

循環流에서의 浮遊物質의 移動特性

Transport Characteristics of Suspended Solids in Two-Dimensional Circulating Flows

金孝重* 朴聖允* 呂運光*

1. 序論

최근 산업의 발달과 이로 인한 폐기물의 무분별한 放出로 河川, 河口, 湖水 및 海岸地域의 水質汚染 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이러한 지역에서 水質汚染 문제를 효과적으로 해결하기 위해서는 汚染物質의 化學的, 物理的 처리 뿐만 아니라, 흐름에 따른 浮遊物質의 移送 및 바다에서의 堆積과 浸蝕에 대한 연구가 요구된다.

흐름과 浮遊物質의 移送에 관해서는 지금까지 많은 연구가 진행되어져 왔고 또 여러 가지 數值模型들이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 既存의 模型들은 대부분 浮遊物質의 堆積과 浸蝕은 고려치 않고 흐름에 따른 浮遊物質의 移送에 관심을 두고 있다. 하지만 洪水時 上流로 부터 流入되는 浮遊物이 河口나 湖水 같은 넓은 斷面을 갖는 流域에 도달하면 堆積되고, 이것은 흐름에 직접 영향을 주며, 또 이렇게 變動된 흐름은 堆積된 물질을 다시 浸蝕, 浮上시켜 移送하는 과정을 반복하게 된다. 따라서 미세한 堆積物質이 많은 지역에서는 바다에서의 堆積과 浸蝕 및 浮遊物質의 移送를 연계하여 解析하여야 정확한 結果를 얻을 수 있다.

본 研究에서는 水深積分에 의한 2次元 흐름模型, 移送模型 및 바다模型을 연계 하여 간단한 地形에 적용시켜서 浮遊物의 移送 및 浸蝕과 堆積에 대해서 알아 보았다. 흐름模型은 staggered grid상에서 ADI方法을 사용하여 流速을 결정하고, 바다模型에서는 바다에 작용하는 剪斷應力을 계산하여 堆積 또는 浸蝕량을 결정하게 된다. 移送模型에서는 바다模型에서 구한 堆積과 浸蝕량으로 浮遊物의 移動을 解析하고 다시 흐름模型에 의하여 流速과 水位를 계산한다. 이러한 반복계산 과정을 통하여 흐름의 변화에 의한 바다變動을 알 수 있고 浚渫등에 의한 流域內 任意 地點에서의 濃度變化의 영향을 解析하는데 이용할 수 있다.

* 明知大學校 土木工學科 (Department of Civil Eng., Myong Ji University, Seoul 120-728 Korea)

2. 模型의 構成

2-1 흐름模型(Flow Model)

非壓縮性流體이고 壓力은 靜水壓분포를 이룬다고 가정하여 連續方程式 및 Navier-Stokes式을 水深에 대하여 平均을 취한 2次元 水深積分式을 사용한다. Fig.1에 대한 結果式은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{H}\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{H}\bar{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho H} \\ - \frac{1}{\rho H} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{H} T_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{H} T_{xy}) \right] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho H} \\ - \frac{1}{\rho H} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\bar{H} T_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{H} T_{yy}) \right] = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \bar{u}, \bar{v} 는 水深平均 流速이며, τ_{bx}, τ_{by} 는 바다에서의 剪斷應力이고 T_{xx}, T_{xy}, T_{yy} 는 아래와 같이 표시된다.

$$T_{xx} = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} [2\rho\nu \frac{\partial u}{\partial x} - \rho \overline{u'u'} - \rho(u - \bar{u})^2] dz \quad (4)$$

$$T_{xy} = T_{yx} = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} [\rho\nu (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}) - \rho \overline{u'u'} - \rho(u - \bar{u})(v - \bar{v})] dz \quad (5)$$

$$T_{yy} = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} [2\rho\nu \frac{\partial v}{\partial y} - \rho \overline{v'v'} - \rho(v - \bar{v})^2] dz \quad (6)$$

