

준설공사시 부유사 확산 예측시스템의 개발 A Prediction System of SS Induced by Dredging

정태성* · 김태식* · 강시환**

Tae Sung Jung*, Tae Sik Kim* and See Whan Kang**

요 旨 : GUI를 이용하여 연안해역에서 항만개발, 방조제 건설, 준설 등의 해상공사시 발생하는 부유사(SS)의 이동 및 확산과정을 편리하게 예측할 수 있는 모의시스템(KUSSMOS)을 개발하였다. 모의시스템은 2차원 유한요소 모형을 사용하여 해수유동을 모의하고, 입자추적모형을 사용하여 부유사 이송-확산을 모의한다. 군산해역 준설공사에 대해 수립된 시스템을 적용한 결과, 유속과 부유사 농도가 비교적 관측치와 일치하는 양호한 계산결과를 보였다.

핵심용어 : 부유사, 조석모형, 입자추적모형, 예측시스템

Abstract □ A SS prediction system using GUI in coastal region has been developed to predict the dispersion of the suspended sediments occurred by dredging. The prediction system uses a finite element hydrodynamic model to calculate water level and velocities and a random-walk particle tracking model to simulate SS dispersion. The system was applied to hindcast the tidal currents and SS concentrations in the Kunsan coastal waters. The simulated tidal currents showed good agreements with the observed currents. The transport model was verified for analytic solutions and field observation showing good agreements.

Keywords : SS, tide model, random-walk model, prediction system

1. 서 론

항만공사, 방파제 및 방조제 건설 등을 위한 준설, 매립 등의 해상공사가 전국 연안해역에서 널리 시행되고 있으며, 공사시 다량의 부유 퇴적물이 발생한다. 이때 발생된 부유사의 확산에 의하여 주변해역의 SS 농도가 증가하며, 이로 인해 연안해역의 수질환경과 생태계는 영향을 받는다. 따라서, 부유사 확산에 의한 영향을 정확히 파악하여 오염방지대책을 적절히 수립할 필요가 있다. 이를 위해서는 공사중 발생하는 부유사 확산을 정확하고 신속하게 예측할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다.

연안해역에서 부유사 확산현상은 조류 등에 의한 해수 유동, 난류확산, 부유사의 침강 등에 의하여 영향을 받는다. 준설 등의 해상공사로 인하여 해수 중에 부유되는 퇴적물 중 조립퇴적물은 발생원 인근에 바로 침강하고, 세립퇴적물은 주변해역으로 멀리까지 이송-확산한다. 세립

퇴적물의 이송-확산과정을 모의하기 위한 연구는 세립퇴적물에 흡착되어 이동하는 오염물질 이동, 퇴적물의 침식과 퇴적, 이로 인한 항만 및 항로 매몰 등의 문제와 관련하여 널리 연구되어 왔다. 점착성을 가진 세립퇴적물의 거동에 관한 과학적 이해의 한계로 실험, 현장조사, 모형개발에 관한 연구가 상호 유기적인 관계를 유지하면서 계속 진행되고 있다(Metha, 1993). 부유사 확산을 모의하는 방법들 중 입자추적모형은 이송-확산방정식의 이송항 차분화 과정에서 발생하는 수치분산과 불안정성을 저감할 수 있어 부유사 확산문제 해석에 널리 사용되고 있다. 이·김(1995)은 2차원 입자추적모형을 개발하고 해석해와 비교검증하였고, 서(1996)는 Lagrangian방법인 입자추적모형과 Eulerian 방법인 유한요소법을 결합한 Eulerian-Lagrangian모형을 수립하여 부유사 확산을 모의하고 고농도 모의시는 Lagrangian 방법이, 저농도 모의시는 Eulerian 방법이 효율적임을 언급하였으며, 조·박(1997)은 입자추적모형을 사용

*한남대학교 토목환경공학과 (Corresponding author: Tae Sung Jung, Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea. Jungts@mail.hannam.ac.kr)

**한국해양연구원 항만공학연구본부 (Coastal & Harbor Engineering Lab., Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan 426-744, Korea)

하여 1차원 염분 확산과정을 모의하였고, 김 등(2000)은 하수종말처리장으로부터 연안해역으로 확산권을 통해 방류되는 입자성 오염물질의 확산을 3차원 입자추적모형을 사용하여 모의하였다. Hathorn(1997)은 난수발생함수로 비정규분포를 가정한 1차원 확산모형의 효율성을 입증하였으며, Dearnaley et al.(1999)은 준설토 확산모의에 대해 Plume모형과 입자추적모형을 비교검토 하였다. Smith and Scott(1997)는 조석환경 하에서 확산현상을 모의하기 위한 방법들을 고찰하고 입자추적방법이 유효한 방법임을 밝히고, 방류위치, 방류시기, 방류속도의 적절한 선택이 환경영향을 저감하는 데 중요함을 언급한 바 있다.

본 연구에서는 연안해역에서 해수유동, 부유사 확산을 실시간으로 모의할 수 있는 시스템을 개발하였다. 조석에 의한 해수유동의 계산에는 2차원 유한요소모형을 사용하며, 부유사 확산 계산에는 입자추적방법을 사용하였다. 모의시스템 개발은 군산해역을 대상으로 하였다. 개발된 시스템을 사용하여 군산해역의 2차원 조류분포를 모의하고, 조류 관측결과와 비교검증을 실시하였으며, 부유사 확산모의를 위한 입자추적모형의 검증을 위해 1, 2차원 해석해와 검증을 수행하였다. 모의시스템은 이용자의 편의를 위해 공사위치, 공사기간, 부유사 발생량을 Window 상에서 입력하면, 부유사 확산 계산이 바로 수행될 수 있도록 되어 있다.

