

## 점착성 유사 수송의 수치모델링에 관한 연구

### A Study on Numerical Modeling of Cohesive Sediment Transport

정태성<sup>1</sup>

Tae Sung Jung<sup>1</sup>

#### 1. 서 론

우리나라 서해안과 남해안에는 입경이 작아 점착성을 띠는 세립퇴적물이 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 알게 한다. 그러므로 이러한 점착성 유사의 수송과정을 정확히 이해하는 것은 연안해역의 수질오염과정과 지형변화의 원인과 결과를 정확히 규명하는 데 있어 매우 중요하다. 특히 대부분 점착성 유사에 의해 발생하는 고농도의 현탁수는 수질을 악화시켜 연안생태계의 파괴를 초래하기도 하며, 물과 함께 이동하다가 항만과 같이 유속이 느린 곳에서 침강하면 항만매몰과 같은 문제가 발생하여, 수심유지를 위해 막대한 공사비를 지출하게 한다. 이러한 문제를 사전에 방지하기 위해서는 유사의 수송과정에 대한 정확한 예측이 필요하며, 이를 위해 실험 결과에 기초한 수치모델이 널리 사용되어 왔다 (Mehta et al., 1989).

본 연구에서는 서해안 및 남해안과 같이 해안선이 복잡한 해역에서 점착성 유사의 수송 모의에 적합한 2차원 유한요소모형을 수립하였다. 모델링 과정에서 침식을 계산에 기존 연구자들의 실험적 연구결과와 현장에서 채취한 퇴적물 시료를 분석하여 얻은 퇴적물 물리특성자료를 기초로 하여 간

편하게 산정식을 수립하는 방법의 현장적용 가능성을 검토하였다. 목포해역에서 점착성 유사 수송을 모의하고, 계산된 부유사 농도의 시간변화를 관측치와 상호 비교하여 사용한 방법의 타당성을 검증하였다.

#### 2. 수치모형

본 연구에서는 조류분포를 계산하기 위한 2차원 해수유동모형과 점착성 유사의 수송을 모의하기 위한 유사 수송모형으로 2차원 모형을 사용하였다. 해수유동모형은 섬이 많고 해안선이 복잡한 목포해역을 모형에서 정확히 고려할 수 있는 지배방정식으로 수심적분된 2차원 천수방정식을 사용하는 2차원 유한요소모형으로 자세한 내용은 정태성·김창식(1989)에 언급되어 있으며, 유사수송모형은 다음과 같다.

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (D_{xx}H\frac{\partial C}{\partial x} \\ + D_{xy}H\frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_{yx}H\frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy}H\frac{\partial C}{\partial y}) + Q_b \end{aligned} \quad (1)$$

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

<sup>1</sup> 한남대학교 토목환경공학과 교수

식 (1)은 해수유동모형과 같이 삼각형 유한요소를 사용하는 Galerkin 유한요소법을 사용하여 수치해석하였으며, 수치적분법으로 음해법을 사용하였고, 바닥경계면에서 유사 교환량인  $Q_b$ 는 침식량과 퇴적량의 차이로 다음과 같다.

$$Q_b = E - D \quad (2)$$

식 (2)에서  $E$ 는 침식량으로 바닥마찰응력  $\tau$ 가 침식한계전단응력  $\tau_c$ 보다 클 경우 발생하며, 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다(Ariathurai and Krone, 1976).

$$E = E_0(\tau/\tau_c - 1)^a \text{ (kg/m}^2\text{/sec)} \quad (3)$$

여기서,  $E_0$ 는 침식률 상수,  $\tau$ 는 바닥마찰응력,  $a$ 는 유사 특성에 따른 상수이다.

식 (3)에서 퇴적은 바닥마찰응력이 퇴적한계전단응력  $\tau_d$ 보다 작을 때 발생하며, 퇴적률  $D$ 는 점착성 유사의 경우 다음 식과 같이 나타낼 수 있다(Ariathurai and Krone, 1976).

$$D = w_s C \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d}\right) \quad (4)$$

여기서,  $w_s$ 는 유사 입자의 침강속도이다.

