

조석분류를 이용한 연안해역의 수질정화에 관한 수치적 평가

박종천*

*부산대학교 조선해양공학과

Numerical Assessment for Coastal Water Purification Utilizing a Tidal Jet System

JONG-CHUN PARK*

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

KEY WORDS : Tidal-jet generator(TJG) 조류제, Tidal jet 조석 분류, Opening ratio 개방률, Water purification 수질 정화

ABSTRACT : When the coastal zone surrounded by a breakwater has a narrow vertical opening, currents in the vicinity of a narrow entrance can result in a jet flow, coinciding with the tide. Such a Tidal-Jet Generator(TJG) can change the water mass distribution and transport processes in the domain of influence of the jet. Also, it can decrease the residual time of them. In the present study, the water purification utilizing tidal jets in the coastal zone over constant bathymetry are estimated numerically, using a finite-difference numerical scheme, named the NS-MAC-TIDE method, which is based on the fully 3D Navier-stokes(NS) equations. The shear velocity near the inlet of the TJG are predicted from the flow field simulation, and are assessed qualitatively with the development of scouring or sediment that is caused by the change of diffusion or sweeping flowup from the seabed of sediment particles. Finally, through solving a transport equation of concentration, the residual time related on mass transport processes and the flushing mechanism for water purification are investigated.

1. 서 론

조석류가 유출·입 되는 강어귀 혹은 만이나 항입구부에서의 조류는 연안이나 해안 환경에 있어서 매우 중요하다. 특히, 지형적으로 좁은 입구에서의 유동은 강하며 국부적으로 한 방향의 분류를 생성할 수 있는데, 단지 조류의 힘에만 기인하는 분류를 조석분류(Tide-induced jet 혹은 Tidal jet)라고 한다. 조석의 한 주기 동안 유입되는 조류는 난류분류를 형성하고 분류의 선두 부분 근처에 높은 와도를 갖는 와류 쌍(Eddy pairs)을 생성한다. 제트에 의해 창출된 대규모 와류(Large-eddy)의 쌍은 주위의 해수유동에 영향을 미친다. 특히 해수의 질량 분포와 분류의 영향 안에 있는 영역에서의 물질의 수송과정에 영향을 준다. 분류 내부에서의 운동량 소산(Momentum dissipation)은 유동이 발달함에 따라 분류의 선두 부분에서 와류 운동으로 인해 서서히 증가해 간다. 이러한 유체역학적인 과정은 조류의 주기와 같은 주기로 유입구의 내부와 외부에 지속적으로 반복되며, 침전물과 물질 수송 현상에 관한 중요한 효과를 가져다 줄 것이다.

지금까지 많은 연구들(French, 1960; Taylor and Dean, 1974; Ozsoy, 1977; Joshi, 1982; Joshi and Taylor, 1983; Ismail and Wiegel, 1983; Wolanski et al., 1988)은 자기 상사(Self-similarity)와 준정상적인 난류 분류의 거동이라는 가정 하에서 충분히 발달한 분류의 중심선 속도와 분류 폭에 대한 일반적인 해를 구해냈다. 그러나 이 해들은 발달하기 전의 초

기 분류(Starting jet) 상태에서의 최대 강도를 평가할 수는 없었다. 최대 강도는 좁은 입구에 이웃하는 지역에서의 해수 유동의 패턴과 구조에 직접적으로 영향을 주게 된다. 만약 어떤 만이 좁은 입구를 갖고 있다면 조류력에 의해 입구 내부와 외부 사이에서 큰 수면 상승치를 야기 시킬 것이다. 이때 에너지 소산은 입구를 통하여 떨어지는 강한 분류에 의해 증가할 것이며, 유입구 가까운 지역의 해류의 상승운동(Upwelling motion)과 같은 3차원 효과가 일어날 것이다.

