

## 2차원조석수치모형에 의한 ㅇ강하구물높이변동특성해석

황 영 민

정애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《세면이 바다로 둘러싸여있고 강하천과 호수, 저수지가 많은 우리 나라에서 연안과 령해관리를 잘하는것이 중요합니다.》

2차원조석수치모형을 리용하여 ㅇ강하구에서의 조석변동특성을 정확히 해석하는것은 항만, 갑문을 비롯한 각종 수리구조물들의 과학적인 설계와 시공, 선박의 안전항해보장, 큰 물피해를 막기 위한 공학실천문제해결에서 매우 중요한 의의를 가진다.

론문에서는 천문 및 기상조석과 파도, 바람, 강물류입 등 시공간규모가 각이한 여러가지 해양 및 기상수문현상들의 호상작용을 동시에 고려하는 2차원수직평균조석계차풀이모형을 리용하여 ㅇ강하구의 조석변동특성을 해석하였다.

### 1. 기본방정식

ㅇ강하구는 조석하구로서 장마철에 큰물의 영향으로 조석파마루와 큰물파마루가 겹치는 경우 심각한 큰물피해를 초래할수 있으므로 큰물시기의 조석물높이변화과정을 정확히 밝히는 문제가 특별히 중요하게 제기된다.

2차원조석수치계산모형은 수직평균한 2차원련속방정식과 운동방정식에 대한 계차근사모형으로서 침수 및 육지구역의 결정, 바람속도에 따르는 바람점성결수계산, 공간적으로 불균일한 바닥마찰결수의 고려, 시공간적으로 변하는 파도응력계산, 그물계산점기억용량의 효과적인 처리 등을 포함하고있다.[1]

바람 및 바닥마찰응력, 파도응력을 동시에 고려하는 수직평균한 2차원얇은물련속방정식과 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(h+\eta)}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial x} = \frac{\partial D_x}{\partial x} \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} \frac{\partial q_x}{\partial y} + f q_x - \tau_{bx} + \tau_{wx} + \tau_{Sx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial(h+\eta)^2}{\partial y} = \frac{\partial D_x}{\partial x} \frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} \frac{\partial q_y}{\partial y} + f q_y - \tau_{by} + \tau_{wy} + \tau_{Sy} \quad (3)$$

여기서  $h$ 는 물깊이,  $\eta$ 는 평균물면으로부터의 물높이변화,  $q_x, q_y$ 는  $x, y$ 축성분흐름량,  $u, v$ 는 수직평균흐름속도의  $x, y$ 축성분,  $g$ 는 중력가속도,  $D_x, D_y$ 는 확산결수,  $f$ 는 코리올리파라미터,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ 는 바닥마찰응력의  $x, y$ 축성분,  $\tau_{wx}, \tau_{wy}$ 는 바람접선응력의  $x, y$ 축성분,  $\tau_{Sx}, \tau_{Sy}$ 는 파도응력의  $x, y$ 축성분이다.

$u, v$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$u = \frac{q_x}{h + \eta} \quad (4)$$

$$v = \frac{q_y}{h + \eta} \quad (5)$$

## 2. 수치계산모형

### 계산점배치

기본방정식의 미분항들을 계차근사로 넘길 때 이류항을 제외한 모든 공간도함수에 대해서는 중심계차근사를 적용한다.(그림)

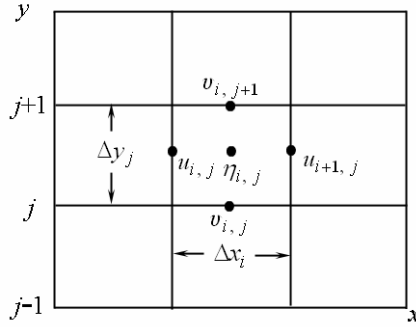


그림. 계산점배치

그림에서 보는바와 같이 물높이계산점은 그물안의 중심점에, 흐름속도계산점들은 해당 그물선의 중심점들에 배치한다.[2]

