

신항만부지에서의 유동 및 수질에 관한 유한요소해석

안도경¹⁾ · 이종우¹⁾

Finite Element Analysis of Flow and Water Quality in the New Harbor Site

D. K. An¹⁾ · J. W. Lee¹⁾

Key words : 분산(dispersion), 오염물질(pollutant), 유한요소이론(Finite element theory)

Abstract

Water flow simulations for environmental problems often require local detailed analyses for better understanding and accurate prediction of the fate of pollutant in water bodies. This study deals with the development and application of a two-dimensional flow and dispersion model to the coastal water area to find out possible changes due to the wide port development plan. As far as the spatial discretization is concerned, the finite element method is attractive because of its flexibility and ability to naturally treat complex coastal geometries.

The model uses finite element theory and the Galerkin weighted-residual approach as its basis. Developed model is applied to the Busan New harbor Construction site. Results from the model were compared with the measured water level and flows in four stations. The flow pattern by the model shows to be similar to the observed data away from the construction site where the flow is not affected. From the simulation results, it is concluded that the model may be useful for numerous other studies for planning and management purposes, especially flow and pollution dispersion in the coastal water bodies where the flow is so complicated.

1. 서론

1.1 연구의 배경

연안역은 바다와 육지가 만나는 경계역이며 이질적인 생태계 사이에 에너지의 흐름과 물질의 순환이 매우 활발하게 일어나는 곳이다. 연안역은 수산생물의 산란장이나 서식지로서 매우 중요하며, 생산력이 높아 보전할 가치가 매우 높은 생태계이다. 아울러 연안역은 사회경제적인 측면에서도 매우 중요한 장소이다. 최근 해양개발에 대한 관심이 고조됨과 더불어 다양한 형태의 해양개발에 따른 지속적인 해양환경의 부정적인 변화가 국제사회의 커다란 관심사로 떠오르고 있다. 해양환경에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 인위적인 인자들 중, 인간의 생산 및 소비활동에서 발생하는 각종 폐기물의 해양유입은 해양을 황폐화시키는 핵심 요소로 인식된다(Coe & Rogers, 1996).

외해와 잘 섞이지 않는 내만이나 항만에서부터 오염의 영향은 차츰 가시화되어져 가고 있고, 한계를

1) 한국해양대학교 토목공학과

넘는 과도한 오염부하로 연안해역은 몸살을 앓고 있는 실증이다. 특히 대규모 건설사업으로 인하여 연안의 물리적 특성 변화와 오염물의 이동 및 분포형태가 달라지므로 유기물의 침전현상이 촉진되어 인근 생태계의 악화를 초래하게 되었다. 악화되고 있는 해양환경을 보존하기 위해서는 오염원이 발생하는 수역에 대한 수질감시와 다양한 공학적 방법에 의한 수질 예측 및 제어가 요구된다.

1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구는 연안역에서 야기되는 물리적 현상의 변화를 수치모델을 통하여 추정하는데 목표를 두고, 대규모 연안역 개발에 따른 개발 진행과정에 변화하는 유동장을 각 공사 단계별로 분석하여, 공사시 진척도에 따른 오염물질의 거동분석에 연구의 주안점을 두었다. 심화되는 연안역 개발에 따른 항내 또는 연안역에서의 확산분포는 국내의 경우 이 외(1984), 최 외(1999) 등이 연구하였으며, 국외의 경우 Fisher(1970), Masch(1971), Leendertes(1967) 등에 의해 연구가 시행되고 계속 개발되어가고 있는 실정이나, 연안역의 수질 변화에 대한 사전 예측자료는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구를 통하여 연안역의 단계적 개발로 인한 연안역의 오염확산분포 변화를 추정하여 앞으로 계속 실시될 사업에 대해 기초적인 자료를 제시함과 동시에 연안 장래 생태계와 수질오염을 효율적으로 관리할 수 있는 근거를 제공하고자 한다. 해수유동 모델은 수심자료 및 조석자료를 이용하여 x, y 방향의 유속과 조위를 계산하며, 확산모델은 해수유동모델에서 계산된 유속과 유향을 이용하여 오염물질의 시간의 경과에 따른 분포를 계산함으로써 오염물질의 확산을 예측한다. 적용할 수치해석적 기법은 유한요소법(FEM, Finite Element Method)으로 Kang(1988), Norton (1973), King(1965) 등에 의해서도 적용된바가 있다.

2. 천수역에서의 흐름해석

2.1 흐름의 지배방정식

천이수역에의 입자의 운동은 거의 일정한 수평운동으로 수립자의 연직방향의 운동을 무시하는 경우가 많다. 우리가 고려하고자 하는 유체의 속도는 아주 느린 흐름이다. 이때에, 유체는 비압축성이라 가정 하는 것이 바람직하다. 또한 대상으로 하는 물의 흐름이 일어나고 있는 영역이 연해역, 또는 호소내 라고 해도, 지구의 크기에 비하여 국부적이기 때문에, 지구표면의 곡률을 고려할 필요는 없고, 지구표면을 평면으로서 취급하는 것으로 한다. 이와 같은 흐름을 지배하는 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ & = \frac{1}{\rho H} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (H\sigma_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\sigma_{xy}) \right\} + \frac{KW^2}{H} \cos \psi - g \frac{U \sqrt{(U^2 + V^2)}}{HC^2} \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ & = \frac{1}{\rho H} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (H\sigma_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (H\sigma_{yy}) \right\} + \frac{KW^2}{H} \sin \psi - g \frac{V \sqrt{(U^2 + V^2)}}{HC^2} \end{aligned} \tag{2.3}$$

$$\sigma_{xx} = \frac{\mu_\epsilon}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad \sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \frac{\mu_\epsilon}{2} \left(-\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \quad \sigma_{yy} = \frac{\mu_\epsilon}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (2.4)$$

여기에서, U, V = x, y 방향의 유속성분, ζ = 조위, K = 수면을 부는 바람에 의하여 발생하는 표면력의 무차원계수, $f = 2w_E \sin \phi$, W = 바람의 속도(m/s), ϕ = 바람의 방향이 x축(동방향)과 이룬 각(rad), μ_ϵ = 와점성계수(Pa · s), C = Chezy계수 ($m^{1/2}/s$), [$C = \frac{1}{n} h^{1/6}$], n = 해저마찰을 나타내는 Manning의 조도계수이다.