본 연구에서는 수심이 일정한 지형에서 조석분류를 이용한 연안 지역의 수질정화에 관한 수치적 평가에 대해 연구한다. 조류와 같은 진동류에 의해 분류를 생성하기 위하여 연직 개구부를 갖는 폐쇄 사각 방파제인 조류제(Tidal-jet generator, TJG)라는 구조물을 이용한다. 좁은 연직 개구부(Opening part)를 갖도록 해역을 방파제로 둘러싸면 조석 운동에 동반되는 해수유동에 의해 개구부 근방에서의 흐름은 분류가 된다. 이러한 조류제는 전면 해역에 있어서의 물질 순환이나 수송과정을 변화시키고 체류시간을 감소시킬 수 있다. 조류제는 사각형 만의 최내측(Head of a rectangular bay)에 설치한다. 조석류는 만의 입구에서 수위를 정현곡선 형상의 경계조건으로 주어짐으로써 재현한다. 조석의 한 주기 동안 조류제의 내부와 외부 사이의 수면 차이로 인해 강하고 한 방향으로의 국부적인 분류가 조류제의 유입구로부터 나타날 수 있다. 이때 유입구로부터 분출되는 분류의 최대강도가 수치적으로 예측된다. 조류제에 의해 발생하는 조석분류의 기초적 흐름 특성을 수치적으로 해석하기 위해 엄밀한 3차원 Navier-Stokes (N-S) 방정식에 기초하고 수정된 Marker and Cell(MAC) 알고리즘을 사용하는 NS-MAC-TIDE 법을 개발하고 조석분류를

교신저자 박종천: 부산광역시 금정구 장전2동 산30

051-510-2480 jcpark@pusan.ac.kr

이용한 연안지역의 수질정화에 관하여 수치적으로 평가한다. 경계조건은 직각 좌표 격자에서 시간진행(Time-marching) 기법을 이용하여 매 시간마다 갱신된다. 압력을 구하기 위한 Poisson 방정식은 Richardson 방법을 사용하여 반복적으로 풀린다. 자유표면의 거동은 역학적, 운동학적 조건을 모두 만족시켜 구한다.

NS-MAC-TIDE 법에 의해 시뮬레이션된 결과는 Furukawa et al.(1994)의 수리 실험 결과 및 타 수치 시뮬레이션 모델들인 3D-ADI 법(Leendertse, 1989, Furukawa and Hosokawa, 1994), Discrete Vortex 법(Furukawa and Wolanski, 1998), 및 CIP-CSF 법(Nakayama and Satoh, 1999)의 결과와 비교된다. 단 후술한 수치 모델들은 순서대로 준 3차원, 수심 평균 2차원, 완전 3차원 N-S방정식에 기초한 방법들이다. 수치 시뮬레이션 모델들 사이의 비교를 통하여 유동의 3차원성 효과의 상호 검토와 확인이 수행된다. 조류계 개구부의 해저 주변에서의 전단속도를 시뮬레이션 결과로부터 추정하여 퇴적입자에 대한 해저면에서 상방향으로의 확산이나 소류력(Tractive force)의 공간적인 변화에 의한 침식(Scouring)나 퇴적(Sediment)의 발생에 관하여 정량적으로 평가한다. 또한, 조류계 전면해역에서의 물질순환이나 수송과정을 재현하기 위해 농도확산에 관한 시뮬레이션을 행하고 이들의 체류시간을 수치적으로 예측한다. 이들에 대한 검토는 실험이나 관측에 의해 추정하는 것은 정확도면에서 곤란하며 수치적 연구에 의한 성과라고 할 수 있다.

2. 유한 차분법, NS-MAC-TIDE

2.1. 지배방정식

유체가 비압축성이고 균질하다고 가정할 때 지배방정식은 다음의 N-S 방정식과 연속방정식으로 주어질 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\nabla \left(\frac{p}{\rho} + \frac{2}{3}k \right) + \mathbf{a} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{a} = -(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} + (\nu + \nu_s)\nabla^2\mathbf{u} + (\nabla\nu_s)\mathbf{S} + \mathbf{f} \quad (3)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 2\frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} & 2\frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} & 2\frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4)$$

위 식에서, $\mathbf{u}=(u, v, w)$ 는 속도 벡터이고, p 는 압력, t 는 시간, ∇ 는 구배 연산자, ν 는 층류의 동점성계수, ν_s 는 Subgrid-scale (SGS) 난류 모델의 와류 점성계수이고 \mathbf{f} 는 중력 가속도를 포함한 외력이다. SGS 난류 모델은 Miyata & Yamada(1992)와 같은 방법으로 도입된다. Smagorinsky et

al.(1965)의 가정에 따르면 SGS 와류 동점성계수 ν_s 와 난류 동역학적 에너지 k 는 다음과 같이 유도된다.

$$\nu_s = (C_1\Delta)^2 \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$k = \frac{(\nu_s)^2}{(C_0\Delta)^2} \quad (6)$$

여기서 $C_1=0.1$ 이고 $C_0=0.094$ 이며 Δ 는 길이 척도이며 $\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ 로 설정된다.

