

有限要素法에 의한 港灣에서의 土砂移送推定模型

Sediment Transport Prediction Model in a Harbor by Finite Element Method

尹 泰 勳*
Yoon, Tae Hoon

Abstract

The development of unsteady, depth-averaged two dimensional sediment transport prediction model in estuaries and harbors by the Galerkin finite element technique is presented. The model consists of two submodels, flow induced circulation model and sediment transport model. The sediment transport submodel is formulated by incorporating sediment continuity equation and sediment diffusion equation. Numerical experiments of the model, which were carried out in one dimensional channel under different conditions for circulation and sediment transport, show the adaptability of the formulation for predicting the migration of both cohesive and noncohesive sediments. The model was applied to Busan harbor to simulate circulation and sediment transport for simplified conditions. Of the results by the model the flow pattern are shown to be similar to observed data.

要 旨

河口, 港灣 등에서 凝集性 및 非凝集性 土砂의 移送推定을 위한 二次元 土砂移送推定模型이 개발되었으며 이 模型은 흐름에 의한 循環模型과 土砂移送模型으로 구성된다. 土砂移送模型은 二次元擴散方程式과 連續方程式으로 이루어진다. 解는 Galerkin 有限要素法과 二段階 Lax-Wendroff 方法에 의하였다. 一次元水路의 相異한 조건하에서 循環과 土砂移送에 관하여 數値模擬 되었으며 釜山港에 적용하여 얻어진 결과중에서 實測値와 비교가 가능한 흐름樣相은 대체로 實測値와 近似하게 나타났다.

1. 序 論

河川水에 의하여 移送되어 灣과 같은 水域으로 流入되는 土砂는 窒素와 磷 등의 營養素를 다량 포함하고 있으므로 水生 生態系의 均衡을 깨트리며 또한 빛을 차단하여 水中植物의 성장을 저해하기도 하며 重金屬 등 여러 汚染物質을 수반하므로 灣에서의 水質汚染의 원인이 되기도

한다^(1,10).

특히 土砂의 港灣內 堆積은 濶漠된 航路의 維持管理를 어렵게 한다. 航路가 循環流에 垂直일 경우에 堆積現象은 더욱 현저하게 된다. 따라서 適定水深의 維持뿐만 아니라 水質汚染과 生態系 문제는 洗掘, 移送 및 堆積의 과정으로 구성되는 灣內土砂循環에 관한 정보를 필요로 한다.

그러나 土砂循環의 미케니즘이 매우 복잡하여

* 正會員·漢陽大學校 土木工學科 敎授

數學的模型보다는 실제 觀測과 水理模型實驗에 의존하여 이러한 정보를 얻어 왔으나 막대한 비용과 많은 시간을 요하므로 근래에는 고속컴퓨터의 발달로 土砂循環에 관한 數學的模型的 중요성이 증가하고 있다. 본 研究에서는 灣內土砂循環을 구명하기 위하여 有限要素法을 이용한 數學的模型에 의하여 浮遊流砂의 濃도와 底面의 標高變化를 豫測하고자 한다.

2. 基本方程式

淺海(shallow water)에서 물의 흐름은 三次元이나 自由表面의 존재, 潮汐의 昇降에 따른 境界面의 변화, 또한 구하고자 하는 미지값의 多數로 인하여 三次元基本方程式을 그대로 적용함에는 어려운 점이 많으므로 문제를 간단히 하기 위하여 흐름은 鉛直方向에 관한 速度勾配와 密度勾配는 아주 작고 壓力分布는 靜水壓分布로 가정한다⁽³⁾.

2.1 循環의 基本方程式

鉛直方向으로 완전히 混合된 水柱에 대한 基本方程式은 三次元 Navier-Stokes 式을 깊이에 관하여 적분하여 index notation 을 사용하면 다음과 같은 二次元運動方程式과 連續方程式으로 주어진다^(6,7).

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} + g \eta_{,i} + \tau_i^B - \tau_i^S = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \{(h + \eta) u_i\}_{,i} = 0 \quad (2)$$

여기서 t 는 시간을, h 는 平均海水面으로부터 바닥까지의 깊이를 나타내며 η 는 平均海水面으로부터의 水面變位를 표시한다. i, j 는 座標를 나타내는 添字로 $i=1$ 일때 $j=1, 2$ 를, $i=2$ 일때 $j=1, 2$ 를 취한다. 또한 u_i 는 i 方向의 流速成分을 (\quad), τ_i^B 는 i 方向의 空間變數 x_i 에 관한 偏微分 $\frac{\partial}{\partial x_i}$ 를 나타낸다. 式 1에서 粘性項과 coriolis 項은 다른 項에 비하여 작은 값이므로 무시하였으며 바닥에서의 摩擦應力 τ_i^B 와 바람에 의한 水面擦應力 τ_i^S 는 다음과 같은 式으로 표시된다^(13,15).

$$\tau_i^B = \frac{g u_i}{(h + \eta) C_s^2} \sqrt{u_i^2 + u_j^2} \quad (3)$$

$$\tau_i^S = \frac{K w_i}{(h + \eta)} \sqrt{w_i^2 + w_j^2} \quad (4)$$

여기서 C_s 는 chezy 常數, w_i 는 i 方向의 風速成分, K 는 無次元常數이다. 실제 계산에서는 τ_i^S 를 무시하였다.

基本方程式 1과 2의 解는 境界條件을 필요로 한다. 즉

$$\eta = \bar{\eta} \quad (5)$$

$$u_n = 0 \quad (6)$$

江이 流入되는 境界에서는

$$u_i = \bar{u}_i \quad (7)$$

여기서 $\bar{\eta}$ 는 既知값을, u_n 은 境界面에 垂直인 流速成分을 나타낸다.

