

河口에서의 一次水質模擬模型

(One Dimensional Water Quality Simulation Model in Estuaries)

尹 泰 勳
Yoon, Tae Hoon

차 례

- 1. 序 言
- 3. 河口에서의 一次元水質模擬模型
 - 3-1-1 物質傳達式
 - 3-1-3 縱移送擴散
 - 3-2 非潮汐速度를 使用한 水質模擬模型
- 5. 河口에서 鉛直 및 橫混合
- 2. 潮汐프리즈姆方法
 - 3-1 實時間에 대한 水質模擬模型
 - 3-1-2 連續 및 運動量方程式
 - 3-1-4 物質傳達式의 解
- 4. 密度流에서의 擴散

1. 序 言

河口에서의 汚染問題는 河口에 放流된 汚染物의 時間的 및 空間的 分布와 水質에 주는 影響을 포함한다.

河口의 汚染物은 上流 河川水에 의하여 流入될뿐만 아니라 河口沿岸에 位置한 放流管을 통하여 相異한 初期 稀釋程度에서 질形態로 流入된다. 이러한 汚染影響의 分析은 處理의 정도를 豫測하는데, 河口의 自然循環系에 汚染問題를 惹起함이 없이 受容할수 있는 汚水 및 廢水의 量을 豫測하는데, 混合과 汚染物의 移動을 豫測하는데 重要하다 또한 이는 廢水處理場의 配置와 型을 결정하는 經濟的 政治的 決定에 중요하게 된다.

汚染物이 周圍受容水와의 混合과 擴散過程은 河口의 海水浸透의 형태에 따라 다르게 된다. Pritchard³⁵⁾의 河口分類에 따르면 fjord와 鹽水楔기(salt wedge)와 같이 各層內에서는 鉛直混合이 현저하나 鹽度句配를 갖는 境界面을 통한 流體의 交換은 없는 強或層形(sharply stratified)河口, 현저한 鉛直密度句配를 역시 갖으나 鉛直混合은 일어나지 않는 弱混合形(partially stratified)河口, 強混合形(well mixed)河口로 분류된다

따라서 河口에 沿하여 低部에 위치한 放流管으로 부터 放流되는 廢水의 擴散은 上流 河川水에 의하여 流入되는 汚染物의 擴散과는 아주 다르게 된다. 本講座는 主로 強混合形河口에 관하여 논의된다.

河口에서의 混合과 擴散미케니즘은 縱方向과 鉛直密度句配에 의한 重力的 循環外에도 潮流速度의 振動으로 自然河川의 경우보다 더욱 복잡하게 된다. 河口에서 河川流量에 의한 流速은 潮流速度에 비하여 그 영향력이 매우 적다 그러나 河川水는 河口에서 중요한 플릿싱作用을 제공한다. 非保存的 物質은 生成 또는 減衰를 수반하는 反應作用을 갖는다. 즉 放射性物質의 減衰, 洩跡子의 流砂이나 河床에 集着, 溶解된 酸素量, BOD, 熱等의 降下가 고려되어야 하고 移送擴散係數를 增加하는 것으로 밝혀진 河床의 不規則, 河床의 死丘의 영향도 고려되어야 한다(Okubo³⁶⁾, Yoon⁴⁶⁾)

1950年 以前에는 汚染問題의 解析이 뉴욕港에 Phelps³³⁾에 의하여 적용된 潮汐프리즈姆概念(tidal prism concept)에 의존하였으며 이는 Stommel⁴⁰⁾와 韓國船舶海洋研究所⁴⁷⁾에 의하여 詳述되었다. 1950年 以後 汚染解析은 擴散과 質量移動(mass transfer)理論에 입각하여 發展되었으며 Taylor^{41,42)}의 亂流擴散이 발전의 효시가

되었다. 汚染分析의 대체적인 技法이 Pritchard³⁶⁾과 Pearson³²⁾에 의하여 要約되었다.

混合 및 擴散은 그 성격으로 봐 空間的으로 三次元이고 定常狀態에 달하는 경우가 극히 적은點에서 時間의 함수이다. 이러한 三次元數學的 模型의 解가 河川에 대해서 Cleary^{5), 6)} Yeh⁴⁵⁾에 의하여 다루어졌고 Navikov²⁸⁾의 解析에 따라 Carter, Okubo^{4), 31)}는 海洋에서 三次元擴散過程에 대한 模型을 提案했으며 이 외에도 Kullenberg²⁶⁾, Wang⁴³⁾에 의하여 주어진다. 그러나 일반적으로 三次元模型은 數學的으로 다루기가 어렵고 上記한 研究도 간단화한 조건하에서만 가능한 點을 들수있다.

따라서 相對的으로 영향력이 큰 要素만을 포함하는 簡單化한 數學的 模型이 필요하게 된다. 二次元空間系에서도 橫方向과 鉛直方向에서 同質(homogeneous)인 二種의 模型으로 平面模型이라고도 하는 模同質模型에서는 水質媒介變數가 主로 鉛直縱方向에서만 중요하며 이러한 河口는 鹽水混入을 포함하는 鉛直으로 成層된 경우이다. 鉛直同質(또는 立面)模型에서는 水質媒介變數가 橫縱方向에서만 變하는 것으로 가정된다.

一次元水質模型은 多次元模型에 比하여 數學的으로 다루기가 容易한 利點이 있으며 모든 量은 縱方向의 距離 x 와 時間 t 의 함수로 가정된다. 一次元模型에서 流速의 變화가 溶解된 酸素量의 濃度 등의 量은 橫斷面에 대한 空間平均值로 주어진다. 이러한 一次元模型이 鉛直 및 橫向同質성을 갖는 河口에 대해서는 잘 맞는 것은 물론이다. 不의 斷面의 河口에 대해서도 성공적으로 적용되어 왔다. 따라서 一次元模型에는 橫斷面的 變化가 포함되어야 한다. 또한 一次元模型은 容易하게 測定할 수 있거나 他種 預測資料에 關한 情報을 利用할 수 있고 預測도 容易하고 실제로 江이나 河口의 詳細 斷面이 入手可能한 경우가 적은 점에서 一次元模型이 實用的이라 하겠다.

Hinwood¹⁹⁾에 의하여 河口의 數學的 模型의 分類와 要約이 詳히 주어졌다.

本 論章의 目的이 總論의 流體力學으로 되어 있으나 斷面的 模型으로서 攪拌等의 混濁物의 初期擴散은 省略된다. 이 부분은 Stetzenbach and Harleman²⁹⁾과 Kch and Brooks²⁰⁾에 의하여 상세히 주어진다.

2. 潮汐프리즈름方法

古典적인 潮汐프리즈름理論(tidal prism theory)에서는 滿潮時에 河口로 流入된 물은 이미 河口에 있는 물과 완전히 混合된다고 가정되었다. 干潮는 滿潮時에 流入된 潮量과 한 潮汐週기 동안에 河口에 流入된 河川水

量의 合에 해당하는 流量을 河口로 부터 外海로 流出시키므로서 河川水에 의하여 河口에 流入된 汚染物의 一部分이 各 潮汐 동안에 河口로부터 빠져나가는 데 이러한 現象을 플릿싱(Flushing)이라 한다. 이러한 플릿싱이 계속되는 동안 河口의 染汚物은 서서히 河口를 빠져나가기 된다. 플릿싱되는 量은 總滿潮프리즈름과 河口內의 總水량과의 比에 의한다. 潮汐프리즈름(tidal prism)은 滿潮時와 干潮時 사이에 河口에 있는 물의 量으로 定義된다. 實際와 不合理한 河口의 完全混合의 假定下에서 유도된 潮汐프리즈름理論을 개선하기 위해 Ketchum^{7), 23), 24)}은 소위 修正潮汐프리즈름方法을 提案했다. 즉 河口를 上流에서 河口의 海洋端까지 n 개의 區間으로 分割하여 各 區間內에서는 滿潮時에 完全混合이 이루어지는 것으로 가정했다. 여기서 上流는 鹽水 浸入이 끝나는 河口上端(head of estuary)이 된다. 실제로 河口上端은 潮汐프리즈름 P_0 와 河川流入量 Q_0 가 같은 地點이며 이 지점보다 上流는 완전히 淡水區域으로 看做된다. 따라서 最上端區間은 干潮時를 滿潮時로 돌리는데 필요한 體積이 한 潮汐週기 동안 河川水의 流入量 Q_0 와 같은 區間으로 定義된다. 分割되는 各 區間의 길이는 平均潮汐移動距離(tidal excursion length)로 提案했으며 潮汐移動距離는 滿潮時에 汚粒子的 平均移動距離로 定義된다. 그림 1에서와 같이 各 區間의 길이는 滿潮時의 潮量이 隣接한 下流側 區間의 干潮時의 潮量과 같도록 결정된다. 이를 식으로 나타내면

$$\begin{aligned} V_1 &= V_0 + Q_0 \\ V_{2i} &= V_1 + P_1 = V_0 + Q_0 + P_1 \\ V_3 &= V_2 + P_2 = V_0 + Q_0 + P_1 + P_2 \end{aligned}$$

따라서 n 번째 區間에 대한 一般式은

$$V_n = V_0 + Q_0 + \sum_{i=1}^{n-1} P_i \dots\dots\dots (1)$$

여기서 V 는 低潮時의 潮量, P 는 各區間에서의 滿潮 프리즈름이다.