2.2 경계조건

Fig.2.1와 같이 계산해역을 Ω 로하고, 그 육지경계를 Γ_v , 해상경계를 Γ_ζ 로 한다. 경계에 세운 외향의 단위 법선의 x, y 성분을 n_x, n_y 라한다. 경계조건은 다음과 같다

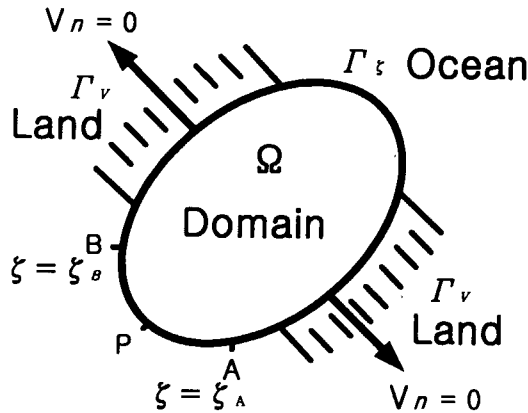


Fig.2.1 Schematic description of boundary conditions

$$\begin{aligned} Un_x + Vn_y &= \bar{V}_n \text{ at } \Gamma_v(\text{shore boundary}), & \zeta &= \bar{\zeta} \text{ at } \Gamma_\zeta(\text{open boundary}) \\ \sigma_{xx}n_x + \sigma_{xy}n_y &= \bar{\tau}_x, \quad \sigma_{yx}n_x + \sigma_{yy}n_y &= \bar{\tau}_y \end{aligned} \quad (2.5)$$

여기에, \bar{V}_n (m/s) = 법선 유속성분, $\bar{\zeta}$ (m) = 조위, $\bar{\tau}_x, \bar{\tau}_y$ (Pa) = 표면력의 x, y 성분은 알고 있는 것으로 한다 초기 조건은 일반적으로 정해지지 않기 때문에, 계산개시 때에는 영역 Ω 내에서 $t=0$ 일때 $\zeta=0, U=V=0$ 된다.

2.3 유한요소법에 의한 이산화

해상경계 Γ_ζ 상에서 $\delta\zeta=0$ 로 되는 것과 같이 임의의 가중함수 $\delta\zeta$ 를 고려하고, 시간에 관하여 이산화된 연속방정식을 양변에 곱하여, 영역 Ω 로 적분한다. n스텝제의 표시를 생략하여 이를 정리하면

다음과 같이 된다.

$$\int_{\Omega} \delta \zeta \frac{\zeta^{n+1} - \zeta}{\Delta t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta \zeta \left(\frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} \right) d\Omega = 0 \quad (2.6)$$

$d\Omega = dx dy$ 이며, Gauss 발산정리, 경계조건을 적용하여 풀면 다음과 같은 가중잔차 방정식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \delta U \frac{U^{n+1} - U}{\Delta t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta U \left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) d\Omega \\ & - \int_{\Omega} \delta U f V d\Omega + g \int_{\Omega} \delta U \frac{\partial \zeta}{\partial x} d\Omega + \int_{\Omega} \left\{ (\nu_{\epsilon} + \Delta t U^2) \frac{\partial \delta U}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} \right. \\ & + \Delta t UV \frac{\partial \delta U}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{1}{2} (\nu_{\epsilon} + \Delta t V^2) \frac{\partial \delta U}{\partial y} \frac{\partial U}{\partial y} \\ & \left. + \frac{1}{2} (\nu_{\epsilon} + \Delta t U^2) \frac{\partial \delta U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} \right\} d\Omega - \int_{\Omega} \delta U \frac{KW^2}{H} \cos \phi d\Omega \\ & + g \int_{\Omega} \delta U \frac{U \sqrt{(U^2 + V^2)}}{HC^2} d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

여기에서, 와동점성계수를 $\nu_{\epsilon} = \mu_{\epsilon} / \rho$ (m^2/s)로 둔다. 영역 Ω 를 삼각형의 유한요소로 분할하고, 미지조위 ζ 와, 미지유속 U , V 와 이들의 가중함수 $\delta \zeta$, δU , δV 를 근사화하고, 요소내의 변수를 면적좌표에 의한 1차 보간함수를 이용하여 근사화하여, 요소e에서 행렬성분을 정리하면, 다음의 요소방정식이 얻어진다.