2.2 土砂移送의 基本方程式

土砂의 移送는 掃流砂(bed load)와 浮遊流砂(suspended load)의 형태로 이루어지며 移送이 진행되는 동안 境界面을 통한 土砂의 流出入, 洗掘 및 移送와 堆積이 계속 일어난다. 洗掘과 堆積은 非凝集性土砂(noncohesive sediment)와 凝集性土砂(cohesive sediment)에 대하여 다 같이 일어난다. 堆積된 土砂가 非凝集性인 경우 洗掘에 대한 抵抗은 무게만에 의하나 凝集性인 경우에는 粒子間의 結束(floculation), 上層載荷로 인한 壓密 등으로 깊이(또는 層)에 따라 密度가 다르게 된다. 따라서 移送過程을 模型化함에는 각 層에 대한 限界剪斷應력과 密度(또는 空隙比)를 아는 것이 필요하다. 그러나 본 研究에서는 非凝集性土砂는 掃流砂만으로 凝集性土砂는 浮遊流砂로 移送하는 것으로 하고 底面土砂의 각 層의 限界洗掘摩擦應력과 密度(또는 空隙比)는 같은 값을 갖는 것으로 가정한다.

掃流砂와 浮遊流砂의 流砂移送는 각각 다음과 같은 二次元土砂連續方程式과 擴散方程式으로 나타낼 수 있다^(4,9).

$$\gamma_b(1-m) \frac{\partial z_0}{\partial t} + \gamma_b q_{i,i} + (P-S) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i C_{,i} - (D_i C_{,i})_{,i} - \frac{(P-S)}{h + \eta} = 0 \quad (9)$$

여기서 z_0 는 基準面으로부터 바닥까지의 높이, γ_b 는 土砂의 單位體積當重量, m 은 底面土砂의 空隙比, C 는 水深平均된 浮遊土砂의 濃度(kg/m^3), D_i 는 i 方向의 擴散係數(m^2/sec)를 각각 나타내며 u_i, h, η 는 循環基本式에서 정의한 바

와 같다.

또한 q_i 는 i 방향의 단위幅當 掃流土砂의 體積移送率($m^3/sec/m$)로 여기서는 Einstein-Brown 式을 적용한다⁽⁹⁾.

$$q_i = \frac{40 w_f \tau_{0i}^3}{(S_b - 1) d^2} \quad (10)$$

여기서 w_f 는 土砂粒子的 沈降速度, γ 는 물의 단위體積當의 重量, d 는 土砂粒子的 平均크기 (mm), S_b 는 土砂의 相對密度($=\rho_b/\rho$)를 각각 나타내며 τ_{0i} 는 i 방향의 底面摩擦應力으로 다음과 같은 式으로 표시된다.

$$\tau_{0i} = \frac{\rho g u_i}{C_c^2} |u_i| \quad (11)$$

式 8, 9의 P 는 단위時間當 단위面積의 底面으로 부터 洗掘되는 土砂의 重量($kg/m^2/sec$), S 는 浮遊流砂가 底面に 堆積되는 土砂重量($kg/m^2/sec$)을 각각 나타내며 Parthenaides⁽¹¹⁾와 Krone⁽⁶⁾에 의해 다음과 같은 式으로 표시된다

$$P = M \left(\frac{\tau_0}{\tau_{ce}} - 1 \right) \quad \tau_0 \geq \tau_{ce} \quad (12)$$

$$S = C w_f \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{cd}} \right) \quad \tau_0 \leq \tau_{cd} \quad (13)$$

여기서 M 은 洗掘常數(erosibility constant), τ_{ce} 는 限界洗掘摩擦應力, τ_{cd} 는 限界堆積摩擦應力을 각각 나타내며 τ_0 는 底面摩擦應力으로 다음과 같다.

$$\tau_0 = \frac{\rho g}{C_c^2} \sqrt{u_i^2 + u_j^2} \quad (14)$$

流砂移送式의 境界條件으로는 外海에 면한 境界와 水域境界의 固定境界에서 濃度勾配(concentration gradient) J 와⁽²⁾

$$J = D_i C, n_i = \bar{J} \quad (15)$$

江이 流入되는 境界에서는 流入濃度を 적용한다.

$$C = \bar{C} \quad (16)$$

여기서 \bar{C} 는 既知值를, n_i 는 境界에 重直成分을 나타낸다.

3. 有限要素式의 誘導

基本方程式을 有限要素式으로 나타내는 데에는 Galerkin 技法을 적용한다. 流速, 水面變位, 底面の 標高變位, 濃도에 대한 加重函數(weighting function)를 각각 u_i^* , η^* , z_0^* , C^* 라 하고 基本方程式 1, 2, 8 및 9에 境界條件을 적용하고

加重函數를 곱한 다음 문제의 全領域 V 에 대하여 적분을 취하여 정리하면 다음과 같은 加重殘差式(weighted residual equation)을 얻는다.

$$\int_V \left(u_i^* \frac{\partial u_i}{\partial t} \right) dV + \int_V (u_i^* u_i u_{i,j}) dV + \int_V \{ u_i^* g \eta_{,i} \} dV + \int_V (u_i^* \tau_i^s) dV - \int_V (u_i^* \tau_i^s) dV = 0 \quad (17)$$

$$\int_V \left(\eta^* \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) dV + \int_V [\eta^* \{ (h + \eta) u_{i,j} \}] dV = 0 \quad (18)$$

$$\int_V \left(z_0^* \frac{\partial z_0}{\partial t} \right) dV + \int_V \left[\frac{z_0^*}{1-m} (q_{i,i}) \right] dV + \int_V \left[\frac{z_0^*}{\gamma (1-m)} (P-S) \right] dV = 0 \quad (19)$$

$$\int_V \left(C^* \frac{\partial C}{\partial t} \right) dV + \int_V (C^* u_i C_{,i}) dV - \int_V \{ C^* (D_i C_{,i}) \} dV - \int_V \left(C^* \frac{P-S}{h+\eta} \right) dV = 0 \quad (20)$$

