

하구의 염수침입을 해석하기 위한 연직 2차원 수치모형 개발

Development of a Laterally Averaged 2-Dimensional Model for Saltwater Intrusion in Estuary

이 종 욱* / 이 봉 희** / 조 용 식*** / 윤 태 훈****

Lee, Jong Wook / Lee, Bong-Hee / Cho, Yong-Sik / Yoon, Tae Hoon

Abstract

A laterally averaged 2-dimensional hydrodynamic model is newly developed. The coordinate system is first transformed to minimize the effects of irregularity of bottom and surface. The advection terms of the governing equations are then discretized by an upwind scheme. By employing an explicit scheme for longitudinal direction and an implicit scheme for vertical direction, the model is free from restriction of temporal step size caused by a relatively small grid ratio. To demonstrate the applicability of the model, calculated time histories of free surface displacements and distributions of velocity and salinity are compared with the field measurements of the Keum River Estuary before construction of the estuary dam. A reasonable agreement is observed between them.

keywords : saltwater intrusion, laterally averaged 2-dimensional hydrodynamic model, advection-diffusion equation, coordinate transform, upwind scheme

요 지

하폭으로 평균된 2차원 동수역학 수치모형을 수립하였다. 수심방향으로 좌표변환하여 자유수면과 하상의 불규칙성에 대한 영향을 최소화하였다. 지배방정식의 이송항은 풍상차분기법을 이용하여 유속과 염분의 이송현상이 잘 표현되도록 하였다. 또한 흐름방향으로는 양해법을, 수심방향으로는 음해법을 사용하여 수심방향 격자중분이 매우 작기 때문에 야기되는 시간중분의 제약에서 벗어나도록 하였다. 모형의 적용성을 검증하기 위해 자유수면변위, 속도 및 염도분포에 관한 계산결과와 하구둑 건설이전의 금강하구의 관측치를 비교하였다. 계산결과는 관측자료와 잘 일치한다.

핵심용어 : 염수침입, 연직 2차원 동수역학모형, 이송-확산방정식, 좌표변환, 풍상차분기법

* 한양대학교 공과대학 토목공학과 인턴연구원

Interim Researcher, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

** 건설교통부 부산지방국토관리청 하천국장

Assistant Director, Pusan Regional Construction Management Office, Ministry of Construction and Transportation

*** 한양대학교 공과대학 토목공학과 조교수

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(E mail : ysc59@email.hanyang.ac.kr)

**** 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

Professor, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

1. 서 론

수리학의 주요 관심분야 중 하나인 하구는 인류에게나 자연생태계에 많은 이점을 제공해 왔다. 여러 동물의 서식처를 제공하고 초기 문명의 발상지로서, 근대에 와서는 자연 발생적인 항구로서의 역할을 수행하였고 중공업 발전의 기반 및 풍부한 해산물의 공급처로서의 역할과 특히 각종 오염물의 자연처리장의 역할을 담당해 왔다. 그러나 하구로부터 유입되는 염수때문에 인근의 수질과 농경지에 피해를 발생시키고 있으며, 이러한 피해를 감소시키기 위해 하구언과 같은 인공구조물을 설치하였으나 급격한 자연환경의 변화로 예측하기 어려운 피해가 발생하고 있는 실정이다. 따라서 염수침입(saltwater intrusion)에 관한 하구에서의 수리학적 거동에 관한 연구가 필요하다.

염수침입의 수리학적 특성에 관한 국내의 연구는 미흡한 실정이다. 염도 확산에 대한 국내 연구는 주철(1982), 강주환(1991) 등이 있고 그 밖에 하구에서의 유동장만을 고려한 연구(최병호 등, 1987; 군산항건설사무소, 1988)와 염수침입 현상과 반대로 담수유출이 해양환경에 미치는 영향에 관한 해양공학적 연구(정종률, 1983; 오임상과 최현우, 1986) 등이 있다. 국외 연구로는 1950년대 초반에 Pritchard(1952)가 하구에서의 염도 혼합양태와 확산계수의 결정 및 수학적 모형에서 각 항들의 상대적 중요성 등과 같은 기초적인 연구를 수행하였다. 1970년대에 컴퓨터의 급속한 발전에 힘입어 보다 많은 수치적 기법이 개발되었다. 폭이 좁고 성층화된 하구에서의 수치계산이 Grubert와 Abbott(1972)에 의해 수행되었고, Prandle과 Crookshank(1974)가 St. Lawrence강 하구에 대한 유속장의 분포를 양해법을 써서 계산하였으며, Hodgins(1979)가 1차원 수치모형의 계산 결과를 성층화된 수조의 실험결과와 비교하였다. 밀도류 순환에 관한 연구는 James강에서 염도에 관한 수치해석에 관한 Godfrey(1980)연구와 Chu와 Yeh(1980)의 $x-y$ 방향에 관한 유속장과 염도분포에 관한 연구 등이 있다.

현재까지의 $x-z$ 방향에 관한 연구는 운동량방정식의 이송항을 제외하고 해석한 연구(Boericke와 Hogan, 1977; Blumberg, 1977; 강주환, 1991)가 대부분이며, 자유수면의 계산을 위해 최상위층을 따로 계산하는 Blumberg(1977)의 연구, 수심방향 유속분포를 power-law에 의해 계산하고 이를 이용하여 염도의

이송-확산방정식을 해석한 Basha(1997)의 연구가 있다.

본 연구에서는 이송항을 포함한 운동량방정식을 해석하였으며 이를 해석하기 위해 Roe 평균치를 이용하였다. 여기서 사용된 Roe기법은 개략 Riemann해(approximate Riemann solver)의 하나로서 비선형 항의 해석에 비교적 간편하고 안정적으로 이용할 수 있다(Toro, 1999). 또한 자유수면 계산을 위해 하상에서 수면까지 무차원 변수 σ 를 도입하여 해수와 담수의 혼합으로 밀도류가 형성되며 난류양상을 띠는 흐름을 해석할 수 있는 연직 2차원 동수역학 수치모형과 염도의 분포양상을 모의할 수 있는 염도의 이송-확산 수치모형을 개발하였다. 개발된 수치모형은 적용성과 정확성을 검증하기 위하여 하구둑 건설전의 금강 하구의 수위, 속도 및 염도분포를 계산하여 기존의 관측결과와 비교하였다.

