

# 河口流出流에 관한 3次元數値解析

(Three-Dimensional Simulation Model for River Plume)

梁 輪 模 釜山大學校 土木工學科 教授

許 再 寧 大阪大學大學院 工學研究科

## 1. 序 論

河口流出流는 溫排水와 마찬가지로 水平 및 鉛直方向으로부터 周圍水를 連行(entrainment)하면서 퍼져 나간다. 同時에, 密度差에 依한 成層安定效果는 鉛直方向의 混合을 抑制해서 水平方向의 퍼짐을 促進한다. 流量이 적어서 浮力效果가 河口로부터 바로 나타나는 경우에는, 河川水는 即時 四方으로 퍼져 나가는 potential 流的인 流動으로 된다. 그러나, 運動量이 卓越한 噴流型(jet-type)의 河川流가 淺水域에 流出하여 海底面에 附着해서 流下하는 경우에는, 下層으로부터의 周圍水의 連行이 遮斷되기 때문에, 深水域에의 流出流와는 약간 다른 퍼짐特性을 나타낸다.

本 研究에서는 河口流出流의 퍼짐機構를 究明하기 위한 3次元數値 model 을 開發하여 日本의 瀨戶內海에 流入하는 明石川의 河口流出流에 適用한다. 數値解析의 技法으로서는 有限差分法을 使用한다.

## 2. 數值 model

沿岸域에 있어서의 濫排水의 表層放流나 河口流出流는 스스로의 運動量流束에 더하여 密度差에 基因하는 浮力效果의 影響을 받는 流動으로서 一般的으로 表層放流密度(噴)流라고 한다. 이러한 流動을 解析하기 爲하여 支配方程式은 3次元非定常流의 運動方程式, 密度差의 輸送方程式 및 連續方程式으로 構成된다. 더욱, 時間 및 空間的인 密度變化를 重力項에 있어서만 考慮하는 Boussinesq 近似를 導入한다. 또한, 鉛直方向의 加速度가 水平方向의 그것에 比해서 微小하다고 假定하여 鉛直方向 運動方程式은 靜水壓近似에 依해 簡略化된다. 亂流에 依한 運動量과 物質의 擴散은 各各 渦動粘性和 渦動擴散의 概念을 採用한다.

質量, 運動量 및 密度差의 保存을 Fig. 1과 같은 control volume에 對해서 適用한다. 靜水壓近似를 採用하기 때문에, 流體의 鉛直方向運動을 規定하는 方程式이 없으므로, 鉛直方向流速은 各 control volume에 連續條件을 適用함에 依해 求해진다.

河川流의 流入에 依한 自由水表面의 變動은 一般的으로 數cm以內이다.

그러나, 自由水表面의 傾斜는 局所壓力傾斜에 顯著한 影響을 미쳐서 流出流의 퍼짐을 直接的으로 制御한다. 따라서, 水面變位에 關係서는 高精度의

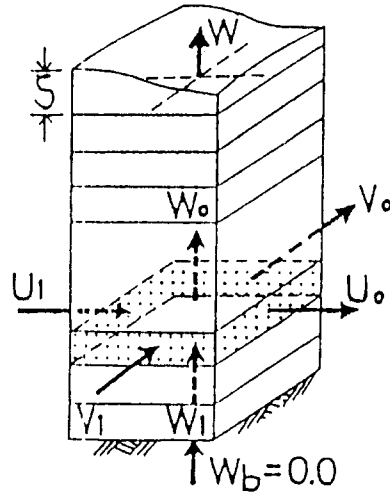


Fig. 1. Definition Sketch.

計算을 必要로 한다. 이러한 問題를 效果的으로 處理하기 위해 널리 利用되고 있는 方法은, 周圍水의 攪亂되지 않은 水平한 自由水面을 Rigid의 非摩擦 Lid 로써 置換하는 것이다. 이 節次에 依해 얻어진 水表面의 變位는 W의 計算에서 發生하는 誤差와 結合되고, 그 誤差가 累積되어서 計算에 있어서의 不必要한 振動 및 不安定의 原因이 될 수 있다. 이와 같은 不安定要素를 除去하기 위하여 水表面에는 아무런 拘束條件도 부과하지 않는다. 自由水表面의 標高는 後에 敘述하는 바와 같은 方法으로 計算된다.

有限差分 scheme 으로서는 Two-Step Leap-Frog法을 利用한다. 또한 移流項의 差分에는 Upwind 差分法을 採用한다. 數值解는 다음과 같은 順序에 依해 얻어진다.

