

## 신항만부지에서의 유동 및 수질에 관한 유한요소해석

안도경\* · 이종우\*\*

\*한국해양대학교 토목환경공학과 대학원  
\*\*한국해양대학교 토목환경시스템공학부 교수

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

Do-Kyung Ahn\* · Joong-Woo Lee\*\*

\*Graduate school of Dept. Civil & Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea  
\*\*Professor, Division of Civil and Environmental Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요약** : 환경문제에 대한 유동시뮬레이션은 수체에서의 오염 물질의 거동에 대한 정확한 예측과 보다 나은 이해를 위해 국지적인 상세한 분석이 종종 요구된다. 이 연구는 연안의 개발 및 거대항만개발계획이 야기하는 연안지역의 변화가능성을 발견하기 위한 2차원 흐름과 분산모형의 적용을 다루고 있다. 유한요소법은 복잡한 연안의 기하학을 실제와 유사하게 다룰 수 있는 능력과 유연성 때문에 매력적인 방법이라 할 수 있는데, 본 모형은 유한요소법과 Galerkin의 가중잔차법에 의한 접근을 그 기초로 하였고, 개발된 모형은 부산 신항만지구에 적용되었다. 모형의 결과는 관측수심과 대상해역의 4개 지점에 비교하였으며, 모의된 흐름 패턴은 건설장소로부터 멀리 떨어져서 흐름의 영향을 받지 않는 지점에서의 관측자료와 유사한 양상을 보였다. 이러한 시뮬레이션 결과로부터 이 모델이 항만계획과 관리 목적을 위한 다른 다수의 연구, 특히 흐름이 매우 복잡한 근해에 있어서의 오염확산과 흐름분석에 대해서 유용한 수단이 될 수 있음을 알았다.

**핵심어** : 분산, 오염물질, 유한요소이론, 유동패턴, 항만건설, 가중잔차

**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.

**Key words** : dispersion, pollutant, finite element theory, flow pattern, harbor construction, weighted residual

## 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 다양

한 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 가시화되어 가고 있고, 한계를 넘는 과도한 오염부하로 연안해역은 몸살을 앓고 있는 실정이다. 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

\* 종신회원, 1109130@hanmail.net 017-856-8679  
\*\* 종신회원, jwlee@hanara.kmaritime.ac.kr 051)410-4461

다양한 공학적 방법에 의한 수질 예측 및 제어가 요구된다.

## 1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구는 연안역에서 야기되는 물리적 현상의 변화를 수치 모델을 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 개발되어 가고 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 조석 자료를 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)으로서 Kang(1988), Norton(1973), King(1965) 등에 의해서도 적용된 바가 있다.

## 2. 천수역에서의 흐름해석

### 2.1 흐름의 지배방정식

천수역에의 입자의 운동은 거의 일정한 수평운동으로 수립자의 연직방향의 운동을 무시하는 경우가 많다. 우리가 고려하고자 하는 유체의 속도는 아주 느린 흐름이다. 이때에, 유체는 비압축성이라 가정하는 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.

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

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

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

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

여기에서, K = 수면을 부는 바람에 의하여 발생하는 표면력의 무차원계수,  $f = (2w_E \sin \phi)$ , W = 바람의 속도(m/s),  $\psi$  = 바람의 방향이 x축(동방향)과 이룬 각(rad),  $\mu_\epsilon$  = 와점성계수(Pa·s), C = Chezy계수 ( $m^{1/2}/s$ ),  $[C = \frac{1}{n} k^{1/6}]$ , n = 해저마찰을 나타내는 Manning의 조도계수이다.

### 2.2 경계조건

Fig.2.1와 같이 계산해역을  $\Omega$ 로하고, 그 육지경계를  $\Gamma_V$ , 해상 경계를  $\Gamma_\zeta$ 로 한다. 경계에 세운 외향의 단위 법선의 x, y 성분을  $n_x, n_y$ 라한다. 경계조건은 다음과 같다.

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

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  $\Omega$ 내에서 다음과 같이 둔다.  $t=0$  일때  $\zeta=0, U=V=0$

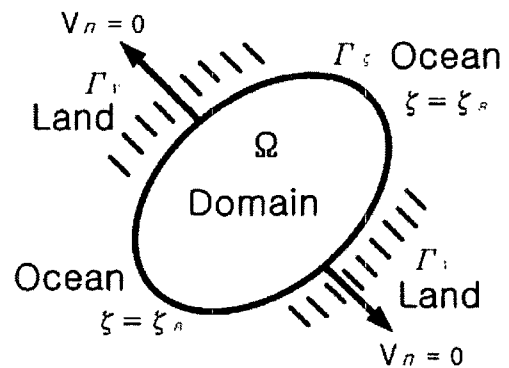


Fig. 2.1 Schematic description of boundary conditions

### 2.3 유한요소법에 의한 이산화

해상경계  $\Gamma_\zeta$  상에서  $\delta\zeta=0$ 로 되는 것과 같이 임의의 가중함수  $\delta\zeta$ 를 고려하고, 시간에 관하여 이산화된 연속방정식을 양변에 곱하여, 영역  $\Omega$ 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.