2. 지배방정식

연직 2차원 수치모형의 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes 방정식과 이송-확산방정식을 그림 1의 $y_1(x, z)$ 에서 $y_2(x, z)$ 까지 하폭으로 적분하여 구할 수 있으며 운동량방정식의 입력항은 염도의 상태방정식, 즉 식 1(d)를 이용하여 수면과 염도의 변위항으로 표현하였다. 하폭방향의 속도 및 가속도가 무시할 수 있을 정도로 작다는 가정과 정수압 분포가정 및 Boussinesq가정을 도입하면 식 (1)과 같은 방정식을 얻을 수 있다(Blumberg, 1977; Boericke와 Hogan, 1977).

$$\frac{\partial(bu)}{\partial x} + \frac{\partial(bw)}{\partial z} = 0 \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(bu)}{\partial t} + \frac{\partial(bu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(buw)}{\partial z} \\ & + bg \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{(\eta-z)}{(1+\alpha S)} \alpha \frac{\partial S}{\partial x} \right\} \\ & = - \frac{gn^2}{H^{1/3}} |u| u \left| \frac{\partial b}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(b \epsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(b \epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} \quad (1b) \end{aligned}$$

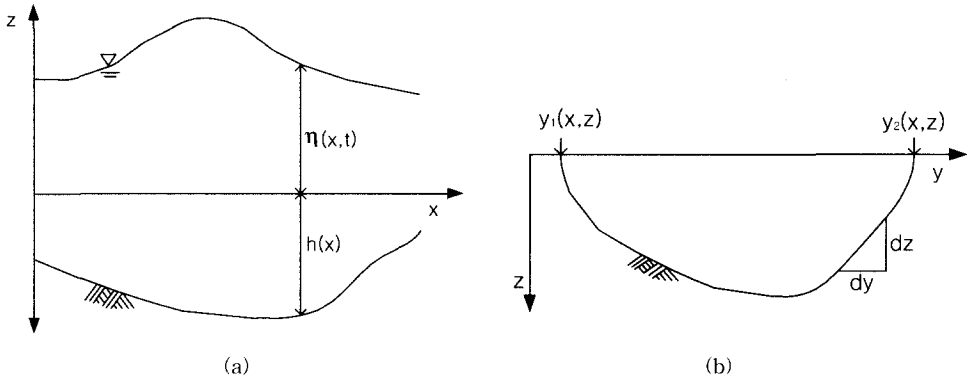


그림 1. $x-z$ 모형의 좌표축

$$\frac{\partial(bS)}{\partial t} + \frac{\partial(buS)}{\partial x} + \frac{\partial(bwS)}{\partial z} \quad (1c)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(bK_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(bK_z \frac{\partial S}{\partial z} \right)$$

$$\rho = \rho_o(1 + 10^{-3}\sigma_t) = \rho_o(1 + \alpha S) \quad (1d)$$

여기서 x 와 z 는 흐름방향과 수심방향의 좌표축이며, u 와 w 는 각각 x 와 z 방향의 유속, b 는 하폭, g 는 중력가속도, η 는 자유수면변위, $H = \eta + h$ 로서 수면변위와 수심을 더한 값이며 ϵ_x 와 ϵ_z 는 x 와 z 방향의 유효점성계수, K_x 와 K_z 는 x 와 z 방향의 확산계수, n 은 조도계수이고 S 는 염분의 농도이다. 식 1(d)는 염도에 관한 상태방정식으로 ρ 는 해수의 밀도, ρ_o 는 담수의 밀도로 4°C에서 1 g/cm³의 값을 갖는다. 또한, σ_t 는 염도와 온도 및 압력의 함수이며 담수와 합류하는 하구에서는 주로 염도의 영향이 크다. 따라서 σ_t 를 염도만의 함수로 선택하였을 때 $\alpha = (\partial\rho/\partial S)/\rho_o$ 이며 대략 0.00078(%)⁻¹의 값을 갖는다(Grandpré 등, 1981). 그러나 식 1(a)의 연속 방정식만으로는 수면변위를 계산할 수 없으므로 연속 방정식을 수심으로 적분한 자유수면방정식으로부터 이를 구한다. 운동학적 경계조건(kinematic boundary condition)을 이용하여 수심적분한 자유수면방정식은 식 1(e)와 같다.

$$b(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \int_{-h}^{\eta} (bu) dz \right\} = 0 \quad (1e)$$

식 (1)의 지배방정식을 수치적으로 해석할 때 그림 1에서 보는 바와 같이 하상과 자유수면의 변화로 인하여 수치해석과 경계조건의 부여 등이 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 식 (2)와 같은 무차원변수, $\sigma(x, z, t)$ 를 도입하여 그림 2와 식 (3)과 같이 좌표를 변환하였다(Boericke와 Hogan, 1977; Perrels와 Karelse, 1981; 강주환, 1991).

$$\sigma = \frac{z + h(x)}{\eta(x, t) + h(x)} = \frac{z + h(x)}{H(x, t)} \quad (2)$$

식 (2)에 의해서 z 좌표는 바닥에서 $\sigma = 0$, 자유수면에서 $\sigma = 1$ 로 치환함으로써 그림 2(a)와 같이 불규칙한 z 방향 격자간격이 그림 2(b)처럼 일정해지며 하상과 자유수면의 격자망이 매끄럽게 연결되어 폐경계에서 발생할 수 있는 문제를 최소화할 수 있다. 그러나 좌표변환에 의해 생성되는 항을 추가로 해석해야 하므로 수치해석이 어려워지며 계산시간이 다소 증가하는 단점이 있다(Hoffmann과 Chiang, 1993).

