
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 35 卷 第 1 號 1998 年 2 月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 35, No. 1, February 1998

음해법에 의한 2차원 조류유동 계산법

김선영*, 송무석*

An Implicit Numerical Method for Two-Dimensional Tidal Computation

by

Sun-Young Kim* and Mu-Seok Song*

요 약

2차원 천수방정식에 기초한 조류계산 수치모델을 개발하였다. 복잡한 해안선의 입력을 단순화할 수 있는 직각격자를 사용하였으며, 방정식은 효율이 뛰어난 것으로 알려져 있는 인수분해음해법 (Implicit Factorization Method)에 의하여 수치적으로 풀었다. 대류항은 상류차분법으로 처리하여 수치소산이 자동적으로 들어가도록 하였으며, 따라서 수치불안정에 의한 발산을 억제할 수 있었다. 모델의 검증을 위하여 선형화된 천수방정식을 풀고 계산결과를 해석해와 비교하였으며 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 수치모델의 응용 예로서 인천항부근의 경인운하 개발예정인 수로에서의 조류 계산결과를 보였다.

Abstract

A two-dimensional numerical model for tidal currents based on the depth averaged equation is developed. The model employs a rectangular grid system for its simplicity in the application of complicate coastal shore lines. To raise computing efficiency, implicit approximate factorization scheme is implemented in solving governing equations. An upwind-differencing is used to discretize convective terms, which provides a numerical dissipation automatically and suppresses any oscillations caused by nonlinear instabilities. Some numerical tests are made against the analytic solutions of a linearized shallow water equation to validate the developed numerical scheme, and comparisons of the model prediction with the analytic solution are satisfactory. As a real application, the tidal currents are computed on the Incheon area where the tidal currents are important for the design of new canal which is under construction.

접수일자 : 1995년 5월 22일, 재접수일자 : 1996년 11월 23일

* 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학연구센터

1. 서 언

최근 국내 연안에서 빈번하게 일어나고 있는 유조선의 해난사고로 인한 대형 해상누유 사고들은 사회경제적으로 그 피해가 너무 커서 유류운송을 담당하고 있는 해운업계뿐만 아니라 선박을 건조하고 있는 조선업계에도 중요한 관심사로 대두되게 되었다. 유출된 기름은 초기에는 어장 및 양식장들을 파괴시켜 단기적인 경제적 손실을 일으키며, 시간이 지남에 따라 해조류 및 어패류의 서식처 파괴등 해양환경의 파괴로 인한 전체 먹이사슬의 파괴로 이어져 인류의 생존까지 위협하는 심각한 국면까지 도달할 수 있게 한다[1].

이러한 누유사고는 근본적으로 선박의 조종안전성 기준의 강화등으로 해난사고를 방지하거나 이 중선각의 의무화등으로 사고가 나도 기름이 유출될 가능성을 줄이는 등 미연에 유출사고를 방지하는 것이 우선이겠으나, 일단 사고가 일어났을 때 이를 초기에 널리 확산되지 않도록 그 피해를 줄이는 것도 매우 중요하다. 즉, 누유사고가 발생하였을 때 신속히 물리적으로나 기계적으로 유출된 기름을 수거하는 소위 해양오염방제기술에 대한 확보가 필요하다. 해양오염방제기술은 기름의 확산이동예측기술, 효과적으로 기름을 가두는 기술 및 가두어진 기름을 회수하는 기술등으로 크게 나누어 생각할 수 있다[2]. 사고 초기에 기름이 널리 확산되지 않도록 신속하게 회수하기 위하여는 각종 방제장비들을 적절한 위치에 신속하게 배치하는 것이 매우 중요하며, 이러한 의미에서 첫번째의 기름의 확산이동예측기술은 해양오염방제기술의 기본이 된다고 할 수 있다. 선진국에서는 이미 기름의 확산이동예측을 위한 소프트웨어들을 개발하여 사고현장에서 직접 사용하고 있으며[3,4], 국내에서는 최근에 이 분야에 대한 연구가 시작되고 있는 단계이다[5,6,7].

기름의 확산이동은 해수유동에 크게 영향을 받으므로 해수유동의 정확한 예측이 중요한 기술요소이다. 해수유동의 예측은 관측에 의한 자료를 쓰거나 수치모델을 사용하여 구하는 방법을 생각할 수 있다. 우리나라에서는 매년 수로국에서 연

안의 특정 지점에서 해수유동을 관측하고 이를 해석하여 수로기술연보, 조석표, 조류도등을 통하여 발표하고 있다. 그러나 이들 자료들은 시간적 그리고 공간적으로 매우 제한되어 있기 때문에 기름의 확산이동의 예측에 사용하기에는 부족하다. 또한 수치모델만에 의존하여 해수유동을 예측할 경우에는 경계조건과 바닥마찰상수나 난류상수 등의 불확실성으로 결과의 정확도에 확신을 갖기 어렵다. 따라서 해수유동의 예측은 수치모델과 관측치들을 결합하여 사용하는 것이 일반적이다. 즉, 일부 관측치들을 수치모델의 경계조건이나 검증용 혹은 매개상수 조정용으로 사용하여 관심영역에서의 모든 점들에 대한 해수유동을 구하는 것이다.

해수유동의 예측에 관한 수치모델들은 해양학분야나 해안공학분야에서는 고전적인 문제로서 잘 정립되어 있는 데 이들은 크게 3차원 모델과 2차원 모델로 나눌 수 있다[8,9]. 2차원 모델은 일반적으로 해수유동의 특성에 있어서 깊이방향의 변화가 수평방향의 변화에 비하여 무시할 정도로 작다는 데 착안한 것으로, 3차원 운동방정식을 수심방향으로 적분하고 이의 평균을 취한 소위 천수방정식(depth averaged equation)을 기초로 한 모델로 계산시간을 크게 단축시킬 수 있다는 점에서 해수유동의 예측모델로서는 가장 널리 쓰이고 있다. 그러나 수심방향의 변화가 크거나 깊이에 따라 수온이나 밀도의 변화가 커서 수직방향의 유동이 크거나 특히 수직방향의 유동이 주 관심일 때는 3차원 모델이 사용되지만, 많은 계산량이 필요하다는 단점을 갖고 있어 일반적인 해수유동의 예측모델로는 실용적이지 못하다.

본 논문에서는 기름의 확산이동의 예측에 필요한 해수유동의 예측을 위하여 개발한 2차원 해수유동예측 수치모델에 대하여 기술하기로 한다. 기존의 수치계산방법으로는 양해법[5,10,11,12]이나 ADI법[13,14,15]이 널리 사용되고 있는 데, 본 논문에서는 항공분야에서 N-S 방정식의 수치해법으로 개발되어 효율적이라고 알려진 IAF(Implicit Approximate Factorization)법을 조류방정식에 적용하였다. 대류항의 미분은 상류차분법을 사용하여 자동적으로 수치소산항이 들어갈 수 있도록 하

였으며, 해안선의 복잡한 지형을 단순히 처리할 수 있도록 직각격자계를 사용하였다. 개발된 수치 모델을 검증하기 위하여 선형화된 조류방정식을 수치계산하였으며, 계산결과는 해석해와 좋은 일치를 보였다. 또한 최근 경인운하 개발과 관련하여 항로개발 때문에 조류에 대한 관심이 높아지고 있는 영종도 동측의 인근 해역에 대한 조류를 계산하여 본 연구에서 개발된 조류계산 프로그램의 실효적 조류계산에 대한 실용성을 보였다.

