

# 천수만의 3차원 조류예측에 관한연구

신문섭<sup>1</sup> · 홍성근<sup>2</sup> · 이동주<sup>3</sup> · 김재형<sup>4</sup>

## 1. 서 론

최근 대규모적인 해면간척사업과 산업이 발달함에 따라, 항만건설, 인공도 및 방파제 축조 등과 같은 해안공사가 날로 급증하고 있다. 이와 더불어, 연안해역에 대한 관심이 여러 측면에서 지속적으로 증대되고 있다. 이러한 크고 작은 해상공사를 진행함에 따라 그 주위에서는 어떠한 형태로든 환경변화가 일어날 수 밖에 없으며, 이와같은 환경변화에 어떻게 대처할 것인가 라는 대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 대책을 마련하기 위해서는, 여러가지 해상공사를 시행함에 따라 발생될 수 있는 자연과 수산자원의 파괴형태에는 어떠한 것들이 존재하며 그 파괴기구(mechanism)와 과정의 해명이 우선 확립되어야 할 것이다. 이러한 대책을 수립하기 위하여 우선 천수만내의 해수유동현상을 파악하여 보았다. 천수만 해역에 대한 흐름은 조류가 우세하여 조류계산을 3차원으로 계산하였다.

## 2. 천수만 해역의 3차원 조류 계산

### 2.1 해수유동의 기본방정식

천수만의 조류계산을 위하여 해역에서 평균해면을 원점으로 하여 직교 좌표계로 나타내었다. 여기서,  $x, y$  축은 수평면,  $z$  축은 연직방향으로 하고  $u, v, w$  는  $x, y, z$  축 방향의 유속성분으로 한다. 그리고  $z = -h$  및  $z = \zeta$  는 해저 및 해면으로 한다. 해역의 3차원 조류를 계산하기 위하여 이용한 연속방정식은 (2.1)과 같으며 운동방정식은(2.2(a,b))과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} - \Omega v = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \tag{2.2(a)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} - \Omega u = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_h \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \tag{2.2(b)}$$

경계조건은

$$z=0 : \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} - w = 0 \tag{2.3} \quad \rho A_v \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \rho A_v \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \tag{2.4}$$

<sup>1</sup> 군산대학교 토목·환경공학부 교수  
<sup>2</sup> 군산대학교 해양생산·기관공학부 교수  
<sup>3</sup> 군산대학교 토목·환경공학부 교수  
<sup>4</sup> 군산대학교 토목·환경공학부 석사과정

$$z=-h : u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w = 0 \quad (2.5) \quad \rho A_v \frac{\partial u}{\partial z} = \tau_x^b, \quad \rho A_v \frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y^b \quad (2.6)$$

$$\zeta = f(x, y, t) \quad (2.7)$$

$$A_v = A_{v0} + l^2 \sqrt{(\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2}, \quad l = k_0(z+h+z_0)[1-(z+h)/h]$$

$$(\tau_x^b, \tau_y^b) = \beta \sqrt{(u^2 + v^2)} (uv) \quad (2.8)$$

과 같다. 앞에서 언급한 연속 및 운동방정식으로부터 유속과 해수면의 높이 수온·염분을 구하기 위하여 유한차분방법을 이용하였다. 일반적인  $x, y, z$  좌표에서 해표면과 해저면을 식(2.9) 이용하여  $\sigma$ -좌표로 전환하면 수심이 낮은 연안해역도 다층으로 구성하여 3차원유동장을 계산할 수있다.  $\sigma$ -좌표계는 다음과 같다.  $\sigma$ 는 0과 1사이의 값들이다. 불규칙한 격자형태를 규칙적인 격자형태로 수심측량근사기법을 이용하여 정리할 수 있다.

$$t' = t, \quad \alpha = x, \quad \gamma = y, \quad \sigma = \frac{z+h}{h+\zeta} \quad (2.9)$$

$\sigma$ -좌표의 새로운 좌표계로 연속 및 운동방정식, 수온·염분방정식을 정리하면 다음과 같다. 여기서 각각  $T, S$  수온과 염분이다.

$$\frac{\partial u}{\partial \alpha} + \frac{\partial v}{\partial \gamma} + \frac{1}{H} \frac{\partial w}{\partial \sigma} + \sigma_x \frac{\partial u}{\partial \sigma} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial \sigma} = 0, \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial \alpha} + v \frac{\partial u}{\partial \gamma} + \sigma_x \frac{\partial u}{\partial \sigma} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial p}{\partial \alpha} + \sigma_x \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right) + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (A_v \frac{\partial u}{\partial \sigma}) + A_h F_u, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial \alpha} + v \frac{\partial v}{\partial \gamma} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial \sigma} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial p}{\partial \gamma} + \sigma_y \frac{\partial p}{\partial \sigma} \right) + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (A_v \frac{\partial v}{\partial \sigma}) + A_h F_v, \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial \alpha} + v \frac{\partial T}{\partial \gamma} + \sigma_x \frac{\partial T}{\partial \sigma} = \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (D_v \frac{\partial T}{\partial \sigma}) + \gamma(T^* - T) + D_h F_T, \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial \alpha} + v \frac{\partial S}{\partial \gamma} + \sigma_x \frac{\partial S}{\partial \sigma} = \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (D_s \frac{\partial S}{\partial \sigma}) + \gamma(S^* - S) + D_h F_S. \quad (2.14)$$

