

흐름장내에서 표사의 거동에 관한 연구

이 호¹⁾ , 이 중 우²⁾

A study Sediment Transport in a Current Field

H. Lee , J. W. Lee

Key Words : 준설물(dredged material), 부유성 실트(suspended silt), 점토성광물입자(clay mineral particle), 천퇴적영역(shoal area), 천퇴율(shoaling rate), 2점재현(two point recurrence), 정상상태 요소 계수매트릭스(steady state element coefficient matrix), 유한차분법(FDM, Finite Difference method)

Abstract

The design and maintenance of navigation channel and water facilities of an harbor which is located at the mouth of river or at the estuary area are difficult due to the complexity of estuarial water and sediment circulation. Effects of deepening navigable waterways, of changing coastline configurations, or of discharging dredged material to the open sea are necessary to be investigated and predicted in terms of water quality and possible physical changes to the coastal environment.

A broad analysis of the transport mechanism in the estuary area was made in terms of sediment property, falling velocity, concentration and flow characteristics. In order to simulate the transport processes, a two-dimensional finite element model is developed, which includes erosion, transport and deposition mechanism of suspended sediments. Galerkin's weighted residual method is used to solve the transient convection-diffusion equation. The fluid domain is subdivided into a series of triangular elements in which a quadratic approximation is made for suspended sediment concentration.

Model could deal with a continuous aggregation by stipulating the settling velocity of the flocs in each element. The model provides suspended sediment concentration, bed shear stress, erosion versus deposition rate and bed profile at the given time step.

1. 서론

1.1 연구배경

1) 한국해양대학교 대학원

2) 한국해양대학교 토목환경공공학부

국내의 상당한 숫자에 이르는 항만은 크고 작음에 차이는 있으나 하구에 위치 또는 하천을 끼고 개발되었으며, 새로 추진되고 있는 신항만의 경우도 하천의 영향권내에 부지를 선정하여 개발이 진행되고 있다. 하구의 수리학적 특성으로 토립자의 운동이 활발한 상태에서 하구표사운동과 퇴적에 대한 기술과 수리학적 조건의 변화 상태에서 이 같은 운동을 예측하는 수단은 하구수질의 유지와 향상 그리고 준설물(dredged material)관리라는 관점에서 수질관리 기관이나 항만 및 해안 기술자들의 많은 관심의 대상이 되고 있다.

표사물질이 유입하는 대부분의 강에서는 낮은 흐름속도로 인해, 총 표사부하의 대부분은 일반적으로 부유성 실트(suspended silt)와 점토성광물입자(clay mineral particle)로 구성된다. 이들 미세한 표사는 상호 인력이 작용할 때, 중간입자의 결합으로 적절한 조건하에서 집적체를 형성하기도 한다. 이들이 형성하는 하상(河床)과 수송의 형태는 비점착성 모래와 자갈이 갖는 것과는 매우 다르다. 표사순환을 모델화하는 것은 수송모델에서 집적, 퇴적 그리고 재부유 과정의 수치모델의 적용이 필요하다. 이와 함께 수리실험과 하구표사의 현장 연구를 병행하면 현실적인 문제를 다룰 수 있을 것이다.

1.2 연구목적

본 연구의 목적은 부유성집적체(suspended aggregate)의 연구와 관련한 점착성 표사입자의 특성에 대한 연구, 흐름하에서 퇴적과 침식에 관련된 개개의 수송과정에 대한 연구로서 사각형의 폐쇄형 항만과 같은 임의의 대상지역에 표사모델을 적용하여 천퇴적영역(shoal area)과 천퇴율(shoaling rate)을 시뮬레이션하고 해안선 침식이나 항내매물과 같은 제현상을 규명하는데 두고 이를 통하여 수질을 향상시키고 수로나 항만의 이용능력을 끌어올리는데 기여할 것을 목표로 한다.

1.3 연구내용 및 방법

수송과정은 침식, 수송과 퇴적이 관계된다. 침식은 한계전단응력이 초과됨으로서 전체층에 대한 이동인 단괴 침식(mass erosion)이나 침식울로 개개 입자가 분리되는 표면침식(surface erosion)으로 정의할 수 있다.

모든 침식표사는 부유사의 형태로 운반되고 흐름을 통해서 이류·확산된다. 질량평형을 위한 속도장은 난류운동방정식 해석으로 구하여야 한다. 적용한 운동방정식은 바람과 저면응력 및 와동성분을 포함토록 하고 질량보존 상태를 나타내는 확산-이류 방정식을 함께 수립하여 유동장과 함께 물질수송을 다룬다. 난류확산계수를 운동량수송방정식에서와 같도록 하여 Fick's law을 적용한다. 일반적으로 유출-유입항은 농도함에 비해서 상대적으로 작으며, 몇몇의 조건을 제외하고 이류는 확산보다 수송과 혼합의 지배적인 형태를 갖는다.

