

## X-Y 數值模型에 의한 河口의 鹽度擴散 分析 Analysis of Salinity Dispersion in Estuaries by an X-Y Numerical Model

姜周煥\* · 李吉成\*

Ju Whan Kang\* and Kil Seong Lee\*

**要 旨** : 座標變換된 깊이方向 平均 X-Y 數值模型을 樹立하여 河口에서 鹽度擴散을 分析하였다. 潮間帶의 數值的 模擬, 殘差流, 閉境界條件 等이 檢討되었으며, 특히 支配方程式 中 擴散項의 처리에 時間分割方法(fractional step method)을 利用하여 數值解의 安定性 및 簡便性을 圖謀하였다. 開發된 模型을 錦江河口에 實際 適用하여 流速場과 鹽度場을 滿足스럽게 再現시켰으며 流速場에 따른 擴散係數 算定에 대해서도 研究하였다.

**Abstract** □ A depth-averaged X-Y numerical model with transformed coordinates is developed to analyze the salinity dispersion in estuaries. Simulation of intertidal zones, residual current and closed boundary condition are examined. Especially, the improvements in stability and accuracy of the numerical algorithm are made by adopting fractional step method for the dispersion term of the governing equation. The model being applied to the Keum River Estuary, velocity fields and salinity fields are reproduced satisfactorily and the estimation of the dispersion coefficient with respect to the flow field is also studied.

### 1. 序 論

最近 人間文明이 急速히 發達함에 따라 自淨能力을 超過하는 汚染物質이 河口로 흘러들어 生態界 破壞가 加速化되고 있으며, 河口堰을 비롯한 人工構造物에 의해 急速한 自然環境의 變形이 이루어져 豫測치 못한 被害가 頻繁히 發生하고 있는 實情이다. 本 研究은 河口環境과 密接한 關係가 있는 流況 및 鹽度擴散에 關한 日련의 研究成果 中 하나로서 先行研究(姜·李, 1991)에서는 側方向 平均한 X-Z模型을 통해 우리나라 西海岸과 같이 강한 潮汐力이 작용하는 곳에서는 깊이方向 平均한 X-Y模型이 適切함을 提示한 바 있다. X-Z模型에서 얻어진 各種 情報를 X-Y模型에 反映함과 동시에 X-Z模型의 欠點을 보완하여 河口環境의 3차원적 分析이 一連의 研究의 目的이다. 특히 本 X-Y模型에서는 流速場의 再現에 主안점을 두어 潮間帶의 模擬와 循環現狀에 따른 흐름擴散係數(longitudinal dispersion coeff.) 算定 等에 關해 主로 研究하

였다.

이러한 水平 2차원 研究時 ADI(Alternating Direction Implicit) 數值解析技法은 80년대 이후 널리 쓰이고 있으나 最近에는 時間 格子間隔을 큰 값으로 택할 수 있다는 長點을 갖는 ADI 方法도 限界가 있음이 드러나고 있는 實情이다. 즉 Weare(1979)는 불규칙한 境界面에서 Courant數가 큰 境遇 ADI方法이 精確치 못한 結果를 보일 수 있음을 解析적으로 밝힌 바 있고 Benqué *et al.*(1982)도 直四角形 水路에서 S字形으로 周邊보다 水深이 깊은 지역이 있는 假想的인 境遇의 數值解析에서 Courant數가 큰 境遇 流向이 S字形과 無關하게 되고 그 크기도 주변에 비해 작게 되는 등 問題가 있음을 지적한 바 있으며 Stelling *et al.*(1986)도 階段形의 水路에서 Courant數가 클 때 ADI方法을 사용할 경우 每時間段階에서 x, y 各 方向으로만 波의 傳達이 이루어진다는 短點이 있다는 소위 ADI效果에 대해 밝힌 바 있다.

Wilders *et al.*(1988)은 이러한 세 가지 問題점을

\*서울大學校 土木工學科(Department of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea)

재검토한 후 ADI방법의限界를 克服할 수 있는 方法의 하나로 2次元 陰解法인 CGS(Conjugate Gradient Squared)方法을 제안하였으나 이는 三重對角(tridiagonal)行列式을 푸는 ADI方法에 비해 對角要素 주위에 零이 아닌 項이 많게 되므로 行列式을 푸는데 많은 시간을 할애해야 한다는 단점이 남아 있다. ADI方法의 단점, 특히 Weare(1979)가 지적한 단점과 Stelling *et al.*(1986)이 지적한 단점을 해결할 수 있는 또하나의 方法으로 ADI方法을 쓰되 支配方程式을 對象河口에 대한 境界座標系로 變換시키는 方法이 있다. 불규칙한 영역에 대한 直角座標系에서 座標變換을 통해 直四角形 領域으로 變換시킴으로써 이러한 短點을 克服할 수 있게 된다.

潮間帶 현상의 數值的 模擬는 固定格子를 이용하는 경우 상당히 많은 研究가 이루어져 왔다. X-Y模型에서 水面變位와 水深이 동일한 座標上에서 정의되지 않으므로 최근 Stelling *et al.*(1986)은 總水深(=水面變位+水深)을 세 가지 方法으로 산정하여 각 方法의 特性과 長短點을 밝히고 이에 따라 數值解가 적지 않은 영향을 받게 됨을 지적한 바 있다. 또한 Falconer and Owens(1987)는 潮間帶의 부적절한 數值的 模擬에 의해 移動境界 부근에서 발생할 수 있는 非現實的인 攪亂波를 제거하기 위해 任意的 格子가 水面上昇에 의해 解析對象에서 除外되는 순간 水深平均流速에서 발생할 수 있는 불연속의 강도를 경감시킴으로써 이를 해결한 바 있다.

本 研究에서는 座標變換을 통한 可變格子를 사용하므로 이와 같은 固定格子網에서의 方法을 직접 적용하는 것은 불가능하므로 새로운 方法을 開發하여 可變格子 시스템에서의 潮間帶 模擬에 이용하였다.

## 2. 數學的 模型의 構成

### 2.1 支配方程式

X-Y模型에 관한 支配方程式은 3차원模型의 支配方程式인 Reynolds式과 移流擴散式에서 鉛直方向의 速度와 加速度가 무시할 수 있을 만큼 작다는 假定下에 連續方程式, 평면상의 x, y方向 運動量方程式, 그리고 質量傳達式을 깊이方向으로 積分하여 水深에 따라 변하는 제반 값들을 水深平均한 값으로 代替함으로써 다음 式 (1)과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial[(\eta+h)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(\eta+h)v]}{\partial y} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon_x \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{gn^2 u(u^2 + v^2)^{1/2}}{(\eta+h)^{4/3}} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \varepsilon_y \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{gn^2 v(u^2 + v^2)^{1/2}}{(\eta+h)^{4/3}} \quad (1c)$$

$$\frac{\partial(HS)}{\partial t} + \frac{\partial(HuS)}{\partial x} + \frac{\partial(HvS)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( HK_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( HK_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) \quad (1d)$$

여기서 t는 時間,  $\eta$ 는 平均水面으로부터의 水面變位, h는 平均水深, u, v는 x, y方向 流速,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ 는 有效粘性係數, g는 重力加速度, n은 Manning 係數, H (=  $\eta+h$ )는 總水深, S는 鹽度,  $K_x$ ,  $K_y$ 는 흐름擴散係數이다. 특히 上記 運動量方程式의 誘導에서 鹽度傾斜項, Coriolis項과 水面摩擦項은 생략되었다.