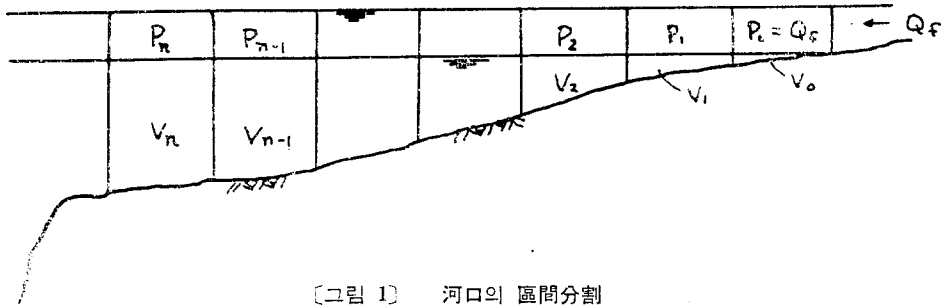
n 번째 區間에서 干潮時에 빠져나가는 물의 量은 다음과 같은 交換率(exchange ratio) r_n 으로 결정된다.

$$r_n = \frac{P_n}{V_n} \dots\dots\dots (2)$$

一定量의 河川水 流入量이 Q_0 인 한 各 潮汐週기가 經過한 후 河口의 n 번째 區間에 殘留된 汚粒體는 河川水量은 다음과 같다.

$$Q_n = \frac{Q_0}{r_n} \dots\dots\dots (3)$$

河川水量은 汚染物에 대한 하나의 指示物質로 사용되었다. 汚染物의 分布를 알고자 한다면 例를 들면 n 번째 區間에서의 分布는 汚染物의 初期濃도에 交換率 r_n 을 곱하여 구해진다.



[그림 1] 河口의 區間分割

Ketchum의 修正潮汐프러플 방법의 實測値와 잘 맞는 結果가 발표되나 있으나 Stommel³⁹⁾는 亂流混合過程을 미리 假定하므로서 좋은 結果를 주지않음을 밝혔다. 그러나 水文實務者間에 合理式이 아직 많이 적용되듯이 Stommel과 Ketchum 방법이 특히 生態學分野에서 널리 사용되고 있다. 이 방법의 制約은 첫째 潮汐週期동안에 潮汐, 바람, 河川水流入量, 汚染物의 變動이 고려되지 않았으며 둘째 斷面에서 完全한 混合을 가정한 점이다. 다음은 이러한 制約을 除去하는 방법이 記述된다.

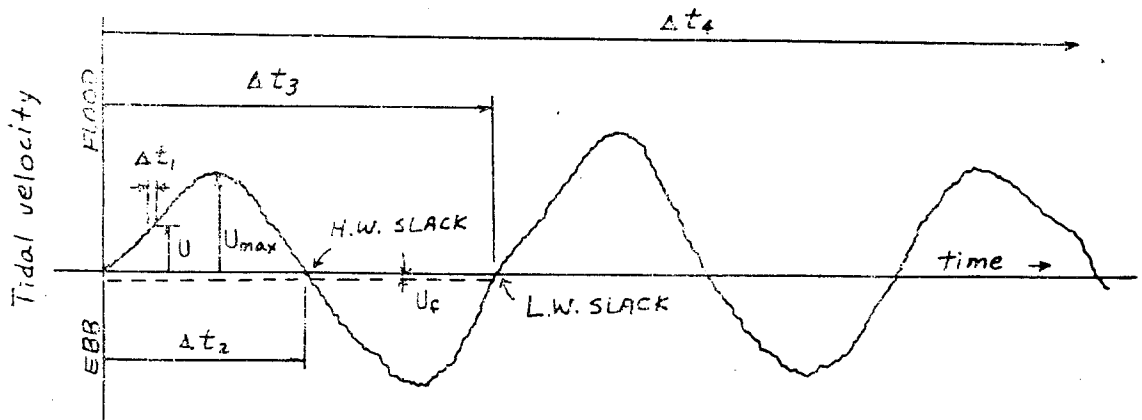
3. 河口에서의 一次元水質模擬模型

一次元數學的模型에서 流速 濃度 斷面積은 縱方向距離 x 와 時間 t 의 함수로 가정된다. 이러한 一次元模型은 광범위한 時間的平均概念(time averaging concept)을 內包하여 定常의 概念도 平均을 취하는 時間幅에 따라 달라진다. 그림 2에서 보인바와 같이 4가지 상이한 時間幅이 고려된다.

i) Δt_1 이 分單位이던 亂流와 관련된 流速變動의 時間의 平均을 얻는다. 이 값을 일반적으로 潮流速度라고 하고 그 크기는 渠에서 最大潮流速度에 이르고 그 방향은 各 潮汐週期동안 滿潮時에는 內陸으로 干潮時에는 外海로 向한다. 潮流速度가 零인 時間을 體潮(slack tide)時間이라 하고 潮汐이 滿潮에서 干潮로 變할때를 高休潮(High water slack), 干潮에서 滿潮로 變할때를 低休潮(Low water slack)이라 한다. 이 경우 潮流速度는 時間에 따라 變하는 量이다.

ii) Δt_2 이 大략 6時間이던 潮汐週期동안 滿潮 또는 干潮期間에 대한 平均값을 얻는다. 이 값을 平均滿潮(또는 干潮)速度라 한다. 이 값들은 大潮-小潮 변화에 따라 매일 또는 每週 變化하므로 時間에 따라 變하는 量이다.

iii) Δt_3 이 潮汐週期(12.4時間)에 같으면 非潮汐移送速度(non-tidal advective velocity)가 얻어진다. 任意의 地點과 潮汐의 最上流點間의 河口體積의 變化率이 潮汐週期의 調和函數이던 非潮汐速度는 河川水流入速



[그림 2] 潮流速度의 時間平均의 期間

度 U 와 같다. 非潮汐移送速度는 河川水流入量의 時間的인 변화에 따라 定常 또는 非定常(unsteady)이 된다.

iv) Δt_s 이 潮汐週期의 二倍 또는 그 以上이 되면 Δt_s 에 대한 非潮汐平均速度가 얻어진다.

平均을 취하는 時間幅은 目的에 따라 다르게 되며 時間幅에 따라 模型을 分類할수 있으며 이들 模型들이 다음에 記述된다.

3-1 實時間에 대한 水質模擬模型

實時間의 表現은 平均을 취하는 時間幅이 Δt_s 임을 의미한다. 따라서 速度와 濃度는 Δt_s 의 크기에 해당하는 時間測定值로서 실질적으로 平均概念이 들어있지 않는 實測值이다. 水質模擬(water quality simulation)의 基本式은 質量保存原則을 설명하는 數學的인 표현인 質量保存式 또는 質量移動(mass transfer)式이다. 質量移送過程은 流速에 의한 移送와 縱擴散에 의한 混合 그리고 非保存的 物質의 경우는 物質의 生成과 減衰를 포함한다. 質量移動에서 중요한 項은 縱方向流速으로 이는 潮流와 河川水의 相互作用으로 x 와 t 의 함수로 주어진다. 河口水理를 설명하는 데는 連續方程式과 運動量方程式이 또한 필요하며 이들은 質量移動式의 流速項을 구하는데 이용된다.

3-1.1 質量移動式

流體에 注入된 物質에 관한 質量保存式이 dx, dy, dz 의 微小六面體要素에 대하여 쓰여진다. 亂流混合에 비하여 分子擴散을 무시하면 x -方向에서 이 要素에 流入量과 流出量은 각각 $(\rho c u) dy dz$, $(\rho c u - \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u)) dy dz$ 로 되어 x -方向에서 흐름에 의한 要素內의 質量의 純變化는 $-\frac{\partial}{\partial x}(\rho c u) dx dy dz$ 이다.