이들은 水柱內에 작용하는 粘性, 亂流에 의한 應力 및 水深에 대하여 平均을 취함으로써 발생하는 운동량의 변화에 의해 생기는 有效應力(effective shear stress)을 나타낸다. 그러나 이들의 영향을 정확하게 定量的으로 표시하는 방법은 아직 充分하지 못하며 많은 提案式중 여기서는 Ponce(1981)의 式을 사용하였다.

$$\bar{u}_{j,k}^* = (1-\alpha)u_{j,k} + \frac{\alpha}{4} (\bar{u}_{j-1,k} + \bar{u}_{j,k-1} + \bar{u}_{j,k+1} + \bar{u}_{j+1,k}) \quad (7)$$

여기서 α 는 加重常數(weighting factor)이며 이것을 代入하면 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{1}{\rho H} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(H T_{xx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H T_{xy} \right) \right] = \epsilon \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

여기서 $\epsilon = a \frac{(\Delta X)^2}{2\Delta t}$ 이다. 한편 바닥摩擦力은 τ_b 는 Chezy式을 사용하였다.

$$\tau_{bx} = \rho g \frac{\bar{u}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)^{0.5}}{C^2} \quad (9)$$

여기서 C = Chezy 常數 이다.

2-2 移送模型(Transport Model)

浮遊物質의 移動에 따른 濃度分布 變化를 알기 위한 模型으로 흐름模型과 같이 水深에 대하여 積分된 擴散方程式을 解析하며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[HC \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\bar{H}uc \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[H\bar{v}c \right] \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[HK_x \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[HK_y \frac{\partial C}{\partial y} \right] + S_e - S_d \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 K_x 및 K_y 는 x,y方向의 擴散係數이고 S_e 와 S_d 는 浸蝕과 堆積에 따른 濃度變化量을 표시한다.

2-3 바닥模型(Bed Model)

流速이 증가함에 따라 底面에서의 剪斷應力도 증가하게 되며, 어떤값에 도달하면 底面에 위치한 粒子들이 浮上하게 되고 일단 떠오른 粒子는 흐름에 의하여 移動하게 되고 이들이 流速이 작은 곳에 도달하면 沈降하며 堆積된다. 式(10)에 있어 浮上되는 量과 沈降되는 量을 각각 S_e 와 S_d 라 할때 다음式을 사용하였다.

$$\begin{cases} S_e = \epsilon_0 e^{\alpha(\tau_b/\tau_{ce} - 1)} & \tau_b > \tau_{ce}, \text{ for unconsolidated sediment} \\ S_e = E \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) & \tau_b > \tau_{ce}, \text{ for consolidated sediment} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} S_d = V_s \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right) C & \tau_b < \tau_{cd} \\ S_d = 0 & \tau_{cd} < \tau_b < \tau_{ce} \end{cases} \quad (12)$$

여기서 ϵ_0, α, E 등은 浮上粒子의 特性에 따라 결정되는 常數이고, τ_b 는 바닥에서의 剪斷應力이며 τ_{ce} 및 τ_{cd} 는 浮上또는 沈降할때의 限界값(critical shear stress for erosion/deposition)이다.

계산절차는 흐름모델로 부터流速과水位를 계산하고 이들로부터各格子點에서의 바닥剪斷應力을 구한다. 이들應力에 따라 바닥模型에서浮上및沈降을 결정하고 이들을移送模型에代入하여濃度分布를 계산한다. 浸蝕과堆積에 따른河床變化를 고려하여 다음段階의 계산을反復함으로서底質의移動을 구할 수 있도록 하였다. 支配方程式의差分化는 Fig.2에 표시한것 처럼 Platzman(1964)에 의하여 제안된 Staggered Grid로서各式을差分化하였으며 Leendertse(1967)처럼 ADI方法으로速度,水位,濃度를 계산하였다.

3. 數值實驗 및 水理模型實驗結果 檢討

우선本模型의 타당성을 검토하기 위하여 Ponce(1981)가 행한 Fig.3과 같은矩形灣에 대하여數值實驗을 하였다. 14 m × 15 m의長方形으로水深은 2.5 m로一定하고 바닥傾斜는 없다. 流入과流出口는幅 4 m의水路이며 0.5 m/s의一定流速을境界條件으로 하였으며 이와같은同一條件으로本模型에서 계산한 결과는 Fig.4에 나타내었다. 이로부터灣內的순환현상이 뚜렷이 나타나고 있으며 Ponce의 결과와 매우 유사함을 알 수 있다.