式 20은 二次微分項을 포함하고 있으므로 Green 定理를 이용하여 部分積分하면

$$\int_V \left(C^* \frac{\partial C}{\partial t} \right) dV + \int_V (C^* u_i C_{,i}) dV + \int_V (C^*_{,i} D_i C_{,i}) dV - \int_V \left(C^* \frac{P-S}{h+\eta} \right) dV - \int_V (C^* D_i C_{,i}) dS = 0 \quad (21)$$

각각의 變數에 대한 試行函數(trial function)와 加重函數에 대하여 같은 補間函數(interpolation function) Φ 를 사용하면 각 函數를 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$u_i = \Phi_\alpha u_{\alpha i}, u_i^* = \Phi_\alpha u_{\alpha i}^* \quad (22), (23)$$

$$\eta = \Phi_\alpha \eta_\alpha, \eta^* = \Phi_\alpha \eta_\alpha^* \quad (24), (25)$$

$$z_0 = \Phi_\alpha z_{0\alpha}, z_0^* = \Phi_\alpha z_{0\alpha}^* \quad (26), (27)$$

$$C = \Phi_\alpha C_\alpha, C^* = \Phi_\alpha C_\alpha^* \quad (28), (29)$$

여기서 α 는 α 번째 節點을 나타낸다.

式 22~29를 式 17, 18, 19 및 21에 대입하여 정리한 후 加重函數의 任意性을 고려하면 다음과 같은 有限要素式을 얻는다.

$$A_{\alpha\beta j} \dot{u}_{\beta j} + B_{\alpha\beta j r k} u_{\beta j} u_{r k} + E_{\alpha\beta j} \dot{\eta}_\beta + \Omega_{\alpha i} = 0 \quad (30)$$

$$G_{\alpha\beta} \dot{\eta}_\beta + H_{\alpha\beta j r} (h_r + \eta_r) u_{\beta j} = 0 \quad (31)$$

$$G_{\alpha\beta} \dot{z}_{0\beta} + K_{\alpha\beta j} q_{\beta j} + \Sigma_\alpha = 0 \quad (32)$$

$$G_{\alpha\beta}\dot{C}_\beta + Q_{\alpha\beta j r} u_{\beta j} C_r + R_{\alpha\beta j r} D_{\beta j} C_r + T_\alpha = \bar{\psi}_\alpha \quad (33)$$

여기서 $\dot{}$ 는 시간에 대한 微分을, α, β 및 r 는 三角要素의 節點을 나타내고

$$A_{\alpha i \beta j} = \int_V (\Phi_\alpha \Phi_\beta) \delta_{ij} dV$$

$$B_{\alpha i \beta j r k} = \int_V (\Phi_\alpha \Phi_\beta \Phi_r) \delta_{ijk} dV$$

$$E_{\alpha i \beta} = \int_V (\Phi_\alpha \Phi_\beta) dV$$

$$\Omega_{\alpha i} = \int_V \{\Phi_\alpha (\tau_i^B - \tau_i^S)\} dV$$

$$G_{\alpha\beta} = \int_V (\Phi_\alpha \Phi_\beta) dV$$

$$H_{\alpha\beta j r} = \int_V \{\Phi_\alpha (\Phi_\beta \Phi_r)_{,j}\} dV$$

$$K_{\alpha\beta j} = \frac{1}{1-m} \int_V (\Phi_\alpha \Phi_\beta)_{,j} dV$$

$$\Sigma_\alpha = \frac{1}{\gamma_b(1-m)} \int_V \{\Phi_\alpha (P-S)\} dV$$

$$Q_{\alpha\beta j r} = \int_V (\Phi_\alpha \Phi_\beta \Phi_r)_{,j} dV$$

$$R_{\alpha\beta j r} = \int_V (\Phi_\alpha)_{,j} (\Phi_\beta \Phi_r)_{,i} dV$$

$$T_\alpha = - \int_V \left\{ \Phi_\alpha \left(\frac{P-S}{h+\eta} \right) \right\} dV$$

$$\bar{\psi}_\alpha = \int_S (\Phi_\alpha \bar{t}) dS$$

각 要素式 30~33을 조합하여 다음과 같은 全領域에 대한 式을 얻는다.

$$M_{\alpha\beta} \dot{v}_\beta + F_\alpha(v_\beta) = 0 \quad (34)$$

여기서 v_β 는 모든 未知값으로 구성되는 列벡터이다.

4. 時間積分

時間積分法에는 여러가지 방법이 있으나 많은 연구에서 정확성과 실용성이 입증된바 있는 二段階 Lax-Wendroff 方法(Two-step explicit Lax-Wendroff scheme)^(6,7,14)을 이용하면 式 34는 다음과 같이 표시된다.

$$M_{\alpha\beta} v_\beta^{n+\frac{1}{2}} = M_{\alpha\beta} v_\beta^n - \frac{\Delta t}{2} F_\alpha(v_\beta^n) \quad (35)$$

$$M_{\alpha\beta} v_\beta^{n+1} = M_{\alpha\beta} v_\beta^n - \Delta t F_\alpha(v_\beta^{n+\frac{1}{2}}) \quad (36)$$

여기서 n 은 시간단계, Δt 는 시간간격을 각각 나타낸다. 計算時間과 computer의 記憶容量을 최대한으로 줄이기 위하여 式 35와 36의 質量

行列(mass matrix) $M_{\alpha\beta}$ 대신 lumped matrix⁽¹⁸⁾를 사용하면 式 35와 36은 다음과 같이 표시된다.

$$L_{\alpha\beta} v_\beta^{n+\frac{1}{2}} = M_{\alpha\beta} v_\beta^n - \frac{\Delta t}{2} F_\alpha(v_\beta^n) \quad (37)$$

$$L_{\alpha\beta} v_\beta^{n+1} = M_{\alpha\beta} v_\beta^n - \Delta t F_\alpha(v_\beta^{n+\frac{1}{2}}) \quad (38)$$

時間間隔 Δt 는 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 安定條件에 의하여 다음 式으로 구한다⁽¹⁶⁾.