여기서 u 는 x -方向의 瞬間的인 流速成分, ρ 는 密度 c 는 注入物의 質量과 溶液의 質量과의 比로 定義되는 濃度이다 같은 操作을 y, z 方向에 대해서도 수행하고 이들의 合을 要素內 物質의 質量의 時間變化率 $\frac{\partial}{\partial t}(\rho c) dx dy dz$ 과 같게 놓고 要素의 體積 $dx dy dz$ 으로 나누면

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

일반적으로 密度의 變化率은 매우 적으므로 식(4)는 다음과 같이 쓰여진다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(cu) + \frac{\partial}{\partial y}(cv) + \frac{\partial}{\partial z}(cw) = 0 \quad \dots\dots(5)$$

亂流에서는 速度와 濃度가 時間平均項과 變動成分項의 合으로 표시된다. 즉

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ v &= \bar{v} + v' \\ w &= \bar{w} + w' \\ c &= \bar{c} + c' \end{aligned}$$

이들을 식(5)에 대입하고 時間平均을 취하면

$$\frac{\partial(\bar{c} + c')}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\bar{c} + c')(\bar{u} + u')] + \frac{\partial}{\partial y}[(\bar{c} + c')(v + v')] + \frac{\partial}{\partial z}[(\bar{c} + c')(w + w')] = 0 \quad (6)$$

變動成分 또는 變動成分과 平均項과의 積의 時間平均은 零이므로 식(6)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\bar{u}\bar{c}) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{v}\bar{c}) + \frac{\partial}{\partial z}(\bar{w}\bar{c}) + \frac{\partial}{\partial x}(u'c') + \frac{\partial}{\partial y}(v'c') + \frac{\partial}{\partial z}(w'c') = 0 \quad \dots\dots(7)$$

亂流에 대한 連續方程式

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

을 적용하면 식(7)은

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(u'c') + \frac{\partial}{\partial y}(v'c') + \frac{\partial}{\partial z}(w'c') = 0 \quad \dots\dots(8)$$

$u'c'$ 는 亂流變動成分에 의한 質量의 移送를 나타내며 이는 Boussinesq의 渦粘性的 類似性(analogy of eddy viscosity) 또는 擴散의 Fick 法則의 類似性에 의하면 平均濃度의 勾配에 比例하고 濃度의 減少하는 方向에 있다. 이 사실을 적용하면

$$\left. \begin{aligned} u'c' &= -e_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \\ v'c' &= -e_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \\ w'c' &= -e_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \end{aligned} \right\} \dots\dots(9)$$

여기서 e_x, e_y, e_z 는 x, y, z 方向亂流擴散係數(turbulent diffusion coefficient)이다. 식(9)를 식(8)에 대입하면 亂流에 대한 三次元移送擴散式(Three dimensional convective diffusion equation)을 얻는다.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(e_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(e_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(e_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}) \quad \dots\dots(10)$$

平均值의 (-)記號를 略하고 非保存的 物質의 單位體積當 生成率 r_1 를 고려하면 三次元質量移動式을 얻는다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(e_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(e_y \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(e_z \frac{\partial c}{\partial z}) + \frac{r_1}{\rho} \quad \dots\dots(11)$$

c 는 斷面의 局部濃度이므로 斷面平均値 = $C \frac{1}{A} \int_A c dA$ 와 偏倚成分 c'' 의 疊으로 表示할수 있다. 流速에 關한 式을 쓰면

$$\left. \begin{aligned} c &= C + c'' \\ u &= U + u'' \\ v &= v'' \\ w &= w'' \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (12)$$

$U = \frac{1}{A} \int_A u dA$ 는 斷面平均 縱方向流速이다. 式(12)를 式(11)에 代入한 후 展開하고 斷面積 A 에 대하여 積分하면 一次元式을 얻는다.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial (AC)}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AUC) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \int_A u'' c'' dA = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (A \bar{e}_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{r_i}{\rho} + \frac{r_e}{\rho} \dots \dots \dots (13)$$

左邊의 積分項은 不均一流速分布에 의한 質量輸送을 나타낸다 \bar{e}_x 는 亂流擴散係數의 空間平均値이다. r_i 는 流體內에서 單位體積에 對한 物質의 生成率을 나타내는 source로서 浮上水草에 의한 酸素의 生成率 (+) r_i , 放射能의 減衰 또는 B.O.D를 含有한 浮流物에 의한 酸素의 소모는 $-r_i$ 이고 r_e 는 境界를 통한 質量移動 (sink)로서 $+r_e$ 는 대기로부터 酸素의 흡수, $-r_e$ 는 追跡物이 圓錐境界面에 흡착됨을 들수있다.

Taylor⁴²⁾와 Aris⁴³⁾는 移送的인 物質輸送을 擴散移送으로 표시할수 있음을 보였으며 이를 時間的隨從에 의한 密度隨從 u'/c' 과 구분하기 위하여 縱移送擴散(longitudinal dispersion)이라 하고 移送擴散係數 E 는 該變 係數의 項으로 정의된다.

$$\int_A u'' c'' dA = -AE \frac{\partial c}{\partial x} \dots \dots \dots (14)$$

Taylor는 E 가 \bar{e}_x 보다 100單位크기에 있음을 보였고 $E + \bar{e}_x$ 를 縱移送擴散係數(longitudinal dispersion coefficient)로 表記한다.

$$D = E + \bar{e}_x \dots \dots \dots (15)$$

實際 河口密交流에서는 重力循環, 不規則河岸, 灣回, 沉帶 등에 의하여 移送되는 바와 같이 式(15)의 D 보다 크게된다. 式(14), (15)를 고려하면 式(13)은

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial t} (AC) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AUC) = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{r_i}{\rho} + \frac{r_e}{\rho} \dots \dots \dots (16)$$

Source 와 Sink 項

Source 와 Sink 項 r_i 와 r_e 가 零인 物質을 保存的이라 한다. 例로 河口의 鹽分을 들수있으며 河口에서 鹽分이 生成되지 않으므로 $r_i=0$ 이고 外廓橫境界를 따라 鹽分의 流入이 없으므로 $r_e=0$ 이다. 內的 sink 項은 一

次反應을 따르는 減衰로서 放射性追跡物에 準한다. 一次反應은 單位體積에 對한 物質의 生成(또는 減衰)率 r_i 가 임의의 순간에 있어서 單位體積內 物質의 質量 (ρC)에 比례함을 의미한다. 減衰의 경우

$$r_i = -kd(\rho C) \dots \dots \dots (17)$$

따라서 式(16)의 sink 項은

$$r_i/\rho = -k_d C \dots \dots \dots (18)$$

여기서 k_d 는 $[T^{-1}]$ 의 單位를 갖는 反應係數이다.

外的 source는 大氣로부터 酸素를 흡수하여 流體의 溶解酸素量의 增加를 들수있다. Dobbins⁴⁴⁾의 膜理論에 의하면 單位體積當 溶解酸素의 質量增加率 r_e 는 單位體積의 表面積과 單位體積當 酸素質量의 不足과의 積에 比례한다. 즉

$$\left[\frac{D.O. 質量增加}{體積 \cdot 時間} \right] = K_L \left[\frac{A_s}{體積} \right] \left[\frac{飽和狀態의 D.O. 質量}{體積} - \frac{D.O. 質量}{體積} \right] \dots (19)$$

K_L 은 $[L/T]$ 의 單位를 갖는 酸素移動의 膜係數, A_s 는 表面積이다. 右邊을 流體의 密度 ρ 로 곱하고 나누면

$$r_e = \rho K_L \frac{A_s}{V} [C_s - C] \dots \dots \dots (20)$$

C_s 는 溶解酸素의 飽和濃度 V 는 體積이다. V/A_s 는 平均깊이 d 로 해석되어 K_L/d 는 再曝氣係數 K_a 로 알려진다. 따라서 式(16)의 source 項은

$$\frac{r_e}{\rho} = K_a (C_s - C) \dots \dots \dots (21)$$

潮流의 速度

潮流의 速度는 i) 河口에서 質點에 의하여 ii) 滿位를 추적하여 連續方程式에 의한 計算 iii) 連續方程式과 運動量方程式을 같이 풀어서 구할수 있다. 마지막 방법은 河口의 幾何學的 要素와 境界條件만을 要한다 따라서 이 방법만이 豫測目的으로 사용될수 있다. 이들 一次元連續 및 運動方程式은 다음에 기술되며 이들의 유도는 Stoker⁴⁵⁾, Dronkers⁴⁶⁾, Harleman⁴⁷⁾에 의하여 주어진다.