자유표면에서 점성 응력과 표면장력을 무시하면 다음과 같은 동역학 및 정역학적 조건을 적용할 수 있다.

$$\frac{D(\eta - z)}{Dt} = 0 \quad (7)$$

$$p = p_{air} \quad (8)$$

여기서 D 는 전미분(Total derivative)이고 η 는 파고 함수를 나타낸다. 그리고 z 는 연직좌표를 나타낸다. 식 (7)은 자유표면 위에 존재하는 입자가 자유표면과 함께 움직인다는 것을 의미한다. 자유표면의 위치가 결정된 후에 지배방정식 (1)은 계산공간상에서 적분된다.

2.2. 알고리즘과 차분 도식

해의 알고리즘은 자유표면의 취급을 제외하고 직각격자계에서 속도와 압력 지점이 다른 엇갈림 격자(Staggered mesh)를 사용한 NS-MAC-NWT(Park et al., 1999) 법과 유사하다. 시간 진행과정에서 파고의 분포는 식 (7)로부터 계산된다. 그리고 새로운 압력장은 다음과 같은 Poisson 방정식을 반복해법으로 풀어서 결정한다.

$$\nabla \cdot \nabla P = \nabla \cdot \left(\mathbf{a} + \frac{\mathbf{u}^{(n)}}{\Delta t} \right) = \nabla \cdot \mathbf{b} \quad (9)$$

$$P^{m+1} = P^m + w_0 (\nabla \cdot \nabla P - \nabla \cdot \mathbf{b}) \quad (10)$$

여기서, $P=p/\rho$ 이며 w_0 는 완화계수이며 1보다 작은 값을 설정한다. 위첨자 n 과 m 은 각각 시간 스텝과 반복회수를 나타낸다. 우변의 \mathbf{b} 항은 확산항과 대류항을 포함하며 소스항이라고 부른다. 속도는 N-S 방정식인 식 (1)에 의하여 갱신되고 자유표면의 새로운 위치에 속도의 경계값들이 설정된다. 식 (1)은 초기값에 의해 풀리는 쌍곡선형 방정식이다. 반면 Poisson 방정식, 식 (9)는 경계조건으로 풀리는 타원형 방정식이다. 식 (1)은 시간진행에 의해 풀리고 매 시간마다 식 (9)는 반복해법에 의해 풀린다. 이 과정은 마지막 계산시간에 도달할 때까지 반복된다.

대류항의 도식은 계산결과에 지대한 영향을 주므로 신중히

선택해야 한다. 본 방법에서는 3방향에 부등간격의 격자계를 사용하기 때문에 부등간격의 격자 크기를 고려한 3차 정확도의 상류 도식인 MUSCL 도식이 사용된다. 한편, 시간 차분에는 2차 Adams-Bashforth 법을, 확산항에는 2차 중심차분 도식을 각각 적용한다.

파고 함수의 수송방정식 (5)은 Crank-Nicholson법에 의해 구해진다.

$$a_p \eta_{ij}^{n+1} = a_e \eta_{i+1j}^{n+1} + a_w \eta_{i-1j}^{n+1} + a_n \eta_{ij+1}^{n+1} + a_s \eta_{ij-1}^{n+1} + c \quad (11)$$

$$a_e = -\frac{\Delta t(u_p - |u_p|)}{2\Delta x_{i+1/2}} \quad (12a)$$

$$a_w = \frac{\Delta t(u_p + |u_p|)}{2\Delta x_{i-1/2}} \quad (12b)$$

$$a_n = -\frac{\Delta t(v_p - |v_p|)}{2\Delta y_{j+1/2}} \quad (12c)$$

$$a_s = \frac{\Delta t(v_p + |v_p|)}{2\Delta y_{j-1/2}} \quad (12d)$$

$$a_p = (1 + a_e + a_w + a_n + a_s) \quad (12e)$$

$$c = \eta_{ij}^n + w_p \Delta t \quad (12f)$$

여기서 첨자 (i, j)는 파고의 이산 위치(Discretized location)를 나타낸다. 이산 방정식 (11)의 해는 표준 Gauss 소거법에 의해 구해진다.

