

3차원 傾壓 海水流動 모델의 開發과 水營灣의 海수유동

김차겸 · 이종섭¹ · 장선덕¹

국립수산진흥원 환경과

¹부산수산대학교 해양공학과

Development of Three-Dimensional Baroclinic Hydrodynamic Model and Flow Patterns of the Suyoung Bay

CHA-KYUM KIM, JONG-SUP LEE¹ AND SUN-DUCK CHANG¹

*Dept. of Environment, National Fisheries Research and Development Agency,
Yongsan, 626-900, Korea*

¹*Department of Ocean Engineering, National Fisheries University
of Pusan, Pusan, 608-737, Korea*

ADI(Alternating Direction Implicit) 유한차분법을 사용하여 3차원 傾壓 海水流動 모델 BACHOM-3을 개발하였다. 본 모델을 장방형 내만에서 하나의 결점을 갖는 정상파에 적용하여 해석해와 비교하였으며, 그 결과 해석해와 잘 일치하였다. 모델의 現地 適用성과 水營灣의 海수유동을 조사하기 위해 모델을 수영만에 적용하여 대조기 平水時 現地관측결과와 비교하였으며, 그 결과 현지 관측결과와 비교적 잘 일치하였다. 만 중앙부의 제 1층(수심 0~2 m)과 제 2층(수심 2~5 m)에서 조석잔차류는 시계방향으로 회전하는 순환류가 나타났으며, 또한 낙조류가 창조류보다 강하게 나타났다. 계산된 유속분포에 의하면, 표층과 저층 사이에 流速의 위상차가 나타나며, 표층으로 갈수록 위상의 지연이 나타났다. 그리고, 본 모델을 홍수시와 바람효과를 고려한 흐름장의 계산에도 적용하였다. 海洋에서 陸地로 바람이 불 때 표층에서는 풍향에 대응하는 유속분포를 나타냈으나, 저층의 육지경계부근에서는 풍향과 반대방향의 흐름이 나타났다.

Three-dimensional baroclinic hydrodynamic model, BACHOM-3, is developed using ADI finite difference scheme. The model is applied to a uni-nodal standing wave in a rectangular basin. The model results for the surface elevation and velocities coincide with the analytical results. To verify the field applicability of the model and to investigate the flow patterns of the Suyoung Bay in Pusan, Korea, the model is applied to the bay. The numerically predicted velocity fields during spring tide at normal river flow are compared with field measurements, the comparisons show good agreement. A clockwise residual circulations at the first level (depth=0~2 m) and the second level (depth=2~5 m) of the central part of the bay occur, and the ebb flow is stronger than the flood flow. Computed velocity fields show that the phase difference of velocities between the surface layer and bottom layer occurs and the phase lag increases with height from the bottom. Then, the model is applied successfully for the computation of flow fields considering flood river flow and wind effects. When the wind is blowing toward the land from the sea, the flow patterns at the surface layer correspond with the wind direction, but the flow patterns at the near solid boundary of the lower layer show opposite currents to the wind direction.

緒 論

최근 연안해역에서 海岸開發事業이나 汚濁水 取扱

등 연안환경문제와 관련하여 海수유동 및 수질에 대한 관심이 집중되고 있다. 연안환경을 보존하기 위해서는 潮流, 吹送流 및 海濱流 등과 같은 沿岸

류를 보다 정확하고 효율적으로 예측하여야 한다. 이들의 해석방법으로는 현장관측, 수리실험 및 수치실험이 있으나, 근래에 와서는 수치 실험이 가장 많이 사용되고 있다. 수치해석방법으로는 유한요소법과 유한차분법이 있다. 유한요소법은 복잡한 지형을 잘 표현할 수 있는 장점이 있으나, 프로그램 코드가 복잡하고, 계산시간이 길고 또한 많은 컴퓨터 기억용량을 요구하는 단점이 있다. 유한 차분법은 계산식이 간단하고, 계산시간이 짧고 또한 컴퓨터 기억용량을 적게 요구하기 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 유한차분법에 의한 수치해석방법으로는 양해(explicit)법, 반음해(semi-implicit)법 및 음해(implicit)법이 있다. 양해법에 의한 3차원 해수유동은 藏本·中田(1991) 등 여러 연구자들에 의해 많은 모델이 개발되었으나, 계산시간간격이 짧고 모델이 불안정하여 안정된 계산치를 얻는데 많은 계산시간을 요한다. 한편, 음해법에 의한 3차원 해수유동은 Leendertse and Liu(1975), 堀口 等(1977), Sheng *et al.*(1978) 및 Sheng(1983) 등에 의해 많은 수치 모델이 개발되었으며, 이 방법은 수치적 안정성은 탁월하나 계산식이 복잡하고 삼중대각행렬(tridiagonal)을 푸는데 많은 계산시간을 요한다. 그래서, 보다 간단하고 안정성이 있고 또한 경제적인 수치해법이 요구된다. ADI법은 수치적 안정성이 탁월하고 또한 경제적이기 때문에(Leendertse, 1970) 수평 2차원 모델이나 two-level 및 two-layer 모델에서는 널리 사용되어 왔으나, 3차원 모델에서는 거의 사용되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 수주(water column)를 multi-level로 나누어 ADI법으로 3차원 傾壓 海水流動을 해석하는 알고리즘을 개발하여 해석해와 비교·검증한다. 개발된 모델을 水營灣에 적용하여 모델의 현지 적용성을 검토한 후 평수시, 홍수시 및 바람의 변동특성에 따른 수영만의 해수유동을 해석한다. 본 프로그램은 20 MHZ 연산속도를 가진 80 386 PC에서 운영된다.

모델의 開發

1. 基本方程式

流體의 물리적인 거동은 힘의 平衡과 質量保存의 원리에 기초한 方程式으로 표시되며, 3차원 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

여기서, x, y = 수평방향 좌표계, z = 연직방향 좌표계, t = 시간, u, v, w = 각각 x, y, z 방향의 속도성분, f = Coriolis 계수 (= 2ω sinφ), ω = 지구자전에 의한 각속도, φ = 위도, ρ₀ = 유체의 기준밀도, ρ = 유체밀도, p = 압력, g = 중력가속도, τ_{xx}, τ_{xy}, τ_{xz}, ... = 전단응력들이다.

비압축성 유체에서 질량보존식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

상기 방정식에 정수압근사, Boussinesq 근사 및 와동-점성 개념을 가정하고, 식 (5) 및 (6)과 같은 우선조건을 적용하면 모델의 기본방정식은 식 (7)~(10)과 같이 된다(金, 1992).

$$w(-h) = -u(-h) \frac{\partial h}{\partial x} - v(-h) \frac{\partial h}{\partial y} \approx 0 \quad (5)$$

$$w(\zeta) = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v(\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} \approx \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (6)$$

여기서, ζ는 해수면의 진폭, h는 수심이다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_{k=1}^b \left\{ \frac{\partial (uh)_k}{\partial x} + \frac{\partial (vh)_k}{\partial y} \right\} = 0, \quad k=1, 2, \dots, b \quad (7)$$

여기서, b는 저면을 나타낸다.

- 운동량 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ &= fv - g \frac{\rho_{\zeta}}{\rho_0} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_{\zeta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ &= -fu - g \frac{\rho_{\zeta}}{\rho_0} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_{\zeta}^z \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 ρ_{ζ} = 해수면에서 유체의 밀도, ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z = 각각 x, y, z 방향의 와동점성계수이다.

- 연직속도성분은 다음 식에 의해 계산된다.

$$w_{k+1/2} = - \sum_{l=k}^b \left\{ \frac{\partial(uh)_l}{\partial x} + \frac{\partial(vh)_l}{\partial y} \right\} \quad (10)$$

2. 境界條件

본 연구에서 사용된 諸 境界條件은 다음과 같다.

2.1 陸地 境界面

陸地境界를 따라 법선방향의 流速은 없는 것으로 하였으며, slip 경계조건을 사용하였다.

