

연직좌표변환을 이용한 하구에서의 염수침투에 관한 2차원 수치모의

Two-Dimensional Numerical Simulation of Saltwater intrusion in
Estuary with Sigma-Coordinate Transformation

배용훈*, 박성수**, 이승오***, 조용식****

Yong-Hoon Bae, Seong Soo Park, Seung Oh Lee, Yong-Sik Cho

Abstract

A more complete two-dimensional vertical numerical model has been developed to describe the saltwater intrusion in an estuary. The model is based on the previous studies in order to obtain a better accuracy. The non-linear terms of the governing equations are analyzed and the σ -coordinate system is employed in the vertical direction with full transformation which is recently issued in several studies because numerical errors can be generated during the coordinate transformation of the diffusion term. The advection terms of the governing equations are discretized by an upwind scheme in second-order of accuracy. By employing an explicit scheme for the longitudinal direction and an implicit scheme for the vertical direction, the numerical model is free from the restriction of temporal step size caused by a relatively small grid ratio. In previous researches, some terms induced from the transformation have been intentionally excluded since they are asked the complicate discretization of the numerical model. However, the lack of these terms introduces significant errors during the numerical simulation of scalar transport problems, such as saltwater intrusion and sediment transport in an estuary. The numerical accuracy attributable to the full transformation is verified by comparing results with a previous model in a simply sloped topography. The numerical model is applied to the Han River estuary. Very reasonable agreements for salinity intrusion are observed.

Key words: Two-dimensional vertical numerical model, Saltwater intrusion, Sigma-coordinate system, Estuaries.

1. 서 론

감조하천의 하구에서는 담수와 해수가 혼합하여 발생하는 흐름이 일어난다. 해수는 담수보다 밀도가 높기 때문에, 염수와 담수사이에 경계가 발생한다. 특히, 하구에서 조석의 영향이 커지게 되면 흐름이 복잡해지며 흐름의 해석이 더욱 복잡해진다. 본 연구에서는 조석의 영향을 받는 감조하천구간에서의 불규칙적인 흐름특성을 고려하여 염수침투 알고리즘을 분석한 후, 염수침투 해석을 위한 수치모형을 개발하도록 한다.

* 정회원대림산업(주) 기술연구소·공학석사 E-mail : yhb@daelim.co.kr

** 한양대학교 토목공학과 석사과정 E-mail : reibun@hanyang.ac.kr

*** 정회원 · 한양대학교 토목공학과 박사 후 연구원 · E-mail: seungoh.lee@gmail.com

**** 교신저자·정회원·한양대학교 토목공학과 교수·공학박사 E-mail : ysc59@hanyang.ac.kr

2. 염수침투 해석모형의 개발

본 연구에서 사용하는 연직 2차원 수치 모형은 비압축성 흐름의 3차원 지배방정식을 하폭방향 적분하여 얻어지는 2차원 방정식을 해석한다. 먼저, 비압축성 흐름의 3차원 지배방정식은 연속방정식 (1)과 Reynolds방정식으로 표현되는 운동량방정식 (2)와 염도의 이송-확산방정식 (3) 및 상태방정식 (4)로 표현할 수 있다(Liggett, 1994).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{p}{\rho}\right) + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z}\right) \quad (2-a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{p}{\rho}\right) + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z}\right) \quad (2-b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{p}{\rho} + gz\right) + \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial\tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z}\right) \quad (2-c)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(uS)}{\partial x} + \frac{\partial(vS)}{\partial y} + \frac{\partial(wS)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial S}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z \frac{\partial S}{\partial z}\right) \quad (3)$$

$$\rho = \rho_o(1 + 10^{-3}\sigma_\alpha) = \rho_o(1 + \alpha S) \quad (4)$$

여기서, x, y, z 는 각각 흐름방향, 하폭방향 및 수심방향의 독립변수, u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 유속, ρ 는 해수의 밀도, g 는 중력가속도, h 는 수심, p 는 압력, τ_{ij} 는 유효점성응력, S 는 염분의 농도, D_i 는 i 방향의 확산계수, ρ_o 는 담수의 밀도로 4°C일 경우 $1g/cm^3$ 이며, σ_α 는 염도와 온도 및 압력의 함수를 나타낸다.