전단응력은 침식이나 퇴적을 결정하는 중요한 요소이며 침강속도는 연속 집적체를 구성하는 요소에 대하여 지정하고 퇴적의 용적필도와 한계전단응력에 적용한다. 퇴적은 한계전단응력하에서 하상전단에 발생하며, 이때 퇴적율은 농도, 재부유확률, 침강속도와 침강이 발생하는 평균깊이에 좌우된다. 따라서 침강속도는 농도에 따라 변화하고 집적과정에 의해 영향을 받는다. 하구에서 이러한 표사이동에 따른 수심과 해저지형의 변화분석 및 예측에 수치모델의 구성이 필수적이다.

이와 같은 특성을 바탕으로 본 연구에서는 유한요소법을 사용하여 수치모델을 구성하기로 한다. 이 때 도입한 방법으로는 Galerkin의 가중잔차법을 사용하고 농도에 대해서 2차 근사를 사용한 삼각요소로 영역을 구성한다.

2. 기초방정식

u, v, w 는 각각 x, y, z 축 방향의 유속을, $z = -h$ 및 $z = \zeta$ 로 각각 해저 및 해면을 나타내는 것으로 한다(Fig. 1 참조). 조석을 상대적으로 장주기의 진행과로 가정하여, 식(1),(2)와 같이 조석파를 포함한 수평, 2차원 운동방정식을 유도하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial a_0}{\partial x} + \frac{gh}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\varepsilon_x}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - 2\omega v \sin \phi + \frac{g^2 u}{C_h^2 h} (u^2 + v^2)^{1/2} - \frac{\zeta}{h} V_a^2 \cos \phi = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + g \frac{\partial a_0}{\partial y} + \frac{gh}{2\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\varepsilon_y}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + 2\omega u \sin \phi + \frac{g^2 v}{C_h^2 h} (u^2 + v^2)^{1/2} - \frac{\zeta}{h} V_a^2 \sin \phi = 0 \quad (2)$$

여기서, V_a = 수면에 대한 바람의 상대속도, ζ = 바람에 의한 수면의 상승량, h = 수심
 a_0 = 기준면에 대한 저면의 높이, C_h = Chezy 마찰계수, ϕ = 국지위도
 ω = 지구자전의 각속도

● 연속방정식

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) = 0 \quad (3)$$

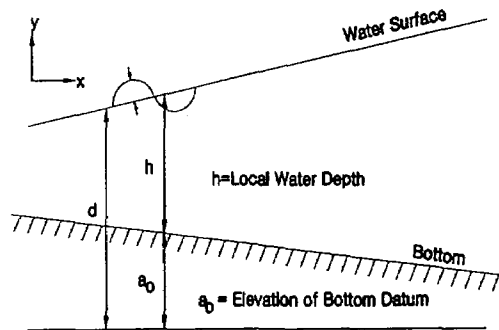


Fig. 1 Definition sketch for horizontal flow model

3. 수송과정의 유한요소해석

수송과정을 지배하는 방정식 중 유한요소해석에서 사용하게되는 것은 다음과 같다.

3.1 수송방정식의 정리

주어진 수평면 $x-y$ 에서의 흐름장, $u(x, y)$ 와 $v(x, y)$ 그리고 유효확산계수 $D_x(x, y)$ 와 $D_y(x, y)$ 에 대해서 부유표사농도 C 를 얻기 위해 식(4)을 풀게된다. 유출-유입항 S 는 식(5) ~ 식(10)에 의해 주어지고, 퇴적과 침식 중 어떠한 식을 사용하는가는 한계전단응력(τ_{cd})과 하상전단응력(τ_b) 값의 비교에 따른다.

1) 이류-확산방정식

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial C}{\partial y} + S \tag{4}$$

여기서, S 는 유출-유입항으로, 침식율과 퇴적율을 사용하여 다음과 같이 정리된다.

$$S = \left. \frac{dC}{dt} \right|_e - \left. \frac{dC}{dt} \right|_d \tag{5}$$

2) 퇴적방정식

$$\left. \frac{dC}{dt} \right|_d = \frac{2w_s C}{z} \left[1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right] \tag{6}$$

여기서 z 는 수심이다.

표사농도가 $C \gg 0.3 \text{ g/l}$ 이면 모든 집적과정이 완료된 것으로 가정하며, 침강속도는 4/3승의 농도에 비례하게 된다.

$$w_s = KC^{4/3} \tag{7}$$

여기서 w_s 는 침강속도이고, K 는 표사형태에 관계되는 경험상수이다.

$C < 0.3 \text{ g/l}$ 이면 독자적인 침강이 존재하고, 더 이상 집적이 발생하지 않으면 농도와는 무관하게 되고 표사형태에만 좌우된다.

3) 침식방정식

단괴침식은 조류가 강한 지역이나 폭풍에 의하여 발생된 흐름하에서 발생한다.

$$\left. \frac{dC}{dt} \right|_e = \frac{\Delta C}{\Delta t} \tag{8}$$

시간간격 Δt 동안에 체적 V 의 물에 의해 침식이 이루어지는 표사의 총 건조중량 W 는 다음식과 같이 농도변화 ΔC 를 가져온다.

$$\Delta C = \frac{W}{V} \tag{9}$$

균질한 특성을 가지며 상대적으로 밀도가 높고 압밀된 저면에 있어서의 침식율은 다음과 같다.

$$\left. \frac{dC}{dt} \right|_e = M \left[\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right] \tag{10}$$

여기서, M 은 침식상수이다.