자유표면의 역학적 조건인 식 (8)은 압력을 위한 Poisson 방정식의 해를 구하는 과정에서 "Irregular star" 법(Chan and Street, 1970)에 의해 만족된다. 자유표면에서의 압력은 자유표면에 수직인 방향으로 제로 구배를 갖도록 외삽된다. 이때 중력차로 인한 연직방향의 정수압 차를 고려하여 외삽한다. 같은 방법으로 속도는 자유표면에 수직인 방향으로 제로 구배를 갖도록 외삽된다. 이 취급방법은 자유표면에서 속도에 대한 점성 접선 조건과 개략적으로 일치한다고 볼 수 있다.

2.3 다른 경계 조건들

방파제를 포함한 고체 벽에 점착(No-slip) 조건을 부여한다. 즉, 모든 속도 성분은 고체 경계면에서 0이다. 고체 벽면에서의 압력과 파고는 수평방향으로 기울기를 갖지 않는 조건을 적용하여 외삽한다. 그러나 연직방향의 압력의 경우 정수압의 차이를 고려하여 외삽한다.

유입경계에서는 강제 조석(Tidal forcing)을 다음과 같이 부여한다.

$$\eta = A \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) = A \cos \sigma t, \quad (13)$$

여기서, A 는 조석의 진폭, T 는 조석의 주기, σ 는 조석의 각주파수이고 t 는 시간이다. 강제 조석은 만조(Full flood)로부터

시작 된다. 정수압은 식 (13)에서 주어진 해수위의 시간변화에 따라 유입경계면 상에 설정된다.

3. 수치 시뮬레이션 조건 및 결과

3.1 조류제 모델

조류제의 설계에 있어서 기본적인 물리특성은 입구의 갑작스런 축소와 확장으로 인한 흐름의 박리현상이라고 할 수 있다. 해석의 단순성을 위해, 조류제의 외벽은 얇고 수직하다고 가정한다. Fig. 1에 보이는 바와 같이 조류제 모델은 수심이 얇고 일정한 사각형의 만내(Head of bay)에 설치된다. 좌표축의 원점은 조류제의 개방입구 중앙에 둔다. 만의 안쪽측면에는 연직 반사벽이 있고 벽면상에는 점착조건을 부여한다. 강제 조석은 사각 만의 입구경계에서 식 (13)의 정현곡선으로부터 수위를 조절함으로써 재현한다. 또한 조석은 사각 만의 폭에 비해 파장이 충분히 길며 만의 깊이에 비해 작은 진폭을 갖는다고 가정한다. 또한 조석은 만의 입구에 수직하게 입사하며 전체 경계에서 반사효과는 무시하였다. 따라서 장파의 전파속도 $C_w = \sqrt{gh}$ 로 전파된다고 할 수 있다. 단 h 는 수심, g 는 중력 가속도이다.

조석의 한 주기 동안 조류제의 안쪽과 바깥쪽사이의 수위 차로 인하여 강하고 단일 방향으로의 분류가 조류제의 유입구를 통하여 국소적으로 발생한다. 어떤 한 시점에 유입구는 한 면의 포텐셜 용출이 되고 다른 면에는 같은 양의 용입이 된다. 이렇게 국소적으로 발생하는 분류는 간조 시 유입구의 바깥주위에 분포된 오염물질의 체재 시간(Residual time)을 줄일 수 있다. 결국 조류 에너지에 의한 분류 효과는 분출 메커니즘(Flushing mechanism)을 제공하여 국소적인 해양 환경을 개선하는데 활용될 수 있다.

이 시스템에서 실험과 수치해석 결과를 특성 짓는 두 개의 변수가 사용된다. 하나는 $\epsilon = \epsilon_0 h / S$ 로 정의되는 개방률(Opening ratio)이다. 여기서 ϵ_0 는 구조물 입구의 개방폭, $S (=B \times L)$ 는 방파제 내부의 수평 면적이다. 여기서 수평 면적과 수심은 시스템에 있어서 최적의 개방률을 결정하는 중요한 변수이다. 또 하나의 변수는 본 논문에서 새롭게 정의된 입구속도의 최대 강도로 $U_{\max} = U / \sigma A$ 로 정의한다. 여기서 U 는 최대 입구속도이다.

