

침식률 측정자료를 이용한 2차원 퇴적물
수송모형의 개발
Development of Two-Dimensional Sediment Transport Model
Using Observed Erosion Rate

정 태 성*
Jung, Tae Sung

Abstract

A 2-dimensional numerical sediment transport model has been developed by using erosion rates observed by SEDFLUME. The model on boundary-fitted coordinate can reduce inaccuracy of sediment model with accurate erosion data. Suspended transport and bed load transport are included in the model together. The model results gave good agreement with particle size distributions in 1-d channel and was more accurate than that of MIDAS of 1-dimensional model. The model applied to an enlarging channel to check model performance in 2-dimensional domain. Bed coarsening reduced erosion and deposition.

keywords : sediment model, erosion, armoring, sediment transport

요 지

침식률 측정장치인 SEDFLUME을 사용하여 직접 측정된 침식률 자료를 이용하는 퇴적물 수송에 관한 2차원 모형이 개발되었다. 개발된 모형은 현장 적용성을 높이기 위하여 경계밀착좌표계를 수평방향에 대해 사용하며, 퇴적물 이동 모의시 침식률 산정에서 불확실성을 줄이기 위해 침식률 측정자료를 직접 사용한다. 개발된 모형은 부유사와 소류사 이동을 모두 고려한다. 모형의 정확성을 검토하기 위하여 1차원 수로에서 장갑화 현상을 모의하고 실험자료와 비교하였다. 비교한 결과에 의하면, 본 모형은 기존의 1차원 모형의 연구결과에 비하여 입도분포 변화과정을 보다 정확히 모의하였다. 또한, 수로폭이 확장하는 2차원 수로에서 퇴적과 침식 현상을 모의한 결과, 모형은 정상적으로 작동하였으며 장갑화 현상이 침식과 퇴적을 억제하는 데 기여하는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 가뭄지수, 가뭄, 가뭄지표, 가뭄분석

* 한남대학교 토목환경공학과 부교수
Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea
(E-mail : jungts@mail.hannam.ac.kr)

1. 서 론

퇴적물 수송에 관한 연구는 자연 하천, 연안 해역 등에서 발생하는 홍수, 해일, 파랑, 수공구조물의 건설로 인한 침식 및 퇴적문제, 퇴적물과 함께 움직이는 오염 물질의 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 현장조사와 수리실험자료에 기초한 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 SEDF-LUME이라는 현장 침식률 실험장치를 개발하여 현장에서 각란되지 않고(undisturbed) 즉 자연상태의 퇴적물 특성(함수비, 입도분포 등)을 그대로 유지하도록 하여 채취한 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 바닥마찰력하에서 침식률을 측정할 수 있다. 대체로 평상시는 거의 퇴적과 침식이 거의 발생하지 않으며, 폭풍 통과 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. 자연하천에서 채취된 퇴적물 시료에 대해 SEDFLUME을 사용하여 얻은 침식률 측정결과는 정태성(2001)에 정리되어 있다.

본 연구에서는 SEDFLUME을 사용하여 정확히 측정된 현장 침식률 자료의 퇴적물 이동 예측에 활용 가능성을 확인하기 위하여 바다경계 조건에 침식률 측정 자료를 이용하는 모형을 개발하였다. 이 모형은 측정된 침식률 자료를 이용하여 모형에서 침식량을 계산하여 퇴적물 이동모형의 불확실한 요소를 일부 줄여 보다 정

확히 퇴적물 이동과정을 계산할 수 있는 장점이 있다. 또한, 복잡한 지형을 갖는 자연하천과 연안해역에 적용성을 높이기 위하여 경계밀착좌표계(boundary fitted coordinate)를 모형의 좌표계로 사용한다. 따라서, 복잡한 육지경계를 비교적 정확히 표현할 수 있도록 하였으며, 부유사와 소류사를 함께 고려하여 세립 및 조립 퇴적물의 이동·확산 연구에 널리 활용할 수 있도록 하였다. 수립된 모형의 활용성을 검토하기 위하여 1차원 수로에서 장갑화 현상의 해석에 적용하고 수리실험자료와 비교검증하여 모형의 정확성을 입증하였으며, 2차원 확장수로에서 장갑화현상을 해석에 적용가능성을 검토하고, 장갑화 현상이 퇴적물 이동 및 확산에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 수치모형의 개요

개발된 수치모형은 복잡한 자연하천과 연안해역에 적용성을 갖기 위하여 경계밀착좌표계를 사용하며, 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 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.

2.1 물의 유동 방정식

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

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

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

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

여기서, ζ 는 평균수심으로부터 수위변화, 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, H 는 총수심 (= $h + \zeta$), f 는 Coriolis 상수, A_h 는 수평 와점성계수, g 는 중력가속도, τ_{ux} 와 τ_{uy} 는 각각 x, y 방향 바람마찰 응력, 바닥마찰응력 $\tau_{bx} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2}$, $\tau_{by} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2}$ 바닥마찰계수 $C_f = \frac{gn^2}{H^{1/3}}$, n 은 Manning의 조도계수이다.