### 운동방정식의 수치계산도식

$x$ 축방향운동방정식의 수치계산식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta q_{x_{i,j}}}{\Delta t} \Delta x_{i,j} \Delta y_{i,j} + (F_{x_{i+1/2,j}}^k - F_{x_{i-1/2,j}}^k) \Delta y_{i,j} + (G_{y_{i,j+1}}^k - G_{y_{i,j-1}}^k) \Delta x_{i,j} + \frac{1}{2} g [(h_{i,j} + \eta_{i,j}^k)^2 - \\ - (h_{i-1,j} + \eta_{i-1,j}^k)^2] \Delta y_{i,j} = \left[ \frac{D_{x_{i+1/2,j}}^k (q_{x_{i+1,j}}^k - q_{x_{i,j}}^k)}{\Delta x_{i,j}} - \frac{D_{x_{i-1/2,j}}^k (q_{x_{i,j}}^k - q_{x_{i-1,j}}^k)}{\Delta x_{i-1,j}} \right] \Delta y_{i,j} + \\ + \frac{f}{4} (q_{y_{i,j}}^k + q_{y_{i-1,j-1}}^k + q_{y_{i,j+1}}^k + q_{y_{i-1,j+1}}^k) \Delta x_{i,j} \Delta y_{i,j} - C_{b_{i,j}}^k u_{i,j}^k |U_{i,j}^k| \Delta x_{i,j} \Delta y_{i,j} + \\ + \tau_{wx_{i,j}}^k \Delta x_{i,j} \Delta y_{i,j} + \tau_{Sx_{i,j}}^{k+1} \Delta x_{i,j} \Delta y_{i,j} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\Delta q_{x_{i,j}} = q_{x_{i,j}}^{k+1} - q_{x_{i,j}}^k$ ,  $k$ 는 시간걸음,  $\Delta x_{i,j}$ 는  $x$  축방향의 그물간격,  $\Delta y_{i,j}$ 는  $y$  축방향의 그물간격이다.

$y$ 축방향운동방정식의 수치계산식도 같은 방법으로 작성할수 있다.

### 연속방정식의 수치계산도식

$$\frac{\Delta \eta_{i,j}}{\Delta t} \Delta x_{i,j} \Delta y_{i,j} + (q_{x_{i,j}}^{k+1} - q_{x_{i+1,j}}^{k+1}) \Delta y_{i,j} + (q_{y_{i,j}}^{k+1} - q_{y_{i,j+1}}^{k+1}) \Delta x_{i,j} = 0 \quad (7)$$

여기서  $\Delta\eta_{i,j} = \eta_{i,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^k$  이다.

#### 경계조건

하류경계에서 8개의 천문조화상수를 고려한 조석예보식은 다음과 같다.

$$\eta = \sum_{l=1}^8 A_l \cos \left[ \frac{2\pi}{360} (s_l t - \phi_l) \right] \quad (8)$$

여기서  $A$ 는 조석분조의 진폭(m),  $s$ 는 조석분조의 속도( $^{\circ}$ /h),  $\phi$ 는 조석분조의 위상( $^{\circ}$ )이다.

상류경계에서 흐름량조건은 다음과 같다.

$$q_{x_{i+1},j}^{k+1} = \frac{Q_{x_{i+1},j}}{\Delta y_{i+1,j}}, \quad q_{x_{i-1},j}^{k+1} = \frac{Q_{x_{i-1},j}}{\Delta y_{i,j}}, \quad q_{y_{i,j+1}}^{k+1} = \frac{Q_{y_{i,j+1}}}{\Delta x_{i,j-1}}, \quad q_{y_{i,j}}^{k+1} = \frac{Q_{y_{i,j}}}{\Delta x_{i,j-1}} \quad (9)$$

륙지와 바다경계에서 닫힌경계조건은 다음과 같다.

$$Q_{x_{i,j}}^{k+1} = 0, \quad Q_{y_{i,j}}^{k+1} = 0 \quad (10)$$

간석지수역에서 이동경계조건판정식은 다음과 같다.

$$H_{i,j} = h_{i,j} + \eta_{i,j} \leq H_{cr} \quad (11)$$

여기서  $H_{i,j}$ 는 전체 물깊이,  $H_{cr}$ 는 림계물깊이이다.

#### 안정성조건

양계차도식의 수치계산에서 최대시간걸음평가식은 다음과 같다.[3]

$$\xi \approx u \frac{\Delta t}{\Delta s} \quad (12)$$

장파인 경우에는  $u = \sqrt{gh}$ 이며 조석, 파도, 바람 등을 모두 고려하여야 한다.