### 2.2 座標變換

境界座標系로의 座標變換은 크게 세 가지, 즉 複素函數를 사용하는 方法, 微分方程式을 사용하는 方法과 代數的인 方法 등으로 나눌 수 있다. 특히 水平面상에서 座標變換을 하는 方法은 微分方程式을 사용하는 方法이 주종을 이루어 왔다. 그러나 이 方法은 境界가 시간에 따라 변화하지 않는다는 假定을 內包하고 있어 本 研究에서와 같이 潮間帶의 數值的 模擬가 並行될 때는 그 한계가 있다. 그래서 本 研究에서는 代數的인 方法(Boericke and Hall, 1974; Perrels and Karelse, 1982)을 이용해 座標變換을 하였으며 이에 따른 境界處理 및 潮間帶의 模擬에 主眼點을 두었다.

Fig. 1(a)와 같은 任意的 形상을 갖는 河口에서 淺水方程式을 直角座標系의 格子網에서 ADI 方法으로 差分化하여 解를 구하게 되면 序數에 기술한 ADI效果와 같은 문제점이 발생하게 된다. 그러나 Fig. 1(b)

와 같은 직교형상으로 座標變換하여 이 座標界에서 數值解析을 施行하면 그러한 문제점은 다소 극복될 수 있다. 또한 이렇게 함으로써 주된 흐름方向과 差分方向이 거의 일치하므로 x, y 각 方向으로만 波의 전달이 이루어지는 ADI 방법의 특성에 비추어 數值解의 正確性 및 安定性에도 기여할 수 있을 것이다.

즉, (x, y; t)座標에서 (x, q; t)座標로 獨立變數로 變換시키면 一般的인 從屬變數  $f_n(x, y; t)$ 는 座標變換 後의 從屬變數  $F_n(x, q; t)$ 로 다음과 같이 變換시킬 수 있다.

$$f_n(x, y; t) \rightarrow F_n(x, q; t) \tag{2a}$$

$$\frac{\partial f_n}{\partial t} = \frac{\partial F_n}{\partial t} + \frac{\partial F_n}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial t} \tag{2b}$$

$$\frac{\partial f_n}{\partial x} = \frac{\partial F_n}{\partial x} + \frac{\partial F_n}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial x} \tag{2c}$$

$$\frac{\partial f_n}{\partial y} = \frac{\partial F_n}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial y} \tag{2d}$$

여기서 q는 無次元化된 幅으로 다음과 같이 정의된다.

1) 潮間帶가 없을 경우

$$q = \frac{y - y_R}{y_L - y_R}$$

2) 潮間帶가 존재할 경우

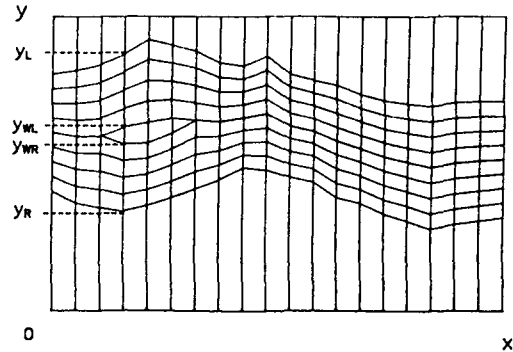
· 潮間帶 아래쪽

$$q = \frac{y - y_R}{y_L - y_R + y_{WR} - y_{WL}}$$

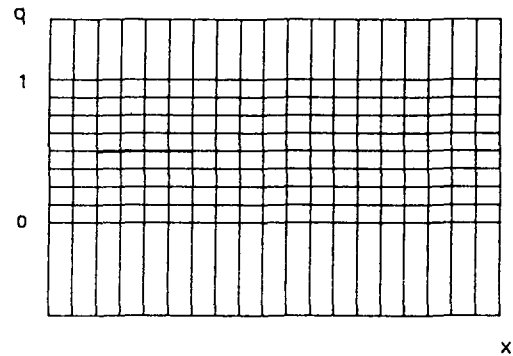
· 潮間帶 위쪽

$$q = \frac{y - y_R + y_{WR} - y_{WL}}{y_L - y_R + y_{WR} - y_{WL}}$$

여기서  $y_R$ 은 陽(+)의 x축 方向을 향하여 右側 閉境界,  $y_L$ 은 左側 閉境界,  $y_{WR}$ ,  $y_{WL}$ 은 定義領域 내부에 형성되는 潮間帶에 의한 閉境界를 말한다. Fig. 1(a)와 같이 潮間帶가 존재할 경우 이것은 Fig. 1(b)와 같이 두께가 없는 하나의 壁면으로 變換되는데 이 壁면은 落潮가 지속되어 潮間帶가 커지게 되면 x方向으로 그



(a) Physical Domain



(b) Computational Domain

Fig. 1. Coordinate transformation

길이만 늘어나게 된다.

이러한 방법으로 座標界를 變換시키면 潮間帶의 처리가 단순해지고 閉境界의 위치를 보다 正確히 예측할 수 있게 되며 그 형상이 平滑(smooth)하게 된다. 특히 一般河道에서와 같이 대상영역의 형상이 흐름 方向의 길이에 비해 幅이 좁고 境界가 복잡한 경우 이러한 座標變換을 통해 ADI 효과를 억제할 수 있을 뿐 아니라 境界에서 발생하는 문제점을 극소화시킬 수 있으며, 모든 斷面에서 側方向으로 동일한 格子 개수를 사용하므로 특히 幅이 좁아지는 곳에서의 數值計算에 長點이 있다. 그러나 支配方程式의 差分形態가 다소 복잡해지고 水深을 每時間段階마다 計算하게 되므로 計算時間이 더 所要되고 曲率半徑이 상당히 큰 경우에는 적용에 制約이 있게 된다.

變換式 (2)와 같은 방법으로 支配方程式 (1)에 대한 座標變換을 수행하면 다음의 變換된 方程式 (3)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial q} + \frac{\partial}{\partial x} \{(\eta + h)u\} + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial q} \{(\eta + h)u\} + \frac{\partial q}{\partial y} \cdot \frac{\partial}{\partial q} \{(\eta + h)v\} = 0 \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{\partial u}{\partial q} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot u \frac{\partial u}{\partial q} + \frac{\partial q}{\partial y} \cdot v \frac{\partial u}{\partial q} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + g \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial q} + \frac{gn^2 u(u^2 + v^2)^{1/2}}{(\eta + h)^{4/3}} \\ & = \epsilon_x \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial q \partial x} + \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial u}{\partial q} + \left\{ \left( \frac{\partial q}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial q}{\partial y} \right)^2 \right\} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial q^2} \right] \end{aligned} \quad (3b)$$

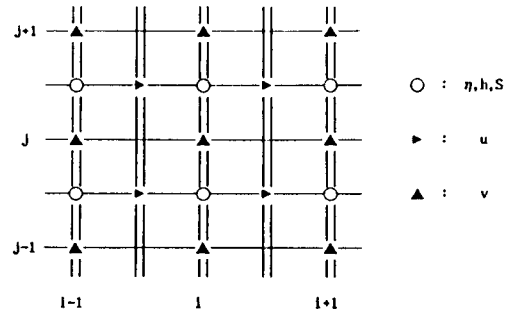
$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{\partial v}{\partial q} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot v \frac{\partial v}{\partial q} + \frac{\partial q}{\partial y} \cdot \frac{\partial v}{\partial q} + \frac{\partial q}{\partial y} \cdot v \frac{\partial v}{\partial q} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + g \frac{\partial q}{\partial y} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial q} + \frac{gn^2 v(u^2 + v^2)^{1/2}}{(\eta + h)^{4/3}} \\ & = \epsilon_y \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial q \partial x} + \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial v}{\partial q} + \left\{ \left( \frac{\partial q}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial q}{\partial y} \right)^2 \right\} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial q^2} \right] \end{aligned} \quad (3c)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(HS)}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{\partial(HS)}{\partial q} + \frac{\partial(HuS)}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial(HuS)}{\partial q} + \frac{\partial q}{\partial y} \cdot \frac{\partial(HvS)}{\partial q} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ HK_x \left( \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial S}{\partial q} \right) \right\} \\ & + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial q} \left\{ HK_x \left( \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial S}{\partial q} \right) \right\} + \left( \frac{\partial q}{\partial y} \right)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial q} \left( HK_y \frac{\partial S}{\partial q} \right) \end{aligned} \quad (3d)$$