자연하천과 연안해역은 대부분 복잡한 육지경계를 갖고 있으며, 이는 경계밀착좌표계를 사용하면 복잡한 지형을 보다 정확히 표현할 수 있다. 곡선좌표계를 사용하면 육지경계면과 일치하도록 격자를 구성할 수 있으며, 좌표변환을 통해 직교좌표계로 변환하므로 지배방정식의 수치해석은 직교좌표계에서와 동일하게 된다. 직교좌표계에서 식 (1)과 (2)를 곡선좌표계인 $\xi = \xi(x, y)$ 와 $\eta = \eta(x, y)$ 좌표계에서 식으로 연쇄법칙(chain rule)을 사용하여 변환하면, 다음과 같다(Spaulding, 1984).

$$\frac{\partial(\zeta/H)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi}(y_{\eta}U - x_{\eta}V) + \frac{\partial}{\partial \eta}(-y_{\xi}U + x_{\xi}V) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(U/D)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi}(y_{\eta} \frac{U^2}{h} - x_{\eta} \frac{UV}{H}) + \frac{\partial}{\partial \eta} \\ (-y_{\xi} \frac{U^2}{H} + x_{\xi} \frac{UV}{H}) + \frac{fV}{J} = -gH \left[\frac{\partial}{\partial \xi}(y_{\eta}\zeta) \right. \\ \left. - \frac{\partial}{\partial \eta}(y_{\xi}\zeta) \right] + \frac{\tau_{ux}}{J} - \frac{\tau_{bx}}{J} + \frac{\partial X_{u\xi}}{\partial \xi} + \frac{\partial X_{u\eta}}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 확산항인 $X_{u\xi}$ 와 $X_{u\eta}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_{u\xi} = A_h H J \left[y_{\eta} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi}(y_{\eta} \frac{U}{H}) - \frac{\partial}{\partial \eta}(y_{\xi} \frac{U}{H}) \right\} \right. \\ \left. + x_{\eta} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi}(x_{\eta} \frac{U}{H}) - \frac{\partial}{\partial \eta}(x_{\xi} \frac{U}{H}) \right\} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} X_{u\eta} = A_h H J \left[-y_{\xi} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi}(y_{\eta} \frac{U}{H}) - \frac{\partial}{\partial \eta}(y_{\xi} \frac{U}{H}) \right\} \right. \\ \left. - x_{\xi} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi}(x_{\eta} \frac{U}{H}) - \frac{\partial}{\partial \eta}(x_{\xi} \frac{U}{H}) \right\} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

직교좌표에서 경계밀착좌표로의 변환행렬은 다음과 같다.

$$\xi_x = J y_{\eta}, \quad \xi_y = -J x_{\eta}, \quad \eta_x = -J y_{\xi}, \quad \eta_y = J x_{\xi}, \quad (8)$$

여기서, $J = (x_{\xi}y_{\eta} - x_{\eta}y_{\xi})^{-1}$ 이다(Thompson 등, 1985).

y 방향 운동량방정식인 (3)도 식 (2)의 (5)로 변환과 같은 방법으로 변환되었다.

2.2 퇴적물 수송방정식

퇴적물 수송은 크게 물과 함께 움직이는 부유사와 바닥경계를 따라 물의 움직임보다 느리게 움직이는 소류사로 구분할 수 있다. 부유사는 물속에 존재하는 난류에 의한 입자의 연직운동이 퇴적물 입자의 침강속도보다 클 때 발생한다. 입자크기가 $200 \mu m$ 보다 작은 경우는 주로 부유사로 이동한다. 물속에 존재하는 혼합 퇴적물은 여러크기의 입자그룹으로 구성되어 있으며, 일반적으로 각 입자그룹의 평균 입자에 대하여 부유사와 소류사 이동을 계산한다. 본 연구에서도 입도분포를 갖는 퇴적물에 대해 입자크기별로 일정간격으로 분류하고, 각 구간의 평균입경에 대하여 계산하였다.

부유사 수송방정식은 다음과 같다. 입도분포를 갖는 퇴적물을 크기가 다른 n 개 입자로 구성되어 있는 것으로 가정하면, 각 입자 k (=1, 2, ..., n)의 수심적분된 평면 2차원 부유사 확산방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(HC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VC_k)}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x}(D_h H \frac{\partial C_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_h H \frac{\partial C_k}{\partial y}) + Q_{s,k} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, C_k 는 입자 k 의 농도, D_h 는 수평 확산계수, ρ 는 물의 밀도, $Q_{s,k}$ 는 입자 k 의 물과 퇴적물사이 바닥경계층에서 유출입량(=부유사 침식률 $E_{s,k}$ - 부유사 퇴적률 $D_{s,k}$)이다. 바닥경계를 통한 침식 및 퇴적 과정을 그림 1과 같이 부유사와 소류사로 분리하였다.

복잡한 육지경계를 잘 표현할 수 있도록 식 (6)을 경계밀착좌표계에서 식으로 변환하면 다음과 같다.