$$\sum_{\beta} M_{\alpha\beta}^e \frac{\zeta_{\beta}^{n+1} - \zeta_{\beta}}{\Delta t} + \sum_{\beta, \gamma} X_{\alpha\beta\gamma}^e U_{\beta} H_{\gamma} + \sum_{\beta, \gamma} Y_{\alpha\beta\gamma}^e V_{\beta} H_{\gamma} + \sum_{\beta, \gamma} X_{\alpha\gamma\beta}^e H_{\gamma} U_{\beta} + \sum_{\beta, \gamma} Y_{\alpha\gamma\beta}^e H_{\gamma} V_{\beta} = 0 \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\beta} M_{\alpha\beta}^e \frac{U_{\beta}^{n+1} - U_{\beta}}{\Delta t} + \sum_{\beta, \gamma} X_{\alpha\beta\gamma}^e U_{\beta} U_{\gamma} + \sum_{\beta, \gamma} Y_{\alpha\beta\gamma}^e V_{\beta} U_{\gamma} - \sum_{\beta, \gamma} N_{\alpha\beta\gamma}^e f_{\beta} V_{\gamma} + g \sum_{\beta} P_{\alpha\beta}^e \zeta_{\beta} + (\nu_{\epsilon} + \Delta t U_{\alpha}^2) \sum_{\beta} D_{\alpha\beta}^e \\ & + \Delta t U_{\alpha} V_{\alpha} \sum_{\beta} E_{\alpha\beta}^e U_{\beta} + \frac{1}{2} (\nu_{\epsilon} + \Delta t V_{\alpha}^2) \sum_{\beta} G_{\alpha\beta}^e U_{\beta} + \frac{1}{2} (\nu_{\epsilon} + \Delta t U_{\alpha}^2) \sum_{\beta} F_{\alpha\beta}^e V_{\beta} - \left[\frac{KW^2}{H} \cos \phi \right]^e \frac{\Delta^e}{3} \\ & + g \left[\frac{\sqrt{(U^2 + V^2)}}{HC^2} \right]^e \sum_{\beta} M_{\alpha\beta}^e U_{\beta} = 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{\beta} M_{\alpha\beta}^e \frac{V_{\beta}^{n+1} - V_{\beta}}{\Delta t} + \sum_{\beta, \gamma} X_{\alpha\beta\gamma}^e U_{\beta} V_{\gamma} + \sum_{\beta, \gamma} Y_{\alpha\beta\gamma}^e V_{\beta} V_{\gamma} - \sum_{\beta, \gamma} N_{\alpha\beta\gamma}^e f_{\beta} U_{\gamma} + g \sum_{\beta} Q_{\alpha\beta}^e \zeta_{\beta} \\ & + \frac{1}{2} (\nu_{\epsilon} + \Delta t V_{\alpha}^2) \sum_{\beta} E_{\alpha\beta}^e U_{\beta} + \frac{1}{2} (\nu_{\epsilon} + \Delta t U_{\alpha}^2) \sum_{\beta} D_{\alpha\beta}^e V_{\beta} + \Delta t U_{\alpha} V_{\alpha} \sum_{\beta} F_{\alpha\beta}^e V_{\beta} \\ & + (\nu_{\epsilon} + \Delta t V_{\alpha}^2) \sum_{\beta} G_{\alpha\beta}^e V_{\beta} - \left[\frac{KW^2}{H} \sin \phi \right]^e \frac{\Delta^e}{3} + g \left[\frac{\sqrt{(U^2 + V^2)}}{HC^2} \right]^e \sum_{\beta} M_{\alpha\beta}^e V_{\beta} = 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

여기에서, 요소e에서의 행렬성분은 다음과 같다.

$$M_{\alpha\beta}^e, X_{\alpha\beta\gamma}^e, Y_{\alpha\beta\gamma}^e, N_{\alpha\beta\gamma}^e, P_{\alpha\beta}^e, Q_{\alpha\beta}^e, D_{\alpha\beta}^e, E_{\alpha\beta}^e, F_{\alpha\beta}^e, G_{\alpha\beta}^e$$

위 식을 모든 요소에 적용하여 합치면, 영역전체에서의 유한요소방정식이 얻어진다.

3. 흐름에 의한 오염확산의 해석

3.1 이류확산의 지배방정식

물질수송현상의 특징은 물질이 그 농도의 기울기에 따라 확산하는 현상과 운동하는 유체에 의해 움직여지는 "이류"라고 불리는 현상이 혼재하고 있다는 것이다. 유체가 운동하고 있는 천수역에서의 오탁물질의 이동현상은 다음과 같은 이류확산 기초방정식이 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} - k \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = S \quad (3.1)$$

여기에, C=오탁물질농도 (kg/m^3), S=단위시간당의 물질방출강도 ($kg/m^3 \cdot s$), k=확산계수 (m^2/s) [일정한 것으로 가정], U, V=유속 u, v를 연직방향으로 적분하여 그 수심평균을 취한 x, y 방향의 유속(m/s)이다.

3.2 경계조건

농도가 규정된 경계를 Γ_c , 질량 flux가 규정되는 경계를 Γ_q 라 한다.

$$\Gamma_c \text{ 상에서는 } C = C_B$$

$$\Gamma_q \text{ 상에서는 } -k \frac{\partial C}{\partial n} = q_B \quad (3.2)$$

여기에서, q_B 는 법선방향의 기지 농도 flux이다.

3.3 유한요소법에 의한 이산화

농도경계 Γ_c 상에서 $\delta C=0$ 이 되도록 한 임의의 가중함수 δC 를 식(3.1)의 양변에 부가하여 영역 Ω 로 적분한다. n step째의 표시를 생략하여 정리하면 식(3.3)과 같다

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \delta C \frac{C^{n+1} - C}{\Delta t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta C \left(U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega} \delta C \left(\frac{\partial \hat{J}_x}{\partial x} + \frac{\partial \hat{J}_y}{\partial y} \right) d\Omega = \int_{\Omega} \delta C S d\Omega \end{aligned} \quad (3.3)$$

여기에서, \hat{J}_x, \hat{J}_y 는 이산화된 에너지 flux이다. 이식을 Gauss-Green정리를 적용하고, 경계조건을 고려하면 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} \delta C \frac{C^{n+1} - C}{\Delta t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta C \left(U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} \right) d\Omega \\
 & + \int_{\Omega} \left(k_{xx} \frac{\partial \delta C}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial \delta C}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial y} \right. \\
 & \left. + k_{yx} \frac{\partial \delta C}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial \delta C}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} \right) d\Omega \\
 & = \int_{\Omega} S \delta C d\Omega - \int_{\Gamma_s} q_B \delta C d\Gamma
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

