

# 경계밀착좌표계에서 2차원 퇴적물 이동확산 수치모형의 개발

정태성\*

## 1. 서론

퇴적물 이동·확산에 관한 연구는 자연 하천, 연안 해역 등에서 홍수 및 수공구조물의 건설로 인한 침식 및 퇴적문제, 퇴적물과 함께 움직이는 오염물질의 이동·확산에 따른 환경문제, 부유 퇴적물에 의해 발생하는 탁도에 의한 생태계의 교란 등과 관련하여 주로 연구되어 왔다.

퇴적물의 이동·확산과정을 설명하고 규명하기 위해서는 현장조사, 수리실험, 수치실험 등을 사용할 수 있다. 여러 방법중 장래에 대한 예측 및 퇴적물 이동현상 규명을 위해 가장 효율적인 방법은 수치모형으로 수치모의를 통하여 복잡한 퇴적물의 퇴적 및 침식, 확산과정을 규명할 수 있다. 퇴적물 연구에 있어서 가장 중요한 것은 퇴적물 이동과 관련된 퇴적물과 물사이의 경계에서 침식, 퇴적 현상을 정확히 묘사하는 것으로 대부분 실험결과에 기초한다. 그러나, 침식과 퇴적현상에 대한 연구에 많은 연구가 있었음에도 불구하고, 아직도 많은 부분이 규명되지 않았다. 최근에 미국 캘리포니아대학의 연구팀은 SEDFLUME이라는 현장 침식을 실험장치를 개발하여 현장에서 각란되지 않고 채취된 퇴적물 시료를 사용해서 침식률을 측정하였다(McNeil 등, 1996; Roberts 등, 1998). 이 장치는 각란되지 않고 채취된 현장 퇴적물의 침식률을 정확히 측정할 수 있으며, 기존의 침식률 측정장치들과는 달리 홍수, 폭풍 등에 의하여 주로 발생하는 큰 바닥마찰용력하에서 침식률을 측정할 수 있다. 대체로 평상시는 거의 퇴적과 침식이 거의 발생하지 않으며, 폭풍통과 시와 같이 유속이 강하여 바닥마찰이 큰 경우에 대부분의 침식과 퇴적이 발생하며, 이때 바닥지형이 크게 변화한다. 따라서, 큰 마찰용력 작용시 침식률과 퇴적물의 측정은 퇴적물 이동확산과정의 규명 및 예측에 있어서 매우 중요하다.

본 연구에서는 SEDFLUME을 사용하여 정확히 측정된 현장 침식률 자료를 활용하여 침식률을 계산하여 퇴적물 이동모형의 불확실한 요소를 줄임으로써 보다 정확히 퇴적물 이동과정을 계산할 수 있는 모형을 개발하였다. 모형은 복잡한 지형을 갖는 자연하천과 연안해역을 보다 현실감 있게 표현할 수 있도록 경계밀착좌표계(boundary fitted coordinate)를 사용한다. 또한, 부유사와 소류사를 함께 계산하여, 세립 및 조립 퇴적물의 이동·확산 연구에 활용할 수 있도록 하였다. 수립된 모형을 1차원 수로에서 장갑화 현상의 해석에 적용하여 모형의 정확성을 입증하고, 2차원 확장수로에서 장갑화현상을 해석하였다.

## 2. 수치모형의 개요

개발된 수치모형은 복잡한 자연하천과 연안해역에 적용성을 갖기 위하여 경계밀착좌표계를 사용하며, 수심방향의 유속변화를 무시한 평면 2차원 모형이다. 퇴적현상에 중요한 곳은 대체로 수평공간에 대해 수심이 작은 곳으로 수심방향으로 잘 혼합되었다는 가정하에 평면 2차원 모형을 사용하여 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있다. 2차원 유동, 퇴적물 이동·확산과 관련한 지배방정

\* 한남대학교 토목환경공학과 부교수

식과 경계조건은 다음과 같다.

### 2.1 물의 유동 방정식

자연하천과 연안해역 등의 자연수피에서 물의 유동은 수심방향으로 잘 혼합된 특성을 갖는 경우에 다음과 같은 수심적분된 2차원 천수방정식이 사용될 수 있다.