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

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

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

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

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

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 구배에 따라 확산하는 현상과 운동하는 유체에 의해 움직여지는 “이류”라고 불리는 현상이 혼재하고 있다는 것이다. 유체가 운동하고 있는 천수역에서의 오탁물질의 이동현상은 다음과 같은 이류확산 지배방정식이 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 ( $kg/m^3 \cdot s$ ),  $\eta$ =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  $\Gamma_c$ , 질량 flux가 규정되는 경계를  $\Gamma_q$ 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  $\Gamma_c$  상에서  $\delta C=0$ 이 되도록 한 임의의 가중함수  $\delta C$ 를 식(3.1)의 양변에 부가하여 영역 $\Omega$ 로 적분한다. n step째의 표시를 생략하여 정리하면 식(3.3)과 같다.

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

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

$$\int_{\Omega} \delta C \frac{C^{n+1} - C}{\Delta t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta C (U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y}) d\Omega + \int_{\Omega} (K_{xx} \frac{\partial \delta C}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial \delta C}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial y} + K_{yx} \frac{\partial \delta C}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \delta C}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y}) d\Omega = \int_{\Omega} S \delta C d\Omega - \int_{\Gamma} q_B \delta C d\Gamma \quad (3.4)$$

여기에서, S는 단위시간당 물질방출강도( $kg/m^3 \cdot s$ )이다.

영역  $\Omega$ 를 삼각형의 유한요소로 분할하고 미지의 농도 C와 가중함수  $\delta C$ 를 각각의 유한요소 내에서 다음과 같이 근사한다.

$$C = \sum_{\alpha} \phi_{\alpha} C_{\alpha} \quad \delta C = \sum_{\alpha} \phi_{\alpha} \delta C_{\alpha} \quad (3.5)$$

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

$$\sum_{\beta} M_{\alpha\beta}^e \frac{C_{\beta}^{n+1} - C_{\beta}}{\Delta t} + \sum_{\beta, \gamma} X_{\alpha\beta\gamma}^e U_{\beta} C_{\gamma} + \sum_{\beta, \gamma} Y_{\alpha\beta\gamma}^e V_{\beta} C_{\gamma} + (K + \frac{\Delta t}{2} U_e^2) \sum_{\beta} D_{\alpha\beta}^e C_{\beta} + \frac{\Delta t}{2} U_e V_e \sum_{\beta} (E_{\alpha\beta}^e + F_{\alpha\beta}^e) C_{\beta} + (K + \frac{\Delta t}{2} V_e^2) \sum_{\beta} G_{\alpha\beta}^e C_{\beta} = S_{\alpha} \quad (\alpha=1,2,3) \quad (3.6)$$

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( $\Delta t$ )=5.625sec로 하며, 초기흐름 속도와 초기 조위값은 0으로 가정한다. 1차원 수로에서, Brebbia에 의하면 바닥 전단 응력과 코리올리력을 무시할 경우, 1차원 모델의 해석해는 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{a}{\cos(\frac{\omega l}{\sqrt{gh}})} \cos[\frac{\omega l}{\sqrt{gh}}(\frac{x}{l} - 1)] \sin \omega t \quad (4.1)$$

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

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

Fig.4.1은 장방형수로의 50번 위치의 절점번호의 조위, 유속값과 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.

### 4.2 모델의 구성

본 연구의 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 부족할 실정에 있다.