2. 2차원 조류방정식

밀도의 공간변화를 무시하고 깊이방향의 규모보다 수평방향의 규모가 훨씬 더 크다는 가정을 사용하면, 다음과 같은 3차원 조류수학모형을 얻을 수 있다[2].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f v + K_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + K_V \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - f u + K_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + K_V \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1c)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1d)$$

위에서 x, y, z 는 각기 수면상에 원점이 놓인 우수 직각고정좌표계에서의 수평방향 및 연직상방의 좌표를 나타내며, u, v, w 는 각 방향의 속도 성분이고, η 는 수면 상승량이다. t 와 p 는 시간과 압력이고, g 는 중력가속도, f 는 Coriolis 상수이다. K_H 와 K_V 는 난류 eddy 점성 및 분자에 의한 점성 효과가 함께 고려된 유효확산계수로 각기 수평방향과 연직방향의 운동에 의한 확산계수이다.

(1)식을 깊이 방향으로 적분하여 평균을 취하면

아래와 같은 2차원 조류방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial u_d}{\partial t} + u_d \frac{\partial u_d}{\partial x} + v_d \frac{\partial u_d}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f v_d + K_{H2D} \left(\frac{\partial^2 u_d}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_d}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho H} (\tau_{w,x} - \tau_{b,x}) \quad (2a)$$

$$\frac{\partial v_d}{\partial t} + u_d \frac{\partial v_d}{\partial x} + v_d \frac{\partial v_d}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - f u_d + K_{H2D} \left(\frac{\partial^2 v_d}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_d}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{\rho H} (\tau_{w,y} - \tau_{b,y}) \quad (2b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2c)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial H u_d}{\partial x} + \frac{\partial H v_d}{\partial y} = 0 \quad (2d)$$

윗 식에서 H 는 수면부터 바닥까지의 거리이며 u_d, v_d 는 수심에 대한 평균속도 성분들로 다음과 같이

$$u_d = \frac{1}{\eta + h} \int_{-h}^{\eta} u \, dz = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} u \, dz \quad (3a)$$

$$v_d = \frac{1}{\eta + h} \int_{-h}^{\eta} v \, dz = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} v \, dz \quad (3b)$$

로 정의되고, τ_w, τ_b 는 각기 수면과 바닥에서의 마찰에 의한 전단력으로 다음식을 사용하여 구하기로 한다.

$$\begin{aligned} \tau_{w,x} &= \rho K_V \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = \rho_a \gamma_w u_a \sqrt{u_a^2 + v_a^2} \\ \tau_{w,y} &= \rho K_V \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=0} = \rho_a \gamma_w v_a \sqrt{u_a^2 + v_a^2} \\ \tau_{b,x} &= \rho K_V \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=-h} = \rho_a \gamma_a u \sqrt{u_d^2 + v_d^2} \\ \tau_{b,y} &= \rho K_V \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=-h} = \rho_a \gamma_a v \sqrt{u_d^2 + v_d^2} \end{aligned} \quad (4)$$

위에서 (u_a, v_a) 와 ρ_a 는 각기 바람의 속도와 밀도를 나타내며, 계수 γ_w, γ_a 는 마찰상수로 지형과 유속에 의존하는 것으로 보통 경험적인 값을 사용한다.

본 논문에서는 2차원 조류계산을 위하여 (2)식을 지배방정식으로 사용한다. 단, 편의상 이하에서는 아랫 첨자 d 를 생략하기로 하며, 따라서 u, v 는 모두 수심평균을 취한 값을 의미한다.

3. 수치계산 방법

계산기법으로는 Beam과 Warming[16]에 의하여 소개된 IAF(Implicit Approximate Factorization)법을 사용한다. IAF법은 ADI법의 일종으로 계산시간이 매우 빠르다는 특징이 있어 항공분야에서 Navier-Stokes 방정식을 푸는 데 널리 사용되고 있다.

3.1 인수분해 음해(IAF)법

(2)식을 다음과 같이 벡터(vector)형으로 표시하기로 한다.

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial y} + \mathbf{C} \nabla^2 \mathbf{q} + \mathbf{D} \mathbf{q} = \hat{\mathbf{R}} \quad (5)$$

여기에서

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ \eta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} u & 0 & g \\ 0 & u & 0 \\ H & 0 & u \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} v & 0 & 0 \\ 0 & v & g \\ 0 & H & v \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -K_{H2D} & 0 & 0 \\ 0 & -K_{H2D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_w}{H} |\mathbf{V}| & -f & 0 \\ f & \frac{\gamma_w}{H} |\mathbf{V}| & 0 \\ \frac{\partial h}{\partial x} & \frac{\partial h}{\partial y} & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \frac{\rho_a \gamma_a}{\rho H} |\mathbf{V}_a| u_a \\ \frac{\rho_a \gamma_a}{\rho H} |\mathbf{V}_a| v_a \\ 0 \end{bmatrix}$$

이며, $|\mathbf{V}| = \sqrt{u^2 + v^2}$, $|\mathbf{V}_a| = \sqrt{u_a^2 + v_a^2}$ 이다.

(5)식에 음해(implicit) 시간미분을 적용하면 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\Delta \mathbf{q}^n}{\Delta t} + \mathbf{A}^{n+1} \frac{\partial \mathbf{q}^{n+1}}{\partial x} + \mathbf{B}^{n+1} \frac{\partial \mathbf{q}^{n+1}}{\partial y} + \mathbf{C} \nabla^2 \mathbf{q}^{n+1} + \mathbf{D}^{n+1} \mathbf{q}^{n+1} = \hat{\mathbf{R}} \quad (7)$$

위에서 윗 첨자 n은 n번째 시간스텝에서의 값을

의미하며, Δ 는 미분연산자로 $\Delta \mathbf{q}^n = \mathbf{q}^{n+1} - \mathbf{q}^n$ 이다. 이 미분연산자를 이용하면 (7)식에서 모든 (n+1)번째 시간스텝에서의 값을 다음과 같이 n번째 시간스텝에서의 값과 증분항의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{A}^{n+1} \mathbf{A} = \mathbf{A}^n + \frac{\partial \mathbf{A}^n}{\partial t} \Delta t \quad (8a)$$

$$= \mathbf{A}^n + \Delta \mathbf{A}^n + O(\Delta t^2)$$

$$\mathbf{B}^{n+1} = \mathbf{B}^n + \frac{\partial \mathbf{B}^n}{\partial t} \Delta t \quad (8b)$$

$$= \mathbf{B}^n + \Delta \mathbf{B}^n + O(\Delta t^2)$$

$$\mathbf{D}^{n+1} \approx \mathbf{D}^n \quad (8c)$$

여기서

$$\Delta \mathbf{A}^n = \begin{bmatrix} \Delta u & 0 & 0 \\ 0 & \Delta u & 0 \\ \Delta \eta & 0 & \Delta u \end{bmatrix}^n \quad (8d)$$

$$\Delta \mathbf{B}^n = \begin{bmatrix} \Delta v & 0 & 0 \\ 0 & \Delta v & 0 \\ 0 & \Delta \eta & \Delta v \end{bmatrix}^n \quad (8e)$$