2.2 海水面 境界面

海水面을 통한 연직방향의 流速은 없는 것으로 하였으며, 바람이 있는 경우에는 바람의 작용이 表面剪斷應力만 발생시키는 것으로 하였다. 海水面에서 바람에 의한 전단응력 τ_s 는 다음과 같이 표시된다.

$$\tau_s = \rho_a \gamma_s^2 W |W| \quad (11)$$

여기서, W = 풍속(m/s), ρ_a = 공기밀도(=0.00123 g/cm³), γ_s^2 = 공기의 저항계수로서 Large and Pond (1981)가 제안한 다음 식을 사용한다.

$$\gamma_s^2 = \begin{cases} 1.2 \times 10^{-3}, & W < 11 \text{ m/s} \\ (0.49 + 0.065 W) \times 10^{-3}, & 11 \leq W < 25 \text{ m/s} \end{cases} \quad (12)$$

2.3 海底 境界面

海底에서 slip 조건이 적용되며, 底面을 통한 鉛直流速은 없는 것으로 하였다. 底面剪斷應力은 다음과 같이 流速의 함수로서 나타냈다.

$$\begin{aligned} \epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} &= \gamma_b^2 u \sqrt{u^2 + v^2} \\ \epsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} &= \gamma_b^2 v \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, γ_b^2 는 저면마찰계수이다.

2.4 内部 境界面

各層間의 摩擦力을 표현하는 연직와동점성계수는 다음식과 같이 流體運動과 관련시킬 수 있다.

$$\epsilon_z = \gamma_l^2 l^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2} \quad (14)$$

여기서, γ_l^2 = 내부마찰계수, l = 혼합길이(= Δz), Δz = 연직격자간격이다.

2.5 外海 境界面

外海 開境界面에서 流速의 경사는 없는 것으로 하였고, 매 시간 간격마다 水位를 입력시켰다.

3. 數值解法

本 研究에 사용된 모델링 시스템은 運動方程式과 連續方程式을 3차원 유한차분 격자상에서 수식화하기 위해 Fig. 1에 나타난 staggered scheme을 사용하였다.

방정식 解析過程은 반음해법인 ADI법을 사용하였으며, ADI 법의 알고리즘은 다음과 같다. 1개의 시간단계 Δt 를 2개의 시간단계로 나누어 제 1시간 단계(전반시간단계)에서는 식 (7)과 (8)을 x축 방향의 성분을 음형식(implicit)으로 표시하고, y축 방향의 성분을 양형식(explicit)으로 표시하여 각 층에서 u와 ζ 를 연립해서 구한다. 이렇게 하여 각 층에서 얻어진 u와 ζ 를 사용하여 식 (9)와 (10)을 양형식으로 적분해서 각 층에서 v와 w를 구한다. 제 2시간단계(후반시간단계)에서는 식 (7)과 (9)를 y축 방향의 성분을 음형식으로 표시하고, x축 방향의 성분을 양형식으로 표시하여 각 층에서 v와 ζ 를 연립해서 구한다. 각 층에서 구한 v와 ζ 를 사용하여 식 (8)과 (10)을 양형식으로 적분해서 각 층에서 u와 w를 구한다. 이로써 1개의 시간단계에 대한 적분이 완

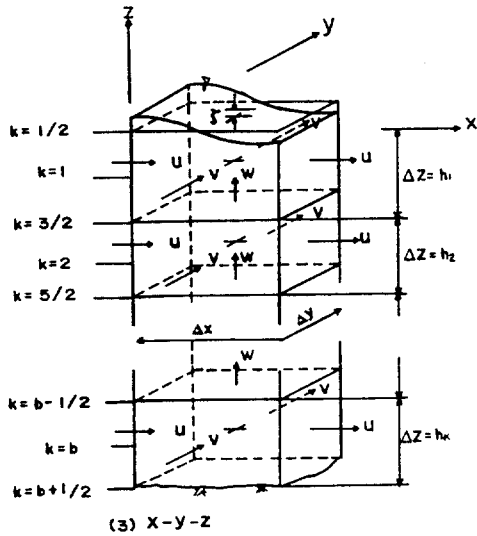
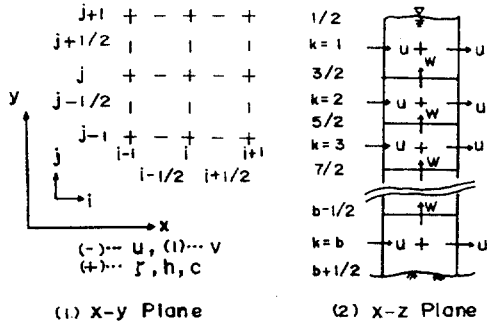


Fig. 1. Coordinate systems and location of variables in three-dimensional model.

료된다. 다음 시간단계도 이상의 과정을 차례로 반복하면서 시간적분하여 계산하며, 차분법에 대한 자세한 내용은 金(1992)의 논문에 수록되어 있다. 이상의 계산과정에 의해 3차원에 傾壓 海水流動을 해석하기 위한 프로그램 BACHOM-3(BARoclinic HydrOdynamic Model-3 dimension)을 개발하였다.

4. 解析解와 比較

본 모델을 검증하기 위하여 解析解가 존재하는 간단한 경우에 적용하여 모델의 정도를 검토하였다. Fig. 2에 나타난 장방형 내만에서 하나의 절점(uninodal)을 갖는 정상파에 BACHOM-3을 적용하여 解析解와 비교하고자 한다. 이때 剪斷應力이나 粘性效果는 무시한다. 이상유체(ideal fluid)에 대한 해석해는 Neumann and Pierson(1966)에 의해 다

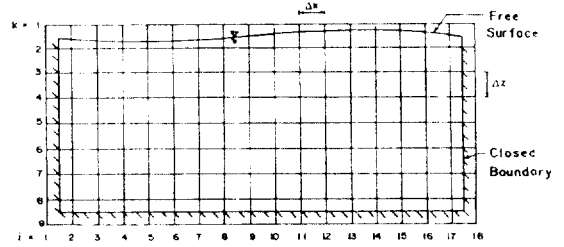


Fig. 2. Vertical two-dimensional finite difference grids.

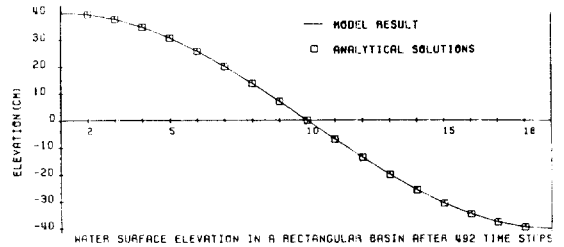


Fig. 3. Water surface elevations in a rectangular basin after 492 time steps.

음과 같이 주어진다.

$$\zeta = A \cos(kx) \cos(\sigma t) \tag{15}$$

$$u = A C/h \sin(kx) \sin(\sigma t) \tag{16}$$

$$w = -A \sigma (h + \zeta)/h \cos(kx) \sin(\sigma t) \tag{17}$$

여기서, A = 파의 진폭(=0.4 m), k = 파수(=2π/L), L = 파장(=CT), C = 파속(=√gh), h = 수심, σ = 각주파수(=2π/T), x = 만의 좌단에서 거리, t = 시간, T = 자유진동주기이다. 만의 길이는 3,400 m, 폭은 1,500 m, 수심은 7 m로 하였다. 계산초기(t=0)에 정상파의 水面變位를 좌단에서 最大振幅 0.4 m 상승하고, 우단에서 最大振幅이 0.4 m 하강하는 半波長의 cosine 함수로 주었다. 모델에서 수평격자간격 Δx=200 m, 연직격자간격 Δz=1 m, 시간간격 Δt=5초, 최대진동주기는 821초(164시간단계), 총 계산 시간은 492시간단계이었다. 492시간단계를 계산하여 그 結果에 대한 일 예를 Fig. 3과 4에 나타냈다.

Fig. 3은 수치실험의 최종시간단계에서 해수면 변위량을 해석해와 수치해를 비교하여 나타낸 것이며, 해석해와 수치해의 수면변위량은 거의 일치하고 있다. Fig. 4는 최강유속이 발생하는 451시간단계 후의 유속분포를 나타낸다. 流速에 대한 數値解의 정도를

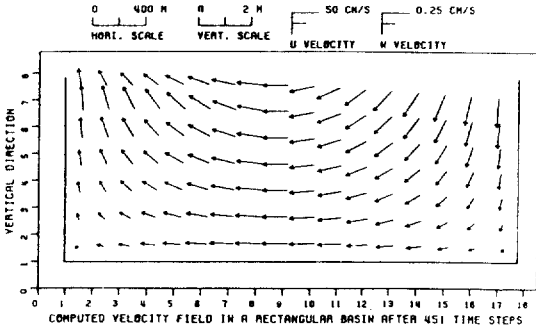


Fig. 4. Velocity fields due to the standing wave in a rectangular basin after 451 time steps.