본 연구에서는 A지구의 호안공사 단계에 따른 유동 및 이로 인한 부유물질 확산특성을 분석하는데 목표를 두고, 실험을 수

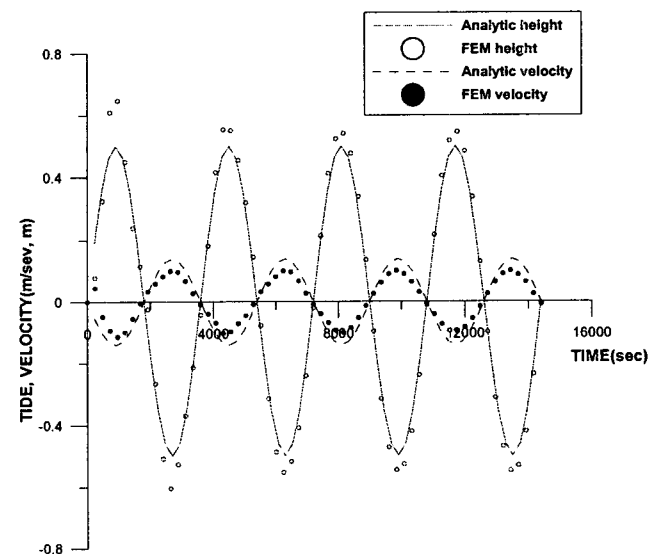


Fig. 4.1 Comparison of analytical and FEM

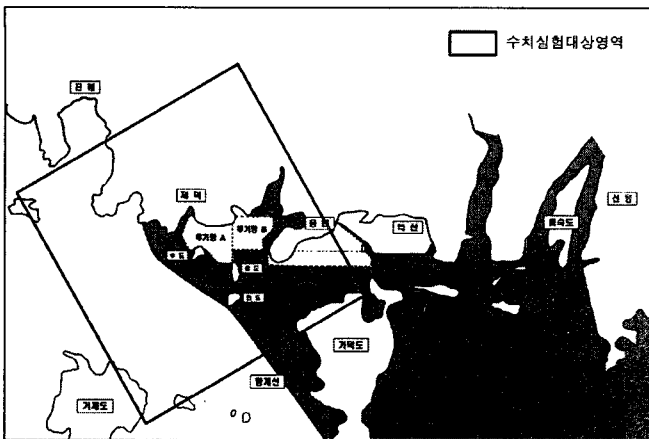


Fig. 4.2 Location map for numerical simulation

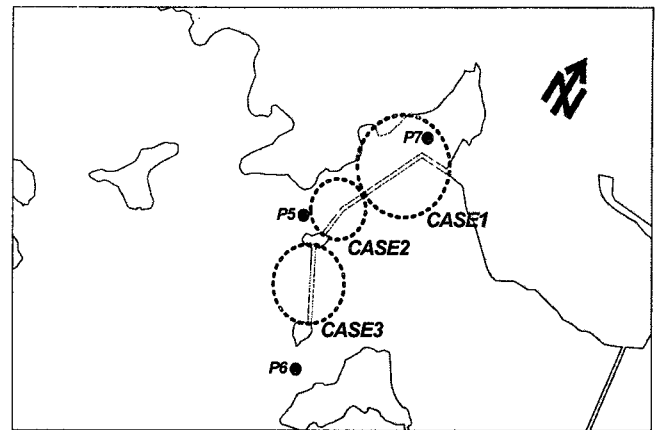


Fig. 4.4 Site for each Case

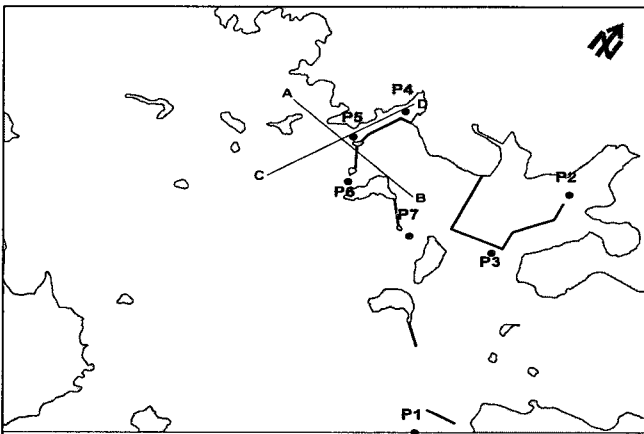


Fig. 4.3 Observation point total domain

행하였다. 모델의 구성은 호안 설치 진행 과정에 따라 Case1, Case2, Case3의 3단계로 Fig.4.4에서처럼 분류하여 유동의 변화와 단계별 공사 과정에서 발생하는 부유물질의 투기로 인한 항 내 오염물 확산분포의 예측을 한다. 대상영역의 수치모델은 유한요소법(FEM)으로서 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 조석 과 유속을 측정 및 비교하기 위한 지점이며, A-B 및 C-D구간은 호안이 설치되고 있는 지역에서 사석공 투하시 발생하는 SS부하량의 농도값과 농도변화를 수직 및 수평으로 측정하기 위해 주어진 구간이다

### 4.3 수치실험 및 분석

#### 4.3.1 해수유동 시뮬레이션

실험영역은 x방향으로 12.5km, y방향으로 10.8km로 설정하고 진북에 대해 32° 반시계 방향으로 좌표축을 선택하였다. 실험에서 고려한 조화상수는 반일주조인  $M_2$  분조이다. 대상영역