3-1.2 連續 및 運動量方程式

x 座標는 河口의 海岸端에서 부터 測定되고 h 는 水平基準에서 水面까지의 距離이다. 흐름을 一次元, 一定한 密度, 靜水層分布를 갖는 것으로 가정하고 灣曲과 偏向力의 影響을 무시하면

$$b \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0 \dots \dots \dots (22)$$

q 는 外部에서 構入되는 單位길이당 橫流이고 流入을 陽, 流出을 陰으로 한다. Q 는 流量 $Q = AU$ 이다.

運動方程式은 뉴우톤의 算二法則으로 부터 유도되며 縱方向密度隨從을 무시하면 運動方程式은

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + Q \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} A + g \frac{Q|Q|}{AC_m^2 R} = 0 \dots\dots\dots(23)$$

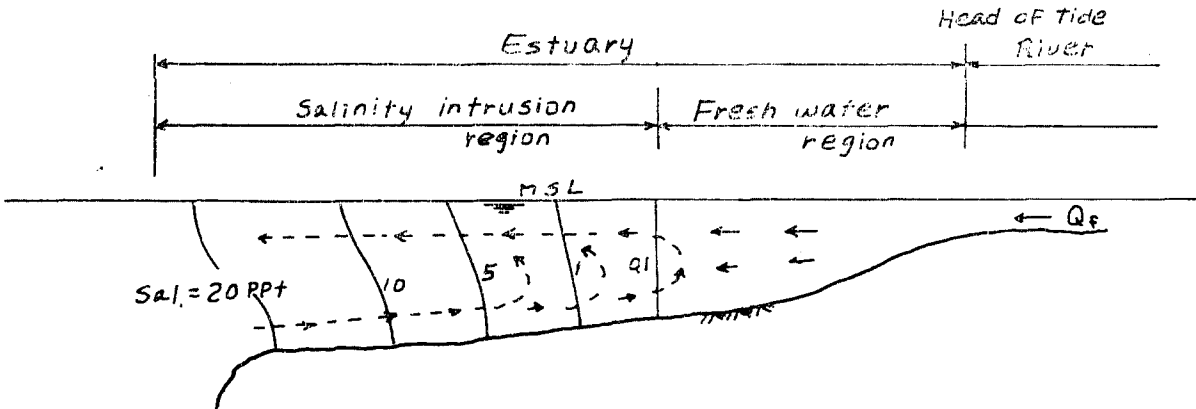
여기서 $C_m = \frac{1}{n} R^{1/6}$, n 는 Manning의 粗度係數, R 는 動水半徑이다. 式(22), (23)은 斷面이 不均一한 河口에서 一次元潮流의 傳播問題에 解를 제공한다. 이는 Harleman¹⁸⁾에 의하여 詳述된다.

3-1.3 縱移送擴散

本節에서는 縱移送擴散係數 D 를 구하는 方法이 기술된다. 첫번째는 振動흐름(oscillating flow)에서 擴散의 流體力學을 고려한 理論的인 方法과 둘째는 質量移動式의 解를 實測한 濃度分布와 比較하여 구하는 實驗的

方法이다. 이 方法에서는 注入된 物質에 대한 source와 sink項이 정의되어야 한다.

定常流의 管水路에 注入된 追跡子는 流速分布로 인하여 中心部追跡子는 壁面部의 追跡子보다 빨리 移動한다. 따라서 式(15)로 정의된 移送擴散係數는 速度分布가 不均一하게 될수록 크게 된다. 이 點을 고려하면 鹽分이 없는 潮流領域에 비하여 鹽水浸透가 있는 河口에서 보다 큰 擴散係數가 기대된다. 海水浸透領域에서는 縱方向密度勾配에 의하여 형성된 重力循環에 따라 潮流速度는 달라진다. 일반적으로 河口는 海水浸透領域과 河川水潮流領域으로 구분된다. 두 領域의 境界線은 海水浸透가 潮汐의 週期和 河川水의 流入에 따라 變하므로 고정되지 않는다.



[그림 3] 混合河口에서 鹽度分布

縱移送擴散係數(均一密度領域)

河口에서 密度가 一定한 領域은 다음과 같은 경우를 들 수 있다. 1) 海水浸透가 河川水와 平衡을 이루는 上流淡水領域 2) 河口鹽水의 密度가 海水의 密度와 거의 같은 河口의 海洋端領域 3) 河川水의 流入이 近소한 河口, 灣 등

i) 單一方向흐름에서의 擴散

Taylor⁴²⁾는 直 管水路의 定常軸對稱亂流에 대하여 縱移送擴散係數를 다음과 같이 구하였다.

$$D = 10.1 a u_* \dots\dots\dots(24)$$

a 는 管의 半徑, $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ 는 剪斷速度, τ_0 는 壁面에서 剪斷應力이다. Elder¹⁰⁾는 對數流速分布를 갖고 무한히 넓은 開水路의 定常二次元흐름에서의 計算結果는 다음과 같다.

$$D = 5.9 d \cdot u_* \dots\dots\dots(25)$$

여기서 d 는 水深이다.

自由表面을 갖는 等流에서 式(24)의 表現은

$$D = 20.2 R \sqrt{g K s} \dots\dots\dots(26)$$

剪斷速度 u_* 를 管의 摩擦損失係數 f 와 平均流速의 項으로 나타내

$$u_* = \sqrt{f/8} \cdot u$$

f 를 Manning의 粗度係數 n 과 動水半徑 R 項으로 表示하면

$$\sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

上記 두 關係式을 式(24)에 차례로 代입하고 정리하면 修正 Taylor式을 얻는다.

$$D = 63 n U R^{5/6} \text{ (m-sec 單位)} \dots\dots\dots(27)$$

이 修正式은 基本式의 解析的解가 주어지지 않았을 때 매우 유용하다. 式(27)의 양변을 動粘性係數 ν 로 나누고 정리하면 D 를 레이놀즈數 Re 와 項으로 표시할 수 있다. 즉

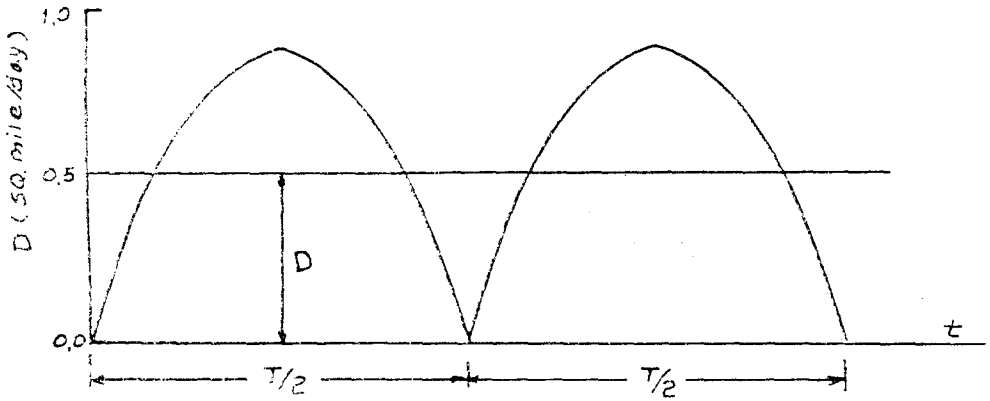
$$\frac{D}{v} = 63 \left(\frac{n}{R^{1/2}} \right) R.$$

D/v 는水路의 R 와 粗度係數의 積에 비례한다.

ii) 振動흐름에서의 擴散

Holley²¹⁾와 Fisher¹⁵⁾에 의하면 振動흐름에서 移送擴散은 振動週期 T 와 斷面混合時間尺度 T_0 와의 비에 따라 달라진다. 河口는 일반적으로 넓고 얕기 때문에 T_0 는 橫混合과 鉛直混合에 대하여 다르게 된다. 미국의 Delaware 河口의 경우 橫混合의 時間尺度가 潮汐週期の 約 200배로 긴 反面 鉛直混合의 時間尺度는 15배程度 짧게 나타났다. 이 사실은 自然河川의 경우 Fischer¹²⁾와는 달리 橫方向流速變化가 縱擴散에 影響이 적고

鉛直分布가 중요한 因子가 되어 식(27)이 河口에도 적용될수 있음을 시사한다. Taylor 修正式을 적용하기 위해서는 振動흐름에 대한 速度를 새로 결정해야 한다 만약 潮流의 速度를 그대로 적용한다면 D 는 그림 4에 보인 바와 같이 두개의 尖頭를 가지고 潮汐週期를 통하여 變化할것이다. Holley와 Harleman^{17), 20)}은 實驗을 통하여 潮流速度의 時間的 變化가 대략 sinusoidal 일때 時間平均速度는 最大潮流速度 U_{max} 의 $2/\pi$ 배에 해당함을 밝혔다. 또한 河口의 河岸의 不規則, 河床死帶, 灣曲 등에 의하여 擴散이 증가되는 점을 고려하여 Taylor 修正式을 3倍增加할것을 提案했다.