여기서

$$\sigma_t = -\frac{\sigma}{H} \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \quad \sigma_x = \frac{1}{H} \left( \frac{\partial h}{\partial x} - \sigma \frac{\partial H}{\partial y} \right), \quad \sigma_y = \frac{1}{H} \left( \frac{\partial h}{\partial y} - \sigma \frac{\partial H}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_w = \sigma_t + \sigma_x u + \sigma_y v + \frac{1}{H} w,$$

$$\sigma_u = \sigma_t + \sigma_x u + \sigma_y v + \frac{1}{H} w, \quad F_u = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \sigma_x \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \sigma_x \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial u}{\partial \alpha} + \sigma_x \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \frac{\partial u}{\partial \gamma} + \sigma_y \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \sigma_y \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial u}{\partial \gamma} + \sigma_y \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right),$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{\partial v}{\partial \alpha} + \sigma_x \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \sigma_x \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial v}{\partial \alpha} + \sigma_x \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \frac{\partial v}{\partial \gamma} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \sigma_y \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial v}{\partial \gamma} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right),$$

$$F_T = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{\partial T}{\partial \alpha} + \sigma_x \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + \sigma_x \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial T}{\partial \alpha} + \sigma_x \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \frac{\partial T}{\partial \gamma} + \sigma_y \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + \sigma_y \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial T}{\partial \gamma} + \sigma_y \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right),$$

$$F_S = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{\partial S}{\partial \alpha} + \sigma_x \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + \sigma_x \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial S}{\partial \alpha} + \sigma_x \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \frac{\partial S}{\partial \gamma} + \sigma_y \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + \sigma_y \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\partial S}{\partial \gamma} + \sigma_y \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right).$$

유한차분식을 이용하여 연속 및 운동방정식을 차분화하였다. 차분방법은 수직방향은 음해법으로 수평방향은 양해법을 이용하여 근사하였다. 조류 형태를 3차원으로 계산하여 보았다. 경계는 서·남·북 경계로, 농어촌진흥공사에서 관측으로부터 얻어진  $M_2$ 분조의 진폭과 위상을 식(2.15)과 같이 수위를 주었다. 그리고 Courant 수의 식은 식(2.16)과 같이 수위를 주었다.

## 2.2 경계조건

조류 계산을 위하여 수평 격자의 크기는  $1km \times 1km$ 하였다. 경계는 서·남·북 경계로, 농어촌진흥공사에서 관측으로부터 얻어진  $M_2$ 분조의 진폭과 위상을 다음식과 같이 수위를 주었다.

$$\zeta = \zeta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_M} t - P\right) \quad (2.15)$$

$$v = 0$$

여기서,  $\zeta_0, P$ 는 open boundary의 진폭과 위상이고,  $T_M$ 는  $M_2$ 조석의 주기,  $t$ 는 시간이다.

초기 조건은  $u=0, \eta=0$ 로 하여 계산 영역을 정방형 격자로 나누고, CFL(Courant Friedrichs Lewy)조건을 만족하게 time step를 결정하였다.

Courant 수의 식은 다음과 같다.

$$C = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (2.16)$$

여기서,  $c$ 는 Courant number,  $\Delta x$ 는 mesh크기,  $\Delta t$ 는 time step,  $u$ 는 가장 빠른 천해파의 전파속도( $\sqrt{gh}$ )이다. 경계는 서·남·북경계로 하였다. 경계치는 농어촌진흥공사에서 관측으로부터 얻어진  $M_2$ 분조의 진폭과 위상을 남쪽 경계에서  $196 \sim 216cm, 90.25^\circ \sim 91.8^\circ, 219 \sim 220cm, 88.20^\circ \sim 89.10^\circ$ , 북쪽 경계에서  $210.3 \sim 220.0cm, 99.0^\circ \sim 99.32^\circ$ , 서쪽 경계에서  $196.2 \sim 210.3cm, 91.25^\circ \sim 99.7^\circ$ 로 계산하였다. 해면은 평균 수면으로(평균해면:  $3.84m$ ) 하였으며 정지하고 있는 상태에서 계산을 시작하였다. 조류 계산을 위한 Parameter는 <표 2.1>과 같다.

<표 2.1>  $M_2$  조류계산을 위한 변수

Mesh size ( $\Delta x, \Delta y$ )	1km
Time step ( $\Delta t$ )	5 sec
Coef. of ho. eddy viscosity( $\nu_h$ )	$10^4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Grav. acceleration ( $g$ )	$980 \text{ cm sec}^{-2}$
Coriolis parameter ( $f$ )	$8.55 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$
Bo. frictional coefficient ( $\gamma_b^2$ )	$2.6 \times 10^{-3}$

## 2.3 천수만의 조류계산결과

조류계산결과 천수만의 흐름특성은 창조류보다 낙조류가 우세한 것으로 판단된다. 수치모델의 검증은 계산에 의하여 얻어진 조류의 위상과 진폭은 관측에 의하여 얻어진 조류의 위상과 진폭과 유사하여 천수만의 흐름을 잘 재현하였다고 판단된다.

