irregular Boundaries in ADI Solutions of the Shallow-Water Equations", *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 14, 1979.
2. Benqué, J.P., Cunge, J.A., Feuillet, J., Hanguel, A. and Holly, F.M., "New Method of Tidal Current Computation", *Proc. of ASCE, Waterway, Port, Coastal Ocean Div.*, Vol. 108, 1982.



3. Stelling, G.S., Wiersma, A.K. and Willemse, J.B.T. M., "Practical Aspects of Accurate Tidal Computations", *J. of Hydraulic Engineering*, Vol. 112, No. 9, Sep. 1986.
4. 강주환, 유한차분모형에 의한 하구의 염도확산 분석, 박사학위논문, 서울대학교 토목공학과, 1991년 2월.
5. 농림수산부 농어촌진흥공사, 새만금 물막이 구간의 수리현상 변화예측을 위한 2차원 수치모형 개발, 1990년 12월.
6. Bayliss, A., Goldstein, C.I. and Turkel, E., "An Iterative Method for the Helmholtz Equation", *J. of Computational Physics*, Vol. 49, 1983.
7. Panchang, V.G., Pearce, B.R., Wei, G. and Cushman-R., B., "Solution of the Mild-Slope Wave Problem by Iteration", *Applied Ocean Research*, Vol. 13, No. 4, 1991.
8. Wilders, P., van Stun, L., Stelling, G.S. and Fokkema, G.A., "A Fully Implicit Splitting Method for Accurate Tidal Computations", *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 26, 1988.
9. Falconer, R.A. and Owens, P.H., "Numerical Simulation of Flooding and Drying in a Depth-Averaged Tidal Flow Model", *Proc. Instn. Civ. Engrs. Part 2*, Vol. 83, 1987.
10. Sonneveld, P., Wesseling, P. and de Zeeuw, P.M., "Multigrid and Conjugate Gradient Acceleration of Basic Iterative Methods", *Numerical Methods for Fluid Dynamics 2*, Morton & Baines (ed.), Clarendon Press, Oxford, 1986.

(接受 : 1993. 1. 19)