다음은 모든 항을 다음과 같이 선형화 시킨다.

$$\left(\mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x} \right)^{n+1} = \left(\mathbf{A}^n + \frac{\partial \mathbf{A}^n}{\partial t} \Delta t \right) \left(\frac{\partial \mathbf{q}^n}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \mathbf{q}^n}{\partial x} \Delta t \right) \quad (9a)$$

$$= \mathbf{A}^n \frac{\partial \mathbf{q}^n}{\partial x} + \mathbf{A}^n \frac{\partial}{\partial t} \Delta \mathbf{q}^n + \Delta \mathbf{A}^n \frac{\partial \mathbf{q}^n}{\partial x} + O(\Delta t^2)$$

$$\left(\mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial y} \right)^{n+1} = \mathbf{B}^n \frac{\partial \mathbf{q}^n}{\partial y} + \mathbf{B}^n \frac{\partial}{\partial t} \Delta \mathbf{q}^n + \Delta \mathbf{B}^n \frac{\partial \mathbf{q}^n}{\partial y} + O(\Delta t^2) \quad (9b)$$

$$(\mathbf{C} \nabla^2 \mathbf{q})^{n+1} = \mathbf{C} \nabla^2 \mathbf{q}^n + \mathbf{C} \nabla^2 \Delta \mathbf{q}^n + O(\Delta t^2) \quad (9c)$$

$$\mathbf{D} \mathbf{q}^{n+1} = \mathbf{D} \mathbf{q}^n + \mathbf{D} \Delta \mathbf{q}^n + O(\Delta t^2) \quad (9d)$$

$$\Delta \mathbf{A}^n \frac{\partial \mathbf{q}^n}{\partial x} = \begin{bmatrix} \Delta u & 0 & 0 \\ 0 & \Delta u & 0 \\ \Delta \eta & 0 & \Delta u \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} \end{bmatrix}^n \quad (9e)$$

$$= \Delta u^n \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} \end{bmatrix}^n + \Delta \eta^n \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} \end{bmatrix}^n$$

$$\Delta \mathbf{B}^n \frac{\partial \mathbf{q}^n}{\partial y} = \begin{bmatrix} \Delta v & 0 & 0 \\ 0 & \Delta v & 0 \\ 0 & \Delta \eta & \Delta v \end{bmatrix}^n \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{bmatrix}^n \quad (9f)$$

$$= \Delta v^n \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{bmatrix}^n + \Delta \eta^n \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix}^n$$

(9e),(9f)식으로부터 다음과 같이 벡터 $\hat{\mathbf{P}}$ 를 정의한다.

$$\Delta \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x} + \Delta \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial y} = \hat{\mathbf{P}} \Delta \mathbf{q} \quad (10a)$$

$$\hat{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (10b)$$

(8)-(10)식을 (7)식에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$[1 + \Delta t \{ \mathbf{A}^n \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{B}^n \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{C} \nabla^2 + \mathbf{D}^n + \hat{\mathbf{P}}^n \}] \Delta \mathbf{q}^n = \Delta t \mathbf{R}^n \quad (11)$$

위에서 \mathbf{R} 은 다음과 같다.

$$\mathbf{R} = \hat{\mathbf{R}} - \mathbf{A} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial x} - \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial y} - \mathbf{C} \nabla^2 \mathbf{q} - \mathbf{D} \mathbf{q} \quad (12)$$

(11)식을 인수분해하여 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} [1 + \Delta t \{ \mathbf{A} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{C} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \}] \\ [1 + \Delta t \{ \mathbf{B} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{C} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \mathbf{P} \}] \Delta \mathbf{q}^n = \Delta t \mathbf{R}^n \end{aligned} \quad (13)$$

(13)식은 x-방향, y-방향으로 나누어 풀게 되면 아래와 같이 두개의 상미분 방정식으로 바뀌게 된다.

x-sweep

$$[1 + \Delta t \{ \mathbf{A} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{C} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \}] \Delta \mathbf{q}^{*n} = \Delta t \mathbf{R}^n \quad (14a)$$

y-sweep

$$[1 + \Delta t \{ \mathbf{B} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{C} \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \mathbf{P} \}] \Delta \mathbf{q}^n = \Delta \mathbf{q}^{*n} \quad (14b)$$

위에서 \mathbf{P} 는 $\hat{\mathbf{P}}$ 와 \mathbf{D} 의 합으로 다음과 같이 정의 된다.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\gamma_w}{H} |\mathbf{V}| & -f + \frac{\partial u}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x} + f & \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\gamma_w}{H} |\mathbf{V}| & 0 \\ \frac{\partial H}{\partial x} & \frac{\partial H}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.2 유한 차분화

수치계산을 위하여 (14)식을 이산화한다. 격자는 정규격자로 모든 변수는 같은 점에서 정의되며, 격자 간격은 x-, y- 방향 각기 균일한 직각의 격자를 사용한다. 차분법으로 대류항을 포함하고 있는 1계 미분항은 수치 안정을 위하여 상류차분을 사용한다[17]. 그러나 1계 미분항의 계수가 행렬이기 때문에 상류차분을 사용하기 위하여는 고유치 (eigenvalue)의 부호에 따라 계수행렬을 분리할 필요가 있다. 선형대수학에 의하면, 계수행렬 \mathbf{A} 는 \mathbf{A} 의 고유치 벡터 \mathbf{L} 와 그에 대응하는 고유벡터 (eigenvector) \mathbf{S} 를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{S} \mathbf{A} \mathbf{S}^{-1} \\ &= \mathbf{S} \mathbf{A}^+ \mathbf{S}^{-1} + \mathbf{S} \mathbf{A}^- \mathbf{S}^{-1} \\ &= \mathbf{A}^+ + \mathbf{A}^- \end{aligned} \quad (16a)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u + \sqrt{gH} & 0 & 0 \\ 0 & u - \sqrt{gH} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16b)$$

$$= \begin{bmatrix} u+c & 0 & 0 \\ 0 & u-c & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} c & c & 0 \\ 0 & 0 & g \\ H & -H & 0 \end{bmatrix} \quad (16c)$$

윗 식에서 $c(=\sqrt{gH})$ 는 전파속도를 나타낸다. 고유치 벡터는 다음과 같이 양과 음의 고유치로 분리된다.

