

## 목포해역의 해수유동 및 담수확산 예측시스템

정태성<sup>1,†</sup> · 김태식<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한남대학교 토목환경공학과

<sup>2</sup>동부엔지니어링 수자원부

# Prediction System of Hydrodynamic Circulation and Freshwater Dispersion in Mokpo Coastal Zone

Tae Sung Jung<sup>1,†</sup> and Tae Sik Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Civil & Environmental Eng., Hannam Univ.

<sup>2</sup>Water Resources Division, Dongbu Engineering

### 요 약

연안해역의 부영양화, 빈산수괴 형성 그리고 유해적조류 출현과 같은 수질오염은 하계 담수의 대량유입에 의해 빈번하게 발생한다. 따라서 연안해역의 수질오염 현상을 정확히 예측하기 위해서는 담수가 해수유동에 의해 이송-확산되어 해역수질 및 생태계에 미치는 영향범위에 대한 예측 및 분석기술 개발이 필요하다. 본 연구에서는 GUI(Graphic User Interface)를 이용하여 연안해역 해수유동과 담수 확산을 쉽게 예측하고, 그 결과를 효과적으로 검토할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 2차원 유한요소모형을 사용하여 조석에 의한 해수유동을 계산하였고, 담수 확산 계산에는 통계학적인 개념을 이용하여 담수 입자의 운동을 묘사하는 2차원 Random-Walk 모형을 사용하였다. 개발된 시스템을 이용하여 목포해역의 2차원 조류 분포와 담수 확산을 모의하였다. 사용한 입자추적모형의 검증에 위해 다른 이송-확산 수치 해석 방법에 의한 결과 및 1, 2차원 해석해와 비교하였다. 본 연구에서 개발한 예측시스템은 GUI 환경에서 작동되므로 누구나 쉽게 자료의 입력 및 수정이 가능하며, 계산된 모형결과를 그래픽을 이용해 효과적으로 가시화하여 계산결과를 누구나 쉽고 정확하게 볼 수 있다. 따라서 본 시스템을 이용하여 연안해역으로 유입되는 담수의 확산 범위를 수치로 예측하여 신속하게 대책을 수립한다면, 오염된 담수유입으로 인한 인근해역의 환경피해를 줄일 수 있을 것이다.

**Abstract** – In coastal region, eutrophication, Do deficit and red tide are frequently occurred by influx of fresh water. When the fresh water containing pollutants is discharged into the sea, the surrounding water is contaminated by dispersion of freshwater flowing into coastal waters. The prediction and analysis about the dispersion process of the discharged fresh water should be conducted. A modeling system using GUI was developed to simulate hydrodynamic flow and fresh water dispersion in coastal waters and to analyze the results efficiently. The modeling module of the system includes a tide model using a finite element method and a fresh water dispersion model using a particle-tracking method. This system was applied to predict the tidal currents and fresh water dispersion in Mokpo coastal zone. To verify accuracy of the hydrodynamic model, the simulation results were compared with observed sea level and time variations of tidal currents showing a good agreement. The fresh water dispersion was verified with observed salinity distribution. The dispersion model also was verified with analytic solutions with advection-diffusion problems in 1-dimensional and 2-dimensional simple domain. The system is operated on GUI environment, to ease the model handling such as inputting data and displaying results. Therefore, anyone can use the system conveniently and observe easily and accurately the simulation results by using graphic functions included in the system. This system can be used widely to decrease the environmental disaster induced by inflow of fresh water into coastal waters.

**Keywords:** Freshwater Dispersion(담수 확산), Particle Tracking(입자추적), GUI(사용자편의), Pollutant Transport(오염물질 확산)

<sup>†</sup>Corresponding author: jungts@hnu.kr

## 1. 서 론

연안해역에서 적조발생, 빈산소 수괴의 형성 그리고 부영양화와 같은 수질 및 생태계 오염현상은 대개 수온의 상승 또는 담수의 대량유입에 의해 많이 발생한다. 염분의 분포가 32~32.5 psu인 저염분 해수에서 발생빈도가 가장 높았으며, 적조 발생 전 집중 호우가 관측된 후 염분농도가 급격히 감소한 경우에 발생하였다(김 [1999]). 담수에 섞여 있던 오염물질은 담수와 함께 방류되어 연안해역의 해양생태계에 커다란 영향을 미치며, 대부분의 담수는 여름철 홍수시 하구 독 수문을 통해서 연안해역으로 방류되고 있다. 그럼에도 불구하고 방류된 담수가 해수유동에 의해 이송-확산되어 미치는 영향범위의 실시간 예측에 대한 체계적인 연구가 미흡한 실정이다. 이를 해결하기 위해서는 무엇보다도 담수 방류로 인한 해수유동 변화와 담수 확산을 정확히 모의함으로써 담수가 미치는 영향범위를 정확히 예측하고 평가하여, 수질오염 방지대책을 적절히 수립할 수 있도록 하여야 한다.

연안해역에서 담수의 확산은 조류, 밀도류, 취송류, 해류 등에 의하여 발생하는 복잡한 과정이다. 본 연구에서는 신속한 예측을 목적으로 2차원 해수유동 수치모형을 사용하여 유속분포를 모의하고, 이송-확산 수치모형을 사용하여 방류된 담수의 확산과정을 예측하는 사용자편의 모델링시스템을 구축하였다. 이 시스템은 강한 조류에 의해 연직방향으로 잘 혼합된 흐름특성을 보이는 해역에서 담수 확산 모의에 적합하다. 그러나 보다 정확한 모의를 위해서는 밀도층형 효과, 취송류 등에 의한 유속과 밀도의 수심변화를 고려할 수 있는 3차원 모형을 예측시스템에 도입할 필요가 있다. 모델링시스템을 마이크로소프트 윈도우 환경에서 GUI(Graphic User Interface)를 이용해 프로그램을 개발하여 모델링 입력자료의 편리한 입력과 수치모형으로부터 나온 방대한 양의 수치적 결과를 직관적으로 볼 수 있도록 하였다. 해수유동과 담수 확산과정의 시간에 따른 변화 양상을 연속적으로 동적 가시화로 보여준다. 조석에 의한 해수유동의 계산에는 2차원 유한요소모형을 사용하며, 담수 확산 계산에는 방출지점 부근의 급격한 농도변화가 있는 곳에서 이송항 차분화과정에서 나타나는 수치 확산을 최소화하기 위하여 통계학적인 개념을 이용하여 담수 입자의 운동과정을 묘사하는 2차원 Random-walk 모형을 사용하였다. 이와 관련된 연구로 이와 김[1995]은 2차원 입자추적모형을 개발하여 해석해와 비교 검증하였고, 서[1996]는 Lagrangian 방법인 입자추적모형과 Eulerian 방법인 유한요소법을 결합한 Eulerian-Lagrangian 모형을 수립하여 부유사 이송-확산을 모의하고 고농도 모의시는 Lagrangian 방법이, 저농도 모의시는 Eulerian 방법이 효율적임을 언급하였으며, 김 등[2000]은 하수종말처리장으로부터 연안해역으로 확산관을 통해 방류되는 부유물질의 확산을 3차원 입자추적모형을 사용하여 모의하였다. Hathhorn[1997]은 난수발생함수로 비정규분포를 가정한 1차원 확산모형의 효율성을 입증하였으며, Dearnaley *et al.*[1999]은 준설토 확산모의에 대해 Plume모형과 입자추적모형을 비교검토했다. Smith and Scott[1997]는 조석환경하에서

담수 확산현상을 모의하기 위한 방법들을 고찰하고 입자추적방법이 유효한 방법임을 밝히고, 방류위치, 방류시기, 방류속도의 적절한 선택이 환경영향을 저감하는 데 중요함을 언급한 바 있다. 강 [1991]은 국내외에 개발된 염분확산 모형들에 대하여 자세히 고찰하고, 금강하구 해역에서 염분확산을 평면과 연직방향 2차원 수치모형을 수립하여 모의한 바 있다. 담수확산 예측시스템 개발은 목포해역을 대상으로 하였다. 개발된 시스템을 이용하여 목포해역의 2차원 조류를 모의하고, 조류 관측결과와 비교검증을 실시하였으며, 여름철 담수 확산과정을 모의하고 염분분포 관측자료와 비교하였다. 본 연구에서 새로이 수립된 입자추적 이송-확산모형의 검증에 의해 해석해가 존재하는 1차원 및 2차원 이송-확산 모의에 적용하고, 계산 정확도가 높은 유한차분법을 동시에 적용하여 결과를 상호비교하였다. 본 연구에서 개발된 모델링시스템은 사용자가 편리하고 쉽게 이용할 수 있도록 되어 있어 모의날짜와 방류량을 Window상에서 입력하면, 조위 및 조류 분포와 염분분포를 예측하도록 되어 있다. 또한 그 결과를 동영상도 포함한 그래픽과 수치로 함께 볼 수 있어 누구나 신속하게 예측하고, 그 결과를 쉽고 정확하게 분석할 수 있다.