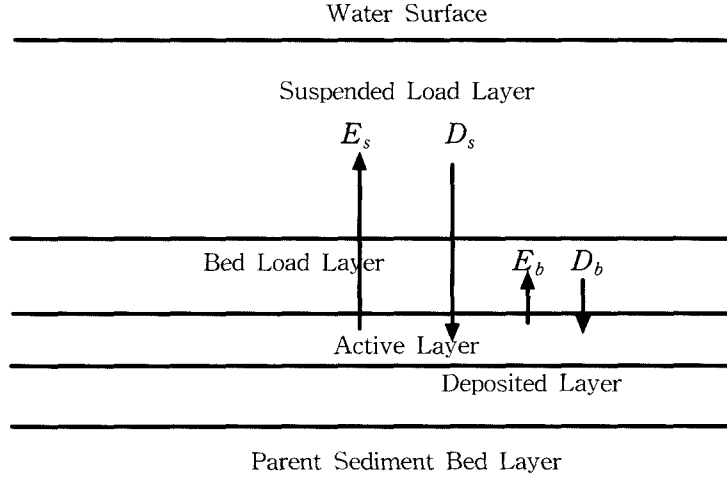


그림 1. 퇴적물 이동 개념도

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{HC_k}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} (y_\eta UC_k - x_\eta VC_k) \\
 & + \frac{\partial}{\partial \eta} (-y_\xi UC_k + x_\xi VC_k) \\
 & = D_h \frac{\partial}{\partial \xi} \left[HJ \left\{ y_\eta \left(\frac{\partial (y_\eta C_k)}{\partial \xi} - \frac{\partial (y_\xi C_k)}{\partial \eta} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. + x_\eta \left(\frac{\partial (x_\eta C_k)}{\partial \xi} - \frac{\partial (x_\xi C_k)}{\partial \eta} \right) \right\} \right] \\
 & + D_h \frac{\partial}{\partial \eta} \left[HJ \left\{ -y_\xi \left(\frac{\partial (y_\eta C_k)}{\partial \xi} - \frac{\partial (y_\xi C_k)}{\partial \eta} \right) \right. \right. \\
 & \left. \left. - x_\xi \left(\frac{\partial (x_\eta C_k)}{\partial \xi} - \frac{\partial (x_\xi C_k)}{\partial \eta} \right) \right\} \right] + \frac{Q_{s,k}}{J}
 \end{aligned} \quad (10)$$

입자 k 에 대한 소류사 이동은 각 수평계산격자에 대하여 다음과 같은 박스모형에 의하여 계산하였다.

$$V_k \frac{dC_{b,k}}{dt} = \sum_{l=1}^4 Q_{l,k} - S_k \quad (11)$$

여기서, $C_{b,k}$ 는 k 입자의 소류사 농도, V_k 는 k 입자의 각 수평격자에서 소류사 수송부의 총체적으로 격자의 수평면적과 소류사 수송두께의 곱에 의하여 계산되며, $Q_{l,k}$ 는 수평계면 l 을 통한 k 입자의 소류사 수평수송량, S_k 는 바닥계면에서 k 입자의 소류사 유출입량으로 소류사 침식률 $E_{b,k}$ 와 소류사 퇴적률 $D_{b,k}$ 의 차이다.

각 계면면을 통한 소류사 수송량 $Q_{l,k}$ 는 다음과 같다.

$$Q_{l,k} = u_{b,k} \delta_{b,k} b_l C_{b,k} \quad (12)$$

여기서, $u_{b,k}$ 는 소류사 이동속도, $\delta_{b,k}$ 는 소류사 이동두께, b_l 는 소류사 이동방향에 직각으로 격자의 폭이다.

소류사 이동속도와 이동두께는 다음과 같다(van Rijn, 1984a).

$$u_{b,k} = 1.5 T^{0.6} [(s-1)gd]^{0.5} \quad (13)$$

$$\delta_{b,k} = 3 d a_*^{0.6} T^{0.9} \quad (14)$$

여기서, $T = \frac{(\tau - \tau_{cb})}{\tau_{cb}}$, τ 는 바닥마찰응력, 침식 한계응력 τ_{cb} 는 바닥에 있는 퇴적물이 이동하기 시작할 때의 마찰응력으로 실험자료로부터 구하였으며, s 는 퇴적물의 단위중량(≈ 2.65), g 는 중력가속도, d 는 퇴적물의 평균입경, a_* 는 입자변수($= d[(s-1)g/\nu^2]^{1/3}$), ν 는 물의 동점성계수이다.

2.3 물-퇴적물 경계조건

물과 퇴적물의 경계에서는 하상에 있는 퇴적물이 침식하여 소류사 및 부유사로 이동하고, 물과 함께 이동

중에 있는 부유사의 퇴적과 저층 경계부근에서 하상과 접촉하며 이동하는 소류사의 퇴적이 발생한다. 따라서, 침식된 바닥 퇴적물은 바닥마찰응력의 크기에 따라 일부는 소류사로 이동하고, 일부는 부유사로 이동한다(그림 1). 퇴적물의 침식률(E)은 부유사로 가는 부유 침식률(E_s)과 소류사로 가는 소류 침식률(E_b)로 구분할 수 있다. 침식된 퇴적물의 일부는 부유사, 나머지는 소류사로 이동할 것이다. 전체 침식률은 SEDFLUME(그림 2)을 이용한 실험결과로부터 얻을 수 있다. SEDFLUME를 이용하여 자연하천에서 코아링을 통해 얻은 각란되지 않은 상태의 현장퇴적물 시료에 대하여 깊이별, 전단응력별 침식률을 측정할 수 있다(McNeil 등, 1996). 미국 Lower Fox River, Detroit River, Santa Barbara Slough에서 각란되지 않고 채취된 약 1m 길이의 코아시료에 대해 SEDFLUME를 사용해서 실험한 결과에 의하면, 침식률은 채취된 시료의 단위체적당 무게인 퇴적물의 체적밀도(bulk density), 바닥마찰응력에 주로 의존한다. 체적밀도는 일반적으로 퇴적층의 깊이와 압밀기간이 증가함에 따라 증가하며, 퇴적물의 함수비가 증가함에 따라 감소한다. 침식률은 바닥마찰응력의 증가에 따라 증가하고, 체적밀도의 증가에 따라 감소한다. 입의 깊이의 입의 바닥마찰응력하에서 침식률은 전단응력과 수심별로 측정된 실험자료를 선형내삽하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E = \frac{\tau_{m+1} - \tau_b}{\tau_{m+1} - \tau_m} \frac{Z_o - Z}{L_o} E_m^{L+1} + \frac{\tau_b - \tau_m}{\tau_{m+1} - \tau_m} \frac{Z_o - Z}{L_o} E_{m-1}^{L+1} + \frac{\tau_{m+1} - \tau_b}{\tau_{m+1} - \tau_m} \frac{Z}{L_o} E_m^L + \frac{\tau_b - \tau_m}{\tau_{m+1} - \tau_m} \frac{Z}{L_o} E_{m+1}^L \quad (15)$$