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}^+ + \mathbf{A}^- = \begin{bmatrix} \lambda_1^+ & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^+ & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^+ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_1^- & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^- & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^- \end{bmatrix} \quad (17a)$$

$$\lambda_m^\pm = \frac{\lambda_m \pm |\lambda_m|}{2} \quad (17b)$$

이를 이용하면 다음과 같이 1계 미분항을 격자 간격이 Δx 일 때 상류차분법에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \frac{\partial \mathcal{A}q}{\partial x} &= \mathbf{A}^+ \frac{\partial \mathcal{A}q}{\partial x} + \mathbf{A}^- \frac{\partial \mathcal{A}q}{\partial x} \\ &= \mathbf{A}^+ \left(\frac{\mathcal{A}q_i - \mathcal{A}q_{i-1}}{\Delta x} \right) + \mathbf{A}^- \left(\frac{\mathcal{A}q_{i+1} - \mathcal{A}q_i}{\Delta x} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

윗식에서는 1차정도의 상류차분을 사용하였지만, (14a)식 우변의 R^n 에 포함되어 있는 1계 공간 미분항은 정도를 높이기 위하여 아래와 같이 3차정도의 상류차분을 사용한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} \frac{\partial q}{\partial x} &= \mathbf{A}^+ \frac{\partial q}{\partial x} + \mathbf{A}^- \frac{\partial q}{\partial x} \\ &= \mathbf{A}^+ \left(\frac{2q_{i-2} - 10q_{i-1} + 9q_i - 2q_{i+1} + q_{i+2}}{6\Delta x} \right) \\ &+ \mathbf{A}^- \left(\frac{-q_{i-2} + 2q_{i-1} - 9q_i + 10q_{i+1} - 2q_{i+2}}{6\Delta x} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

(14b)식에 행렬 \mathbf{B} 를 포함한 1계 공간 미분항에

대하여도 같은 방법으로 상류차분을 사용하고, 2계 미분항은 중심차분을 사용하면 다음과 같은 차분식을 얻는다.

x-sweep

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{x,i,j} \Delta \mathbf{q}^*_{i-1,j} + \mathbf{M}_{x,i,j} \Delta \mathbf{q}^*_{i,j} \\ + \mathbf{N}_{x,i,j} \Delta \mathbf{q}^*_{i+1,j} = \mathbf{Q}_{x,i,j} \end{aligned} \quad (20a)$$

$$\mathbf{L}_{x,i,j} = \left[-\alpha_x \mathbf{A}^+ + \frac{\alpha_x}{\Delta x} \mathbf{C} \right]_{i,j}$$

$$\mathbf{M}_{x,i,j} = \left[1 + \alpha_x (\mathbf{A}^+ - \mathbf{A}^-) - \frac{2\alpha_x}{\Delta x} \mathbf{C} \right]_{i,j} \quad (20b)$$

$$\mathbf{N}_{x,i,j} = \left[\alpha_x \mathbf{A}^- + \frac{\alpha_x}{\Delta x} \mathbf{C} \right]_{i,j}$$

$$\mathbf{Q}_{x,i,j} = \Delta \mathbf{R}_{i,j}$$

y-sweep

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{y,i,j} \Delta \mathbf{q}_{i,j-1} + \mathbf{M}_{y,i,j} \Delta \mathbf{q}_{i,j} \\ + \mathbf{N}_{y,i,j} \Delta \mathbf{q}_{i,j+1} = \mathbf{Q}_{y,i,j} \end{aligned} \quad (21a)$$

$$\mathbf{L}_{y,i,j} = \left[-\alpha_y \mathbf{B}^+ + \frac{\alpha_y}{\Delta y} \mathbf{C} \right]_{i,j}$$

$$\mathbf{M}_{y,i,j} = \left[1 + \mathbf{P} \Delta t + \alpha_y (\mathbf{B}^+ - \mathbf{B}^-) - \frac{2\alpha_y}{\Delta y} \mathbf{C} \right]_{i,j} \quad (21b)$$

$$\mathbf{N}_{y,i,j} = \left[\alpha_y \mathbf{B}^- + \frac{\alpha_y}{\Delta y} \mathbf{C} \right]_{i,j}$$

$$\mathbf{Q}_{y,i,j} = \Delta \mathbf{q}^*_{i,j}$$

위에서 $\alpha_x = \frac{\Delta t}{\Delta x}$, $\alpha_y = \frac{\Delta t}{\Delta y}$ 이며

$\mathbf{L}_{i,j}$, $\mathbf{M}_{i,j}$, $\mathbf{N}_{i,j}$ 는 3×3 행렬, $\mathbf{Q}_{i,j}$ 는 3×1 행렬로 (20), (21)식은 block tridiagonal system을 이룬다.

3.3 경계 조건

폐경계면

경계면에 수직 방향 속도는 0이고, 경계면에 평행한 방향의 속도 및 수위 η 는 경계면 수직 방향에 대하여 0-구배 조건을 사용한다. 따라서 경계면이 (1, j) 에 x방향으로 놓여 있을 경우 경계 조건은 다음과 같이 된다.

$$u_{1,j} = 0, v_{1,j} = v_{2,j}, \eta_{1,j} = \eta_{2,j} \quad (22)$$

$$\Delta u_{1,j} = 0, \Delta v_{1,j} = \Delta v_{2,j}, \Delta \eta_{1,j} = \Delta \eta_{2,j}$$

개방경계면

수위 η 는 조화함수에 의하여 주고, 경계면에 평행한 속도는 경계면 수직 방향에 대하여 0-구배 조건을 사용한다. 경계면에 수직 방향의 속도는 경계면에 평행한 속도의 경계면에 평행한 방향에 대한 변화가 작다는 가정으로 연속방정식을 근사적으로 만족하도록 양해적으로(explicitly) 구한다. 즉, 경계면이 (1, j) 에 x 방향으로 놓여 있을 경우 다음과 같은 조건을 사용한다.

$$v_{1,j} = v_{2,j}, \eta_{1,j} = \eta_A = \eta_0 \sin(\omega t - \phi)$$

$$u_{1,j} = (u_{2,j} H_{2,j} + \frac{\Delta \eta_{1,j}}{\Delta x} \Delta x) / H_{1,j}, \quad (23)$$

$$\Delta u_{1,j} = \Delta u_{2,j}, \Delta v_{1,j} = \Delta v_{2,j},$$

$$\Delta \eta_{1,j} = \Delta \eta_A = \omega \eta_0 \cos(\omega t - \phi)$$

4. 선형 해석해와의 비교

4.1 선형 천수 방정식

선형 천수방정식은 비선형 천수방정식으로부터 수위의 변동이 수심에 비하여 작다는 가정으로부터 대류항을 무시하고 선형화된 바닥 마찰항을 사용함으로써 얻을 수 있으며, 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot [h \mathbf{v}] = 0 \quad (24a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + g \nabla \eta + \tau \mathbf{v} - \frac{\mathbf{W}}{h} = 0 \quad (24b)$$

윗 식에서 $h(x, y)$ 는 평균수면으로부터 바닥까지의 깊이, τ 는 선형화된 바닥마찰상수,

W_x, W_y 는 바람에 의한 마찰응력이다.

(24)식에서 속도를 소거하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \tau \frac{\partial \eta}{\partial t} - g \nabla \cdot (h \nabla \eta) = 0 \quad (25)$$

4.2 선형해석해

Fig.1과 같이 $x = x_1, y = 0, y = L$ 의 3면은 벽으로 둘러싸이고 $x = x_2$ 의 면에서 조류가 유입되고 있고, 바람에 의한 응력은 전 영역에서 일정할 때의 문제를 생각하기로 한다. 바닥 지형은 $h = h_0 x^n$ 으로 표현한다. 이 문제의 경계조건은 다음과 같다.