Table 1. Comparisons of numerical and analytical velocities after 451 time steps

(a) Horizontal velocities

Grid point(i)	Analytical solution(mm/s)	Numerical solution(mm/s)	Error (%)
2	-86.9	-86.5	0.46
3	-170.9	-170.1	0.47
4	-249.1	-248.3	0.32
5	-318.8	-318.4	0.13
6	-377.6	-376.8	0.21

(b) Vertical velocities at mid-depth(k=4)

Grid point(i)	Analytical solution(mm/s)	Numerical solution(mm/s)	Error (%)
2	1.72	1.75	1.71
3	1.63	1.65	1.21
4	1.48	1.51	1.99
5	1.29	1.33	3.01
6	1.05	1.07	1.87

검토하기 위해 451시간단계에서 水平流速과 鉛直流速의 결과를 해석해와 비교하여 Table 1에 나타냈다. 數値解와 解析解와의 誤差는 水平流速의 경우는 0.5% 이내이고, 鉛直流速의 경우는 3.1% 이내이다. 이와 같이 수치 모델의 결과는 해석해의 결과와 대단히 잘 일치하고 있다.

水營灣의 海水流動 特性

1. 計算條件

본 연구에서 개발된 海水流動 모델 BACHOM-3의 현지 적용성과 수영만의 해수유동 특성을 조사하기 위해 모델을 水營灣(Fig. 5)에 적용하여 大潮期 水

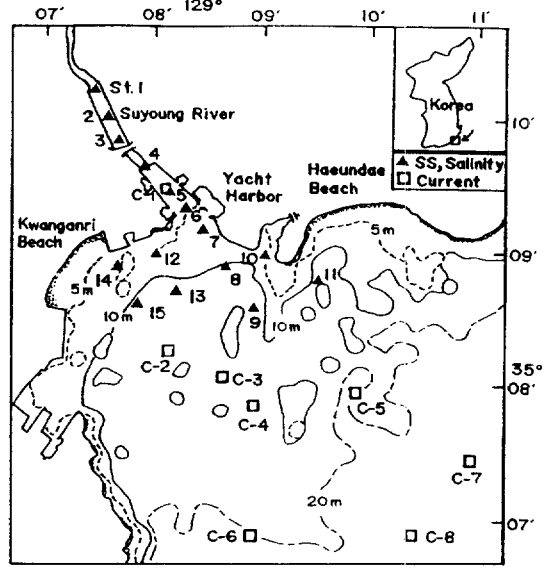


Fig. 5. Bottom topography of the Suyoung Bay.

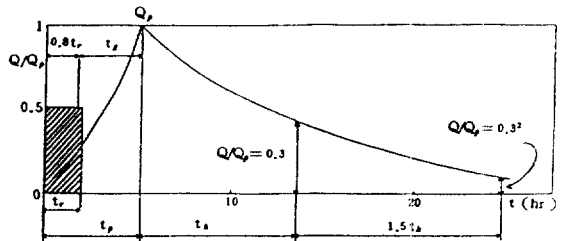


Fig. 6. Flood discharge model of Nakayas.

營灣의 3차원 海水流動을 계산하였다. 水營灣은 水營江을 끼고 있기 때문에 당 海域의 海水流動을 해석할 때는 밀도류 효과를 고려하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 조석, 바람 및 담수유입의 영향을 고려하여 해수유동을 수치실험하였다. 풍향은 부산 지방의 주 풍향인 NE, NW 및 SW계로 하고, 풍속은 현장관측기간의 평균풍속인 3.4 m/s(金, 1992)로 하였다. 水營江 流出量은 부산시(1984)의 조사결과에 의해 平水量은 4.0 m³/s로 하였고, 50년 빈도의 設計洪水量은 1,130 m³/s로 하였다. 洪水時의 流量은 Fig. 6에 나타낸 Nakayas의 流量圖에 따라 식 (18)~(21)과 같이 주었다.

상승곡선

$$0 < t < t_p = 6 \text{ hours: } \frac{Q}{Q_p} = \left(\frac{t}{t_p}\right)^{2.4} \quad (18)$$

하강곡선

$$t_p < t \leq t_k \quad (1.0 > \frac{Q}{Q_p} \geq 0.3): \quad \frac{Q}{Q_p} = 0.3^{(t-t_p)/t_k} \quad (19)$$

$$t_k < t \leq 1.5t_k \quad (0.3 > \frac{Q}{Q_p} \geq 0.3^2): \quad \frac{Q}{Q_p} = 0.3^{(t-t_p+0.5t_k)/1.5t_k} \quad (20)$$

$$1.5t_k < t \quad (0.3^2 > \frac{Q}{Q_p}): \quad \frac{Q}{Q_p} = 0.3^{(t-t_p+1.5t_k)/2t_k} \quad (21)$$

여기서, t =시간, t_p =Peak 도달시간, Q =순간유량(m^3/s), Q_p =첨두유량(m^3/s), t_k =Peak 후 최대유량의 1/3에 도달할 때까지의 시간이다. 平水時의 유량은 전 계산시간을 통해 $4.0 m^3/s$ 로 일정하게 주었다. 洪水時의 유량은 Fig. 6과 같은 형태로 고조시를 시점으로 하여 25시간 주었으며, 最大流量은 저조시에 발생하도록 하였다.

육지 폐경계에서 법선방향 유속은 없는 것으로 하였고, 외해 개경계에서의 경계조건은 부산시(1984)가 冬柏섬 西岸(북위 $35^\circ 09' 06''$, 동경 $129^\circ 09' 09''$)에서 潮汐을 관측하여 調和分解한 결과인 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 분조의 조화상수를 다음과 같이 합성한 조위로 주었다.

$$\begin{aligned} \zeta(t) = & 0.341 \cos\left(\frac{2\pi}{12.42 \times 3600} n \frac{\Delta t}{2} - 231.5^\circ \frac{\pi}{180}\right) + \\ & 0.160 \cos\left(\frac{2\pi}{12.0 \times 3600} n \frac{\Delta t}{2} - 256.2^\circ \frac{\pi}{180}\right) + \\ & 0.047 \cos\left(\frac{2\pi}{13.93 \times 3600} n \frac{\Delta t}{2} - 123.5^\circ \frac{\pi}{180}\right) + \\ & 0.022 \cos\left(\frac{2\pi}{25.82 \times 3600} n \frac{\Delta t}{2} - 90.8^\circ \frac{\pi}{180}\right) \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, $\zeta(t)$ =외해 개경계에서 진폭(m), Δt =시간 간격(sec), n =계산반복횟수이다. 계산시간간격은 $\Delta t=15$ 초, 수평격자간격은 $\Delta x=\Delta y=150$ m, 연직 방향은 4층으로 분할하였으며, 총 격자점수는 $43 \times 41 \times 4=7052$ 개이다. 염분의 수평 및 연직분포는 金과 李(1992)의 현지관측결과를 초기염분분포로 하여 담·염수의 이류-확산방정식으로 계산하였으며, 密

Table 2. Computational conditions of flow field.

Parameters	Values
Horizontal grid interval	$\Delta x = \Delta y = 150$ m
Time interval	$\Delta t = 15$ sec
Vertical grid interval	Level 1: 2 m(0~2 m) Level 2: 3 m(2~5 m) Level 3: 4 m(5~9 m) Level 4: below 9 m
Horizontal eddy viscosity coefficient	$A_h (= \epsilon_x = \epsilon_y) = 10$ m ² /s
Internal friction coefficient	$\gamma_i^2 = 0.001$
Bottom friction coefficient	$\gamma_b^2 = 0.0026$
Fresh water density	$\rho_f = 0.999$
Salinity concentration in open boundary	33.0‰
Initial salinity concentration	Interpolated from observed salinity
Coriolis parameter	$f = 8.37 \times 10^{-5}$
Wind direction	NE, NW, SW
Wind speed	3.4 m/s
Normal discharge of the Suyoung River	4.0 m ³ /s
Design flood discharge with 50 years return period of the Suyoung River	1.130 m ³ /s

도 ρ 는 수온차가 적은 경우 鹽分 S 만 고려하기 위해 柳와 磯邊(1987)이 제안한 다음과 같은 선형방정식을 사용하여 결정하였다.