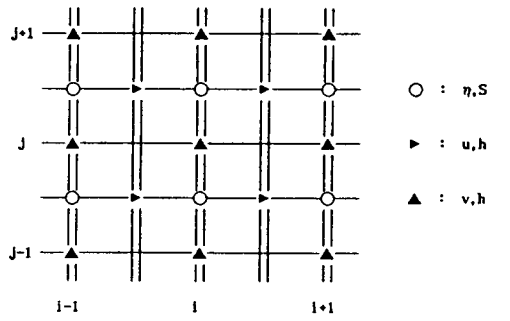
### 3. 模型의 數值解析

#### 3.1 適用 差分法

X-Y模型 중 流況模型에 관한 식 (3a, b, c)에 대해서는 ADI方法으로 有限差分化하였다. 格子網은 staggered net이고 매시간단계마다 x, y方向 두번의



(a) Typical computational mesh



(b) Adopted computational mesh

Fig. 2. Computational mesh

계산이 이루어지는 方法이다. 즉 시간  $n\Delta t$ 에서  $(n+1/2)\Delta t$ 까지의 구간에서는 x方向에 대하여 流速 u와 水面變位  $\eta$ 를 포함하는 項을 陰解法으로, 流速 v를 포함하는 項을 陽解法으로 각각 표현하여 連續方程式과 x方向 運動量方程式을 동시에 푼다. 시간  $(n+1/2)\Delta t$ 에서  $(n+1)\Delta t$ 까지의 구간에서는 y方向에 대하여 流速 v와 水面變位  $\eta$ 를 陰解法, 流速 u를 陽解法으로 표현하여 역시 連續方程式과 y方向 運動量方程式을 동시에 푼다. 結果적으로 三重對角 行列式이 구성되므로 Thomas 알고리즘을 사용하여 쉽게 數值解를 구할 수 있는 方法이다.

格子網의 구성은 Fig. 2(a)와 같은 형태로 정의되는 것이 일반적인 方法이지만 本 研究에서는 Falconer and Owens(1987)가 채택한 바 있는 Fig. 2(b)와 같은 형태를 선정하였다. 流速이 정의되는 지점에서 水深도 함께 정의되므로 既存 方法에 의해 水深資料가 2배 필요하지만 그만큼 더 精確한 河床形態를 入力시킬 수 있고, 流速과 水深이 동일한 格子點에서 정의되

므로 水深에 대한 補間이 필요없게 된다. 이러한 格子網을 도입함으로써 특히 潮間帶의 形成에 관한 數值的 模擬에 좀더 正確性이 부여될 수 있을 것이다.

變換된 支配方程式 (3)을 상기 ADI方法으로 差分化하면 다음과 같다. 먼저 連續方程式 (3a)에 대한  $n\Delta t$ 에서  $(n+1/2)\Delta t$ 로의 計算過程은

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} (\eta_{i,j}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^n)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{\partial \eta}{\partial q} = \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{1}{2\Delta q} (\eta_{i,j+1}^n - \eta_{i,j-1}^n)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \{(\eta+h)u\} = \frac{1}{\Delta x} (A1u_{i+1/2,j}^{n+1/2} - A2u_{i-1/2,j}^{n+1/2})$$

$$A1 = \frac{1}{2}(\eta_{i+1,j}^n + \eta_{i,j}^n) + h_{i+1/2,j}^n$$

$$A2 = \frac{1}{2}(\eta_{i,j}^n + \eta_{i-1,j}^n) + h_{i+1/2,j}^n$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial q} \{(\eta+h)u\} = \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{1}{4\Delta q} \{A3(u_{i+1/2,j+1}^n + u_{i-1/2,j+1}^n) - A4(u_{i+1/2,j-1}^n + u_{i-1/2,j-1}^n)\}$$

여기서  $\partial q/\partial t$ ,  $\partial q/\partial x$ 는 閉境界가 時時刻刻 변하기 때문에 매시간단계에서 시간의 함수인  $q$ 에 대해  $\Delta q/\Delta t$ ,  $\Delta q/\Delta x$ 를 각각 計算함으로써 산정된다.

$$A3 = \eta_{i,j+1}^n + \frac{1}{2}(h_{i+1/2,j+1}^n + h_{i-1/2,j+1}^n)$$

$$A4 = \eta_{i,j-1}^n + \frac{1}{2}(h_{i+1/2,j-1}^n + h_{i-1/2,j-1}^n)$$

$$\frac{\partial q}{\partial y} \cdot \frac{\partial}{\partial q} \{(\eta+h)v\} = \frac{\partial q}{\partial y} \cdot \frac{1}{\Delta q}$$

$$(A5v_{i,j+1/2}^n - A6v_{i,j-1/2}^n)$$

여기서  $\partial q/\partial y$ 도 매시간단계에서  $\Delta q/\Delta y$ 를 計算함으로써 算定된다.

$$A5 = \frac{1}{2}(\eta_{i,j+1}^n + \eta_{i,j}^n) + h_{i,j+1/2}^n$$

$$A6 = \frac{1}{2}(\eta_{i,j}^n + \eta_{i,j-1}^n) + h_{i,j+1/2}^n$$

여기서  $A1, A2, A3, A4, A5, A6$  등은 流速成分이 計算되는 格子點에서 水面變位가 정의되지 않기 때문에 근방의 값을 平均하여 流速成分과 동일한 格子點에서의 값으로 代置하기 위하여 導入한 것이다.

이 식들을 식 (3a)에 대입하여 未知數만 左邊에 정리하면

$$C_1 u_{i-1/2,j}^{n+1/2} + C_2 \eta_{i,j}^{n+1/2} + C_3 u_{i+1/2,j}^{n+1/2} = C_4 \quad (4)$$

와 같은 형태의 三重對角 行列式을 얻을 수 있으며, 여기서  $C_1, C_2, C_3$ 와  $C_4$ 는 既知數이다.