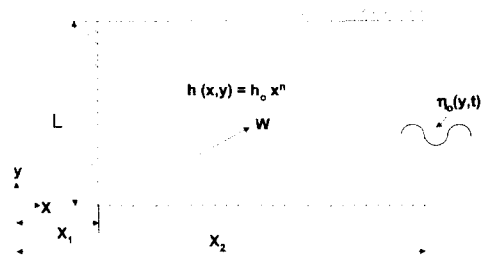


Fig.1 Coordinates and notation for the linearized problem

$$\text{at } x = x_1 : \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{W_x}{gh} = 0 \quad (26a)$$

$$\text{at } x = x_2 : \eta(x_2, y, t) = \text{Re}(\eta_0(y) e^{i\omega t}) \quad (26b)$$

$$\text{at } y = 0, L : \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{W_y}{gh} = 0 \quad (26c)$$

윗 식에서 ω 는 조류의 원주파수, W_x, W_y 는 x-, y- 방향의 바람에 의한 응력, $\eta_0(y)$ 는 $x = x_2$ 에서의 조류의 파고 및 위상을 나타내는 복소함수이다. (26)식을 경계조건으로 하는 (25)식의 해석해를 Lynch와 Gray[18]는 바람이 없을 때

의 해 η_f 와 조류가 없을 때의 해 η_w 로 분리하여 구한 바 있다. 풀이 과정은 참고문헌[18]에 나와 있으므로 생략하기로 하고 여기서는 다음절에서 수치계산과 비교하기 위하여 사용될 특정한 경우의 해에 대하여 인용하기로 한다.

1차원 문제

η_0 가 y 의 함수가 아닌 상수이고 $W_y=0$ 이면 (24)식은 다음과 같은 1차원 해를 갖는다.

$$1) h(x) = h_0 \quad (n=0),$$

$$\eta_w(x) = \frac{W_x(-x_2 + x)}{gh_0} \quad (27a)$$

$$\eta_f(x, t) = \text{Re}\{\eta_0 e^{i\omega t} \frac{\cos(\beta(x-x_1))}{\cos(\beta(x_2-x_1))}\} \quad (27b)$$

$$u_f(x, t) = \text{Re}\left\{\frac{-i\omega\eta_0}{gh_0} e^{i\omega t} \frac{\sin(\beta(x-x_1))}{\cos(\beta(x_2-x_1))}\right\} \quad (27c)$$

$$2) h(x) = h_0 x^2 \quad (n=2).$$

$$\eta_w(x) = \frac{W_x(1/x_2 - 1/x)}{gh_0} \quad (28a)$$

$$\eta_f(x, t) = \text{Re}\{(Ax^{s_1} + Bx^{s_2})e^{i\omega t}\} \quad (28b)$$

$$u_f(x, t) = \text{Re}\{(As_1 x^{s_1-1} + Bs_2 x^{s_2-1}) i\omega e^{i\omega t} / \beta^2 h_0\} \quad (28c)$$

$$A = \frac{\eta_0 s_2 x_1^{s_2}}{s_2 x_1^{s_2} x_2^{s_1} - s_1 x_1^{s_1} x_2^{s_2}} \quad (28d)$$

$$B = \frac{-\eta_0 s_1 x_1^{s_1}}{s_2 x_1^{s_2} x_2^{s_1} - s_1 x_1^{s_1} x_2^{s_2}} \quad (28e)$$

$$s_1, s_2 = -\frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \beta^2} \quad (28f)$$

2차원 문제

(26b)식에서 $\eta_0(y) = H_j \sum_{j=0}^{\infty} \cos(\pi y/L)$ 로 주어지면 η_f 는 다음과 같은 해를 갖는다.

$$\eta_f(x, y, t) = \text{Re}\left\{e^{i\omega t} \sum_{j=0}^{\infty} (a_j \xi_{1j} + b_j \xi_{2j}) [\cos(j\pi y/L)]\right\} \quad (29a)$$

$$a_j = \frac{H_j \xi_{2j}'(x_1)}{\xi_{2j}'(x_1) \xi_{1j}(x_2) - \xi_{2j}(x_2) \xi_{1j}'(x_1)} \quad (29b)$$

$$b_j = \frac{-H_j \xi_{1j}'(x_1)}{\xi_{2j}'(x_1) \xi_{1j}(x_2) - \xi_{2j}(x_2) \xi_{1j}'(x_1)} \quad (29c)$$

위 식에서 $\xi_{1j}(x), \xi_{2j}(x)$ 는 수심이 h_0 로 일정한 경우 아래와 같이 표현되며 $\xi_{1j}'(x), \xi_{2j}'(x)$ 등은 각각의 x 에 대한 미분값이다.

$$\xi_{1j}(x) = \cosh\{[(j\pi/L)^2 - \beta^2]^{\frac{1}{2}} x\} \quad (30a)$$

$$\xi_{2j}(x) = \sinh\{[(j\pi/L)^2 - \beta^2]^{\frac{1}{2}} x\} \quad (30b)$$

(27)-(30)식에서 β 는 아래와 같다.

$$\beta = \sqrt{(\omega^2 - i\omega\tau)/gh_0} \quad (31)$$

4.3 계산 및 결과

4.2절의 문제를 3장에서 설명한 방법에 의하되 비선형항은 (25)식과 같이 선형화 하여 수치계산한다. 1차원문제로 먼저 Fig.1과 (27)식에서 아래의 조건에 대하여 풀기로 한다.

$$x_1=10000\text{m}, x_2=30000\text{m}, L=8000\text{m}, h(x)=20\text{m}$$

$$\eta_0 = 1\text{m}, \quad \text{주기 } T = 12 \text{ hr.}, \quad \tau = 0.001$$

위 문제를 격자수 21×9 , 격자간격 1000m, 시간간격 300초를 사용하여 계산하였다. Fig.2는 $x=20000, y=4000$ 에서 시간에 따라 변화하는 속도와 조위를, Fig.3은 $t=95\text{hr.}$ 에서 x 에 따른 속도와 조위의 변화를 각기 계산결과와 해석해(27식)와 비교하여 보여주고 있다. 두 결과가 매우 잘 일치하고 있으나 경계면에서 약간 오차가 크게 나타나고 있다. 경계면 특히 개방경계면($x=x_2$)에서의 오차는 속도조건을 근사하여 취급한 데 있는 것으로 보여진다. 같은 문제를 여러 시간간격을 사용하여 계산하였으며 각 시간간격에 대한 계산결과를 해석해와 비교하여 최대오차를 Table 1에 나타내었다. 계산은 상당히 큰 CFL수에 대하여도 발산하지 않으나 오차가 크며, 이 오차는 시간간격

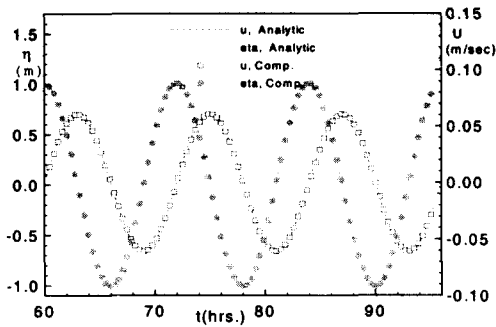


Fig.2 Time histories of the tidal elevation and the velocity at $x=20000\text{m}$: $h_0(x) = 20\text{m}$, $\eta_0(y) = 1.0\text{m}$, $T = 12\text{hr}$.

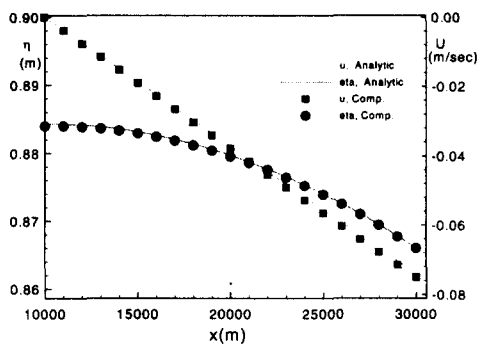


Fig.3 Distribution of the tidal elevation and the velocity at $t=95\text{hr}$. : $h_0(x) = 20\text{m}$, $\eta_0(y) = 1.0\text{m}$, $T = 12\text{hr}$.