한편浮上物質의移動에 따른濃度分布를 알아보기 위하여 Fig.5와 같이水理模型實驗을 행한다. 이러한水路에 있어流速벡터를 표시한 것이 Fig.6이며 Fig.7은流入部에서一定한濃度를流入시켰을때의時間에 따른分布이며 Fig.8은 바닥에底質을 채운 후 흐름에 의하여浮上 또는沈降하며 이루는濃度分布를 나타낸 것이다. 현재까지의實驗結果로 보아本數值模型이 실제 흐름및移送현상은 잘再現시키고 있다고 보여지나底質의移動解析을 위한 바닥模型의 경우底面粒子가 갖는精密한水理的特性(τ_{ce} , τ_{cd} , ϵ_0 , α 등)이 선행되어야 좋은結果를 얻을수 있다.

4. 參考文獻

- Krone, R. B., 1972. A Cohesive Sediment Transport Model, Technical Bulletin 19, U.S Army Corps of Engineers, June.
- Lean, G. H. and Weare, T. J., 1979. Modeling Two-Dimensional Circulating Flow, ASCE, VOL. 105, JAN., pp. 17-26.
- Leendertse, J. J., 1970. A Water-Quality Simulation Model for Well-Mixed Estuaries and Coastal Seas, Vol. I, RM-6230-RC, The Rand Corp., Santa Monica, Calif.
- Platzman, G. W. and Rad, D. B., 1964. Spectra of Lake Erie Water Levels, J. of Geophysical.
- Ponce, V. M. and Yabusaki, S. B., 1981. Modeling Circulation in Depth-Averaged Flow, ASCE, HY11, Vol. 107, NOV., pp. 1501-1518.