여기에서, S는 단위시간당 물질방출강도($kg/m^3 \cdot s$)이다. 영역 Ω 를 삼각형의 유한요소로 분할하고 미지의 농도 C와 가중함수 δC 를 각각의 유한요소 내에서 다음과 같이 근사한다.

$$C = \sum_{\alpha} \phi_{\alpha} C_{\alpha} \quad \delta C = \sum_{\alpha} \phi_{\alpha} \delta C_{\alpha}$$

(3.5)

여기서, $\phi_{\alpha} (\alpha=1,2,3)$ 은 삼각형 유한요소 e에 있어서 1차의 보간함수이다. 이때, 요소내 각 보간함수의 미분과 적분을 이용하여 δC 가 임의인 것에 따라 다음과 같은 요소방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{\beta} M_{\alpha\beta}^e \frac{C_{\beta}^{n+1} - C_{\beta}}{\Delta t} + \sum_{\beta, \gamma} X_{\alpha\beta\gamma}^e U_{\beta} C_{\gamma} + \sum_{\beta, \gamma} Y_{\alpha\beta\gamma}^e V_{\beta} C_{\gamma} \\
 & + \left(k + \frac{\Delta t}{2} U^2 \right) \sum_{\beta} D_{\alpha\beta}^e C_{\beta} + \frac{\Delta t}{2} U_e V_e \sum_{\beta} (E_{\alpha\beta}^e + F_{\alpha\beta}^e) C_{\beta} \\
 & + \left(k + \frac{\Delta t}{2} V^2 \right) \sum_{\beta} G_{\alpha\beta}^e C_{\beta} = S_{\alpha} \quad (\alpha=1,2,3)
 \end{aligned}$$

(3.6)

이것을 모든 요소에 적용하여 합치면 영역 전체에서의 유한요소방정식이 얻어진다.

4. 모델의 검증 및 현장적용

4.1 모델의 검증

유한요소의 적용과 컴퓨터 프로그램의 알고리즘을 증명하기 위해 계산해를 적용하기 위한 모델을 선택하고 Brebbia(1976)의 연구에서 얻어진 해석해와 비교 검증한다. 선택된 모델은 1600×4000m의 장방형 수로로서 수심은 일정하다. 적용된 파라메타로는 진폭= 0.5m, 주기=3600sec, 수심=20m, 길이=4000m이고, 시간중분(Δt)=5.625sec로 하며, 초기흐름 속도와 초기 조위값은 0으로 가정한다. 1차원 수로에서, Brebbia에 의하면 바닥 전단 응력과 코리올리력을 무시할 경우, 1차원 모델의 해석해는 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{a}{\cos\left(-\frac{wt}{\sqrt{gh}}\right)} \cos\left[\frac{wt}{\sqrt{gh}}\left(\frac{x}{l} - 1\right)\right] \sin wt$$

(4.1)

$$U = \frac{a\sqrt{gh}}{h\cos(\frac{wl}{\sqrt{gh}})} \sin[\frac{wl}{\sqrt{gh}}(\frac{x}{l} - 1)] \cos \omega t$$

(4.2)

여기서, x =수로입구로부터의 거리(m), a =진폭 (m), l =장방향 수로길이(m), h =수로수심(m), T =주기(sec), ω =각속도($2\pi/T$) 이다.

Fig.4.1은 장방향수로의 50번 위치의 절점번호의 조위, 유속 값과 Brebbia의 해석해를 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 조위, 유속변화가 진폭이나 주기성에서 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있으므로, 본 모델의 검증이 안정된 것으로 판단된다.

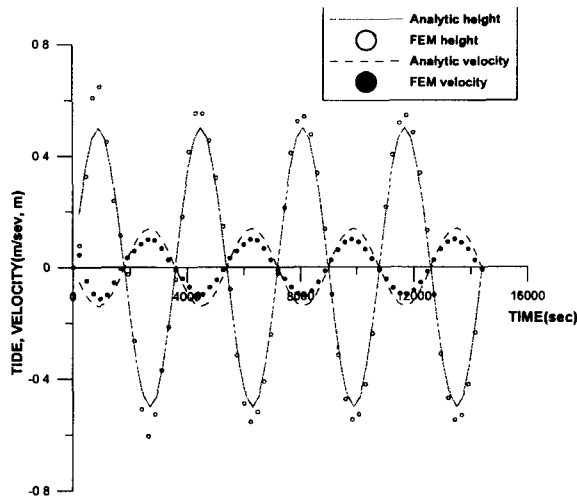


Fig.4.1 Comparison of analytical and FEM

4.2 모델의 구성

본연구의 대상영역은 가덕도 연안으로, 신항만 부지 조성을 위해 Fig.4.2에 제시된 것과 같이, 준설토를 투기하여 배후지를 확보하는 것으로 계획하고 있다. Fig.4.2의 투기장 A, B 건설을 위해 1차적으로 호안공사가 Fig.4.3과 같이 단계적으로 진행되고 있으나 공사가 진행됨에 따라 예상되는 해수유동 변화와 부유물질 확산의 분석이 필요로 된다. 본 연구에서는 A지구의 호안공사 단계에 따른 유동 및 이로 인한 부유물질 확산특성을 분석하는데 목표를 두고, 실험을 수행하였다. 모델의 구성은 호안 설치 진행 과정에 따라 CASE 1, CASE 2, CASE 3의 3단계로 Fig.4.4에서처럼 분류하여 유동의 변화와 단계별 공사 과정에서 발생하는 부유물질의 투기로 인한 항 내 오염물 확산분포의 예측을 한다. 대상 영역의 수치모델은 유한요소법(FEM)으로서 격자의 구성은 삼각형 요소로 요소의 한변이 25~400m인 가변요소를 선택하였으며, 방파제, 가호안, 섬 주위는 상세한 정보를 얻기 위해 더욱 세밀한 요소로 구성하고 수로중앙부의 수심이 깊은곳은 요소의 크기를 크게하였다. Fig.4.3에서 나타난 point (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7)는 각 지점의 조석을 국립해양조사원(1999)에서 관측한 조석과 비교하기 위한 지점이다