3.2 시뮬레이션 조건

길이 $L=8.75\text{m}$ 와 폭 $B=10\text{m}$ 의 사각 만 모형에서 NS-MAC-TIDE 법에 의한 수치 시뮬레이션을 행하였다. 시뮬레이션의 조건은 Furukawa et al.(1994)의 실험 조건과 동일하게 주었다. 입사파의 주기와 파고는 각각 $T=390\text{sec}$, $H=2A=0.0037\text{m}$ 이며, 조류제의 수평면적 $S=2.01 (=1.15 \times 1.75)\text{m}^2$, 수심 $h=0.0981\text{m}$ 으로 설정하였다. 모든 수평 공간의 격자는 $\Delta x = \Delta y = 0.05\text{m}$ 로 고정하였다. 수렴

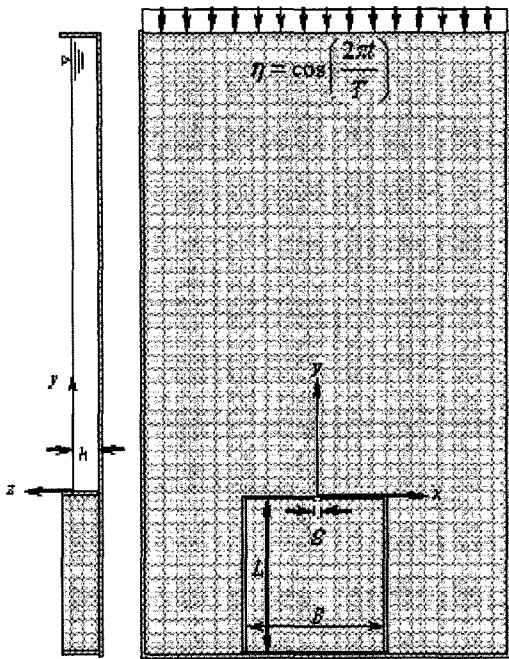


Fig. 1 A tidal-jet generator(TJG) Model

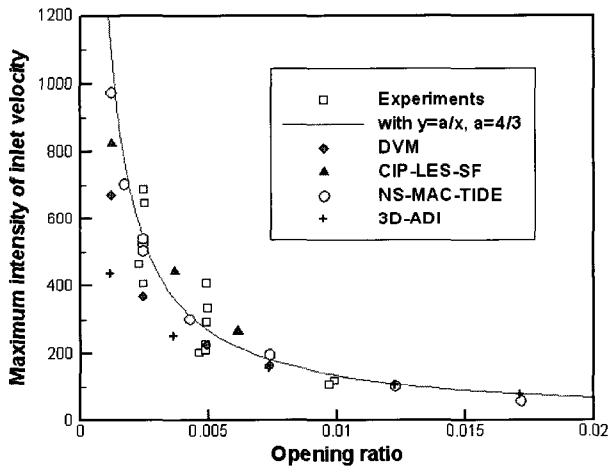


Fig. 2 Relation between maximum intensity of inlet velocity and opening ratio of the TJG

테스트의 결과에 따라 자유표면과 해저면까지의 수직 셀 수 N_z 는 5로, CFL 수는 0.5로 정하여 Δt 를 정했다.

3.3 조석분류의 최대 강도 분포

본 연구에서는 TJG에 관한 이전의 연구로부터 얻어진 Furukawa et al.(1994)의 실험결과를 재분석하여, 무차원 최대 유입 속도 강도 U_{max} 와 개방률 ϵ_0 사이의 새로운 관계식을 얻어냈다. 재분석된 실험 결과는 Fig. 2에 보인다. 실선으로 표시한 것은 $U_{max} = a/\epsilon_0$ 의 곡선이 적용된 경험식이고, 전체적으로 2% 미만의 오차를 갖는다. 이때 실험정수 a 는 4/3이며, 계수 a 의 물리적인 의미는 조석분류가 존재하지 않는 경우에

비해 유입속도의 최대 강도율을 4/3배만큼 더 크게 하는 데 조석분류가 기인하는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구에서 개발한 NS-MAC-TIDE 방법에 의한 결과는 세 종류의 독립된 수치 모델인 3D-ADI(Furukawa and Hosokawa, 1994), DVM(Furukawa and Wolanski, 1998) 및 CIP-CSF(Nakayama and Satoh, 1999)의 시뮬레이션 결과와 함께 Fig. 5에 비교된다. 여기서 타 수치 모델들은 순서대로 준 3차원, 수심 평균 2차원, 완전 3차원 NS-방정식에 기초한 방법들이다. 본 연구 결과는 실험에서 얻어낸 경험식과 잘 일치하고 있으며, 타 수치 모델들에 비하여 유입속도의 최대 강도를 정확히 예측할 수 있음을 명확히 알 수 있다. 결과적으로, $\epsilon_0 < 0.005$ 와 같은 비교적 작은 개방률 범위에서 수심방향의 유동 계산을 단순히 표현한 3D-ADI와 DVM 모델은 경험식과 잘 일치하지 않음을 알 수 있다. 이는 개방률이 작아짐에 따라서 조류제 입구의 내부와 외부 면 사이의 수위차가 커지게 되며, 이로 인해 개방된 틈새로부터 조석분류에 의한 해수의 낙차와 그에 따른 용승(Upwelling)과 같은 3차원 특성들이 강하게 나타나는 것에 기인하기 때문이라고 볼 수 있다. 따라서 수심 방향에서의 정수압의 가정은 더 이상 허용될 수 없을 것이며 모델링에 따른 수치적인 오차로 작용하게 될 것이다.