### 3. 수치계산모형의 적용

2차원수직평균조석수치계산모형의 적용성을 검토하기 위하여 ◦강하구계산수역을 300개 × 240개의 직4각형그물로 분할하고 수치계산실험을 진행하였다.

$\Delta x = \Delta y = 125\text{m}$ ,  $\Delta t = 12\text{s}$ 로 하였으며 상류경계에서는 ①지점에서의 평수기흐름량  $Q = 952\text{m}^3/\text{s}$ 을, 하류경계에서는 조석조화상수에 의한 물높이에보값을 주었다.

◦강하구 하류지역의 ③지점과 상류지역인 ②지점에서의 조석물높이관측값과 수치계산값을 대비분석하는 방법으로 계산결과에 대한 평가를 진행하였다.

2차원수직평균조석수치모형의 적용성을 평가한데 기초하여 ◦강하구 주요지점들에서의 조석변형특성을 해석하였다.

②, ③지점에서의 물높이계산값과 실측값사이의 평균절대오차 및 상대오차는 표 1과 같다.

표 1. 계산결과오차

오차	지점	
	③	②
평균절대오차/m	0.14	0.10
상대오차/%	3.7	4.1

표 1에서 보는바와 같이 ②, ③지점에서의 계산값이 실측값과 비교적 잘 일치된다는것을 알 수 있다.

표 2에 평수기 ⑤, ③, ④, ②지점에서의 평균조차와 평균밀물시간 및 평균썰물시간을 사리와 조금별로 주었다.

표 2. 조석특성값표(평균기)

지점	사리			조금		
	평균조차/m	밀물시간 /시:분	썰물시간 /시:분	평균조차/m	밀물시간 /시:분	썰물시간 /시:분
⑤	7.0	6:05	6:29	3.9	5:50	6:56
③	5.4	5:06	7:34	3.1	4:55	7:41
④	4.7	4:55	7:44	2.9	4:40	7:54
②	4.6	4:20	8:23	2.1	4:03	8:12

표 2에서 보는바와 같이 평균조차는 강하류에서 가장 크고 강상류로 가면서 점차 작아지며 밀물시간과 썰물시간의 비대칭성이 점차 커진다는 것을 알 수 있다.

큰물시기 ◯강상류(①지점)에서의 강흐름량조건에 따르는 물높이변동특성을 해석하고 주요지점들에서의 설계물높이를 결정하였다.(표 3)

표 3에서 보는것처럼 큰물시기 강하류에서는 조석의 영향이 더 세계 미치므로 보장률별물높이변동값이 강상류보다 더 커진다는 것을 알 수 있다.

표 3. 설계물높이(m)(평균물면기준)

지점	보장률		
	1	0.1	0.01
⑤	7.0	6.05	6.29
③	5.4	5.06	7.34
④	4.7	4.55	7.44
②	4.6	4.20	8.23

## 맺는 말

조석하구인 ◯강하구에서 복잡하게 일어나는 여러가지 형태의 흐름들을 종합적으로 분석한데 기초하여 파도와 하천흐름, 바닥지형, 바람 등 조석변형조건들을 고려하는 수학적 모형과 수치해석방법을 제시하고 그것을 적용하여 설계물높이를 결정하였다.

## 참고 문헌

- [1] B. Hackett et al.; Cont. Shelf. Res., 18, 1, 2015.
- [2] H. E. Hurlburt et al.; J. Phys. Oceanogr., 6, 646, 1976.
- [3] F. Mesinger et al.; GARP Publication Series, 17, 64, 2017.

주제109(2020)년 1월 5일 원고접수

## Analysing of Water Surface Elevation Variation Characteristics in Estuary of the ◯ River by 2D Tidal Numerical Model

Hwang Yong Min

In this paper we suggested the method for analysing tidal variation characteristics in estuary of the ◯ river by using 2D tidal numerical model.

We analysed water surface elevation variation characteristics according to the various flowing rates at several points in estuary of the ◯ river and decided design water level.

Keywords: tidal estuary, 2D model, finite difference, design water level