

## 목포해역 점착성 퇴적물의 수송에 관한 수치모의

정태성<sup>1\*</sup> · 김태식<sup>2</sup> · 정동국<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한남대학교 토목환경공학과, <sup>2</sup>동부엔지니어링 수자원환경

# Numerical Modeling of Cohesive Sediment Transport at Mokpo Coastal Zone

T.S. Jung<sup>1\*</sup>, T.S. Kim<sup>2</sup> and D.K. Jeong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil & Environmental Engineering, Hannam University, Ojung-Dong, Daejeon 306-791, Korea  
<sup>2</sup>Division of Water Resources & Environment, Dongbu Engineering, Samsung-Dong 154-17, Seoul 135-090, Korea

### 요 약

연안해역에서 점착성 퇴적물의 수송과정을 수치모의하였다. 복잡한 지형을 가진 연안해역에 효과적인 유한요소모형이 해수유동과 퇴적물 수송을 모의하기 위해 수립되었다. 침식률을 기존 연구결과 및 바닥퇴적물 시료의 물리특성 분석자료를 가지고 편리하게 결정하였으며, 모의결과는 관측된 부유사 농도의 시간변화와 잘 일치하는 양호한 계산 결과를 보였다. 따라서 본 연구에서 사용한 침식률 결정방법이 퇴적물 수송모의에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

**Abstract** – Cohesive sediment transport in coastal region has been studied by numerical modeling. A finite element numerical model was setup to simulate hydrodynamics and sediment transport in the coastal region with complex topography. Only physical features of observed sediments has been used to determine erosion rates of bottom sediments together with the previous research results. The simulation results using the simply determined equation of erosion rates were compared with time variations of the observed SS concentration and showed good agreements. In conclusion, this method can be used to estimate transport of cohesive sediment conveniently.

**Keywords:** Cohesive Sediment(점착성퇴적물), Suspended Sediment(부유사), Tide Model(조석모형), Finite Element Model(유한요소모형)

### 1. 서 론

우리나라 서해안과 남해안에는 입경이 작아 점착성을 띠는 세립 퇴적물이 넓게 분포되어 있다. 이러한 퇴적물은 연안해역으로 유입되는 각종 오염물질을 흡착하고 물과 함께 이동하며, 강한 조류에 의해 발생하는 큰 마찰응력에 의해 바닥퇴적물이 침식되고, 수중에서 고농도의 부유사를 발생시켜 연안 해역의 수질 변화에 큰 영향을 미친다. 또한 유속변화에 따라 강한 유속이 발생하는 지역에서는 바닥퇴적물을 침식하여 수심이 깊어지고, 유속이 느린 곳에 퇴적하여 수심을 얕게 한다. 그러므로 이러한 점착성 퇴적물의 수송과정을 정확히 이해하는 것은 연안해역의 수질오염과정과 지형변화의 원인과 결과를 정확히 규명하는 데 있어 매우 중요하다. 특히

대부분 점착성 퇴적물에 의해 발생하는 고농도의 현탁수는 수질을 악화시켜 연안 생태계의 파괴를 초래하기도 하며, 물과 함께 이동하다가 항만과 같이 유속이 느린 곳에서 침강하면 항만매몰과 같은 문제가 발생하여, 수심유지를 위해 막대한 공사비를 지출하게 한다. 또한 바닥에 퇴적된 오니는 해수 중으로 영양염과 같은 오염물질을 배출하거나 수중의 산소를 소모하여 부영양화 또는 빈산소 수괴 형성 등의 문제를 야기하여 적조 등의 원인이 되기도 한다. 특히 이러한 문제는 폐쇄성 연안 해역에서 심각하다. 이러한 문제를 사전에 방지하기 위해서는 퇴적물의 수송과정에 대한 정확한 예측이 필요하며, 이를 위해 실험결과에 기초한 수치모델이 널리 사용되어 왔다(Mehta *et al.*[1989]).

우리나라 연안해역에서 점착성 퇴적물의 수송과정을 정확히 이해하기 위한 연구로 김[1992]은 점착성 토사의 수송기구를 규명하

\*Corresponding author: jungts@hannam.ac.kr

기 위하여 직선수로에서 침식물에 대한 수리실험과 이를 토대로 3차원 모형을 수립하여 수영반에서 부유사 확산을 모의하였으며, 정 등[2004]은 점착성 및 비점착성 퇴적물의 수송을 모의할 수 있는 2차원 모형을 수립하고, 자연하천에서 퇴적물의 수송을 모의하였으며, 김[2002]은 2차원 모형을 수립하여 금강하구역에서 퇴적현상을 해석하였다. 복잡한 점착성 퇴적물의 침강 및 퇴적 특성에 관한 실험적 연구로는 Shaker를 이용한 추[1993]와 박[1993]의 연구, 환형수조를 이용한 황[2002]의 연구가 있으며, 황 등[2005]은 환형수조에서 저층퇴적물의 밀도를 변화시켜 가며 실험하여 고령토의 밀도별 침식특성을 고찰하였다. 이 등[2005]은 시화호 퇴적물의 침강속도를 침강수주를 사용하여 측정하고, 그 결과를 이용하여 시화호의 퇴적물 수송을 모의하였다. 지금까지 대부분의 연구를 살펴보면, 퇴적물의 침강 및 침식 특성에 대해 실험실에서 실험한 연구결과가 대부분이며, 퇴적물 수송모델링에서는 모형결과에 큰 영향을 미치는 주요 요소인 침식률과 퇴적률 계산에서는 실험실에서 실시된 제한된 실험결과를 사용하거나 기존 연구결과를 지역 특성에 대한 고려없이 사용하여 모형결과의 신뢰성을 입증하지 못하였다. Roberts *et al.*[1998]에 의하면, 현재 널리 사용하는 실험장치인 Shaker와 순환수로를 사용하여 실험실에서 수행한 대부분의 실험은 현장 퇴적물 시료를 실험실에서 재구성하여 실험함으로써 현장 퇴적물의 침식특성을 정확히 재현하는 데 문제가 있으며, 유속이 강한 경우에 대해서는 실험하는 데 제한이 있다. 이에 대한 대안으로 McNeil *et al.*[1996]과 Robert *et al.*[1998]은 Sedflume 이라는 장치를 사용하여, 교란되지 않고 채취된 현장퇴적물의 침식률을 측정할 바 있다.