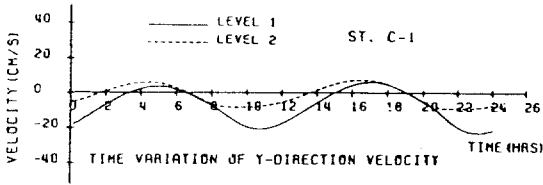
$$\rho = \rho_f (1 + 0.000757 S) \quad (23)$$

여기서, ρ_f 는 담수의 밀도이다. 水平渦動粘性係數는 유속관측결과로부터 구한 水營灣 중앙부의 대표적인 Eulerian 擴散係數라 할 수 있는 10 m²/s(金과 李, 1992)를 사용하였다. 海水流動 數值計算에 사용된 計算條件 및 諸 係數들의 값은 Table 2와 같다.

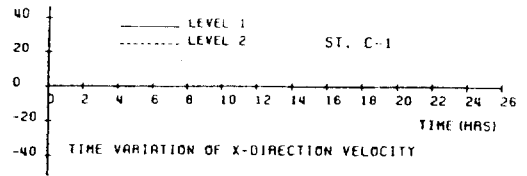
2. 結果 및 考察

2.1 平水時 流動特性

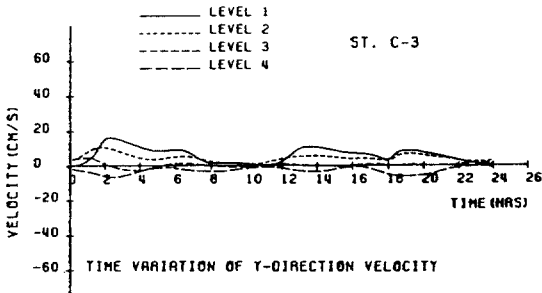
3차원 海水流動 모델 BACHOM-3의 現地 適用性和 수영만의 유동특성을 조사하기 위해 大潮期 平水時 水營灣의 海水流動을 재현하였다. 총 계산시간은 37.5시간이며, 수치적 안정해를 얻기 위해 처음 12.5시간에 대한 성분은 버리고, 거의 안정상태에 도달한 나머지 25시간 성분을 취하였다. 37.5시간을 계산하는데 20 MHz 연산속도를 갖는 80386 PC로 LAHEY FORTRAN을 사용하여 약 13.5시간



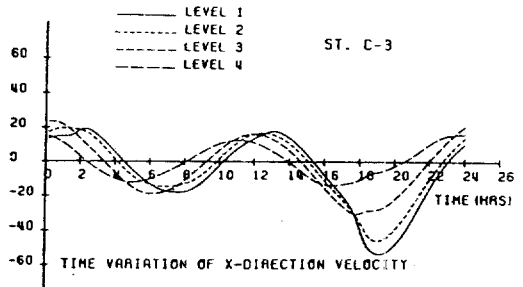
(a) Y-direction component at St. C-1



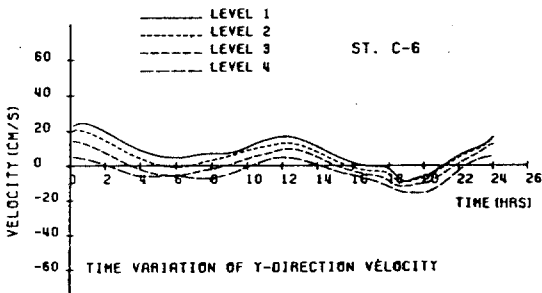
(b) X-direction component at St. C-1



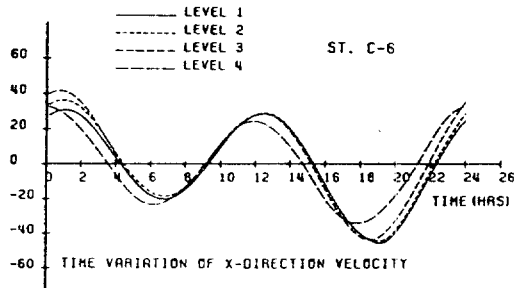
(c) Y-direction component at St. C-3



(d) X-direction component at St. C-3



(e) Y-direction component at St. C-6



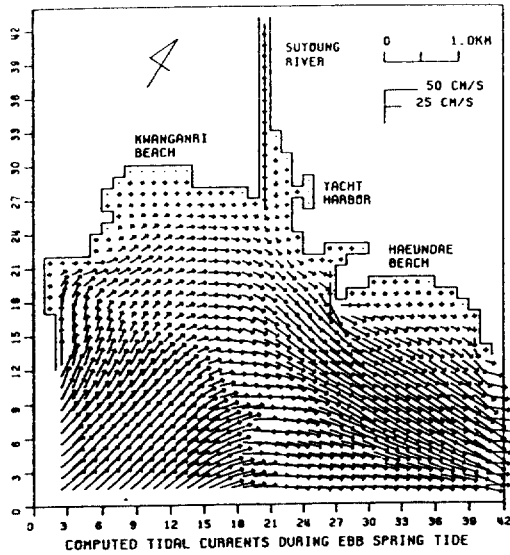
(f) X-direction component at St. C-6

Fig. 7. Time variations of computed tidal current velocities with no wind during spring tide at normal river flow.

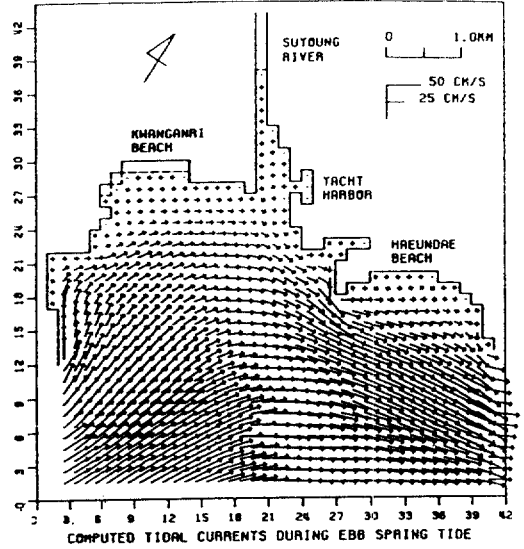
소요되었다. 水營江의 平水量을 고려했을 시 各層 別로 流速의 時間的인 變動特性을 알아보기 위해 Fig. 5의 St. C-1, C-3, C-6에서 계산된 결과를 Fig. 7의 (a)~(f)에 나타냈다. Fig. 7의 (a), (c), (e)는 각각 St. C-1, C-3, C-6에서의 y방향(종축) 유속성분을 나타내고, (b), (d), (f)는 x방향(횡축) 유속성분을 나타낸다. St. C-1의 제 1층에서 +유속보다는 -유속이 훨씬 강하고, 제 2층에서는 +유속과 -유속이 주기적으로 거의 같게 나타났다. 이것은 水營江 流出水의 영향에 의해 제 1층에서는 落潮流時가 漲潮流時보다 유속이 훨씬 강하고, 제 2층에서는 流出水의 영향을 거의 받지 않기 때문에 漲潮流時와 落潮流時의 유

속이 거의 같은 것으로 생각된다. 그리고, St. C-1에서 x방향의 유속은 없는 것으로 나타났다. St. C-3와 C-6에서 x, y방향의 유속은 표층에서 저층으로 갈수록 감소하는 현상이 뚜렷하게 나타났다. 흐름의 주성분인 x방향 유속분포에 의하면, 표층과 저층 사이에 유속의 위상차가 나타나며, 저층으로 갈수록 위상이 빠르게 나타났다. 이것은 표층에서는 慣性力이 크게 작용하고, 저층으로 갈수록 底面摩擦力이 크게 작용하여 저층이 표층보다 빨리 전류하기 때문인 것으로 생각된다.