여기서, Z 는 퇴적층의 두께, Z_o 는 초기 퇴적층의 두께, m 은 전단응력이 τ_b 보다 작은 퇴적층에서 침식률을, $m+1$ 은 전단응력이 τ_b 보다 큰 퇴적층에서 침식률이다.

여러 크기의 입자를 포함하는 비점착성(조립질) 퇴적물은 크기가 작은 퇴적물의 이동과 큰 입자의 잔류에 따라 바다에 퇴적된 퇴적물의 입자구성비가 변하는 장갑화현상(armoring)을 겪게 된다. 이에 따라 표층 퇴적물의 조립화로 쉽게 침식가능한 퇴적물층의 두께가 감소한다. 이러한 장갑화 현상은 조립퇴적물의 퇴적 및 침식현상을 연구하는 데 있어서 매우 중요하다. 저층 퇴적물 층은 바로 침식가능한 활성층(active layer), 퇴적된 퇴적물중 활성층을 제외한 두께(deposited layer), 바로 침식되지 않는 비활성층(parent bed layer)으로 구분할 수 있다(그림 1). 퇴적층은 침식이 우세할 때는 활성층으로 퇴적이 우세할 때는 압밀현상을 겪으며 비활성층으로 된다. 활성층은 바닥마찰에 의하여 한번에 모두 침식될 수 있으며, 활성층 두께에 대

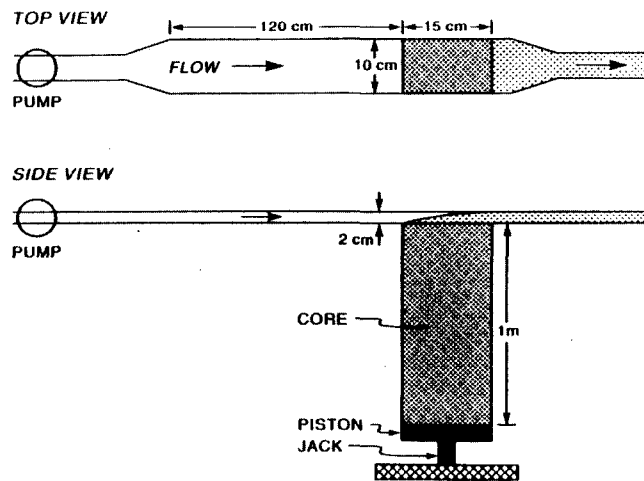


그림 2. 현장 침식률 측정장치(SEDFLUME)의 형상과 제원

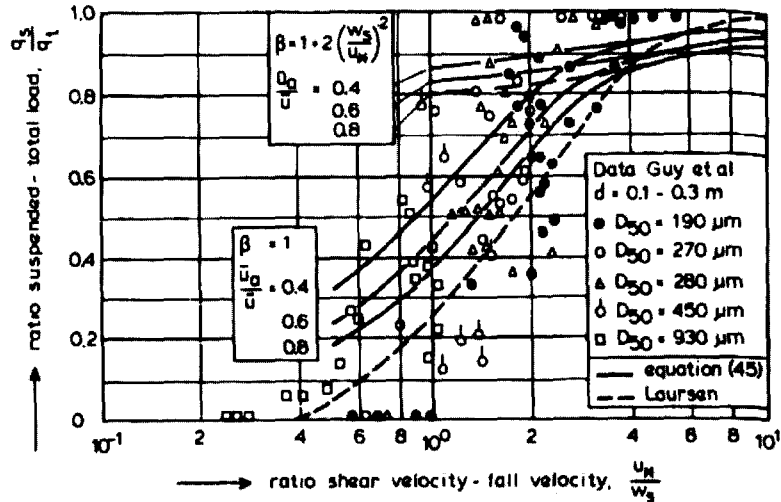


그림 3. 부유사 수송량의 전체 수송량에 대한 비(van Rijn, 1984b)

해서는 여러 가지가 제안되어 왔다. Hydroqual(1997)에 의하면, 활성층 두께는 바닥마찰응력과 중앙입경에 의존하며 다음과 같다.

$$L_a = 2d_{50} \left[B \left(\frac{\tau}{\tau_{cb}} \right) + (1 - B) \right], \quad \tau \geq \tau_{cb} \quad (16)$$

$$= 2d_{50}, \quad \tau < \tau_{cb}$$

여기서, B 는 조절 가능한 상수로, 1이면 van Niekerk 등(1992)과 같다.