본 연구에서는 서해안 및 남해안과 같이 해안선이 복잡한 해역에서 점착성 퇴적물의 수송 모의에 적합한 2차원 유한요소모형을 수립하였다. 모델링 과정에서 침식률 계산에 기존 연구자들의 실험적 연구결과와 현장에서 채취한 퇴적물 시료를 분석하여 얻은 퇴적물 물리특성자료를 기초로 하여 간편하게 산정식을 수립하는 방법의 현장적용 가능성을 검토하였다. 목포해역에서 채취한 퇴적물 시료의 물성 분석결과, 김[1992]의 실험결과, Roberts *et al.*[1998]의 실험결과를 활용하여 침식률 산정식의 계수를 결정하였으며, 목포해역에서 퇴적물 수송을 모의하고, 계산된 부유사 농도의 시간변화를 관측치와 상호 비교하여 사용한 방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 수치모델

본 연구에서는 조류분포를 계산하기 위한 2차원 해수유동모형과 점착성 퇴적물의 수송을 모의하기 위한 퇴적물 수송모형으로 2차원 모형을 사용하였으며, 모형의 주요 특징은 다음과 같다.

### 2.1 해수유동모형

섬이 많고 해안선이 복잡한 해역을 모형에서 정확히 고려할 수 있는 2차원 유한요소모형으로 본 모형의 지배방정식인 수심적분된 2차원 천수방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(U^2/H)}{\partial x} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial y} + fV = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_h \frac{\partial}{\partial x} \left[ H \frac{\partial(U/H)}{\partial x} \right] \\ + A_h \frac{\partial}{\partial y} \left[ H \frac{\partial(U/H)}{\partial y} \right] + \frac{\tau_{wx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2/H)}{\partial y} - fU = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_h \frac{\partial}{\partial x} \left[ H \frac{\partial(V/H)}{\partial x} \right] \\ + A_h \frac{\partial}{\partial y} \left[ H \frac{\partial(V/H)}{\partial y} \right] + \frac{\tau_{wy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\zeta$ 는 평균수심으로부터 수위변화, 수심적분유속,  $U = \int_h^z u dz$ ,  $u$ 와  $v$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 방향의 유속,  $z$ ,  $H$ 는 총수심 ( $=h+\zeta$ ),  $h$ 는 평균수심,  $f$ 는 Coriolis 상수,  $A_h$ 는 수평외점성계수,  $g$ 는 중력가속도,  $\tau_{wx}$ 와  $\tau_{wy}$ 는 각각 방향 바람마찰응력,  $\tau_{bx}$ 는  $C_f U \sqrt{U^2 + V^2} / H^2$ ,  $\tau_{by}$ 는  $C_f V \sqrt{U^2 + V^2} / H^2$ , 바닥마찰계수  $C_f$ 는  $gn^2/H^{1/3}$ ,  $n$ 은 Manning의 조도계수이다.

식 (1)-(3)을 시간적분법으로 양해법, 격자형태로 삼각형을 사용하는 Galerkin 유한요소법(Chung[1978])을 사용하여 수치해석하였으며, 격자형태는 삼각형요소를 사용하였고, 조건대는 격자망은 그대로 두고 노출되는 경우에 해당되는 요소를 계산에서 제거하는 방법으로 고려하였다. 수치해석 방법과 조건대 처리방법은 정과 김[1992]에 자세히 기술되어 있다.

### 2.2 퇴적물 수송모형

입자크기가 작아 쉽게 부유되는 점착성 퇴적물의 수송과 이로 인한 지형변화를 모의하기 위해 다음과 같은 수심적분된 2차원 퇴적물 수송방정식을 사용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{xx} H \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} H \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{yx} H \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q_b \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $C$ 는 부유사의 농도,  $D_{xx}$ ,  $D_{xy}$ ,  $D_{yx}$ ,  $D_{yy}$ 는 수평확산계수,  $Q_b$ 는 바닥경계층에서 퇴적물 교환량이다.

식 (4)는 해수유동모형과 같이 삼각형 유한요소를 사용하는 Galerkin 유한요소법을 사용하여 수치해석하였으나 시간적분법으로 음해법을 사용하였고, 바닥경계면에서 퇴적물 교환량인  $Q_b$ 는 침식량과 퇴적량의 차이로 다음과 같다.

$$Q_b = E - D \quad (5)$$

식 (5)에서  $E$ 는 침식량으로 바닥마찰응력  $\tau_b$ 가 침식한계전단응력  $\tau_c$ 보다 클 경우 발생하며, 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다(Ariathurai and Krone[1976]).

$$E = E_0 (\tau_b / \tau_c - 1)^a \text{ (kg/m}^2\text{/sec)} \quad (6)$$

여기서,  $E_0$ 는 침식률 상수,  $\tau_b$ 는 바닥마찰응력,  $\alpha$ 는 퇴적물 특성에 따른 상수이다.

식 (5)에서 퇴적은 바닥마찰응력이 퇴적한계전단응력  $\tau_d$ 보다 작을 때 발생하며, 퇴적률  $D$ 는 점착성 퇴적물의 경우 다음 식과 같이 나타낼 수 있다(Ariathurai and Krone[1976]).

$$D = w_s C \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d}\right) \quad (7)$$

여기서,  $w_s$ 는 퇴적물 입자의 침강속도이다.

퇴적물의 침강속도는 점착성 및 비점착성 퇴적물의 침강속도 실험결과를 분석한 Cheng[1997]의 연구결과에 의하면 다음과 같다.

$$w_s = \frac{v}{d} [\sqrt{25 + 1.2 d_*^2} - 5]^{1.5} \quad (8)$$

여기서,  $v$ 는 물의 동점성계수,  $d_*$ 는 퇴적물의 입경,  $d_* = d[(s-1)g/v^2]^{1/3}$ ,  $s$ 는 퇴적물 입자의 비중이다.

### 3. 수치모형의 적용

위와 같은 모형을 사용하여 해안선이 복잡하고, 바닥 퇴적물이 점착성퇴적물로 구성되어 있는 목포 앞바다에서 조류분포와 부유사 분포를 모의하였으며, 자세한 내용은 다음과 같다.

#### 3.1 해수유동

목포해역을 대상으로 모형을 수립하였으며, 수심분포는 Fig. 1,

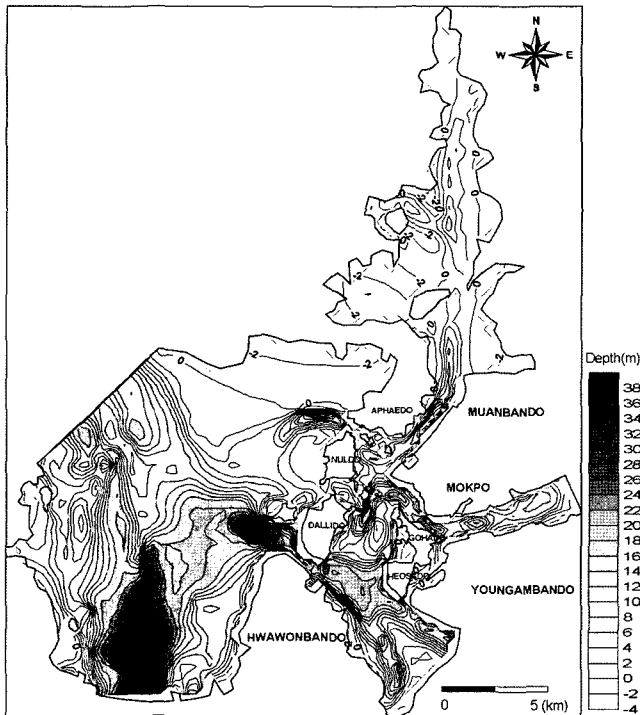


Fig. 1. Bathymetry of study area.