2. 해수유동모형

천수방정식의 수치해를 유한요소법에 의하여 구하며, 2차원 수심적분된 천수방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Uq_y) = -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + fq_y - \frac{gq_x \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{C^2 H^2} + \frac{\partial F_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yx}}{\partial y} \tag{2}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Uq_y) = -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - fq_x - \frac{gq_y \sqrt{q_x^2 + q_y^2}}{C^2 H^2} + \frac{\partial F_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial F_{yx}}{\partial y} \tag{3}$$

여기서, t 는 시간, x, y 는 직교좌표, η 는 평균해면으로부터 해수면변위, H 는 총수심($=h+\eta$), q_x, q_y 는 각각 x, y 방향 단위폭당 유량, U, V 는 각각 x, y 방향 수심평균

된 유속, f 는 코리올리 상수, g 는 중력가속도, $F_{xx} = E_{xx}(\partial q_x / \partial x)$, $F_{yy} = E_{yy}(\partial q_y / \partial y)$, $F_{xy} = E_{xy}(\partial q_x / \partial y + \partial q_y / \partial x)$, E_{xx}, E_{yy}, E_{xy} 는 운동량확산계수, C 는 Chezy의 마찰계수($=H^{1/6}/m$), n 는 Manning의 조도계수이다.

식 (1)~(3)을 Galerkin방법에 의해 유한요소화하였으며, 계산 격자형태로는 삼각형 격자를 사용하였고, 보간함수를 Lumped한 양해법을 사용하여 수치해석하였다(정 · 김, 1992). 육지경계조건은 경계에서 유속의 수직성분이 0이 되도록 하였다. 개방경계조건으로는 경계면 선상의 각 격자점에서 주요 4대 분조의 합성에 의한 조위값을 다음과 같이 지정하였다.

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=0}^4 A_i(x, y) \cos(w_i t - g_i) \tag{4}$$

여기서, $A_i(x, y)$ 는 i 분조의 반조차, w_i 는 i 분조의 각속도, g_i 는 i 분조의 위상이다.

본 연구에서 사용한 2차원 모형은 조건대 처리기법을 포함하고 있으며, 마로해(정 · 김, 1992), 아산만(정 등, 2002) 등에 적용되어, 그 정확성이 입증된 바 있다.

3. 부유사 이송-확산모형

3.1 모형의 개요

수심적분된 2차원 부유사 확산방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial Hc}{\partial t} + \frac{\partial UHc}{\partial x} + \frac{\partial VHc}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_{xy} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \tag{5}$$

여기서, c 는 부유사 농도, D_{xx}, D_{xy}, D_{yy} 는 확산계수이다. 위식의 양변에 (6)과 같은 항을 양변에 더하여 정리한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial(D_{xx}H)}{\partial x} c \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial(D_{xy}H)}{\partial y} c \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial(D_{xy}H)}{\partial x} c \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial(D_{yy}H)}{\partial y} c \right] \tag{6}$$

source항을 고려하여 식 (5)를 정리한 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(C) + \frac{\partial}{\partial x}(U_1 C) + \frac{\partial}{\partial y}(V_1 C) = \frac{\partial^2}{\partial x^2}(D_{xx} C) + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y}(D_{xy} C) + \frac{\partial^2}{\partial y^2}(D_{yy} C) + Q_s + Q_{sb} \tag{7}$$

$$U_1 = U + \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial y} + \frac{D_{xx}\partial H}{H \partial x} + \frac{D_{xy}\partial H}{H \partial y} \quad (8)$$

$$V_1 = V + \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial x} + \frac{D_{yy}\partial H}{H \partial y} + \frac{D_{xy}\partial H}{H \partial x} \quad (9)$$

여기서, $C=cH$, Q_s 는 공사시 단위시간당 부유사 발생량, Q_{sb} 는 $E-D$, E 는 침식량, D 는 퇴적량이다.

$\vec{X} = \vec{X}(t)$ 에 있는 부유입자는 확정론적인 부분인 이송 과정과 불규칙하게 움직이는 확산과정에 따라 Δt 시간 후 위치 $\vec{X}(t+\Delta t)$ 는 다음과 같다(Dimou and Adams, 1993).

$$\vec{X}(t+\Delta t) = \vec{X}(t) + \vec{V}(t) + \vec{d} \quad (10)$$

\vec{d} 는 분산에 의한 이동으로 \vec{d} 의 방향 성분 d_i 는 다음과 같다.

$$d_i = V_i \Delta t = \sqrt{2D_i / \Delta t} \cdot RAN \cdot \Delta t \quad (11)$$

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

Elder(1959)에 의하면, 종방향 확산계수 D_L 은 다음과 같다.

$$D_L = 5.93HU_* \quad (12)$$

여기서 U_* 는 마찰속도로 다음과 같다.

$$U_* = \frac{\sqrt{g}}{C} \sqrt{U^2 + V^2} \quad (13)$$

횡방향 확산계수는 다음과 같다.

$$D_T = \alpha H U_* \quad (14)$$

여기서, α 는 장소에 따라 변하는 상수이다(Fischer et al., 1979).

유속의 종방향 및 횡방향 분산속도는 다음과 같다.

$$d_L = \sqrt{2D_L / \Delta t} \cdot RAN \quad (15)$$

$$d_T = \sqrt{2D_T / \Delta t} \cdot RAN \quad (16)$$

분산속도의 x, y 방향 성분은 다음과 같다.

$$d_x = d_L \cos\theta - d_T \sin\theta \quad (17)$$

$$d_y = d_L \sin\theta - d_T \cos\theta \quad (18)$$

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

식 (17)과 (18)을 이용해서 구한 분산속도와 식 (8)과 (9)를 이용해서 구한 이송속도를 이용해서 새로운 위치를 식 (10)으로부터 계산한다.