## 2. 이송-확산 수치모형

담수의 이송-확산을 모의하기 위해 다음과 같은 2차원 Random-walk 모형을 사용하였다. Random-walk 모형은 담수 방류구 부근과 같이 농도변화가 급격한 곳에서도 수치분산 없이 정확하게 확산과정을 모의한다(Dearnaley *et al.*[1999]). 수심방향으로 적분된 2차원 이송-확산방정식은 다음과 같다(Fischer *et al.*[1979]).

$$\frac{\partial(HS)}{\partial t} + \frac{\partial(HuS)}{\partial x} + \frac{\partial(HvS)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( HD_{xx} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( HD_{xy} \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( HD_{xy} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( HD_{yy} \frac{\partial S}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서,  $S$ 는 물질의 농도,  $H$ 는 총수심,  $t$ 는 시간,  $u$ 는  $x$ 방향 유속,  $v$ 는  $y$ 방향 유속,  $D_{xx}$ ,  $D_{yy}$ ,  $D_{xy}$ 는 물질의 확산계수이다.

식 (1)을 아래와 같이 변환한 후에 입자추적방법을 이용하여 해석하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(HS) + \frac{\partial}{\partial x}(u_1 HS) + \frac{\partial}{\partial y}(v_1 HS) = \frac{\partial^2}{\partial x^2}(D_{xx} HS) + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}(D_{xy} HS) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(D_{yy} HS) \quad (2)$$

$$u_1 = u + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + \frac{D_{xx} \partial H}{H \partial x} + \frac{D_{xy} \partial H}{H \partial y} \quad (3)$$

$$v_1 = v + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial x} + \frac{D_{yy} \partial H}{H \partial y} + \frac{D_{xy} \partial H}{H \partial x} \quad (4)$$

$\vec{X} = \vec{X}(t)$  에 있는 담수입자는 확정론적인 부분인 이송과정과 불규칙하게 움직이는 확산과정에 따라 이송-확산하므로  $\Delta t$ 시간 후 입

자위치  $\vec{X}(t+\Delta t)$  는 다음과 같다(Dimou and Adams[1993]).

$$\vec{X}(t+\Delta t) = \vec{X}(t) + \vec{v}(t)\Delta t + \vec{d} \quad (5)$$

여기서,  $\vec{v}(t)$  는 임의시간  $t$  에서 속도벡터이다.

$\vec{d}$  는 분산에 의한 이동거리로 방향  $i$  성분  $d_i$  는 다음과 같다.

$$d_i = \sqrt{2D_i/\Delta t} \cdot \text{RAN} \cdot \Delta t \quad (6)$$

여기서,  $D_i$  는  $i$  방향 확산계수, RAN은 평균치 0, 분산 1인 정규분포를 만족하는 -1과 1사이에서 변하는 난수이다.

종방향 및 횡방향 분산에 의한 이동거리  $d_L$  과  $d_T$  는 다음과 같다.

$$d_L = \sqrt{2D_L/\Delta t} \cdot \text{RAN} \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$d_T = \sqrt{2D_T/\Delta t} \cdot \text{RAN} \cdot \Delta t \quad (8)$$

여기서,  $D_L$  은 종방향 확산계수,  $D_T$  은 횡방향 확산계수이다.

$x$ ,  $y$  방향의 분산에 의한 이동거리  $d_x$ ,  $d_y$  는 다음과 같다.

$$d_x = d_L \cos\theta - d_T \sin\theta \quad (9)$$

$$d_y = d_L \sin\theta - d_T \cos\theta \quad (10)$$

여기서,  $\theta = \tan^{-1} \frac{d_y}{d_x}$  이다.

이송속도를 구하기 위해서는 현재 위치에서 유속, 수심이 필요하다. 이는 정과 김[1992]의 2차원 유한요소 해수유동모형을 사용하여 계산하며, 해수유동모형에서 계산된 결과인 유속과 수심은 삼각형 유한요소의 꼭지점에서 존재하므로 이를 다음과 같이 꼭지점에서 값이 미치는 영향이 현재위치로부터 거리에 반비례하도록 하는 Inverse 법(Keckler[1994])을 사용하여 입자의 현재 위치에서 값  $Z$  를 다음과 같이 계산하였다.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{Z_i}{r_i^\beta}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{r_i^\beta}} \quad (11)$$

$$r_i = \sqrt{L_i^2 + \delta^2} \quad (12)$$

여기서,  $Z$  는 삼각형격자의 절점  $i$  에서 값,  $r_i$  는 현재 위치와 유한요소 삼각형 절점사이의 유효거리,  $L_i$  는 현재 위치와 유한요소 삼각형 절점사이의 거리,  $\beta$  는 기중치,  $\delta$  는 평활치(smoothing parameter) 이다. 물질 농도는 식 (5)를 사용하여 방류된 입자를 추적한 후에 격자내에 위치한 입자의 수를 구하고 단위수심당 입자의 총질량을 격자크기로 나누는 방법으로 계산하였다.

### 3. 이송-확산 모형의 검증

입자추적 이송-확산 모형의 정확성을 평가하기 위하여 1차원

문제와 이송-확산 문제, 2차원 이송-확산문제에 대해 적용하고, 높은 정확도의 유한차분법에 의한 해 및 해석해와 비교하였다.

#### 3.1 1차원 이송-확산

입자추적 모형의 정확성을 평가하기 위하여 가상영역에 대해 1차원 및 2차원 이송-확산을 모의하고, 이송-확산 해석에 널리 사용되는 유한차분방법 및 해석해와 비교하였다. 연직방향으로 일정한 농도를 갖는 선오염원이 순간적으로 유입된 경우에 대한 1차원 이송-확산방정식의 해석해는 다음과 같다(Fischer *et al.*[1979]).

$$C(x,y,t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left[-\frac{(x_0-ut)^2}{4Dt}\right] \quad (13)$$

여기서,  $M$  은 단위수심당 방류량,  $D$  는 확산계수,  $x_0$  는  $x$  방향 초기위치이다.

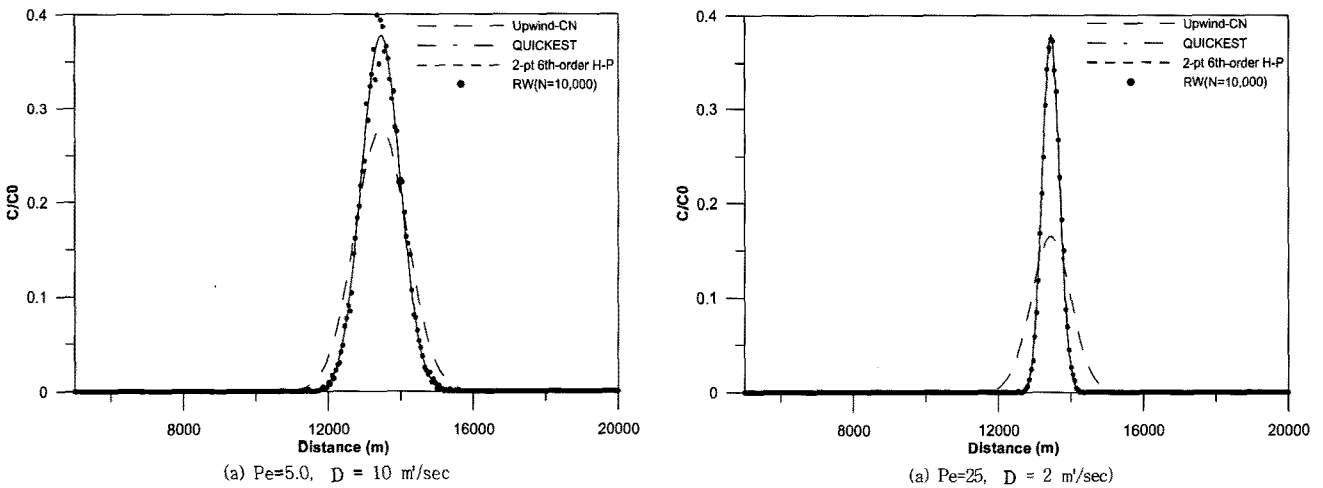
Random-Walk모형을 사용한 1차원 이송-확산방정식 모의결과의 정확도를 검토하기 위하여 다양한 유한차분방법을 사용하여 동시에 모의하고, 그 결과를 해석해와 비교하였다. 비교에 사용된 방법은 upwind 기법으로 이송항을 풀고, Crank-Nicolson 기법으로 확산항을 계산하는 upwind-CN method([Fletcher, 1988]), 3차의 정도를 가지는 QUICKEST method(Leonard[1979]), sixth-order Holly-Preissmann 기법으로 이송항을 풀고, 확산항의 계산에는 Crank-Nicolson 기법을 이용하는 모형(전과 이[1994]) 그리고 방출입자수로 10,000개를 사용한 Random-walk 모형이다. 1차원 모의의 경우에 모든 계산은 초기농도 분포의 최대값을 1로하여 계산값과 초기값의 해석결과를 비교하였다. 오염물질의 초기 유입조건은 순간 방출을 가정하였으며, 경계조건은 무한한 공간으로 확산할 수 있다고 가정하였다. 확산계수  $D$  는  $2 \text{ m}^2/\text{sec}$  와  $10 \text{ m}^2/\text{sec}$ , 흐름 유속는  $1 \text{ m}/\text{sec}$ ,  $\Delta t$  는 10, 30, 50, 70 sec에 대 검토하여 Cr 수 ( $= \frac{u\Delta t}{\Delta x}$ )의 변화에 따른 모형의 정확도 변화를 검토하였다. 모의결과의 정확도 분석을 위하여 Noye[1987]가 제안한 확산방정식에 대한 수치기법의 정확도 평가를 위한 무차원척도 5가지를 사용하였다.