van Rijn(1984b)은 기존 실험결과를 정리하여 전체 퇴적물 수송량중 부유 수송량의 비율에 관한 연구결과를 그림 3과 같이 제시하였다. 본 연구에서는 전체 침식량중 부유사와 소류사로 가는 양의 비가 수송량의 비와 같다고 가정하여, 그림 3을 단순화하여 k 입자의 전체침식률 E 와 부유 침식률의 비율을 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{E_{s,k}}{E_k} = 0, \quad \frac{\sqrt{\tau}}{w_{s,k}} \leq \frac{\sqrt{\tau_{cs,k}}}{w_{s,k}}$$

$$= \left[\log \left(\frac{\sqrt{\tau}}{w_s} \right) - \log \left(\frac{\sqrt{\tau_{cs,k}}}{w_s} \right) \right] / \left[\log 4 - \log \left(\frac{\sqrt{\tau_{cs,k}}}{w_s} \right) \right]$$

$$, \quad \frac{\sqrt{\tau}}{w_{s,k}} < \frac{\sqrt{\tau_{cs,k}}}{w_{s,k}} < 4$$

$$= 1, \quad \frac{\sqrt{\tau}}{w_{s,k}} \geq 4 \quad (17)$$

여기서, $\tau_{cs,k}$ 는 k 입자의 부유한계응력으로 van Rijn(1984b)를 참고하여 구하였으며, $w_{s,k}$ 는 k 입자의 침강속도이다.

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

$$D_{s,k} = P_{s,k} w_{s,k} C_{b,k} \quad (18)$$

여기서, 퇴적확률 $P_{s,k}$ 는 물의 흐름이 정지상태인 경우에 1이며, 난류가 증가함에 따라 감소한다. 본 연구에서는 비점착성 퇴적물의 퇴적확률 계산에 난류의 불규칙성을 고려하여 유도하고, 실험자료와 검증을 통해 그 효용성이 입증된 다음 식을 사용하였다(Gessler, 1967).

$$P_{s,k} = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^Y e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (19)$$

여기서, $Y = \frac{1}{\sigma} [\frac{\tau_{cs,k}}{\tau} - 1]$, σ 는 전단응력의 표준편차로 Gessler에 의하면 0.57이다.

식 (13)의 근사적분은 다음과 같다(Hydroqual, 1997).

$$P(Y) = 1 - F(Y)(0.4632X - 0.1202X^2 + 0.9373X^3) \quad (20)$$

여기서, $F(Y) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}Y^2}$, $X = (1 + 0.3327Y)^{-1}$ 이며, Y 가 1보다 작을 때 $P(Y) = 1 - P(|Y|)$ 이다.

침강속도 w_s 는 Cheng(1997)의 연구결과에 의하면 다음과 같다.

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

점착성 퇴적물의 부유사 농도는 잘 혼합된 흐름장에서 깊이에 따라 크게 변화하지 않으나 비점착성 부유사의 농도는 깊이에 따라 크게 변하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 점착성 퇴적물의 경우는 모형계산결과인 수심평균 농도를 바닥농도 대신 사용할 수 있으나 비점착성 퇴적물의 퇴적을 산정시는 바닥 농도를 구해야 한다. 부유사 모형의 계산결과인 수심평균농도와 바닥경계층 농도의 비는 다음과 같은 방법으로 구할 수 있다. 바닥층에 위치한 기준높이($z = z_a$)에서 부유사 농도 $C_{z_a,k}$ 는 다음과 같다(van Rijn, 1984b).

$$C_{z_a,k} = 0.015 \frac{d T^{1.5}}{z_a d_*^{0.3}} \quad (22)$$

여기서, 기준높이 $z_a = \max(0.5\Delta, k_s, 0.01H)$, Δ 는 바닥형상높이, k_s 는 Nikuradse의 등가조도이다.

바닥형상높이는 바닥에 형성된 ripple과 dune에 의하여 주로 결정되며 van Rijn(1984b)에 의하면 다음과 같다.

$$\Delta = 0.11 H^{0.7} d^{0.3} (1 - e^{-0.5T})(25 - T) \quad (23)$$

k 입자의 부유사 농도 수심분포는 다음과 같다.

$$C_k(z) = C_{z_a,k} \left[\left(\frac{z_a}{H - z_a} \left(\frac{H}{z} - 1 \right) \right)^\zeta, \frac{z}{H} < 0.5 \right. \\ \left. = C_{z_a,k} \left(\frac{z_a}{H - z_a} \right)^\zeta e^{-4\zeta \left(\frac{z}{H} - 0.5 \right)}, \frac{z}{H} \geq 0.5 \right] \quad (24)$$

여기서, $\zeta = \frac{w_{s,k}}{\beta x u_*}$, x 는 von Karman 상수이며, β 는 다음과 같다.

$$\beta = 1 + 2 \left(\frac{w_{s,k}}{u_*} \right)^2, 0.1 < \frac{w_{s,k}}{u_*} < 1 \quad (25)$$

부유사 농도 수심분포 식 (24)를 적분하여 정리하면, 수심평균농도 $C_{m,k}$ 는 다음과 같다.

$$C_{m,k} = \frac{C_{z_a,k}}{H} \left(\frac{z_a}{H - z_a} \right)^\zeta \left[\int_{z_a}^{0.5H} \left(\frac{H}{z} - 1 \right)^\zeta dz + \int_{0.5d}^d e^{-4\zeta(z/H - 0.5)} dz \right] \quad (26)$$

위 식을 사다리꼴 공식을 사용해서 적분하면, 평균농도와 바닥농도의 관계는 다음과 같다.