연직 2차원 모형의 지배방정식은 하폭방향의 속도변화가 무시할 수 있을 만큼 작다는 가정하에 하폭방향의 제반 값들을 일정한 값으로 치환하기 위하여 식(1)~식(4)를 하폭방향으로 적분하게 되면 하폭방향의 변수가 없는 연직 2차원 방정식을 얻을 수 있다. 연직 2차원 지배방정식을 수치기법으로 해석할 때 하상과 자유수면 $\eta(x, t)$ 의 변화로 인하여 경계조건의 부여 등이 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 식 (5)와 같은 무차원변수 $\sigma(x, z, t)$ 를 도입하여 좌표를 변환하였다.

$$\sigma = \frac{z + h(x)}{\eta(x, t) + h(x)} = \frac{z + h(x)}{H(x, t)} \quad (5)$$

식 (5)에 의해서 z 좌표는 바닥에서 $\sigma = 0$, 자유수면에서 $\sigma = 1$ 로 치환되며 이렇게 함으로써 같이 불규칙한 z 방향 격자간격이 일정해지며 하상과 자유수면의 격자망이 매끄럽게 연결되어 폐경계에서 발생할 수 있는 문제를 최소화 할 수 있다.

3. 염수침투량 모니터링 (일산대교 현장)

일산대교 건설현장에서 채수한 시료로 염수의 농도를 계산하였다. 2006년 6월 23일 측정은 낙조시에 관측된 것으로 유속은 약 26~40cm/s이고, 염도는 0.033~0.038ppt의 범위를 나타낸다. 6월 29일 측정은 창조에서 낙조로 전환되는 시점에 관측되었으며, 창조시 유속은 최대 약 120cm/s 염도는 최대 약 0.34ppt를 나타내었다. 7월 7일 측정은 낙조에서 창조로 전환되는 시점에 관측되었으며, 유속은 2~20cm/s, 염도는 약 0.038~0.049ppt를 나타내었다. 6월 23일과 7월 7일 측정의 경

우 낙조가 끝나가는 시점으로 9시간 동안 지속된 낙조의 영향으로 유속 및 염도변화는 크지 않다. 창조사의 경우 창조가 끝나가는 시점으로 3시간 동안 지속된 창조의 영향으로 유속 및 염도의 변화폭은 크다.

분석된 염도분포의 결과를 살펴보면, 1회와 3회의 낙조사에는 염도가 수심에 따라 거의 변하지 않는다. 즉 수심별 염도차이가 거의 없으므로 완전 혼합유라 할 수 있다. 측정결과를 이용하여 표 1에 측정시간 별 평균염도와 수심 값을 나타내었다.

표 1. 상대수심에 대한 염도 (2006년)

측정일	측정 시간	평균농도($\times 10^{-3}$ ppt)	수심(m)
6월 23일	14시 40분	33.49	5.00
	15시 00분	33.87	4.99
	15시 20분	34.51	4.98
	15시 40분	35.27	4.95
	16시 00분	36.94	4.90
6월 29일	9시 30분	99.95	7.78
	10시 00분	156.46	7.85
	10시 30분	215.30	7.61
	11시 00분	278.04	7.27
	11시 30분	331.96	6.80
7월 7일	12시 30분	39.11	4.40
	13시 00분	39.51	4.25
	13시 30분	44.27	4.35
	14시 00분	46.39	4.50
	14시 30분	47.33	4.65

4. 모형의 적용

개발된 $x-z$ 모형을 이용하여 대상구간인 한강에서의 염수침투 해석을 실시하였다. 좌표축은 하구의 흐름상류방향을 x 축, 연직상향을 z 축으로 선택하였고 평균해수면보다 2.0m 높은 가상선을 z 축의 원점으로 잡았다. 현장 관측일인 2006년 6월 23일, 6월 29일, 7월 7일을 포함한 70시간 동안의 모의에 대하여 각각 Case 1~3으로 명하고 표 2에 나타내었다.