의 각 Case별 최강창조류, 최강낙조류를 Fig.4.5~Fig.4.10에서 나타내고 있다. 여기에서 조류는 반일주조의 형태로서 1일 2회의 규칙적인 창·낙조류가 일어나는 것을 알 수 있으며, 섬이나 육지경계에서의 흐름패턴이 공사 진행과정에 따른 지형변화로 인해 만내 부분인 호안이나 방파제 부근에서는 Case3의 유속이 Case1, 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 Case1, 2, 3의 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. 4.11에서와 같이 유사한 진폭과 주기의 형태값이 나타남을 알 수 있다. 그 중에서도 Case3의 경우와 거의 비슷한 것을 알 수 있다.

#### 4.3.2 오염물 확산 시뮬레이션

본 연구에서 호안의 단계적 공사로 인한 해양수질에 영향을 미칠 환경영향 요소는 호안 공사시 사석투하로 인한 부유물질(SS)의 발생이며, 이런 부유물질(SS)의 영향권의 범위를 부유물 확산 수치모델실험을 통하여 예측하였다. 오염부하시 오염부하형태는 연속방류형태로서 산정하였으며, 공사단계별 즉, Case 1, Case 2, Case 3로 나누어, 각각의 경우에 오탁방지막 설치 전·후로 구분하여 수행하였다. 산정기간은 지역특성 및 오염원 특성을 고려하여 15조석주기로 하였으며, 본 해역의 조석특성을 고려하여 평균대조 실험자료로부터 고려된 유동자료로부터 체류시간에 따른 확산형태에 대해 검토가 이루어졌다.

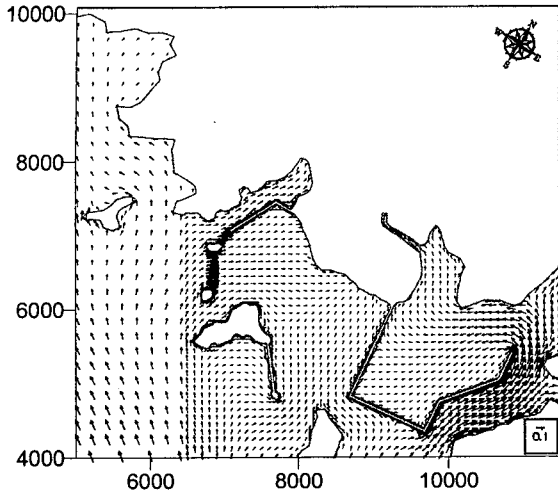


Fig. 4.5 Tide currents (Case1\_max Flood flow)

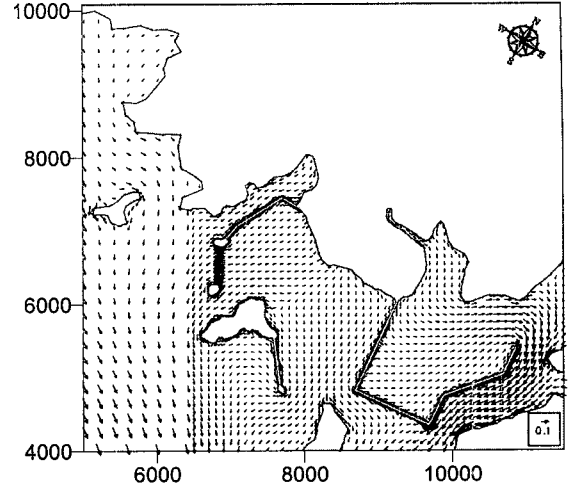


Fig. 4.8 Tide currents(Case2\_max Ebb flow)

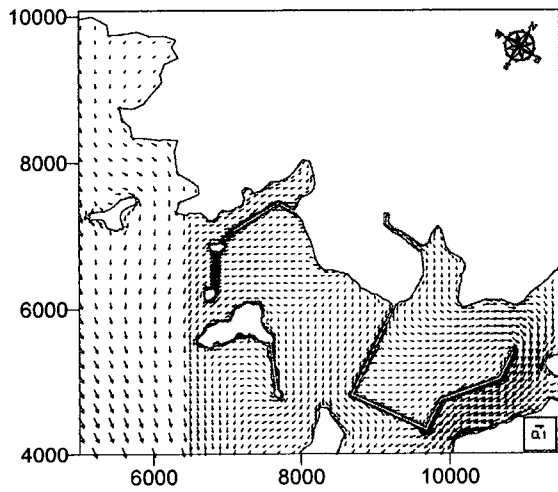


Fig. 4.6 Tide currents(Case2\_max Ebb flow)