3.4 조석분류에 의한 수질정화의 수치적 평가

조류제 전면부에서 수질 정화와 질량 수송에 관한 확산 메커니즘을 조사하기 위해서 식 (14)와 같은 농도 (Concentration) C 의 스칼라 수송방정식을 계산하여 농도의 시간 잔차율을 예측하였다. 이때 입구의 개방폭 $\epsilon = 5, 15, 25$ cm의 3가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 행하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (u \cdot C) = \left(\frac{\nu + \nu_s}{S_{CH}} \right) \nabla^2 C \quad (14)$$

식 (14)에서 난류 Schmidt 수 S_{CH} 는 0.7로 선택한다(Rodi, 1993). 따라서 농도 C 는 오염물질이나 물의 양분 또는 해안의 유해 방출물 등으로 가정될 수 있다. 농도에 관한 계산은 시간 진행 과정에서 매 시간스텝마다 유체의 유동장 계산과 함께 동시에 계산되며, 두 번째 조류가 유입 경계에서 발생된 후부터 계산이 시작된다. 농도의 초기분포로 조류제 전면의 사각형 영역에는 $C=1$ 로, 그 외의 모든 영역에는 $C=0$ 으로 설정한다(Fig. 3). 농도 잔여량의 시간율은 폐쇄된 조류제의 체적 $2m^3$ 과 동일한 $2hm^3$ 의 가상 체적의 영역에 걸쳐 농도 잔여량을 적분하여 계산된다.

무차원 시간율은 초기적으로 획득된 값에 의해 구해진다. Fig. 4는 농도 잔여량의 시간에 따른 변화를 보인다. 즉, 조류의 4주기 동안 가상영역내의 농도의 전체량은 $\epsilon = 5, 15, 25$ cm의 경우에 대하여 각각 52%, 25%, 15%씩 손실되는 것을 알 수 있다. 그러므로 가상영역에서의 잔류시간을 약 8T, 16T, 27T로 추정할 수 있다. Fig. 5에는 개구폭이 다른 3가지 경우에 대해 수면위에 분포된 농축물의 시간변화를 나타낸다. 개