이송속도를 구하기 위해서는 현재 위치에서 유속, 수심이 필요하다. 해수유동모형에서 계산된 결과는 삼각형 유한요소의 꼭지점에서 존재하므로 이를 다음과 같이 보간하여 입자의 현재 위치에서 값 Z 를 다음과 같이 계산하였다.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{Z_i}{r_i^\beta}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{r_i^\beta}} \quad (19)$$

$$r_i = \sqrt{S_i^2 + \delta^2} \quad (20)$$

여기서, Z_i 는 삼각형 격자의 절점 i 에서 값, r_i 는 현재 위치와 유한요소내 삼각형 절점사이의 유희거리, S_i 는 현재 위치와 유한요소내 삼각형 절점사이의 거리, β 는 가중치, δ 는 평활치(smoothing parameter)이다.

Cheng(1997)은 자연 퇴적물의 침강속도 w_s 는 세립퇴적물과 조립퇴적물을 포함하는 자연상태 퇴적물에 대해서 침강속도를 실험적으로 구한 결과로부터 다음과 같이 무차원 입자변수 d_* 를 사용해서 나타낼 수 있음을 제안하였다.

$$w_s = \frac{v}{d_*} [\sqrt{25 + 1.2d_*^2} - 5]^{1.5} \quad (21)$$

여기서, v 는 물의 동점성계수, d_* 는 퇴적물 입자의 직경, d_* 는 퇴적물 입자의 입자변수($=d_s [(s-1)g/v^2]^{1/3}$)로 침강하는 입자의 항력계수를 구하는데 이용되며, s 는 퇴적물의 비중이다.

현재 모형에서는 바닥 퇴적물의 침식에 의한 재부유는 고려하지 않았으며, 일정 크기의 바닥마찰응력 보다 작은 바닥마찰응력이 발생하는 경우에 퇴적이 발생하도록 하였다. 모형의 정확도 개선을 위해 이 부분을 보완중이다.

3.2 해석해와 검증 및 민감도 분석

새로이 수립된 입자추적 모형의 정확성을 평가하기 위하여 단순영역에 대해 1차원 및 2차원 이송-확산을 모의하고, 해석해와 비교하였다. 연직방향으로 일정한 농도를 갖는 선오염원이 순간적으로 유입된 경우에 대한 2차원 이송-확산방정식의 해석해는 다음과 같다(Fischer et al., 1979).

Table 1. Sensitivity analysis of random number generator

| Input Parameter | | Time | C_{max} | $\sum C_{cat} - C_{anal} $ | | |
|-----------------|--|--------|-----------|-----------------------------|------|------|
| | | | | RAN1 | RAN2 | RAN3 |
| CASE-1 | U = 0 m/sec D = 1.0 m ² /sec | 1 hour | 1.88 | 0.71 | 0.6 | 0.72 |
| | | 3 hour | 1.09 | 1.11 | 0.91 | 0.95 |
| | | 6 hour | 0.77 | 1.15 | 1.32 | 0.92 |
| CASE-2 | U = 0.1 m/sec D = 0.5 m ² /sec | 1 hour | 2.62 | 0.7 | 0.49 | 0.58 |
| | | 3 hour | 1.53 | 0.86 | 0.79 | 0.73 |
| | | 6 hour | 1.08 | 1.27 | 0.92 | 0.96 |
| CASE-3 | U = 1.0 m/sec D = 0.5 m ² /sec | 6 min | 6.67 | 2.17 | 1.84 | 1.79 |
| | | 12 min | 5.62 | 1.18 | 0.95 | 1.03 |
| | | 24 min | 4.12 | 0.58 | 0.54 | 0.48 |

$$C(x, y, t) = \frac{M}{4\pi Dt} \exp\left[-\frac{(x_0 - Ut)^2 + (y_0 - Vt)^2}{4Dt}\right] \quad (22)$$

여기서, D 는 확산계수, x_0 와 y_0 는 초기 위치이다.

모형수립시 난수발생 방법에 따른 계산결과의 차이를 검토하였다. 검토대상은 Numerical Recipes(Press et al., 1986)에 수록되어 있는 방법들 중 비교적 사용이 간편한 세가지(RAN1, RAN2, RAN3)이다. Table 1은 유속, 확산계수, 시간을 달리해가며 난수 발생방법에 따른 계산 오차를 비교한 것이다. 계산시 초기 방출입자는 10,000개이며, 단순확산인 경우(CASE-1), 이송-확산 문제중 확산이 지배적인 경우(CASE-2), 이송이 지배적인 경우(CASE-3)에 대해 검토하였다. 모든 경우에 대하여 RAN1은 타 방법에 비하여 좋지 못한 결과를 주었으며, RAN2와 RAN3는 비교적 양호한 결과를 주었다. 어느 방법을 선택하느냐에 따라 정확성에 약간의 차이는 있었으나 그 차이는 크지 않았다.

CASE-1에 대해 방류 입자 수에 따른 모의결과의 민감도를 분석하고 해석해와 비교한 결과(Fig. 1), 방출입자수가 적은 경우는 경향은 일치하나 변동이 크게 나타나는 불안정한 모습을 보였으며, 입자수가 증가함에 따라 계산 농도가 해석해와 거의 일치하는 모습을 보였다. 모의시 민감도 분석된 변수를 제외한 변수 값은 $N=10,000$ 개, 계산 시간간격은 50초, 계산격자간격은 20 m 이다. 격자크기에 따른 민감도를 분석한 결과(Fig. 2), 격자간격이 작은 경우에는 모의된 입자가 각 격자에 위치하는 수가 적어 농도 계산에서 오차가 크게 나타났으며, 격자간격이 큰 경우에는 각 격자에 많은 입자가 위치하여 농도를 정확히 계산할 수 있었다. 작은 크기의 격자를 사용하는 경우는 격자 내에 많은 수의 입자가 위치하도록 많은 수의 입자를 사용해야 양호한 결과를 얻을 수 있음을 의미한다. 계산시간간격은 모의결과에 크게 영향을 미치지 않았다(Fig.