또한  $x$ 方向 運動量方程式 (3b)에 대하여

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i+1/2,j}^{n+1/2} - u_{i+1/2,j}^{n-1/2})$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{\partial u}{\partial q} = \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{1}{2\Delta q} (u_{i+1/2,j+1}^{n-1/2} - u_{i+1/2,j-1}^{n-1/2})$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta x} u_{i+1/2,j}^{n-1/2} (u_{i-1/2,j}^{n-1/2} - u_{i+1/2,j}^{n-1/2})$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} \cdot u \frac{\partial u}{\partial q} = \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{1}{2\Delta q} u_{i+1/2,j}^{n-1/2} (u_{i+1/2,j+1}^{n-1/2} - u_{i+1/2,j-1}^{n-1/2})$$

$$\frac{\partial q}{\partial y} \cdot v \frac{\partial u}{\partial q} = \frac{\partial q}{\partial y} \cdot \frac{1}{4\Delta q} (v_{i,j+1/2}^n + v_{i+1,j+1/2}^n + v_{i,j-1/2}^n$$

$$+ v_{i+1,j-1/2}^n) \cdot (u_{i+1/2,j+1/2+p}^n - u_{i+1/2,j-1/2+p}^n)$$

$$p = - \frac{v_{i,j+1/2}^n + v_{i+1,j+1/2}^n + v_{i,j-1/2}^n + v_{i+1,j-1/2}^n}{2|(v_{i,j+1/2}^n + v_{i+1,j+1/2}^n + v_{i,j-1/2}^n + v_{i+1,j-1/2}^n)|}$$

여기서  $p$ 는 質量傳達 性質과 安定性의 증진을 위하여 移送項을 上流方向 差分化하기 위한 것이다(李·姜, 1989).

$$g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{g}{\Delta x} (\eta_{i+1,j}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n+1/2})$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} \cdot g \frac{\partial \eta}{\partial q} = \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{g}{4\Delta q} \{(\eta_{i,j+1}^n + \eta_{i+1,j+1}^n)$$

$$- (\eta_{i,j-1}^n + \eta_{i+1,j-1}^n)\}$$

바다摩擦項은 다음과 같이 陰解法으로 처리하였다.

$$\frac{gn^2 u(u^2 + v^2)^{1/2}}{(\eta+h)^{4/3}} = \frac{gn^2}{2} (u_{i+1/2,j}^{n+1/2} + u_{i+1/2,j}^{n-1/2})$$

$$\frac{[(u_{i+1/2,j}^{n-1/2})^2 + \frac{1}{4}\{(v_{i,j+1/2}^n + v_{i+1,j-1/2}^n + v_{i,j+1/2}^n + v_{i+1,j-1/2}^n)\}^2]^{1/2}}{[(\eta_{i,j}^n + \eta_{i+1,j}^n)/2 + h_{i+1/2,j}^n]^{4/3}}$$

즉, 모든 變數의 값을 u와 동일한 格子點에서의 값으로 근방의 값을 平均하여 取하였고 u는 既知와 未知의 두 시간단계의 값을 같은 加重值로 택하였다. 이 식들도 식 (3a)에 대입하여 未知數만 左邊에 정리하면

$$C_5 \eta_{i,j}^{n+1/2} + C_6 u_{i+1/2,j}^{n+1/2} + C_7 \eta_{i+1,j}^{n+1/2} = C_8 \quad (5)$$

와 같은 형태의 三重對角 行列式을 얻을 수 있으며 C<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>과 C<sub>8</sub>은 既知數이다.

식 (3b)의 우변은 有效粘性項으로서 이를 差分化하여 運動量方程式과 함께 풀어 解를 구할 수도 있지만 本 研究에서는 有效粘性項이 포함되지 않은 상태에서 식 (5)로 計算된 數值解를 다음 식 (6)과 같이  $\alpha_r (=2\epsilon_r \Delta t / \Delta x^2)$ 의 加重值를 두어 空間平均項으로써 有效粘性項이 존재하는 효과를 갖도록 하는 일종의 時間分割方法을 도입하였다(姜, 1991).

$$u_{i+1/2,j}^{n+1/2} = (1 - \alpha_r) u_{i+1/2,j}^* + \frac{\alpha_r}{4} (u_{i+1/2,j-1}^* + u_{i+1/2,j+1}^* + u_{i+3/2,j}^* + u_{i-1/2,j}^*) \quad (6)$$

여기서 우변의 각 項은 有效粘性項이 포함되지 않은 상태에서 計算된 數值解이다.

(n+1/2)Δt에서 (n+1)Δt의 計算課程도 식 (3)에서 u를 陽解法, v를 陰解法으로 표현하는 것과 식 (3b) 대신 식 (3c)에 대해 v를 陰解法으로 差分하는 것만 차이가 있을 뿐 類似한 差分을 행하였으며 매 시간단계에서 구성된 三重對角行列式을 Thomas 알고리즘으로 풀 수 있다.

이상과 같이 流速 및 水面變位가 결정되면 이들을 既知값으로 하여 독립된 시간단계에서 식 (3d)를 역시 ADI方法으로 풀게 된다. 식 (3d)를 다시 정리하면

$$\begin{aligned} & H \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} \cdot H \frac{\partial S}{\partial q} + H u \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot H u \frac{\partial S}{\partial q} \\ & + \frac{\partial q}{\partial y} \cdot H v \frac{\partial S}{\partial q} + S \left\{ \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{\partial H}{\partial q} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} \right. \\ & \left. + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial(Hu)}{\partial q} + \frac{\partial q}{\partial y} \cdot \frac{\partial(Hv)}{\partial q} \right\} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ HK_x \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left. + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial S}{\partial q} \right\} + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial q} \left\{ HK_x \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{\partial S}{\partial q} \right) \right\} + \left( \frac{\partial q}{\partial y} \right)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial q} \left( HK_y \frac{\partial S}{\partial q} \right) \end{aligned}$$

右邊의 擴散項을 당분간 무시하고 連續方程式 (3a)를 사용하면 이 식은

$$\begin{aligned} & \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{\partial S}{\partial q} + u \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} \cdot u \frac{\partial S}{\partial q} \\ & + \frac{\partial q}{\partial y} \cdot v \frac{\partial S}{\partial q} = 0 \quad (7) \end{aligned}$$

流況模型에서와 같이 擴散方程式에도 時間分割方法을 도입하였는데, 1단계에서는 식 (7)을 다음과 같이 上流方向 差分法을 포함한 ADI方法으로 有限差分하여 數值解를 구한다. 즉 nΔt에서 (n+1/2)Δt까지의 計算過程은 다음과 같은데 擴散模型의 時間格子間隔을 流況模型의 時間格子間隔보다 큰 값으로 선택하여 流況模型을 몇 회 遂行시킨 후 擴散模型을 1회 遂行시킬 수도 있으나 本 研究에서는 두 模型에서의 Δt를 동일하게 선택하였다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} (S_{i,j}^{n+1/2} - S_{i,j}^n)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{\partial S}{\partial q} = \frac{\partial q}{\partial t} \cdot \frac{1}{2\Delta q} (S_{i,j+1}^n - S_{i,j-1}^n)$$

$$u \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} u_{i,j}^n (S_{i+1/2+\rho,j}^{n+1/2} - S_{i-1/2+\rho,j}^{n+1/2})$$

여기서 ρ는 u의 부호에 따라 陽數이면 -1/2, 陰數이면 1/2이다. 그리고 u는 (i,j)점에서 정의되지 않으므로 u<sub>i,j</sub>는 u<sub>i+1/2,j</sub>와 u<sub>i-1/2,j</sub>의 平均값으로 하고 다음에 나오는 v<sub>i,j</sub>도 v<sub>ij+1/2</sub>와 v<sub>ij-1/2</sub>의 平均值로 대치한다.

$$\frac{\partial q}{\partial x} \cdot u \frac{\partial S}{\partial q} = \frac{\partial q}{\partial x} \cdot \frac{1}{2\Delta q} u_{i,j}^n (S_{i,j+1}^n - S_{i,j-1}^n)$$

$$\frac{\partial q}{\partial y} \cdot v \frac{\partial S}{\partial q} = \frac{\partial q}{\partial y} \cdot \frac{1}{2\Delta q} v_{i,j}^n (S_{i,j+1}^n - S_{i,j-1}^n)$$

(n+1/2)Δt에서 (n+1)Δt의 計算過程도 이상과 類似하게 差分하였다. 이로부터 다음 식 (8)을 얻을 수 있으며

$$C_9 S_{i-1/2+\rho j}^{n+1/2} + C_{10} S_{i,j}^{n+1/2} + C_{11} S_{i+1/2+\rho j}^{n+1/2} = C_{12} \quad (8)$$

이렇게 얻어진 數值解를 다음과 같이 식 (6)과 類似한 方法으로 加重值  $\alpha_d (= 2K_x \Delta t / \Delta x^2)$ 로 空間平均함으로써 식 (3d) 右邊의 擴散項을 처리하였다. 즉,

$$S_{i,j}^{n+1} = (1 - \alpha_d) S_{i,j}^* + \frac{\alpha_d}{4} (S_{i+1,j}^* + S_{i-1,j}^* + S_{i,j+1}^* + S_{i,j-1}^*) \quad (9)$$

이와 같이 時間分割方法을 導入함으로써 數值解析상의 簡便性을 圖謀할 수 있을뿐 아니라 數值解의 安定性에도 寄與하게 된다.