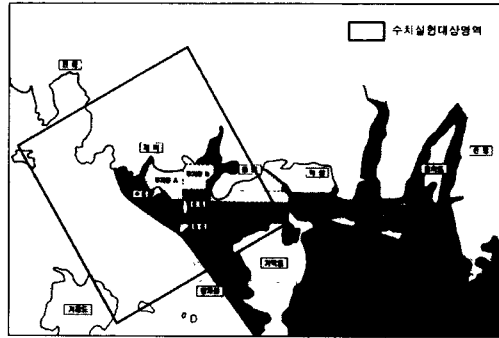


Fig.4.2 Location map for numerical simulation

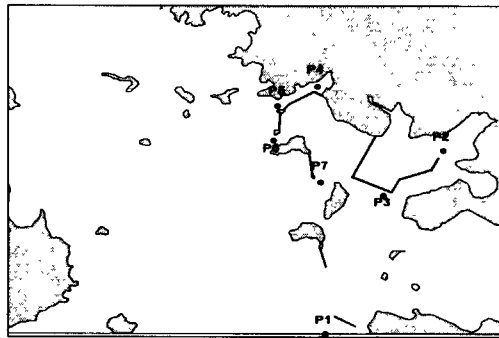


Fig.4.3 Observation point total domain

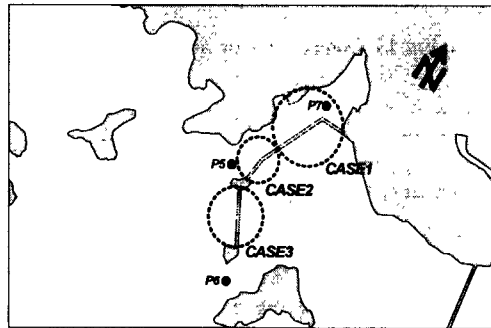


Fig.4.4 Site for each case of the construction work

4.3 수치실험 및 분석

4.3.1 해수유동 시뮬레이션

실험영역은 x방향으로 12.5km, y방향으로 10.8km로 설정하고 진북에 대해 32° 반시계 방향으로 좌표 축을 선택하였으며, 시간중분은 $\Delta t = 3.5\text{sec}$ 로 하였다. 실험에서는 대상 해역이 반일주조가 우세한 지역이므로 조화상수는 반일주조인 M_2 분조로 이용하였다. 대상영역의 각 CASE별 최강창조류, 최강 낙조류를 Fig.4.6~Fig.4.11에서 나타내고 있다. 여기에서 조류는 반일주조의 형태로서 1일 2회의 규칙

적인 장·낙조류가 일어나는 것을 알 수 있으며, 섬이나 육지경계에서의 흐름패턴이 공사 진행과정에 따른 지형변화로 인해 만내 부분인 호안이나 방파제 부근에서는 CASE 3의 유속이 CASE 1, 2 지점의 유속보다 크게 나타남을 알 수 있으며, 호안 설치 단계별로 흐름의 방향 및 크기가 변화하고 있는 것을 알 수 있다

모델의 재현성을 확인하기 위하여, Fig 4.3에 제시된 정점에서의 수치실험 결과치와 관측치를 비교하였다 Fig 4.11은 각 CASE 1, 2, 3 의 P1지점의 조석과 국립해양조사원(1999)에서 관측한 조석을 비교한 그래프이다 해양조사원에서 조사한 지점(P8)은 본 모델의 P1지점보다 아랫부분에 위치한 영역 바깥에 위치해 있다 국립해양조사원 보고서에 의하면 조석형태수는 $F = \frac{O_1 + K_1}{M_2 + S_2} = 0.15$ 로 반일주조형이 탁월하며, M_2 , S_2 의 영향이 조석의 주종을 이루는 것으로 분석되었다 본 모델에서는 M_2 분조만을 고려하였으며, 위치의 다소 차이가 있으나 Fig 4.5에서와 같이 유사한 진폭과 주기의 형태값이 나타남을 알 수 있다. 그 중에서도 CASE 3의 경우와 거의 비슷한 것을 알 수 있다.