$$\frac{\partial(bu)}{\partial x} + \sigma_x \frac{\partial(bu)}{\partial \sigma} + \sigma_z \frac{\partial(bw)}{\partial \sigma} = 0 \quad (3a)$$

$$b(\eta) \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ H \int_0^1 (bu) d\sigma \right\} = 0 \quad (3b)$$

□ □ □ □ □ Surface Elevation Node
 ★ ★ ★ ★ ★ Velocity/Salinity Node

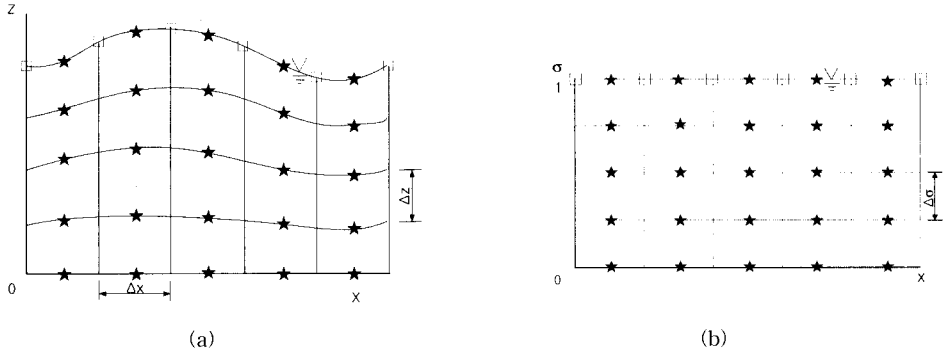


그림 2. 좌표변환과 유한차분 계산격자

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(Hbu)}{\partial t} + \frac{\partial(Hbu^2)}{\partial x} + H \frac{\partial(bu\Psi)}{\partial \sigma} \\ & + gHb \frac{\partial \eta}{\partial x} + gb \frac{\alpha H^2(1-\sigma)}{(1+\alpha S)} \left(\frac{\partial S}{\partial x} + \sigma_x \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) \quad (3c) \\ & = -\frac{gn^2}{H^{1/3}} |u|u \frac{\partial b}{\partial \sigma} + H \frac{\partial}{\partial x} \left(b\epsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(b\epsilon_z \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(HbS)}{\partial t} + \frac{\partial(HbuS)}{\partial x} + H \frac{\partial(b\Psi S)}{\partial \sigma} \quad (3d) \\ & = H \frac{\partial}{\partial x} \left(bK_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(bK_z \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) \end{aligned}$$

여기서 σ_x 와 σ_z 는 $\partial\sigma/\partial x$ 와 $\partial\sigma/\partial z$ 를 의미하며, Ψ 는 좌표변환에 의해 생성된 항으로 식 (4)와 같다.

$$\Psi = \frac{\partial\sigma}{\partial t} + u \frac{\partial\sigma}{\partial x} + w \frac{\partial\sigma}{\partial z} \quad (4)$$

3. 유한차분기법과 초기 및 경계조건

제2장의 지배방정식은 서로 연관된 시스템(coupled system)에서 계산하게 된다. 즉, 동수역학모형에서 얻어진 유속분포는 염도에 영향을 미치게 되고 운동량방정식에는 염도항이 포함되어 있으므로 운동량방정식과 오염물 이송-확산방정식은 독립적으로 풀 수 없으며, 이들은 반드시 순차적으로 해석하여 결과를 얻어야 한다(그림 3).

운동량방정식과 오염물 이송-확산방정식의 이송항은 풍상차분법(upwind scheme), 확산항은 중앙차분법을 이용하여 차분하였으며 수심방향으로는 음해법, 흐름방향으로는 양해법으로 차분하여 흐름방향의 격자증분 (Δx)에 비해 수심방향의 격자증분 (Δz)이 매우 작아 발생하는 시간증분의 제약으로부터 벗어나도록 하였다. 연속방정식과 자유수면방정식은 중앙차분법이 사용되었으며 자유수면방정식의 비선형항은 반복계산에 의한 선형화기법을 이용하여 해석하였다.

3.1 운동량방정식

운동량방정식의 유한차분방정식은 중앙차분법과 풍상차분법을 사용하여 다음과 같이 전개하였다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} \{ (Hb)_{i,k}^n u_{i,k}^{n+1} - (Hbu)_{i,k}^n \} \\ & + \frac{1}{\Delta x} \{ H_R^n b_R^n (u^2)_R^n - H_L^n b_L^n (u^2)_L^n \} \\ & + \frac{H_i^n}{\Delta \sigma} \{ b_T^n u_T^{n+1} \Psi_T^n - b_B^n u_B^{n+1} \Psi_B^n \} \quad (5) \\ & + \frac{g(Hb)_{i,k}^n}{\Delta x} (\eta_{i+1/2}^{n+1/2} - \eta_{i-1/2}^{n+1/2}) \\ & + gb_{i,k}^n \frac{\alpha(H_i^n)^2(1-\sigma_k)}{(1+\alpha S_{i,k})} \\ & \left\{ \frac{(S_{i,k+1}^n - S_{i,k-1}^n)}{2\Delta x} + \sigma_x \frac{(S_{i+1,k}^n - S_{i-1,k}^n)}{2\Delta \sigma} \right\} \end{aligned}$$