[그림 4] 潮汐週期동안 縱移送擴散係數의 變化

$$D = 121nU_{max}R^{5/6} \dots \dots \dots (28)$$

縱移送擴散係數가 m^2/sec 보다 km^2/day 로 표시됨을 고려하여 식(28)을 다시 쓰면 $1km^2/day = 11.6m^2/sec$ 이므로

$$D = 10.4nU_{max}R^{5/6} \left[\begin{matrix} D: km^2/day \\ U_{max}: R: m \cdot sec \end{matrix} \right] \dots (29)$$

河口 Delaware의 경우 $n=0.023$, $U_{max}=2 ft/sec$, $R=20ft$ 에 대해 D 값이 $65ft^2/sec$ 로 주어졌다.

3-1.4 質量移動式의 解

式(16)에서 獨立變數는 潮流速度 U , 縱移送擴散係數 D 이고 從屬變數는 x 와 t 의 함수인 水質의 媒介變數인 濃度 C 이다. 內的 및 外的 source와 sink項은 水質 媒介變數의 性質에 따라 상이한 형을 취한다. 河口의 斷面形 $A=f(x,t)$ 와 初期 및 境界條件은 完전한 문제의 定立을 위해 明示되어야 한다. 이와같은 경우에 대한 식(16)의 해는 매우 복잡하므로 簡便화한 경우를 고려하기로 한다.

河口에 沿한 支流나 地下水流入 등 橫流가 上流의 河川水 流入量에 비하여 무시할 량이고 潮汐運動이 모든

斷面에서 全 橫斷面에 均一하게 작용하면 $q=0$ 이 되어 식(22)는

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (AU) = 0 \dots \dots \dots (30)$$

식(30)을 식(16)에 적용하면 不均一한 斷面을 갖는 河口에 대한 식을 얻는다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AD \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{r_i}{\rho} + \frac{r_c}{\rho} \dots (31)$$

다음의 경우에는 보다 簡便형이 가능하다.

i) 河口의 幅 b 가 一定한 경우로 이는 水深 $h=f(x,t)$ 가 되어 式(31)은

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{n} \frac{\partial}{\partial x} (nD \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{r_i}{\rho} + \frac{r_c}{\rho} \dots (32)$$

ii) 河口의 幅과 水深이 일정하고 潮汐에 의한 水深의 變化가 적은 경우로 이는 橫斷面積 A 를 一定으로 가정하는 경우와 대응하다. 이 경우 식(31)은

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{r_i}{\rho} + \frac{r_c}{\rho} \dots (33)$$

iii) 橫斷面積 A 가 일정하고 縱移送擴散係數 D 가 x 에 關하여 一定한 경우

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{r_i}{\rho} + \frac{r_e}{\rho} \dots\dots\dots(34)$$

iv) Source 와 sink 項이 극히 근소한 경우

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \dots\dots\dots(35)$$

橫斷面積이 一定한 理想的인 河口에서 縱移送擴散係數가 一定하고 潮流의 速度가 時間 t 의 함수로 다음과 같이 時間의 調和函數로 표시된다.

$$U = U_s + U_{max} \sin \sigma(t - \delta) \dots\dots\dots(36)$$

여기서 u_s : 河川水의 流速

u_{max} : 潮流의 最大速度

t : 汚染物 注入한 순간부터 經過된 時間

δ : $t=0$ 과 $u=0$ 인 時間變化를 나타내는 常數

汚染物의 瞬間的인 注入에 대한 式(24)의 解는 講座에서 記述되었으며 汚染物이 非保存的이어서 式(18)을 주어진 減衰를 갖는 경우 式(34)은

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - K_d \cdot c \dots\dots\dots(37)$$

瞬間的인 注入에 대한 式(37)의 解는

$$\frac{c}{c_0} = \frac{U_s}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left\{-\frac{[x - U_s t + \frac{U_{max}}{\sigma} (\cos \sigma t - \cos \sigma \delta)]^2}{4Dt} - K_d t\right\} \dots\dots\dots(38)$$

여기서 瞬間的인 注入量 w 는 $c_0 = \frac{w}{wAv_s}$ 로 주어지고

w 는 물의 單位重量이다.

現地實測이나 實驗室에서 潮速流度가 零인 休潮에서

濃度를 測定하는 것이 보통이다. 瞬間的인 注入이 $x=0, t=0$ 인 高休潮에서 일어나면 $\delta=0, t=NT$ (N 은 潮汐數로 $N=1, 2, 3, \dots$)이므로 式(38)은

$$\frac{c}{c_0} = \frac{U_s}{\sqrt{4\pi DNT}} \exp\left\{-\frac{[x - U_s NT]^2}{4DNT} - K_d NT\right\} \dots\dots\dots(39)$$

低休潮에서 濃度分布는 N 을 $\frac{T}{2}$ 만큼 다른 $N=1.5,$

$2.5, 3.5, \dots$ 로 하므로서 얻어진다. 不均一한 斷面을 갖는 河口에 대한 高休潮에서의 解가 O'Connor²³⁾에 의하여 주어진다 있다.

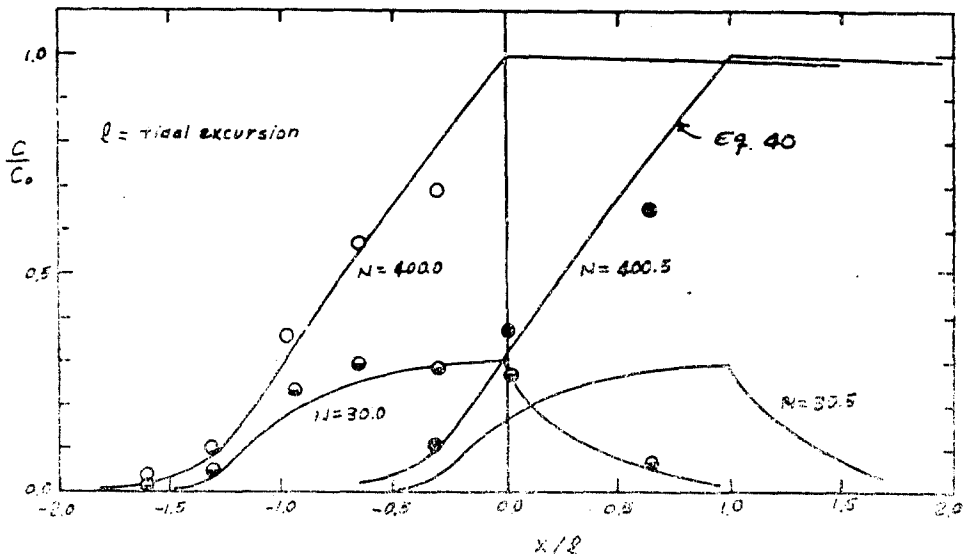
連續的인 注入에 대한 解는 式(38)을 積分하여 얻어진다. 즉

$$\frac{c}{c_0} = \int_0^t \frac{U_s}{\sqrt{4\pi D(t-\tau)}} \exp\left\{-\frac{[x - U_s(t-\tau) + \frac{U_{max}}{\sigma} (\cos \sigma t - \cos \sigma \tau)]^2}{4D(t-\tau)} - K_d(t-\tau)\right\} d\tau \dots\dots\dots(40)$$

