韓國海洋工學會誌 第11卷 第4號, pp.141~151, 1997. 11

◉ 論 文

도류제에 의한 항만내 조류제어 연구

양 찬 규*·홍 기 용*

(97년 6월 9일 접수)

Flow-Guider Applied to Controlling Current in a Bay

Chan-Kyu Yang* · Key-Yong Hong*

Key Words : current control, flow-guider, depth averaged equation, standard k-ε model, finite volume method, unsteady flow, implicit scheme

Abstract

This paper deals with a numerical study of flow-guider applied to controlling current in a bay. Two dimensional numerical model for tidal currents based on the depth averaged equation is developed and standard k-ε model is adopted to determine the turbulence diffusion. Equations are described in a generalized coordinate system to be implemented by non-staggered grid system and discretized by using finite volume method. Unsteady flow is simulated by fully implicit scheme. Hybrid scheme and central differencing are used to compute the convective terms and source terms, respectively. The tidal current in a rectangular bay is simulated and it gives satisfactory results. The realistic and distinct models of a large structure placed in bay are also exemplified with or without flow-guiders. The simulation results show that the flow-guider gives the residual tidal current in the bay by the different flux with respect to the direction of tidal current.

1. 서 론

수세기에 걸친 산업의 발전과 이에 따른 인구의 폭증으로 인해 육상공간이 부족해짐에 따라 인류는 바다로 눈을 돌리게 되었다. 특히 최근에는 환경오염에 대한 인식이 높아짐으로 해서, 주거지 근처에 쓰레기 소각장, 공항 등 환경오염의 원인이 되는 부대시설 건설이 주민들의 심한 반발에 부딪혀 연근해 해양공간 활용이 그 대안으로 제기되고 있다.

연근해에 설치된 해상플랜트(plant)나 해상공항은 그 주위의 해수유동을 부분적으로 정체시키거나 하수 및 온배수의 유입으로 인해 해양생태계를 파괴시켜 연안어장에 악영향을 줄 수 있다. 부유식

* 선박·해양공학연구센터

구조물은 파도의 영향을 덜 받는 만에 설치되고, 만에서의 해수의 용존·현탁물질의 거동은 조류에 의해 좌우되지만 진동류인 조류는 일반적으로 항만의 해수교류에 크게 기여하지 못한다.

항만 내 해수의 교류·교환을 촉진시키기 위해서는 Fig.1과 같이 방파제가 설치된 만 입구의 좌우에 방향이 서로 다른 도류제(flow-guider)를 설치해서 만조와 간조시 조류의 방향에 따라 유량계수의 차이를 두어 한쪽 방향으로 잔여조류(residual tidal current)를 발생시키는 방법을 생각할 수 있다[1].

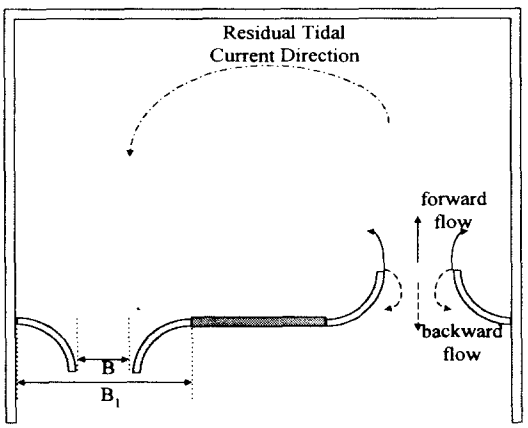

Fig.1 Plane View of Circular Flow-Guider

본 연구에서는 구조물이 설치된 만의 조석류에 의한 해수유동특성과 도류제가 해수교류에 미치는 영향을 수치 시뮬레이션을 통해 살펴보았다. 수직방향의 유동성분을 무시한 2차원 조류방정식을 사용했고[2], 바람에 의한 수평응력 및 코리올리 힘(Coriolis force)은 무시했다. 난류확산의 결정에는 표준 k-ε 모델을 적용하였다[2].

지배방정식 및 난류방정식의 이산화에는 공간상으로는 유한체적법(finite volume method)을 시간상으로는 음해법(implicit method)을 적용했다. 일부가 개방된 간단한 만에 개발된 수치코드를 적용해 그 타당성을 검증하였다. 단순화된 만에 설치된 구조물에 의한 조류분포와, 도류제를 포함한 문제를 살펴봄으로써 도류제에 의한 유량계수의 변화가 해수교환에 미치는 영향을 논의하였다. 도류제의 형상은 흐름 방향에 따라 유량계수의 차이가 큰 1/4원형으로 정하였다[3].

2. 2차원 해수유동의 정식화

도류제의 설치목적이 수평방향의 해수혼합을 야기하는데 있으므로, 수평방향의 유동성분이 수직방향의 유동성분에 비해 충분히 크다는 가정하에 해안 및 해양공학에서 조류 모델로 흔히 쓰이고 있는 2차원 조류방정식을 사용할 수 있다[2]. 협소한 해역의 수치모델이므로 코리올리 힘(Coriolis force)을 무시하고, 자유표면 상에서 바람에 의한 수평응력은 고려하지 않았다. Cartesian 좌표계 (x_1, x_2)로 표현된 2차원 조류방정식과 깊이 평균된 난류에너지(k) 및 난류소산률(ε)방정식은 다음식과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial H u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -g\frac{\partial \eta}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu_{eff}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right] - \frac{\tau_{b,x_i}}{\rho H} \tag{2}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\nu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G + \frac{P_{kv}}{\rho} - \frac{\varepsilon}{\rho} \tag{3}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G + \frac{P_{\varepsilon v}}{\rho} - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{\rho k} \tag{4}$$

여기서

$H = \eta + h$,

η = surface elevation,

h = water depth,

$\nu_{eff} = \nu + \nu_t$

ν : dynamic viscosity of fluid,

$$G = \nu_t\left[2\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial u_2}{\partial x_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}\right)^2\right]$$

(u_1, u_2): depth averaged velocity component,

g : gravitational acceleration.