4) 유출-유입항 S

식(5)에 식(6)~(10)을 대입하여 S 를 결정한다. 먼저, 농도 $C \gg 0.3g/l$ 인 경우

$$S = M \left[\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right] - \frac{2KC^{7/3}}{d} \left[1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right] \tag{11}$$

유출-유입항은 침식이나 퇴적이 발생하는지 여부에 따라서 변하기 때문에 유한시간 간격내에서는 상수로서 취급하는 것이 바람직하다. 게다가, 이는 침식의 형태와 퇴적이 발생하는 곳에서의 농도에 달려있다. 본 연구에서 S 는 주어진 시간 간격동안에 상수로 취급하고, S 가 C 에 좌우되는 퇴적의 경우에만 시간간격 초기의 농도값 C 를 그 시간간격동안 계속 사용하는 것으로 한다. $\lim_{\Delta t \rightarrow 0}$ 이 되는 극한에서는 이것은 정확한 해로된다.

시간 T 는 주어진 요소내에 유체의 평균속도를 요소에서의 평균높이로 나눈 것으로 정의한다. 이 시간 T 가 Δt 보다 크다면 퇴적은 정체 조건으로부터 발생하는 것으로 고려된다. 즉 농도는 퇴적이 발생하면서 감소한다. 이 같은 경우에서 퇴적율은 초기농도 C_0 와 최종농도 C_f 의 차로써 계산된다.

i) $T > \Delta t$, $C_0 \gg 0.3gm/l$

식(6)과 식(7)을 조합하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left. \frac{dC}{dt} \right|_d = \frac{2KC^{7/3}}{z} \left[1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right] \quad (12)$$

Δt 사이 시간에 대한 적분은

$$C = \left[\frac{8}{3} \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right) \frac{K\Delta t}{d} + C_0^{-4/3} \right]^{-3/4} \quad (13)$$

퇴적율의 계산은 다음과 같다.

$$\left. \frac{dC}{dt} \right|_d = - \frac{C_0 - C_f}{\Delta t} \quad (14)$$

ii) $T > \Delta t$, $C_0 < 0.3 \text{ gm/l}$

침강속도는 상수로서 간주된다. 이때, 식(6)의 적분은

$$C_f = C_0 \exp \left[-2 \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right) \frac{w_s \Delta t}{d} \right] \quad (15)$$

이고, 퇴적율은 식(14)와 같이 계산된다.

4. 유한요소법의 적용

4.1 요소와 형상함수

본 연구에서 영역은 절점(node)에 상호연결되는 일련의 삼각요소로 분할한다. 모서리절점으로 불리는 정점에서 3개, 변의 중간 절점으로 불리는 변의 중앙에 3개로 총 6개의 절점을 삼각형으로 연결한다. 이것을 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같다. 각 요소 내에서 농도에 대한 2차 근사가 이루어진다. 확산계수 D_x, D_y 와 유입-유출항 S 는 요소내에서 상수로 가정한다. x, y 범직교좌표계 대신에 면적좌표로 불리는 국부요소좌표 ξ_1, ξ_2 와 ξ_3 가 사용된다(Fig. 2 참조).

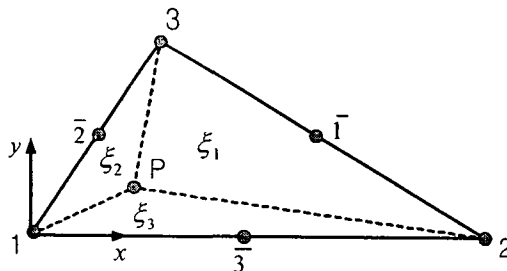


Fig. 2 Element used in analysis

4.4 가중잔차법 (Galerkin Method)

2차형상함수 $[M]$ 의 사용으로, Galerkin 방법은

$$\int_V [M]^T L([M]\{\hat{C}\}) dV = 0 \quad (15)$$

이다. 여기서 $L(\{\hat{C}\}) = 0$ 은 지배미분방정식이다. 즉, 식(4.1)에 근사함수와 가중함수를 도입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_V N_i [V \nabla \hat{C} - \nabla (D \nabla \hat{C}) + Q] dV = 0 \quad (16)$$

여기서 $Q = \frac{\partial \hat{C}}{\partial t} - S$ 이다.

Q 는 공간적 문제에서 상수를 가리킨다. 항 $\nabla (D \nabla \hat{C})$ 의 전개에서 Green정리의 적용은 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$\int_V [N_i (V \nabla \hat{C}) + \nabla N_i (D \nabla \hat{C}) + N_i Q] dV - \int_A N_i (D \nabla \hat{C}) n dA = 0 \quad (17)$$

여기서 n 은 영역 V 의 표면에 대한 법선이다. z 방향으로 변화가 없다고 가정하여 수심 h 에 대해서 식(17)을 적분하면

$$\begin{aligned} h \int_A \left[N_i \left(Q + u \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial x} D_x \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} D_y \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right] dA \\ - h \oint_L N_i \left[D_x \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} \cdot n_x + D_y \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \cdot n_y \right] dL = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 L 은 경계영역내에 경계를 따르는 길이이고, n_x, n_y 는 그것에 대한 법선여현이다.