本 研究를 통해 開發된 潮間帶의 數值的 模擬方法은 다음과 같다. 먼저 兩岸 堤防의 座標를 既入力된 x 方向 格子距離에 따라 入力시킨다. x 方向으로 形成되는 側方向의 各 斷面에서 역시 既入力된 q 方向의 格子距離에 따라 平均海面에서 河床까지의 깊이인 水深을 入力시킨다. 每時間段階마다 直前に 計算된 水面變位와 水面變位 格子點에 隣接한 4점의 水深을 平均한 값의합을 側方向의 既入力된 各 格子點에서 구한 후 線形補間에 의해 그 합이 0이 되는 지점을 찾는다. 이 점들을 흐름方向으로 연결한 선이 潮間帶를 포함한 새로운 閉境界가 되고, 이렇게 결정된 양쪽 閉境界에서 q 方向 格子間隔마다 水深을 역시 線形補間에 의해 산출한다.

### 3.2 初期·境界條件

流速에 관해서는 初期停止 條件을 사용하였으며 水面變位에 관한 初期條件은 다음 식 (10a)와 같이 X-Z模型(姜·李, 1991)에서 計算된 上下流端水面變位の 값을 對象領域 内部에 線形的으로 分布시켰고, 鹽度에 관한 初期條件도 모든 q에 대해서 다음 식 (10b)와 같이 領域内部에 線形的으로 分布시켰다.

$$\eta(x, q) = \eta(0, q) + \frac{x}{L} \{ \eta(L, q) - \eta(0, q) \} \quad (10a)$$

$$S(x, q) = S(0, q) + \frac{x}{L} \{ S(L, q) - S(0, q) \} \quad (10b)$$

本 研究에서는 staggered net 형태의 格子網에서 대부분의 空間微分項을 中央差分한 ADI方法을 사용하였고 上下流 兩端境界에서 水面變位와 側方向流速이 정의되도록 하였기 때문에 u는 모든 格子點에서

결정될 수 있으나 兩端에서의 v는 결정될 수 없다. 그러므로 兩端에서의 水面變位와 側方向流速에 관한 境界條件을 다음과 같이 부여하였다.

水面變位에 관한 閉境界條件으로는 X-Z模型의 結果를 이용하였다. X-Z模型의 適用區間은 群山外港에서 關岩까지의 59 km이고 X-Y模型의 適用區間은 群山外港에서 上流方向으로 1 km가량 떨어진 곳으로부터 5.4 km 區間으로서 X-Z模型 適用區間の 일부이다. 그리고 側方向流速에 관한 境界條件은 境界上的 모든 格子點에서 流向이 q가 일정하게 되는 선을 향하도록 부여하였다.

또한 X-Z模型과는 달리 X-Y模型에서는 側方向의 水面變位도 구하기 때문에 閉境界에서 水面變位를 側方向으로 일정하게 부여하면 適用區間 内部에서 計算되는 側方向 水面變位 分布와 差異가 있게 되며 특히 閉境界 부근에서 歪曲된 水面變位 分布가 발생할 수 있게 된다. 이러한 影響을 減少시키기 위해 本 研究에서는 X-Z模型에서 取한 水面變位 境界條件을 平均값으로 하여 x 方向으로 隣接한 斷面에서의 分布를 따르게 하였다.

直角座標系에서는 境界面이 座標系와 平行하므로 境界와 垂直인 流速과 境界에 垂直方向의 水面變位 傾斜를 0으로 하는 閉境界條件을 부여하기가 어렵지 않다. 그러나 變換된 座標系에서는 이러한 閉境界條件을 부여하기란 그지 간단치 않은 문제이다.

本 研究에서는 境界에 垂直인 流速이 0이 되도록 다음과 같이 境界條件을 부여하였다.

$$V_j^2 = u^2 + v^2 \quad (11)$$

여기서  $V_j$ 는 흐름方向의 流速이다. 그러므로 다음 식

$$\frac{\partial V_j}{\partial t} = \frac{u}{V_j} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{v}{V_j} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (12)$$

이 성립하며 境界面 부근의 흐름은 境界面과 平行을 이루어야 하므로,  $u/V_j = a$ ,  $v/V_j = b$ 라 하면  $a$ ,  $b$ 는 境界面의 方向餘弦(directional cosine)이 된다. 또한  $u = a \cdot V_j$ 이므로

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial V_j}{\partial t} \quad (13)$$

식 (12)를 식 (13)에 대입하면

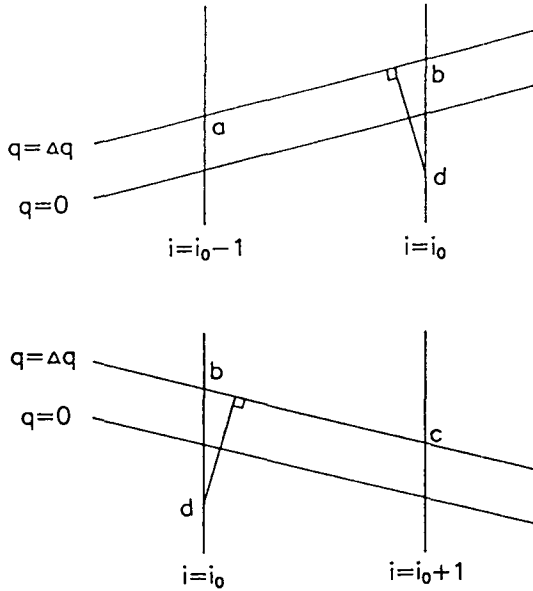


Fig. 3. Closed boundary condition for  $\eta$  or  $S$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_c^2 \frac{\partial u}{\partial t} + a_c b_c \frac{\partial v}{\partial t} \quad (14)$$

$a_c^2 + b_c^2 = 1$  이므로

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{a_c}{b_c} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \quad (15)$$

여기서  $a_c$ 와  $b_c$ 는 매시간단계에서 境界面의 座標로부터 計算될 수 있으므로 境界에서  $(n+1/2)\Delta t$ 시간단계에서의  $x$ 方向 流速은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$(u^{n+1/2} - u^{n-1/2})/\Delta t = a_c/b_c \cdot (v^n - v^{n-1})/\Delta t \quad (16)$$

$y$ 方向 流速도 類似한 方法으로 산정할 수 있다.