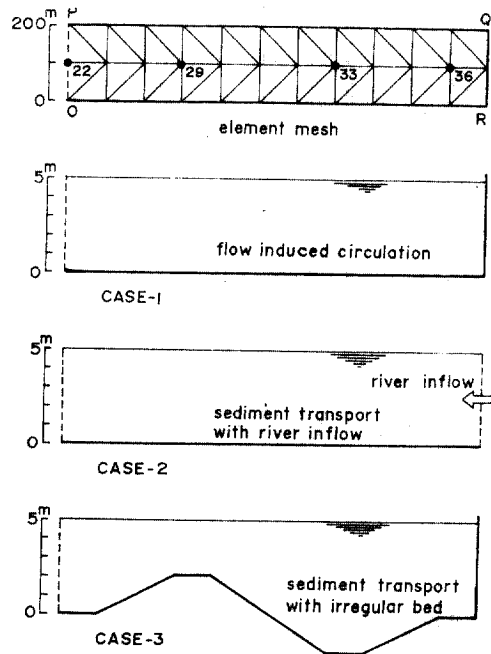
$$\Delta t \leq \frac{\Delta s}{\sqrt{2} \sqrt{gh}} \quad (39)$$

여기서 Δs 는 要素의 邊 중에서 가장 작은 邊의 길이이다.

5. 模型의 檢定 및 實際港灣에 適用

本 研究에서 개발된 模型의 일부인 式 (30), (31)에 의한 循環模型만을 따로 분리하여 正確解가 주어진 一次元水路에 대해 數值解를 구하고 正確解와 比較하였다.

그림 1의 경우 1과 같은 一次元水路에 대한



for CASE 1, 2 & 3

$$\bar{\eta} = 0.7 \sin\left(\frac{2\pi}{4000} t\right) \text{ at } O-P$$

그림 1. 一次元水路의 要素網과 흐름條件

正確解는 移送項과 摩擦項을 무시하면 Brebbia⁽¹²⁾에 의해 다음과 같은 式으로 주어진다.

$$\eta = \frac{a}{\cos\left(\frac{\omega l}{\sqrt{gh}}\right)} \cos\left[\frac{\omega l}{\sqrt{gh}}\left(\frac{x}{l}-1\right)\right] \sin \omega t \quad (40)$$

$$u = -\frac{a\sqrt{gh}}{h\cos\left(\frac{\omega l}{\sqrt{gh}}\right)} \sin\left[\frac{\omega l}{\sqrt{gh}}\left(\frac{x}{l}-1\right)\right] \cos \omega t \quad (41)$$

여기서 x 는 水路入口로 부터의 거리, a 는 진폭, ω 는 $2\pi/T$, l 은 水路의 길이, h 는 수심, T 는 주기를 각각 표시한다.

境界條件으로는 水路入口 O-P에 水面變位를 式 42에 의해 대입하고, P-Q-R-O에는 式 6을 대입하였으며 初期條件은 일반적으로 初期에 알려지지 않은 실제문제와 부합시키기 위해 cold start ($\eta=0, u_t=0$)을 적용한다.

$$\bar{\eta} = a \sin \omega t \quad (\text{여기서 } a=0.7 \text{ m}, \quad T=4,000 \text{ sec}, \quad \Delta t=10 \text{ sec}) \quad (42)$$

正確解와 本模型에 의한 數值解를 比較해 보면 그림 2와 같이 時間이 경과함에 따라 初期條件의 영향이 점차 소멸되어 數值解와 正確解가 일치됨을 알 수 있다.

다음 단계로 그림 1의 경우 2와 같이 Q-R에 浮遊砂濃度 1.0 kg/m^3 , 流速 0.05 m/sec 를 갖는 흐름이 灣으로 流入되고 水路바닥에서의 限界洗掘摩擦應力(τ_{cs})와 限界堆積摩擦應力(τ_{cd})가 각각 0.3 N/m^2 와 0.07 N/m^2 인 경우에 대해 流砂移送模型을 적용하면 그림 3과 같다.

마지막으로 경우 3과 같이 水路底面の 凹凸이 심한 경우에 대해 本模型을 적용하여 潮汐에 의한 流砂移送現象과 底面の 變化를 살펴보면 그림 4와 같다. 여기서 사용한 τ_{cs} 와 τ_{cd} 는 短期間에 대한 洗掘과 堆積을 현저히 나타내기 위해 실제보다 훨씬 작은 값인 0.02 N/m^2 와 0.015 N/m^2 를 각각 사용하였다. 隆起部에서는 洗掘이 일어나고 洗掘된 土砂는 凹部(節點 33과 36)에 堆積이 되며 이와같은 현상은 平衡상태에 달