4.3.2 오염물 확산 시뮬레이션

본 모델에서는 오염물질의 공사 진행중 사석공 투하로 발생하는 오염물질의 확산과정을 방오막 설치 전과 방오막 설치 후로 나누어 예측하고자 한다 호안이 설치되는 최협소부의 육지경계에 사석공 투하로 인한 부유물질(SS, Suspended Substance)발생 원단위농도 $C = 1\text{kg}/\text{m}^3$ 의 오염부하를 주었다 공사진행시 발생하는 오염물질의 확산계산을 위해 초기시각에 대하여 만내는 오염되어 있지 않음으로 한다. 호안 설치 완공 후, 조석 주기변화에 의한 오염물농도의 확산 분포는 Fig 4.12와 같으며, 1조석주기~4조석주기의 주기별 변화를 나타내고 있다 각 주기별 부유물질농도의 확산형태를 보면, 호안과 방파제 사이인 만내에서는 부유물질 농도의 초기 정체현상이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 만외측으로는 흐름에 의한 농도확산이 원활하게 일어남을 알 수 있다 오염확산농도의 정량적인 값을 얻기 위하여 Fig.4.12에 A, B의 두 정점을 두어 A지점으로부터 B지점까지의 농도값의 변화와 농도치를 Fig 4.13에서 조석 주기변화에 따라 나타나고 있으며, Table.4.1에서는 A, B지점의 농도값과 농도증가율을 표로서 나타내고 있다. Fig 4.13의 중앙부분은 오염원이 주어지는 호안설치 지역으로 농도값이 크게 나타나고 있으며, Table 4.1의 A, B 두 지점의 농도값이 거의 동일하며, 거의 일정하게 증가함을 알 수 있다 이러한 호안 공사시 발생하는 오염 확산을 최소화 하기 위한 방안으로 공사가 발생하는 호안 주위에 초기에 방오막을 설치하였을 경우 어떠한 결과가 발생하는지를 Fig4.14에서 나타난다

방오막 설치시 투과율을 50%로 보았을 경우 Fig4.14에서처럼 오염물의 확산치가 반으로 줄어든 것을 알 수 있으며, Fig 4.15 및 Table 4.2에 정량적인 농도 값과 농도변화를 또한 반으로 줄어든 것을 알 수 있다 이로써, 초기 방오막 설치의 필요성이 필수적임을 알 수 있다.

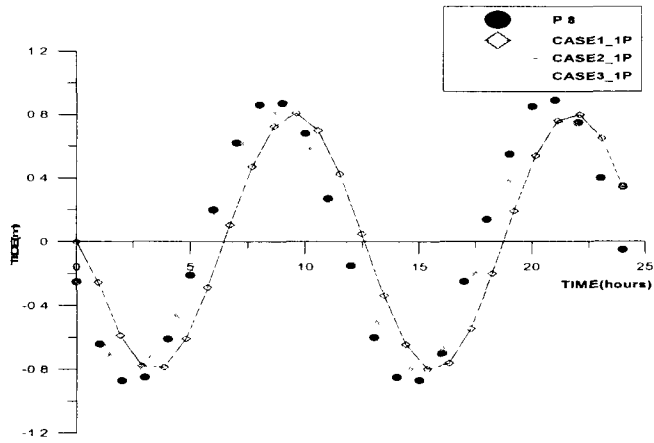


Fig.45 Observation and calaulaed tides for the selected stations(CASE_1, 2, 3)

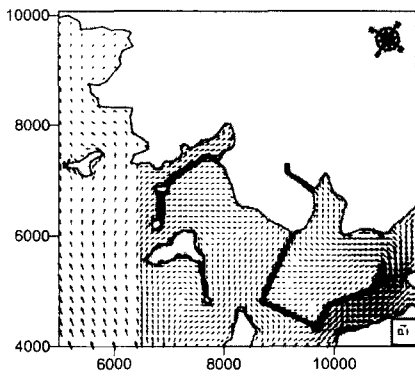


Fig.46 Tide currents (CASE1_max flood flow)

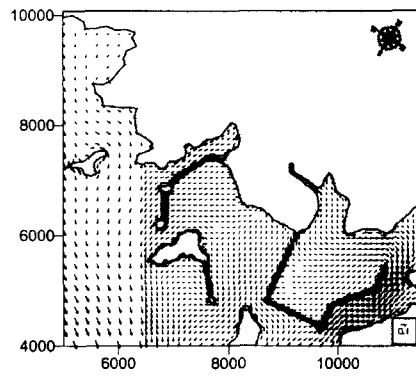


Fig 47 Tide currents (CASE1_max ebb flow)

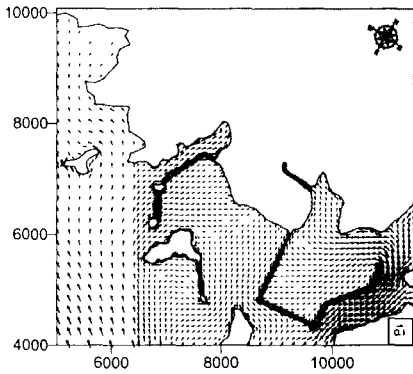


Fig 4 8 Tide currents(CASE2_max flood flow)

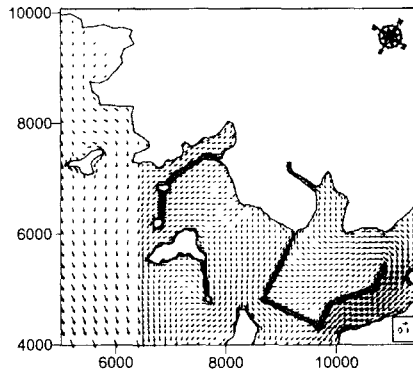


Fig 4 9 Tide currents(CASE2_max ebb flow)

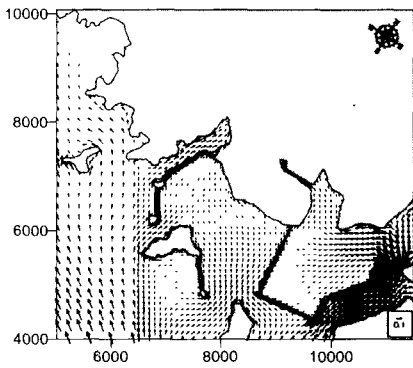


Fig 4 10 Tide currents(CASE3_max flood flow)