Table 1 Values of Empirical Coefficients

Coefficients	C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε
Values	0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

그 밖에도 난류방정식과 난류 소산률 방정식에 사용된 경험계수(empirical coefficient)는 실험에 의해 구해지는 상수이지만, 본 연구에서는 Launder와 Spalding[4]이 제안한 표준값을 사용하였다(Table 1). τ_{b,x_i}는 저면마찰에 의한 x_i-방향 전단응력으로서 $\rho u_i\sqrt{C_f}U_f$ 로 쓸 수 있다. 여기서 마찰속도(friction velocity) $U_f=\sqrt{C_f(u_1^2+u_2^2)}$ 이고, 마찰계수(friction coefficient) C_f는 경험적으로 구해지는 상수이다. P_{kv}, $P_{\varepsilon v}$는 저면조도에 의한 유속경사와 연직방향 유속성분의 불균일성에 관한 항으로 Rastogi and Rodi[5]는 다음 식과 같이 마찰속도(friction velocity)의 함수로 나타내었다.

$$P_{kv}=\rho C_k\frac{U_f^3}{h}\ ,\ P_{\varepsilon v}=\rho C_\varepsilon\frac{U_f^4}{h^2}$$

여기서 $C_k=\frac{1}{\sqrt{C_f}}$, $C_\varepsilon=3.6C_{2\varepsilon}\sqrt{\frac{C_\mu}{C_f^{3/4}}}$이다.

표준 k-ε 난류모델에서 에디점성(eddy viscosity; $\mu_t=\rho\nu_t$)는 다음과 같이 계산된다.

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

식(2)-(4)는 각 물리량($\phi=u_i, k, \varepsilon$)에 대한 이송방정식(transportation equation)이고 이를 일반 좌표계(generalized coordinate system: ξ_1, ξ_2)로 변환(Fig. 2 참조)하면 다음과 같이 좌변 첫째항인 시간변화율(rate of change)항, 좌변 두 번째 및 세 번째 항인 대류-확산항 그리고 우변의 소스항(source term)으로 구분하여 쓸 수 있다[6].

$$\frac{\partial\phi}{\partial t}+\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial\xi_1}\left(U_1\phi-\frac{\Gamma}{J}c^{11}\frac{\partial\phi}{\partial\xi_1}\right)+\frac{1}{J}\frac{\partial}{\partial\xi_2}\left(U_2\phi-\frac{\Gamma}{J}c^{22}\frac{\partial\phi}{\partial\xi_2}\right)=S \tag{6}$$

여기서

$$J=\begin{vmatrix}\frac{\partial x_1}{\partial\xi_1} & \frac{\partial x_1}{\partial\xi_2}\\ \frac{\partial x_2}{\partial\xi_1} & \frac{\partial x_2}{\partial\xi_2}\end{vmatrix}\ :\ \text{Jacobian},$$

$$c^{ij}=\frac{\partial\xi_i}{\partial x_m}\frac{\partial\xi_j}{\partial x_m}\ ,$$

$$C_i^j=\frac{\partial x_j}{\partial\xi_i},$$

ξ_i : generalized coordinate,

Γ : diffusivity defined in table 2.

contravariant tensor인 c^{ij}와 contravariant 속도성분인 U_i는 2차원 문제의 경우 다음과 같이 C_i^j와 Cartesian 속도성분으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}c^{11} &= C_2^2C_2^2+C_2^1C_2^1\\ c^{12} &= -C_2^2C_1^2-C_2^1C_1^1\\ c^{21} &= -C_1^2C_2^2-C_1^1C_2^1\\ c^{22} &= C_1^2C_1^2+C_1^1C_1^1\end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}U_1 &= C_2^2u_1-C_2^1u_2\\ U_2 &= -C_1^2u_1-C_1^1u_2\end{aligned} \tag{8}$$

Table 2 Evaluation of Source Terms in Generalized Coordinate System

ϕ	S_u	S_ϕ	Γ
u_i	$-\frac{g}{J}\frac{\partial\xi_1}{\partial x_i}\frac{\partial\eta}{\partial\xi_1}-\frac{g}{J}\frac{\partial\xi_2}{\partial x_i}\frac{\partial\eta}{\partial\xi_2}+\frac{\partial}{\partial\xi_1}\left(\nu_{eff}\frac{c^{12}}{J}\frac{\partial u_i}{\partial\xi_2}\right)+\frac{\partial}{\partial\xi_2}\left(\nu_{eff}\frac{c^{21}}{J}\frac{\partial u_i}{\partial\xi_1}\right)$	$-\frac{\sqrt{C_f}U_f}{H}$	ν_{eff}
k	$\frac{\partial}{\partial\xi_1}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k}\frac{c^{12}}{J}\frac{\partial k}{\partial\xi_2}\right)+\frac{\partial}{\partial\xi_2}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k}\frac{c^{21}}{J}\frac{\partial k}{\partial\xi_1}\right)+G+\frac{P_{kv}}{\rho}$	$-\frac{\varepsilon}{\rho k}$	$\frac{\nu_t}{\sigma_k}$
ε	$\frac{\partial}{\partial\xi_1}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{c^{12}}{J}\frac{\partial\varepsilon}{\partial\xi_2}\right)+\frac{\partial}{\partial\xi_2}\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{c^{21}}{J}\frac{\partial\varepsilon}{\partial\xi_1}\right)+\frac{P_{\varepsilon v}}{\rho}$	$\frac{C_1}{k}G-C_2\frac{\varepsilon}{\rho k}$	$\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}$

S는 소스항으로써 다음 식과 같이 선형화해서 나타낼 수 있고, S_u와 S_ϕ는 물리량 ϕ에 따라 Table 2와 같이 유도할 수 있다.