$$\begin{aligned} E_1 &= |C_{cal} - C_{exact}|_{\max} / (C_{exact})_{\max} \\ E_2 &= \sum_{i=1}^{I_{\max}} |(C_{cal})_i - (C_{exact})_i| / \sum_{i=1}^{I_{\max}} (C_{exact})_i \\ E_3 &= [(C_{cal})_{\max} - (C_{exact})_{\max}] / (C_{exact})_{\max} \\ E_4 &= (C_{cal})_{\min} / (C_{exact})_{\max} \\ E_5 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{I_{\max}} [(C_{cal})_i - (C_{exact})_i] / \sum_{i=1}^{I_{\max}} (C_{exact})_i \end{aligned} \quad (14)$$

여기서,  $C_{cal}$  는 수치모형에 의한 계산값,  $C_{exact}$  는 해석해이다. 위의 무차원척도들은 각각  $E_1$  과  $E_2$  는 모형의 전반적인 정확성,  $E_3$  는 수치분산,  $E_4$  와  $E_5$  는 수치진동을 나타내며,  $E_4$  와  $E_5$  는 수치진동이 있을 경우 음의 값을 가진다. 본 연구에서 사용한 각각의 모형들의 정확도 분석결과의 일부가 Table 1에 정리되어 있다. Pe 수는  $u\Delta x/D$  로 표현되는 무차원 수로서 Pe수가 클수록 이송이 지배적인 흐름이다. Fig. 1은 해석결과의 일부를 도시한 것이다. 그림에서

**Table 1.** Error analysis of 1-dimensional advection-diffusion models

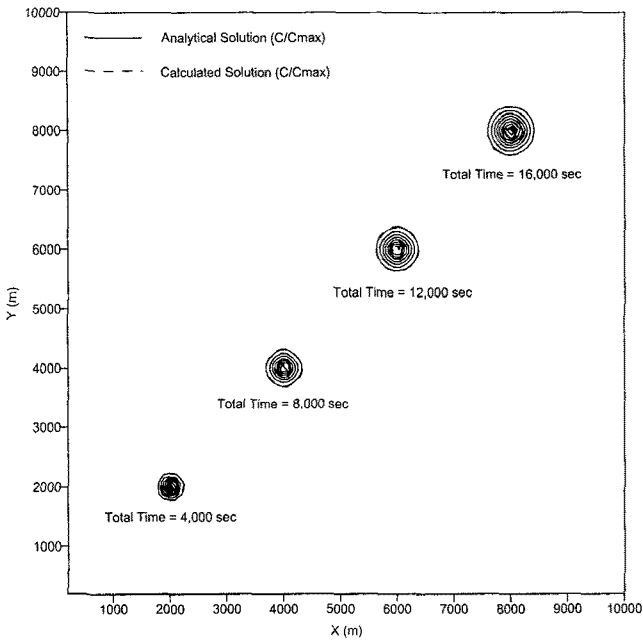
| Model                      | Cr  | Pe | $E_1$     | $E_2$      | $E_3$      | $E_4$      | $E_5$      |
|----------------------------|-----|----|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Upwind-CN                  | 0.2 | 5  | 0.3452420 | 0.4043252  | -0.3452420 | 0          | 0          |
|                            |     | 25 | 0.6390523 | 0.9104409  | -0.6390522 | 0          | 0          |
|                            | 1.0 | 5  | 0.0006092 | 0.0005988  | 0.0006092  | 0          | 0          |
|                            |     | 25 | 0.0033096 | 0.0030450  | 0.0033096  | 0          | 0          |
|                            | 1.4 | 5  | 0.1546722 | 0.1623014  | -0.1546722 | 0          | 0          |
|                            |     | 25 | 0.4226624 | 0.5182850  | -0.4226624 | 0          | 0          |
| QUICKEST                   | 0.2 | 5  | 0.0043645 | 0.0041485  | -0.0043645 | 0          | 0          |
|                            |     | 25 | 0.0989265 | 0.1131478  | -0.0989265 | -0.0121684 | -0.0094046 |
|                            | 1.0 | 5  | 0.0001287 | 0.0001203  | -0.0001287 | 0          | 0          |
|                            |     | 25 | 0.0024897 | 0.0023141  | 0.0024897  | 0          | 0          |
|                            | 1.4 | 5  | 0.0012555 | 0.0011772  | -0.0012555 | 0          | 0          |
|                            |     | 25 | 0.0116039 | 0.0105340  | 0.0112241  | 0          | 0          |
| 6th-order Holly-Preissmann | 0.2 | 5  | 0.0022770 | 0.0019750  | 0.0022770  | 0          | 0          |
|                            |     | 25 | 0.0108988 | 0.0096133  | 0.0108988  | 0          | 0          |
|                            | 1.0 | 5  | 0.0006092 | 0.0005988  | 0.0006092  | 0          | 0          |
|                            |     | 25 | 0.0033096 | 0.0030450  | 0.0033096  | 0          | 0          |
|                            | 1.4 | 5  | 0.0005210 | 0.0004731  | 0.0005210  | 0          | 0          |
|                            |     | 25 | 0.0025735 | 0.0023608  | 0.025735   | 0          | 0          |
| Random-Walk (N=10,000)     | 0.2 | 5  | 0.0733604 | 0.0507751  | 0.0454591  | 0.0017366  | 0          |
|                            |     | 25 | 0.0379189 | 0.0335854  | -0.0183140 | 0.0007767  | 0          |
|                            | 1.0 | 5  | 0.1296194 | 0.06866700 | 0.0445947  | 0.0038833  | 0          |
|                            |     | 25 | 0.0733604 | 0.0505751  | 0.0454591  | 0.0017366  | 0          |
|                            | 1.4 | 5  | 0.1070824 | 0.0726304  | 0.0567869  | 0.0045947  | 0          |
|                            |     | 25 | 0.0719633 | 0.0517021  | 0.0356311  | 0.0020548  | 0          |



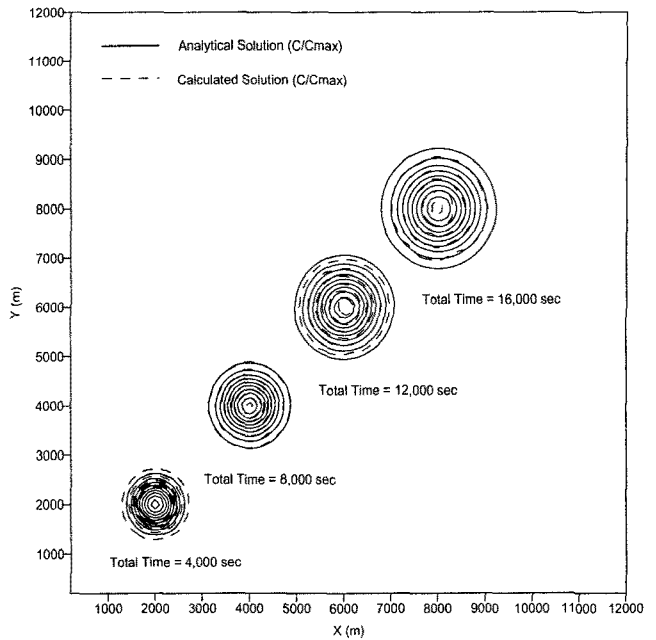
**Fig. 1.** Examples of 1-D simulation results ( $\Delta t=30$ ).