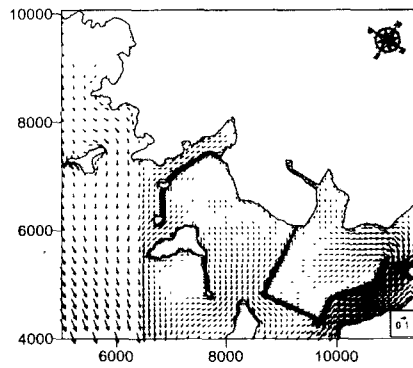
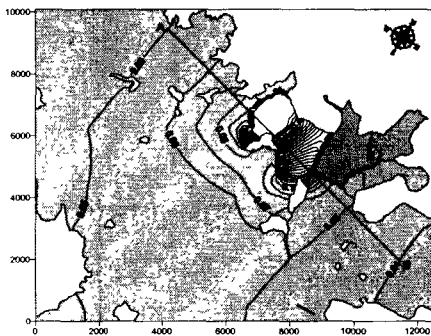
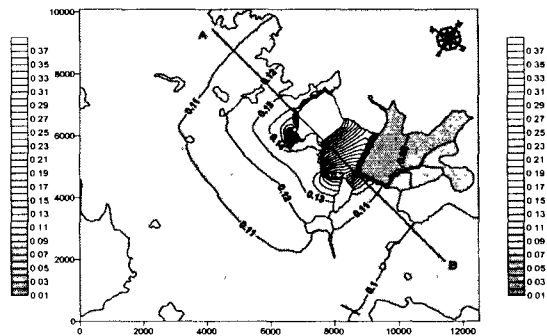


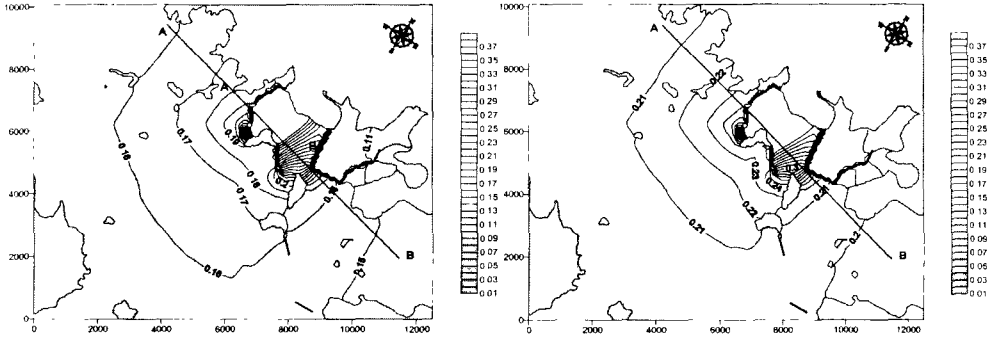
Fig 4.11 Tide currents(CASE3_max ebb flow)



(a) After 1 cycles of a tidal



(b) After 2 cycles of a tidal



(c) After 3 cycles of a tidal

(d) After 4 cycles of a tidal

Fig.4.12 Distribution of SS in the harbor - without silt protectors

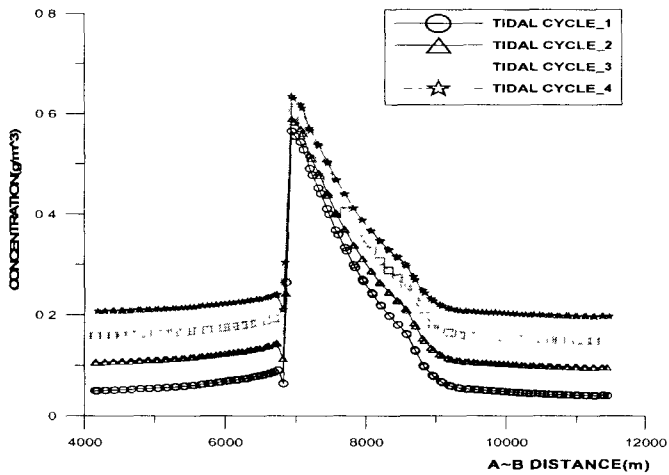
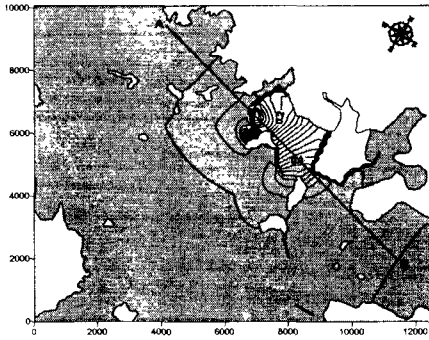


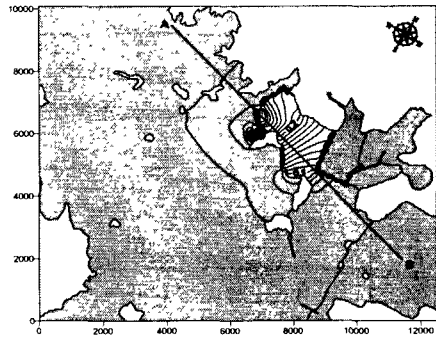
Fig.4.13 Distribution of SS at cross section A-B without silt protector

Table4.1 Distribution rate of SS and increment without silt protector(Tidal cycles)

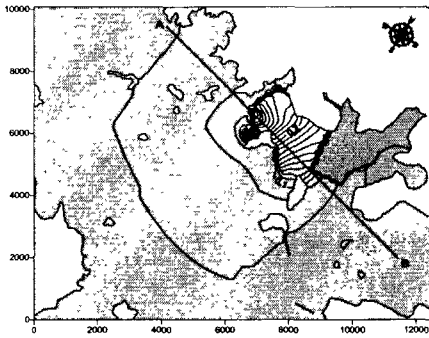
Tidal cycle	A station	A (%)	B station	B (%)
1	0.0499	4.99	0.0400	4.0
2	0.1064	5.65	0.0958	5.58
3	0.1584	5.20	0.1480	5.22
4	0.2071	4.87	0.1969	4.89