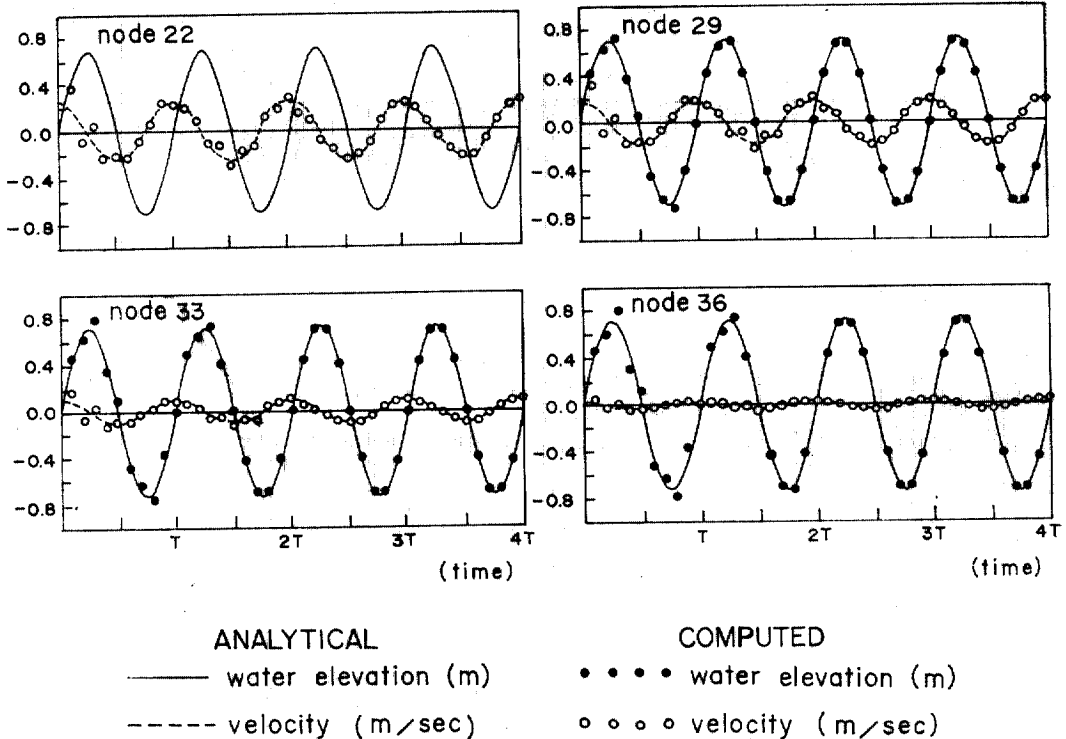


그림 2. 一次元水路에서 正確解와 數值解의 比較

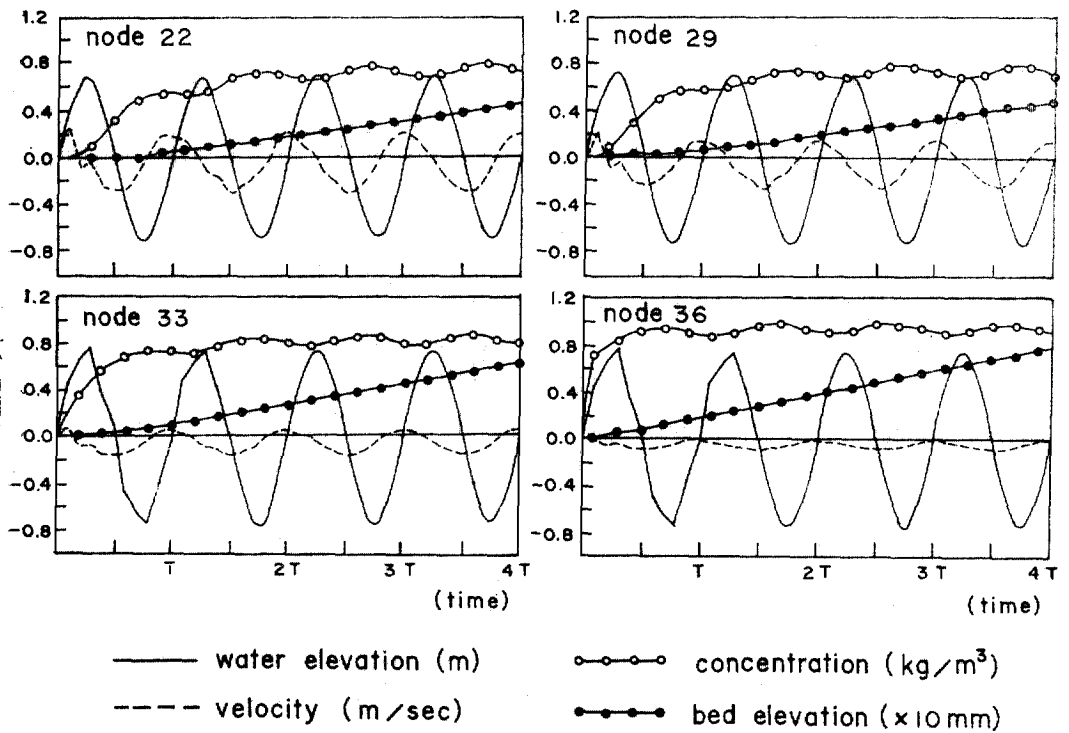


그림 3. 河川이 流入되는 경우 循環과 土砂移送의 計算結果

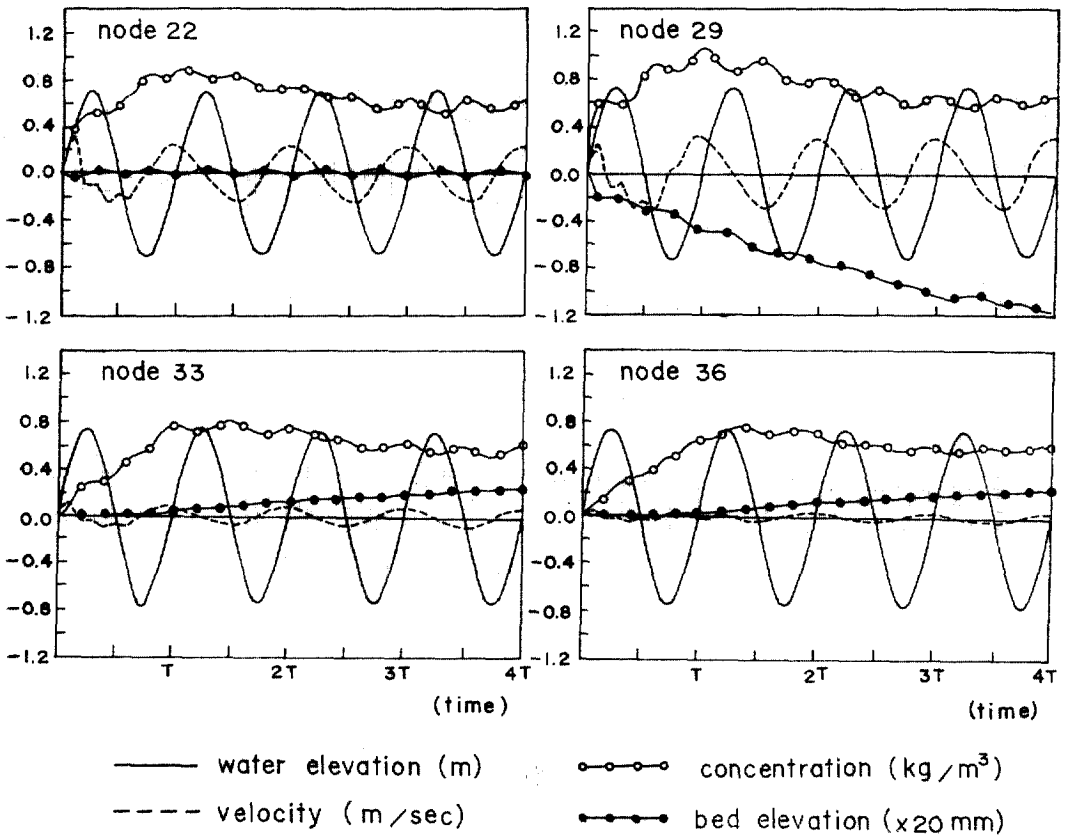


그림 4. 水路底面の 凹凸이 심한 경우 循環과 土砂移送의 計算結果

할 때까지 계속될 것이다. 경우 2 및 3에서 공통적으로 사용한 제반상수는 다음과 같다.

$$\rho_s = 2,650 \text{ kg/m}^3, S_b = 2.65, m = 0.65, M = 1.85 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2/\text{sec}, D_x = D_y = 10 \text{ m}^2/\text{sec}, g/C_s^2 = 0.0025, w_f = 5.0 \times 10^{-4} \text{ m/sec}, d = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$$

本模型을 실제항만에 적용시키기 위해 汚染度가 비교적 높은 釜山港을 선정하였다.