QUICKEST scheme과 six-order Holly-Pressmann 기법에 의한 결과는 중첩되어 있다. upwind-CN scheme의 경우 수치해가 무조건 안정하지만 수치확산으로 인해 정확도에 비해 현저하게 과소평가 되는 것을 볼 수 있다. Leonard[1979]가 구성한 3차의 정도를 가지는 QUICKEST scheme의 경우는  $E_4 \sim E_5$ 에서 보듯이 약간의 수치 진동이 발생하는 반면, six-order Holly-Pressmann 기법은 매우 정확한 결과를 보였고, 특히 이송이 지배적인 흐름에서도 우수한 결과를 보였다. Random-walk 모형 역시 수치진동과 수치분산이 발

생하지 않고, Cr수에 관계없이 해석해에 전반적으로 일치하는 좋은 결과를 보였다. Random-walk를 제외한 모형들은 Pe 수가 증가 즉 확산에 비해 유속이 큰 경우에 정확도가 떨어지는 모습을 보였으나 Random-walk 모형은 반대로 정확도가 증가하였다(Table 1). 이는 비교에 사용된 Eulerian 형태의 모형들은 높은 정밀도를 갖는 기법을 사용해도 이송항이 지배적인 경우에 이송항 처리를 완벽하게 할 수 없다는 것을 의미하며, 반대로 Lagrangian 방법인 Random-walk 모형은 확산항 모의에서는 사용한 입자수가 적은 경우에 오



(a) Advection-dominated flow



(b) Diffusion-dominated flow

Fig. 2. Simulation results of 2-D advection-diffusion by a random-walk model.

차를 발생할 수 있으나 Eulerian 방법의 문제점인 이송항 처리에서 문제점이 나타나지 않았다. 따라서 충분한 모의입자수를 사용하는 경우에 Random-walk 모형은 서해안과 같이 유속이 큰 연안해역에서 담수의 이송-확산을 정확하게 모의할 수 있을 것이다. 그러나 입자수를 늘리면, 많은 계산시간을 필요로 한다.

### 3.2 2차원 이송-확산

1차원 이송-확산 모의결과에서 비교적 양호한 결과를 보인 5차의 보간 다항식을 사용하는 six-order Holly Preissmann기법과 Random-walk모형을 사용하여 단순영역에서 2차원 이송-확산을 모의하고 그 결과를 비교하였다. 비교에 사용된 2차원 이송-확산 방정식의 해석해는 다음과 같다(Fischer *et al.*[1979]).

$$C(x,y,t) = \frac{M}{4\pi Dt} \exp\left[-\frac{(x_0-ut)^2 + (y_0-vt)^2}{4Dt}\right] \quad (15)$$

여기서,  $y_0$ 는  $y$ 방향 초기위치이다.

수치실험에서  $x$ 방향과  $y$ 방향 유속은 모두 동일하게 0.5 m/sec로 고정하였으며, 확산계수  $D$ 가 1.0 m<sup>2</sup>/sec와 10 m<sup>2</sup>/sec로 각각 이송이 지배적인 흐름과 확산이 지배적인 흐름에 대해 모의하였다. 계산시간간격은 50 sec, 격자간격은 200 m이다. Random-walk 모형은 입자수를 20,000개인 경우에 대해 검토하였다.

Fig. 2는 주어진 조건인 유속이 일정한 경우에 총 계산시간 16,000 sec까지 4,000 sec 간격으로 이송-확산되는 과정을 보여 준다. (a)는 이송이 지배적인 경우로서 방출된 물질이 시간에 따라 거의 확산하지 못하고 유속에 의해 이동하며, (b)는 확산이 지배적인 흐름으로 시간이 경과함에 따라 빠르게 확산하면서 이동하는 모습을 보여주고 있다. 이송이 지배적인 경우에 대해 자세히

살펴보면, Fig. 3의 (a)에서와 같이 six-order Holly Preissmann기법은 큰 격자간격으로 충분히 농도변화를 고려하지 못하여 일부 지점에서 수치진동과 농도가 낮게 계산되는 모습을 보였으며, Random-walk 모형을 이용한 결과(Fig. 3의 (b))는 해석해와 일치하는 양호하고 안정된 결과를 보였다. 그림에서 실선은 해석해로 정확히 원을 나타내야 하나 모의결과와 동일한 격자간격의 해를 사용하여 도시하다보니 약간 일그러졌다. 이와 반대로 확산이 지배적인 경우, six-order Holly Preissmann기법에 의한 결과(Fig. 4의 (a))는 해석해와 거의 일치하였으며, Random-Walk 방법의 결과(Fig. 4의 (b))는 six-order Holly Preissmann기법에 의한 결과에 비하여 고농도 영역에서 부정확한 모습을 보였다. 이 문제는 방출 입자 수를 증가시키면 해결되었으나 많은 계산시간이 소요되었다.

## 4. 해수유동 및 담수확산 예측 GUI시스템의 구축

위와 같은 검증과정을 통해 수립된 2차원 Random-walk 이송-확산 모형과 유한요소법을 수치해석 기법으로 사용하는 2차원 해수유동모형(정과 김[1992])을 이용하여 해수유동과 담수 확산을 모의하고, 그 결과를 그래픽으로 보여주는 담수확산 예측시스템인 FREDMOS(FREeshwater Dispersion MOdeling System) 프로그램이 구축되었다. 구축된 프로그램은 예측시스템 구동 및 제어를 위해 필요한 자료의 입력, 해수유동 및 입자추적 담수 확산모형의 실행, 모의결과의 가시화 부분으로 구성되어 있다. 본 프로그램의 개발도구로는 프로그램 언어인 Visual C++ 6.0(이[1998])과 그래픽 라이브러리인 OpenGL(Fosner[1997])을 사용하였다.

본 사용자편의 모델링시스템의 구성은 다음과 같다. 그 첫 번째는 예측시스템에서 필요로 하는 입력자료를 읽어 들이는 부분이

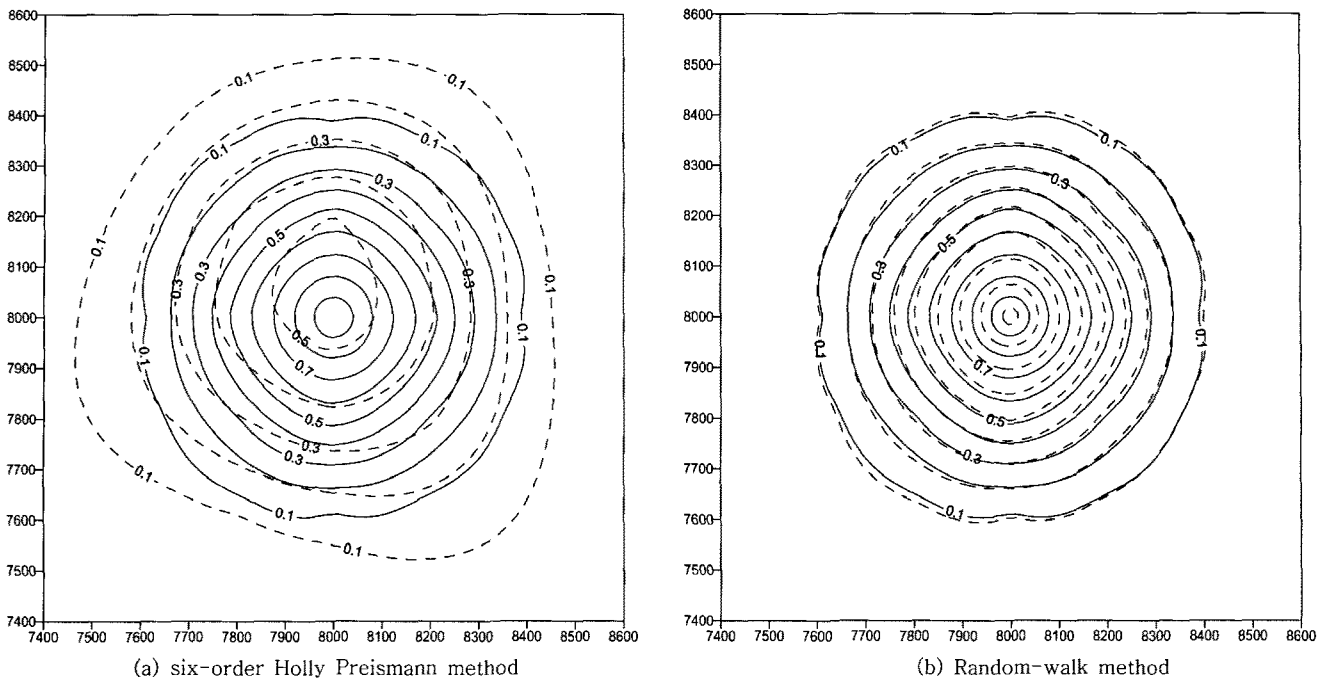


Fig. 3. Simulation results of advection-dominated flow.