1) 加重平均 parameter  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq 1$ )를 導入하여 壓力項中에서  $(n+1)$  step 에 있어서의 自由水面의 變動量을  $\zeta^{n+1} = (1-\theta)\zeta^{n+2} + \theta\zeta^{n+2}$  와 같이 表現한다. 여기에서  $n, (n+1)$  및  $(n+2)$ 는 時間 step 을 나타낸다. 이 壓力項을 利用한 X方向運動方程式을 各 control volume 마다 計算함에 依해 水平方向流速成分  $U^{n+2}$  및  $V^{n+2}$ 의 近似解를 求한다.

2)  $U^{n+1}$  및  $V^{n+1}$ 에 關係서도  $(n+2)$  step 의 近似解와  $n$  step에서의 既知量을 利用한 加重平均을 行하고 그 값을 各 control volume의 連續方程式에 代入해서  $\zeta^{n+2}$ 를 求한다. 이 計算過程에서 壓力項을 媒介로해서 隣接하는 column 의  $\zeta^{n+2}$ 도 包含되어지기 때문에 最終的으로는  $\zeta^{n+2}$ 에 관한 連立一次方程式을 푸는 것으로 된다.

3) 壓力項의 加重平均表示를 包含하는 X方向運動方程式으로부터  $U^{n+2}$  및

$V^{*+2}$ 를 求한다.

4) 連續方程式으로부터 鉛直方向成分  $W^{*+2}$ 를 底面으로부터 順次的으로 求한다. 底面에서의 鉛直方向流速  $W^{*+2}$ 는 0으로 둔다.

5) 時間從屬의 密度差輸送方程式으로부터 密度差를 求한다.

### 3. 現地調査 및 model의 適用

明石川은 日本의 瀨戶內海 (Seto Inland Sea)에 流入하는, 河口幅 120 m의 小河川이다. 河口附近의 海底地形은 水深 10 m以內로 平坦하지만 深海側 600 m에서 1/3~1/5의 海底傾斜를 갖는다.

現地調査는 神戶 (Kobe)市 當局에 依해 1981年 6月부터 1983年 7月에 걸쳐서 實施되었다. 海洋觀測 및 航空寫眞觀測이 行해졌는데, 海洋觀測은 流速과 流跡을 測定하는 流況調査와 더불어 鹽分濃度와 水溫分布가 水平·鉛直方向의 約 35點에 걸쳐서 同時に 測定되었다.

Photo 1은 1983年 6月 21日의 河口에서의 密度 Froude 數 ( $F_{do} = U_o / \sqrt{\epsilon_o g H}$ ,  $\epsilon_o = \Delta\rho_o / \rho_s$ ,  $\Delta\rho_o = \rho_s - \rho_o$ ,  $\rho_s$  = 基準密度,  $g$  = 重力加速度  $H$  = 河口에서의 放流水深,  $U$  = 放流流速)가 4.1, 流量 29.1  $m^3 / sec$ 일때의 航空寫眞의 一例이다.

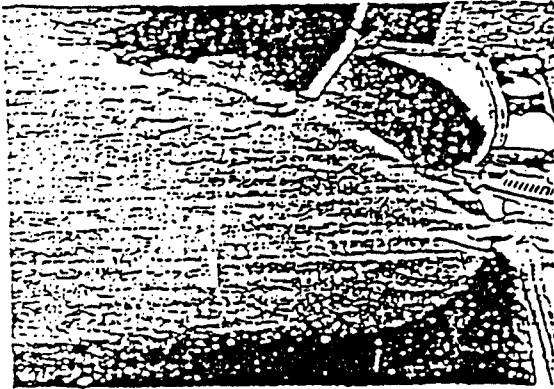


Photo 1.

model의 適用은 觀測結果에 根據하여 密度 Froude 數 2.1 및 4.1의 2case에 대하여 實施한다. 이 計算에 있어서 18(offshore)×15(shoreline)×5~10(vertical)의 格子網을 採用한다. 그 格子間隔은  $\Delta x(\text{offshore}) = 20 \sim 30 \text{ m}$ ,  $\Delta y(\text{shoreline}) = 5 \sim 300 \text{ m}$  및  $\Delta z(\text{vertical}) = 0.3 \sim 1.5 \text{ m}$ 이다.