이 작아짐에 따라 급격히 줄어든다. 수심이 일정하지 않고 x_1 에서 x_2 까지 수심이 6m에서 54m까지 2차적으로 증가하는 경우에 대한 계산결과를 Fig.4에 해석해(28식)와 비교하여 나타내었다. 이 계산은 시간간격 100초를 사용하였으며 다른 조건은 수심이 일정한 경우와 같은 조건을 사용하였다. 여기서도 좋은 일치를 보이고 있으나 경계에서의 오차가 크게 나타나고 있다. 시간간격을 줄이면 이 오차는 크게 줄어들지만 보다 효율적인 계산을 위하여는 큰 시간간격의 사용이 필요하므로 경계 조건의 개선이 필요할 것으로 생각된다.

2차원문제로 지형 및 유입 조류조건은 아래와 같다.

Table 1 Effects of time step on the accuracy

Δt (sec.)	CFL No. ($\sqrt{2gh}\Delta t / \Delta x$)	Max. Error in u (m/sec)	Max. Error in η (m)
1200	23.8	0.0106	0.0022
600	11.9	0.0055	0.0011
300	5.9	0.0028	0.0006
120	2.4	0.0012	0.0003
60	1.1	0.0007	0.0002

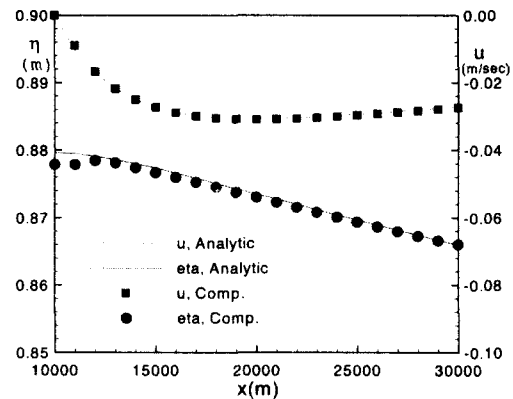


Fig.4 Distribution of the tidal elevation and the velocity at $t=95\text{hr}$. : $h_0(x) = 6 \cdot 10^{-8}x^2$, $\eta_0(y) = 1.0\text{m}$, $T = 12\text{hr}$.

$$x_1=10000\text{m}, x_2=30000\text{m}, L=20000\text{m},$$

$$h(x)=20\text{m}, \eta_0(y) = 1 + 0.2\cos(\pi y/L),$$

$$\text{주기 } T = 12 \text{ hr.}, \tau=0.001$$

계산은 격자간격 1000m로 21×21 개의 격자와 시간간격 300초를 사용하여 수행하였다. Fig.5는 조류유입경계면에서 가까운 곳(28000,17000)과 떨어진 곳(13000,3000)의 두 지점에서 시간에 따라 변화하는 조위의 계산결과를 해석해와 비교하여 보여주고 있다. 조류유입구 가까운 곳에서 약간 오차가 있으나 대체로 잘 맞고 있다고 생각된다. Fig.6은 계산으로부터 얻어진 $t=52\text{hr}$ 에서의 조위 분포를 해석해(30식)와 비교한 것이다. Fig.5와 마

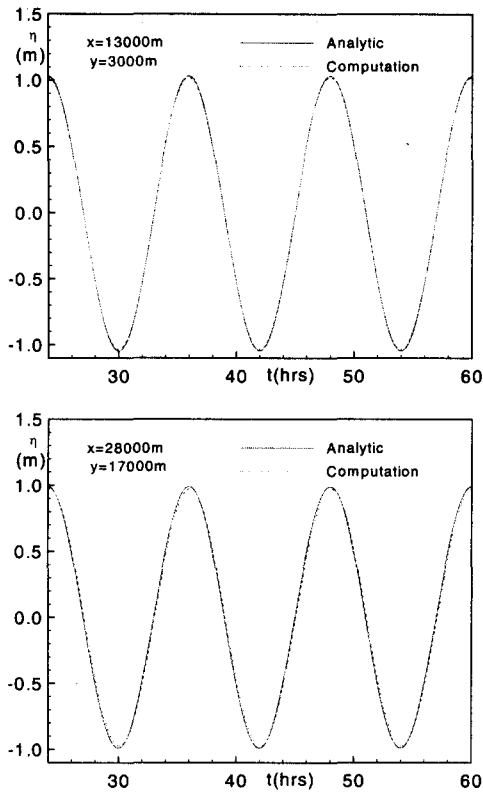


Fig.5 Time histories of the tidal elevation and the velocity: $h_0(x)=20m$, $\eta_0(y)=1+0.2\cos(\pi y/L)$, $T=12hr$

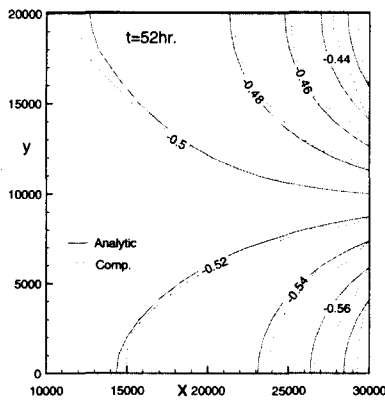


Fig.6 Contours of the tidal elevation: $h_0(x)=20$, $\eta_0(y)=1+0.2\cos(\pi y/L)$, $T=12hr$

찬가지로 유입경계면 근처에서는 약간의 오차가 있으나 경계면에서 멀어지면서 오차가 주는 것을 볼 수 있다. 또한 조류유입경계면에서 주어지는 조위의 y방향의 변화도 경계면에서 멀어질수록 줄어들고 있다. Fig.7은 같은 시간에서의 속도분포를 나타낸 것이다. 유입경계면에서의 y방향의 조위변화로 인하여 완전한 2차원유동이 나타나고 있음을 볼 수 있다.

격자간격 1000m로 21×21개의 격자와 시간간격 300초를 사용하여 수행하였다. Fig.5는 조류유입경계면에서 가까운 곳(28000,17000)과 떨어진 곳(13000,3000)의 두 지점에서 시간에 따라 변화하는 조위의 계산결과를 해석해와 비교하여 보여주고 있다. 조류유입구 가까운 곳에서 약간 오차가 있으나 대체로 잘 맞고 있다고 생각된다. Fig.6은 계산으로부터 얻어진 t=52hr.에서의 조위분포를 해석해(30식)와 비교한 것이다. Fig.5와 마찬가지로 유입경계면 근처에서는 약간의 오차가 있으나 경계면에서 멀어지면서 오차가 주는 것을 볼 수 있다. 또한 조류유입경계면에서 주어지는 조위의 y방향의 변화도 경계면에서 멀어질수록 줄어들고 있다. Fig.7은 같은 시간에서의 속도분포를 나타낸 것이다. 유입경계면에서의 y방향의 조위변화로 인하여 완전한 2차원유동이 나타나고 있음을 볼 수 있다.