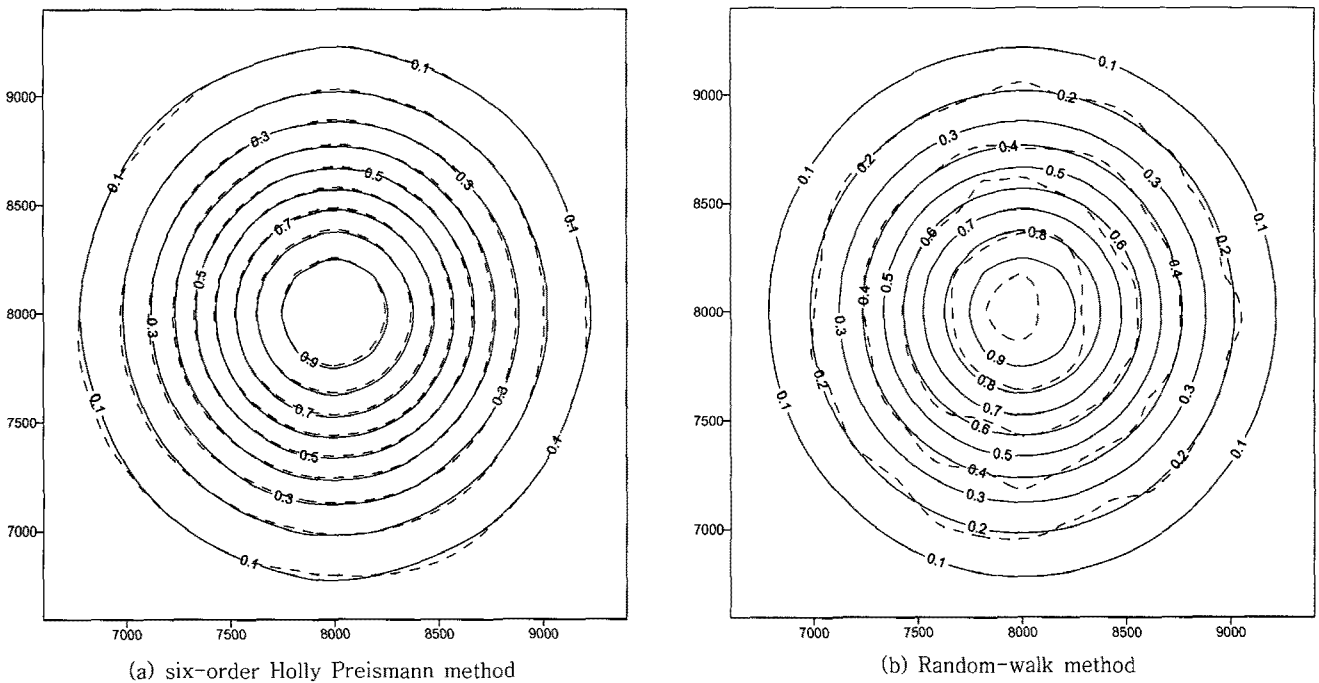


Fig. 4. Simulation results of diffusion-dominated flow.

며, 두 번째는 읽어 들인 자료를 이용하여 모델링을 수행하는 부분이고, 세 번째는 모의결과를 화면에 그래픽으로 직접 묘사하는 부분이다. 프로그램은 먼저 지형자료와 배경구성을 위한 지도의 비트맵 이미지를 입력받아 주 메뉴의 바탕화면을 구성하며, 모의에 필요한 자료인 유한요소 삼각형 격자망 자료, 육지경계면 위치 자료, 해수유동 모의를 위한 개방경계에서 주요 분조의 조화상수 등을 읽어 메모리에 저장한다. 다음으로 모의에 필요한 방류량을

입력한다. 방류량을 읽고 모의하고자 하는 날짜를 달력으로부터 선택하면 해수유동 모의가 시작되고, 해수유동 모의가 종료된 후에는 담수확산 모의가 시작된다. 모의 시작시간에서 과거 모의결과가 있는 경우에는 바로 계산을 시작하며, 없는 경우는 1일간의 예비모의를 거친 후 원하는 계산기간의 해수유동 모의결과가 저장된다. 모의가 종료된 후에는 계산된 조류분포, 조위분포, 방류된 담수 입자의 분포, 염분분포의 20분 간격 시간변화를 그래픽으로

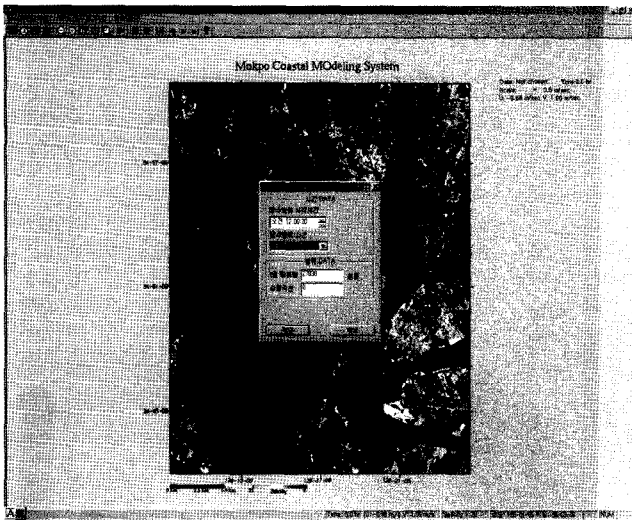


Fig. 5. Main screen of FREDMOS.

관찰할 수 있다. 또한 필요시 특정지역에 대해 줌기능을 이용하면, 공간적으로 자세하게 모의결과를 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 예측시스템의 구동시 초기에 나타나는 주화면으로 좌측 상단에 있는 담수확산 모의설정 아이콘을 마우스로 클릭하였을 때 나타나는 화면이다. 화면에서 1일 총 방류량을 입력하고, 시계모양의 아이콘을 클릭하여 모의를 원하는 날짜를 선택하면, 그 날의 조위 및 조류가 계산되고, 조위 및 조류계산이 종료되면, 계산된 조위 및 조류분포와 담수 방류량 자료를 이용하여 입자추적법을 이용한 담수확산이 모의된다. 모의가 종료되면 조류분포의 시간변화와 함께 시간별 담수 입자분포 및 염분분포를 그림으로 볼 수 있도록 계산결과가 메모리에 자동으로 로딩된다. 마우스를 화면 위에서 이동하면, 마우스가 위치한 지점의 위·경도, 수심, 방향별 조류크기 그리고 염분이 그림의 우측 하단에 표시된다. 모의 결과는 확대/축소 기능을 이용해서 특정지역만을 선택적으로 관찰할 수 있으며, 모의기간 중의 조류와 염분의 시간변화를 동영상으로도 관찰할 수 있다(Fig. 6~8). Fig. 6~8은 특정영역을 자세히 관찰하기 위해서 줌기능을 사용하여 특정영역을 전체화면으로 확대한 모습이다, 모델링 과정을 단계별로 나타내면 다음과 같다.

- (1) 1일 총 담수 방류량을 입력한다.
- (2) 조위 및 조류 분포를 해수유동모형을 이용하여 예보한다.
- (3) 입자추적모형을 사용하여 방류된 입자의 현재위치를 계산한다.
- (4) 각 유한요소내 방류 입자수를 구하고, 유한요소의 평균농도로 환산한다.
- (5) 모의 결과물을 PC 화면에 그래픽으로 도시한다.

### 5. 담수확산 예측시스템의 검증

구축된 예측시스템의 정확도를 평가하기 위하여 현장조사결과와 비교하였다. 목포 인근해역에 대해 유한요소 격자망을 구성하였으며, 수심자료 및 지형자료는 수치해도 No. 321, 343을 사용

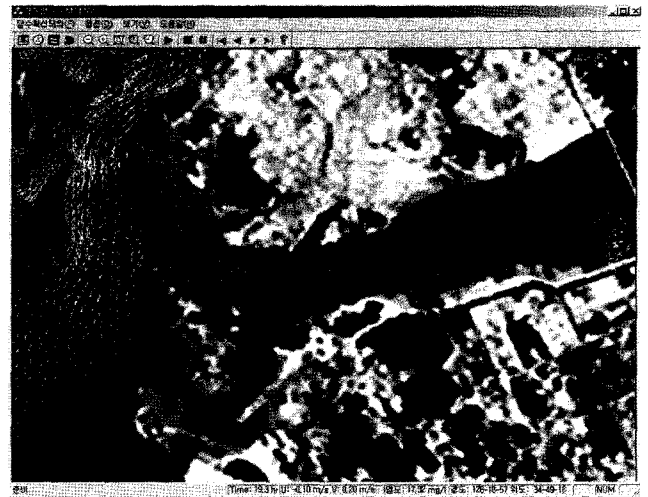


Fig. 6. Display of hydrodynamic model results.