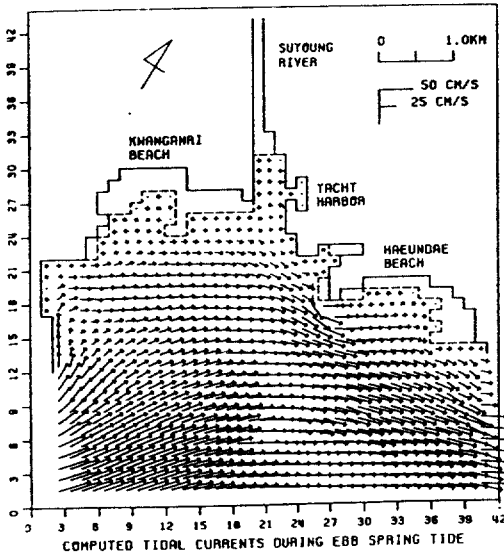
平水時 水營江의 流動場을 각 층별로 Fig. 8~9에 나타냈다. Fig. 8은 落潮流時의 流況이고, Fig. 9는



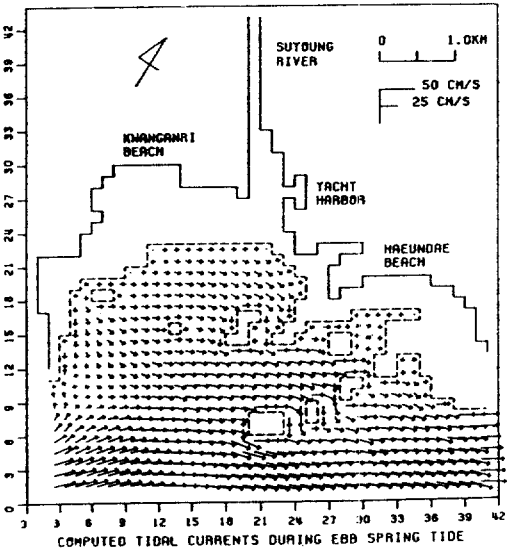
(a) Level 1



(b) Level 2



(c) Level 3

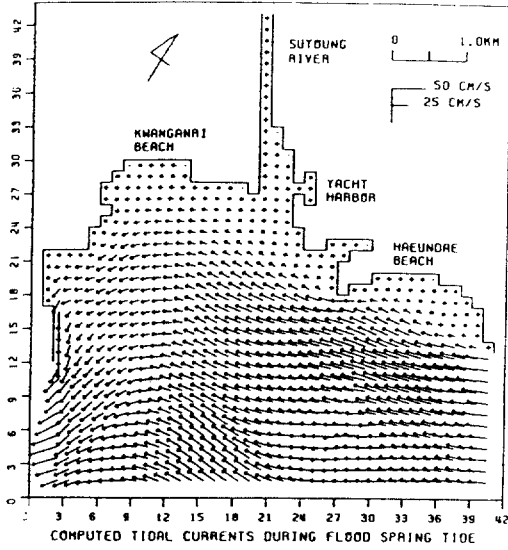


(d) Level 4

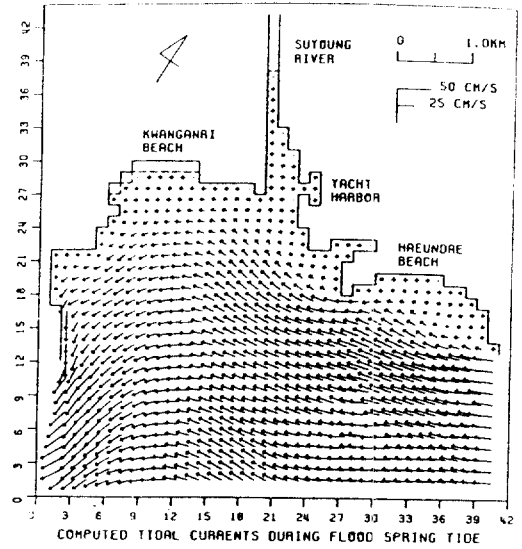
Fig. 8. Computed velocity fields with no wind during the ebb flow of spring tide at normal river flow.

漲潮流時의 流況이다. 전반적으로, 落潮流가 漲潮流時보다 유속이 강하며, 이와 같은 결과는 金과 李(1992)의 현지관측에서도 나타났다. 제 1층과 제 2층에서의 流況은 서로 비슷하게 나타났으나, 제 3층에서 제 4층으로 갈수록 유속이 현저하게 감소하였다. 특히, 제 4층의 육지경계부근의 流況은 제 1층과 뚜렷한 차이를 보여주고 있다. 그리고, 平水時 水營灣

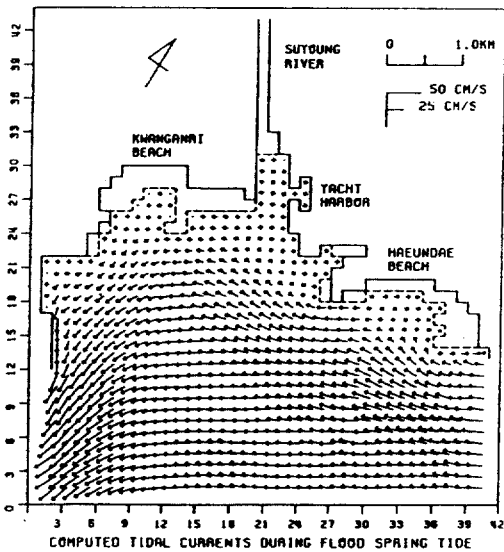
의 潮汐殘差流를 Fig. 10의 (a)~(d)에 나타냈다. 제 1층과 제 2층의 만 중앙부에서 조석잔차류는 시계방향으로 회전하는 循環流가 나타났으며, 이 결과는 金과 李(1992)가 수심 5 m에서 관측한 조류타원의 회전방향과 거의 동일하다. 제 3층에서는 灣의 하단부근에서 반시계방향의 약한 環境流가 일어났고, 제 4층에서 조석잔차류는 제 1층과 상반되게 灣의 외



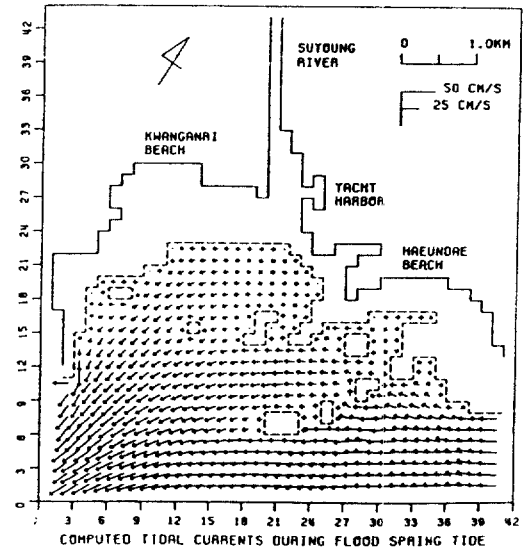
(a) Level 1



(b) Level 2



(c) Level 3



(d) Level 4

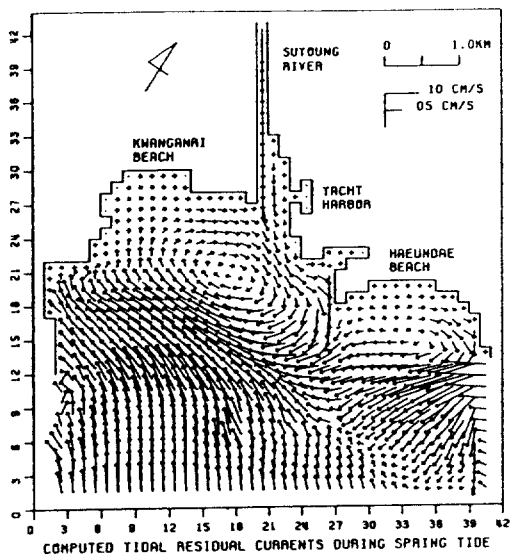
Fig. 9. Computed velocity fields with no wind during the flood flow of spring tide at normal river flow.

부로 流出되는 양상을 보여주고 있다. 이와 같이 표층과 저층의 流況이 상반되게 나타나는 것은 육지경계의 존재로 인한 質量收支의 원리로서 3차원적 流動特性을 잘 나타내고 있다.

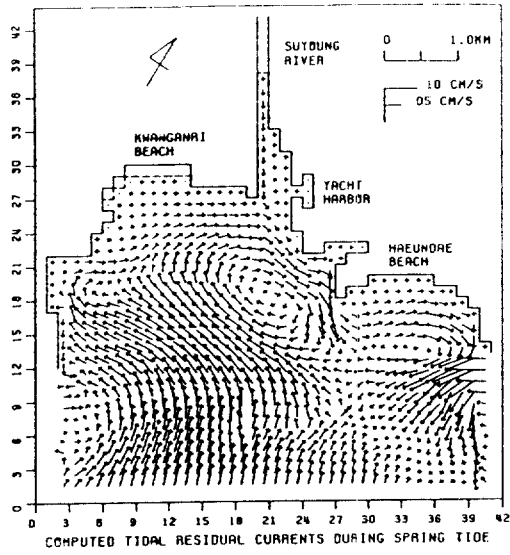
2.2 現地觀測結果와 比較

본 모델(BACHOM-3)의 現地 適用性を 검토하기 위해 大潮期 水營江 平水量을 고려하여 계산한 항

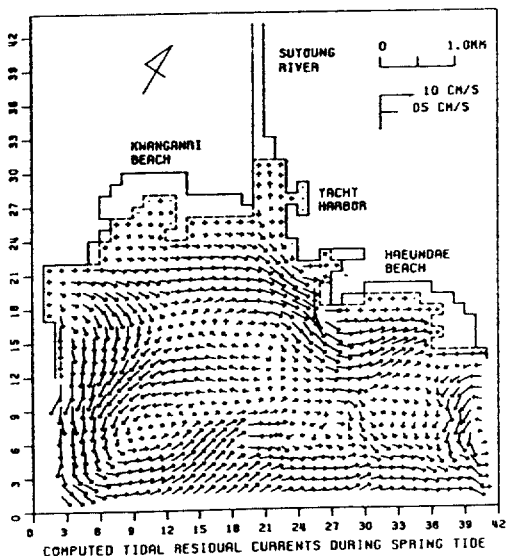
류와 수심 5 m(모델에서는 제 2층에 해당)에서 관측한 항류(金과 李, 1992)를 Fig. 11에 나타냈다. 대체적으로, 觀測된 結果와 計算된 結果가 서로 비슷하게 나타났으며, 특히 제 1층에서 계산된 결과는 관측결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 부산 요트센터 上流附近的 St. C-1에서는 수심 0.3 m에서의 관측치이기 때문에 제 1층에서의 결과만