유사의 침강속도는 점착성 및 비점착성 유사의 침강속도 실험결과를 분석한 Cheng(1997)의 연구 결과에 의하면 다음과 같다.

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

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

### 3. 수치모형의 적용

#### 3.1 해수유동 모의

Fig. 1과 같이 목포해역을 대상으로 모형을 수립하였으며, 전체모델링 영역에 대한 유한요소 격자망은 Fig. 1과 같다. 수심자료는 수로국 발행 수치해도 No. 301, 321, 343,을 참고하였다. 모의결과는 수로국(2002)의 2000년도 목포항 관측조위 및 2003년의 조위관측결과(대림산업, 2003)와 조위를 검증하였고, 1994년과 2002년 수로국 조류 관측결과(수로국, 1994; 수로국, 2004) 및 2003년 조류 관측결과(대림산업, 2003)와 조류를 검증하였다. 모형검증에 사용된 수로국 조류 관측자료의 관측 위치도는 Fig. 2, 2003년도 해양조사 위치도는 Fig. 3과 같다.

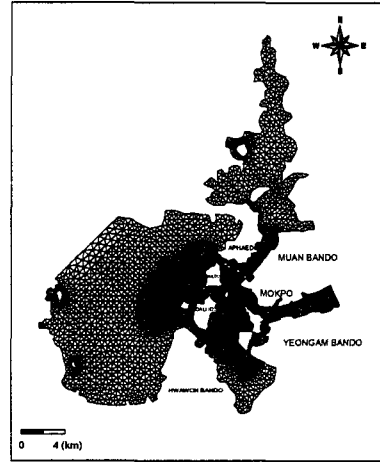


Fig. 1 Finite element grid system

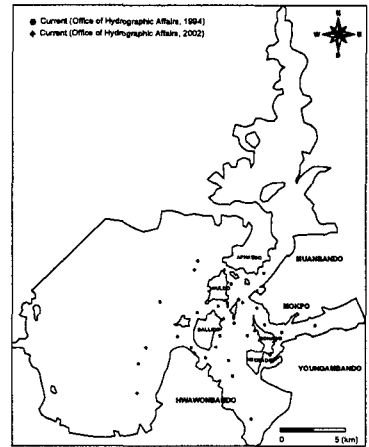


Fig. 2 Observation points of Office of Hydrographic Affairs

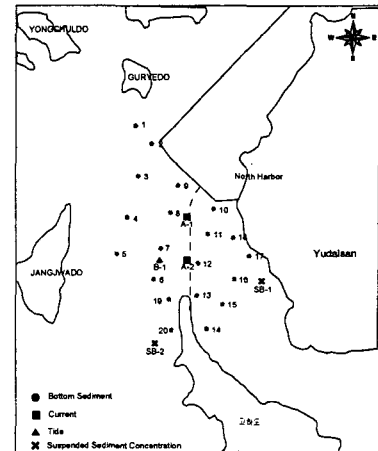


Fig. 3 Observations of 2003 survey

모의시 조절과정을 거쳐 Manning의 조도계수는 0.021, 계산시간간격 0.5 초를 사용하였다. 평균대조기와 평균소조기를 포함하는 15일간에 대해 연속모의하였다. 모형의 개방경계에서는 목포해역의 대표조석인 M<sub>2</sub> 분조와 S<sub>2</sub> 분조의 합성조석을 부여하였으며, 본 조사해역의 조류특징인 낙조 우세현상을 고려하기 위하여 강주환·임병선(1998)이 제안한 낙조우세 특성을 고려한 개방경계 조건을 사용하였다. Fig. 2와 3에 표기된 정점에서 평균대조기 창조류와 낙조류의 크기를 비교하였다. Fig. 4와 5에서 보이는 바와 같이 낙조류 우세현상을 잘 재현하였다.