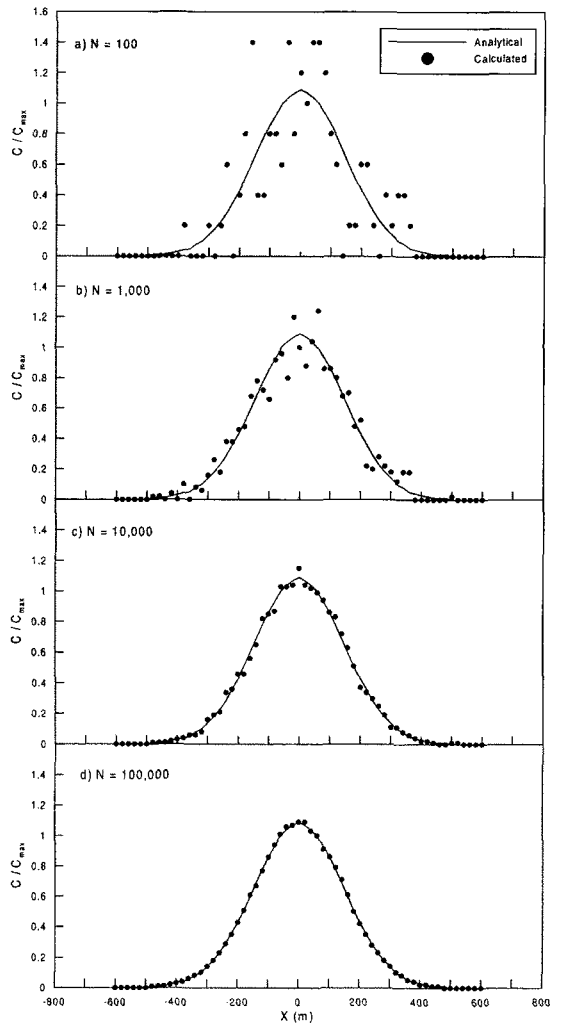


Fig. 1. Sensitivity analysis of number of particle.

3). 그러나 유속장이 시·공간적으로 변화하는 경우는 계산결과에 영향을 미칠 것이다.

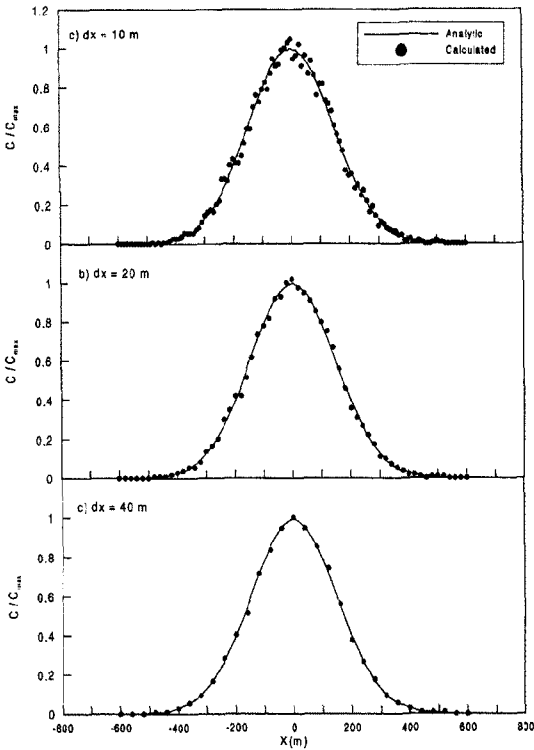


Fig. 2. Sensitivity analysis of grid size.

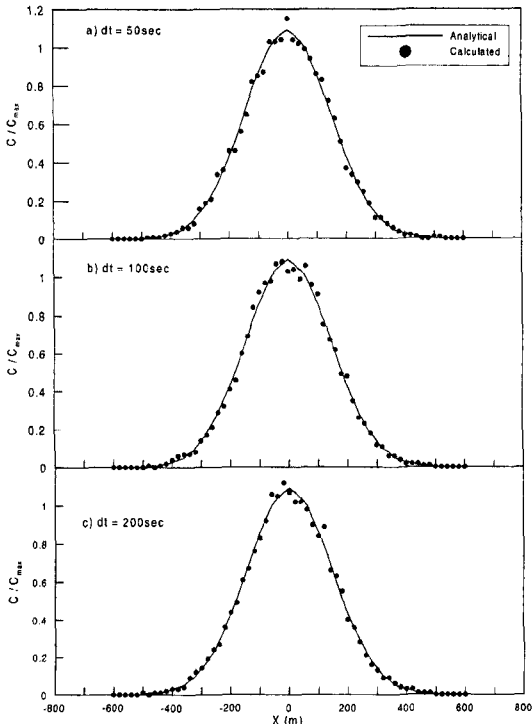


Fig. 3. Sensitivity analysis of time step.

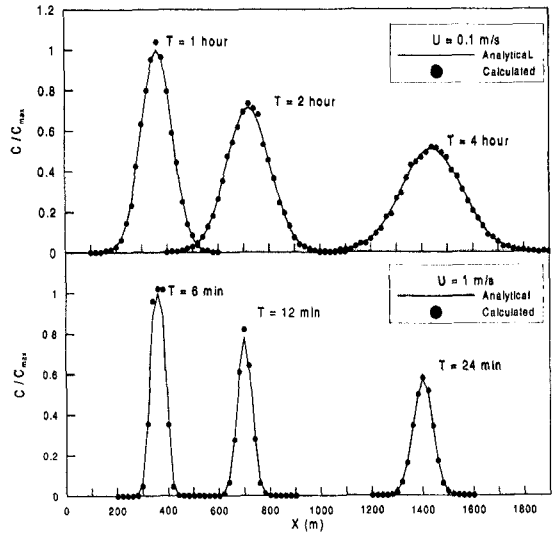


Fig. 4. Verification for 1-dimensional advection-diffusion problem.