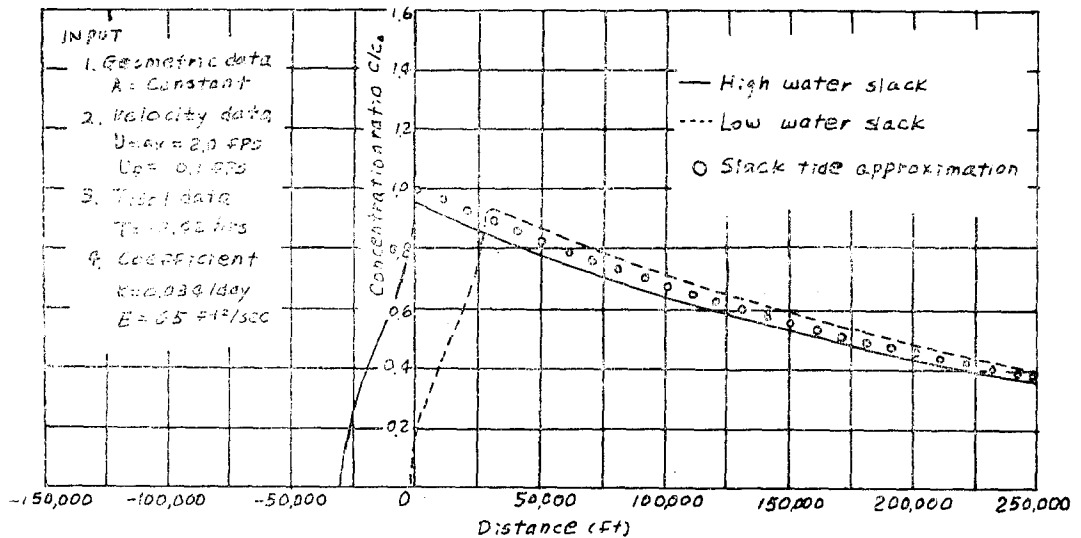
式(40)의 積분은 解析的으로는 구해지지 않고 數值解法에 의하여 구할수 있다. 非保存的物質($K_d=0$)에 대한 計算結果가 그림 5의 無次元濃度 c/c_0 가 無次元縱距離 x/l 의 함수로 플랏트되었다. 여기서 l 은 潮汐動距離로 물粒子가 潮汐週期の 半 동안에 移動한 距離移動

$$l = \frac{U_{max} T}{\pi}$$

로 주어지고 N 은 $N=t/T$ 로서 $x=0, t=0$ 에서 注入



[그림 5] 連續的인 注入에 대한 實驗結果와 式(40)과의 比較(Harieman, et al., 17)



[그림 6] 非保存的 物質에 대한 式(40)의 準定常狀態 解(Harleman, et. al. 17)

부터 潮汐週期數를 나타낸다. $N=30, 400$ 은 高休潮에 30.5, 400.5는 低休潮에 해당한다. 潮汐週期동안에 汚染物은 $x=0$ 에서 上下流로 移送되고 대략 $N=400$ 潮汐週期에서 準定常상태에 달할때 까지 濃度는 증가한다.

式(40)에서 濃度에 중요한 영향을 미치는 因子는 D 보다는 潮流速度와 減衰項에 의한 移送이다. 一次的減衰를 하는 非保存的 物質에 대한 式(40)의 數值解가 Lee²⁷⁾에 의하여 주어진다. 高休潮時와 低休潮時에 같이 約 150 潮汐週期後에 準定常狀態의 濃度分布에 달했다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 減衰項의 영향이 현저함을 알수있다. 이 경우 潮汐移動距離가 28, 500ft이고 30, 000ft의 上流까지 濃度가 檢出됨이 보인다.

3.2 非潮汐速度를 使用한 水質模擬模型

河口的 복잡한 不定 및 不等流의 중요한 因子인 潮汐移送速度를 무시한 數字的模型이 提案되어 왔다. 이에 대한 두가지 模型은 記述된다.

1) 潮汐週期的 時間平均質量移動

Arons and Stommel^{28), 29)}는 潮汐프러즘方法의 制約을 除去하고자 式(31)의 各項을 潮汐週期에 대하여 平均을 취한 다음과 같은 一次元質量移動을 提案했다.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + U_s \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (\bar{AD} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}) + \frac{\bar{r}_i}{\rho} + \frac{\bar{r}_e}{\rho} \dots \dots \dots (41)$$

여기서 \bar{c} 는 潮汐週期에 平均을 취한 濃度, U_s 는 河川水 流入에 의한 非潮汐移送速度(Non-tidal advective

velocity) $\frac{Q_s}{A}$ D 는 時間平均한 縱移送擴散係數, \bar{A} 는 時間平均面積이며 source와 sink 項도 時間平均되었다.

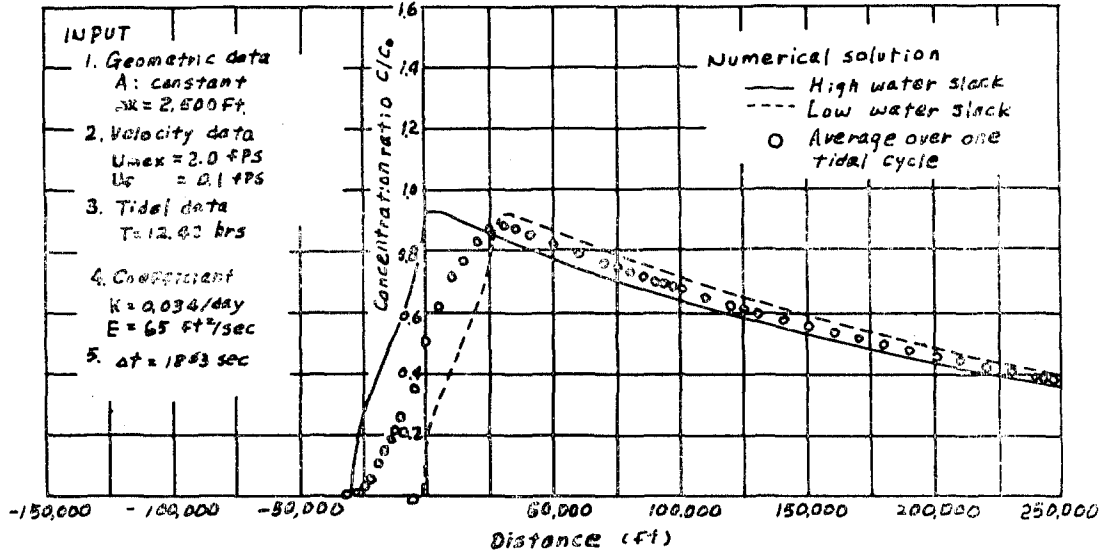
2) 休潮概略式

O'Connor²⁹⁾의 休潮概略式(slack tide approximation)은 非保存的 物質에 대한 非潮汐速度의 數學的模型으로 B.O.D와 D.O의 縱方向分布에 관한 것으로 이 模型은 休潮의 濃度分布에 적용된다. 이 사실은 대부분의 河口的 觀測이 休潮상태에서 얻어지기 때문으로 고려된다. 엄격한 의미에서 休潮의 時間은 潮流의 移送速度가 零인 시간이다. 그러나 式(31)에서 移送項을 除去하면 플러팅作用이 상실되므로 O'Connor는 河川水 流入에 의한 非潮汐速度 $\frac{Q_s}{A}$ 를 대신 사용했다.

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + \frac{Q_s}{A} \frac{\partial c_s}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AD_s \frac{\partial c_s}{\partial x}) + \frac{r_i}{\rho} + \frac{r_e}{\rho} \dots \dots \dots (42)$$

여기서 添字 s 는 濃度分布가 休潮때의 값임을 의미한다. Q_s 와 D_s 는 상수로 가정되어 x 에 독립적이다.

上記 두 模型에서 式(28) 및 (29)과 같은 Taylor 修正式에 의하여 實時間模型에서와 같이 D 를 구할수 없는 점이 非潮汐速度를 使用한 模型의 弱點이다. 따라서 이들 模型을 적용할 경우에는 非潮汐速度模型의 解를 實測値와 비교하므로써 D 를 구해야 한다. 觀測되는 濃도가 色素, B.O.D., D.O와 같이 非保存的이면



[그림 7] 非保存的 物質의 連續注入에 대한 實時間式(40)과 休潮概略式(43)과의 比較 (Harleman, et. al., 16)

縱移送擴散係數와 生成率과의 組合을 통해서 D 가 決定되므로 模型의 妥當性이 弱化된다.

$x=0$ 에서 連續的으로 注入한 汚染物의 定常상태의 空間의 分布를 주는 式(42)의 解가 다음과 같이 주어졌다.

$$\frac{c_s}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{1+\alpha}} \exp\left\{-\frac{xU_s}{2D_s} [1 \mp \sqrt{1+\alpha}]\right\} \dots \dots (43)$$

여기서 $\alpha = \frac{4K_d D_s}{U_s^2}$, (-)는 下流물 (+)는 上流물 나타낸다.