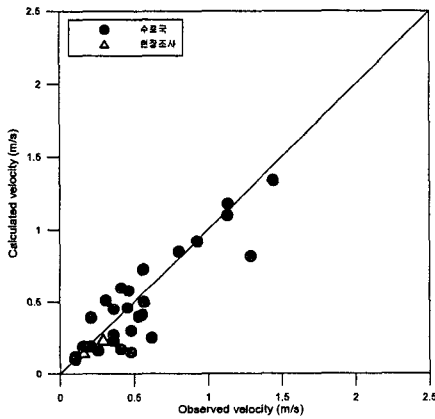


Fig. 4 Flood currents in spring tide

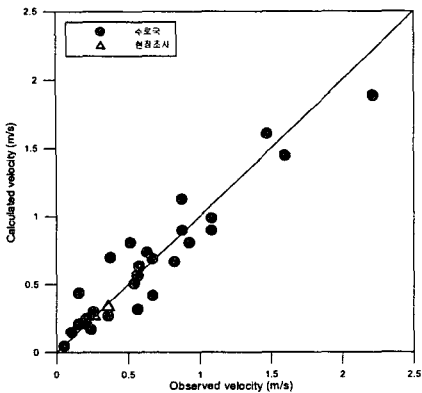


Fig. 5 Ebb currents in spring tide

### 3.2 유사수송 모의

유사 수송모형의 모형상수 결정에 참고하기 위해 Fig. 4에 표시된 20개 정점의 표층 유사시료의 입도를 미국 Malvern사의 자동입도분석기 (Mastersizer, 측정범위: 0.5 ~ 900 μm)를 사용하

여 분석하였으며, 시료를 500°C 이상의 고온에서 건조하여 수분과 물을 제거하여 건조전후 무게를 측정하는 방법으로 체적단위중량을 측정하였다. 측정된 입도분포(Fig. 6)를 보면, 입자크기가 주로 100 μm 미만으로 대부분 점착성 유사로 구성되어 있다. 표층퇴적물의 중앙입경의 크기는 6 ~ 10.6 μm이며, 체적단위중량(bulk density)은 1.32 ~ 1.73 g/cm<sup>3</sup>이다. 표층퇴적물의 체적단위중량의 평균치는 1.36 g/cm<sup>3</sup>이며, Coring 된 시료중 3 m 깊이의 퇴적물 시료를 분석한 결과는 체적단위중량이 1.57 g/cm<sup>3</sup>로 표층보다 크게 나타나 압밀이 상당히 진행된 것으로 나타났으며, 중앙입경은 1.7 μm로 미세하였다.

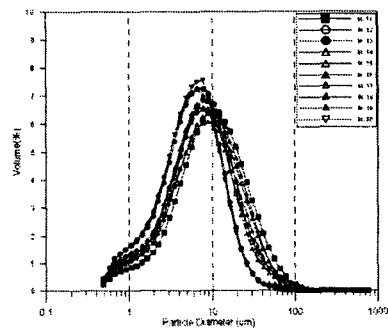


Fig. 6 Distribution of particle sizes

본 연구해역과 같이 서해안에 위치한 영광 앞 바다의 점착성 퇴적물시료를 가지고 직선수로에서 수리실험하여 침식률을 측정한 김차겸(1992)의 연구결과에 의하면,  $E_0$ 는 0.00188 kg/m<sup>2</sup>/s,  $\tau_c$ 는 0.185 N/m<sup>2</sup>,  $\alpha$ 는 0.633이며, 실험에 사용된 시료의 체적단위중량은 약 1.44 g/cm<sup>3</sup>이다. Roberts et al.(1998)에 의하면,  $E_0$ 는 체적단위중량에 반비례하고,  $\tau_c$ 는 체적단위중량에 비례한다. 표층퇴적물의 체적단위중량이 영광앞바다 시료에 비하여 작으므로 침식률은 증가하고 침식한계응력은 감소할 것이다. 본 연구에서는 침식률에 대한 기존 실험 연구자료와 현장에서 채취된 퇴적물의 물성을 가지고 침식률을 간편하게 산정하였다. 목포해역과 인접하여 유사한 퇴적물 입자구성비를 가지고 있는 영광 퇴적물시료에 대한 수리실험결과(침식한계응력과 침식률)를 기준으로 하고, 영광해역과 목포해역의 체적단위중량비 차이를 고려하여 침식률을 수정하였다. 목포해역에 대해 수정된 값은  $E_0 = 0.002$ 와  $\tau_c = \tau_d = 0.13$  N/m<sup>2</sup>이며,  $\alpha$  값은 김차겸(1992)의 연구결과와 동일한 0.633을 사용하

였다.