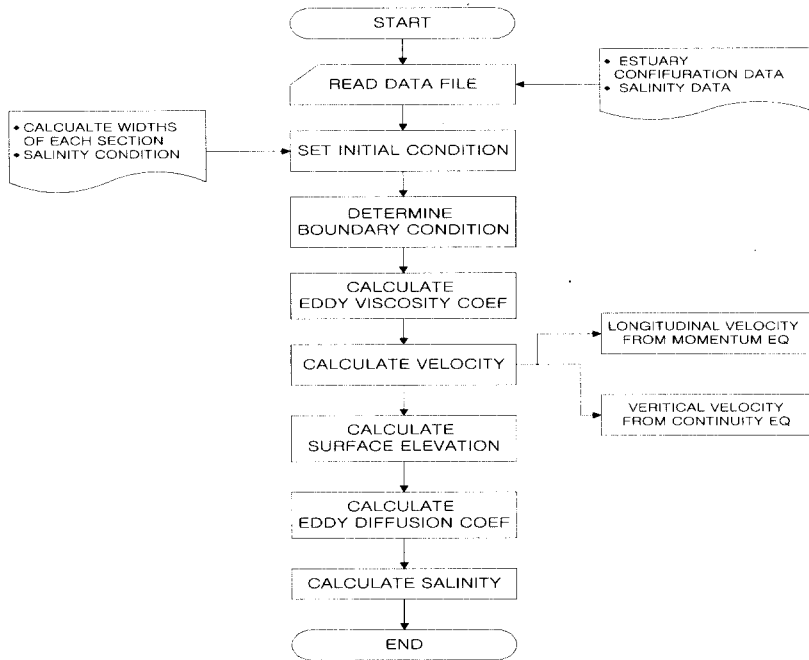


그림 3. 수치모형의 계산흐름도

여기서 위첨자 n 은 시간단계를 나타내며, 아래첨자 i 와 k 는 각각 x 와 z 방향의 공간증분을 의미한다. 이송항의 유한차분에 사용된 아래첨자 R, L 과 T, B 는 u 와 Ψ 에 의해 결정되는 향으로 식 (6)과 같다.

$$b_R = \begin{cases} b_{i,k} & \text{for } u_R > 0 \\ b_{i+1,k} & \text{for } u_R < 0 \end{cases}, \quad (6a)$$

$$b_L = \begin{cases} b_{i-1,k} & \text{for } u_L > 0 \\ b_{i,k} & \text{for } u_L < 0 \end{cases},$$

$$b_T = \begin{cases} b_{i,k} & \text{for } \Psi_T > 0 \\ b_{i,k+1} & \text{for } \Psi_T < 0 \end{cases}, \quad (6b)$$

$$b_B = \begin{cases} b_{i,k-1} & \text{for } \Psi_B > 0 \\ b_{i,k} & \text{for } \Psi_B < 0 \end{cases}$$

식 (6)에서 u_R, u_L, Ψ_T, Ψ_B 는 식 (7)을 이용하여 계산할 수 있으며 이는 개략 Riemann해 중의

하나인 Roe기법에서 사용된 평균치(Roe, 1981; Jha 등, 1994; 윤태훈과 이종욱, 1999)이다.

$$u_R = \frac{\sqrt{b_{i,k}} u_{i,k} + \sqrt{b_{i+1,k}} u_{i+1,k}}{\sqrt{b_{i,k}} + \sqrt{b_{i+1,k}}}, \quad (7a)$$

$$u_L = \frac{\sqrt{b_{i,k}} u_{i,k} + \sqrt{b_{i-1,k}} u_{i-1,k}}{\sqrt{b_{i,k}} + \sqrt{b_{i-1,k}}}$$

$$\Psi_T = \frac{\sqrt{b_{i,k}} \Psi_{i,k} + \sqrt{b_{i,k+1}} \Psi_{i,k+1}}{\sqrt{b_{i,k}} + \sqrt{b_{i,k+1}}}, \quad (7b)$$

$$\Psi_B = \frac{\sqrt{b_{i,k}} \Psi_{i,k} + \sqrt{b_{i,k-1}} \Psi_{i,k-1}}{\sqrt{b_{i,k}} + \sqrt{b_{i,k-1}}}$$

3.2 연속방정식

운동량방정식에서 흐름방향 유속 u 를 계산한 후, 이를 식 (8)에 대입하여 수심방향 유속 w 를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{(bu)_{i+1,k} - (bu)_{i-1,k}}{2\Delta x} \\ & + \sigma_x \frac{(bu)_{i,k+1} - (bu)_{i,k-1}}{2\Delta\sigma} \\ & + \sigma_z \frac{(bu)_{i,k+1} - (bu)_{i,k-1}}{2\Delta\sigma} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

3.3 자유수면방정식

계산된 유속분포를 이용하여 $\Delta t/2$ 시간 후에 자유수면방정식에서 수면변위 η 를 구한다.

$$\eta_{i+1/2}^{n+3/2} = \eta_{i+1/2}^{n+1/2} - \frac{1}{b_{i,kmax}^n} \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{i+1}^{n+1} - Q_i^{n+1}) \quad (9)$$

식 (9)에서 $b_{i,kmax}^n$ 는 자유수면상에서의 하폭 $b(\eta)$ 를 나타내며, Q 는 사다리꼴 면적공식(Boericke와 Hogan, 1977; 강주환, 1991)을 이용한 식 (10)에서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_i^{n+1} &= \left[\frac{1}{2} \{ (bu)_{i,1}^{n+1} + (bu)_{i,kmax}^{n+1} \} \right. \\ & \left. + \sum_{k=2}^{kmax-1} (bu)_{i,k}^{n+1} \right] \cdot (\eta + h)_i^{n+1} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)의 η_i^{n+1} 이 미지이므로 η_i^{n+1} 대신에 $\eta_i^{n+1/2}$ 를 대입해 Q_i^{n+1} 를 구한 후 식 (9)로부터 $\eta_i^{n+3/2}$ 를 계산한다. 그러나 η_i^{n+1} 와 $\eta_i^{n+1/2}$ 가 같지 않기 때문에 $\eta_i^{n+3/2}$ 와 $\eta_i^{n+1/2}$ 를 다시 식 (10)에 대입하여 식 (10)에 대입하는 값과 식 (9)에서 계산된 값의 차이가 충분히 작아질 때까지 반복하여 계산하였다.