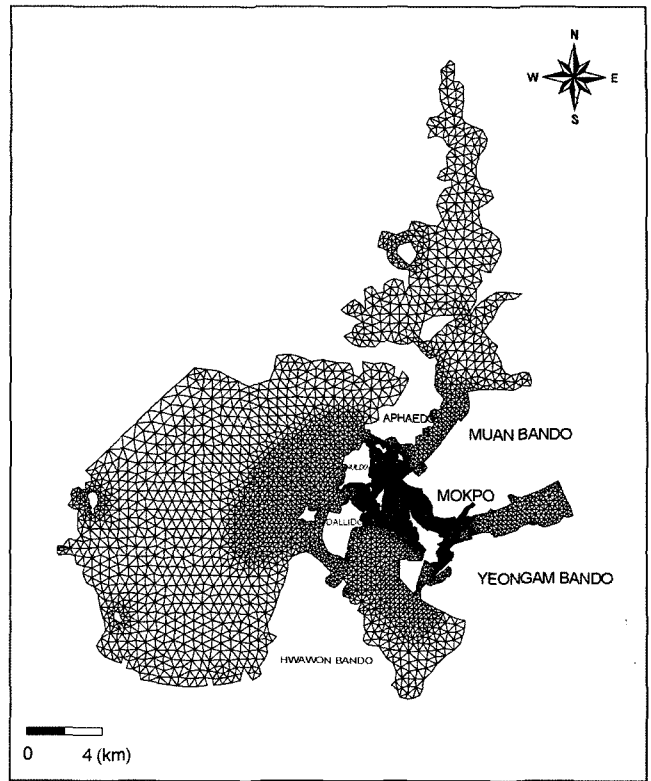


Fig. 2. Finite element grid system.

전체모델영역에 대한 유한요소 격자망은 Fig. 2와 같다. 관측자료가 존재하는 영역에 대하여 상세하게 격자를 구성하였다. 수심자료는 수로국 발행 수치해도 No. 301, 321, 343,을 참고하였다.

모형의 검증에 위해 조위자료는 수로국[2002]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. 모형검증에 사용된 수로국 조류 관측자료의 관측위치는 Fig. 3, 2003년도 해양조사 위치도는 Fig. 4와 같다.

모의시 조절과정을 거쳐 Manning의 조도계수는 0.021, 계산시간 간격 0.5 초를 사용하였다. 평균대조기와 평균소조기를 포함하는 15 일간에 대해 연속모의하였으며, 정상상태의 해를 얻기 위하여 약 1 일간 예비 계산하였다. 모형의 개방경계에서는 목포해역의 대표조석인  $M_2$  분조와  $S_2$  분조의 합성조석을 부여하였으며, 본 조사해역의 조류특징인 낙조 우세현상을 고려하기 위하여 다음과 같이 개방경계 조건을 부여하였다. 강과 임[1998]은 목포 주변해역은 낙조류가 우세하며 이를 정확히 모의하기 위해서는 다음과 같이 낙조우세 특성을 고려한 개방경계 조건을 사용할 것을 제안하였다.

$$\zeta = \sum_{i=1}^n A_i \cos[\omega_i t - g_i - 11.0 * \sin(\omega_i t - g_i + \pi/2)]$$

여기서,  $A_i$ 는 분조  $i$ 의 진폭,  $\omega_i$ 는 분조  $i$ 의 각속도,  $g_i$ 는 분조  $i$ 의 동경 135도를 기준으로 한 위상,  $n$ 은 고려된 조석분조의 수이다.

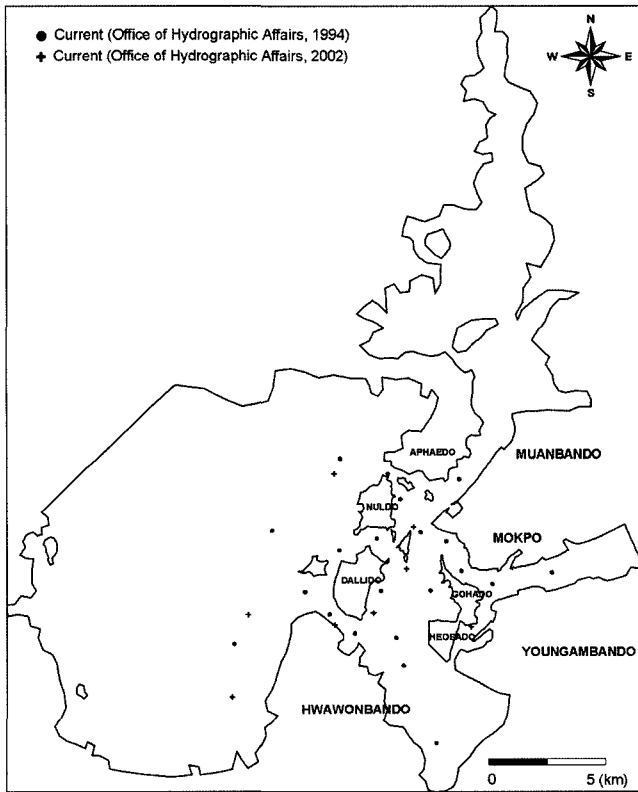


Fig. 3. Observation points of Office of Hydrographic Affairs.