표 2. 각 Case 별 모의기간 및 일산대교 실측기간

	모의기간	일산대교 실측기간
Case 1	2006년 6월 20일 23시 00분 ~ 2006년 6월 23일 20시 00분	2006년 6월 23일 14시 40분 ~ 2006년 6월 23일 16시 00분
	2006년 6월 26일 16시 00분 ~ 2006년 6월 29일 13시 00분	2006년 6월 29일 9시 30분 ~ 2006년 6월 29일 11시 30분
Case 3	2006년 7월 4일 21시 00분 ~ 2006년 7월 7일 18시 00분	2006년 7월 7일 12시 30분 ~ 2006년 7월 7일 14시 30분

모형의 적용구간은 한강본류의 수위관측 시작지점인 전류로부터 상류 약 45km지점에 위치한 영동대교까지 약 $\Delta x = 500m$, $\Delta \sigma = 0.1$, $\Delta t = 30sec$ 로 유한차분망을 구성하였다. 단면자료는 건설교통부 서울지방국토관리청에서 정리한 한강수계 하천정비 기본계획(2002)을 참고하였다. 염도에 관한 초기조건은 선형으로 분포시켰다(정종률, 1983). 영동대교와 전류에서의 수위 관측치를 각각 모형의 상·하류 경계조건으로 하였으며, 관측시간을 포함하여 총 70시간 동안 모의하였다.

염도에 대한 수치모의 결과를 각 case 별로 일산대교 건설현장에서의 실측치와 비교하여 표 3~표 5에 나타냈다.

표 3. 측정치와 모의결과 비교 (Case 1)

측정 시간	모의 평균 NaCl 농도 (ppt)	측정 평균 NaCl 농도 (ppt)
14시 40분	0.022	0.034
15시 00분	0.022	0.034
15시 20분	0.023	0.035
15시 40분	0.023	0.035
16시 00분	0.023	0.037

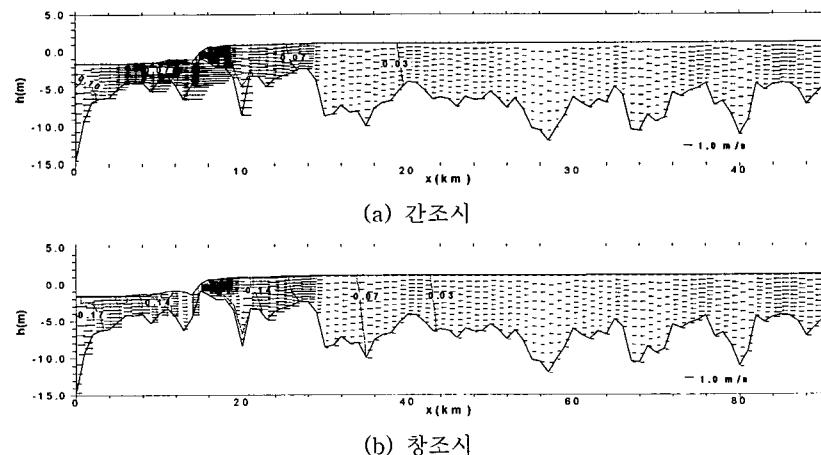
표 4. 측정치와 모의결과 비교 (Case 2)

측정 시간	모의 평균 NaCl 농도 (ppt)	측정 평균 NaCl 농도 (ppt)
9시 30분	0.182	0.100
10시 00분	0.200	0.156
10시 30분	0.210	0.215
11시 00분	0.216	0.278
11시 30분	0.217	0.332

표 5. 측정치와 모의결과 비교 (Case 3)

측정 시간	모의 평균 NaCl 농도 (ppt)	측정 평균 NaCl 농도 (ppt)
12시 30분	0.030	0.039
13시 00분	0.030	0.040
13시 30분	0.031	0.044
14시 00분	0.031	0.046
14시 30분	0.031	0.047

일산대교에서의 염도는 창조시에 최대 0.34ppt를 나타내고, 낙조시에는 일반적으로 0.03ppt로 나타났다. 본 연구에서 개발한 모형에서는 초기 염도조건과 상·하류 경계조건에 의해 염분농도 수치가 0.03ppt로 수렴하였다. 특히, 하류경계조건인 전류에서의 수위분포가 다른 case에 비하여 낮은 Case 3에서는 염분농도가 진동 없이 빠르게 수렴하였다.