$$S = S_u + S_\phi \phi \tag{9}$$

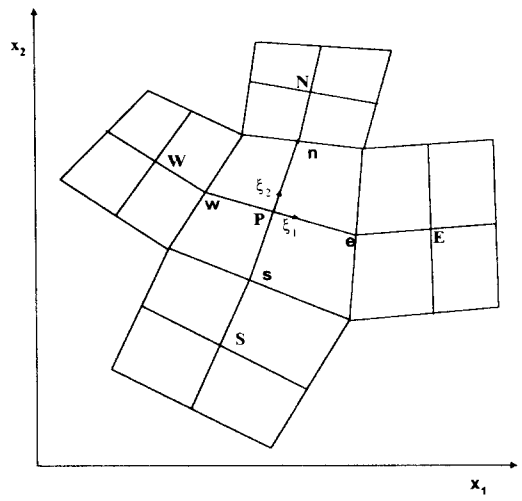

Fig. 2 A Configuration of Control Volume

3. 수치해석

격자계는 non-staggered 격자계를 사용했고(Fig. 2), 일반적으로 non-staggered 격자계에서 압력장과 속도장을 분리하는데 있어서 "checker- board 현상"이 생기므로, 이를 해결하기 위해 운동량내삽법(momentum interpolation method)을 적용했다[7].

3.1 유한체적법에 의한 이산화

일반좌표계로 변환된 이송방정식을 시간과 공간에 대해 적분하면 다음식과 같다[8].

$$\begin{aligned}
&\int_t^{t+\Delta t}\left[\int\int J\frac{\partial \phi}{\partial t}\, d\xi_1 d\xi_2\right]dt \\
&+ \int\int\left[\int_t^{t+\Delta t}\left(\rho U_1\phi - \frac{\Gamma}{J}c^{11}\frac{\partial \phi}{\partial \xi_1}\right)dt\right]d\xi_1 d\xi_2 \\
&+ \int\int\left[\int_t^{t+\Delta t}\left(\rho U_2\phi - \frac{\Gamma}{J}c^{22}\frac{\partial \phi}{\partial \xi_2}\right)dt\right]d\xi_1 d\xi_2 \\
&= \int\int\left[\int_t^{t+\Delta t} JS_\phi\, dt\right]d\xi_1 d\xi_2
\end{aligned} \tag{10}$$

시간변화율 항을 이산화해서 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
&\int_t^{t+\Delta t}\left[\int\int J\frac{\partial \phi}{\partial t}\, d\xi_1 d\xi_2\right]dt \\
&= \Delta V(\phi - \phi^o)
\end{aligned} \tag{11}$$

여기서 상첨자 o는 시간 t에 해당하는 값을 나타내고 $t+\Delta t$에 해당하는 값에 대해서는 첨자를 사용하지 않았다.

물리량 ϕ의 시간에 대한 적분은 다음과 같이 가중치 θ를 이용해서 표현될 수 있다.

$$\int_t^{t+\Delta t}\phi dt = [\theta\phi + (1-\theta)\phi^o]\Delta t$$

대류-확산항의 공간에 대한 적분을 식(10)의 좌변 두 번째 항을 예로 설명하면, 다음식과 같이 대류항이 제어체적 면의 물리량으로 표현되므로 이웃하는 제어체적 중심의 물리량으로 이를 표현해 주어야 한다.

$$\begin{aligned}
&\int\int\left(U_1\phi - \frac{\Gamma}{J}c^{11}\frac{\partial \phi}{\partial \xi_1}\right)d\xi_1 d\xi_2 \\
&= \left(\int U_1 d\xi_2\right)_e \phi_e - \left(\int \frac{\Gamma}{J}c^{11}d\xi_2/\delta\xi_1\right)_e(\phi_E - \phi_P) \\
&- \left(\int U_1 d\xi_2\right)_w \phi_w - \left(\int \frac{\Gamma}{J}c^{11}d\xi_2/\delta\xi_1\right)_w(\phi_P - \phi_W)
\end{aligned}$$

본 연구에서는 대류항의 계산을 위해 Spalding이 제안한 hybrid scheme[9]을 사용했고, hybrid scheme 표현된 대류-확산항의 이산화식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
&\theta\int\int\left(U_1\phi - \frac{\Gamma}{J}c^{11}\frac{\partial \phi}{\partial \xi_1}\right)d\xi_1 d\xi_2 \\
&+ (1-\theta)\int\int\left(U_1\phi^o - \frac{\Gamma}{J}c^{11}\frac{\partial \phi^o}{\partial \xi_1}\right)d\xi_1 d\xi_2 \\
&= \theta[a_E\phi_E + a_W\phi_W] + (1-\theta)[a_E\phi_E^o + a_W\phi_W^o] \\
&- (a_W + a_E)\phi_P - (1-\theta)(a_W + a_E)\phi_P^o
\end{aligned}$$

여기서

$A_E = D_e\max(0, 1-0.5|R|) + \max(-F_e, 0)$

$A_W = D_e\max(0, 1-0.5|R|) + \max(-F_w, 0)$

$R = F/D$: cell Reynolds number,

$$F=\int U_1 d\xi_2 \ , \quad D=\int \frac{\Gamma}{J} c^{11} d\xi_2/\delta\xi_1 .$$

모멘텀 방정식에서 나타나는 수위상승의 구배항과 모멘텀 방정식과 난류확산방정식의 교차미분항(cross derivative term)은 2차 중심차분(2nd order central difference)을 이용하여 이산화하면 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$a_P\phi_P = \theta[a_W\phi_W + a_E\phi_E + a_N\phi_N + a_S\phi_S] + B_U \tag{12}$$

여기서

$$a_P = \theta(a_W + a_E + a_S + a_N) + a_P^o - (\Delta V)S_P ,$$

$$B_U = [a_P^o - (1-\theta)(a_W + a_E + a_S + a_N)]\phi_P^o + (\Delta V)S_U$$

$$a_P^o = \frac{\Delta V}{\Delta t} ,$$

(ΔV): volume of control volume.