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

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

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

여기서,  $\zeta$ 는 평균수심으로부터 수위변화,  $f$ 는 Coriolis 상수,  $H$ 는 총수심 ( $= h + \zeta$ ),  $A_h$ 는 수평 와점성계수,  $g$ 는 중력가속도,  $\tau_{ux}$ 와  $\tau_{vy}$ 는 각각  $x, y$ 방향 바람마찰응력, 수심적분유속  $U = \int_{-h}^{\zeta} u \, dz$ ,  $V = \int_{-h}^{\zeta} v \, dz$ ,  $u$ 와  $v$ 는 각각  $x$ 와  $y$ 방향의 유속,  $z$ 는 수심방향이며, 바닥마찰응력은  $\tau_{bx} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $\tau_{by} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $C_f$ 는 바닥마찰계수이다.

### 2.2 퇴적물 수송방정식

퇴적물 수송은 크게 물과 함께 움직이는 부유사와 바닥경계를 따라 물의 움직임보다 느리게 움직이는 소류사로 구분할 수 있다. 부유사는 물속에 존재하는 난류가 퇴적물 입자의 무게보다 클 때 발생한다. 대체로 입자크기가  $200 \mu m$ 보다 작은 경우는 부유사로만 이동한다. 물속에 존재하는 혼합 퇴적물은 여러크기의 입자로 구성되어 있으며, 일반적으로 각 입자그룹의 평균 입자에 대하여 부유사와 소류사 이동을 계산한다.

부유사 수송방정식은 다음과 같다. 입도분포를 갖는 퇴적물을 대표적인  $n$ 개의 입자로 구분하면, 입자  $k(=1, 2, \dots, n)$ 의 부유사 확산방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(HC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VC_k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h H \frac{\partial C_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h H \frac{\partial C_k}{\partial y} \right) + Q_{s,k} \quad (4)$$

여기서,  $C_k$ 는 입자  $k$ 의 농도,  $D_h$ 는 수평 확산계수,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $Q_{s,k}$ 는 입자  $k$ 의 물과 퇴적물사이 바닥경계층에서 유출입량(부유사 침식물  $E_{s,k}$  - 부유사 퇴적물  $D_{s,k}$ )이다.

각 대표입자  $k$ 에 대한 소류사 이동은 각 수평계산격자에 대하여 다음과 같은 박스모형에 의하여 계산되었다.

$$V_k \frac{dC_{b,k}}{dt} = \sum_{l=1}^4 Q_{l,k} - S_k \quad (5)$$

여기서,  $C_{b,k}$ 는  $k$ 입자의 소류사 농도,  $V_k$ 는  $k$ 입자의 소류사 이동부분의 총체적으로 격자의 수평면적과 소류사 이동두께의 곱에 의하여 계산되며,  $Q_{l,k}$ 는 수평경계면  $l$ 을 통한  $k$ 입자의 소류사 수평이동량,  $S_k$ 는 바닥경계면에서  $k$ 입자의 소류사 유출입량으로 침식률  $E_{b,k}$ 와 퇴적률  $D_{b,k}$ 의 차이이다.

$Q_{l,k}$ 는 격자의 수평 경계면을 통한 퇴적물 이동량으로 다음과 같다.

$$Q_{l,k} = u_{b,k} \delta_{b,k} b C_{b,l,k} \quad (6)$$

여기서,  $u_{b,k}$ 는 소류사 이동속도,  $\delta_{b,k}$ 는 소류사 이동두께,  $b$ 는 소류사 이동방향에 직각으로 격자의 폭,  $C_{b,l,k}$ 는 각 단면에서  $k$ 입자의 소류사 농도이다. 소류사 이동속도, 이동두께는 다음과 같다(van Rijn, 1984a).

$$u_{b,k} = 1.5 T^{0.6} [(s-1)gd]^{0.5} \quad (7)$$

$$\delta_{b,k} = 3 d d_*^{0.6} T^{0.9} \quad (8)$$

여기서,  $s$ 는 퇴적물의 단위중량(=2.65),  $g$ 는 중력가속도,  $d$ 는 퇴적물의 평균입경,  $T = \frac{(\tau - \tau_{cb})}{\tau_{cb}}$ ,  $\tau$ 는 바닥마찰응력,  $\tau_{cb}$ 는 침식한계응력으로 바닥에 있는 퇴적물이 이동하기 시작할 때의 마찰응력,  $d_*$ 는 입자변수(=  $d[(s-1)g/\nu^2]^{1/3}$ ),  $\nu$ 는 물의 동점성계수이다.