그림 5는 有限要素解析을 위한 釜山港의 三角形要素網을 나타낸다.

釜山港은 2개의 開放境界(open boundary, A-B, C-D)와 하천이 流入되는 境界(F-E)로 구성되며 2개의 開放境界중 影島大橋에 위치한 境界(A-B)는 흐름이 자유로이 드나들 수 있는 自由境界(free boundary)이다.

自由境界의 특성을 살펴보기 위해 그림 6과 같이 釜山港을 簡單化한 二次元 흐름에 대해 循環模型을 적용시켜 보기로 한다.

自由境界(G-H)에는 아무런 境界條件도 대입하지 않았으며 開放境界(I-J)에는 水面變位($\bar{\eta}$)

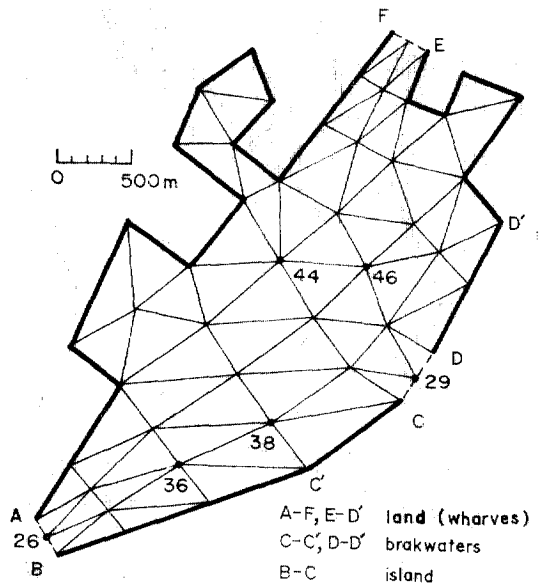


그림 5. 釜山港의 有限要素網

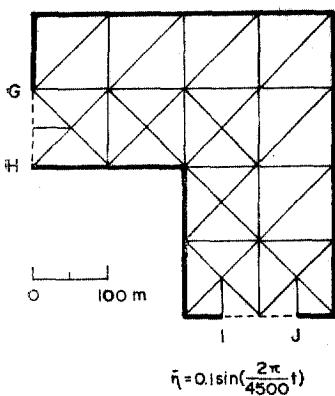


그림 6. 簡單化한 釜山港의 有限要素網

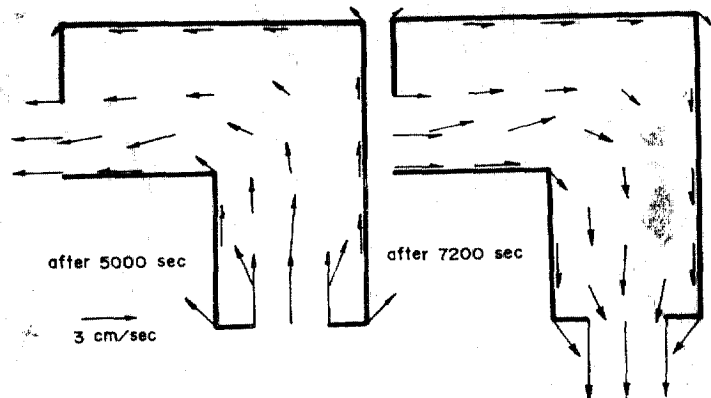


그림 7. 計算된 流速分布(1週期 4,500)

를 대입하고 나머지 다른 境界에는 境界面을 통한 물의 流入出이 없는 固定境界條件을 대입하였다. 그림 7은 계산된 流速分布를 나타낸 것이며 開放境界에서의 흐름현상을 잘 설명해 주고 있다⁽¹⁷⁾.