식(12)는 가중치(weight; θ)에 따라서 Table 3과 같이 양해법, 음해법 그리고 Crank Nicolson 해법으로 나뉘게 된다. 본 연구에서는 θ=1로 하였다.

Table 3 Time Marching Schemes with Respect to Weight

θ	scheme	Stability
0	Explicit Scheme	conditionally stable
$0<\theta<1/2$	Implicit Scheme	
1/2	Crank-Nicolson Scheme	unconditionally stable if all coefficients positive
$1/2<\theta<1$	Implicit Scheme	
1	Fully Implicit Scheme	

3.2 압력 수정

일반좌표계로 변환된 연속방정식을 Cartesian 속도성분으로 표현한 식은 다음과 같다.

$$J\frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x^1}(C_2^2 Hu_1 - C_2^1 Hu_2) + \frac{\partial}{\partial x^2}(-C_1^2 Hu_1 + C_1^1 Hu_2) = 0 \tag{13}$$

이송방정식과 마찬가지로 공간에서는 유한제어체적에 대해 시간에서는 시간간격에 대해 적분함으로써 공간 및 시간에 대한 이산화과정을 거치게 된다.

$$\int_t^{t+\Delta t}\left(\int\int J\frac{\partial\eta}{\partial t}\,d\xi_1 d\xi_2\right)dt + \int_t^{t+\Delta t}\left\{\int\int \frac{\partial}{\partial x^1}(C_2^2 Hu_1 - C_2^1 Hu_2)d\xi_1 d\xi_2\right\}dt + \int_t^{t+\Delta t}\left\{\int\int \frac{\partial}{\partial x^2}(-C_1^2 Hu_1 + C_1^1 Hu_2)d\xi_1 d\xi_2\right\}dt = 0$$

이산화된 각 항을 대입하여 정리하면 다음과 같은 이산화된 연속방정식이 얻어진다.

$$\theta[(HC_2^2)u_1 - (HC_2^1)u_2]_e - \theta[(HC_2^2)u_1 - (HC_2^1)u_2]_w + \theta[(-HC_1^2)u_1 + (HC_1^2)u_2]_n - \theta[(-HC_1^2)u_1 + (HC_1^2)u_2]_s = A_U \tag{14}$$

여기서

$$A_U = (\theta-1)[(HC_2^2)u_1^o - (HC_2^1)u_2^o]_e - (\theta-1)[(HC_2^2)u_1^o - (HC_2^1)u_2^o]_w + (\theta-1)[(-HC_1^2)u_1^o + (HC_1^2)u_2^o]_n - (\theta-1)[(-HC_1^2)u_1^o + (HC_1^2)u_2^o]_s - \frac{\Delta V}{\Delta t}(\eta-\eta_o)$$

식(12)를 이용해 제어체적 중앙에서의 속도수정식을 쓰면 다음 식과 같다.

$$u_{iP} = \alpha_v[D_1^i(\eta_w' - \eta_e') + D_2^i(\eta_s' - \eta_n')] / (1-\alpha_v\Sigma A_{NB}/A_P)$$

여기서

α_v : relaxation factor ($\alpha_v > 0$)

$$D_1^i = \left(\int \frac{1}{J} \frac{\partial \xi_1}{\partial x_i} d\xi_2 / \delta\xi_1 \right)_P \Big| A_P ,$$

$$D_2^i = \left(\int \frac{1}{J} \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} d\xi_1 / \delta\xi_2 \right)_P \Big| A_P ,$$

NB = geometric center of neighbouring cell,

η' = pressure correction.

운동량 내삽법[7]을 이용하면 제어체적 면 w 에서의 속도수정식은 다음과 같이 P점과 W점의 속도수정식을 내삽함으로써 구할 수 있다.

$$u_{iw} = \alpha_v \overline{D_1^i} (\eta_w' - \eta_e') / \left(1 - \alpha_v \overline{\sum A_{NB} / A_P} \right)$$

같은 방법으로 e, s, n점에서의 속도수정식을 유도하여 식 (14)에 대입하면 다음 식과 같은 압력수정방정식을 얻을 수 있다.

$$A_P \eta_P' = A_E \eta_E' + A_W \eta_W' + A_N \eta_N' + A_S \eta_S' + A_U$$

여기서 $A_P = A_W + A_E + A_N + A_S$이고, A_W, A_S등의 유도는 Yang 등의 논문[10]에 주어져 있다.

SIMPLEC 알고리즘을 적용해서 연성된 속도장과 압력장을 풀었고 그 계산순서는 다음과 같다. (a)속도, 압력, 난류량들을 가정한다. (b)운동량방정식 (12)를 풀어 속도를 구한다. (c)압력수정방정식으로부터 얻어진 수정압력으로 속도 및 압력을 수정한 후, (d)난류확산방정식을 풀어 난류점성을 구한다. (e)해가 수렴할 때까지 (b)-(d)의 과정을 반복한다. 이렇게 해서 얻어진 해가 수렴을 하면, 다음 시간으로 넘어가 다시 같은 방법으로 해를 찾게 된다. 행렬식의 계산은 Stone solver[11]를 사용했다.

4. 경계조건

수치계산에 있어서 경계조건의 처리는 계산결과의 정확도에 지대한 영향을 미치며, 이에 대한 대략적인 설명은 다음과 같다.