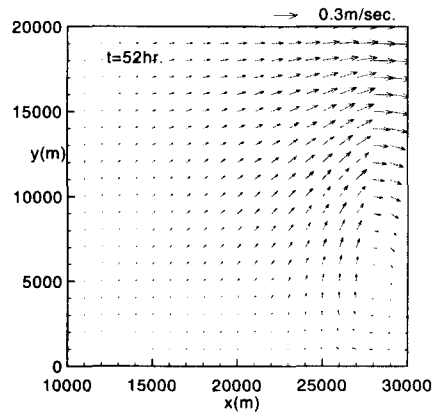


Fig.7 Velocity Vectors : $h_0(x)=20m$, $\eta_0(y)=1+0.2\cos(\pi y/L)$, $T=12hr$

5. 실효역 계산

본 연구에서 개발된 조류계산 프로그램의 실용성을 검토하기 위하여 실효역 계산으로 인천항 부근의 영종도 인근해역에서의 조류를 계산하였다. 이 곳은 경인운하 개발과 관련하여 최근 항로개발을 위하여 조류의 정보가 요구되고 있는 곳이다. Fig.8은 계산대상영역과 수심분포를 보여주고 있다. 계산을 위한 격자는 격자간격이 $\Delta x=100m$, $\Delta y=100m$ 이고 격자수는 42×91 이다. 바닥마찰상수 γ_w 는 지형과 유동에 따라 변화하며, 계산결과에 영향을 미치는 중요한 계수이나 경험적인 값으로 0.0015를 사용하였다. 난류확산계수 K_{H2D} 도 지형이나 격자간격 등에 의존하는 값이나 본 계산에서는 결과에 영향을 크게 미치지 않는 범위에서

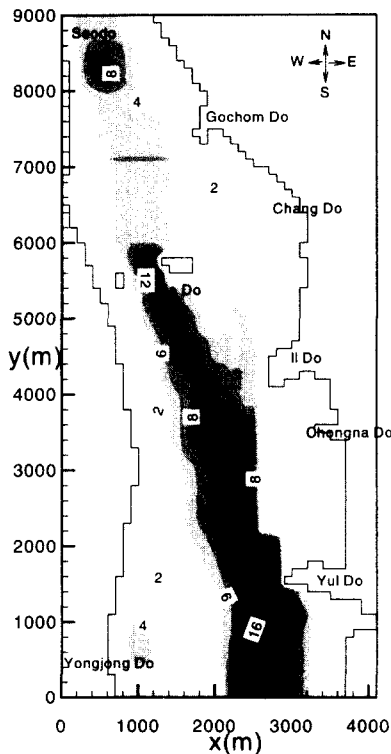


Fig.8 Bathymetry of computational domain

Table 2 Tidal Harmonic Constants used for Open Boundary Condition [19]

		Inchon	Seodo
M_2	H(cm)	293.4	304.0
	K(deg)	130.6	131.7
S_2	H(cm)	107.6	123.6
	K(deg)	182.0	179.1

가능한 한 작은 값으로 100을 사용하였다. 계산에서 바람은 고려하지 않았고 조류는 M_2 , S_2 두 가지 성분만을 고려하였다. 조류의 개방경계조건은 북측경계(Fig.8에서 상방)에서는 세어도에서의 관측 M_2 , S_2 조화상수를 근간으로, 남측경계에서는 인천에서의 관측 M_2 , S_2 조화상수를 사용하였으며, 사용한 경계조건은 Table 2와 같다[19]. Table 2에서 M_2 와 S_2 는 각기 주기 12.42시간과 12시간을 갖는 조류성분을 나타내며, H는 조위진폭, K는 지체각(phase lag)을 의미한다. 계산은 시간간격 10초를 사용하여 4주기까지 수행하여 안정된 결과를 얻었다. 계산초기의 6시간은 유동을 정지상태에서 서서히 가속시켜 교란을 억제하였다. Fig.9는 울도 앞(2200,1200)과 일도 앞(2300,4500)에서 조위와 속도의 시간에 따른 변화에 대한 계산결과를 보여주고 있다. 조위의 변화보다는 속도의 비선형적인 효과가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 수로국에서 발간한 조류도[20]를 참고하면 최강창조류(maximum flood current)¹의 경우 울도 근처에서 2.3kts, 일도에서는 2.5kts인데 반하여 계산치는 1.7kts와 2.3kts로 전체적으로 작은 값으로 예측하고 있다. 최강낙조류(maximum ebb current)²의 경우도 관측치는 울도 근처에서 2.1kts, 일도에서는 2.7kts인데 반하여 계산치는 1.8kts 2.0kts로 작은 값으로 예측하고 있다. 이러

1 창조(flood tide)중에 유속이 최대가 되는 방향의 조류. 여기서는 그림의 윗쪽 방향으로의 최대 유속.
2 낙조(ebb tide)중에 유속이 최대가 되는 방향의 조류. 여기서는 그림의 아랫쪽 방향으로의 최대 유속.

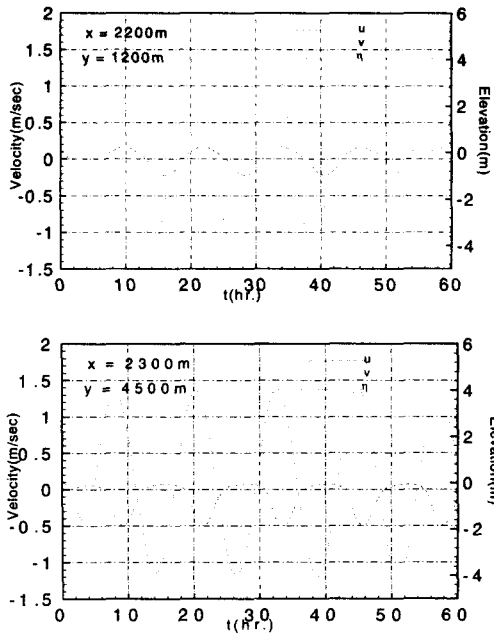


Fig.9 Time histories of the tidal elevation and velocity at the reference points

한 오차는 사용한 분조(tidal constituent)3수가 실제의 분조수보다 작은 데서 가장 큰 원인을 찾을 수 있겠다. 즉, 실제 이 해역의 조석을 나타내는 분조는 2개 이상인데 반하여 본 계산에서는 가장 주요하다고 생각되는 2개 분조만을 사용하였기 때문에 작은 값이 나왔다고 생각할 수 있다. 또한, 측정값의 경우도 측정위치 및 조건 등이 명확하게 기술되어 있지 않은 자료로부터 취한 것이기 때문에 정확한 비교는 어려우리라 생각된다.

Figs.10-11에는 최강창조류와 최강낙조류에 대한 계산결과를 나타냈다. 이 그림은 각 지점에서 생길 수 있는 최대유속을 나타낸 것이다. 따라서 각 지점에서 최대유속에 도달하는 시간은 서로 일치하지 않기 때문에 이 그림들은 동일한 시간에서

의 유속분포는 아니다. 이러한 유속분포는 입출항 시뮬레이션시 입력자료로 사용하는 데, 이는 가장 어려운 조건을 택함으로써 안전을 기하고자 하기 때문이다.