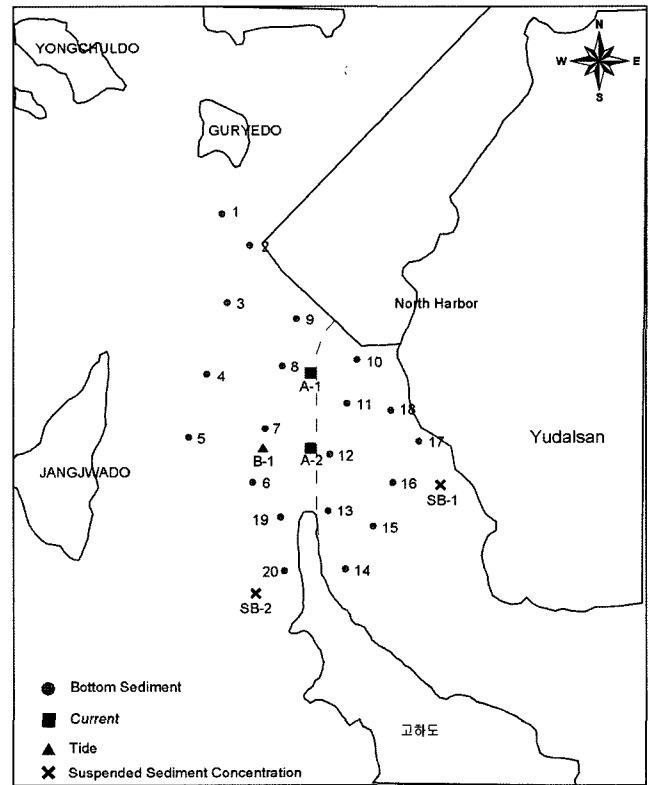


Fig. 4. Observations of 2003 survey.

수치모형의 신뢰성을 입증하기 위하여 목포항 조위변화에 대해 검증한 결과는 Fig. 5와 같으며, 진폭과 위상이 관측치와 일치하는 양호한 결과를 보였다. Fig. 3과 4에 표기된 정점에서 평균대조기 창조류와 낙조류의 크기를 비교하였다. Fig. 6과 7에서 보이는 바와 같이 낙조류 우세현상을 잘 재현하였으며, 계산치가 관측치와 전반적으로 잘 일치하였다.

조류패턴을 보면, 대조기 창조시(Fig. 8)는 화원반도 서측수로를 통해 남에서 북으로 최대 약 3 m/sec로 강하게 이동하며, 달리도 남쪽수로, 놀도와 달리도 사이에 있는 수로, 놀도와 압해도 사이에 있는 수로를 통해 1 m/sec이상의 강한 유속으로 내만에 유입된다. 남쪽에 있는 수로를 통해 유입된 해수의 대부분은 만내로 들어온 후

에 북쪽으로 이동하다가 가운데 있는 수로를 통해 들어와서 남쪽으로 분기된 해수와 합류하여 북쪽으로 이동하다가 일부는 목포시 쪽으로 이동한다. 만내로 유입된 대부분 해수는 압해도와 목포시 사이에 있는 수로를 통해 빠른 유속으로 북쪽으로 이동한다. 낙조시는 창조시와 방향이 반대되는 흐름특성을 보였으며(Fig. 9), 유속크기는 일부해역을 확대한 Fig. 9에서는 나타나지 않지만 화원반도 서측수로에서 크게 나타나 최대 약 3 m/s에 달하였으며, 압해도 남측과 동측수로, 달리도 남측수로에서도 1 m/s이상의 강한 흐름을 나타내었다.

### 3.2 퇴적물 수송

퇴적물 수송모형의 모형상수 결정에 참고하기 위해 Fig. 4에 포

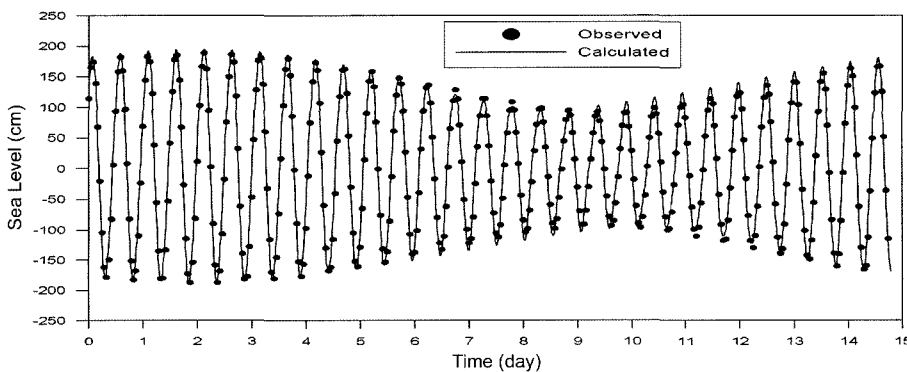


Fig. 5. Sea level change at Mokpo harbor.

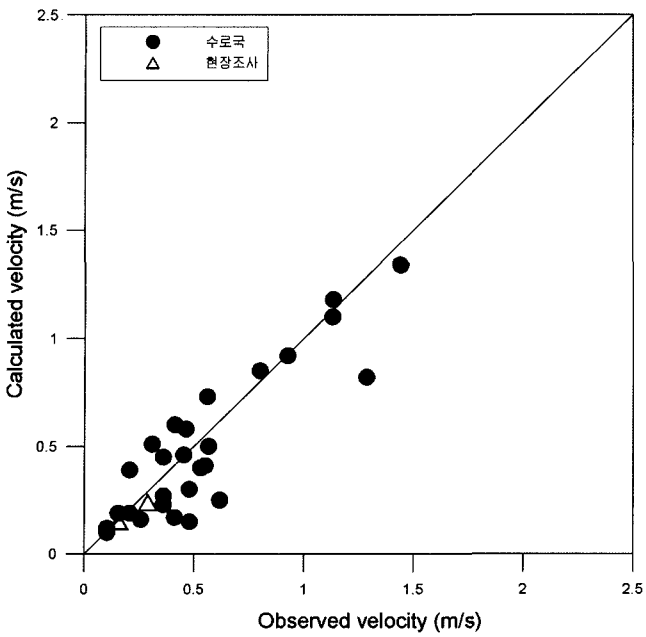


Fig. 6. Flood currents in spring tide.

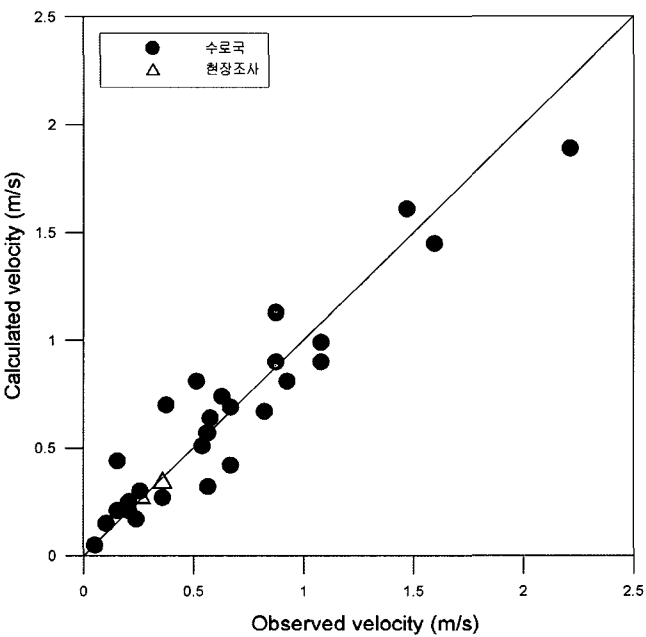


Fig. 7. Ebb currents in spring tide.