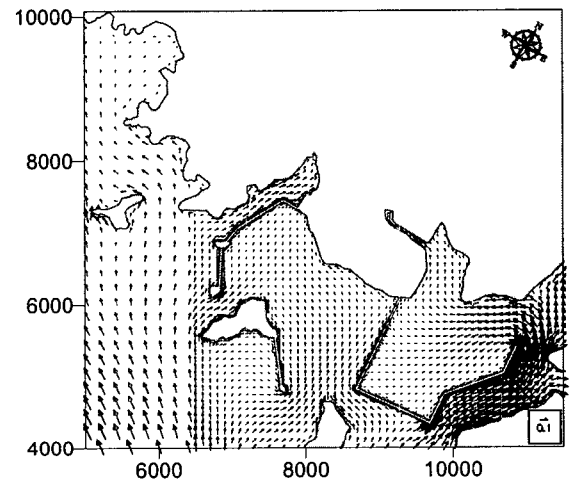


Fig. 4.9 Tide currents(Case3\_max Flood flow)

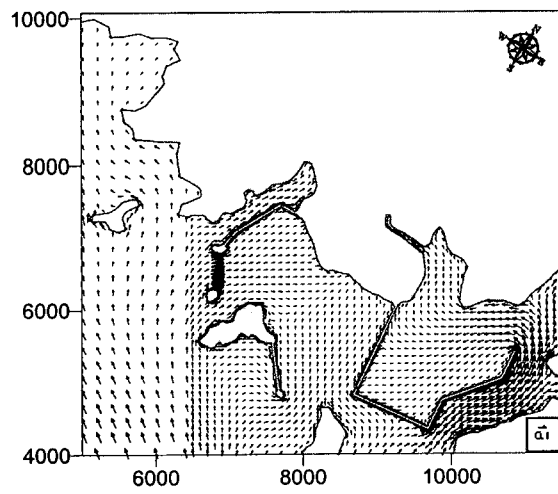


Fig. 4.7 Tide currents(Case2\_max Flood flow)

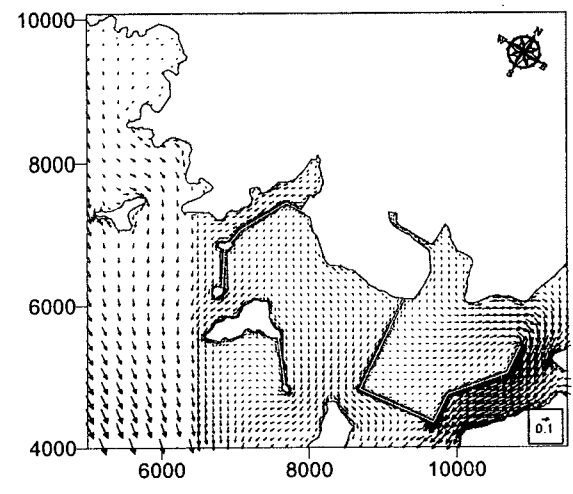


Fig. 4.10 Tide currents(Case3\_max Ebb flow)

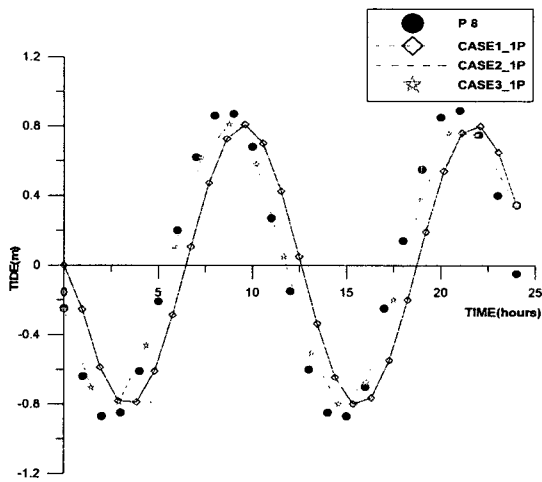


Fig. 4.11 Observation and calaulaed tides for the selected stations(Case\_1, 2, 3)