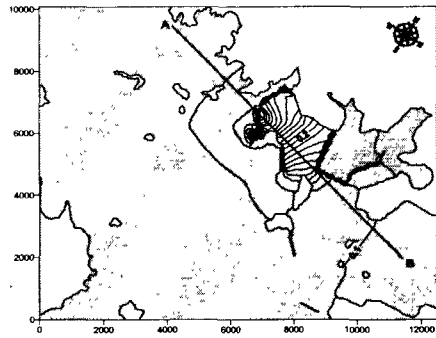
(a) After 1 cycles of a tidal



(b) After 2 cycles of a tidal



(c) After 3 cycles of a tidal



(d) After 4 cycles of a tidal

Fig 4 14 Distribution of SS in the harbor - with silt protectors

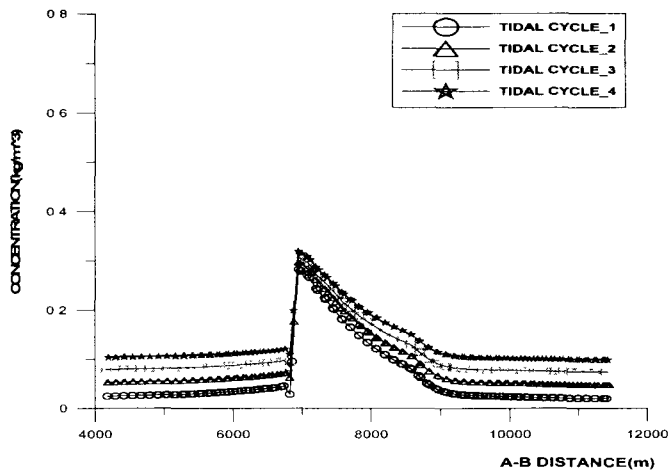


Fig 4 15 Distribution of SS at cross section A-B with silt protector

Table 42 Distribution rate of SS and increment with silt protector(Tidal cycles)

Tidal cycle	A station	A (%)	B station	B (%)
1	0.025	2.6	0.02	2.0
2	0.053	2.8	0.047	2.7
3	0.079	2.6	0.074	2.7
4	0.103	2.4	0.097	2.3

5. 결론

본 연구에서는 조석에 의한 해수유동과 오염물 확산을 유한요소 Galerkin법을 사용하여 수치모델을 구축하고 모델 해석해가 주어진 영역에 대해 실험하여 비교·검증하였으며 이를 실제로 호안 및 방파제 공사가 진행중인 가덕 신항만을 대상으로 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(i) 대상 지역의 개발 단계별 해수유동 특성의 분석으로 공사과정과 공사완료 후의 조석 및 유동장 변화를 재현할 수 있었다.

(ii) 단계적 호안 공사로 인해 반 폐쇄 수역인 만내 제한 수역에서 유동장이 변화하여 확산과정에서도 변화된 유동장의 영향이 미치는 것을 파악할 수 있었다.

(iii) 공사로 발생하는 SS부하량을 저감시키고 영향권을 축소시키기 위한 방안으로 오탁방지막 설치는 필연적이며, 오탁방지막의 설치위치, 방향, 규모등 오염물 확산 방지계획에 중요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 본다.

또한, 장래에 발생하는 추가 공사와 동일한 형태의 연안역 개발시 기초적인 자료를 제시함과 동시에 연안 장래 생태계와 수질오염을 효율적으로 관리할 수 있는 근거를 확보하게 되었다 차후 연안역 오염물의 확산분포 연구시 현장관측을 중심으로 해역의 오염물 초기농도를 반영하거나 오염물질원을 부유물질에만 국한시키지 않는 다양한 인자를 포함한 연구가 필요한 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1 이정규 외, 1984, "조류에 의한 부유사의 확산에 대한 수치모형," 대한토목학회 논문집, 제4권, 제4호.
- 2 해양수산부 국립해양조사원, 1999, "99 가덕수도 조류관측 결과", 보고서
- 3 최성룡, 1999, "항만개발에 따른 수질변화 및 개선책에 관한 연구, 한국항만학회지 제13권, 제1호, pp 123~131.
- 4 Brebbia, C A and Partridge, P. M., 1976, "Quadratic Finite Elements in Shallow Water Problems", J of Hydraulics Div, ASCE, Vol. 102, No 9
- 5 Coe J M. & Roser, D B, 1996, "Marine Debris, Source, Impact, and Solution", Spring, NY
- Fischer, H B, 1970. "A Method for Predicting Pollutant Transport in Tidal Waters", Hydraulic Laboratory, Univ. of California, Berkeley

6. Kang, S. W., 1988, "Numerical Modelling of Pollutant Dispersion in Masan Bay", KORDI Tech. Report, BSPF 0057-184-4.
7. King, I.P., 1965, "Finite Element of Two Dimensional Time Dependent Stress Problems", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
8. Leendertes, J. J, 1967, "Aspects of a Computational Model for Well-mixed Estuaries and Coastal Sea", RM 5294-PR, The Rand Corp., Santa Monica, California.
9. Masch, F. D. et al., 1971, "Tidal Hydrodynamic and Salinity Models for San Antonio and Matagorda Bay, Texas", Report to Texas Water Development Board, Austin, Texas.
10. Norton, W.R., King, I. P. and Orlob, G. T., 1973, "A Finite Element Model for Lower Granite Reservoir", Walla District U.S. Army Report, prepared by Water Resources Engineers, Inc.