실제 釜山港에서의 循環模型에 대한 境界條件으로는 自由境界(A-B)에는 境界條件을 대입하지 않았으며, 開放境界(C-D)에는 $\bar{\eta} = 0.6(1 -$

$\cos \frac{2\pi}{T}t)$, 하천이 流入되는 곳(E-F)에는 $\bar{u}_n = -0.05$, 나머지 固定境界에는 $\bar{u}_n = 0$ 을 대입하였으며 潮汐週期(T)는 44,700 초이다. 또한 流砂移送模型에 대한 境界條件으로는 河川流入點(E-F)에 $\bar{C} = 0.5$ 를 대입하고 나머지 모든 境界에는 式 15와 같이 $\bar{J} = 0$ 으로 하였으며 τ_{cs} 는 0.3, τ_{ca} 는 0.07을 사용하였다. 여기서 短期間에 底面變化가 나타나도록 하기 위해 河川水의 土砂濃度에

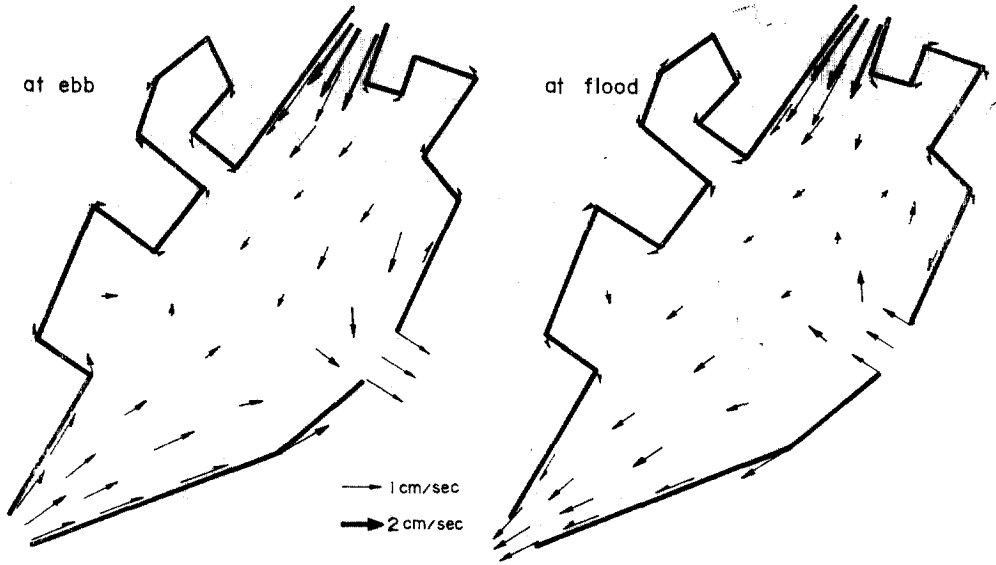


그림 8. 計算된 潮汐循環(釜山港)

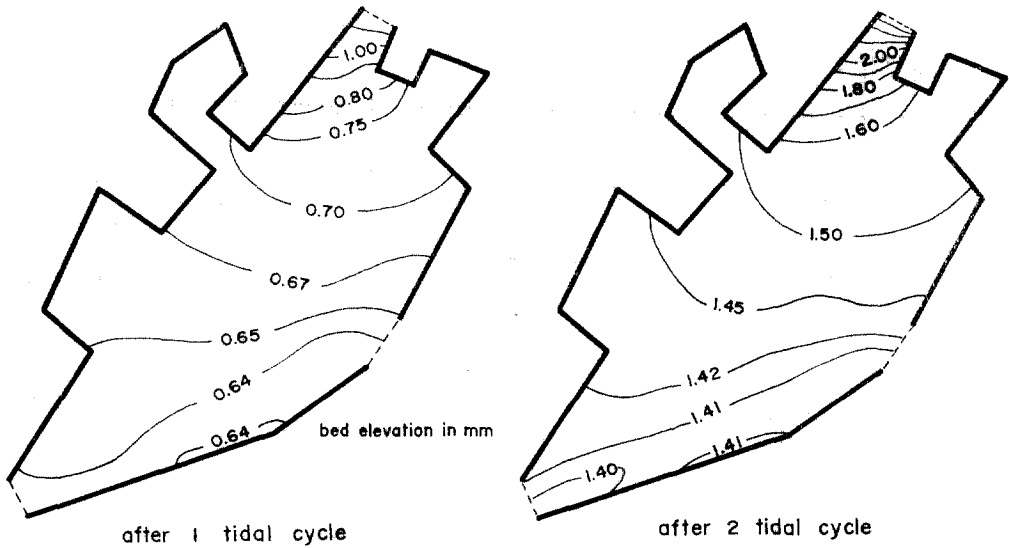


그림 9. 模擬된 土砂의 堆積現象(釜山港)

실제보다 큰 값을 사용하였다.