水面變位에 관한 閉境界條件은 다음과 같이 설정하였다. 즉, Fig. 3에서  $i=i_0$ 선상의 數值解析時 境界 밖에 있는  $d$ 점에서의 水面變位 값이 필요하게 되는데 直角座標系에서는 水面變位の 傾斜가 영이라는 閉境界條件에 의해 이를  $b$ 점에서의 값과 동일한 값으로 取하게 된다.  $y$ 座標軸과 境界面이 垂直을 이루지 않으므로  $d$ 점에서의 값을  $a$ 점과  $b$ 점(또는  $b$ 점과  $c$ 점)간의 內插法을 이용하여 산정하였다. 鹽度에 관한 閉境界條件은 境界에 垂直인 方向으로 鹽度傾斜가 0이라는 條件으로부터 水面變位 境界條件과 類似하게

設定하였다.

### 3.3 數值 安定性

淺水方程式의 數值解析時 不安定한 結果가 惹起되는 原因은 時間間隔을 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy)條件보다 큰 값으로 선택하였을 때 발생하는 경우와 移流項과 摩擦項 등 非線形項의 부적절한 空間有限差分에 의한 경우가 있는데(Benqué *et al.*, 1982), 空間的 不安定性은 일반적으로 有效粘性項의 도입으로 다소 극복될 수 있다(Weare, 1976; Falconer, 1980). 移流項과 摩擦項을 모두 생략한 경우 시간에 따른 不安定性만 발생되며 이때 陰解法은 무조건 安定하지만 1次元의 경우 陽解法은 Courant數( $\equiv \Delta t / \Delta x \cdot (gH)^{1/2}$ )가 1보다 작아야 安定하게 된다. 2次元의 경우 다음 식 (17)과 같이 정의되는(Benqué *et al.*, 1982) Courant數에 의해 安定性의 제약을 받는다.

$$Cr \equiv \Delta t \{gH(1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2)\}^{1/2} \quad (17)$$

本 流況模型에서 사용된 ADI方法의 安定性 한계는 經驗적으로 대략  $Cr < 5$ 로 알려져 있으며(李·姜, 1989) 差分形態의 차이와 適用對象에 따라 다소 增減되기도 한다.

## 4. 模型의 實際適用

### 4.1 入力資料의 選定

X-Z模型과의 連繫性을 위하여 X-Y模型의 適用對象도 錦江河口로 선정하였고 適用期間도 1982년 6월 15일부터 6월 17일까지로 X-Z模型에서와 동일한 期間을 택하였다. 模型의 適用區間은 X-Z模型 適用區間의 일부로서 忠淸南道에 있는 展望山 附近에서 소치곶 附近까지의 5.4 km로서 Fig. 4에 나타내었다. 開境界 兩端에서 側方向 水面變位の 變化를 極小化시키기 위하여  $y$ 축을 북쪽에서 약  $20^\circ$  서쪽으로 偏向되게 선정하였다.

全體 解析區間을  $x$ 方向으로 18개의 格子로 나누어  $\Delta x = 0.3$  km를 선택하였고  $\Delta q = 1/16$ 로 하였으며, 境界條件의 入力와 觀測值와의 比較를 容易하게 하기 위하여 X-Z模型에서 택한  $\Delta t = 60$  sec를 택하였는데, 最大水深이 대략 10m, 最少幅이 약 1.6 km이므로  $y$ 方向 最小格子間隔이 100m가 된다. 이에 따라 식 (17)에서  $Cr \approx 60 \times \{9.8 \times 10 \times (1/90000 + 1/10000)\}^{1/2}$



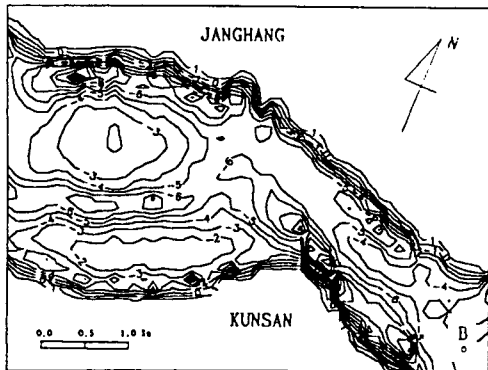


Fig. 4. Establishment of X-Y coordinate for the Keum River

≈6이 되며 數值 實驗結果 安定性이 확인되었다.

流況模型에 대한 開境界條件은 X-Z模型의 計算結果를 이용하여 兩端의 水面變位 計算值를 入力하였는데 兩端境界가 그리 멀리 떨어져 있지 않기 때문에 그 형태가 거의 일치하게 된다. 兩端 境界條件으로 水面變位를 택한 이유는 流速을 택할 경우 水面變位보다 側方向의 變化가 훨씬 심하기 때문이다. 이렇게 얻어진 境界條件은 側方向을 대표하는 값으로 이를 側方向 모든 格子點에서의 값으로 擴大 適用할 수도 있겠지만 本 研究에서는 境界에 隣接한 内部格子에서 水面變位の 傾斜를 함께 고려하여 다음 식 (18)과 같은 境界條件을 부여하였다.

$$\eta(0, q, t) = \eta_i(0, q, t) + C_m \{ \eta(\Delta x, q, t) - \eta_b(\Delta x, t) \} \quad (18a)$$

$$\eta(L, q, t) = \eta_i(L, q, t) + C_m \{ \eta(L - \Delta x, q, t) - \eta_b(L - \Delta x, t) \} \quad (18b)$$

여기서  $\eta_i$ 는 X-Z模型으로부터 計算된 값이고,  $C_m$ 은 0과 1사이의 常數이며,  $\eta_b$ 는 水面變位 計算值를 側方向으로 平均한 값이다. 本 研究에서는  $C_m = 0.8$ 로 택하였다. 鹽度에 관한 境界條件도 이와 동일한 方法을 사용하였다.

#### 4.2 媒介變數의 算定

X-Y模型에 관한 Manning係數의 경우 農業振興公社 資料( $n = 0.028$ ), 群山港建設事務所 資料( $n = 0.020$ ), 그리고 X-Z模型에서 사용한 값( $n = 0.014$ ) 등을 사용해 數值實驗한 Fig. 4의 A地點에서의 結果를 16일 18시부터의 觀測值와 함께 Fig. 5에 圖示하였다. 이때

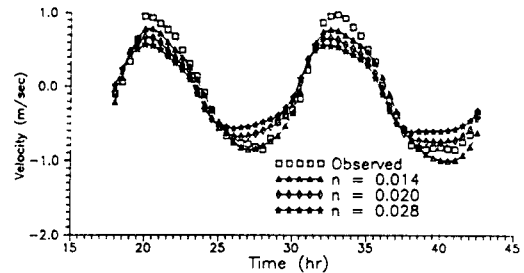


Fig. 5. Sensitivity of Manning's n (Location A)

다른 媒介變數는 後術된 方法에 의해 算定된 값으로 선택하였다. 이를 보면 X-Z模型에서 사용한 값을 이용한 경우가 觀測值에 가장 접근하고 있기에  $n = 0.014$ 를 선택하였다.

식 (6)의 有效粘性項에 관한  $\alpha_v$ 와 식 (9)의 흐름擴散項에 관한  $\alpha_d$  등의 空間平均係數는 그 값이 작을수록 얻어지는 結果가 地域的인 特性을 잘 보여주게 되는 반면 不安定性이 惹起될 소지가 있게 된다. 本 X-Y模型에서는 이들 空間平均係數를 Ponce and Yabusaki(1981)가 제안한 0.1을 각각 검증하였는데, 擴散項에 관해서는 별 문제가 없었으나 粘性項 空間平均係數가 0.1일 경우 適用領域의 水深變化가 심하므로 流況模型의 非線形 移送項에 의해 약간의 不安定性이 惹起되었으며 0.3까지 增加시켜서야 비로소 安定性이 유지되었다. 空間平均係數들의 定義에 따르면  $\epsilon_x = \epsilon_y = 225(\text{m}^2/\text{sec})$ ,  $K_x = K_y = 75(\text{m}^2/\text{sec})$ 가 되며 X-Z模型에서의  $K_x = 1900(\text{m}^2/\text{sec})$ 와 함께 Mersey河口의 擴散係數(Fischer, 1972)와 비교하면 水平循環에 의한 흐름擴散係數가 20배 가량 크다는 사실은 일치하며 Mersey河口에 비해 錦江河口의 흐름擴散係數가 3-4배 큼을 알 수 있다.