4.5 시간의존 문제

일반적으로 확산의 문제에서는 흐름이 변동하기 때문에 시간적으로 변동하는 경우나 정상상태에 이를 때까지의 과도상태를 문제로 해야하는 경우 등, 비정상적으로 해석을 실시할 필요가 있다. 이 경우 식(19)을 초기조건아래 적분을 해야한다.

식(18)에서 경로적분이 무시된다면

$$\int_A \left[N_i \left(u \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial x} D_x \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} D_y \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} \right] dA + \int_A N_i Q dA = 0 \quad (19)$$

여기서, $\hat{C} = [N(x, y)]\{C\}^e$ 이고, $\{C\}^e$ 는 절점농도이다.
 식(19)를 적분하여 정리하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\int_A [M]^T Q dA = [T] \frac{\partial \{C\}^e}{\partial t} + \{F\} \quad (20)$$

$$\text{여기서 } [T] = \int_A [M]^T [M] dA, \{F\} = - \int_A [M]^T S dA$$

여기에서 사용된 6절점 삼각형 요소에 적용하여 각각의 절점 1, 2, 3, $\bar{1}$, $\bar{2}$, $\bar{3}$ 에 대해 쓰면 식(16)은 다음과 같은 매트릭스 미분방정식으로 쓸 수 있다.

$$[K]\{C\} + [T] \frac{\partial \{C\}}{\partial t} + \{F\} = 0 \quad (21)$$

여기서, $[K]$ 는 정상상태 요소계수매트릭스(steady state element coefficient matrix)이다.

시간 $(n+1)$ 과 시간 n 에서의 농도 C^{n+1} 과 C^n 사이의 2점재현(two point recurrence)관계에 따라 적분을 수행하면

$$\left[\theta [\bar{K}] + \frac{[T]}{\Delta t} \right] \{C\}^{n+1} = \left[\frac{[T]}{\Delta t} - (1-\theta)[\bar{K}] \right] \{C\}^n + \{F\} \quad (22)$$

이때 θ 는 $0 \leq \theta \leq 1$ 의 실수값을 갖는 상수이다. 식(22)의 연립방정식은 새로운 절점농도 $\{C^{n+1}\}$ 에 대해서 컴퓨터 프로그램으로 해석하게 된다.

5. 하구 수송에의 적용

2) 장방향항 모델 실험 및 결과

대상모델의 구성은 Fig. 3과 같은 가로, 세로 $300 \times 300m$ 의 크기로 일정한 수심을 지닌 장방향의 폐쇄형 항만으로 한다. 격자간격은 $\Delta x = 50m$, $\Delta y = 50m$ 로 구성하고 하천으로부터 주흐름은 항만의 바깥측에서 경계면을 따라 흐르며 항만내에서는 이로 인한 흐름장이 형성되는 것으로 하여 Fig 5와 같은 유동장을 구하였다. 주흐름속도는 $200cm/sec$ 로 하고 초기농도는 $0.5g/l$ 의 표사농도를 운반하는 균일한 흐름으로, 만입구에서 영향을 미치는 것으로 하여 수치실험을 실행하기로 한다.

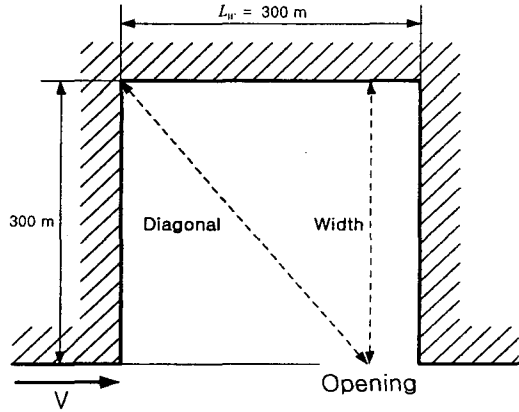


Fig.5 Definition sketch of rectangular harbor

수치시뮬레이션은 Fig. 4의 흐름도(Flow chart)와 같이 진행한다. 문제의 주요형태는 정상상태 농도문제, 비정상상태 농도문제 그리고 표사문제로 구분되며, 본 연구에서는 비정상상태 농도에 대한 해석문제를 적용하기 위해 속도, 경계조건 등을 도입하여 농도를 계산하고 이에 따른 표사문제 즉, 침식과 퇴적율, 저면 변화율 등을 계산한다. Fig. 6은 수송과정을 해석하기 위해 이류-확산모델에서 사용할 영역의 격자 및 요소망을 나타낸다. 모델에서 도입한 이류-확산계수는 Sauzay & Allen(1975)이 Gironde하구에서 현장관측한 자료로부터 구한 $0.5 \text{ m}^2/\text{sec}$ 를 사용하였으며 또한 퇴적과 관련된 한계전단응력은 0.6 dyne/cm^2 을 적용하였다. 그리고 저면마찰응력 계산에서 마찰속도는 Egizaroff가 제안한 식을 사용하였다. 일정한 침강속도로 0.00066 cm/sec 를 전체실험기간동안 적용하였으며, 초기하상의 두께는 0에서 출발하고, 퇴적물의 덩어리밀도로부터 자동적으로 계산토록 하였다.