4.1 벽경계(wall boundary)

벽면경계에서는 2층형(two-layer form) 벽함수를 이용하였고, 다음 식과 같이 난류영역과 부 층류영역(laminar sub-layer)에 대해 상이한 속도가 정의된다[12].

$$u^+ = \begin{cases} y^+ & y^+ < 11.6 \\ \frac{1}{\varkappa} \ln E y^+ & y^+ \geq 11.6 \end{cases} \qquad (15)$$

where

$\varkappa$ = von Karman constant(= 0.4187),

E = wall roughness parameter(= 9.793)

$y^+ \equiv y u_\tau / \nu$,

$u_\tau \equiv \sqrt{\tau_w / \rho}$,

τ_w = wall shear stress $= \mu \frac{\partial u}{\partial y}\Big|_{wall}$

4.2 개방경계

개방경계에서는 수위를 $\eta = \eta_o \sin(\frac{2\pi}{T} t)$와 같이 시간에 대한 함수로 주었다. 여기서 η_o는 수위변화의 진폭이고, T는 주기이다. 개방경계의 수위를 주어진 대로 고정시키려면 압력수정을 해서는 안된다. 경계면 위의 계산점에서 압력수정방정식의 소스항이 $A = A_u + A_\eta \eta_P'$으로 표현될때, 다음식과 같이 계수를 결정하고 수정압력을 0으로 하였으며, 다른 물리량들은 계산영역안의 값을 외삽하였다.

$$A_u = 0 \ , \quad A_\eta = -10^{30} \qquad (16)$$

4.3 대칭경계

대칭경계면에서는 슬립(slip)을 허용하고, 경계면을 가로지르는 유량이 없다는 조건을 적용하였다.

4.4 섬의 처리

복잡한 지형을 계산하는 경우 섬의 형상을 표현

하기 위해 복잡한 격자계를 구성하는 대신에 섬을 계산영역 안에 포함시키고 섬에 포함되는 격자점에서 유도되는 속도, 수정압력, 난류확산에 대한 식의 소스항 계수들을 다음과 같이 결정하고, 각 물리량들을 0으로 놓았다.

$$S_u = 0 \ , \quad S_\phi = -10^{30} \ , \quad \phi_P = 0 \qquad (17)$$

5. 계산결과 및 토론

가로 200km 세로 100km이고 좌측의 반쪽이 개방된 만내의 조류문제를 3 주기동안 계산하였다 (Fig. 3). 개방구에서 수위에 대한 경계조건 및 기타 계산조건은 다음과 같다.

진폭 $\eta_o = 0.5m$, 주기 $T = 12hours$, 수심 h = 50 m, 격자간격 ΔS = 10 km

시간간격 $\Delta t = 0.12hours$.

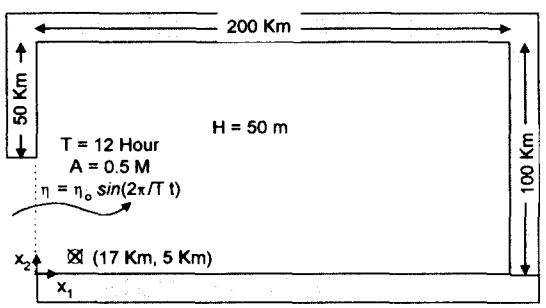

Fig.3 A Rectangular Bay with an Island

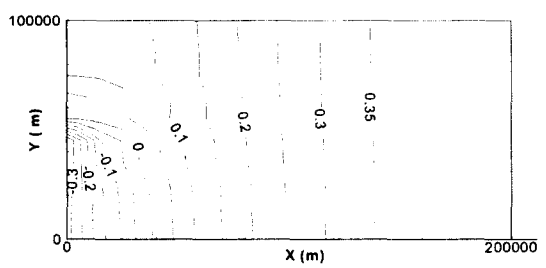

Fig.4 Surface Elevation at T = 20 Hour

마찰계수 C_f는 0.003을 대입하였고, 점성계수는 1000을 균일하게 주었다. T = 20 hours일 때의 수위분포를 보면(Fig.4) 만의 안쪽으로 부터 개방경계면쪽으로 가면서 수위가 낮아지고, 같은 시간에서의 유속(Fig.5)은 수위가 높은 만 안쪽으로부터 수위가 낮은 개방구로 향하게 된다. 그림에서 x는 x_1을 y는 x_2를 각각 나타낸다.

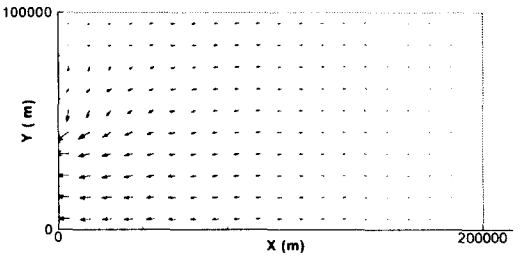

Fig.5 Velocity Distribution at T = 20 Hour

x=17km , y=5km위치에서 tidal ellipse와 수위변화를 Fig.6과 Fig.7에 각각 도시하였다. Tidal ellipse는 X-방향 속도(u)를 수평축으로 하고 Y-방향 속도성분(v)를 수직축으로 그린 것으로서 한 주기가 지난 후부터 같은 모양의 폐곡선을 그리기 시작했고, 수위또한 한주기 후부터 준정상상태(stationary state)에 도달하였다.

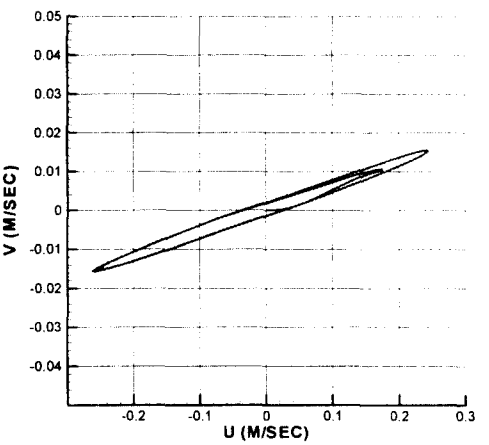

Fig.6 Tidal Ellipse(17Km, 5Km)

다음은 앞의 예제와 같은 만에서 개방경계 근처에 40km×20km의 섬이 존재하는 경우, 섬의 처리방법에 대한 타당성 및 섬에 의한 조류분포변화를

관찰하였다(Fig.8). 계산조건은 앞의 예제와 같이 부여하였다. T = 20 hour일 때의 수위분포(Fig.9) 및 속도분포(Fig.10)가 섬 근처에서 변화하게 되고, 섬의 우측 상단의 한 지점(85km, 45km)에서 tidal ellipse(Fig.11)는 섬이 없는 경우와는 달리 v가 좀 더 큰 진폭을 가지고 변화하고 u는 상대적으로 작아짐을 알 수 있다. 수위변화의 진폭 또한 섬의 영향으로 작아졌다.