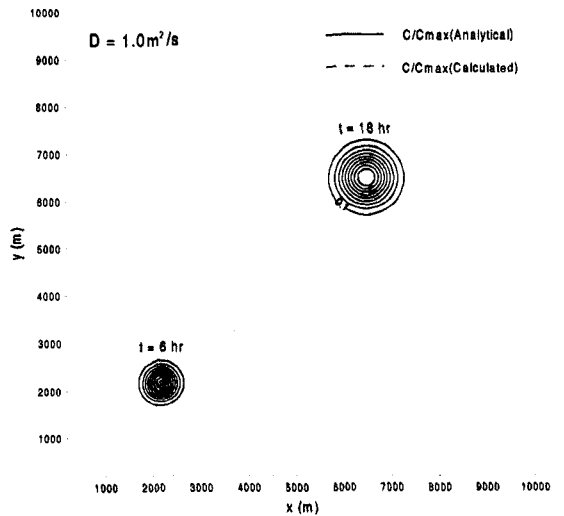


Fig. 5. Verification for 2-dimensional advection-dominated problem.

1차원 이송-확산문제에 대해서 계산결과와 해석해를 비교한 결과는 Fig. 4와 같다. 유속이 0.1 m/sec로 이송이 확산에 비해 느리게 진행되는 CASE-2의 경우(윗 그림)와 유속이 1.0 m/sec로 이송이 지배적인 경우인 CASE-3(아래 그림) 모두 해석해와 일치하는 양호한 계산결과를 보였다.

2차원 이송-확산 문제에 적용한 결과는 다음과 같다. 두 경우 모두 유속은 0.1 m/sec 이며, 확산계수가 1.0 m²/sec로 이송이 지배적인 경우와 확산계수가 5.0 m²/sec로 확산이 지배적인 경우 모두 해석해와 일치하는 양호한 계

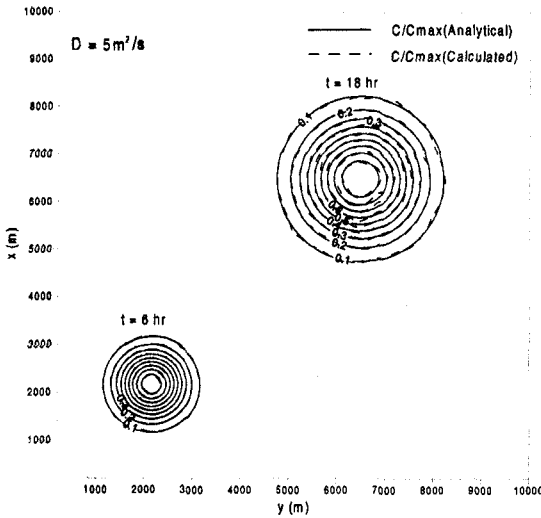


Fig. 6. Verification for 2-dimensional diffusion-dominated problem.

산결과를 보였다. 모의시 방출 입자수는 10,000개, 계산 격자간격은 200 m 었다.

4. GUI를 이용한 부유사 확산 모의시스템 구축

본 연구에서는 모형 입력자료화일을 GUI환경에서 쉽게 입력 및 수정할 수 있고, Window상에서 계산 및 계산된 모형결과를 효과적으로 가시화하여 분석할 수 있는 군산 해역 SS모의 시스템인 KUSSMOS(KU^{nsan} SS MOdeling System)프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 모의 시스템 구동 및 제어를 위해 필요한 자료의 입력, 해수유동 및 입자추적 부유사 확산모형의 실행, 모의결과에의 가시화 부분으로 구성되어 있다. 본 프로그램의 개발 언어로 Visual C++ 6.0(이, 1999)과 OpenGL(신, 1999)을 사용하였다. 프로그램은 먼저 지형자료와 배경 구성을 위한 지도의 비트맵 이미지를 입력 받아 주메뉴를 구성하며, 구성된 주메뉴에서 모의에 필요한 자료인 유한요소 삼각형 격자망자료, 육지 경계면 위치자료, 해수유동 모의를 위한 개방경계에서 주요 4개 분조의 조화상수 등을 읽어 메모리에 저장한다. 다음으로 모의하고자 하는 날짜를 달력으로부터 선택하고 조류 계산결과가 없으면 계산을 수행하고, 계산결과가 있으면 모의에 필요한 공사시작 시간, 공사기간을 입력한다. 그리고, 공사위치를 마우스로 선택하면, 모의시스템이 시작되어 부유사 확산을 계산하게 된다. 수분(PC의 성능에 따라 다름)을 기다리면 모의가 종료된다. 종료된 후에는 모의된 조류분포, 조위분포, 부유 퇴적물 입

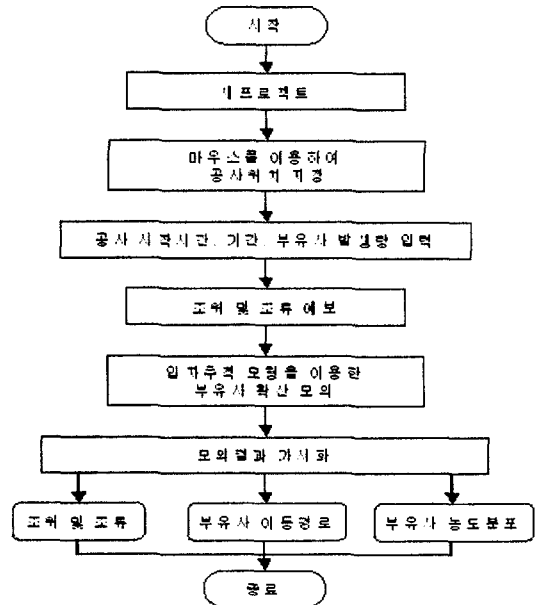


Fig. 7. Flowchart of KUSSMOS.