$$C_{b,k} = \Gamma C_{m,k} \quad (27)$$

여기서,

$$\Gamma = \left(\frac{H}{z_a} - 1 \right)^\zeta \left[\frac{1}{4\zeta} (1 - e^{-2\zeta}) + \frac{1}{3} \left(0.5 - \frac{z_a}{H} \right) \left\{ 0.5 \left(\frac{H}{z_a} - 1 \right)^\zeta + \left(\frac{H}{z_a + \delta z} - 1 \right)^\zeta + \left(\frac{H}{z_a + 2\delta z} - 1 \right)^\zeta + 0.5 \right\} \right], \\ \delta z = (0.5H - z_a)/3 \text{이다.}$$

입자크기가 작은 점착성 퇴적물의 퇴적확률은 다음과 같다(Ariathurai와 Krone, 1976).

$$P_s = 1 - \frac{\tau}{\tau_{cd,k}} \quad (28)$$

소류사에 대해 국지평형을 생각하면, 부유사로부터 퇴적되는 퇴적물은 바닥에 바로 퇴적한다는 가정하에 다음과 같은 관계식을 도출할 수 있다.

$$E_{b,k} = D_{b,k} \quad (29)$$

소류사 퇴적률 $D_{b,k}$ 는 다음과 같이 퇴적물 침강속도 $w_{s,k}$, 소류사 퇴적확률 $P_{b,k}$, 소류사 농도 $C_{b,k}$ 에 비례하는 것으로 알려져 있다.

$$D_{b,k} = P_{b,k} w_{s,k} C_{b,k} \quad (30)$$

소류사 농도는 van Rijn(1984a)에 의하면 다음과 같다.

$$C_{b,k} = 0.11778 \frac{T}{d_{*,k}} \quad (31)$$

따라서, 식 (23) ~ (25)를 정리하면, 퇴적확률 $P_{b,k}$ 는 다음과 같다.

$$P_{b,k} = \frac{E_{b,k} d_*}{0.11778 w_{s,k} T} \quad (32)$$

소류사 퇴적확률 계산에 식 (32)을 사용하는 대신에 부유사에 대한 식 (19)를 사용할 수도 있다.

2.4 지배방정식의 수치해석

육지경계를 보다 정확히 표현하기 위해 변환된 경계 밀착좌표계에서 물의 유동과 퇴적물 수송에 관한 방정식들을 중앙차분법을 사용하여 유한차분화한 후에 각각의 계산격자요소에 대하여 적분하여 계산하는 체적체적법(Volume Integral Method)을 사용하여 수치해석하였다. 체적적분법은 계산영역을 격자크기가 $\Delta\xi \times \Delta\eta$ 인 격자로 분할하고, FTCS(Forward Time and Centered Space)법을 사용하여 차분화한 식을 각 계산격자와 계산시간간격 Δt 에 의해 만들어지는 유한체적($\Delta\xi \times \Delta\eta \times \Delta t$)에 대해 적분하여 유한차분식을 구한다. 이 과정에서 Taylor급수가 이용되며, 이러한 과정을 거치면 시간과 공간에 대하여 2차의 정도를 갖는 차분식이 얻어진다. 이 방법은 경계처리에 장점을 가지고 있다(Lick 등, 1987). 본 연구에서는 Ziegler와 Lick(1986)에 의하여 개발된 직사각형 좌표계에서 모형을 경계밀착좌표계에서 모형으로 개선하였으며, 침식률 측정자료(그림 4)를 직접 활용하여 모형에서 침식률을 정확히 계산할 수 있도록 하였다.

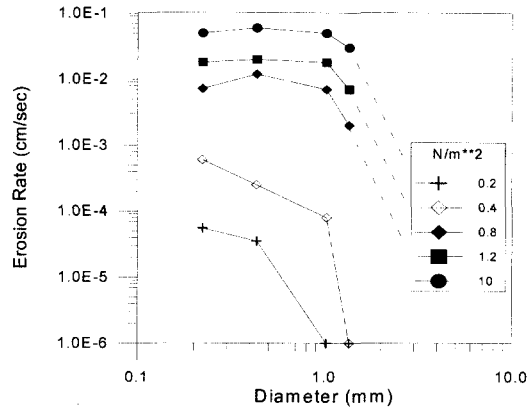


그림 4. SEDFLUME을 이용한 침식률 측정결과

3. 모형의 검증

길이 20 m, 폭 0.8 m인 수로를 길이방향으로 1 m, 폭 방향으로 0.2 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 초기 입경분포는 그림 5의 Exp.(t = 0)와 같다. 계산결과는 Ashida와 Michiue의 수리실험결과(Vogel 등, 1992) 및 MIDAS 모형 결과와 비교되었다. MIDAS 모형은 장갑화현상을 정확히 계산하기 위해 van Niekerk 등(1992)에 의하여 개발된 1차원 모형으로 물의 유동은 1차원 점변류 방정식을 사용하여 해석하며, 퇴적물 수송과정을 소류사와 부유사로 분리하여 해석한다. 소류사는 수정된 Bagnold 식을 사용하며, 이 때 본 연구에서와 같이 난류에 의한 바닥마찰응력의 확률 분포를 고려하고, 부유사 수송은 1차원 이송-확산 방정식을 사용하여 해석한다. 그림 4의 침식률 측정결과를 식 (9)를 사용하여 내삽하는 방법으로 모형에서 침식률을 산정하였다. 퇴적률은 부유사는 식 (12), 소류사는 식 (14)를 사용하였다. 침식률은 실험실에서 SEDFLUME을 사용하여 채분석을 통해 분류된 각 입자에 대해 전단응력을 변화시켜 가며 측정된 자료이다. 본 연구에서 사용한 퇴적물 입자는 크기가 비교적 커서 침식률이 바닥마찰응력에만 의존하고, 전체중량은 침식률에 거의 영향을 미치지 않았다. 그러나, 입자크기가 더 작은 경우는 전체중량이 침식률에 크게 영향을 미친다(Roberts 등, 1988). 바닥마찰응력은 Vogel 등(1992)의 연구와 동일하게 Manning의 조도계수 0.017(실험 1)과 0.02(실험 2)를 사용하였다.