3.4 염도의 이송-확산방정식

이송-확산방정식의 유한차분은 운동량방정식의 경우와 같이 이송항에 대해서는 Roe 평균치를 이용한 풍상차분법을 사용하였는데 이 기법은 이송항의 물리적 특성을 잘 표현한다는 것과 Peclet 수가 큰 경우에도 안정성이 있다는 장점이 있다(Hoffmann과 Chiang, 1993). 또한 확산항은 중앙차분법을 이용하고 흐름방향은 양해법, 수심방향은 음해법으로 전개하여 시간증분을 크게 할 수 있도록 하였다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} \{ (HbS)_i^{n+1} - (HbS)_{i,k}^n \} \\ & + \frac{1}{\Delta x} \{ H_R^n b_R^n u_R^n S_R^n - H_L^n b_L^n u_L^n S_L^n \} \\ & + \frac{H_i^{n+1}}{\Delta\sigma} \{ b_T^{n+1} \psi_T^{n+1} S_T^{n+1} - b_B^{n+1} \psi_B^{n+1} S_B^{n+1} \} \\ & = \frac{H_i^{n+1}}{\Delta x^2} \{ (bK_x)_{i+1/2,k}^n (S_{i+1,k}^n - S_{i,k}^n) \\ & - (bK_x)_{i-1/2,k}^n (S_{i,k}^n - S_{i-1,k}^n) \} \\ & + \frac{1}{H_i^{n+1} \Delta\sigma^2} \{ (bK_z)_{i,k+1/2}^n (S_{i,k+1}^{n+1} - S_{i,k}^{n+1}) \\ & - (bK_z)_{i,k-1/2}^n (S_{i,k}^{n+1} - S_{i,k-1}^{n+1}) \} \end{aligned} \quad (11)$$

3.5 초기조건과 경계조건

동수역학모형의 초기조건은 원상시동(cold start)을 하더라도 그 영향은 오래가지 못하고 곧 소멸되나 염도의 이송-확산모형에서는 매우 중요하다(Chu와 Yeh, 1980). 따라서 염도의 초기조건은 관측치를 사용하는 것이 가장 바람직하나 관측치가 없는 경우 하구에서 상류경계까지 선형분포식을 사용하기도 한다(Boericke와 Hogan, 1977; 강주환, 1991). 본 연구에서도 관측치의 미비로 식 (12)와 같은 선형분포식을 사용하여 이송-확산모형의 초기조건을 결정하였다.

$$S(x, z) = \begin{cases} A_R(L_R - x)/L_R & \text{for } x \leq L_R \\ 0 & \text{for } x \geq L_R \end{cases} \quad (12)$$

식 (12)에서 A_R 은 하구에서의 염도이고 L_R 은 간조시 외해경계로부터 염도가 0에 가까운 지점까지의 거리로서 본 연구에서는 관측치(정종률, 1983)를 참조하여 $L_R = 10\text{km}$ 를 선택하였다.

동수역학모형의 개방경계조건은 하류와 상류 모두 관측수위를 사용하였다. 폐경계에서 경계조건은 운동량방정식에 사용되는 흐름방향유속 u 에 관한 조건과 연속방정식의 수심방향유속 w 에 관한 조건을 모두 고려해야 한다. 식 13(a)는 u 에 관한 경계조건으로 수면에서는 바람에 대한 마찰력이 무시되었으나 바닥에서는 조도에 의한 마찰력을 고려할 수 있도록 하였다. 식 13(b)는 w 에 관한 경계조건으로 자유수면방정식

의 유도에 사용되었던 운동학적 경계조건이다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=1} &= 0, \quad \varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=\Delta\sigma} \\ &= \frac{\tau_b}{\rho} = \frac{gn^2}{H^{1/3}} u|u \Big|_{\sigma=\Delta\sigma} \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} w|_{\sigma=1} &= \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \Big|_{\sigma=1}, \\ w|_{\sigma=\Delta\sigma} &= -u \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\sigma=\Delta\sigma} \end{aligned} \quad (13b)$$

이송-확산모형의 폐경계조건은 동수역학모형의 자유수면에 관한 조건과 같이 염도의 변화율을 0으로 하는 조건을 사용하였다. 개방경계는 낙조와 창조때 각각 다른 식이 사용될 수 있다. 먼저, 낙조의 경우 이송항만으로 표현된 식 14(a)를 사용하는 방법(Blumberg, 1977; Falconer, 1984)과 확산의 효과를 고려할 수 있는 식 14(b)를 사용하는 방법(강주환, 1991)이 있으며 본 연구에서는 식 14(b)를 사용하여 확산의 효과가 포함되도록 하였다.

$$S_{i,k}^{n+1} = S_{i,k}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (S_{i+1,k}^n - S_{i,k}^n) u_{i,k}^n \quad (14a)$$

$$S_{i,k}^{n+1} = S_{i,k}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (S_{i+1,k}^n - S_{i,k}^n) u_{i,k}^n E_d \quad (14b)$$

식 14(b)에서 E_d 는 확산효과를 고려한 계수이며 창조시의 경계조건은 식 (15)를 사용하였다(Chu와 Yeh, 1980; 강주환, 1991).

$$S(t) = S(t_p) + \frac{A}{2} + \frac{A}{2} \cos\{\phi + \omega(t - t_p)\} \quad (15)$$

식 (15)에서 A 는 해수의 염도와 하류단에서의 관측 최저염도 $S(t_p)$ 와의 차이값으로 매주기마다 값이 산정되고 ω 는 주파수, $t - t_p$ 는 가장 최근 만조가 시작하는 시각 t_p 부터 계산시각 t 까지의 시간이다.