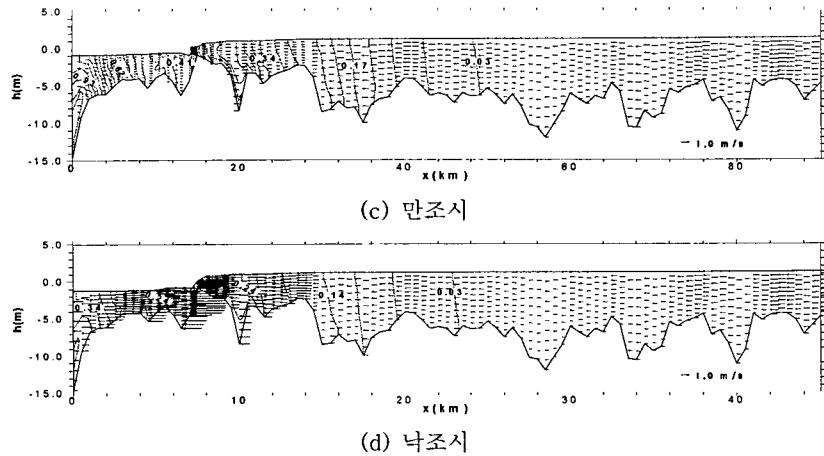


그림 4. 흐름 벡터도와 염도 분포도

5. 결 론

본 연구에서는 해수와 담수의 혼합으로 난류흐름이 발생하는 하구에 적용 가능한 $x-z$ 동수 역학모형과 염도의 분포양상을 해석하기 위한 이송학산모형을 개발하였다. 풍상차분기법을 이용하여 비교적 정확한 이송현상의 모의와 큰 Peclet수에도 안정적인 계산이 가능하도록 하였으며 x 방향은 양해법으로, z 방향은 음해법으로 해석하였다.

수치모형의 비교자료로 활용하기 위해 일산대교 건설현장에서 수위와 유속을 관측하고, 채수한 시료로 염수의 농도를 계산하였다. 그 결과, 낙조가 끝나가는 시점에 측정한 결과는 9시간 동안 지속된 낙조의 영향으로 유속 및 염도는 작고 염도변화도 크지 않았으며, 창조시의 경우 창조가 끝나가는 시점으로 3시간 동안 지속된 창조의 영향으로 유속 및 염도의 변화폭은 크게 나타났다. 또한, 염도가 창조시 최대 0.34ppt로 전반적으로 매우 작게 나타났는데, 한강의 다수의 지류와 임진강의 영향으로 인해 염도가 많이 희석된 후 침투하기 때문인 것으로 생각된다.

영동대교와 전류에서의 수위 관측치를 각각 모형의 상·하류 경계조건으로 하여, 총 70시간 동안 모의한 염도를 일산대교 현장의 실측치와 비교한 결과, 모형의 수치기법상의 특징으로 인하여 발생하는 극히 일부의 불안정성을 제외하고는 실측치와 잘 일치하는 경향을 보였다.

감 사 의 글

본 논문은 2006년도 대림산업(주)의 연구과제에 의해서 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부(2002). 한강수계 하천정비기본계획, 건설교통부.
- 정종률(1983). 금강 염하구의 해수순환역학, I. 해수의 순환특성. 서울대학교 자연과학대학 해양학과.
- Liggett, J.A.(1994). Fluid mechanics, McGraw Hill Book Inc.