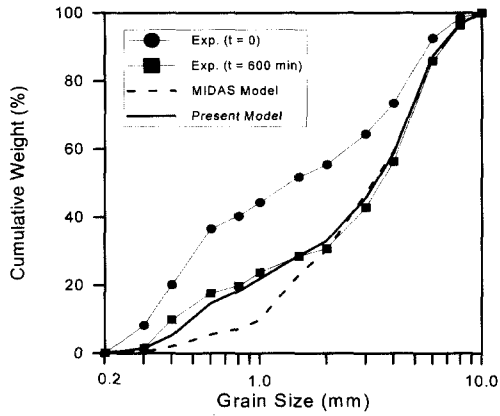


그림 5. 입도분포 계산결과(실험 1)

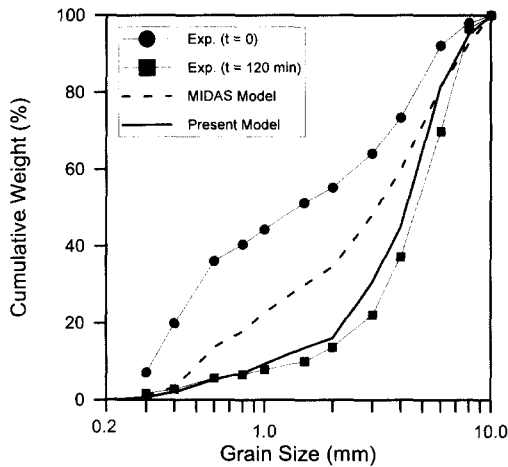


그림 6. 입도분포 계산결과(실험 2)

실험 1의 경우(그림 5)를 보면, 본 모형에 의해 계산된 입도분포는 약간의 차이를 제외하고는 대체로 실험치와 일치하는 매우 양호한 결과를 보였다. 그림에서 점선은 1차원 모형인 MIDAS모형에 의하여 계산한 결과(Vogel 등, 1992)로 본 연구결과에 비하여 2.0 mm 이하 퇴적물에서 입자구성비가 실험치와 큰 차이를 보이고 있다. 실험 2에 대한 모의결과(그림 6)를 보면, 실험 1에서와 같이 계산결과가 실험치와 약간의 차이를 제외하고는 입도분포 경향이 비슷한 모습을 보이고 있다. 그러나, 실험 1에서와 마찬가지로 MIDAS모형은 입도분포가 실험결과와 큰 차이를 보이고 있어, 장갑화 현상을 제대로 모의하지 못하고 있다. 이상과 같은 결과를 볼 때, 정확히 측정된 침식률 자료를 사용한 본

모형이 침식률 산정에 경험식을 사용한 MIDAS모형에 비하여 장갑화 현상을 비교적 정확히 예측하고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 침식률 산정식이 개선될 필요가 있음을 말한다. 그림 7은 실험 1에서 각 입자의 구성비의 시간변화를 계산한 것이다. 시간이 지남에 따라 세립자가 침식되어 하류로 이동함에 따라 퇴적물중 조립자의 비율은 증가하고 세립자의 비율은 감소하는 모습을 보이고 있으며, 이 과정이 초기 30분에 활발하게 일어나고 있다.

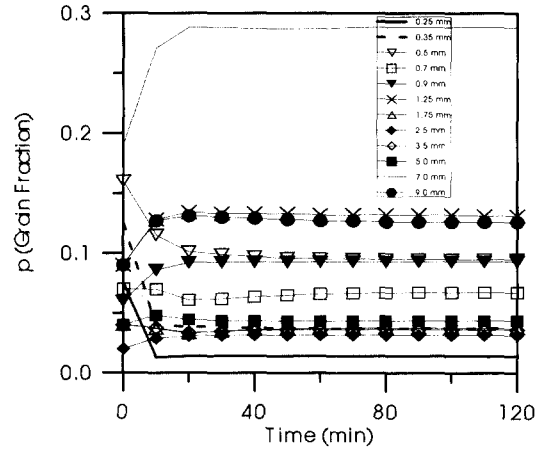


그림 7. 입자 구성비의 시간변화(실험 1)

4. 2차원 확장수로에서 장갑화 모의

이상과 같이 1차원 수로에서 장갑화 현상을 해석한 결과, 침식률 측정자료를 사용한 모형이 장갑화 현상을 비교적 정확히 모의함에 따라 실제 2차원 하천에서 모형의 적용성을 검토하기 위하여 수심이 1 m이며, 폭이 2.75 m에서 8.25 m로 확장하는 2차원 수로(그림 8)에 유량이 2 m³/sec으로 흐르는 경우에 대해 수치실험을 실시하였다. 이때 퇴적물의 침식 및 퇴적, 세립 퇴적물의 수송과 조립 퇴적물의 퇴적으로 인해 발생하는 입도분포 변화인 장갑화 현상을 조사하였다. 계산은 편의상 모든 입자의 크기가 0.726 mm인 단일크기 입자로 구성된 경우(실험 3)와 3가지 입자가 혼합되어 평균입경이 0.726 mm인 경우(실험 4)에 대하여 실시하였다. 실험 4에서 입경의 구성비는 1.02 mm(33.3%), 0.726 mm(33.3%), 0.432 mm(33.3%)이다. 단일입자로 구성된 경우와 평균입경을 같게 설정하여 계산결과를 비교함으로써 장갑화 현상이 침식 및 퇴적, 퇴적물 농도 등에 미치는 영향을 검토하였다. 수