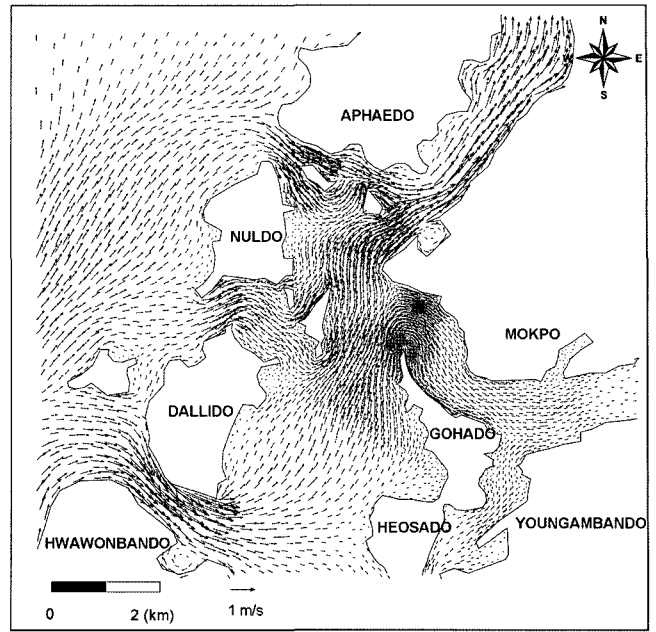


Fig. 8. Distribution of maximum flood currents in spring tide.

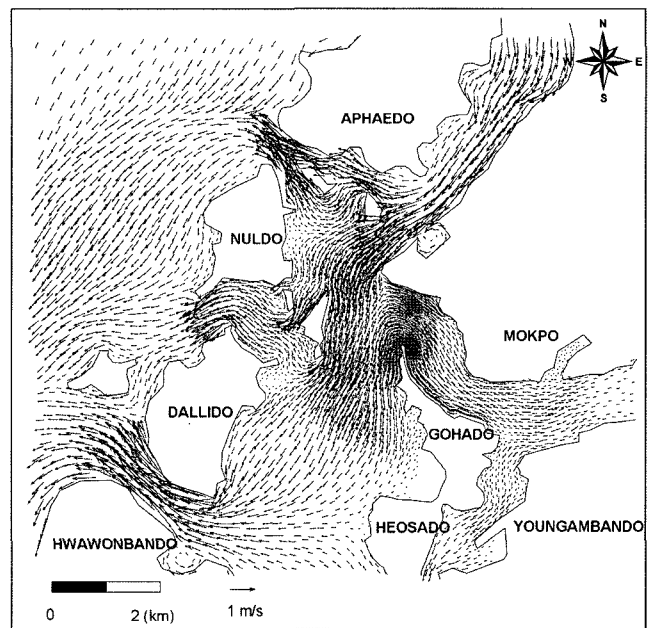


Fig. 9. Distribution of maximum ebb currents in spring tide.

시된 20개 정점에서 Grab을 사용하여 대림산업에서 채취한 퇴적물 시료의 특성을 실험실에서 미국 Malvern사의 자동입도분석기 (Mastersizer, 측정범위: 0.5~900  $\mu\text{m}$ )를 사용하여 입도분석을 하였으며, 시료를 500  $^{\circ}\text{C}$  이상의 고온에서 건조하여 수분과 물을 제거하여 건조전후 무게를 측정하는 방법으로 체적단위중량을 측정하였다. 측정된 입도분포(Fig. 10)를 보면, 입자크기가 주로 100  $\mu\text{m}$  미만으로 대부분 점착성 퇴적물로 구성되어 있었다. 표층퇴적물의 중앙입경의 크기는 6~10.6  $\mu\text{m}$ 이며, 체적단위중량(bulk density)은 1.32~1.73  $\text{g}/\text{cm}^3$ 이다. 표층 퇴적물의 체적단위중량의 평균치는 1.36

$\text{g}/\text{cm}^3$ 이며, Coring 된 시료중 3 m 깊이의 퇴적물 시료를 분석한 결과의 체적단위중량이 1.57  $\text{g}/\text{cm}^3$ 로 표층보다 크게 나타나 압밀이 상당히 진행된 것으로 나타났으며, 중앙입경은 1.7  $\mu\text{m}$ 로 미세하였다.

본 연구해역과 같이 서해안에 위치한 영광 앞바다의 점착성 퇴적물시료를 가지고 직선수로에서 수리실험하여 침식률을 측정한다. 김[1992]의 연구결과에 의하면,  $E_0$ 는 0.00188  $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$ ,  $\tau_c$ 는 0.185  $\text{N}/\text{m}^2$ ,  $\alpha$ 는 0.633이며, 실험에 사용된 시료의 체적단위중량은 약 1.44  $\text{g}/\text{cm}^3$ 이다. Roberts *et al.*[1998]에 의하면,  $E_0$ 와  $\tau_c$ 는 체적단위중량에 크게 의존하여 변화한다.  $E_0$ 는 체적단위중량에 반비례하고,

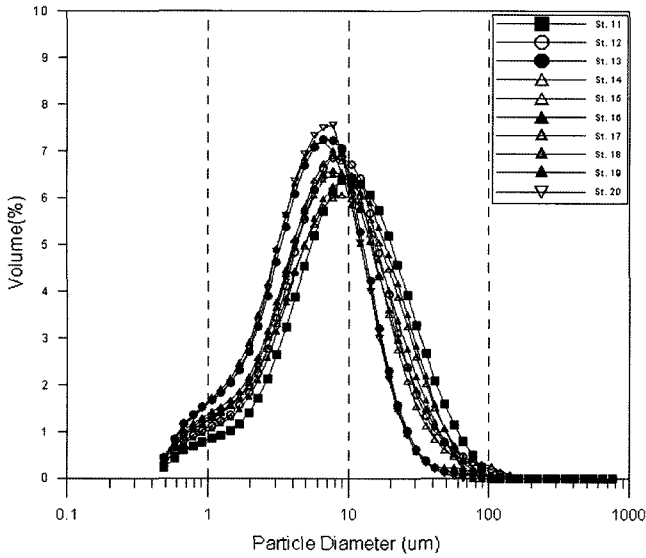


Fig. 10. Distribution of particle sizes.

Table 1. Physical properties of sampled bottom sediments.