앞 절에서 주어진 조건에 대한 실험의 결과는 Fig. 7~Fig. 9에서 10일 후 하류측에 개구부가 위치한 경우에 해저면의 전단응력, 퇴적/침식율, 해저면의 변화로 나타내었다. 침강속도와 확산계수를 실험기간 동안 동일한 값을 적용하였으므로 시뮬레이션으로 구한 부유사의 농도는 시간의 경과에 따라 현장에서 구할 수 있는 값보다 차이가 날 것이다. 흐름장내의 유속이 증가하면 농도와 하상에서의 농도구배도 증가한다. 특히 실험에 의한 하상의 농도값은 현장에서 측정된 값보다 높게 나타나는 것으로 알려져 있다 (Ariathurai, 1977).

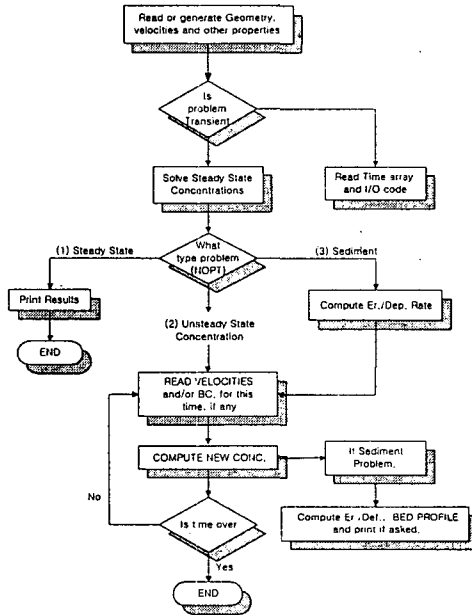


Fig. 4 Flow chart for numerical model simulation

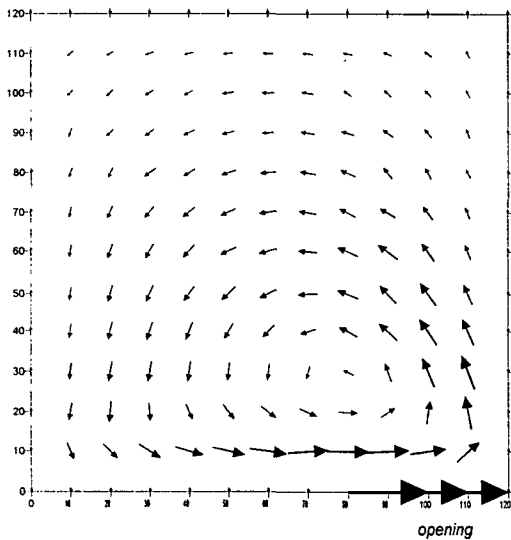


Fig. 5 Velocity vectors of flow across the harbor

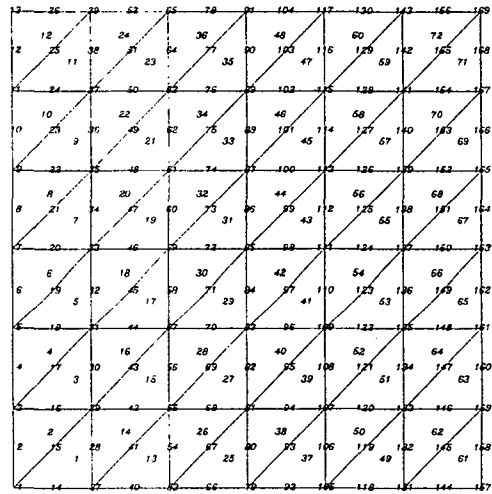


Fig. 6 Finite element grid for rectangular harbor

실험대상영역에 대한 농도변화는 전체영역을 고려해 볼 때 개구부에서 대상영역내의 후부지역으로, 고농도에서 저농도 지역으로 차츰 농도구배가 증가하는 형태로 확산하며, 해저면의 전단응력(Fig. 7)은 개구부의 빠른 유속으로 인해 초기 전단응력구배가 크게 나타나고 개구부에서 멀어질수록 차츰 완만해지는 형태로 계산되었다. 퇴적과 침식에 대한 비(Fig. 8)는 대상영역에 있어 전반적으로 유동장의 패턴과 유사한 동심원을 이루는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 각 시간($T = 4, 6, 10$ days)에 대한 해저면의 변화상태를 나타내는데, 시간이 지나면서 침식과 퇴적이 가속되고 있음을 알 수 있다. 초기하상의 두께 0에서 비교해 볼 때 입구부는 강한 유속으로 인해 침식현상이 나타나고, 다소 유속이 떨어지는 대상영역내의 후부지역과 유입과 유출이 교차함으로 발생하는 저속지역에서는 퇴적현상이 발생하는 것으로 분석되었다.