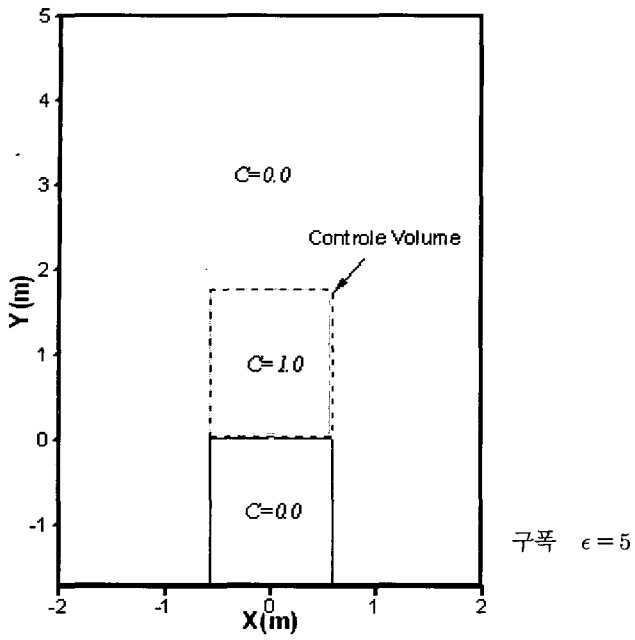


Fig. 3 Initial condition for the calculation of concentration transport

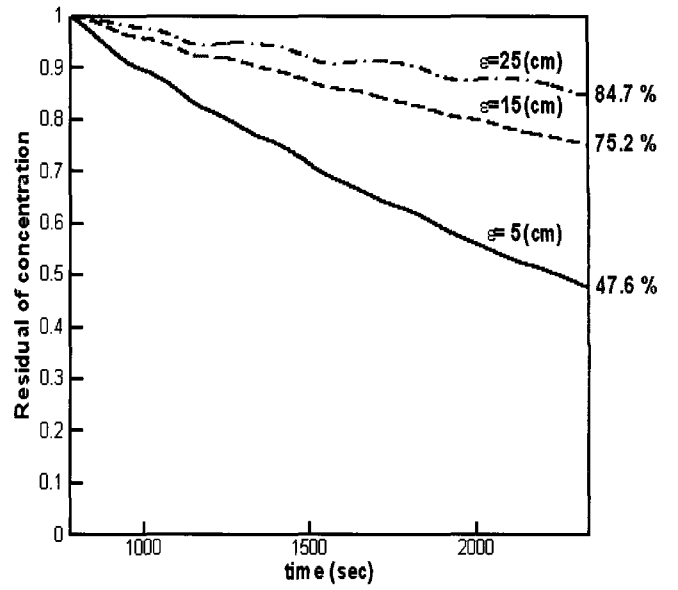


Fig. 4 Time evolution of the residual of concentration in a monitored control volume

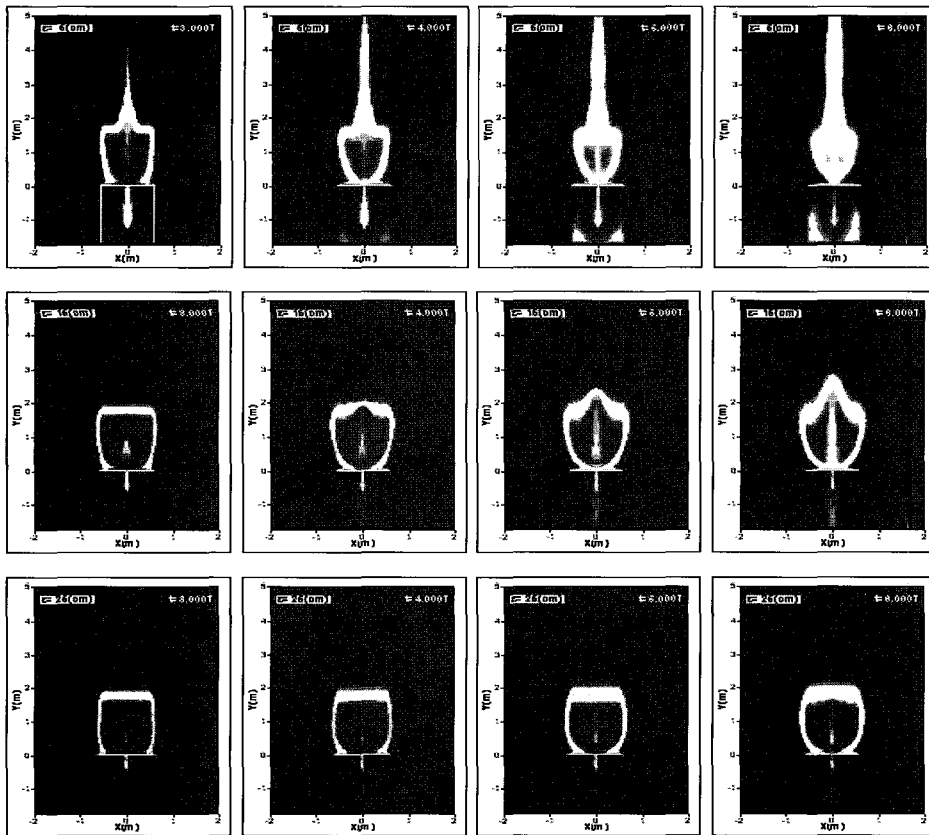


Fig. 5 Distribution of the residual of concentration at various time for the cases of $\epsilon = 5, 15$ and 25 cm

개구폭 $\epsilon = 5\text{cm}$ 의 경우 농도분포는 조류 제트 효과 때문에 시간이 증가함에 따라 유입구로부터 현저하게 손실되고 확산된다. 지역적으로 발생하는 조석분류는 대규모 와류운동으로 인하여 유입구의 바깥쪽 주변에 분포된 오염물질의 잔차 시간을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 그 효과는 조류 에너지가 수질정화를 위한 확산 메커니즘을 제공함으로써 지역적인 해양 환경의 개선에 영향을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

완전 3차원 N-S 방정식에 기초한 수치 모델인 NS-MAC-TIDE 법을 사용하여 수심이 일정한 사각형 만내의 조류제의 좁은 틈으로부터 조류에 의해 발생하는 조석분류에 의한 연안지역의 수질정화에 관하여 수치적으로 평가하였다.