유사 수송모델링은 해수유동모형과 동일한 격자망에 대하여 수행하였다. 바다 퇴적층의 구성은 현장퇴적물 시료 분석결과에 기초하여, 표층에 체적단위중량이  $1.36 \text{ g/cm}^3$ 이고 입경이  $7.5 \mu\text{m}$ 인 퇴적물이 표층에 있고, 그 아래에는 압밀이 진행되어 단단해진 체적단위중량  $1.57 \text{ g/cm}^3$ 인 퇴적물이 존재한다고 가정하였다. 유사 수송 모의는 15일간의 예비계산을 통해 부유사 농도의 초기 공간분포를 산정한 후에 이를 초기조건으로 사용하여 대조기와 소조기를 포함하는 30일간에 대해 연속적으로 실시하였다. 모형의 검증방법으로는 퇴적과 침식에 의한 지형변화와 검증하거나 부유사 농도에 대한 검증으로 하는 방법이 있으며, 점착성 유사의 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. 4의 정점 SB-1(목포항 입구)에서 측정한 자료와 모의결과를 조위차가 같은 기간을 선정하여 대조기에 비교한 결과는 Fig. 7과 같다. 전반적으로 시간에 따른 변화 양상과 농도 값이 잘 일치하는 양호한 계산결과를 보였다. 유사 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 유사에 대한 침식률 측정자료가 없는 경우에 침식률을 결정하는데 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

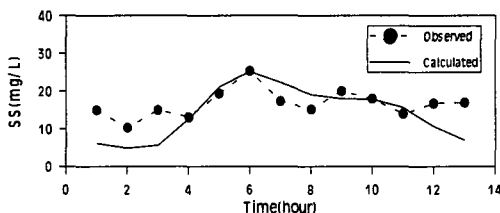


Fig. 7 Time variation of SS concentration of spring tide at St. SB-1

#### 4. 결론

해안선이 복잡한 해역에서 효과적으로 격자를 형성할 수 있는 수치해석방법인 유한요소법을 사

용하는 2차원 점착성유사 수송모형을 수립하였으며, 목포해역에 적용하여 모형의 현장 적용성을 검토하였다. 유사 수송모형에서 침식률 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, 조위변화와 낙조류 우세현상을 보이는 조류에 대해 수립된 모형이 잘 재현하였다. 단순한 방법으로 결정된 침식률 산정식을 사용하여 점착성 유사의 수송과정을 모의한 결과, 모델에 의한 부유사 농도변화는 현장에서 관측된 농도변화와 전반적으로 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 침식률 산정식 결정에 사용한 방법의 현장 활용성을 확인할 수 있었으며, 본 연구방법은 서해안과 같이 점착성 유사가 넓게 분포되어 있는 지역에서의 유사 수송과정을 모의하는 데 널리 활용될 수 있을 것이다. 그러나 현재 사용한 방법은 점착성 유사의 응집, 붕괴 등의 복잡한 과정을 정확히 고려하지 않은 것으로 보다 정확한 유사 수송과정의 규명을 위해서는 서·남해안 점착성 유사의 응집, 퇴적, 침식 등에 대한 현장조사와 실험적 연구가 수치모의와 병행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

강주환, 임병선 (1998). 방조제 건설로 인한 목포해역에서의 오염확산양상 변화, 대한토목학회 논문집, 제18권, 제II-6호, 613-622.  
 김차겸 (1992). 점착성토사의 수송기구와 3차원 수송모델, 부산대학교 공학박사 학위논문.  
 대림산업 (2003). 목포시관내 국도대체 우회도로 건설공사 해양조사.  
 수로국 (1994). 수로기술연보.  
 수로국 (2002). 수로기술연보.  
 정태성, 김창식 (1992). 이동경계를 고려한 유한요소 해수유동모형, 한국해양·해양공학회지, 제4권 제3호, 687-699.  
 Ariathurai, R., and Krone, B.K. (1976). Finite element model for cohesive sediment transport., J. of Hyd. Div., ASCE, 102(HY3), 323-338.  
 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., 115(8), 1094-1112.  
 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., 124(12)1261-1267