Fig. 10~Fig. 12는 실험대상영역(Fig. 3참조)에서 실행한 실험결과를 상대거리(l/L_w)로 폭(width)과 대각(diagonal) 길이(l)방향으로 각각의 단면에 대한 천퇴변화율을 나타내었다.

Fig. 10은 각 시간간격에 대한 해저면의 단면변화로 초기시간간격에 대해서는 침식과 퇴적현상이 미소하게 발생하고, 차츰 시간이 경과하면서 퇴적현상이 현저하게 증가하고 있는 것으로 분석되었다. 전반적인 단면변화는 폭방향에 있어 상대거리 0.5정도까지 미소한 침식의 발생으로 일정한 값을 유지하다가 이후 퇴적량의 증가로 급격한 저면변화를 나타내고 있다. 대각방향에 대해서는 만입구에서 유입과 유출의 교차로 인한 감속으로 퇴적이 발생하고 있음을 나타내고 만내 후부지역에서는 점진적인 유속감소로 저면변화율이 크게 증가하고 있음을 나타내고 있다. Fig. 11은 전단응력에 대한 단면변화로 폭방향에 대해서는 상대거리 0.2 전후로하여 전단응력구배가 크게 나타났으며 이후 계단형의 미소한 변화가 나타났다. 대각방향에 대해서는 상대거리 0.3까지 전단응력구배가 크게 나타났으며 이후 소폭의 변화율을 보였다. Fig. 12는 침식과 퇴적에 대한 단면변화율로 폭과 대각방향에서 각각의 크기에는 차이가 있으나 침식, 퇴적 그리고 침식의 순환과정을 나타내었다.

전반적으로 유속이 강하게 작용하는 지역에는 전면전단응력의 증가로 지속적인 수송이 이루어져 침식이 발생하였으며 이와 반대로 저속지역에서는 저면전단응력의 감소로 퇴적이 발생하는 패턴을 볼 수 있었다. 하구에서의 표사는 주로 유동장으로 인한 것이나 유속이 떨어지는 지점에서는 침강속도와 수직확산계수에 상당한 영향을 받게되는데, 이와 같은 변화를 파악할 수 있으면 검증과정을 훨씬 줄일 수 있다. 이와 같이 본 연구의 결과를 개량하면 폐쇄형 항만이나 소규모 어항을 가로지르는 하구지역에 대한 침식과 퇴적과 관련한 수치실험용으로 사용가능 할 것이다.

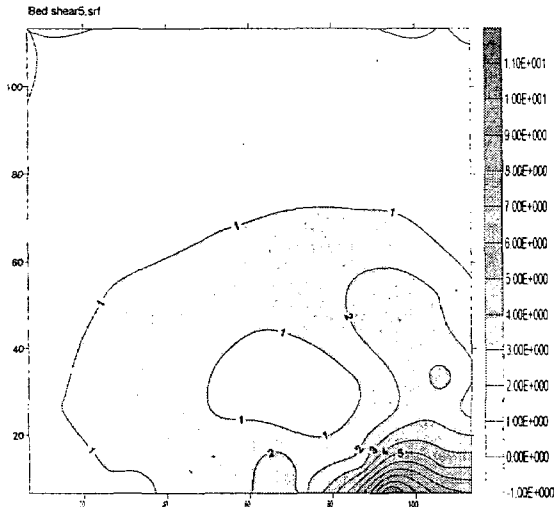


Fig. 7 Distribution of bed shear (after a period of 10 days)

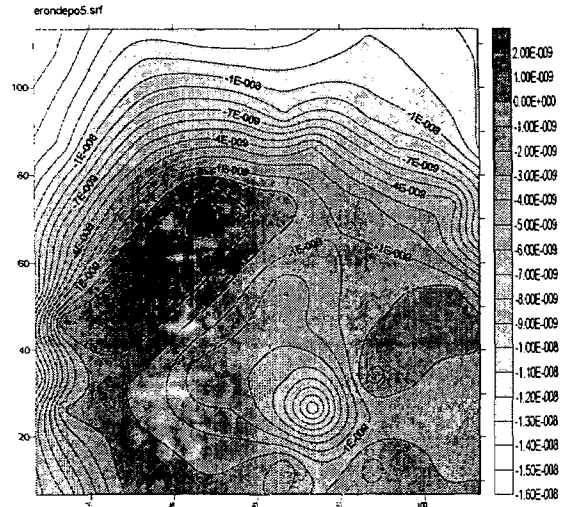


Fig. 8 Ratio of erosion and deposition (after a period of 10 days)