### 2.3 물-퇴적물 경계조건

물과 퇴적물의 경계에서는 퇴적물의 침식과 물속에 있는 부유사 및 저층경계부근에 있는 소류사의 퇴적이 발생한다. 침식된 바닥 퇴적물은 바닥마찰응력의 크기에 따라 일부는 소류사로 이동하고, 일부는 부유사로 이동한다(그림 1). 퇴적물의 침식률( $E$ )은 부유사로 가는 부유 침식률( $E_s$ )와 소류사로 가는 소류 침식률( $E_b$ )로 구분할 수 있다. 전체 침식률은 SEDFLUME을 이용한 실험결과로부터 얻을 수 있다. SEDFLUME을 이용하여 저층퇴적물의 깊이별로 전단응력에 따른 침식률을 구할 수 있다. 미국 Lower Fox River, Detroit River, Santa Barbara Slough에서 각란되지 않고 채취된 약 1 m 길이의 코아시료를 사용하여 SEDFLUME 실험자료에 의하면, 침식률은 채취된 시료의 단위체적당 무게에 근거한 퇴적물의 체적밀도(bulk density), 바닥마찰응력에 주로 의존한다. 체적밀도는 일반적으로 퇴적층의 깊이와 퇴적기간이 증가함에 따라 증가하며, 퇴적물의 함수비가 증가함에 따라 감소한다. 침식률은 바닥마찰응력의 증가에 따라 증가하고, 체적밀도의 증가에 따라 감소한다. 또한, 침식률은 수심과 전단응력의 증가에 따라 증가한다. 임의 깊이의 바닥마찰응력하에서 침식률은 전단응력과 수심별로 측정된 실험자료를 선형내삽하여 구할 수 있다.

여러 크기의 입자를 포함하는 비점착성(조립질) 퇴적물은 크기가 작은 퇴적물의 소류사 이동에 따라 바닥에 퇴적된 퇴적물의 입자구성비가 변하는 장갑화현상을 겪게 된다.

이에 따라 표층 퇴적물의 조립화로 쉽게 침식가능한 퇴적물층의 두께가 감소한다. 이러한 장갑화 현상(armoring)은 조립퇴적물의 퇴적 및 침식현상을 연구하는 데 있어서 매우 중요하며, 저층퇴적물을 활성층(active layer), 비활성층(parent bed layer)으로 구분하여 연구되어 왔다. 활성층은 흐름에 의하여 한번에 침식될 수 있는 퇴적층의 두께를 나타내며, 활성층 두께에 대해서는 여러 가지가 제안되어 왔다. 본 연구에서는 활성층 두께로 대략 바닥퇴적물 평균입경의 2배를 사용하였다. van Rijn(1984b)은 기존 실험결과를 정리하여 전체 퇴적물 수송량중 부유 수송량의 비율에 관한 연구결과를 제시하였다. 본 연구에서는 수송량과 침식률이 비례한다고 가정하였다.

퇴적률은 정지상태에 있는 물속에서는  $k$  입자의 침강속도  $w_{s,k}$ 와 바닥층에서 부유사의 농도  $C_{kb}$ 의 곱으로 표현할 수 있다. 그러나 실제 자연상태에서는 난류로 인하여 침강확률이 변화하므로 확률의 개념이 도입되어 부유사 퇴적률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D_{s,k} = P_{s,k} w_{s,k} C_{kb} \quad (9)$$

퇴적확률  $P_{s,k}$ 는 물의 흐름이 정지상태인 경우에 1이며, 난류가 증가함에 따라 감소한다. 본 연구에서는 비점착성 퇴적물의 퇴적확률 계산에 난류의 불규칙성을 고려하기 위해 Gaussian분포함수를 사용하였으며(Gessler, 1967), 입자크기가 작은 점착성 퇴적물 ( $d \leq 200 \mu m$ )의 퇴적확률은 Ariathurai and Krone(1976) 방법을 사용하였다. 침강속도  $w_{s,k}$ 는 Cheng(1997)의 식[  $= \frac{\nu}{d} (\sqrt{25 + 1.2a_*^2} - 5)^{1.5}$  ]을 사용하였다. 점착성 토사의 부유사 농도는 모든 수심에서 일정한 것으로 생각할 수 있으나, 비점착성 부유사의 농도는 수심분포를 갖는 것으로 알려져 있다. 따라서, 퇴적률은 바닥층에서 농도에 비례하며, 수심평균농도와 바닥경계층 농도의 비는 van Rijn(1984b)의 방법을 사용하였다.