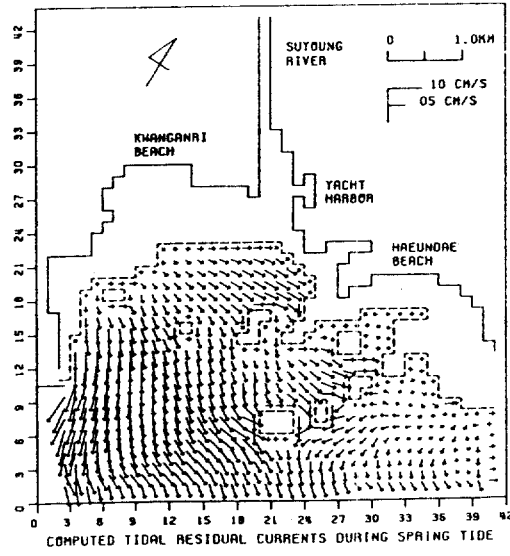
(a) Level 1



(b) Level 2



(c) Level 3



(d) Level 4

Fig. 10. Computed tidal residual currents with no wind during spring tide at normal river flow.

비교하였다. 現地觀測結果와 數值計算結果에 의하면 水營灣 중앙부와 외해부근의 恒流 방향은 대체적으로 N~WNW 방향이고, 그 크기는 약 4~14 cm/s 이다.

St. C-2의 제1층, 제2층 및 제3층에서 계산치의 조화분해 결과와 金과 李(1922)가 St. C-2의 표층, 중층 및 저층에서의 관측한 조화분해 결과를 비교

하기 위해 조류타원의 장축의 진폭과 방향을 Table 3에 나타냈다. Table 3에서 조류타원의 방향은 거의 일치하는 것으로 나타났으나, 半日周潮 成分과 日周潮 成分을 합성한 유속의 진폭은 관측치가 계산치보다 약간 크게 나타났다. 이것은 계산결과에는 조석과 밀도류 효과만 고려되었으나, 현지관측 결과는 海水流動에 영향을 미치는 바람 등의 효과를

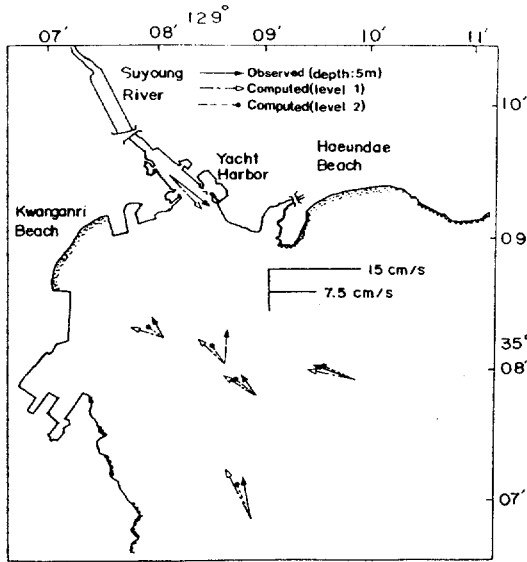


Fig. 11. Comparison of computed tidal residual currents (dotted lines) and observed residual currents (solid lines).

포함하고 있기 때문에 관측결과와 계산결과가 다소 차이를 나타내고 있는 것으로 생각된다. 이상과 같이大潮期 平水時 數値計算結果와 觀測結果와의 비교로부터 모델의 現地 適用性을 검토한 결과 본 연구에서 개발된 모델 BACHOM-3은 現地流動을 비

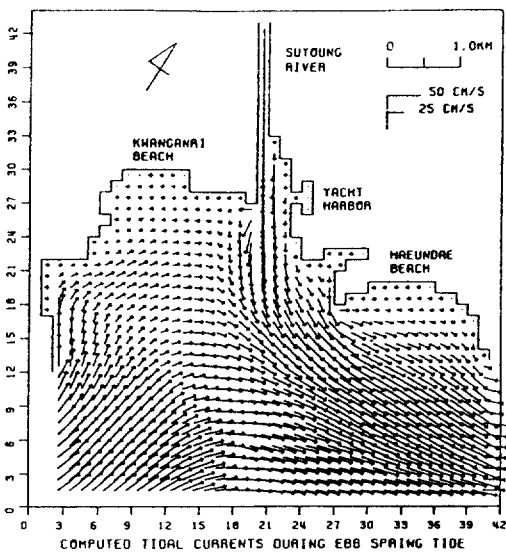
Table 3. Comparison of amplitudes and directions for long axis of computed and observed tidal current ellipses.

Classification	Tidal	Position	Amplitude (cm/s)	Direction
Computed results	Semi-diurnal	Level 1	15.2	N58°E-S58°W
		Level 2	14.3	N55°E-S55°W
		Level 3	13.2	N47°E-S47°W
		Level 4	7.9	N45°E-S45°W
	Diurnal	Level 1	7.9	N60°E-S60°W
		Level 2	5.6	N55°E-S55°W
		Level 3	4.8	N53°E-S53°W
		Level 4	3.0	N55°E-S55°W
Observed results	Semi-diurnal	Surface	19.4	N55°E-S55°W
		Middle	17.0	N53°E-S53°W
		Bottom	11.9	N58°E-S58°W
	Diurnal	Surface	6.0	N62°E-S52°W
		Middle	5.5	N73°E-S73°W
		Bottom	3.8	N73°E-S73°W

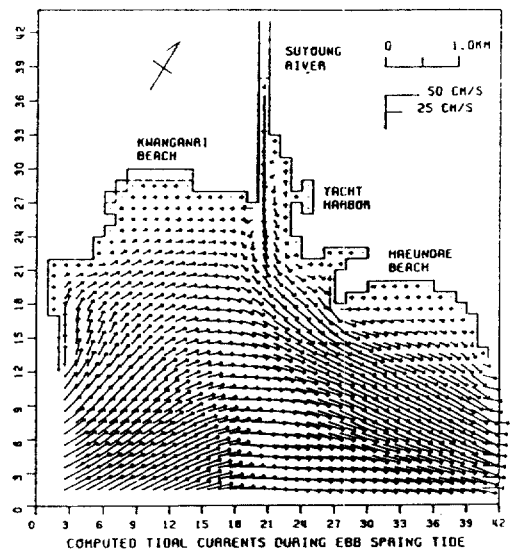
교적 잘 재현하는 것으로 생각된다.

2.3 洪水時 流動特性

洪水時 水營江 유출량이 水營灣의 海水流動에 미치는 영향을 조사하기 위해 洪水時 水營灣의 流動場을 수치실험하였으며, 落潮流時(流出 3시간 후)의 流況을 각 층별로 Fig. 12에 나타냈다. 제 1층과 제 2층에서 水營江河口域의 최대유속은 각각 약 2.2 m/s.