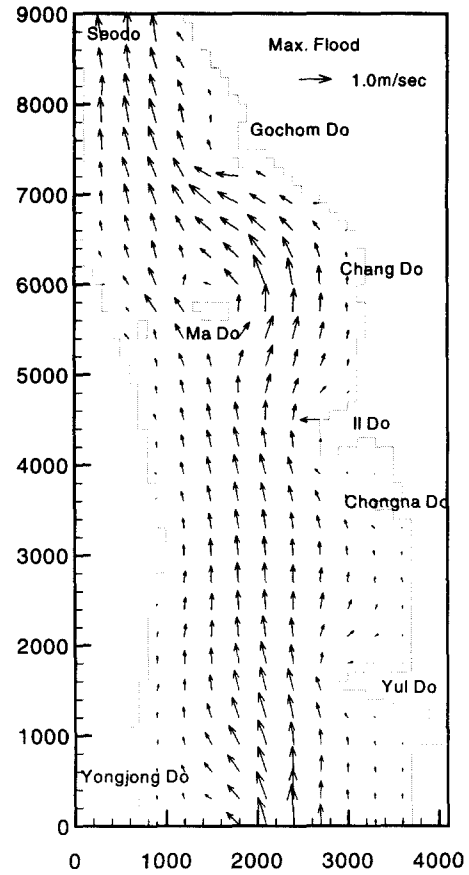


Fig.10 Computed tidal currents : maximum flood

3 서로 다른 주기 및 지체각(phase)을 갖는 조석의 성분. 이는 기조력을 일으키는 달과 해가 복잡한 궤도로 운행하기 때문에 발생하며 현재까지 알려진 분조는 600여개이나 우리나라 연안에서는 4대분조 (M_2 , S_2 , K_1 , O_1)가 주로 사용되고 있다.

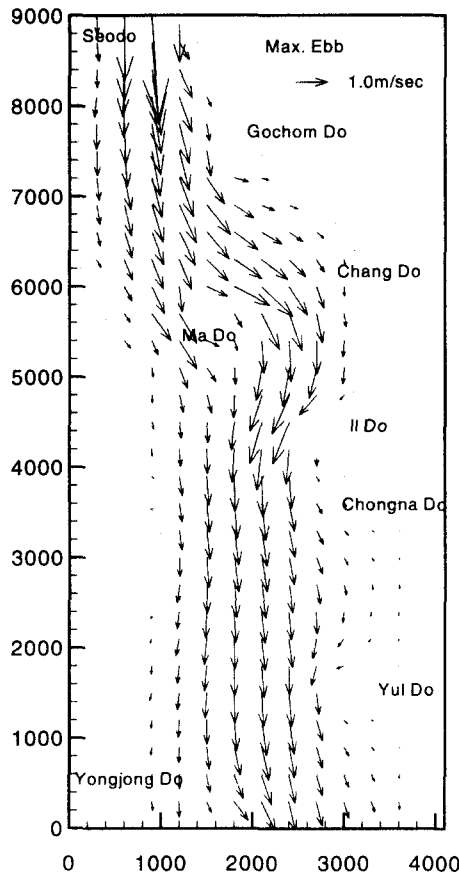


Fig.11 Computed tidal currents maximum ebb

6. 결 언

본 연구의 결과 누유의 확산이동 예측을 위하여 필요한 해수유동의 예측을 위한 조류계산프로그램이 IAF법과 상류차분법에 기초하여 개발되었다. 개발된 프로그램의 검증을 위하여 선형문제에 대하여 수치계산하고 이를 이론해와 비교하였으며, 이를 통하여 정도나 효율면에서 만족할 만 결과를 얻었다. 실험에서의 계산을 위하여 인천항부근의 영종도 인근해역에서 조류계산을 수행하였으며, 정성적으로는 조류유동의 특성을 잘 나타내는 결

과를 얻었다.

본 연구에서 개발된 프로그램의 실용적 이용을 위하여는 앞으로 개방경계면에서의 경계조건 개선과 실험에서의 조류 계산에 있어서 경계조건이나 매개상수들의 결정 및 조정방법에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 1995년도에 과학기술처에서 시행한 특정연구개발사업 "해상유출유 확산방지 기술개발"의 연구결과중 일부입니다.

참 고 문 헌

- [1] 최 효, "해상풍과 유류의 이동·확산에 관한 연구", 한국환경과학연구협회 연구보고서, 1990.
- [2] 홍기용외, "해상유출유 확산방지 기술 개발", 한국기계연구원 선박해양공학연구센터 연구보고서 UCN339-1879-D, 1995.
- [3] Jayko, K. and Howlett, E., "OILMAP: An Interactive Oil Spill Model", OCEANS 92', 1992.
- [4] Ellegaard, A.C., "A PC Modelling System for the Simulation of Transport and Fate of Solutes and Suspended Substances", Proc. of 2nd International Conf. (ASCE), Tampa, FL, 1992.
- [5] 이동연, 최항순, "해상누유 확산의 수치해석", 대한조선학회 논문집 32권 1호, 1994.
- [6] 송무석, 김선영, 홍기용, 현범수, "해상누유 확산 예측시스템의 개발", 대한조선학회 1995년도 춘계 연구발표회 논문집, 1995.
- [7] 윤범상, 송지운, "해상누유의 초기확산 예측모델 및 수치추정", 대한조선학회 1995년도 추계 연구발표회 논문집, 1995.
- [8] Kowalik, Z., Murty, T.S., "Numerical Modeling of Ocean Dynamics", Advanced Series on Ocean Engineering, Vol.5, World Scientific Publishing Co., 1993.
- [9] Kang, J. W., Lee, K.S., "Analysis of Salinity Dispersion in Estuaries by Finite Difference Models", Coastal Engineering Research, Report No. SNU/HER-17, 1991

- [10] 오임상, 최현우, "조류모델을 위한 개방 경계조건 연구", J. Korean Earth Science Society, Vol 7, No. 1, 1986.
- [11] 藤野 正隆, 多部田 茂, "多層モデルによる海水流動の数値解析", 日本造船學會論文集 第170.號, 1991.
- [12] 윤범상, 노준혁, 藤野正隆, 濱田孝治, "연안해수 유동에 관한 효율적인 수치계산기법", 대한조선 학회논문집 제32권 제4호, 1995.
- [13] Weare, T.J., "Errors Arising from Irregular Boundaries in ADI Solutions of the Shallow-Water Equations", Intl. J. for Numerical Methods in Engineering, Vol. 14, 1979.
- [14] Falconer, R.A., "Numerical Modeling of Tidal Circulation in Harbors", J. of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, Vol. 106, No.WW1 1980.
- [15] Stelling, G.S., Wiersma, A.K., Willemse, J.B.T.M., "Practical Aspects of Accurate Tidal Computations", J. of Hydraulic Engineering, Vol. 112, No.9, 1986.
- [16] Beam, R.M. and Warming, R.F., "An Implicit Factored Scheme for the Compressible Navier-Stokes Equations", AIAA Journal Vol. 16, No.4, 1978.
- [17] Kodama, Y., "A Cell-Centered, Finite-Volume Upwind Scheme with Global Conservation", J. of SNAJ, Vol. 168, 1990.
- [18] Lynch, D. R. and Gray, W.G., "Analytic Solutions for Computer Flow Model Testing", J. of Hydraulics Div., American Society of Civil eng., 1978
- [19] 이재욱, "경인운하 서해터미널 개발계획 타당성 검토에 따른 수치모형실험보고서", 삼성건설주 식회사
- [20] 수로국, "조류도(인천항 및 부근)", 서지 제1434호