深海의 開境界는 汀線으로부터 1300 m, 沿岸境界는 河口中心으로부터 1300 m 水深은 最大 10 m이다. 差分時間間隔은 1.0 sec로 한다. 水平 및 鉛直方向의 渦動粘性 / 擴散係數는 各各  $0.5 \times 10^4 \text{ cm}^2 / \text{sec}$ 로 한다. 더욱, 鉛直方向의 亂流輸送은 河川水와 海水와의 密度差에 基因하는 浮力安定效果의 影響을 받아서 抑制된다. 이러한 密度成層의 影響을 考慮하기 위하여 鉛直方向의 亂流係數는 局所 Richardson 數의 함수로서 나타내도록 하고, Webb (1970) 및 Kondo et al. (1978)의 提案式을 利用한다.

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{z0}(1 + 5.2 R_i)^{-1} \quad (\text{by Webb})$$

$$K_z/\varepsilon_z = \begin{cases} 1/7R_i & \text{for } 1.0 \leq R_i \\ 1/\{6.873R_i + 1/(1+6.873R_i)\} & \text{for } 0.01 \leq R_i \leq 1.0 \end{cases} \quad (\text{by Kond at al.})$$

여기에서

$$R_i = \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho / \partial Z}{(\partial U / \partial Z)^2}$$

#### 4. 計算結果 및 考察

Fig. 2 및 Fig. 3은 河口에서의 放流密度 Froude 數가 2.1 및 4.1의 경우의 實測結果와 計算結果와의 比較를 나타낸다. 兩圖에 있어서 左圖은 實測結果, 右圖은 計算結果이다. 實線은 流速 vector의 等值線을, 點線은 相對密度差  $\Delta \rho / \Delta \rho_0$ 의 等值線을 나타낸다. 實測의 等流速線과 等密度線은 河口近傍에서 複雜한 分布形狀을 보이고 있지만, 全體적으로는 計算結果와 良好한 一致를 나타내고 있다.  $F_{do} = 4.1$ 의 流出流의 等流速, 等密度分布는 流下方向으로 거의 相似形을 維持하면서 퍼져가고 있다. 이것에 대해  $F_{do} = 2.1$ 의 流出流에서는  $F_{do} = 4.1$ 의 경우에 比較해서 橫方向으로 보다 퍼져나간 分布形狀을 보이고 있다. 이것은 密度 Froude 數의 減少와 더불어 浮力效果가 增加하면, 河口에서의 水位上昇이 增加하여, 그 結果, 橫方向에로의 퍼짐이 助長되기 때문이다. y 方向運動方程式中の 壓力傾斜와 擴散項이 거의 平衡을 이루고 있는 것으로부터도 上述의 것을 確認할 수 있다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 各各의 경우의 流速 vector를 나타낸다. 流速

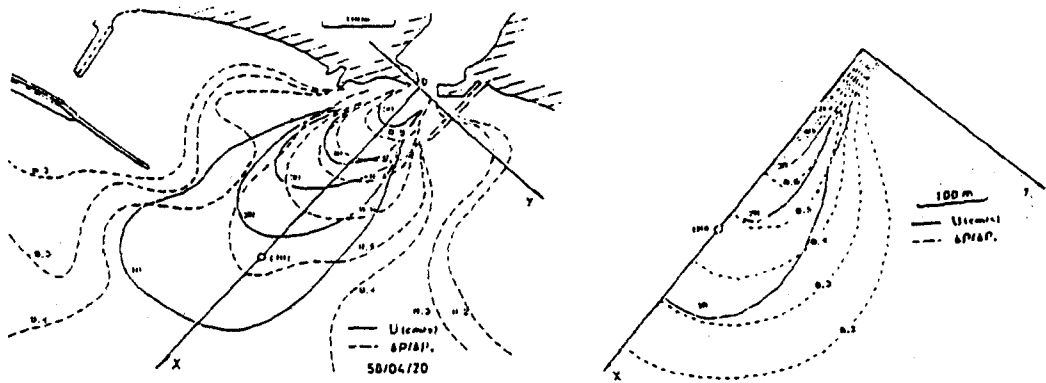


Fig.2 Field data and predicted result( $F_d = 2.1$ )