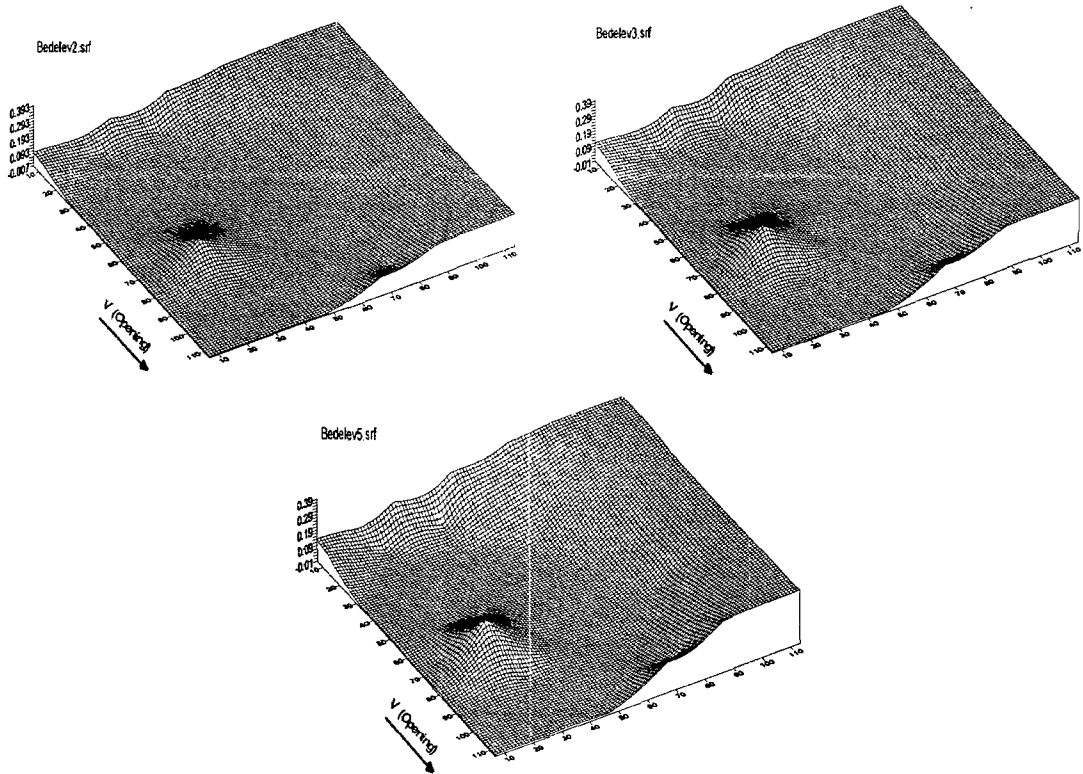


Fig. 9 Distribution of bed elevation (after a period of 10 days)

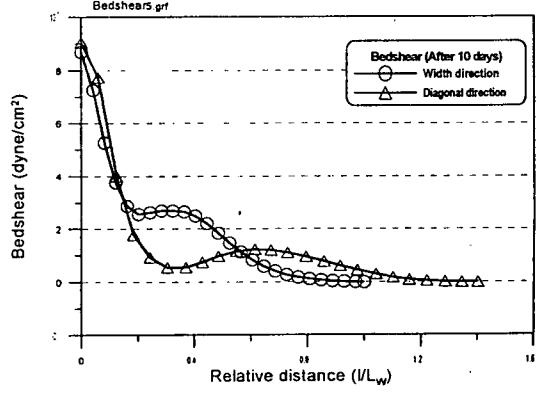
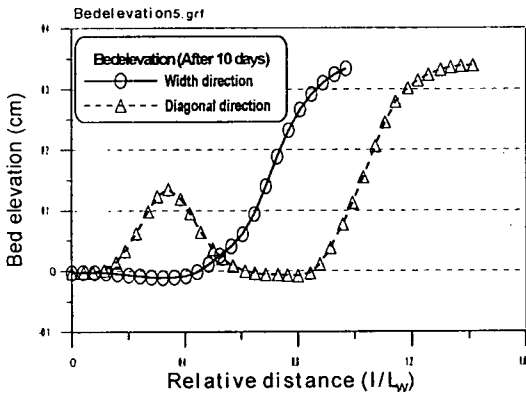
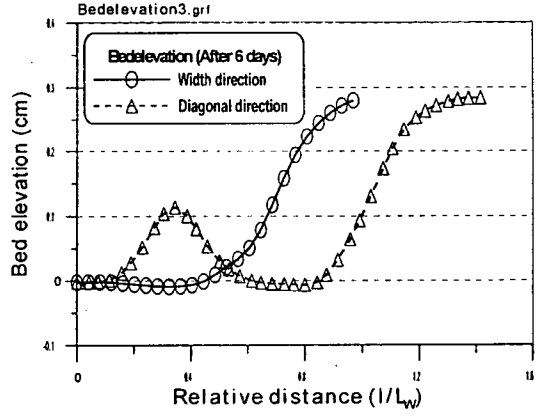
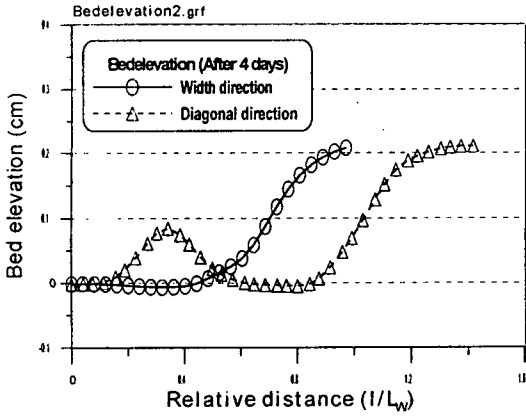