자의 분포, SS 농도분포를 시간변화에 따라 연속적으로 관찰할 수 있다. 필요시 특정지역에 대해 확대하여 자세한 모의결과를 관찰할 수 있다. 모의시스템의 흐름도는 Fig. 7과 같다.

위와 같이 검증된 해수유동모형과 입자추적 모형을 기본으로 수립한 모의시스템에서 부유사 확산을 다음과 같이 예측한다.

- (1) 조위 및 조류 분포를 해수유동모형을 이용하여 예보한다.
- (2) 공사위치, 공사 시작시간, 공사기간, 부유사 발생량을 입력한다.
- (3) 입자추적모형을 사용하여 부유사 확산을 모의한다.
- (4) 결과를 출력한다.

시스템 구동의 한 예로 대조기인 2001년 7월 8일 오전 8시에 준설공사를 시작하여 12시간 동안 공사가 진행되는 상황에 대해 모의시스템을 운영하는 과정은 다음과 같다. 주화면인 Fig. 8의 상단 좌측에 있는 시계모양의 아이콘을 마우스로 클릭하면, Fig. 8의 중앙에 있는 달력이 나타난다. 원하는 날짜를 마우스로 선택하면, 그 날의 조위 및 조류가 계산된다. 조위 및 조류계산이 종료되어 계산결과와 조류분포가 화면에 로딩되면, 주화면 상단의 시계 바로 우측에 있는 아이콘을 선택한다. 아이콘이 선택되면 Fig. 9의 중앙에 보이는 입력창에서 모의 시작시간을 오전 8시, SS모의 발생시간을 12시간, 발생량을 8,770

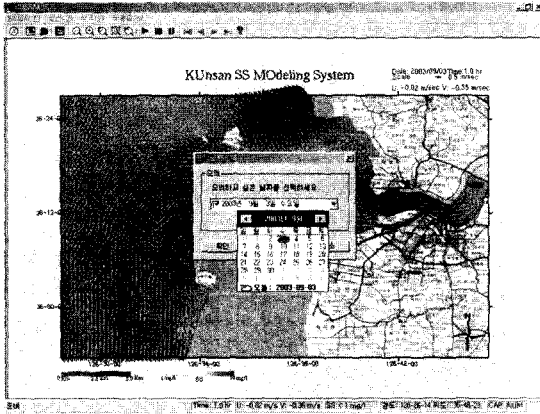


Fig. 8. Selection of the date.

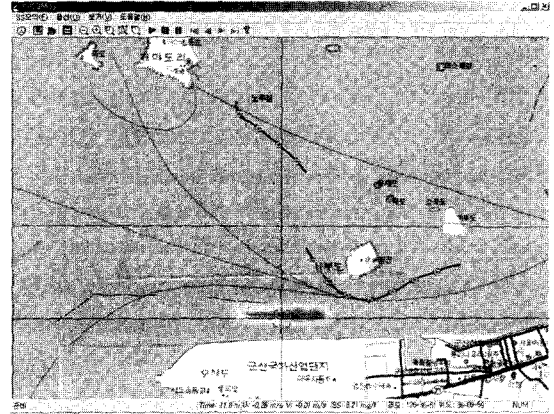


Fig. 10. An example of SS distribution.

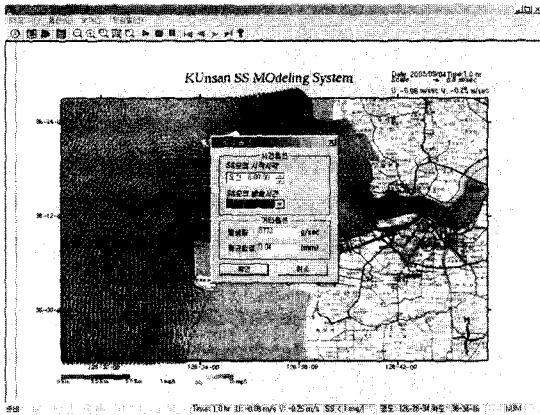


Fig. 9. Setting of SS options.

g/sec, 평균입경 0.04 mm를 입력하고, 확인을 누른 다음에 마우스를 이용하여 공사지점의 위치를 더블 클릭하면 SS확산 모의가 시작된다. 모의가 종료되면, 조류분포와 함께 Fig. 10과 같은 시간별 SS 농도분포를 볼 수 있다. 동서방향의 강한 조류에 의해 동서방향으로 길게 확산된 모습을 보였다. 마우스를 화면위에 위치하면, 그 지점의 조류크기와 SS농도가 그림의 하단에 표시된다. 모의결과 확대/축소 기능을 이용해서 특정지역만을 선택적으로 관찰할 수 있으며, 모의기간 중의 조류와 SS농도의 시간변화를 동영상으로 관찰할 수 있다.

5. 부유사 확산 모의시스템의 현장 검증

Fig. 11과 같이 위도 35°53'36"N~36°27'N, 경도 126°28'24"E~126° 45'36"E 해역에 대해 유한요소 격자망을 구성하였으며, 수심자료 및 지형자료는 수치해도 No. 305를 사용하였다. 유한요소 격자의 크기는 150~700 m,

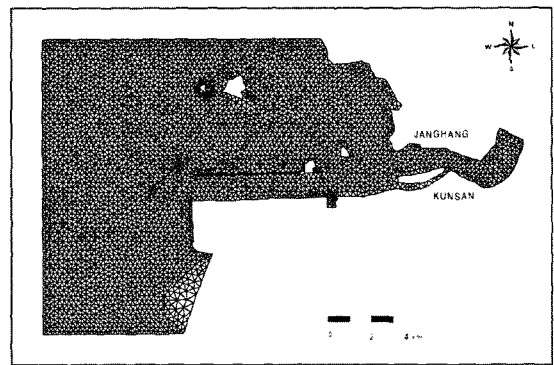


Fig. 11. Finite element grid system for KUnsan modeling.