본 연구에서 개발된 수치 모델의 결과는 Furukawa et al.(1994)의 실험결과 및 타 수치모델들의 결과와 비교하였으며, 실험으로부터 제안된 경험식과 비교하여 유입구 속도의 최대 강도를 정확하게 예측할 수 있었다.

이 연구로부터 본 연구에서 개발한 NS-MAC-TIDE 법은 조석분류에 의한 조류제 입구속도의 최대강도를 정확히 예측할 수 있으며 연안지역의 수질개선 등에 관한 해양환경 평가를 거론하는 데 있어 활용가치가 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 부산대학교 연구(보조)비(4년과제)의 지원으로 이루어 졌습니다.

참 고 문 헌

- Chan R.K.C and Street, R.L. (1970). "A Computer Study of Finite Amplitude Water Waves", J. Computational Physics, Vol 6, pp 68-94.
- French, J.L. (1960). "Tidal Flow in Entrances", Bulletin No 3, U.S. Army Corps of Engineers, Committee of Tidal Hydraulics.
- Furukawa, K., Hirano, T. and Hosokawa, Y. (1994). "Flow Analysis on Tidal Flow Generator -Hydraulic Experimental and Numerical Simulation -", Report of the Port and Harbour Research Institute, Japan, Vol 33, No 1, pp 37-66 (in Japanese).
- Furukawa, K. and Hosokawa, Y. (1994). "A Three Dimensional Physical - Biological Modeling and its Application to Evaluation of Nitrogen Uptake at Coast", Report of the Port and Harbour Research Institute, Japan, Vol 33, No 3, pp 27-56 (in Japanese).
- Furukawa, K. and Wolanski, E. (1998). "Shallow-water Frictional Effects in Island Wakes", Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol 46, pp 599-608.
- Ismail, N.M and Wiegel, R.L. (1983). "Opposing Wave Effect on Momentum Jets Spreading Rate", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol 109, No 4, pp 465-483.
- Joshi, P.B. (1982). "Hydromechanics of Tidal Inlets", J. Port, Waterway, Harbor, and Ocean Division, ASCE, Vol 108, No WW3, pp 239-253.
- Joshi, P.B. and Taylor, R.B. (1983). "Circulation Induced by Tidal Jets", J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol 109, No 4, pp 445-464.
- Leendertse, J.J. (1989). "A New Approach to Three-Dimensional Free-Surface Flow Modeling", The RAND cooperation, R-3712-NETH/RC.
- Miyata, H. and Yamada, Y. (1992). "A Finite Difference Method for 3D Flows about Bodies of Complex Geometry in Rectangular Co-ordinate Systems", Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol 14, pp 1261-1287.
- Nakayama, K. and Satoh, T. (1999). "Analysis of Plumes on Horizontal Surface by LES Model", J. of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering, JSCE, Vol 628, No II-48, pp 97-114 (in Japanese).
- Ozsoy, E. (1977). "Flow and Mass Transport in the Vicinity of Tidal Inlets", Technical Report No.TR-026, University of Florida, Coastal and Oceanographic Engineering Laboratory.
- Park, J.C., Kim, M.H. and Miyata, H. (1999). "Fully Non-linear Free-Surfaces Simulations by a 3D Viscous Numerical Wave Tank", Int. J. for Numerical Methods in Fluids, Vol 29, pp 685-703.
- Rodi, W. (1993). "Turbulence models and their application in hydraulics", 3rd ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Taylor, R.B. and Dean, R.G. (1974). "Exchange Characteristics of Tidal Inlets", Proc. of 14-th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp 2268-2289.
- Smagorinski, J., Manabe, S. and Holloway, J.L. (1965). "Numerical results from a Nine-Level General Circulation Model of the Atmosphere", Mon. Wealth. Rev., Vol 93, No 12, pp 727-768.
- Wolanski, E., Drew, E., Abel, K.M. and O'Brien J. (1988). "Tidal Jets, Nutrient Upwelling and Their-Influence on the Productivity of the Alga Halimeda in the Ribbon Reefs", Great Barrier Reef, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol 26, pp 169-201.

2005년 11월 17일 원고 접수

2006년 8월 11일 최종 수정본 채택