이상의 부유물확산에 대한 수치실험 결과를 정리하면 다음과 같다. Fig.4.12 및 Fig.4.13는 Case 3의 방오막 설치 전의 계산 결과로서, 사업대상역에서는 대곶도와 꽃도를 연결하는 선상에서 확산되어가는 양상을 보이는데 1조석주기 후에는 수도 북서해안에서 삼포 남단까지 원형의 영역에 해당하며, 15조석주기 후에는 남산-수도와 울미도 중간-토기섬-소고도-명동 남서단까지 연결한 영역으로 Case 1 및 Case 2 보다 약간 늘어난 영역이나 유사한 모양을 나타내고 있다. Fig.4.14 및 Fig.4.15는 방오막 설치후의 계산결과를 나타낸다. Case 3의 경우, 저감전의 경우 1mg/l의 등농도선이 섬을 근접하고 있는 것을 알 수 있으나, 오탉방지막에 의한 저감 후의 경우, 0.1mg/l의 등농도선이 섬의 상단에 근접하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 기존 호안 끝단에서 남측해역으로 약 500m의 최대 확산거리 감소효과가 나타났다.

수치실험의 결과를 위치점 P4, P5, P6, P7에서 비교한 것이 Fig.4.16~Fig.4.19이다. 선택된 위치점은 본 연구와 관계가 깊은 지점으로 각 Case별 주어진 조석주기 후에 오탉방지막의 설치 전후의 농도변화를 그래프로 재정리하였다. 예상된 바와 같이 방오막의 효과는 그대로 반영이 되었으며, 각 위치점에서 농도는 10조석주기 이후부터 거의 변동이 없는 안정한 상태로 수렴하게 된다. 단, 위치점 P7에서는 공사지점과는 원거리이 있으므로 작업이 시작한지 수일이 지나야 비로소 오탉물질의 확산의 영향권에 들어오고 또한 그 영향도 거의 무시할 수 있는 정도에 불과함을 나타내고 있다. Fig.4.20~Fig.4.21은 Fig.4.3의 비교지점 중에서 동서방향의 단면 AB와 남북방향의 단면 CD에서의 오염물의 분포 및 변화량을 조석주기에 따라 비교한 것이다. 전반적인 변화경향은 농도가 증가하다가 거의 일정수준에 이르면 더 이상 오염의 증가가 일어날 수 없다는 것을 나타낸다. 이상의 실험에서 알 수 있듯이, 오탉방지막 등의 저감대책을 수립할 경우, 부유사 발생영역을 훨씬 넓은 범 위까지 감소시킬 수 있을 것으로 판단되며 특히 앞으로 준설시

나 투기장에서 매립사와 같이 부유토사가 대량으로 발생할 것으로 예상되는 경우의 저감효과는 이보다 훨씬 탁월할 것으로 사료된다.

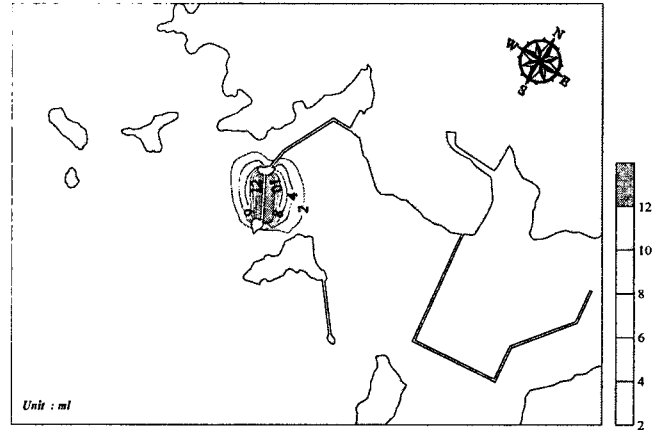


Fig. 4.12 Distribution of SS in the harbor after 1 cycle of the tidal period for case 3 with silt protector

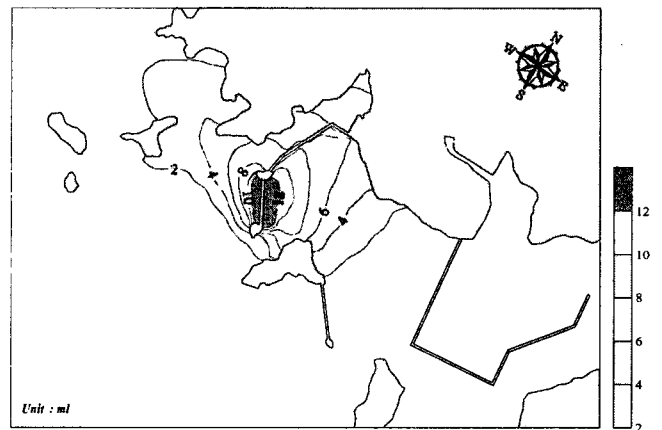


Fig. 4.13 Distribution of SS in the harbor after 15 cycle of the tidal period for case 3 with silt protector