#### 2.4 좌표변환과 수치해석

자연하천과 연안해역은 대부분 복잡한 육지경계를 갖고 있으며, 이는 경계밀착좌표계(boundary fitted coordinate)를 사용하면 복잡한 지형을 보다 정확히 표현할 수 있다. 따라서, 유동과 퇴적물 수송에 관한 방정식들을 경계밀착좌표계에서 방정식으로 변환한 후에 각각의 계산격자요소에 대하여 적분하여 계산하는 유한체적법(Ziegler and Lick, 1985)을 사용하여 수치해석하였다. 사용된 유한체적법은 시간과 공간에 대하여 2차의 정도를 갖는다.

### 3. 모형의 검증

길이 20 m, 폭 0.8 m인 수로를 길이방향으로 1 m, 폭 방향으로 0.5 m인 격자망을 구성하여 유량이 30 l/sec(수심 6.5 cm, <실험 1>), 31.4 l/sec(수심 6.0 cm, <실험 2>)에 대하여 수치실험하였다. 복합퇴적물의 초기입경분포는 그림 2의 Exp.(t = 0)와 같다. 계산결과는 Ashida와 Michiue의 수치실험결과(Voget 등, 1992)와 비교되었다. 계산시 침식률 자료로는 Roberts 등(1988)의 입자크기 0.2 ~ 1.4 mm까지의 실험결과를 참고하였으며, 1.4 mm보다 큰 입자에 대해서는 실험결과를 외삽하여 사용하였다. 민감도 분석에 의하면 조립자의 침식률은 침식깊이에는 영향이 있으나, 입경분포는 터무니 없는 값을 사용한 경우를 제외하고는 계산결과에 거의 영향을 미치지 않았다. <실험 1>의 경우를 보면, 본 모형에 의해 계산된 결과는 입경 2.0 mm와 0.4 mm부근에서 일부 차이를 제외하고는 실험치와 일치하는 매우 양호한 계산결과를 보였다. 그림에서 점선은 1차

원 모형인 MIDAS모형에 의하여 계산된 결과로 2.0 mm이하 퇴적물 분포에서 실험치와 큰 차이를 보이고 있다. <실험 2>에 대한 모의 결과를 보면, 계산결과가 실험치와 약간의 차이를 제외하고는 입도분포 경향이 비슷한 모습을 보이고 있다. 그러나, <실험 1>에서와 마찬가지로 MIDAS 모형은 장갑화 현상을 제대로 모의하지 못하고 있다. 이상과 같은 결과를 볼 때, 본 모형이 1차원 모형인 MIDAS모형에 비하여 장갑화 현상을 비교적 정확히 예측하고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 4는 각입자의 구성비가 시간에 따라 변하는 모습을 보여주고 있다. 시간이 지남에 따라 세립자가 침식되어 하류로 이동함에 따라 퇴적물중 조립자의 비율은 증가하고 세립자의 비율은 감소하는 모습을 보이고 있으며, 이 과정은 초기 30분에 활발하게 일어남을 나타낸다.

이상과 같이 모형의 정확성이 입증됨에 따라 실제 2차원 하천에서 모형의 적용성을 검토하기 위하여 폭이 2.75 m에서 8.25 m로 확장하는 2차원 수로(그림 5; 유량 = 2 m<sup>3</sup>/sec) 및 퇴적물의 침식 및 퇴적으로 인한 장갑화 현상을 해석하였다.

#### 4. 결 론

침식을 측정자료를 사용하여 모형의 정확도를 향상시킨 2차원 모형이 개발되었으며, 개발된 모형은 1차원 수로에서 장갑화 현상을 비교적 정확히 모의하였다. 이는 모형내 조절변수의 하나인 침식을 부분을 현장자료에 의존할 수 있도록 하여 예측 정확도 개선에 기여하리라 생각된다.

#### 5. 참고문헌

- 1) Ariathurai, R., and Krone, B.K. (1976). "Finite element model for cohesive sediment transport.", *J. of the Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 102, No. HY3, pp. 323~338.
- 2) Cheng, N.S. (1997). "Simplified settling velocity formula for sediment particle." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 133(2), pp. 149-152.
- 3) Gessler, J. (1967). "The beginning of bedload movement of mixtures investigated as natural armoring in channels." *Translation T-5*, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology.
- 4) McNeil, J., Taylor, C., and Lick, W. (1996). "Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 122(6), pp. 316-324.
- 5) Roberts, J., Jepsen, R., Gotthard, D., and Lick, W. (1998). "Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 124(12), pp. 1261-1267.
- 6) van Rijn, L.C. (1984a). "Sediment transport, Part I: Bed load transport." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 110(10), pp. 1431-1456.
- 7) van Rijn, L.C. (1984b). "Sediment transport, Part II: Suspended load transport." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 110(11), pp. 1613-1641.
- 8) Vogel, K.R., van Niekerk, A., Slingerland, and John, S.B. (1992). "Routing of heterogeneous sediments over movable bed : Model verification." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 118(2), pp. 263-279.
- 9) Ziegler, C.K., and Lick, W. (1986). "A numerical model of the resuspension, deposition, and transport of fine-grained sediments in shallow water." *Report ME-86-3*, UCSB.