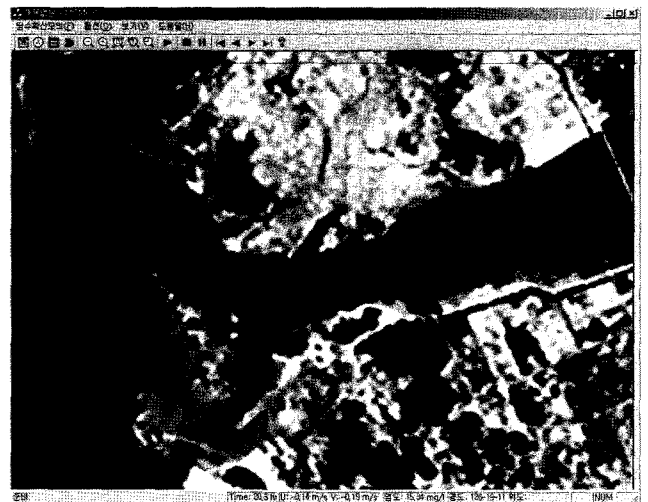


Fig. 7. Display of simulated particle dispersion.

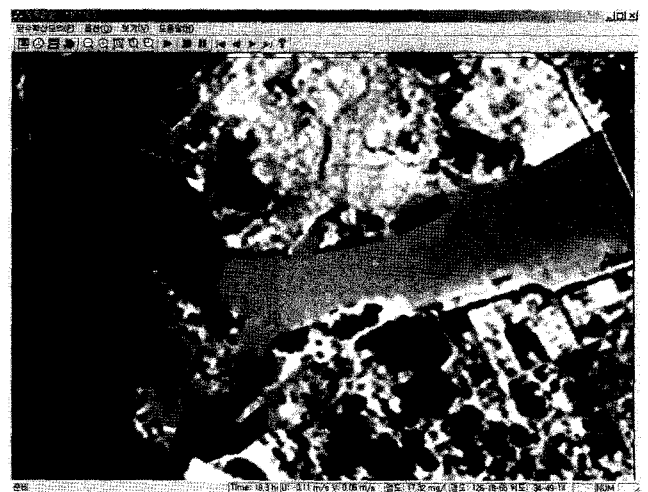


Fig. 8. Display of simulated salinity distribution.

하였다. 유한요소 격자의 크기 80~950 m로 총격자수는 4,341개, 중요소수는 7,736개로 구성하였다(Fig. 9). 수치지도와 수심측량 성과로부터 작성된 모델영역의 수심분포는 Fig. 10과 같다. 모의 시 개방경계조건으로 주요 4개 조석 M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub> 분조의 합성 조석을 사용하였다.

해수유동 모형의 검증에 위해 조위자료는 수로국[2001]의 2000년도 목포항 관측결과와 2003년의 현장관측결과(대림산업[2003])를 참고하였고, 조류자료는 1994년과 2002년 수로국 조류 관측결과(수로국[1994]; 수로국[2004])와 2003년 조류 관측결과(대림산업[2003])를 참고하였다. 해수유동 모형의 모의결과인 조위와 조류는 관측자료와 일치하는 양호한 계산결과를 보였다. 조류모의결과와의 검증에 사용된 수로국 조류 관측자료의 관측위치도는 Fig. 11과 같다.

수치모형의 신뢰성을 입증하기 위하여 목포항 조위변화에 대해 검증한 결과는 Fig. 12와 같이 진폭과 위상이 관측치와 일치하는 양호한 결과를 보였다. Fig. 11에 표기된 정점에서 평균대조기 창조류와 낙조류의 크기를 비교하였다. Fig. 13과 14에서 보이는 바와 같이 목포해역의 특이한 조류특성인 낙조류 우세현상을 잘 재현하였으며, 계산치가 관측치와 전반적으로 잘 일치하였다. 자세한 검증결과는 정 등[2006]에 기술되어 있다.

유속이 강한 대조기 조류패턴을 보면, 창조시(Fig. 15)는 화원반도 서측수로 통해서 최대 약 3 m/sec의 유속으로 만내로 유입되며, 달리도 남쪽수로, 놀도와 달리도 사이에 있는 수로, 놀도

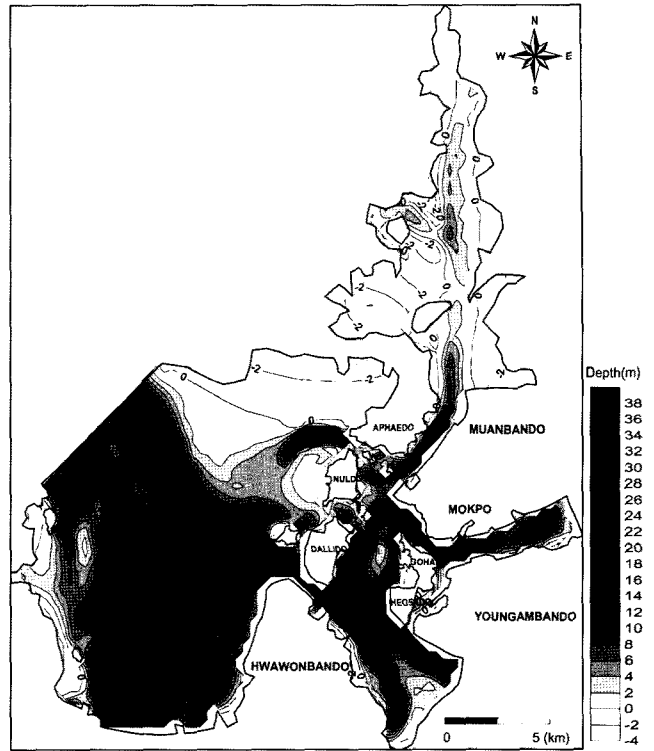


Fig. 10. Bathymetry of study area.

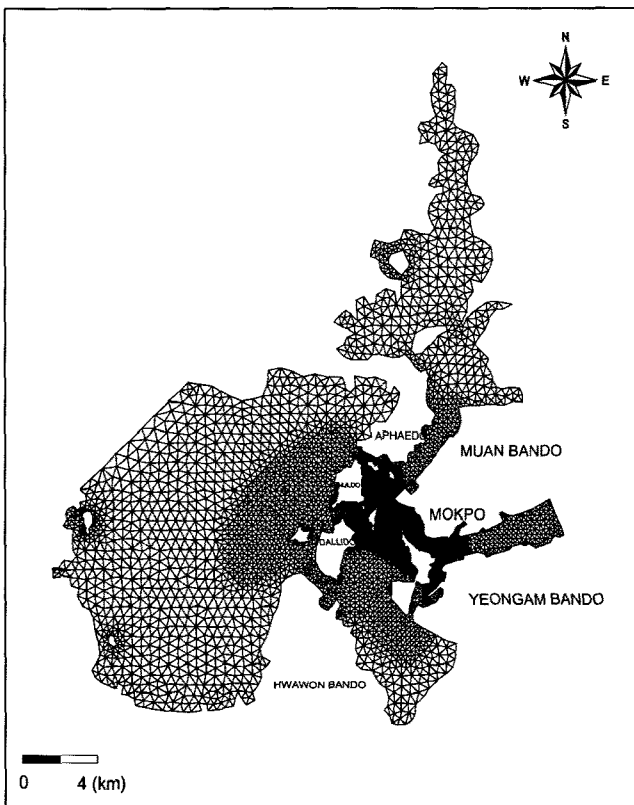


Fig. 9. Finite element grid system.

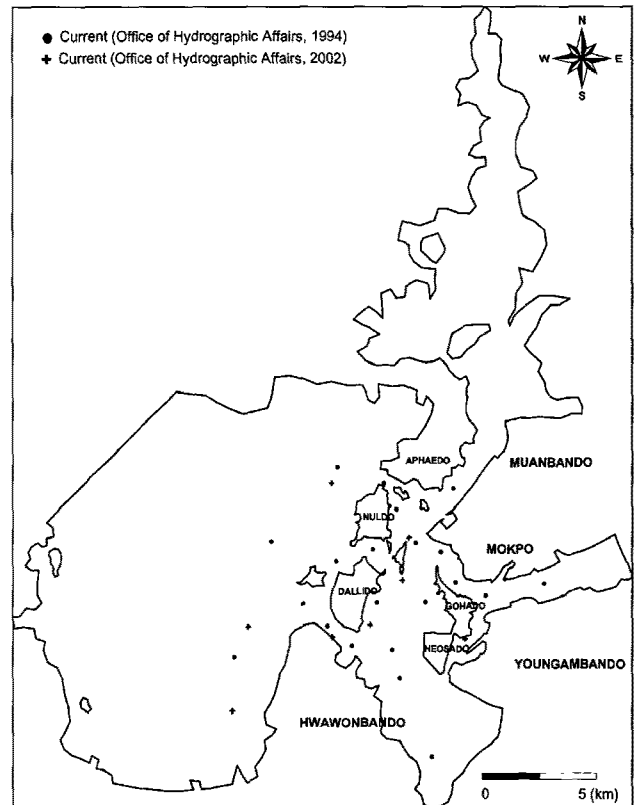


Fig. 11. Observation points of Office of Hydrographic Affairs.