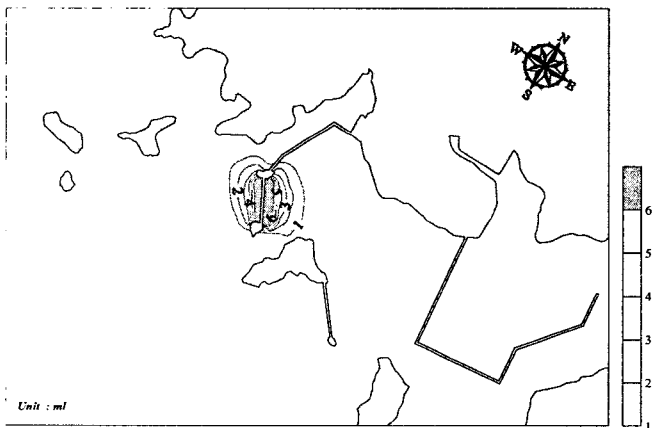


Fig. 4.14 Distribution of SS in the harbor after 1 cycle of the tidal period for case 3 with silt protector

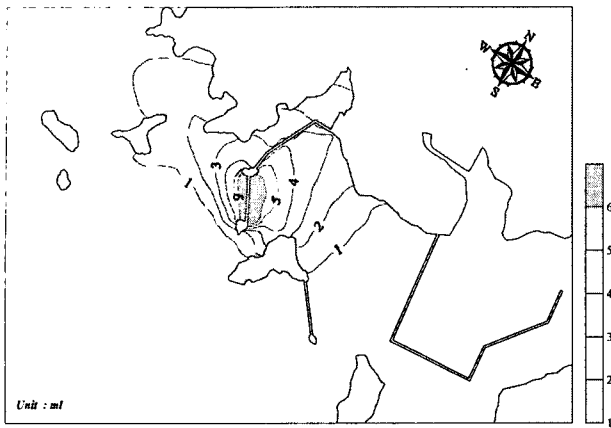


Fig. 4.15 Distribution of SS in the harbor after 15 cycle of the tidal period for case 3 with silt protector