St.	Bulk Density(g/cm <sup>3</sup> )	D <sub>50</sub> (μm)	Remark
1	1.51	6.0	
2	1.45	6.2	
3	1.48	7.2	
4	1.48	7.2	
5	1.58	8.0	
6	1.38	7.0	
7	1.37	7.6	
8	1.44	6.2	
9	1.63	6.7	
10	1.73	10.0	
11	1.39	10.6	Mean D <sub>50</sub> =7.5 μm
12	1.39	8.4	
13	1.32	6.2	
14	1.35	7.8	
15	1.33	8.7	
16	1.37	7.6	
17	1.44	8.0	
18	1.53	9.3	
19	1.43	6.0	
20	1.43	6.1	
core	1.57	1.7	

$\tau_c$ 는 체적단위중량에 비례한다. 표층퇴적물의 체적단위중량이 영광 앞바다 시료에 비하여 작으므로 침식률은 증가하고 침식한계응력은 감소할 것으로 예상되었다. 정확한 침식률 산정식의 계수를 결정하는 방법은 현장 또는 실험실에서 실험을 통해 결정하여야 하나 현실적으로 매우 어려우며 많은 시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 침식률에 대한 기존 실험 연구자료와 현장에서 채취된 퇴적물의 물성을 가지고 침식률을 간편하게 산정하였다. 목포해역과 인접하여 유사한 퇴적물 입자구성비를 가지고 있는 영광 퇴적물시료

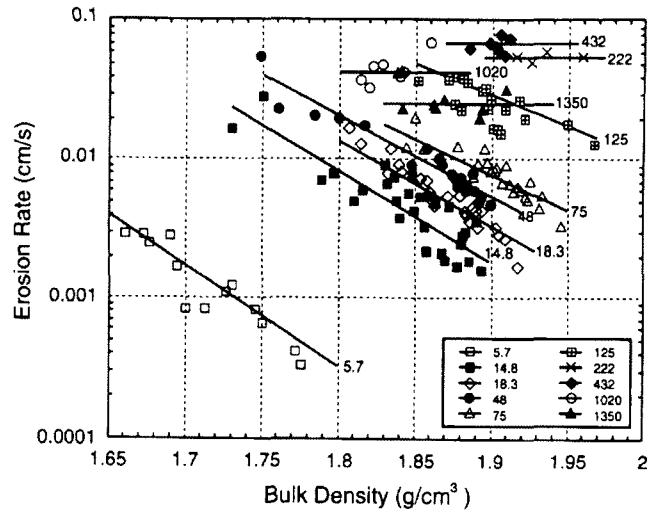


Fig. 11. Erosion rates as function of bulk density at shear stress of 1.6 N/m<sup>2</sup>.

에 대한 수리실험결과(침식한계응력과 침식률)를 기준으로 하고, 영광해역과 목포해역의 체적단위중량비 차이를 고려하여 침식률을 수정하였다. Roberts *et al.*[1998]에 의하면, 침식률은 체적단위중량에 따라 변화하며, 바닥마찰응력 1.6 N/m<sup>2</sup>인 경우에 대해서 실험한 결과는 Fig. 11과 같다. 전단응력 크기를 변화시키면서 실험한 결과에 의하면, 침식률은 체적단위중량과 선형적인 관계를 보였다. 본 연구에서는 5.7-432 μm 크기의 퇴적물 균등입자에 대해 입경크기 별로 체적단위중량 변화에 대한 침식률을 측정하여 얻은 Fig. 11의 관계를 사용하여 영광퇴적물에 대한 침식률 계산식을 수정하여 본 연구해역 퇴적물의 침식률을 산정하였다. 목포해역에 대해 수정된 값은  $E_0=0.002$ 와  $\tau_c = \tau_d = 0.13$  N/m<sup>2</sup>이며,  $\alpha$ 값은 김[1992]의 연구결과와 동일한 0.633을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 방법은 퇴적물의 함수비에 따라 침식률이 지역에 상관없이 일정하게 변화한다고 가정하여 침식률을 결정하였으나, 침식률은 체적단위중량에 의해서만 결정되는 함수가 아니므로 보다 정확한 평가를 위해서는 목포해역의 퇴적물 시료를 가지고 현장 또는 실험실에서 수리실험을 실시하여야 할 것이다.

퇴적물 수송모델링은 해수유동모형과 동일한 격자망에 대하여 수행하였으며, 계산시간간격은 2초, 확산계수는 1.0 m<sup>2</sup>/s를 사용하였다. 바다 퇴적층의 구성은 현장퇴적물 시료 분석결과에 기초하여, 표층에 체적단위중량이 1.36 g/cm<sup>3</sup>이고 입경이 7.5 μm인 퇴적물이 표층에 있고, 그 아래에는 압밀이 진행되어 단단해진 체적단위중량 1.57 g/cm<sup>3</sup>인 퇴적물이 존재한다고 가정하였다. 개방경계에서 경계 조건으로는 흐름이 모델영역 외부로 향하는 경우는 인접 내부점의 농도를 사용하여 외삽하는 방법으로 경계에서 농도를 계산하였으며, 흐름 방향이 내부로 향하는 경우는 흐름이 외부로 향할 때의 농도 값의 평균치를 지정하였다. 모의시 퇴적물 수송에 의한 침식 및 퇴적으로 인한 수심변화가 적다고 가정하여, 이미 모의된 유속 모의결과를 입력자료로 활용하였다. 실제로 퇴적물 수송 모의결과

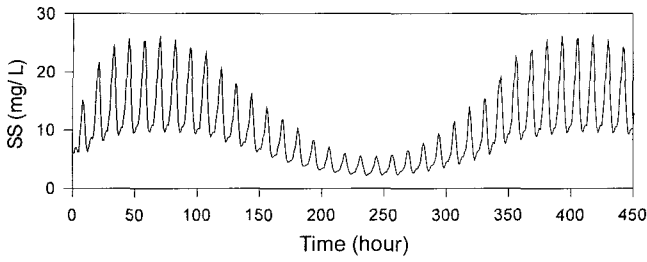


Fig. 12. Time variation of SS concentration at St. SB-1.