총격자수는 4,147개, 총요소수는 7,822개이다. 해수유동모형의 계산시간간격은 8초를 사용하였으며, 모의영역의 수심분포는 Fig. 12와 같다. Manning 조도계수는 모의결과와 관측결과의 비교검증과정(민감도 분석)을 통하여 결정된 0.02를 사용하였다. 모의시 개경계조건으로는 주요 4개 분조(M₂, S₂, K₁, O₁)의 합성조위를 기준 관측 및 수치모의결과(군산항 건설사무소, 1986a; 1986b)를 참고하여 초기 부여하였으며, 관측치와 비교과정에서 수정하였다.

Fig. 12에 표기된 PC-1에서 조위와 PC-4의 중층에서 2001년 7월에 관측된 15일간의 유속 시계열자료(군산지방 해양수산청, 2001)를 본 예측시스템을 이용하여 예측한 결과와 비교한 결과, 관측조위 및 유속과 대체로 일치하는 양호한 결과를 보였다(Fig. 13과 Fig. 14). Fig. 14에서 +는 창조류를, -는 낙조류를 의미한다. Fig. 14에서 금강하구로부터 유입되는 담수량을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 유속크기 차이가 소조기에만 약간 나타나는 것으로 나타났다. 계산결과와 관측결과의 차이의 원인은 여러가지가 있으나 주로 모형에서 고려하지 않는 4

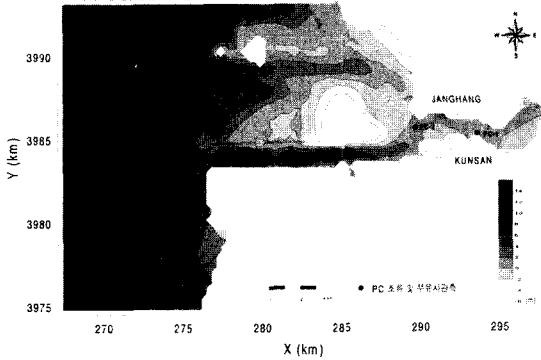


Fig. 12. Bathymetry and observation stations.

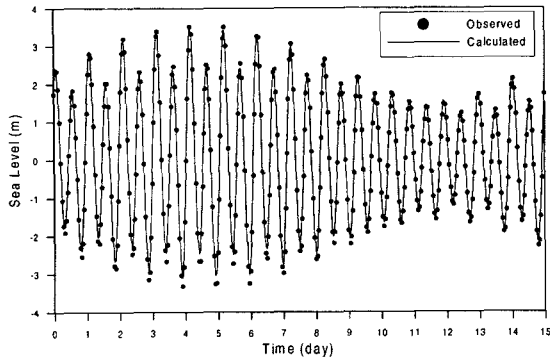


Fig. 13. Comparison of sea level change.

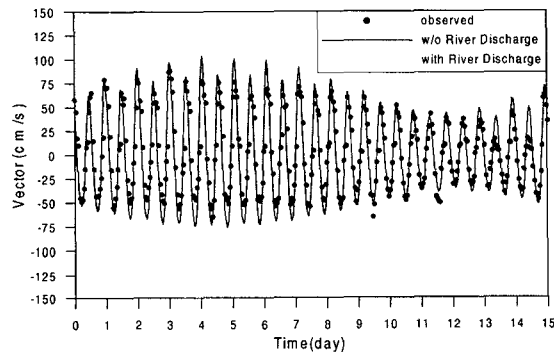


Fig. 14. Comparison of tidal current magnitude.

개 주요 분조 외의 조석 성분에 의한 것으로 생각된다.

모형의 검증기간에 대해 예측된 대조기 조류의 분포는 Fig. 15, Fig. 16과 같다. 전반적으로 해수가 창조시는 수로를 따라 서에서 동으로 흐르며, 낙조시는 동에서 서로 흐른다. 외해에 비해 만내부로 갈수록 금강하구언에 의한 조류소통의 차단으로 유속이 감소하였다.

부유사 확산 모형의 현장검증을 위해 SS 발생량은 부유사 농도 관측자료로부터 추정된 8.77 kg/sec, 부유사의

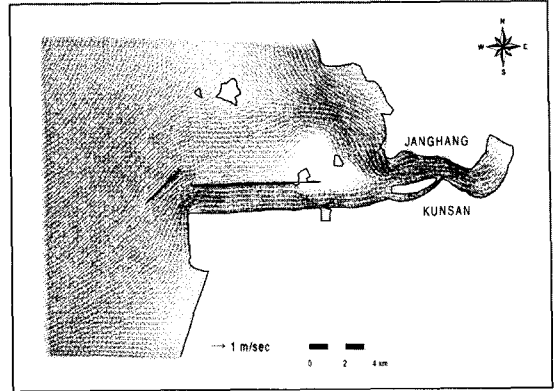


Fig. 15. Distribution of simulated flood currents in spring tide.

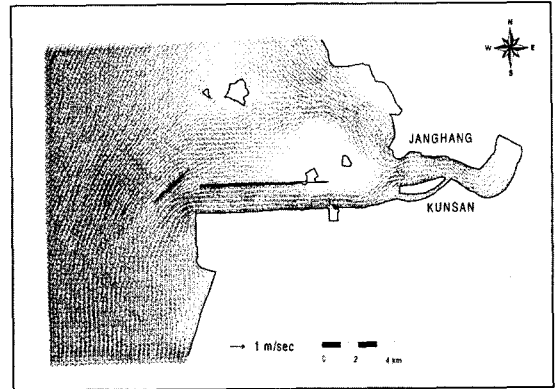


Fig. 16. Distribution of simulated ebb currents in spring tide.