Fig. 10 Cross sectional variation of bed elevation

Fig. 11 Cross sectional variation of bed shear

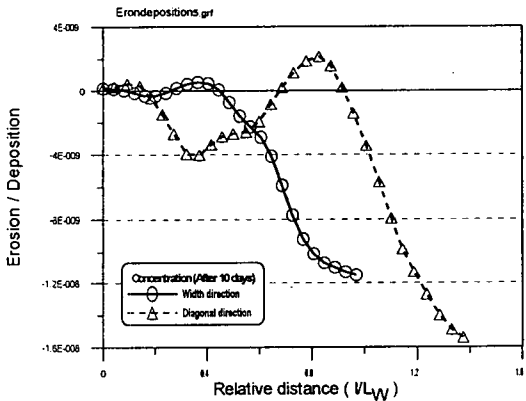


Fig. 12 Cross sectional variation of erosion / deposition rate

6. 결론 및 제언

본 연구는 육지로부터 유입된 담수와 해수가 혼합, 희석되면서 외해와 자유롭게 연결되는 반폐쇄성 수역인 하구수역에서 항만매물과 침식현상에 대한 메카니즘을 분석하기 위한 시도로 행하였다. 유역 특징에 따라 인위적이든 자연적이든 표사의 일부나 전부가 하구역에 도달하기 전에 처리되는데, 하구에 퇴적한 토사 또는 하구유출류를 타고 더욱 외해쪽에 퇴적한 토사는 하구사주를 형성하며, 항내에서는 매물이나 수로를 차폐할 가능성이 있다. 수송과정의 분석에서 이와 같은 구조를 수식으로 정리하고 이를 수치모델에서 지배방정식의 조건식으로 도입하였다. 수립된 수치모델을 하천을 포함하고 있는 장방형 폐쇄항만에 적용하여 초기농도 대해서 시간의 경과 후에 해수의 해저면의 전단응력, 해저면의 변화와 퇴적/침식율을 시뮬레이션 하였다. 이류-확산에 관한 지배방정식에 유한요소법의 근사과정을 도입하였으며, 이 때 삼각요소로 분할한 영역에 대하여 2차의 근사함수를 도입하여 모델을 구축하였다.

모델실험은 유동장의 부가로 폐쇄형 항만에서 10일 주기 동안 실험대상영역에서 해저면의 전단응력, 침식과 퇴적으로 인한 하상의 변화를 조사하였으며, 현장 적용의 가능성을 나타내었다. 실험 결과는 전체영역을 고려해 볼 때 다소 국부적인 농도확산이지만 개구부에서 대상영역내의 후부지역으로, 고농도에서 저농도 지역으로 차츰 농도구배가 증가하는 형태로 나아감을 확인할 수 있었다. 해저면의 전단응력은 개구부의 빠른 유속으로 인해 초기 전단응력구배가 크게 나타나고 차츰 완만해지는 형태로 진행되었다. 해저면의 변화는 초기 하상의 두께 0에서 비교해 볼 때 주 흐름에 접속된 입구부는 비교적 강한 유속으로 인해 침식현상이 나타나고, 다소 유속이 떨어지는 대상영역내의 폐쇄역과 유입과 유출이 교차함으로 발생하는 저 유속지역에서는 양의 값으로 퇴적현상이 발생하였음을 알 수 있었다. 퇴적과 침식율에 대한 비는 유동장 패턴과 같이 전형적인 동심원 형태로 나타났으며, 농도구배에 대한 다소 국부적인 변화는 유동장을 변화시켜 전영역에 대한 변화율을 고려해 필요가 있다.

이와 같이 본 연구는 폐쇄형 항만이나 소규모 어항을 가로지르는 하구지역에 대한 침식과 퇴적과 관련한 수치 실험으로 사용가능 할 것으로 보이며, 앞으로 현장관측자료, 수리환경특성을 반영하여 모델을 보완하고 실 항만에 적용하고자 한다.

참고문헌

- [1] 이석우(1994) 한국항만수리지. 집문당. pp. 79-188.
- [2] Alishahi, M. R., and Krone, R. B., "Suspension of Cohesive Sediments by Wind-Generated Waves", Report to Coastal Engineering Research Center, U.S. Army, 1964.
- [3] Bosworth, R. C. L., "The Kinetics of Collective Sedimentation," Journal of Colloid Science, Vol. 2, 1956, pp. 496
- [4] Kandiah, A., and Krone, R. B., "Influence of pH on Structure and Erosion of Cohesive Soils", Submitted for Publication, ASCE Hydr. Div., 1974.
- [5] Kruyt, H. R., Ed., "Colloid Science", Elsevier Pub. Co., New York, 1952.