### 5. 適用結果의 分析

#### 5.1 水位 및 流速場의 決定

이상과 같이 결정된 媒介變數와 入力資料를 사용하여 全體 解析領域에서 시간에 따른 水面變位와 流速을 計算하였다. 上下流端 境界條件이 거의 일치하므로 領域内部에서 水面變位の 計算值와 觀測值를 비교하는 것은 무의미한 일이므로 Fig. 4의 A地點과 B地點에서의 流速에 대해서만 觀測值와 비교하였다. 領域内部의 中央附近에 위치한 A地點에서의 流速計

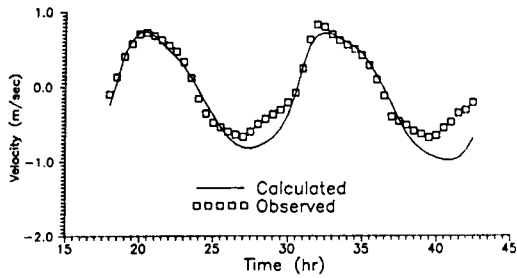


Fig. 6. Comparison of calculated velocity with observation at Location B

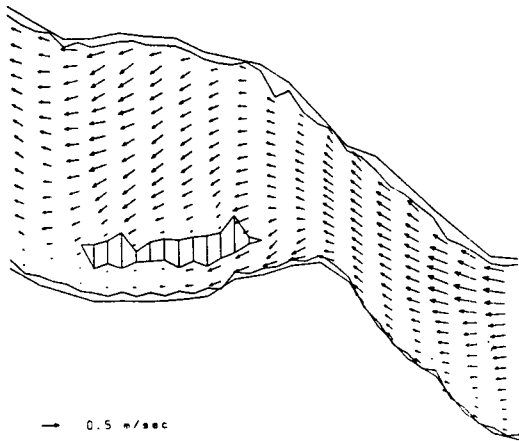


Fig. 7. Velocity field at low water

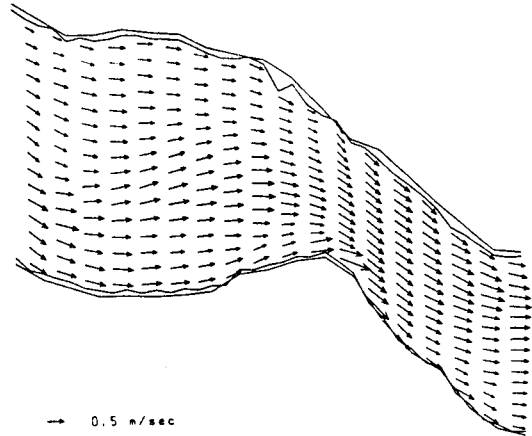


Fig. 8. Velocity field at flood current

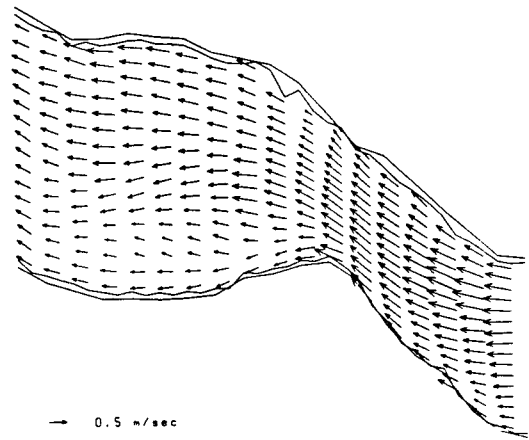


Fig. 9. Velocity field at ebb current

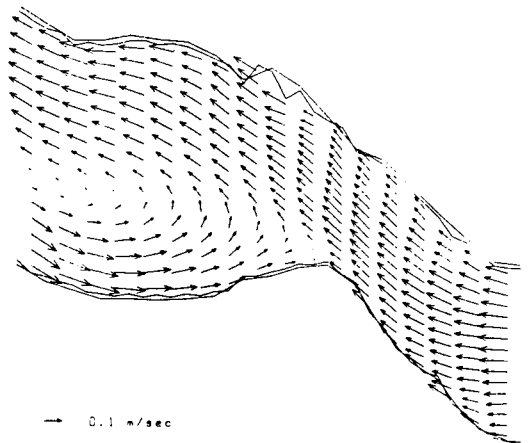


Fig. 10. Residual currents

算値는 Fig. 5에 보인 바와 같이 觀測値와 매우 잘 일치하고 있으나 Fig. 6에 제시한 B地點 計算値는 그 위치가 境界와 근접하고 있어 境界條件의 불완전성에 기인하여 下流方向으로의 最强流速이 다소 크게 나타나고 있다. 또한 Fig. 7-9에 보인 바와 같이 流向도 閉境界에 거의 평행한 방향의 만족한 結果를 보이고 있다. 이 두 地點만의 비교로 전체 流速場의 計算이 올바르게 되었다고 할 수는 없겠지만 두 地點의 比較結果 傾向은 잘 일치하고 있는 바, 鹽度計算의 기초작업으로서 流速場의 형성은 만족할만한 結果를 보이고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 4에 제시된 適用 對象領域을 보면 左下段 일대가 水深이 가장 낮아 干潮時 潮間帶가 형성되는데 Fig. 7과 같이 이러한 現象도 數值的으로 잘 模擬되고 있다. Fig. 7-10에서 제일 바깥쪽의 線은 堤防의 위치를 나타내며 안쪽의 線이 座標變換을 이용한 數值計算에 의해 형성되는 새로운 閉境界이다. 既存의 固

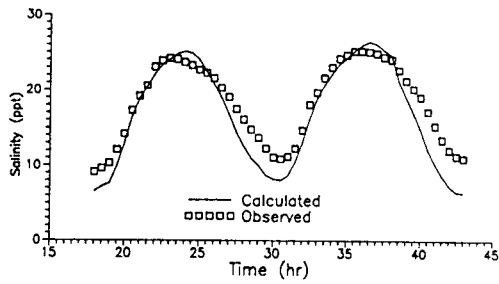


Fig. 11. Comparison of calculated salinity with observed at Location A

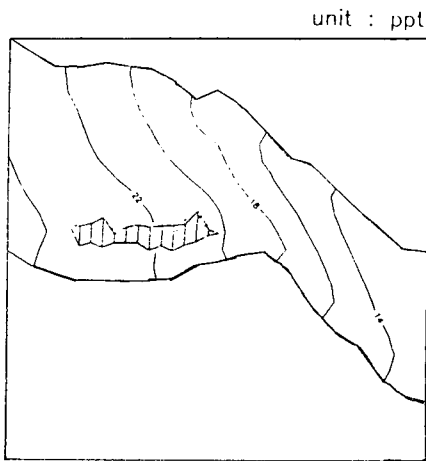


Fig. 12. Salinity distribution at low water

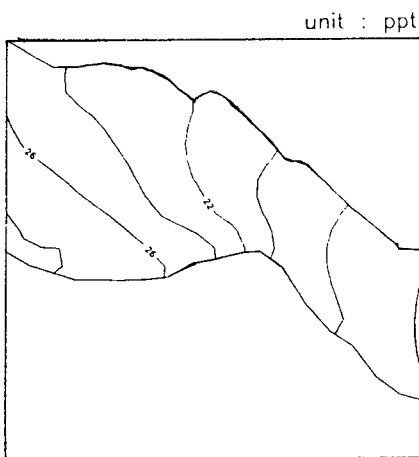


Fig. 13. Salinity distribution at flood current

定格子 시스템을 동일한 格子數에서 이러한 潮間帶의 模擬에 이용했다면 潮間帶의 形성이 이보다 훨씬 부 正 確하고 그 形상도 이처럼 매끄럽게 될 수는 없을