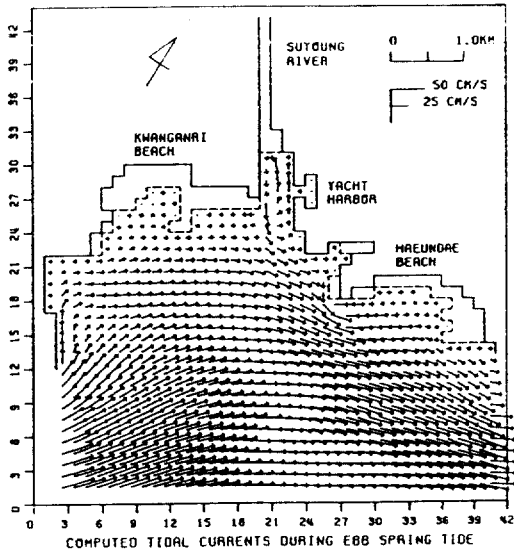


(a) Level 1

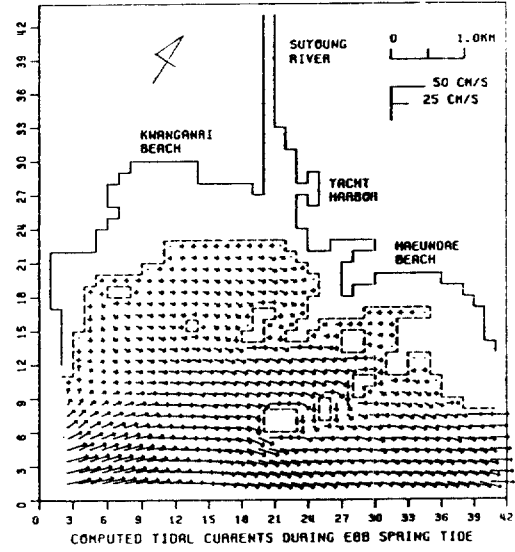


(b) Level 2

Fig. 12. Computed velocity fields with no wind during the ebb flow of spring tide at flood river flow.



(c) Level 3



(d) Level 4

Fig. 12. Continued

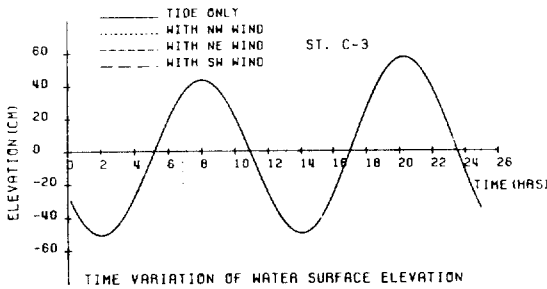


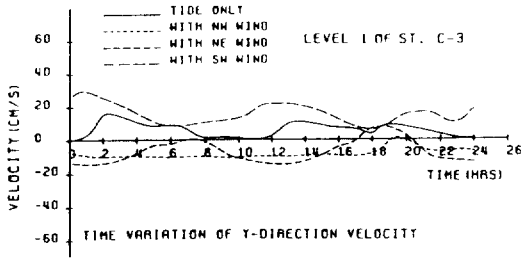
Fig. 13. Time variations of computed water surface elevation at St. C-3 during spring tide at normal river flow.

0.7 m/s이며, 제 1층에서 洪水時 유속은 平水時의 약 10배 크기이다. 洪水量이 水營灣의 해수유동에 미치는 영향은 대단히 크며, 제 1층과 제 2층에서 유출수는 潮時에 관계없이 河川噴流의 형태로 그 영향이 의해 개경계까지 나타났으나, 저층에서 갈수록 홍수량이 만내의 해수유동에 미치는 영향은 점차 감소하였다.

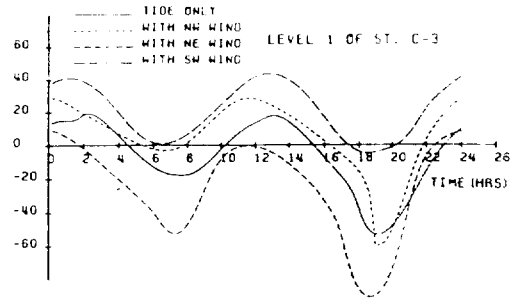
2.4 바람효과를 고려한 流動特性

바람이 水營灣의 海水流動에 미치는 영향을 조사하기 위해 부산지방의 탁월풍인 NE, NW 및 SW 방향에 대해서 풍속 3.4 m/s를 37.5시간 연속적으로 작용시켜 수치실험하였다. 이 때 水營江 流出量은

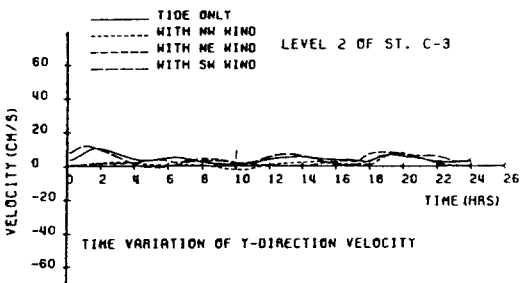
平水量을 사용하였다. Fig. 5의 St. C-3에서 바람효과를 고려했을 경우와 안했을 경우에 계산된 水位의 시간적 변화를 Fig. 13에 나타냈다. 風速이 3.4 m/s 작용할 때 바람이 수위에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았다. 바람이 流速에 미치는 영향을 알아보기 위해 St. C-3의 각 층에서 계산된 y 방향(종축)의 유속과 x 방향(횡축)의 유속의 시간적 變動特性을 Fig. 14에 나타냈다. 흐름의 주 성분인 x 방향의 유속분포는 제 1층과 제 2층에서는 風向에 대응하는 流速分布를 나타냈으나, 저층으로 갈수록 바람의 影響이 감소되어 제 4층에서는 바람의 영향이 아주 미소하게 작용하는 것으로 나타났다. y 방향의 유속도 표층에서는 풍향에 대응하는 유속분포를 나타냈으나, 저층으로 갈수록 바람의 효과가 감소하였다. 海洋에서 陸地로 바람(SW 바람)이 불 때 계산된 유동장을 Fig. 15에 나타냈다. 이 때 표층에서는 풍향에 대응하는 유속분포를 나타냈으나, 저층의 육지경계부근에서는 풍향과 반대방향의 유속이 나타났다. 이것은 바람에 의한 質量輸送에 대한 보상류로서 沿岸域에서의 吹送流의 특성을 잘 나타내고 있다. 이상의 연구결과에 의하면 제 1층에서의 海水流動은 바람의 영향을 크게 받는 것으로 나타났으나, 저층으로 갈수록 바람의 영향이 감소하다가 제 4층에서는 바람의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나



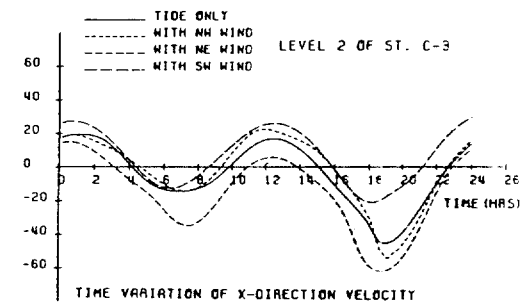
(a) Y-direction component at level 1



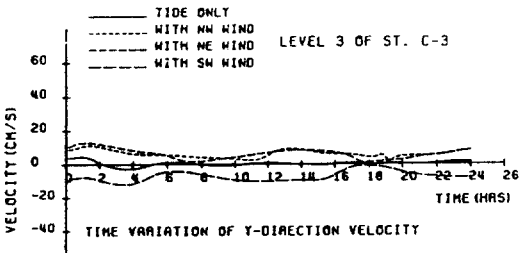
(b) X-direction component at level 1



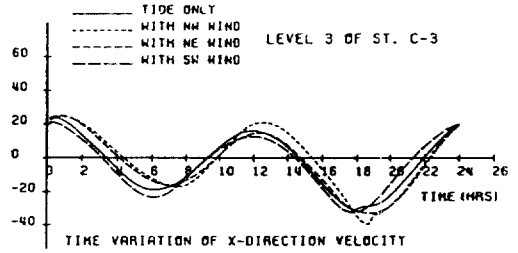
(c) Y-direction component at level 2



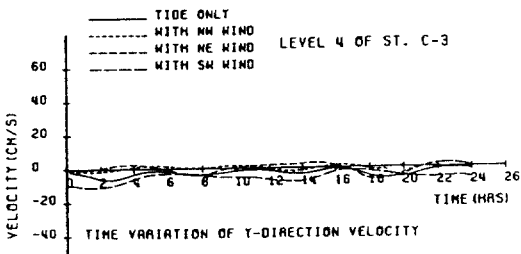
(d) X-direction component at level 2



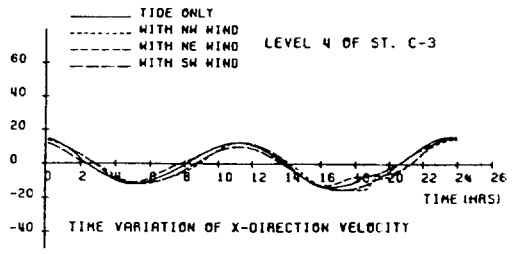
(e) Y-direction component at level 3



(f) X-direction component at level 3



(g) Y-direction component at level 4



(h) X-direction component at level 4

Fig. 14. Time variations of computed velocities at St. C-3 during spring tide at normal river flow.