와 압해도 사이에 있는 수로를 통해서도 1 m/sec이상의 강한 유속으로 내만에 유입된다. 남쪽에 있는 수로를 통해 유입된 해수의 대부분은 북쪽으로 이동하다가 서쪽에 있는 수로를 통해 들어온



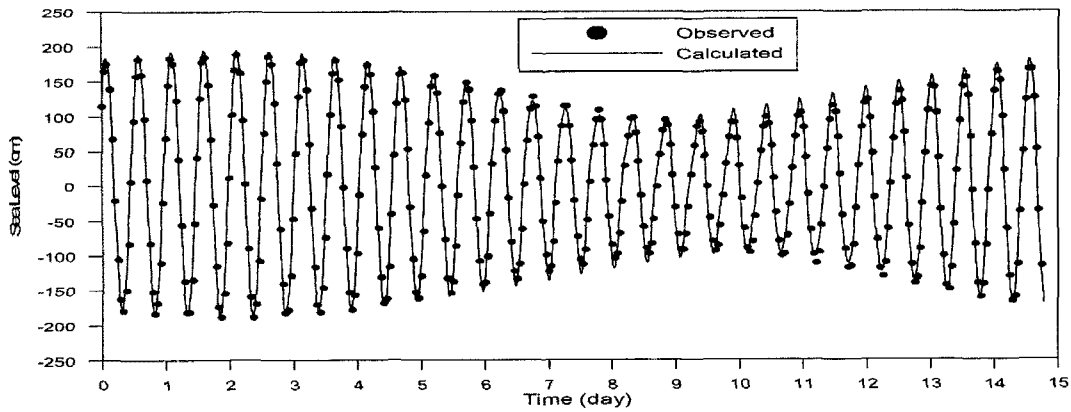


Fig. 12. Sea level change at Mokpo harbor.

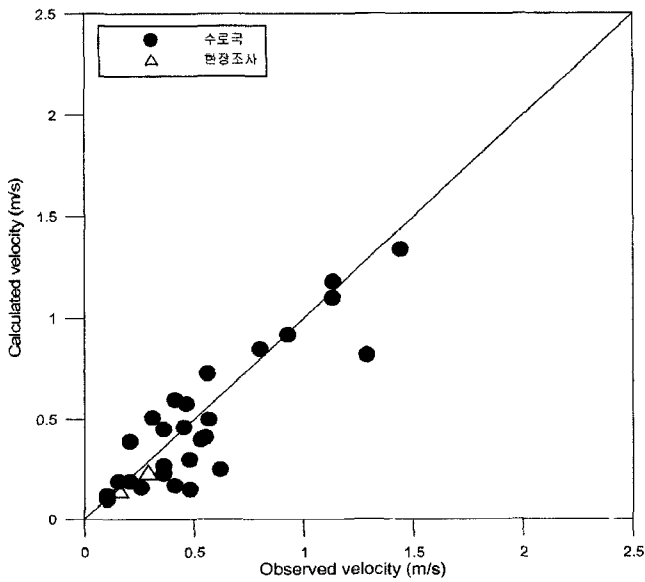


Fig. 13. Flood currents in spring tide.

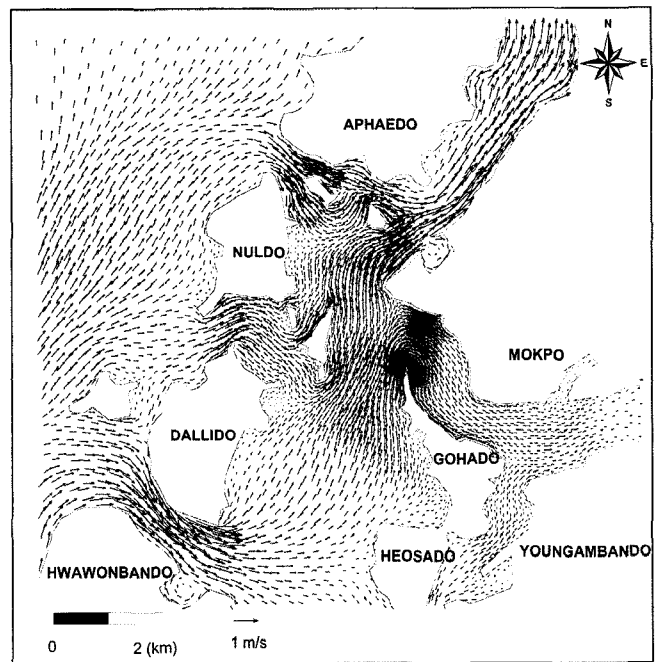


Fig. 15. Distribution of maximum flood currents in spring tide.

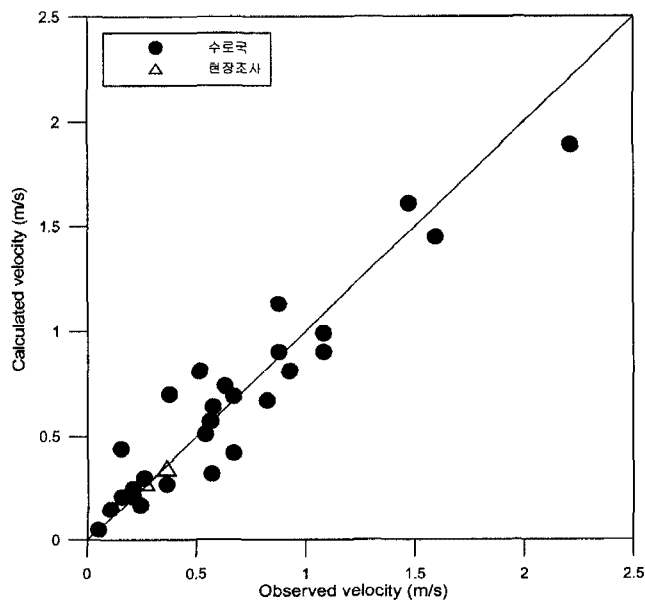


Fig. 14. Ebb currents in spring tide.

해수와 합류하여 대부분은 북쪽으로 이동하고, 일부는 영산강 하구둑을 통해 담수가 유입되는 목포시 방향으로 이동한다. 낙조시는 창조시와 방향만 반대되는 흐름특성을 보였다(Fig. 16).

위와 같이 검증된 해수유동모의결과와 2002년 8월과 9월의 방류량 자료를 사용해서, 2002년 9월 3일에 상황에 대해 염분분포를 담수확산 모의 시스템을 사용하여 모의하고, 염분분포 관측치(김과 유[2003])와 비교하였다. 모의시 8월의 담수유입량은 영산강 하구둑 평균방류량을 사용하였으며, 9월 3일의 방류량은 322 ton/sec 이다. 초기 염분농도로 전영역에 대해 외해 경계에서 관측농도의 최고치인 22‰을 부여하였다. 개방경계에서 유출시 염분농도는 내부농도의 외삽에 의해 결정하였으며, 유입시는 직전 조석주기에서 염분농도의 평균치를 사용하였다. 목포해역으로 유입되는 담수의 총량은 연간 약 2 억톤이며, 영산강하구둑으로부터 전체유입량의 90%가 유입한다고 알려져 있다(이와 김[1998]). 염분분포를 비교해 보면, 관측자료(Fig. 17)와 계산결과(Fig. 18)의 염

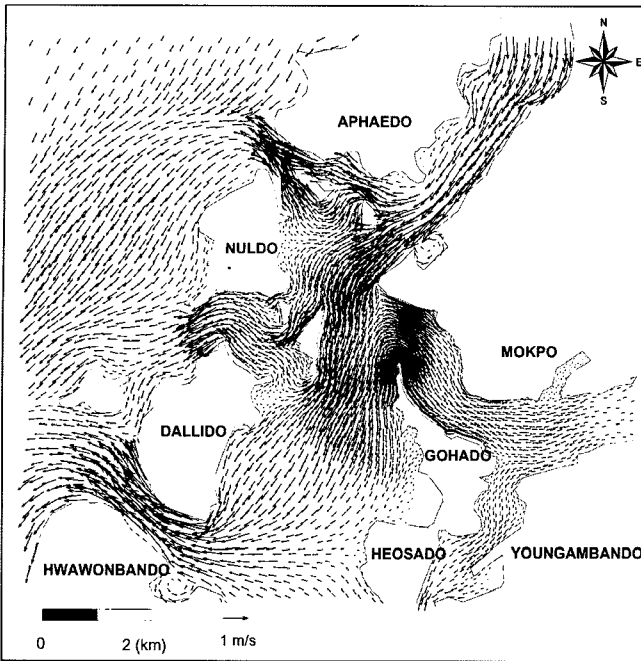


Fig. 16. Distribution of maximum ebb currents in spring tide.