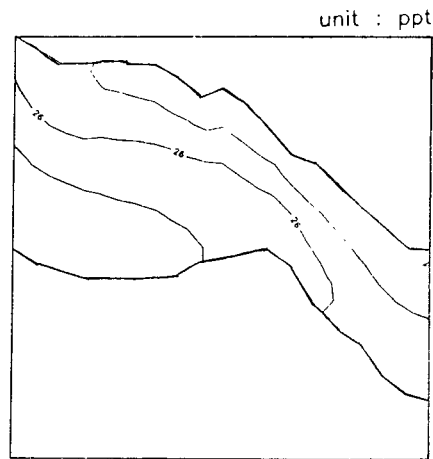


Fig. 14. Salinity distribution at high water

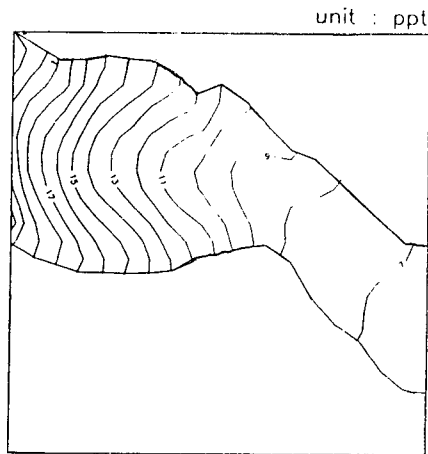


Fig. 15. Salinity distribution at ebb current

것이다. 또한 漲潮時와 落潮時의 流速場을 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 圖示하였는데 전체적인 흐름양상이 대 체적으로 합당한 結果를 보이고 있다.

한편 각 地點에서의 流速을 週期平均한 값인 殘差流 (residual current)의 形태를 Fig. 10에 圖示하였는데 下流部에서 反時計方向의 循環現象을 보이고 있다. 이는 落潮時 主흐름이 地形的 屈曲 때문에 領域의 北岸에 접해 흐르기 때문인 것으로 보이며 循環現象을 보이고 있는 地點에 土沙量이 집중되어 이 附近의 水深이 비교적 얇은 것이 설명될 수 있을 것이다. 또한 Ramming and Kowalik(1980)에 의하면 領域内部에 섬이 존재할 경우 그 주위에서 循環現象이 惹起될 수 있다고 하였다.

## 5.2 鹽度場의 形成

이미 計算된 流速場을 기초로 하여 鹽度場을 計算하였고 A地點에서 鹽度의 觀測値와 比較가 이루어졌는데 Fig. 11에서 보는 바와 같이 傾向도 일치하며 대체적으로 만족할만한 結果를 얻을 수 있었다.

시간에 따른 鹽度의 空間的 分포를 干潮, 漲潮, 滿潮, 落潮에 대해서 각각 Fig. 12-15에 圖示하였다. 이를 보면 한 週期동안 鹽度의 空間的 分포상태를 볼 수 있는데 Fig. 7-9의 流向에 따라 等鹽度線이 形成되고 있음을 볼 수 있다. 또한 週期平均 流速이 循環現象 (Fig. 10 參照)을 보이는 下流端 南岸 附近의 鹽도가 다소 상승함을 볼 수 있다.

## 6. 結 論

X-Y模型의 數值實驗 結果 다음과 같은 結論을 導出할 수 있었다.

1) 數值的 模擬結果 錦江河口의 流速場과 鹽度場이 만족스럽게 재현되었으며 X-Z模型의 妥當性이 부분적으로 입증되었다.

2) ADI方法을 이용한 2次元 數值模型은 座標變換을 통해 正確性과 安定性의 증진이 기대된다.

3) 時間分割方法을 이용해 流況模型의 粘性項과 鹽度擴散模型의 擴散項을 처리함으로써 數值解析上의 簡便性을 꾀할 수 있고, 특히 安定性의 증진이 기대되며 空間平均係數가 粘性項에 대해서 각각 0.3, 0.1일 때 비교적 만족스런 結果를 얻을 수 있었다.

4) 開發된 閉境界 算定方法을 이용하면 閉境界의 위치를 보다 精確히 찾을 수 있고 平滑性에 장점이 있다.

5) 週期平均 流速은 下流部에서 反時計方向의 循環現象을 보이고 있고 이에 따라 下流端 南岸 附近의 鹽도가 다소 높게 되며 等鹽度線은 流向에 따라 형

성된다.

## 參考文獻

- 姜周煥, 1991. 有限差分模型에 의한 河口의 鹽度擴散 分析, 서울대학교 博士學位論文.
- 姜周煥, 李吉成, 1991. X-Z 數值模型에 의한 河口의 鹽度擴散 分析, 韓國海岸·海洋工學會誌, 3(4).
- 李吉成, 姜周煥, 1989. 淺水方程式의 有限差分特性, 大韓土木學會 論文集, 9(1).
- Benqué, J.P., Cunge, J.A., Feuillet, J., Hanguel, A. and Holly, F.M. 1982. New method of tidal current computation, *Proc. of ASCE, Waterway, Port, Coastal Ocean Div.*, 108: 396-417.
- Boericke, R.R. and Hall, D.W., 1974. Hydraulics and thermal dispersion in an irregular estuary, *Proc. of ASCE*, 100(HY1): 85-101.
- Falconer, R.A., 1980. Numerical modeling of tidal circulation in harbors, *Proc. of ASCE*, 106(WW1): 31-48.
- Falconer, R.A. and Owens, P.H., 1987. Numerical simulation of flooding and drying in a depth-averaged tidal flow model, *Proc. Instn Civ. Engrs*, Part 5, 83: 161-180.
- Fischer, H.B., 1972. Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries, *J. of Fluid Mechanics*, Part 4, 53: 671-687.
- Perrels, P.A.J. and Karelse, M., 1982. A two-dimensional laterally averaged model for salt intrusion in estuaries, *Delft Hydraulics Laboratory*, Pub. No.262: 483-535.
- Ponce, V.M. and Yabusaki, S.B., 1981. Modeling circulation in depth-averaged flow, *Proc. of ASCE*, 107(HY11).
- Ramming, H-G. and Z. Kowalik, 1980. Numerical modelling of marine hydrodynamics: Applications to dynamic physical process, Elsevier.
- Stelling, G.S., Wiersma, A.K. and Willemse, J.B.T.M., 1986. Practical aspects of accurate tidal computations, *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(9): 802-817.
- Weare, T.J., 1976. Instability in tidal flow computational schemes, *Proc. of ASCE*, 102(HY5).
- Weare, T.J., 1979. Errors arising from irregular boundaries in ADI solutions of the shallow-water equations, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 14: 921-931.
- Wilders, P., van Stun, L., Stelling, G.S. and Fokekema, G.A., 1988. A fully implicit splitting method for accurate tidal computations, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 26: 2707-2721.