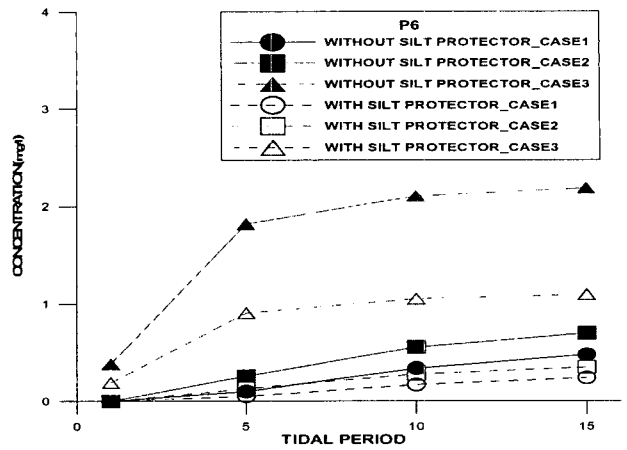


Fig. 4.18 Distribution of SS for each tidal period at station P6

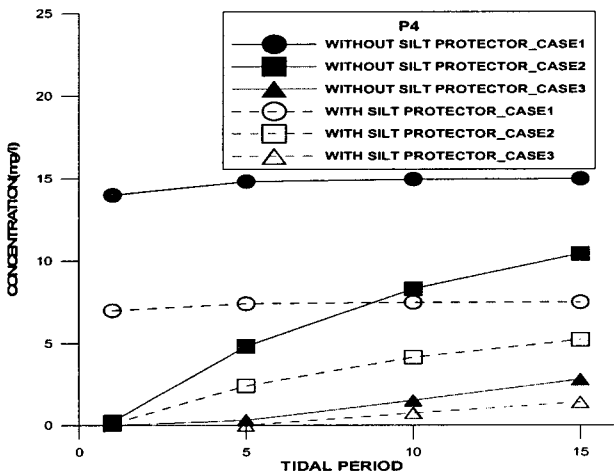


Fig. 4.16 Distribution of SS for each tidal period at station P4

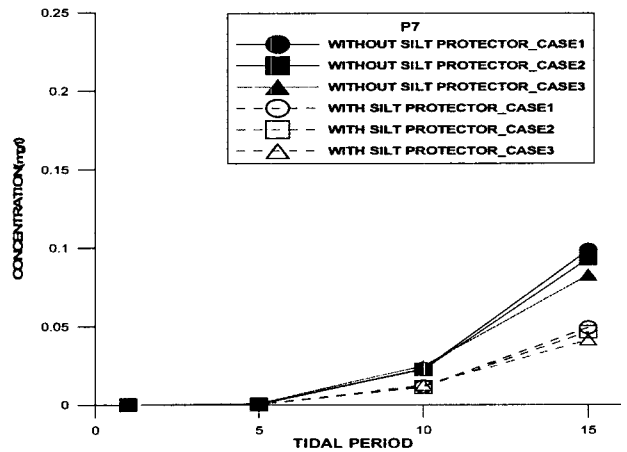


Fig. 4.19 Distribution of SS for each tidal period at station P7

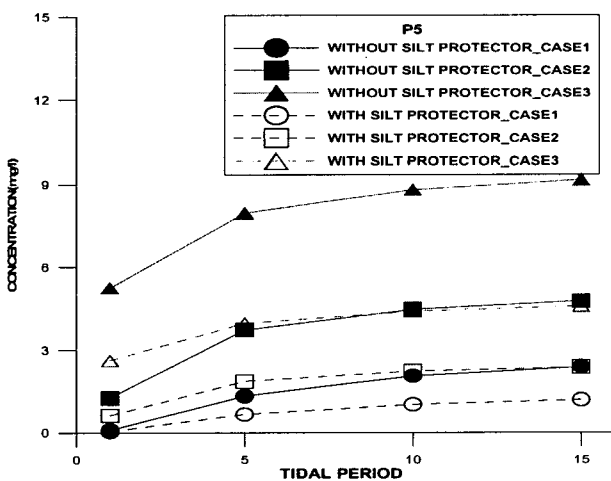


Fig. 4.17 Distribution of SS for each tidal period at station P5

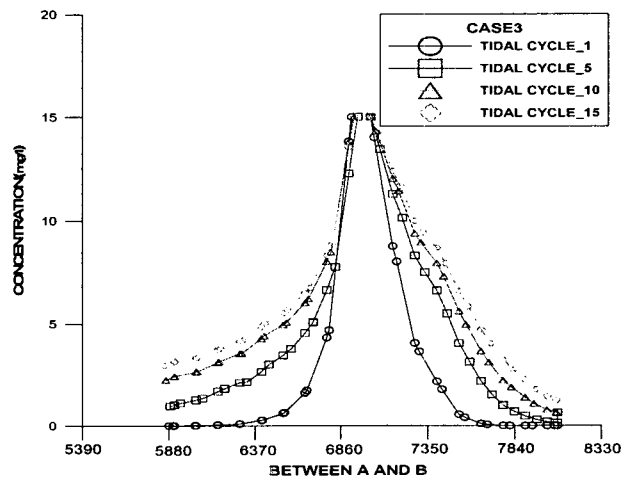


Fig. 4.20 Distribution of SS at the cross section A-B without silt protector for Case 3



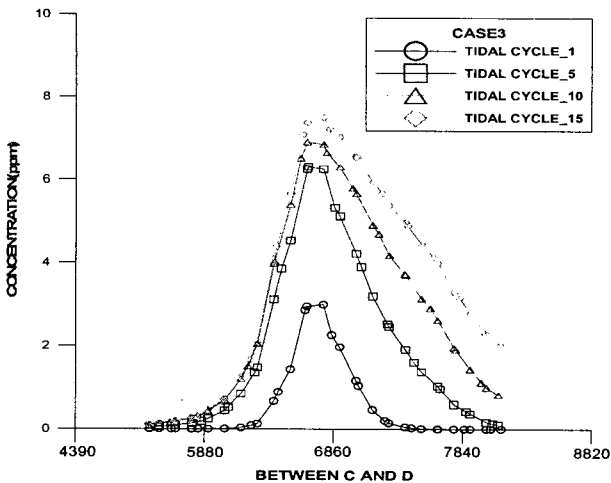


Fig. 4.21 Distribution of SS at the cross section C-D without silt protector for Case 3

### 5. 결 론

상기의 분석결과를 바탕으로 본 연구에서는 조석에 의한 해수유동과 오염물 확산을 유한요소 Galerkin법을 사용하여 수치 모델을 구축하고 모델 해석해가 주어인 영역에 대해 실험하여 비교·검증하였으며 이를 실제로 호안 및 방파제 공사가 진행 중인 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 오탐방지막 설치의 필연적이며, 오탐방지막의 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 부유물

질에만 국한시키지 않는 다양한 인자를 포함한 연구가 필요한 것으로 나타났다.

### 참 고 문 헌

- [1] 이정규 외, 1984, "조류에 의한 부유사의 확산에 대한 수치 모형," 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.

원고접수일 : 2002년 01월 20일  
 원고채택일 : 2002년 03월 22일