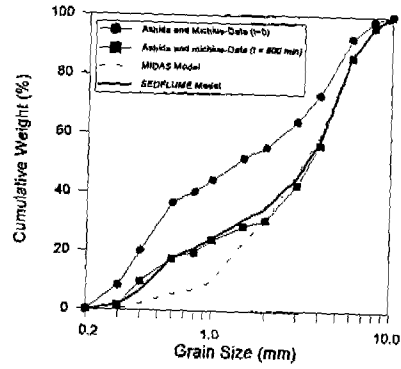
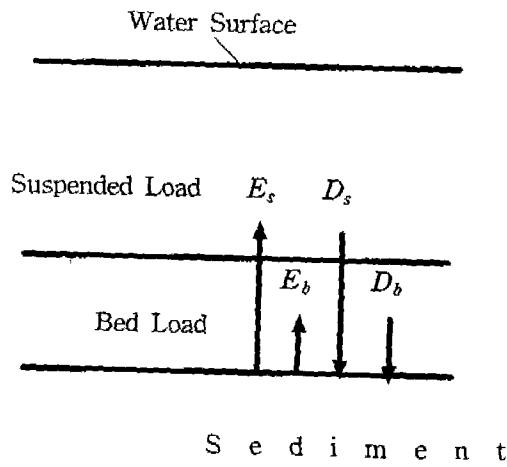


그림 2. 입도분포 계산결과(실험 1)

그림 1. 물-퇴적물 경계에서 퇴적물 이동 개념도

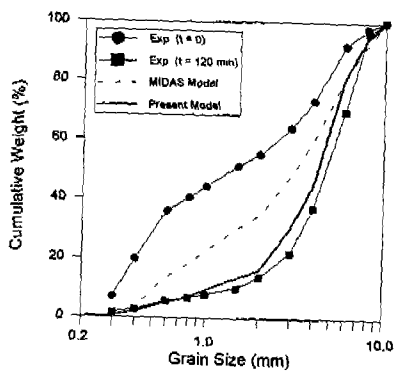


그림 3. 입도분포 계산결과(실험 2)

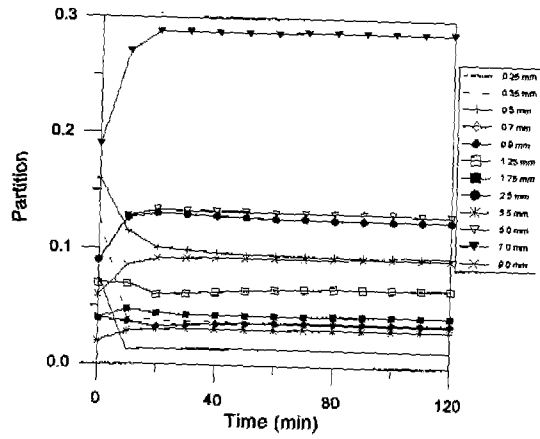


그림 4. 입자구성비의 시간변화(실험 1)

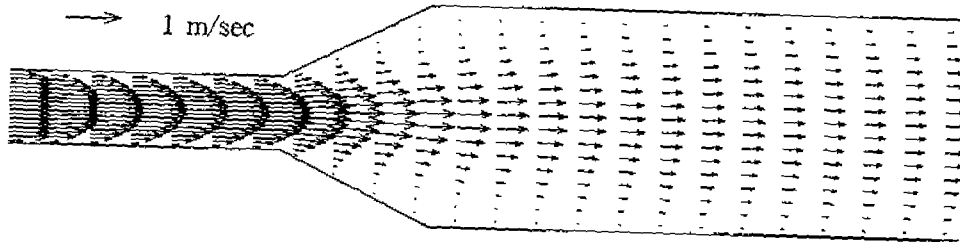


그림 5. 2차원 확장수로내 유속분포 계산결과예