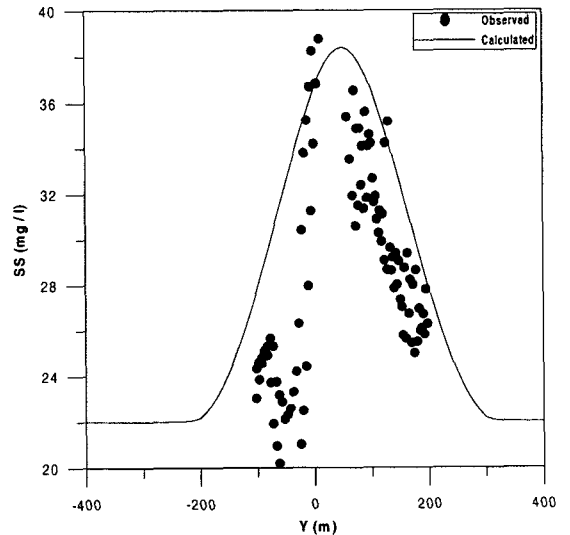


Fig. 17. SS concentrations at 150 m from source.

침강속도는 2002년 8월 21일의 부유사 샘플을 입도분석한 결과로부터 얻은 평균입경 40 μm 에 대한 0.096 cm/sec를 사용하였다. 2002년 8월 17일 15시 상황에 대해 부유사 확산을 모의하고 관측결과와 비교하였다. Fig. 17은 준설공사 지점으로부터 서쪽으로 약 150 m 떨어진 단면에서 부유사 농도 변화로 준설공사로 인하여 발생된 부유사 플룸의 폭과 SS농도의 변화양상으로 관측치와 계산치가 대체적으로 일치하고 있다.

6. 결 론

연안해역에서 널리 진행되는 준설공사로 인한 부유사 농도 증가를 신속하고 간편하게 예측할 수 있는 GUI 모의시스템(KUSSMOS)을 수립하였다. 수립된 시스템을 활용하여 조류를 예측한 결과, 비교적 관측치와 일치하는 양호한 계산결과를 보였다. 부유사 확산 모의를 위해 수립된 입자추적모형은 1, 2차원 이송-확산문제의 해석해 및 현장 관측치와 비교한 결과, 비교적 계산결과가 해석해 및 현장 조사결과와 잘 일치하였다. 입자추적모형의 적용시 입자갯수는 계산결과에 크게 영향을 미치며, 이는 격자크기와 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 나타났다.

본 시스템은 GUI 환경에서 작동되므로 누구나 쉽게 자료의 입력 및 수정이 가능하며, 계산된 모형결과를 그래픽을 이용해 효과적으로 가시화하여 계산결과를 누구나 쉽게 현실감 있게 볼 수 있다. 따라서 본 시스템을 이용하여 수시로 공사중 발생하는 부유사 확산을 예측하고, 그 결과를 분석하고 오염방지 대책을 수립하면, 환경피해를 줄일 수 있을 것이다. 그러나, 예측 정확성을 높이기 위해서는 퇴적물 이동의 제과정에 대한 많은 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부의 R & D 사업 “부유토사 발생량 평가 및 오탉방지막 효율에 관한 연구 용역”의 연구 지원에 의해 수행된 연구결과와 일부분입니다.

참고문헌

군산지방 해양수산청, 2001. 금강하구 수리현상 변화조사.
 군산항건설사무소, 1986a. 금강하구 수리현상조사 현지자료 조사 보고서.
 군산항건설사무소, 1986b. 금강하구 수리현상조사 수치모형 실험 보고서.

김영도, 강시환, 서일원, 오병철, 2000. 3차원 입자추적 모형에 의한 수중방류 하수의 이송·확산 예측, **대한토목학회논문집**, 20(6-B): 843-852.
 서승원, 1996. Eulerian-Lagrangian 농도 및 입자 결합모형에 의한 연안의 부유사 확산해석, **한국해양·해양공학회지**, 8(2): 185-192.
 신현주, 1999. **OpenGL SUPERBIBLE**, 도서출판 인포·북.
 이상엽, 1999. **Visual C++ Programming Bible Ver. 6.x**, (주)영진출판사.
 이종섭, 김호진, 1995. Random Walk 모형에 의한 확산해의 민감도 분석, **대한토목학회논문집**, 15(5): 1267-1277.
 정태성, 김성근, 강시환, 2002. 3차원 흐름 모델링시스템(FEMOS)을 이용한 아산만 조류모의, **한국해양·해양공학회지**, 14(2): 151-162.
 정태성, 김창식, 1992. 이동경계를 고려한 유한요소 해수유동모형, **한국해양·해양공학회지**, 4(3): 146-155.
 조재현, 박재용, 1997. Random Walk 입자추적법에 의한 1차원 하구염분도 모형, **추계 학술연구 발표회**, 대한환경공학회, 296-298.
 Cheng, N.S., 1997. Simplified settling velocity formula for sediment particle, **J. of Hydraulic Engineering**, ASCE, 133(2), pp. 149-152.
 Dearnaley, M.P., Stevenson, J.R. and Spearman, J., 1999. *Environmental aspects of aggregate Dredging*, Report SR 548, HR Wallingford.
 Dimou, K.N. and Adams, E.E., 1993. A random-walk, particle tracking model for well-mixed estuaries and coastal water, **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 37, pp. 99-110.
 Elder, J., 1959. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, **J. of Fluid Mechanics**, 5(4), pp. 544-560.
 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.
 Hathhorn, W.E., 1997. Simplified approach to particle tracking methods for contaminant transport, **J. of Hydraulic Engineering**, ASCE, 123(12), pp. 1157-1160.
 Metha, A.J., 1993. Nearshore and estuarine sediment transport, *Coastal and Estuarine Studies*, 42, Americal Geophysical Union.
 Press, H.P., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. and Vetterling, W.T., 1986. *Numerical recipes: the art of scientific programming*, Cambridge University Press.
 Smith, R. and Scott, C.F., 1997. Mixing in the tidal environment, **J. of hydraulic Engineering**, 123(4), pp. 332-340.

Received October 4, 2003

Accepted March 3, 2004