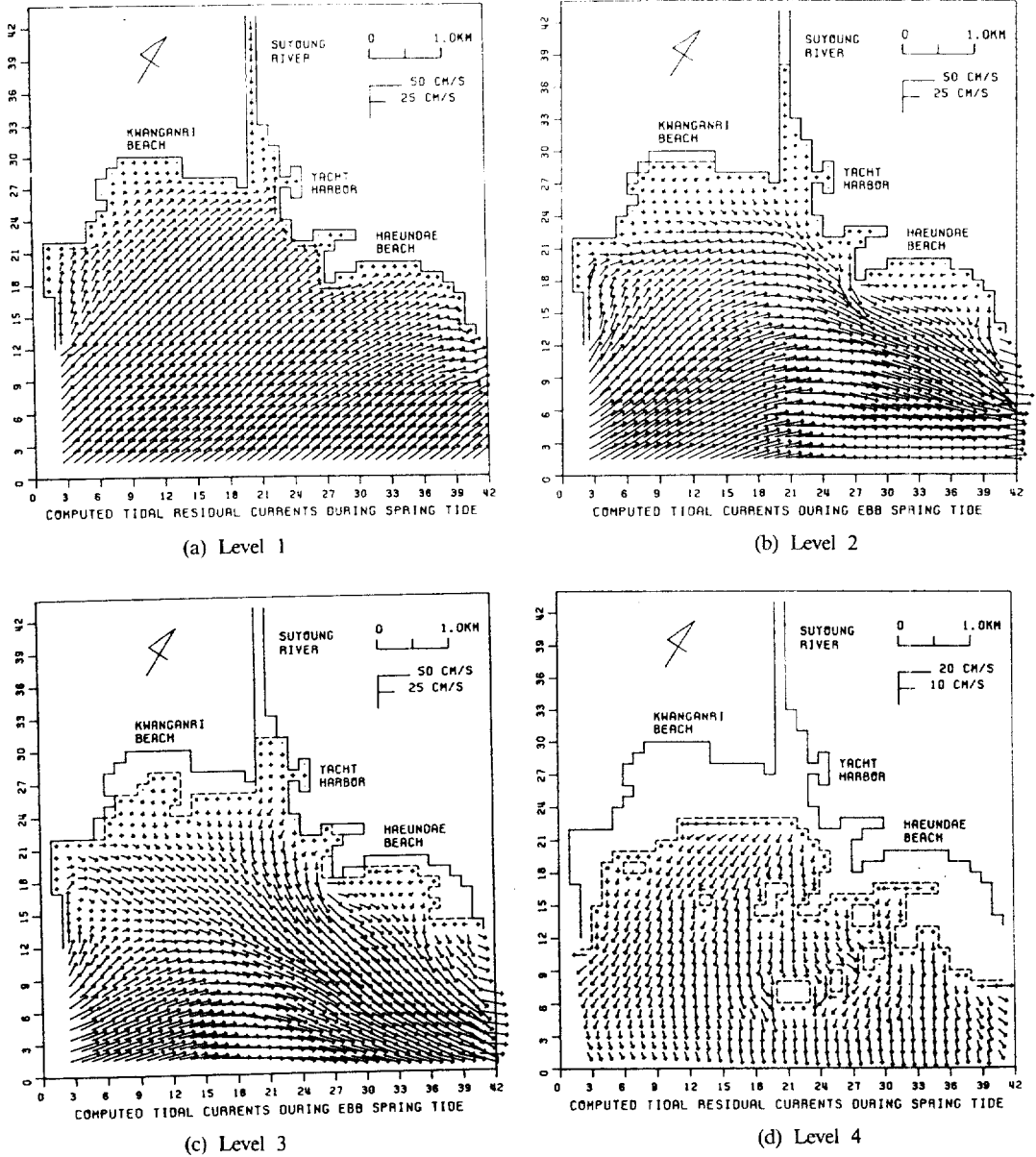


Fig. 15. Computed velocity fields with SW wind during the ebb flow of spring tide at normal river flow.

타났다.

要約 및 結論

3차원 傾壓 海水流動 모델 BACHOM-3을 개발하여 장방형 내만에서 하나의 절점을 갖는 정상과에 적용하여 해석해와 비교하였으며, 그 결과 解析解와

잘 일치하였다. 모델의 現地 適用性을 검토하기 위해 모델을 水營灣에 적용하여 大潮期 平水時 計算된 恒流 및 潮流橢圓을 觀測된 恒流 및 潮流橢圓과 비교하였다. 수심 5m(모델에서는 제 2층에 해당)에서 관측된 항류는 제 1층에서 계산된 항류와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 層別 調和分解 결과에 의하면, 조류타원의 방향은 거의 일치하는 것으로

나타났으나, 반일주조 성분과 일주조 성분을 합성한 유속의 진폭은 관측치가 계산치보다 약간 크게 나타났다. 만 중앙부의 제 1층(수심 0~2 m)과 제 2층(수심 2~5 m)에서 조석 잔차류는 시계방향으로 회전하는 순환류가 나타났으며, 이와 같은 현상은現地觀測에서도 나타났다. 계산된 층별 유속분포에 의하면, 표층과 저층 사이에流速의 위상차가 나타났으며, 저층으로 갈수록 관성력보다는 저면마찰력이 크게 작용함으로써 위상이 빠르게 나타났다. 본 모델은 홍수시와 바람효과를 고려한 흐름장의 계산에도 적용되었다. 海洋에서 陸地로 바람이 불 때 표층에서는 풍향에 대응하는 유속분포를 나타냈으나, 저층의 육지경계부근에서는 풍향과 반대방향의 유속분포를 나타냄으로써 이론적인 취송류 현상을 잘 재현하였다. 본 모델은 20 MHZ의 연산속도를 갖는 80386 PC에서 효과적으로 수행되었으며, 또한 조석 및 조류의 수치적 안정해를 얻는데 요구되는 수렴시간이 약 1조석 주기로 대단히 빠르게 나타났다.

REFERENCE

- 金次謙, 1992. 粘着性土砂의 輸送機構와 3次元 輸送 모델, 부산수산대학교 해양공학과 박사학위논문, 184pp.
- 金次謙, 李宗燮, 1992. 水營灣의 潮流, 鹽分 및 浮游物質의 분포, 한국수신학회지, **25**(5): 359-370.
- 釜山直轄市, 1984. 水營灣 開發地區 數値 吳 水理模型 實驗 報告書, 398pp.
- 堀口孝男, 富田 勇, 堀江 毅, 1977. 三次元モデルによる流れと擴散の數値解法について, 第 24回海岸工學講演會論文集, 443-447.
- 柳哲雄, 磯邊篤彦, 1987. 河口域での懸濁粒子の舉動に関する數値實驗, 沿岸海洋研究ノート, **25**(1): 61-66.
- 藏本 武名, 中田喜三郎, 1991. 東京灣における流動と底層 DO濃度フミュレーション, 沿岸海洋研究ノート, **28**(2): 140-151.
- Large, W. G. and S. Pond, 1981. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**: 324-336.
- Leedertse, J. J., 1970. Water quality model for well-mixed estuary and coastal seas: Vol. I, Principles of computation. *RM-6230-RC*. The Rand Corp., 77pp.
- Leedertse, J. J. and S. K. Liu, 1975. A three-dimensional model for estuaries and coastal seas: Vol. II, Aspects of computation. *R-1764-OWRT*. The Rand Corp., 123 pp.
- Neumann, G. and W. J. Pierson, 1966. Principles of physical oceanography. Printice-Hall Inc.
- Sheng, Y. P., 1983. Mathematical modeling of three-dimensional coastal currents and sediment dispersion: Model development and application. *CERC-83-2*. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.. Also *ARAP Report No. 458*. Princeton, NJ, 288pp.
- Sheng, Y. W., W. Lick, R. I. Gedney and F. N. Molls, 1978. Numerical computation of a free-surface model and a rigid lid model. *J. Phys. Oceanogr.*, **8**: 713-827.

Accepted March 31, 1993