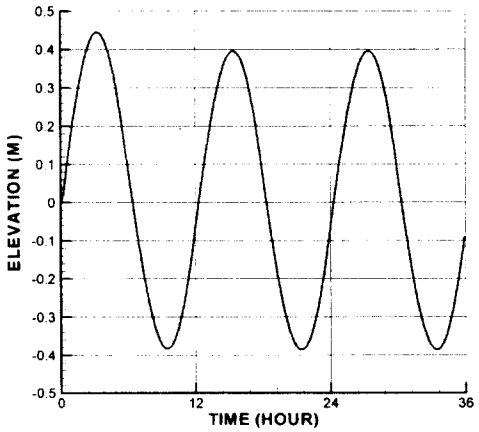

Fig.7 Time History of Surface Elevation(17Km, 5Km)

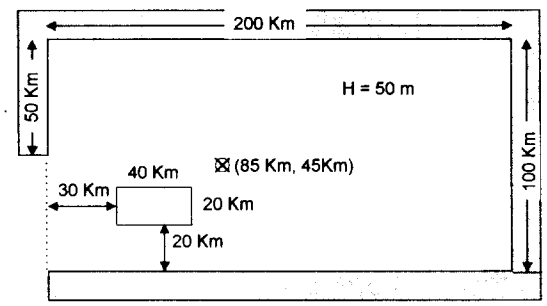

Fig.8 A Rectangular Bay without Island

실제 구조물이 설치될 해역을 Fig.13과 같은 가로,세로 길이가 L인 만으로 단순화하고 구조물도 가로, 세로 각각 1/3L, 1/3L인 정사각형으로 모델링하였다. 구조물의 가로방향 위치는 a와 b에 의해 결정되고, 세로방향 위치는 만의 중앙으로 하였다(Fig.13). 구조물, 도류제 그리고 육지의 경계면은 벽경계로 처리했고, 개방경계면 A는 대칭경계조건을 부여했다. 개방경계면 B는 앞의 예제와 같이 조류를 진폭 0.5m 주기 12시간의 수위변화로 주었다. 난류의 확산에는 k-ε 모델을 사용했다. 격자수는 71×61개를 사용했고, 도류제 및 구조물 주위에 많은 격자를 분포시켰다. 시간적분시 시간간격은 0.12 hour로 하여 충분히 안정된 해를 얻을 수 있었다.

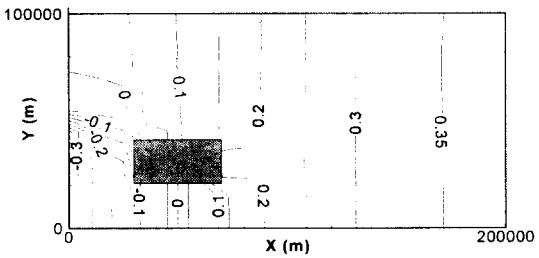

Fig.9 Surface Elevation at T = 20 Hour

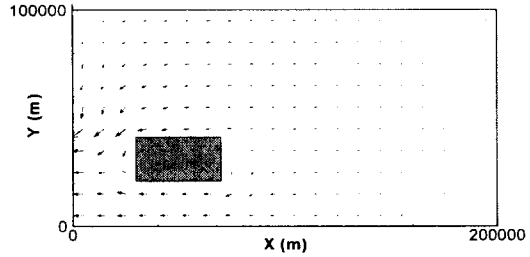

Fig.10 Velocity Field at T = 20 Hour

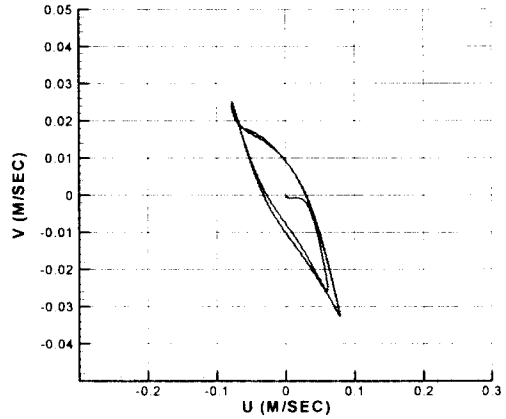

Fig.11 Tidal Ellipse (85Km, 45Km)

Table 4에 있는 바와 같이 네가지 경우에 대해 계산하였다. Case 1과 2는 도류제가 없는 경우이고, case 3과 4는 case 2에 도류제를 추가한 경우이다.

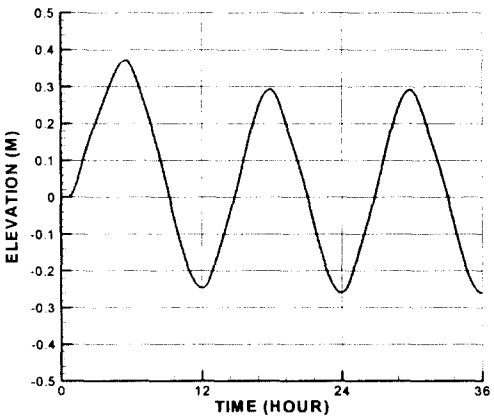

Fig.12 Surface Elevation (85Km, 45Km)