3.6 유효점성계수와 확산계수의 산정

일반적으로 하구는 조석에 의해 영향을 받는다. 조석의 영향으로 인해 염분이 유입되고 이 염분은 이송과 난류확산에 의해 상류로 전파된다. 따라서 흐름방향

과 수심방향의 흐름 및 염도분포를 정확하게 예측하기 위해서는 유효점성계수와 확산계수의 산정이 무엇보다 중요하다. 이들 계수는 식 (16)의 Richardson수 즉, Ri 와 밀접한 관계가 있으며 Ri 가 커질수록 확산현상은 줄어들어 한계 Richardson수 Ri_c 에 도달하게 되면 확산현상은 멈추게 된다. 그러므로 이들 계수는 Ri 와의 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$Ri = -ga \frac{\partial S}{\partial z} \Big/ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (16)$$

수심방향 확산계수 K_z 는 중립상태($Ri = 0$)의 확산계수 K_o 를 이용하여 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$K_z = K_o \phi(Ri) \quad (17)$$

식 (17)에서 $\phi(Ri)$ 는 Ri 에 관한 함수로서 Blumberg(1977)에 의하면 식 (18)과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi(Ri) = \begin{cases} \left(1 - \frac{Ri}{Ri_c}\right)^{1/2} & \text{for } Ri < Ri_c \\ 0 & \text{for } Ri \geq Ri_c \end{cases} \quad (18)$$

식 (18)에서 Ri_c 는 현장의 관측결과로부터 결정되어야 하나 충분한 관측자료가 없으므로 본 연구에서는 Blumberg(1977)가 제안한 $Ri_c = 10$ 을 사용하였다. 또 중립상태의 확산계수, K_o 는 혼합거리 이론에 따른 식 (19)를 사용하였다.

$$K_o = k_2^2 (z+h)^2 \left(1 - \frac{z}{H}\right)^2 \Big| \frac{\partial u}{\partial z} \Big| \quad (19)$$

유효점성계수, ε_z 도 K_z 와 같이 Ri 의 함수로 표현할 수 있으며 이는 식 (20)과 같다.

$$\varepsilon_z = \begin{cases} \frac{k_1}{k_2} K_z (1 + Ri) & \text{for } Ri < Ri_c \\ 0 & \text{for } Ri \geq Ri_c \end{cases} \quad (20)$$

식 (20)에서 k_1 과 k_2 는 조정가능한 계수로서

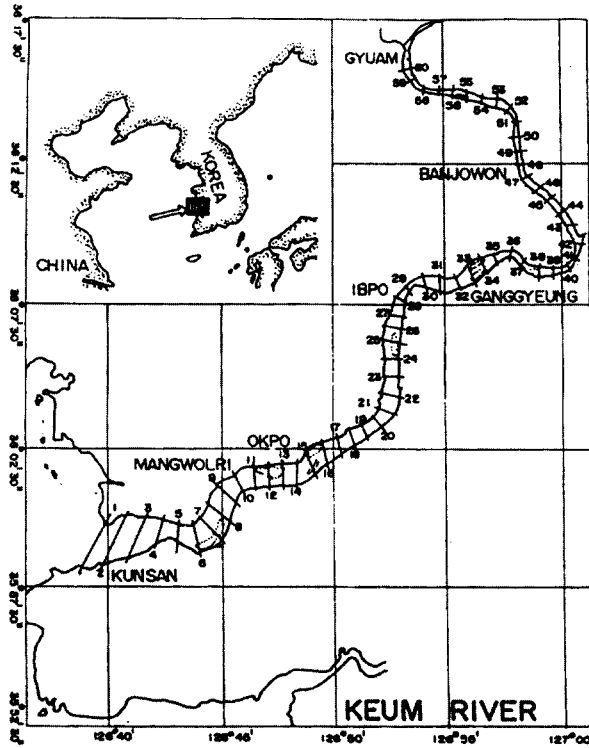


그림 4. 모형의 적용구간

Blumberg(1977)는 이들 계수를 각각 0.1로 제안하였다.

흐름방향 유효점성계수, ϵ_x 와 확산계수, K_x 는 Boericke와 Hogan(1977)이 제안한 식 (21)을 사용하였다.

$$\epsilon_x = K_x = C_d(x) bu \quad (21)$$

식 (21)에서 $C_d(x)$ 는 경험적인 계수로서 수치모의를 통해 결정될 수 있으며, Boericke와 Hogan(1977)이 사용한 값은 0.25이다.

4. 수치모형의 적용

본 모형의 적용성 및 정확성을 검증하기 위하여 하구둑 건설 이전의 금강 하류부를 적용대상으로 선정하였다(그림 4). 검증기간은 유속과 염분의 관측치가 존재하는 1982년 6월로 선택하였다. 모형의 적용구간은 금강외항에서부터 상류 59km지역에 위치한 규암관측

소까지로서 좌표축은 하구의 상류방향을 x 축, 연직방향을 z 축으로 선택하였으며, 평균해수면보다 1.5m 높은 가상선을 z 축의 원점으로 사용하였다. 공간격자 $\Delta x=1000m$, $\Delta \sigma=0.1$ 로 유한차분망을 구성하였으며 시간증분 Δt 는 평균수심이 약 10m이므로 Courant 조건에 따라 $1000/(9.8 \times 10)1/2 \approx 100sec$ 이어야 하나 계산의 편의상 60sec로 선택하였다. 동수역학모형의 개방경계조건은 군산외항의 조석관측자료와 규암관측소의 수위관측자료를 사용하였다.

동수역학 모형에서 초기조건의 영향을 없애기 위해 약 2주기 동안 동수역학 모형을 계산한 후 염도의 경계조건이 부여되도록 하였으며 이 때 확산효과를 고려하기 위해 식 14(b)의 $E_d=0.15$ 를 사용하였다. 식 (20)의 k_1 과 k_2 는 Blumberg(1977)가 사용한 0.1을 사용하였으며 식 (21)의 $C_d(x)$ 는 Boericke와 Hogan(1977)이 제안한 0.25를 사용하였다. 조도계수는 농업진흥공사의 단면자료와 같이 제시된 값을 사용

하였으며, 이 값은 0.020~0.028의 범위를 갖는다.