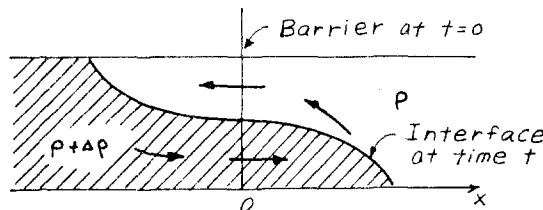
4. 密度流에서의 擴散

河口에서는 海水의 浸入으로 소위 鹽水楔가 형성되어 成層流가 일어난다. 이와같이 密度가 다른 成層流에서는 重力不安定度(gravitational instability)에 따

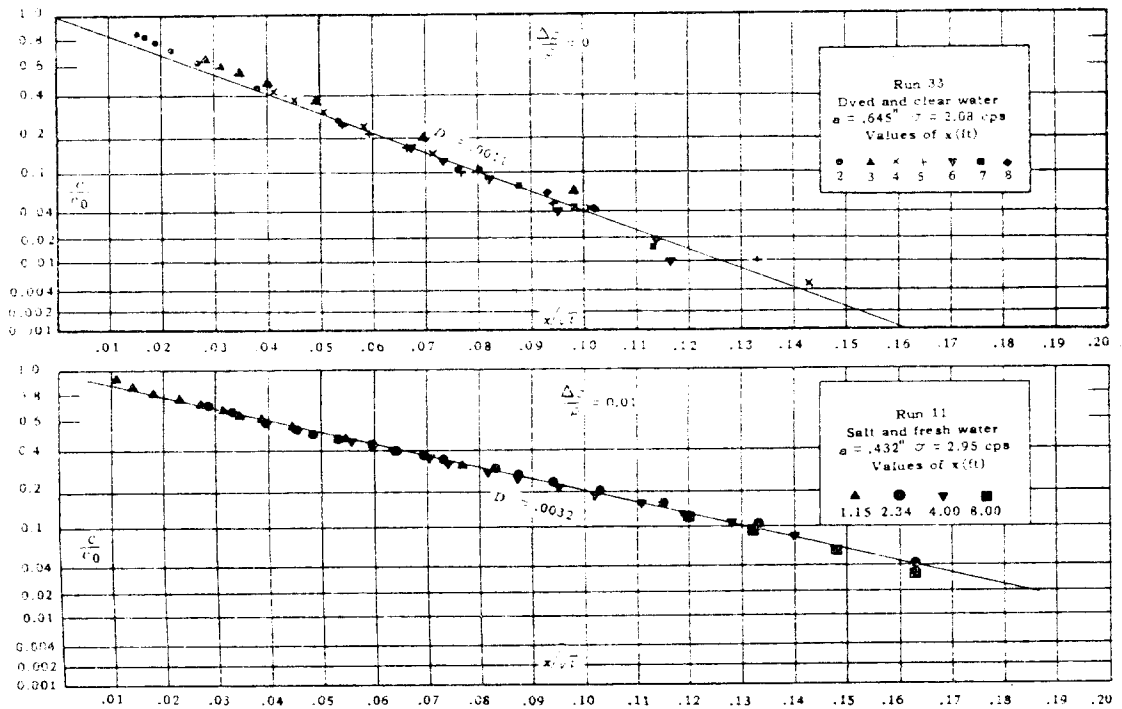
라 大規模의 渦形態로 循環이 형성되어 擴散을 증가시킨다. 重力循環은 密度分布, 慣性과 摩擦의 影響, 地球廻轉, 바람의 4因子에 일어난바 이들 因子도 擴散에 고려되어야 한다.

不均一한 密度分布를 갖는 河口에서 擴散은 亂流와 重力不安定에 의하므로 擴散係數는 亂流와 分子만의 擴散에 의한 경우보다 크게된다. 實驗에 의하면¹⁶⁾ 密度가 1% 증가함에 따라 縱擴散係數는 約 3倍 증가되었다.

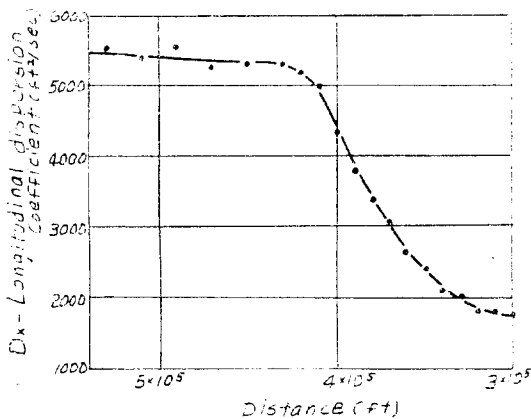
海水浸透領域에서 擴散은 振動하는 潮汐運動에 의한 擴散과 密度勾配에 의한 重力不安定에 의한 擴散을 포함한다. 密度流의 縱移送擴散係數는 x 에 따라 可變的이고 특정 x 에 있어서는 河川水의 변화에 크게 影響을 받는다. 이 點을 勘案하여 密度流의 縱移送擴散係數를 D_x 로 表記한다. 미국 Delaware 河口의 경우 20



[그림 8] 障壁除去後 密度流形成



[그림 9] 密度差로 인한 擴散의變化 (Harleman, et. al. 16)



[그림 10] 距離에 대한 D_x 의 變化 (Kent, 22)

mile의 거리에서 D_x 의 값이 5배의 변화를보였다.

式(31)의 解는 D_x, A , 河川水流入速度的 空間的變化

率을 고려하여 有限階差法으로 구해진다^{22,29}. x 에 대한 D_x 의 變化는 鹽度の 縱分布의 準定常상태가 特定 河川水量에 대해 알려지면 다음과 같이 구할수 있다.

$\frac{\partial c}{\partial t} = 0$, $r_i = r_e = 0$ 이면 式(31)은

$$U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} (AD_x \frac{\partial c}{\partial x}) \dots \dots \dots (44)$$

x 에 관하여 積分하고 兩邊에 A 를 곱하면

$$Q_r c = AD_x \frac{\partial c}{\partial x} \dots \dots \dots (45)$$

여기서 Q_r 는 河川水量이다. 式(45)를 有限階差型으로 쓰면

$$D_x = \frac{Q_r c_x 2 \Delta x}{A(C_{x+\Delta x} - C_{x-\Delta x})} \dots \dots \dots (46)$$

그림10은 Delaware 河口의 D_x 의 變化를 보인것으로 資料는 高休潮에서 平均鉛直濃度이다. D_x 의 값 2,000~5,500 ft^2/sec 는 向一한 密度의 경우 65보다 훨씬 크게 됨을 시사한다. sanfrancisco 灣의 경우 460~1,400 ft^2/sec 의 D_x 값이 발표되었다.

5. 河口에서 鉛直 및 橫混合

開水路에서 鉛直混合係數는 $\epsilon_y = 0.07du_*$ 로 주어진다 여기서 d 는 水深, u_* 는 剪斷速度이다. 그러나 河口에서는 密度成層程度에 따라 감소한다. Francis¹¹⁾가 미국 Maine주 Kennebec 河口에서 측정 한 ϵ_y 는 50~650ft²/sec 범위였다. 또한 미국 James 河口 資料로부터 Pritchard^{34, 35)}는 다음 식을 제안했다.

$$\epsilon_y = \{8.59 \times 10^{-3} \frac{\bar{u}z^2(d-z)^2}{d^3} + 9.57 \times 10^{-3} \frac{z(h-z)H}{dT} \exp(-2\pi z/L) (1 + 0.276R_i)^{-2}$$

여기서 $\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T |u| dt$, H 는 潮汐의 높이, T 는 週期

L 은 表面風波의 길이 $R_i = \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \bar{u}} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ gradient Richardson No.이다.

Bowden³⁾은 計算結果는 ϵ_y 의 값이 表面에서 5cm²/sec, 中心部에서 71cm²/sec로 나타났다.

橫混合은 亂流와 密度成層, 河岸不規則과 二次的循環에 의하여 유도된 대규모 水平循環에 의하는 것으로 고려된다. 開水路에서 $\epsilon_z = 0.15du_*$ 로 주어지는 反面 河口에서는 Ward⁴⁴⁾에 의한 既存資料로부터 얻은 結果는 $\frac{\epsilon_z}{du_*}$ 값이 0.42~1.03, 實驗結果는 0.66~1.70으로 나타났다.