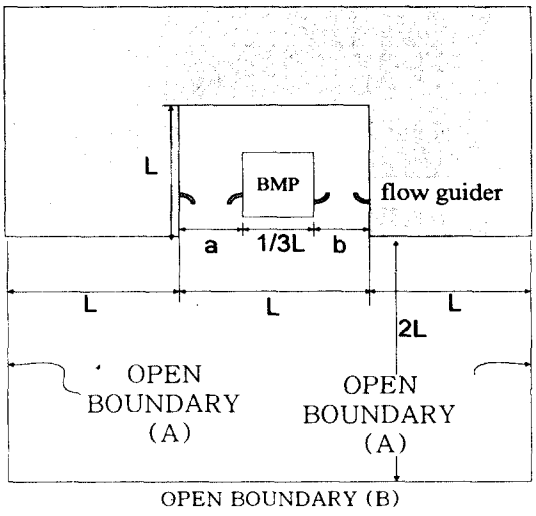

Fig.13 Computational Domain

우선 구조물이 만의 중심에 위치하는 경우, 2주기에 걸쳐 시간평균된 만내 잉여조류(residual tidal current)는 구조물의 뒤쪽과 앞쪽에 각각 순환류를 야기하지만 서로 섞이지 않으므로 해수교환에는 도움을 주지 못함을 알 수 있다.(Fig.14). 구조물이 만의 오른쪽으로 치우쳐 있는 경우에도 잉여조류에 의한 국부적인 순환류가 해수교환의 진작에 크게 기여하지 못한다(Fig.15).

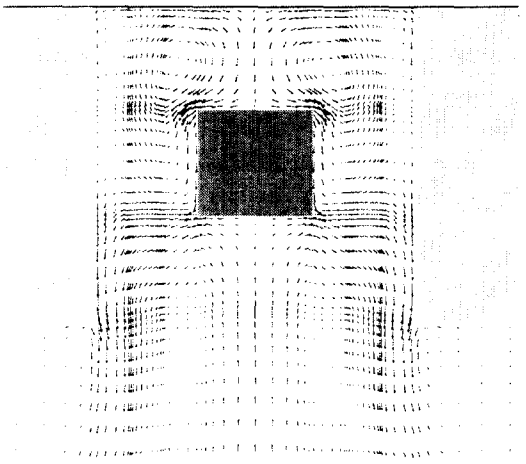

Fig.14 Tidal Residual Current(Case 1)

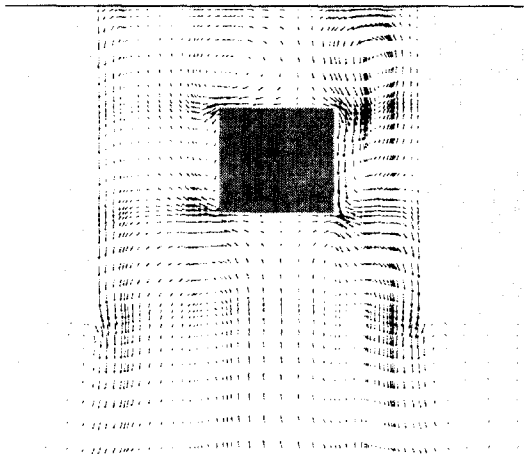

Fig.15 Tidal Residual Current(Case 2)

Case 3은 반시계방향의 순환류를 야기하기 위한 경우로 Fig.13과 같이 좌측이 만의 바깥쪽을 향하고 우측이 안쪽을 향하도록 도류제를 배치한 것이다. 해수가 만으로부터 빠져 나갈 때 좌측 개구(left opening)에서 순방향이 되고 우측 개구(right

opening)에서는 역방향이 되므로 좌측에서 해수의 유동이 많다(Fig.16). 해수가 만으로 유입되는 경우는 반대가 되므로 좌측 개구로 유입되는 해수는 빠져나간 양에 비해 작아지고 우측개구로 유입되는 해수는 빠져나간 양보다는 커지게 되므로 반시계 방향으로 순환하는 잉여조류가 발생하게 된다. Case 4는 좌측이 만의 안쪽을 향하고 우측이 바깥쪽을 향하도록 도류제를 배치한 경우, case 3과 반대 원리에 의해 도류제가 시계방향으로 순환류를 야기하게 된다(Fig.17).

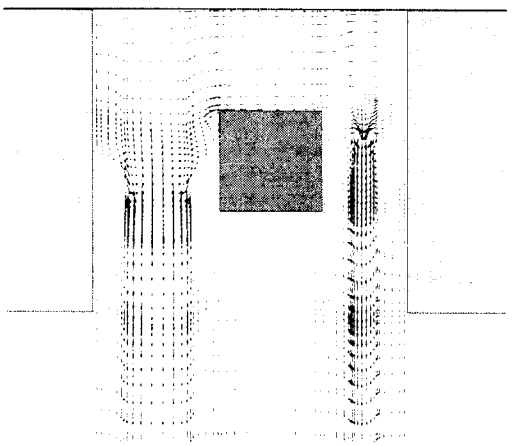

Fig.16 Tidal Current at T = 21.6 Hour(Case 3)

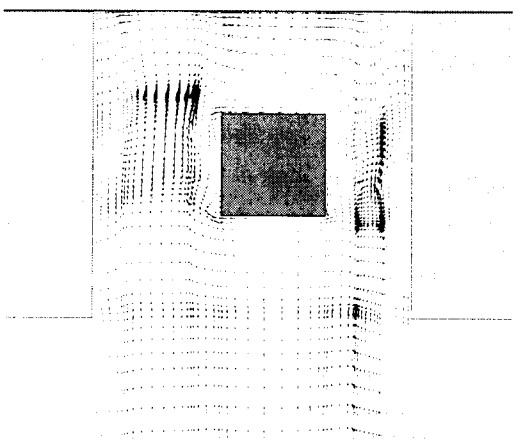

Fig.17 Tidal Current at T = 14.4 Hour(Case 4)