그림 8은 계산된 流速分布이고 全般的인 循環은 釜山港의 實測値와 대체로 近似하게 나타났다⁽⁶⁾.

그림 9는 1주기 및 2주기에서의 底面變化를 나타낸 것이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 釜山港에서 循環流의 流速이 전체적으로 미약하여

洗掘現象은 일어나지 않고 있으며 비교적 流速이 큰 부분 즉 26-36-38-29로 이어지는 부분에는 土砂의 堆積이 다른 곳보다 적게 나타났다.

6. 要約 및 結論

河口, 港灣 등에서 凝集性 및 非凝集性土砂移送의 豫測을 위한 二次元土砂移送推定模型이 開

發되었으며 本 模型은 淺海循環模型과 底面에서의 土砂移送連續方程式과 浮遊砂擴散方程式으로 구성되는 土砂移送模型으로 이루어 진다. Galerkin 有限要素法으로 解를 구하였으며 時間積分은 二段階 Lax-Wendroff 方法에 의하였다.

正確解가 얻어진 一次元水路에 循環模型을 적용, 비교한 결과는 本 模型이 循環을 적절히 模擬하는 것으로 나타났으며 二次元水路의 計算結果도 예상되는 흐름樣相이었다. 水路局에 의한 釜山港의 潮流測定成果(1978年)는 흐름樣相을 나타내는 정도이어서 本 模型의 檢證은 불가능하였고 Computer의 容量과 計算時間의 과대로 충분히 많은 數의 要素로 釜山港의 水域을 분할하지는 못하였으나 本 模型에 의하여 계산된 흐름樣相은 觀測值에 대체로 近似하게 나타났다.

土砂移送推定模型의 遂行可能性을 시험하기 위하여 일차적으로 浮遊土砂를 수반하는 江이 灣內로 流入하는 경우와 外界로 부터 土砂의 流入은 없고 단순히 底面의 凹凸이 심한 경우의 一次元水路에 각각 數值模擬한 결과에 의하면 前者의 경우는 단순한 過負荷(overloading)현상으로 週期的 영향은 나타나지 않았고 後者の 경우에는 凸部에서 洗掘이, 凹部에서는 堆積이 일어나는 일반적인 사항이 설명되었다. 釜山港에 적용은 土砂移送에 관한 觀測資料가 없고 洗掘堆積현상이 미미한 것으로 나타나 河川에서 높은 濃度の 土砂가 流入하는 경우에 대하여 模擬되었다.

謝 辭

本 研究는 產學協同財團의 支援으로 수행되었는 바 同 財團에 謝意를 표하며 本 研究의 全般에 걸쳐 수고를 해준 漢陽大學校 土木工學科 尹性範 助敎에 感謝하는 바이다.

參 考 文 獻

1. Ariathuri, R., and Krone, R.B., Finite Element Model for Cohesive Sediment Transport, *J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 102, No. HY3*, March, 1976, pp. 323-338.
2. Christodoulou, G.C., and Connor, J.J., Dispersion in Two-layer Stratified Water Bodies, *J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 106, No. HY4*, 1980, pp. 557-573.
3. Connor, J.J., and Brebbia, C.A., *Finite Element Techniques for Fluid Flow*, Newnes-Butterworths, 1976.
4. Graf, W.H., *Hydraulics of Sediment Transport*, McGraw-Hill, New York, 1971.
5. Hydrographic Office of R.O.K., Technical Reports, Pub. No. 1101, Seoul, Korea, 1978.
6. Kawahara, M., et al, Two-step Explicit Finite Element Method for Tsunami Wave Propagation Analysis, *Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 12*, 1978, pp. 331-351.
7. Kawahara, M., et al, Two-step Explicit Finite Element Method for storm surge Propagation Analysis, *Int. J. Num. Meth. Engng., Vol. 15*, 1980, pp. 1129-1148.
8. Krone, R.B., Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Processes, *Technical Report, Hydraulic Eng. Lab., Univ. of California, Berkeley, Calif.*, 1962.
9. McDowell, D.M., and O'Connor, B.A., *Hydraulic Behavior of Estuaries*, John Wiley & Sons, New York, 1977.
10. Onishi, Y., Sediment-Contaminant Transport Model, *J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 107, No. HY9*, 1981, pp. 1089~1107.
11. Parthenaides, E., A Study of Erosion and Deposition of Cohesive Soils in Salt Water, thesis presented to the Univ. of Calif. at Berkeley, Calif., in partial fulfillment of the requirements for the degree of Ph. D., 1962.
12. Partridge, P.W., and Brebbia, C.A., Quadratic Finite Elements in Shallow Water Problems, *J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 102, No. HY9*, 1976, pp. 1299~1313.
13. Pinder, G.F., and Gray, W.G., *Finite Element Simulation in Surface and Subsurface Hydrology*, Academic Press, 1977.
- 14) Roache, P.J., *Computational Fluid Dynamics*, Hermosa Publishers, Albuquerque, N.M., 1976.
15. Taylor, C., and Davis, J.M., Tidal Propagation and Dispersion in Estuaries, *Finite Elements in Fluids, Vol. 1*, John Wiley & Sons, 1975.
16. Wang, J.E., and Connor, J.J., Finite Element Modeling of Hydrodynamic Circulation, *Numer-*

- ical Methods in Fluid Dynamics*, Pentech Press, London, 1974.
17. Yoon, T.H., and Yoon, S.B., Mathematical Simulation Model of Flow Induced Circulation in a Harbor, *Proc. of Int. Conf. at 3rd Cong. of the APD-IAHR Bandung, Indonesia*, 1982.
18. Zienkiewicz, O.C., *The Finite Element Method*, McGraw-Hill, third edition, 1977.

(接受: 1982.5.13)