분 10‰과 15‰ 선의 위치가 서로 일치하는 양호한 계산결과를 보였다. 계산결과는 모의 마지막 날인 9월 3일의 모의결과를 평균한 값이다. 따라서 본 모의시스템은 담수유입에 따른 연안해역의 염분분포를 비교적 정확히 모의함을 확인할 수 있었다. 그러나 현재결과는 월평균 유입량자료로 가정하여 모의한 결과보다 정확한 비교를 위해서는 담수유입량과 염분분포의 시계열 자료를 사용한 보다 자세한 연구가 필요하다.

## 6. 결 론

연안해역의 조류와 연안역으로부터 방류되는 담수의 확산을 신속하고 간편하게 예측할 수 있는 GUI 예측시스템을 성공적으로 수립하였다. 수립한 예측시스템을 활용하여 목포해역의 조류를 모

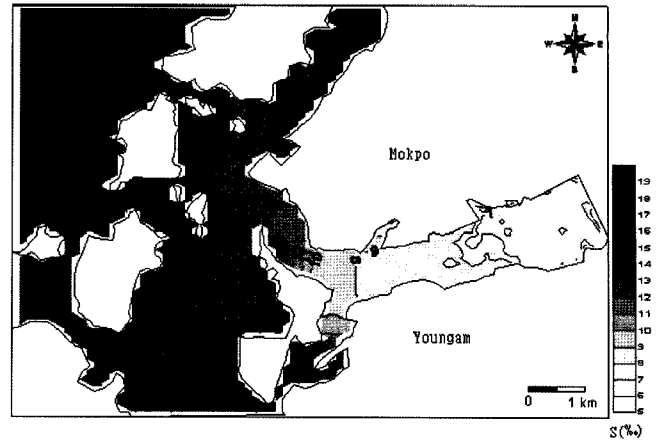


Fig. 18. Calculated salinity distribution.

의한 결과, 비교적 관측치와 일치하는 양호한 계산결과를 보였다. 담수의 확산 모의를 위해 수립된 입자추적모형은 1, 2차원 이송-확산문제의 해석해와 비교한 결과, 계산결과가 해석해와 잘 일치하였다. 그러나 격자간격과 총 입자수의 선정에 주의가 필요함을 확인할 수 있었다. 정확한 목포해역의 염분분포 모의를 위해서는 조석에 의한 해수유동 뿐만 아니라 밀도류, 바람 등의 영향 등도 추가적으로 고려해야 할 것이다. 영산강하구담 방류량을 사용하여 목포해역 담수 확산을 모의한 결과는 관측 염분분포와 확산 폭과 확산 범위가 거의 일치하는 양호한 결과를 보였다. 그러나 보다 정확한 계산결과를 얻기 위해서는 정확한 담수확산범위 관측자료의 확보, 정확한 담수방류량의 시계열 관측, 확산계수 선정 등에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것이다. 본 연구에서 개발한 시스템은 GUI 환경에서 작동되므로 누구나 쉽게 자료의 입력 및 수정이 가능하며, 계산된 모형결과를 그래픽을 이용해 효과적으로 가시화하여 계산결과를 누구나 쉽고 현실감 있게 볼 수 있다. 따라서 본 시스템은 하구 독, 연안에 위치한 하천 등을 통해 연안해역으로 유입되는 담수의 확산 범위를 신속하고 정확하게 예측하고, 그 결과를 관찰하는 데 널리 활용될 수 있으며, 궁극적으로 담수 방류로 인한 환경영향 범위의 정확한 파악과 신속한 오염방지 대

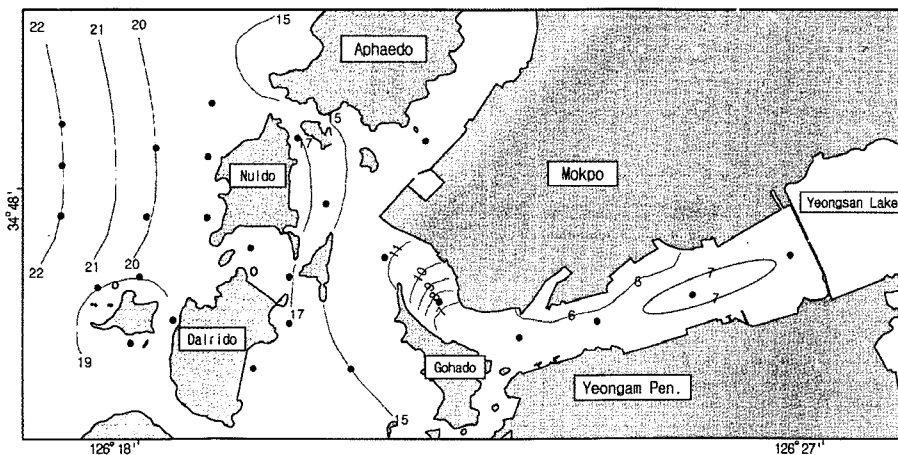


Fig. 17. Observed salinity distribution on September 3, 2002.

책 수립에 기여하여 연안수질을 개선하는 데 크게 기여할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 2007년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 강주환, 1991, 유한차분모형에 의한 하구의 염분확산 분석. 박사학위논문, 서울대학교.
- [2] 김도희, 유한홍, 2003, “집중 강우시 목포 주변해역의 수질 특성”, 한국해양환경공학회지, 6(2), 28-37.
- [3] 김영도, 강시환, 서일원, 오병철, 2000, “3차원 입자추적 모형에 의한 수중방류 하수의 이송확산 예측”, 대한토목학회논문집, 20(6-B), 843-852.
- [4] 김학균, 1999, 나로도 인근해역에서 *Cochlodinium Polykrikoides* 적조의 최초발생과 환경특성, 수진연구보고서, 23-47.
- [5] 대림산업, 2003, 목포시관내 국도대체 우회도로 건설공사 해양조사.
- [6] 이남일, 김광수, 1998, “목포항에 유입하는 오염부하량 산정 (비강우시 육상오염 부하를 중심으로)”, 추계학술대회 논문집, 한국해양환경공학회, 53-60.
- [7] 이상엽, 1998, Visual C++ Prgramming Bible Ver. 6.x, 영진출판사.
- [8] 이종섭, 김호진, 1995, “Random-Walk 모형에 의한 확산해의 민감도 분석”, 대한토목학회논문집, 15(5), 1267-1277.
- [9] 서승원, 1999, “Eulerian-Lagrangian 농도 및 입자 결합모형에 의한 연안의 부유사 확산해석”, 한국해양-해양공학회지, 8(2), 185-192.
- [10] 수로국, 1994, 수로기술연보.
- [11] 수로국, 2001, 수로기술연보.
- [12] 수로국, 2004, 수로기술연보.
- [13] 전경수, 이길성, 1994, “중확산방정식에 대한 Eulerian-Lagrangian 연산자 분리방법”, 대한 토목학회논문집, 14(1), 131-141.
- [14] 정태성, 김태식, 정동국, 2006, “목포해역 점착성 퇴적물의 수송에 관한 수치모의”, 한국해양환경 공학회지, 9(1), 36-44.
- [15] 정태성, 김창식, 1992, “이동경계를 고려한 유한요소 해수유동모형”, 한국해양-해양공학회지, 4(3), 146-155.
- [16] Dearnaley, M. P., Stevenson, J. R. and Spearman, J., 1999, Environmental aspects of aggregate dredging. Report SR 548, HR Wallingford.
- [17] Dimou, K. N. and Adams, E.E., 1993, “A random-walk, particle tracking model for well-mixed estuaries and coastal water”, Estuarine, Coastal Shelf Science, 37, 99-110.
- [18] Fosner, R., 1997, OpenGL Programming for Windows 95 and NT. Addison-Wesley Developers Press.
- [19] Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H., 1979, Mixing in Inland and Coastal Waters, Academic Press, Inc.
- [20] Fletcher, C. A. J., 1988, Computational Techniques for Fluid Dynamics Volume I, Springer-Verlag.
- [21] Hathhorn, W. E., 1997, “Simplified approach to particle tracking methods for contaminant transport”, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, 123(12), 1157-1160.
- [22] Keckler, D., 1994, SURFER for Windows, Golden Sofrware, Inc.
- [23] Leonard, B. P., 1979, “A stable accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation”, Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, 19, 59-98.
- [24] Noye, J., 1987, “Numerical methods for solving the transport equation”, in Numerical Modelling. Applications to Marine Systems, Elsevier.
- [25] Smith R. and Scott, C. F., 1997, “Mixing in the tidal environment”, J. of hydraulic Engineering, 123(4), 332-340.

2007년 11월 5일 원고접수

2008년 2월 13일 수정본 채택