에 의하면 모의기간동안 수심변화는 10 cm 미만으로 적었다. 수심 변화가 큰 경우는 해수유동모형과 퇴적물 수송모형을 매 계산시간 단계마다 동시에 해석하는 연계 수치모델링을 하여야 한다. 퇴적물 수송 모의는 15일간의 예비계산을 통해 부유사 농도의 초기 공간 분포를 산정한 후에 이를 초기조건으로 사용하여 대조기와 소조기를 포함하는 30일간에 대해 연속적으로 실시하였다. 모형의 검증 방법으로는 퇴적과 침식에 의한 지형변화와 검증하거나 부유사 농도에 대한 검증으로 하는 방법이 있으며, 점착성 퇴적물의 경우에 부유사 농도를 검증하는 방법이 널리 이용된다. 본 연구에서도 부유사 농도에 대해 대조기와 소조기 부유사 농도 관측결과와 검증하였다. 모의결과는 현장측정 부유사 농도의 시간변화와 검증을 수행하였다. Fig. 12는 정점 SB-1에서 15일간의 부유사 농도변화이다. 유속이 강한 대조기에는 농도가 10~27 mg/l 사이에서 변화하며, 유속이 느린 소조기에는 부유사 농도가 10 mg/l 미만이었다. 15일간의 예비계산 결과를 초기조건으로 사용하여 모의한 결과로 정상상태에 도달했음을 확인할 수 있었고, 비교적 안정적인 결과를 보였으며, 그림에 나타내지 않은 후반기 15일간의 결과도 Fig. 12와 거의 같았다. Fig. 4의 정점 SB-1(목포항 입구)에서 측정한 자료와 모의결과를 조위차가 같은 기간을 선정하여 비교한 결과는 대조기 Fig. 13, 소조기 Fig. 14와 같으며, SB-2(고하도 북서측)에서 비교한 결과는 대조기 Fig. 15, 소조기 Fig. 16과 같다. 그림에서 관측결과는 상층, 중층, 하층에서 관측한 부유사 농도 값을 평균한 결과이다. 대조기는 2003년 5월 31일, 소조기는 2003년 6월 9일에 관측된 결과이다. 전반적으로 시간에 따른 변화 양상과 농도 값이 잘 일치하는 양호한 계산결과를 보였으나, SB-2의 대조기 모의결과는 관측농도와 큰 차이를 보였다. 관측농도와 계산농도와 달리 시간에 따라 증가하는 모습을 보였으며, 조시에 따른 변화양상이 다른 관

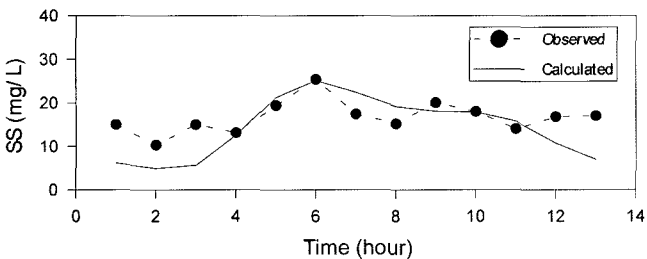


Fig. 13. Time variation of SS concentration of spring tide at St. SB-1.

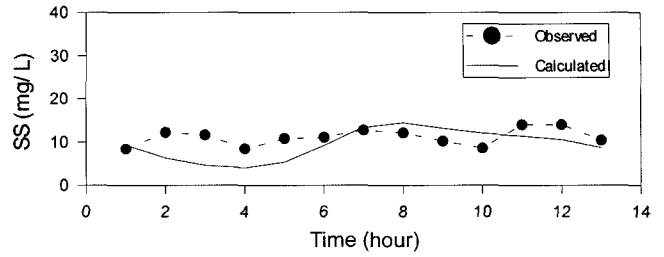


Fig. 14. Time variation of SS concentration of neap tide at St. SB-1.

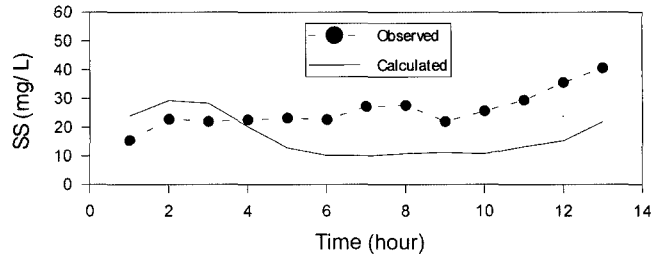


Fig. 15. Time variation of SS concentration of spring tide at St. SB-2.

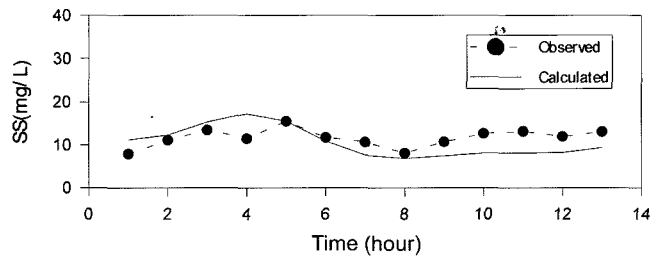


Fig. 16. Time variation of SS concentration of neap tide at St. SB-2.

측농도와는 다른 모습을 보였다. 따라서 측정오차로 추정되나 그 원인은 명확하지 않다. 퇴적물 수송모형에서 사용한 각종 상수의 결정을 퇴적물 시료에 대한 수리실험 없이 단순하게 하였음에도 불구하고 계산농도 값이 관측농도 값과 같은 범위에 있으며, 계산된 부유사농도의 조시에 따른 변화양상이 대체로 잘 일치하는 상당히 양호한 결과를 보였다. 따라서 본 연구에 사용한 방법이 완전하지는 않지만 점착성 퇴적물에 대한 침식률 측정자료가 없는 경우에 침식률을 결정하는 데 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 본 연구에서 사용한 방법은 정확한 수리실험자료에 근거하지 않은 것으로 본 연구해역에 대해서만 제한적으로 활용 가능할 수 있으며, 현재 제한된 연구결과가 있는 우리나라 연안해역의 점착성 퇴적물의 침식 및 퇴적 특성에 대한 다양한 실험적 연구 및 모델링 연구를 통해 추후 본 연구방법의 다른 해역에 적용가능성을 확인할 필요가 있다.

Fig. 17은 대조기 창조시 부유사 농도분포도, Fig. 18은 대조기 낙조시 부유사 농도분포도이다. 창조와 낙조에 따른 농도의 공간분포 형태는 거의 유사하였으며, 전반적으로 유속이 강한 수로 중앙부를 따라 고농도 부분이 나타나고 있으며, 해안선 부근에서 느린 유속으로 인하여 농도가 낮게 나타났다. 창조시와 낙조시의 부유사 농도 최고치는 Fig. 12에서와 보는 같이 거의 같다.

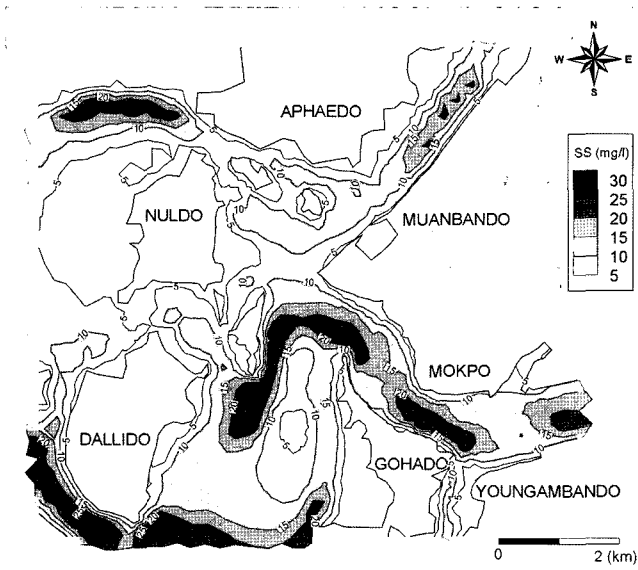


Fig. 17. Horizontal distribution of SS concentration at maximum flood currents.