그림 5 ~ 8은 본 모형의 계산결과와 관측결과를 비교한 것이다. 본 모형의 검증에 위해 사용된 관측결과는 정종률(1983)의 측정결과를 이용하였다. 이 관측결과는 소조기(82년 6월 15일 ~ 17일)와 대조기(82년 6월 22일 ~ 24일)에 금강하구의 6개 지점에서 조위와 유속, 염분과 온도를 측정된 것으로 그림 4에 나타난 단면과 일치하는 곳은 단면1, 단면2, 단면5와 단면10 등의 4 지점이다. 정종률(1983)은 수리량의 측정을 위하여 금강하구를 상류와 하류로 구분하여 약 30시간 간격을 두고 3지점씩 측정하였다. 이 때 측정기기는 유속 측정에는 CM-2형 전기유속계와 DCM-2형 전기유속계, 염분과 온도 측정에는 NIO T-S 측정기와 T-S 측정기, 조위의 측정에는 검조표척에 의한 목측에 의해 측정되었다. 본 연구에서는 이 측정결과

중 소조기에 해당하는 자료를 계수화(digitization)하여 사용하였다. 그림 5~8에서 선으로 표현된 것은 계산결과를, 기호(symbol)로 표현된 것은 관측치를 나타낸다. 아래첨자 s , m , b 는 각각 수면, 평균, 바닥의 의미하나 유속의 경우 u_b 는 바닥에서 100cm 떨어진 지점에서 관측된 것이다. 특히 그림 7은 모형의 하류 단 경계인 단면1의 결과로서 염도의 경계조건이 적절하게 산정되었음을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 유속의 시간분포는 조위와 90°의 위상차를 보이며 염도의 변화는 조위의 변화와 정확히 일치한다. 그러므로 전체적으로 개발된 수치모형에 의한 계산결과는 현장 관측자료와 잘 일치한다.

그림 9은 하구에서부터 상류로 59km 떨어진 지점까지의 흐름벡터도와 염도의 분포를 도시한 것으로 조석의 위치에 따라 유속과 염도의 분포가 적절함을 알

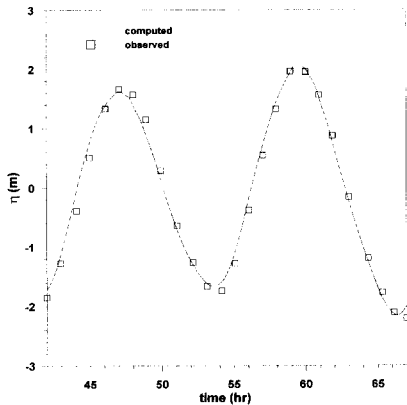


그림 5. 계산수위와 관측수위 비교(단면5)

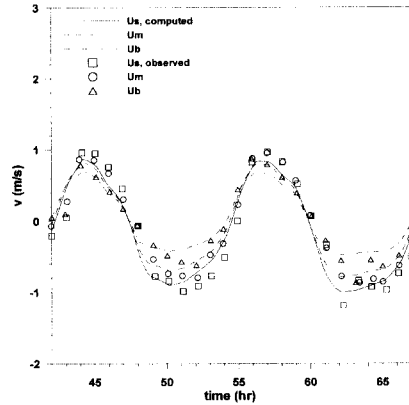


그림 6. 계산유속과 관측유속 비교(단면5)

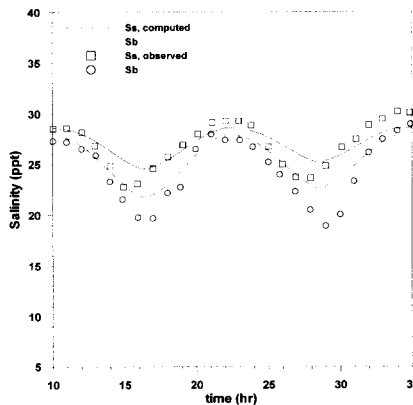


그림 7. 계산염도와 관측염도 비교(단면1)

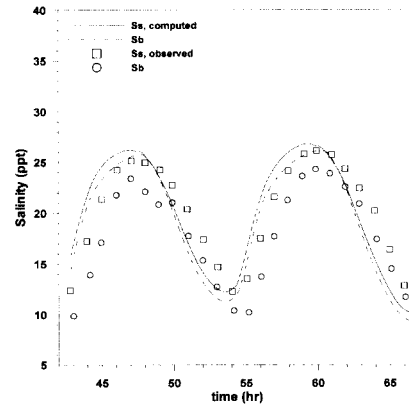


그림 8. 계산염도와 관측염도 비교(단면5)

표 1. 하구에서 수리변수의 비교

구 분	정종률(1983)	강주환(1991)	본 연구
Reynolds number	4.0×10^9	2.6×10^9	4.2×10^9
Froude number	0.07	0.07	0.09
Richardson number	0.91	1.73	1.86

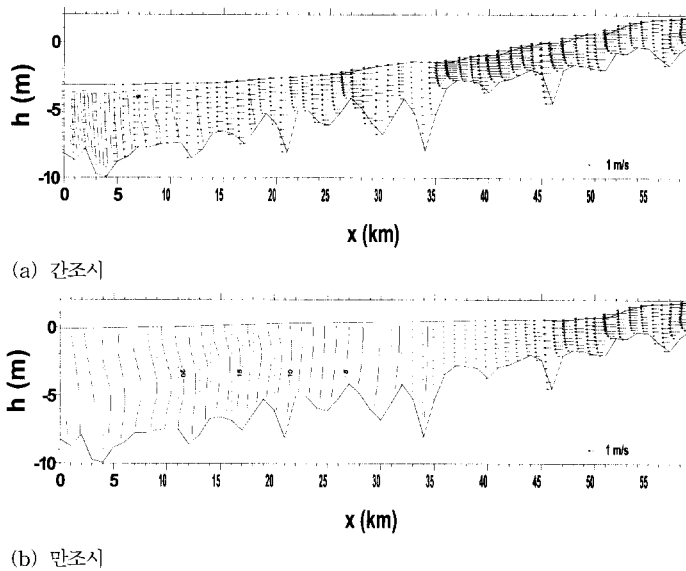


그림 9. 흐름 벡터도와 염도 분포도

수 있다. 표 1은 계산결과와 관측치의 제반 수리변수를 비교한 것으로 이로부터 금강하구는 상류(subcritical flow)이며 강한 난류의 흐름으로 분류할 수 있다.