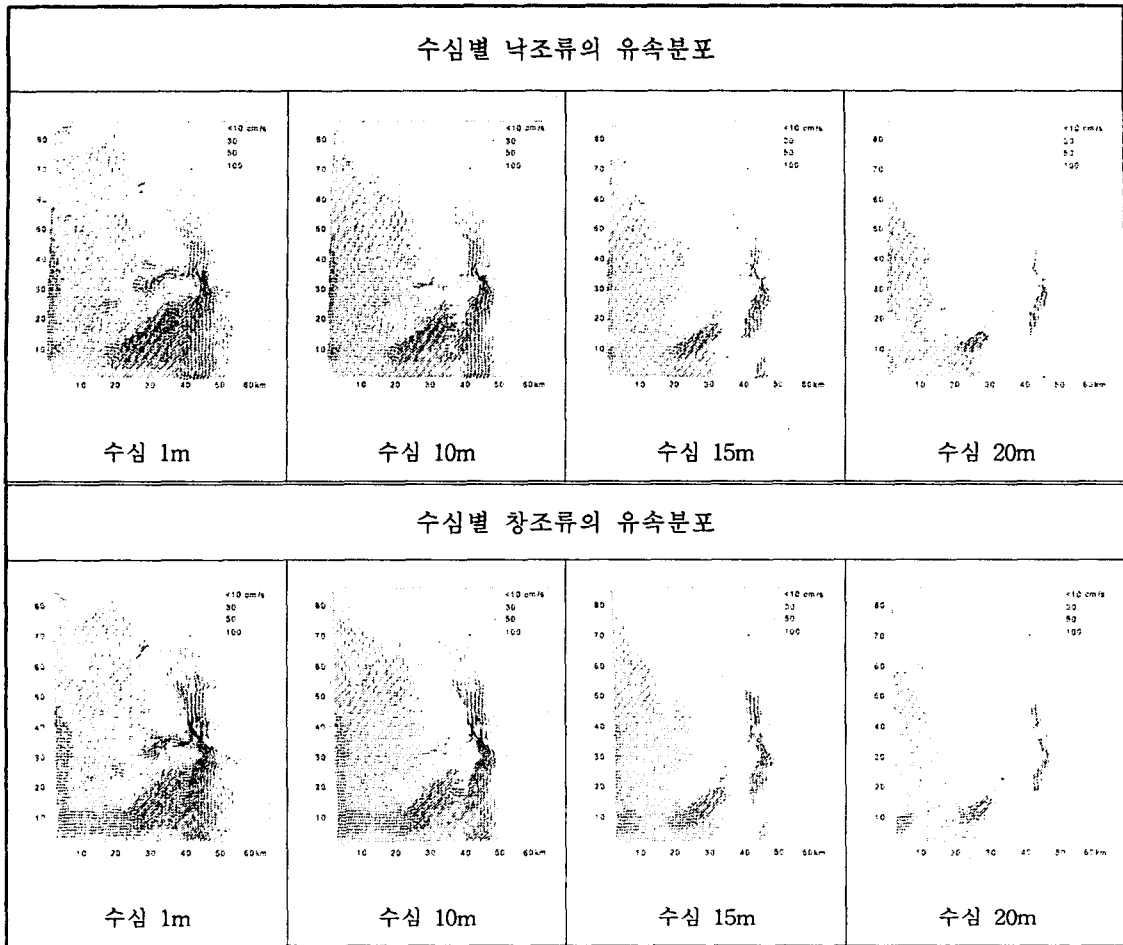


그림2.1 수심별 낙· 창조류의 유속분포

### 3. 결론

본 연구에서는 천수만의 물질의 분산과 은배수확산을 예측하기 위하여 천수만의 해수유동의 주요인인 조석현상이므로 흐름특성을 규명하기 위하여 조류를 계산하였다. 그결과 모델의 검증은 계산에 의하여 얻어진 조류의 위상과 진폭은 관측에 의하여 얻어진 조류의 위상과 진폭과 유사하여 천수만의 흐름을 잘 재현하였다고 판단된다. 또한 조류계산결과 천수만의 흐름특성은 창조류보다 낙조류가 우세한 것으로 판단된다.

### 4. 참고문헌

1. 申文燮, Yanagi T, 權哲輝, (1997), "조석잔차류에 의한 새만금간척지구의 미치게이션" 대한토목학회논문집, 제17권 II-5호, pp461-468.
2. 申文燮, (1996), "해상공사에 따른 토사확산예측" 韓國海岸·海洋工學會誌, 第2卷, pp 204-214.
3. 申文燮, Yanagi T, (1999), "새만금 간척에 따른 역기능보완에 관한연구" 대한토목학회논문집, 제19권 II-3호, pp317-327.