參 考 文 獻

- 1) Aris, R.; On the Dispersion of a solute in Fluid Flowing through a Tube, Proc. Roy. Soc. London (A), Vol. 235, pp. 67~77 April, 1956
- 2) Arons, A.B. and Stommel, H.: A Mixing Length Theory of Tidal Flushing, Trans. Amer. Geoph. Union, Vol. 32, No.3, pp.419-421, June, 1951
- 3) Bowden, K.F.: The Mixing Process in a Tidal Estuary, Int. J. Air Water Pollut 7, pp. 343-356, 1963
- 4) Carter, H.H. and Okubo, A.; A Study of the Physical Processes of Movement and Dispersion in the cape Kennedy Area, Report No. Nyo-2973-1, Chesapeake Bay Institute, The Johns Hopkins Univ., Baltimore, MD, 1965
- 5) Cleary, R.W. and Adrian, D.D.; New Analytical Solutions for Dye Diffusion Equations, Jour. Environ Eng. Div. ASCE, Vol. 99, No. EE3, pp.213-227,

- June, 1973
- 6) Cleary, R.W. et al., Unsteady State Three-Dimensional Model of Thermal Diffusion in Rivers, Amer Inst of Chem Engs Symposium Series 129, Vol. 69, pp.422-431, 1973
- 7) Diachishin, A.N. et. al.; Sewage Disposal in Tidal Estuaries, Trans, ASCE, Vol. 119, 1954
- 8) Dobbins, W.E.; BOD and Oxygen Relationships in Streams, Proc. ASCE, Vol. 90, No. SA3, pp. 53-78, June, 1964
- 9) Dronkers, J.J.; Tidal Computations in Rivers and Coastal Waters, Interscience Publishing, New York, 1964
- 10) Elder, J.W.; The Dispersion of Marked Fluid in Turbulent Shear flow, Jour. Fluid Mech., Vol. 5, Part 4, pp. 544-560, May, 1959
- 11) Francis, J.R.D. et al.; Observations of Mixing Processes in a Tidal Estuary, Woods Hole Oceanogr., Inst. Ref. No. 53-22, 1953
- 12) Fischer, H.B.; Longitudinal Dispersion in Laboratory and Natural Streams, Cal. Inst of Tech., Keck Lab. Rept. No. KH-R-12, 1966
- 13) Fischer, H.B.; The Mechanics of Dispersion in Natural Streams, Jour. Hydr. Div., ASCE, Vol. 93, No. HY6, pp. 187-216, Nov., 1967
- 14) Fischer, H.B.; Dispersion Predictions in Natural Streams, Jour. Sanit Div., ASCE, Vol. 94, No. SA5, pp.927-943, Oct. 1968
- 15) Fischer, H.B.; Cross-Sectional Time Scale and Dispersion in Estuaries, Proc. 13th Congress, IAHR, Vol. 3, pp. 173-180, Kyoto, 1969
- 16) Harleman, D., et. al.; The Diffusion of Two Fluid of Different Density in a Homogeneous Turbulent Field, Tech. Rept. No. 31, M.I.T., Hydro. Lab., Feb., 1959
- 17) Harleman, D., et. al.; Interpretation of Water Pollution Data from Tidal Estuary Models, Proc. 3rd Int. Conf. on water pollut. Res., Sect. III, paper No. 3, Munich, Pergamon Press, Sept. 1966.
- 18) Harleman, D. and Lee, C.H.; The Computation of Tides and Currents in Estuaries and Canals, Tech. Bull No. 16, Commit on Tidal Hydr. U.S. Coaps of Engas. Vicksburg, Miss, Sept., 1969
- 19) Hinwood, J.B. and Wallis, I.G.; Review of Models of Tidal Waters, Jour. Hyd. Div., ASCE, Vol.

- 101, No. Hyll, pp.1405-1421, Nov., 1975
- 20) Holley, E.R. and Harlewan, D.R.F.; Dispersion of pollutants in Estuary Type Flows, M.I.T., Hydro. Lab, Tech, Rept, No 74, Jan., 1965
- 21) Holley, E. R. et, al.; Dispersion in Homogeneous Estuaries, Jour, Hydr, Div, ASCE, Vol,96, No,Hy8, Aug,1970
- 22) Kent, R.E.; Turbulent Diffusion in a Sectionally Homogeneous Estuary, Jour, Sanit, Div, ASCE, Vol. 86, SA2, March,1960
- 23) Ketchum, B.H.; The Exchange of Fresh and Salt water in Tidal Estuaries, J. Marine Res, Vol. 10, 1951
- 24) Ketchum, B.H.; The Flushing of Tidal Estuaries, Sew. and Ind. Wastes, Vol. 23, 1951
- 25) Koh, R.C.Y. and Brooks, N.H.; Fluid Mechanics of Waste Water Disposal in the Ocean, Ann. Rev. Fluid Mech. 7, pp. 187-211, 1975
- 26) Kullenberg, G.; Apparant Horizontal Diffusion in a Stratified Vertical Shear Flow, Tellus, Vol. 24, pp. 17-28, 1972
- 27) Lee, C.H.; One-Dimensional Real Time Model for Estuarine Water Quality Prediction, Ph.D. Thesis, M.I.T., Dept. of Civil Eng. Cambridge, Mass, Jan., 1970
- 28) Navikov, E.A.; Concerning a Turbulent Diffusion in a Stream with a Transverse Gradient of Velocity, Jour. Appl. Math. and Mech., Vol. 22, pp. 576-579, 1968
- 29) O'connor, D.J.; Estuarine Distribution of Non-Conservative Substances, Jour. Sanit. Div., ASCE, Vol. 91, No. SA1, Feb, 1965
- 30) Okubo, A.; Effect of Shoreline Irregularities on Streamwise Dispersion in Estuaries and Other Embayments, Netherlands Jour. Sea. Res., 6(1-2) pp. 213-224, 1973
- 31) Okubo, A.; Some Remarks the Shear Effect on Horizontal Dispersion, Jour of Oceanograph Soc of Japan, Vol. 24, pp. 60-69, 1968
- 32) Pearson, E.A.; Tracer Methodology and Pollution Analyses of Estuaries, Proc. 1st Int.Conf on Waste Disposal in the Marine Environment, Pergamon Press, New York, 1960
- 33) Phelps, E. and C. Velz; Pollution of New York Harbor, Sewage Works, Jour, Vol. 5, No. 1, 1933
- 34) Pritchard, D.W. and Kent, R.E.; A Test of Mixing Length Theories in a Coastal Plain Estuary, Jour. Marine Res., 18, pp. 62-72, 1959
- 35) Pritchard, D.W.; Observations of Circulations in Coastal Plain Estuaries, Estuaries, AAAS Publ. No. 83, Washington, D.C., pp. 37-44, 1967
- 36) Pritchard, D.W.; The Movement and Mixing of Contaminants in Tidal Estuaries, Proc. 1st Int. conf on Waste Disposal in the Marine Environ Pergamon Press, New York, 1960
- 37) Stoker, J.J.; Water Waves, Interscience Publ. New York, 1957
- 38) Stolzenbach, K. and Harleman, D.R.F.; Fluid Mechanics of Heat Disposal from Power Generation, Ann. Rev. Fluid Mech. 4, pp.7-32, 1972
- 39) Stommel, H.; Computation of Pollution in a Vertically Mixed Estuary, Sewage and Industrial wastes, Vol. 25, No. 9, pp. 1065-1071, Sept. 1953
- 40) Stommel, H.; Proceeding of the Colloquium on the Flushing of Estuaries, Woods Hole Oceanographic Inst., No. 50-53, Oct. 1950
- 41) Taylor, G.I., Dispersion of Soluble Matter in Solvent Flowing Slowly through a Tube, Proc. Roy. Soc. London, A, 219, 1953
- 42) Taylor, G.I.; The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe, Proc. Roy.Soc. London, A. 223, 1954
- 43) Wang, S.T.et. al.; Analytical Model of Dispersion in Tidal Fjords, Jour. Hydr. Div., ASCE, Vol.103, No. Hy7, pp. 737-751, July, 1977
- 44) Wara, P.R.B.; Transversed Dispersion in Oscillatory Channel Flow, Jour. Hydr. Div., ASCE, Vol. 100 No. HY6 pp. 755-772, June, 1974
- 45) Yeh, G.T.; Three Dimensional Pollutant Modeling in Shear Flows, Jour. Hydr Div., ASCE, Vol. 12, No. HY3, pp. 351-364, Mar., 1976
- 46) Yoon, T.H.; Dead Zones on Longitudinal Dispersion in Natural Streams, Int.Conf on Water Resour. Eng, Bangkok, Thailand, Jan., 1978
- 47) 韓國船舶海洋研究所, 河口의 潮汐플러팅現象 및 汚染物質分布狀況의推定, 1977. 2