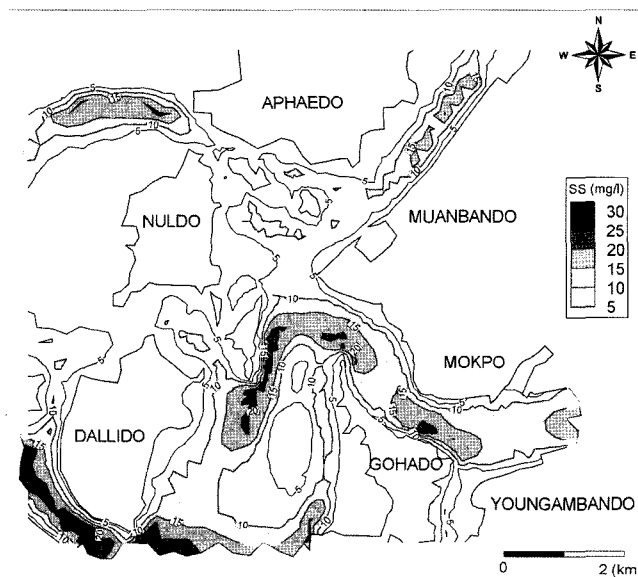


Fig. 18. Horizontal distribution of SS concentration at maximum ebb currents.

#### 4. 결 론

해안선이 복잡한 해역에서 효과적으로 격자를 형성할 수 있는 수치해석방법인 유한요소법을 사용하는 2차원 점착성퇴적물 수송 모형을 수립하였으며, 목포해역에 적용하여 모형의 현장 적용성을 검토하였다. 퇴적물 수송모형에서 침식을 산정식을 결정하기 위하여 인접해역에 대한 수리실험결과와 체적단위중량과 침식률의 관계에 대한 수리실험결과를 참조하여 현장 퇴적물의 입도분포와 체적단위중량 분석결과만으로 간편하게 침식률을 구하고 적용성을 검토하였다. 목포해역에 대해 해수유동을 모의한 결과, 조류변화와

낙조류 우세현상을 보이는 조류에 대해 수립된 모형이 잘 재현하였다. 단순한 방법으로 결정된 침식률 산정식을 사용하여 점착성 퇴적물의 수송과정을 모의한 결과, 모의에 의한 부유사 농도변화는 현장에서 관측된 대조기와 소조기의 농도변화와 전반적으로 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 침식률 산정식 결정에 사용한 방법의 현장 활용성을 확인할 수 있었으며, 본 연구방법은 서해안과 같이 점착성퇴적물이 넓게 분포되어 있는 지역에서의 퇴적물 수송과정을 모의하는 데 널리 활용될 수 있을 것이다. 그러나 현재 사용한 방법은 점착성 퇴적물의 응집, 붕괴 등의 복잡한 과정을 정확히 고려하지 않은 것으로 보다 정확한 퇴적물 수송과정의 규명을 위해서는 서해안 점착성 퇴적물의 응집, 퇴적, 침식 등에 대한 현장조사와 실험적 연구가 수치모의와 병행되어야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구에서 검증자료로 사용된 조류변화 및 부유사 농도변화 관측자료와 퇴적물 물성 파악을 위해 사용된 퇴적물 시료를 제공해 주신 대림산업에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 강주환, 임병선, 1998, “방조제 건설로 인한 목포해역에서의 오염확산양상 변화”, 대한토목학회논문집, 제18권, 제II-6호, 613-622.
- [2] 김차검, 1992, 점착성토사의 수송기구와 3차원 수송모형, 부산대학교 공학박사 학위논문.
- [3] 김태인, 2002, 금강하구의 해수유동과 퇴적과정, 성균관대학교 공학박사 학위논문.
- [4] 대림산업, 2003, 목포시관내 국도대체 우회도로 건설공사 해양조사.
- [5] 박광순, 1993, 연안해역 미세퇴적물의 침강특성, 부산수산대학교 공학박사 학위논문.
- [6] 수로국, 1994, 수로기술연보.
- [7] 수로국, 2002, 수로기술연보.
- [8] 이영재, 이상화, 황규남, “시화호 점착성 퇴적물의 침강 특성에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제19권 제4호, 42-48.
- [9] 정태성, 김창식, 1992, “이동경계를 고려한 유한요소 해수유동모형”, 한국해양·해양공학회지, 제4권 제3호, 687-699.
- [10] 정태성, 크랙 존스, 윌버트 릭, 2004, “침식률 측정결과를 사용하는 유사이동모형의 적용”, 한국수자원학회논문집, 제37권 제12호, 1033-1041.
- [11] 추용식, 1993, 세립질 부유퇴적물의 퇴적 특성에 관한 수조실험 연구, 서울대학교 이학석사 학위논문.
- [12] 황규남, 2002, “서해안 갯벌 점착성 퇴적물 침강속도 곡선식의 재검토”, 한국해양환경공학회지, 제5권, 제1호, 3-10.
- [13] 황규남, 소상돈, 김태민, “미세-점착성 퇴적물의 침식률 산정을 위한 실험적 연구”, 한국해양·해양공학회지, 제17권 제2호, 119-128.



- [14] Ariathurai, R., and Krone, B.K., 1976, "Finite element model for cohesive sediment transport.", *J. of Hyd. Div., ASCE*, Vol. 102, No. HY3, 323-338.
- [15] Cheng, N.S., 1997, "Simplified settling velocity formula for sediment particle.", *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 133, No. 2, 149-152.
- [16] Chung, T.J., 1978, *Finite Element Analysis in Fluid Dynamics*, McGraw-Hill, Inc.
- [17] McNeil, J., Taylor, C., and Lick, W., 1996, "Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth.", *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 6, 316-324.
- [18] Mehta, A.J., Mcanally, W.H., Hayter, E.J., Teeter, A.M., Schoellhamer, D., Heltzel, S.B., and Carey, W.P., 1989, "Cohesive sediment transport II: Application", *J. of Hyd. Eng.*, Vol. 115, No. 8, 1094-1112.
- [19] Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D., and Lick, W., 1998, "Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles", *J. of Hyd. Eng.*, Vol. 124, No. 12, 1261-1267.

---

2005년 2월 11일 원고접수

2006년 2월 3일 수정본 채택