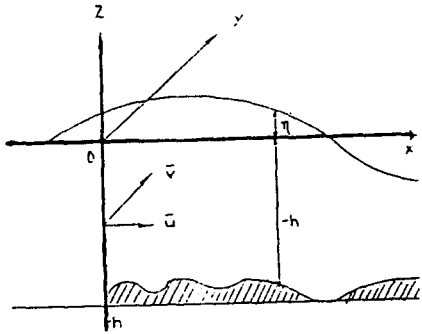


Fig. 1 Coordinate system

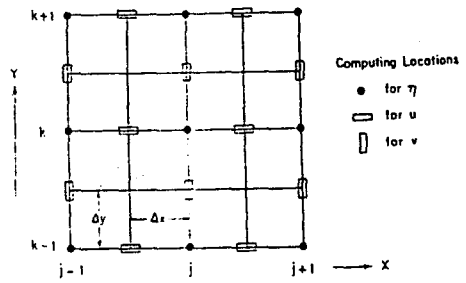


Fig. 2 Grid system

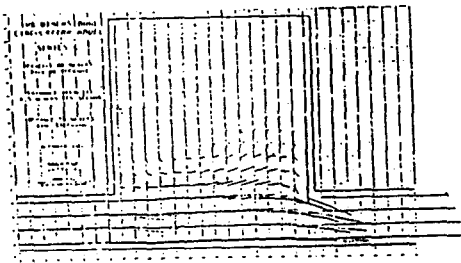


Fig. 3 Ponce's results

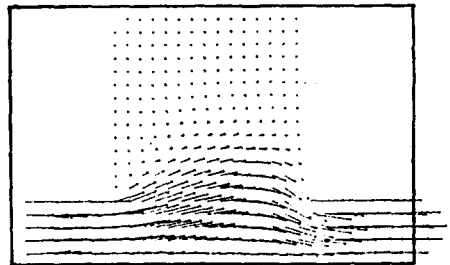


Fig. 4 Results in this study

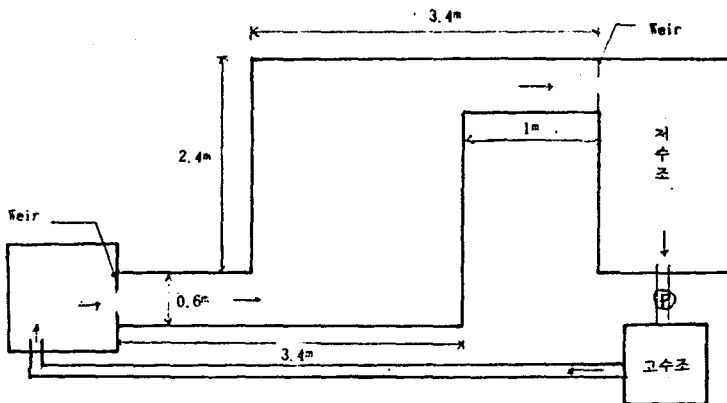


Fig. 5 Experimental set up

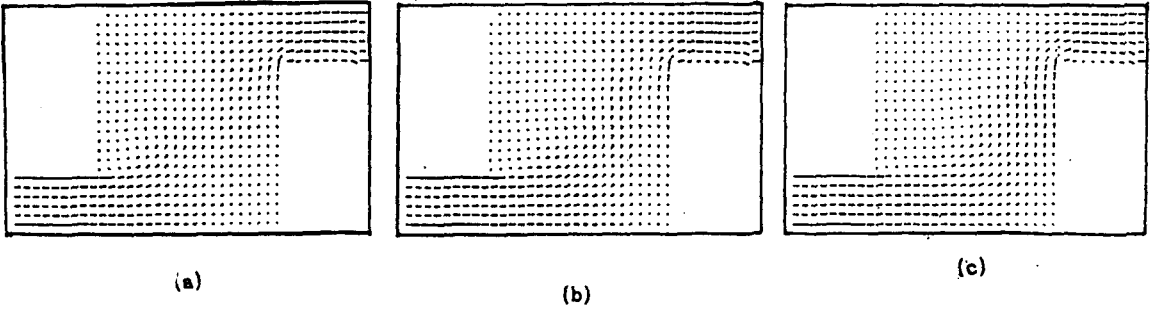
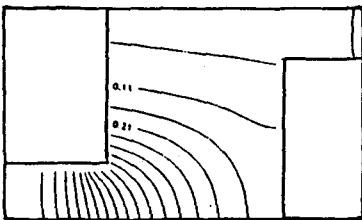
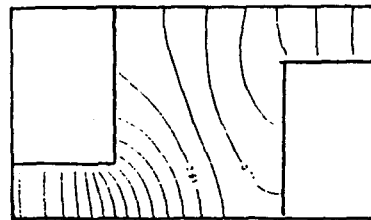


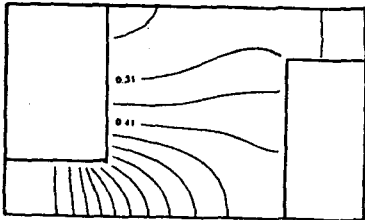
Fig. 6 Flow pattern



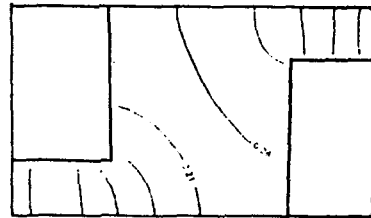
(a)



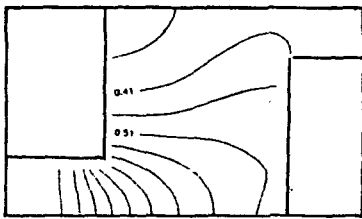
(a)



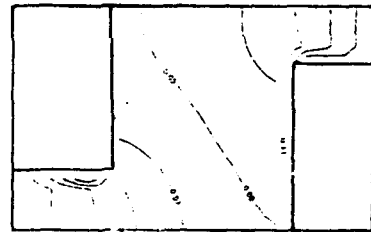
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 7 Constant concentrations

fig. 8 Erosion and deposition