Hansen과 Rattray(1966)는 수면의 유속과 단면평균 유속의 비율인 순환계수(circulation parameter)와 수면과 바닥의 염분 차이와 단면평균 염도의 비율인 성층계수(stratification parameter)에 따라 하구를 7가지로 분류하였으며 본 모형에서 구한 주기평균값은 각각 1.54와 0.07로 Type 1a에 속한다. Type 1a 하구의 특징은 수직혼합에 비해 수평혼합이 크고 염도의 분포는 주로 수평방향 난류확산에 영향을 받으며 약한 성층을 보인다. 본 연구의 모의 결과에서도 단면평균한 유속이 모든 깊이에서 하류를 향하고 있어 밀도류 순환현상은 확인되지 않았으며 상류로 염분의 이동은 난류확산에 의해 발생하고 약한 성층을 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 해수와 담수의 혼합으로 난류흐름이 발생하는 하구에 적용 가능한 $x-z$ 동수역학모형과 염도의 분포양상을 해석하기 위한 이송-확산모형을 개발하였다. 풍상차분기법을 이용하여 이송현상의 비교적 정확한 모의가 가능하였으며, Roe의 평균치 개념을 도입하여 큰 Peclet수에서도 안정적인 계산이 가능하도록 하였다. 또한 x 방향은 양해적으로, z 방향은 음해적으로 해석하여 z 방향 격자증분이 매우 작아서 발생할 수 있는 시간증분의 제약에서 벗어나도록 하였다.

본 모형의 적용성을 검증하기 위하여 금강하구에서 관측된 수위, 유속, 염도 등과 본 연구에서 개발한 수치모형에 의한 계산결과를 비교하였다. 수치모형에 의한 계산 결과는 관측자료와 비교하여 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 모형의 적용성과 타당

성이 간접적으로 입증되었다고 할 수 있으며, 이 연구 결과를 이용하면 상류에서 염분이 미치는 영향을 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 금강하구와 같이 아주 약한 성층을 보이는 경우에도 효과적으로 모의할 수 있는 수치모형을 구성하기 위해서는 수평2차원 모형이나 3차원 모형의 보완이 요구된다.

감사의 글

본 연구에 사용된 수치모형의 기본적인 개념은 목포대학교의 강주환교수가 제공한 것으로 이에 감사를 드립니다. 본 연구는 해양수산부 2000년 해양한국발전프로그램 연구개발사업(사업명: 서해연안의 방재시스템구축에 관한 기초연구)으로부터 재정적 지원을 받았기에 이에 사의를 표합니다.

참고 문헌

강주환 (1991). 유한차분모형에 의한 하구의 염도확산 분석. 박사학위논문, 서울대학교.
 군산항건설사무소 (1988). 금강하구 수리현상조사 보고서.
 건설부 수로국 (1982). 군산외항 검조기록표.
 오임상, 최현우 (1986). 금강하구의 수치모델을 위한 기초연구. 서울대학교 자연과학대학 해양학과.
 윤태훈, 이종욱 (1999). “불연속 흐름의 2차원 수치 해석.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제19권, 제II-4호, pp. 445~454.
 정중률 (1983). 금강 염하구의 해수순환역학, 1. 해수의 순환특성. 서울대학교 자연과학대학 해양학과.
 주철 (1982). 감조하천에서의 염분농도확산에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교.
 최병호, 이정렬, 오윤근 (1987). “하천유량의 증가에 따른 금강 조석의 변화.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제7권, 제3호, pp. 121~132.
 Basha, H.A. (1997). “Analytical model of two-dimensional dispersion in laterally nonuniform axial velocity distributions.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, pp. 853-862.
 Blumberg, A.F. (1977). “Numerical model of estuarine circulation.” *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 103, pp. 295~310.
 Boericke, R.R. and Hogan, J.M. (1977). “An x-z

hydraulic/thermal model for estuaries.” *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 103, pp. 19~37.
 Chu, W.-S. and Yeh, W.W.-S. (1980). “Two dimensional tidally averaged estuarine model.” *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 106, pp. 501~518.
 Falconer, R.A. (1984). “A mathematical model study of the flushing characteristics of a shallow tidal bay.” *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Civil Engineering*, pp. 311~332.
 Godfrey, J.S. (1980). “A numerical model of the James river estuary, Virginia, U.S.A.” *Estuarine and Coastal Marine Science*, Vol. 11, pp. 295~310.
 Grandpré, C.B. de, El-Sabh, M.I., and Salomon, J.C. (1981). “A two-dimensional numerical model of the vertical circulation of tides in the St. Lawrence estuary.” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 12, pp. 373~387.
 Grubert, J.P. and Abbott, M.B. (1972). “Numerical computation of stratified nearly horizontal flow.” *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 98, pp. 1847~1865.
 Hansen, D.V. and Rattray, Jr.M. (1966). “New dimensions in estuary classification.” *Limnology and Oceanography*, Vol. 11, pp. 319~326.
 Hodgins, D.O. (1979). “On the numerical computation of two-layer nearly horizontal flow.” *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 17, pp. 23~41.
 Hoffmann, K.A. and Chiang, S.T. (1993). *Computational Fluid Dynamics for Engineers, Volume I*. Engineering Education System.
 Jha, A.K., Akiyama, J., and Ura, M. (1994). “Modeling unsteady open-channel flows-modification to Beam and Warming scheme.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, pp. 461~476.

- Perrels, P.A.J. and Karelse, M. (1981). "A two-dimensional, laterally averaged model for salt intrusion in estuaries." *Transport Models for Inland and Coastal Waters: Proceeding of a Symposium on Predictive Ability*, pp. 483~535.
- Prandle, D. and Crookshank, N.L. (1974). "Numerical model of St. Lawrence river estuary." *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 100, pp. 517~530.
- Pritchard, D.W. (1952). "Salinity distribution and circulation in the Chesapeake bay estuarine system." *Journal of Marine Research*, Vol. 9, pp. 106~123.
- Roe, P.L. (1981). "Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes." *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357~372.
- Toro, E.F. (1999). *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Springer, pp. 341~372.

(논문번호:00-071/접수:2000.11.20/심사완료:2000.01.03)