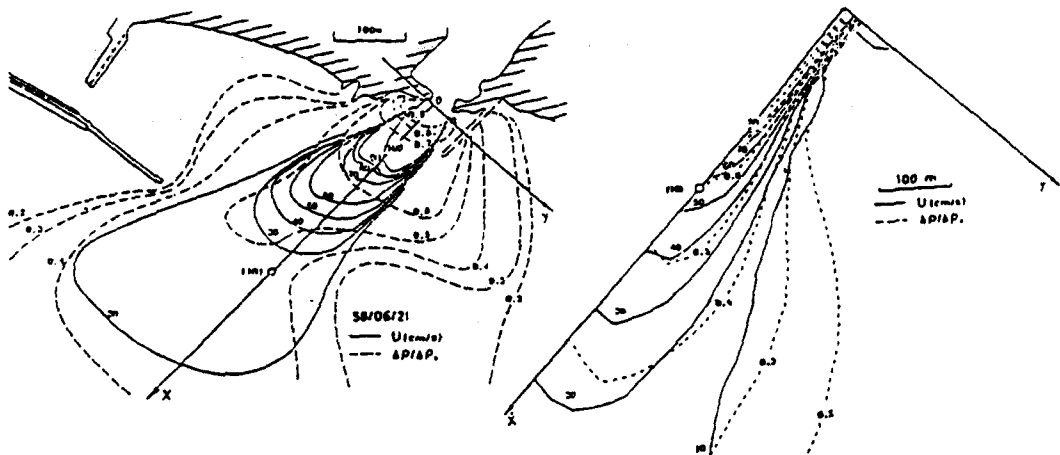


Fig.3. Field data and predicted result( $F_d = 4.1$ )

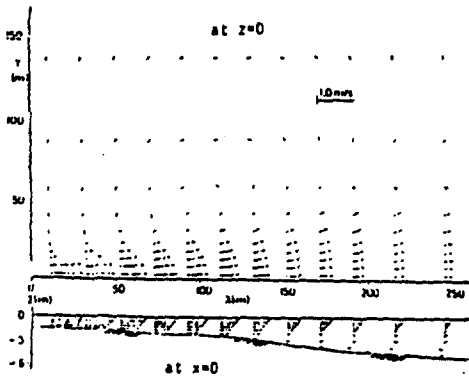


Fig.4. Velocity vector ( $F_d = 2.1$ )

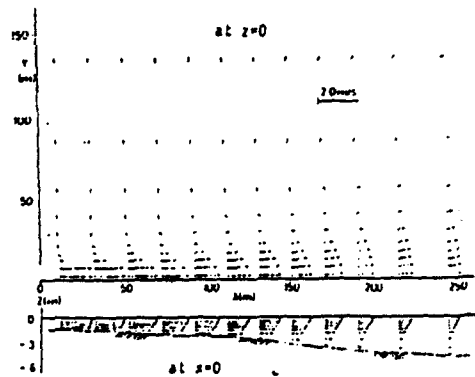


Fig.5: Velocity vector ( $F_d = 4.1$ )

의 크기는 矢印의 길이로서 表現하고 있다. 各圖의 上段은  $x - y$  平面의 表層流速 Vector, 下段은 中心軸에 있어서의  $x - y$  鉛直面의 流速 vector 이다. 表層流速分布는 上述의 橫方向퍼짐의 特性을 보다 詳細히 나타내고 있다. Fig. 4의 上段에 나타낸 水平面內의 流況圖로부터 中心軸의 兩側에 큰 循環이 形成되어 있는 것을 알 수 있다. 密度Froude 數가 더욱 큰 Fig. 5의 경우에는 河口流出流의 學動이 運動量 流束에 의해 支配되어 中心軸方向의 흐름이 卓越해 Fig. 4와 같은 循環은 보이지 않는다. 그러나, 流下와 더불어 橫方向의 流速成分이 增加한다.

河口付近에서는 底面地形의 影響에 의해 鉛直方向의 連行이 抑制된다. 이 點이 河口流出流와 深水域表層에 放流되는 溫排水와의 顯著한 相異點이다. Fig. 4에 底面に 沿한 微弱한 岸向의 흐름이 나타나 있는데 이것은 河川水가 流下와 더불어 浮力의 影響을 받기 시작하여 海底面으로부터 剝離하기 때문이다. 더욱, 이러한 淺水域에서는 鉛直方向의 퍼짐이 抑制되어, 그 結果, 河口付近에 있어서도 平面 2次元流的인 特徵을 가질 可能性이 높음을 알 수 있다.

## 參 考 文 獻

- Webb, E. K. (1970) Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 96, pp.67~90.  
Kondo, J. et al. (1978) J. Atm. Sci., Vol. 35, pp.1012~1021.