Table 4 Computational Cases

case	a	b	Flow-Guider
1	1/3L	1/3L	NONE
2	2/5L	4/15L	NONE
3	2/5L	4/15L	counter-clockwise circulation
4	2/5L	4/15L	clockwise circulation

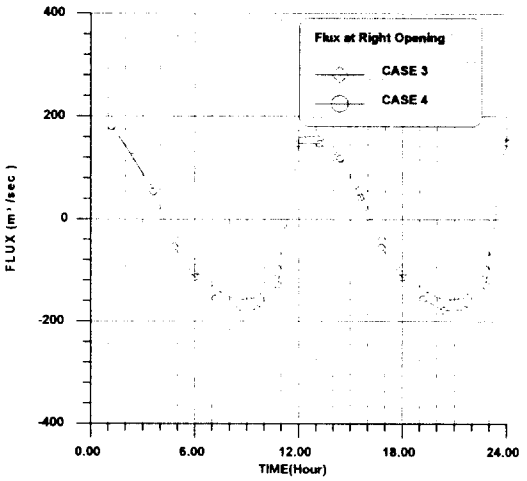

Fig.18 Time History of Flux(Right Openning)

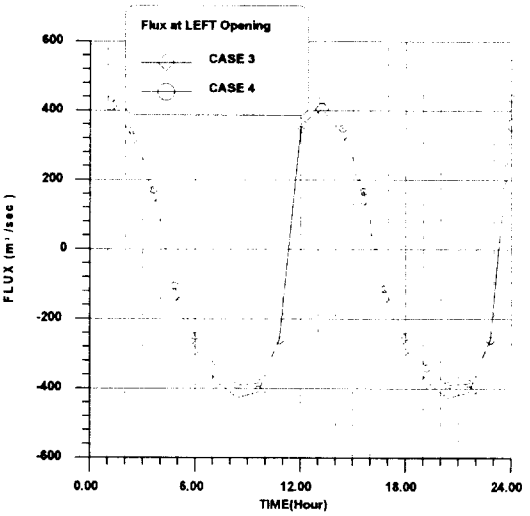

Fig.19 Time History of Flux(Left Openning)

Fig.18과 Fig.19에서는 도류제에 의한 좌-우측 개

구에서의 유량변동을 시간에 대해 보여주고 있다. 전술한 바와 같이 우측 개구에서는 case 3이 case 4보다 전반적으로 유량의 유입이 많고(Fig.18), 좌측 개구에서는 case 4가 case 3보다 유량 유입이 많다(Fig.19). 결국 case 3은 유량유입이 많은 우측 개구로부터 유량유입이 상대적으로 적은 좌측 개구로의 순환류가 발생하고, case 4는 좌측개구로부터 우측개구로의 순환류가 발생하게됨을 증명하고 있다. 하지만 유량의 차이가 별로 크지 않으며 도류제의 형상, 크기 및 개수의 영향에 대한 연구가 수행되면 보다 효과적으로 순환류를 발생시킬 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

협소한 해역의 조류해석을 위한 수치프로그램을 개발하여 도류제를 이용해서 진동류인 조석류를 만내에서 한 방향으로 순환시키기 위한 연구를 수행하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 도류제가 설치되지 않은 항만 내의 조류를 한 주기동안 시간평균한 잔여조류성분은 전체 해수교환에 기여하지 못하고 국부적인 보오텍스(vortex)를 생성하는데 국한된다.

2. 조류가 도류제에 순방향으로 유입될 때와 역방향으로 유입될 때 유량의 차이가 생겨 도류제가 만내의 조류를 한 방향으로 순환시키는 역할을 하게 된다.

3. 유량의 차이를 결정짓는 인자로는 수로 폭과 도류제 길이의 비, 도류제의 개수 및 형상이 있으며, 각 인자들의 영향에 대한 상세한 연구는 차후의 과제로 남겨진다.

참고문헌

1) 日本全國沿岸漁業振興開發協會, "沿岸漁場整備開發事業實施計劃指針", 1992

2) Rodi, W., "Turbulence Models and Their Application in Hydraulics - A State of the Art Review,"University of Karlsruhe, 1984

3) Yano, S., Komatsu, T., Kohashi, N. Fujita, K. and Gug, S.G., "On the Control of Tidal Residual Current in a Bay by Bottom Roughness with Directional Characteristic,"제1회 환경유체심포지엄 강연논문집, C225, 1996

4) Launder, B.E. and Spalding, D.B., "The Numerical Computation of Turbulent Flow," Comp. Meth. in Appl. Mech., and Eng.,Vol.3, p.269, 1974

5) Rastogi, A.K. and Rodi, W., "Predictions of heat and mass transfer in open channels, "Journal of the Hydraulics Division, ASCE, No. HY3, pp.397-420, 1978

6) Karki, K.C. and Patankar, S.V., "Calculation Procedure for Viscous Incompressible Flows in Complex Geometries," Numeriacl Heat Transfer, Vol.14, pp.295-307, 1988

7) Rhie C.M. and Chow W.L., "A Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Isolated Airfoil with Trailing Edge Separation," AIAA Journal, Vol.21, pp.1525-1532, 1983

8) Versteeg H.K. and Malalasekera W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method, "Longman Scientific & Technical, 1995

9) Spalding, D.B., "A Novel Finite Difference Formulation for Different Expressions Involving both First and Second Derivatives, "Int. J. Num. Methods Eng., Vol.4,p.551, 1972

10) Yang, C.K., Hong, K. and Choi, H.S., "A Numerical Simulation of Vertical Convection Flow Induced by V-Shaped Plate", Proc. of ISOPE '97, Vol.3, pp.899-905, 1997

11) Stone, H.L., "Iterative Solution of Implicit Approximations of Multidimensional Partial Differential Equations," SIAM J. Numer. Anal., Vol.5, No.3, pp.530-558, 1986

12) 양찬규, "표준 k-ε 모델의 예측성 연구-후방계단 유동," 97년 춘계 선박유체역학 연구회 발표논문, 1997