치실험은 초기에 유동에 대한 안정적인 결과를 얻기 위해 물의 유동만을 약 3분간을 계산한 후에 퇴적물 수송에 대한 계산을 시작하여 12분간 계산하였다.

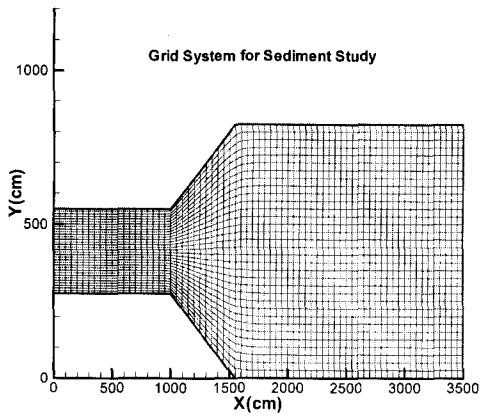


그림 8. 2차원 확장수로 해석을 위한 계산 격자망

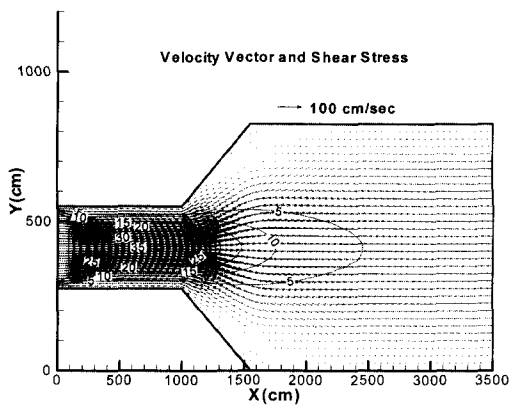
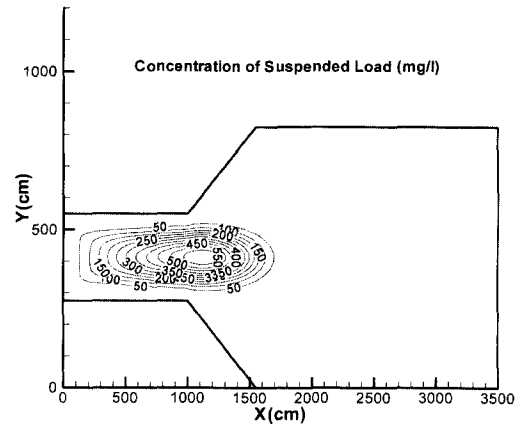


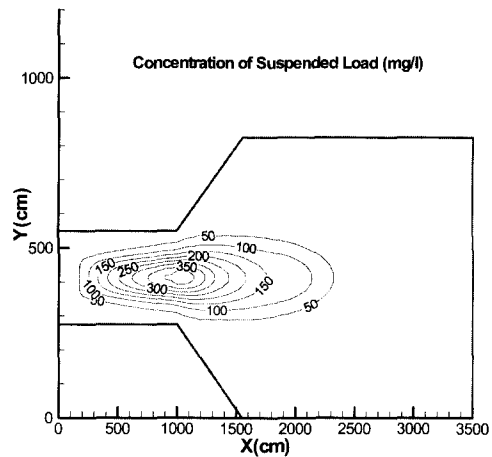
그림 9. 2차원 수로에서 유속분포와 바닥마찰응력 (dyne/cm²) 분포

그림 9는 계산결과가 준정상상태에 도달한 계산시작 3분후의 유속분포도이다. 폭이 작은 수로에서 큰 수로로 변화되면서, 유속이 급격히 약해지는 모습을 볼 수 있다. 폭이 좁은 수로에서 평균 유속은 72.7 cm/sec이며, 폭이 넓은 단면에서는 24.2 cm/sec다. 그림 9에 침식에 영향을 미치는 바닥 마찰응력의 분포를 함께 표시하였다. 최대 바닥마찰응력은 약 35 dyne/cm²로 좁은 수로에서 넓은 수로로 확장하기 직전에 수로의 중

양에서 발생한다.



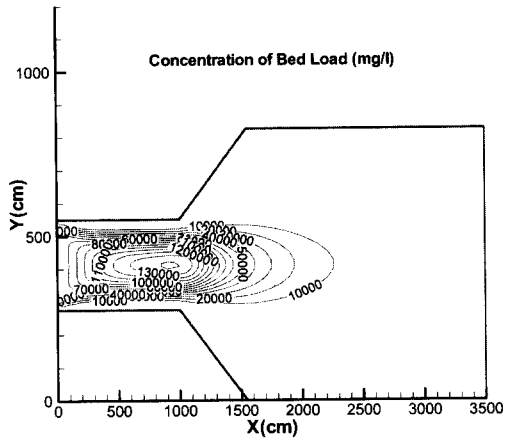
(a) 실험 3



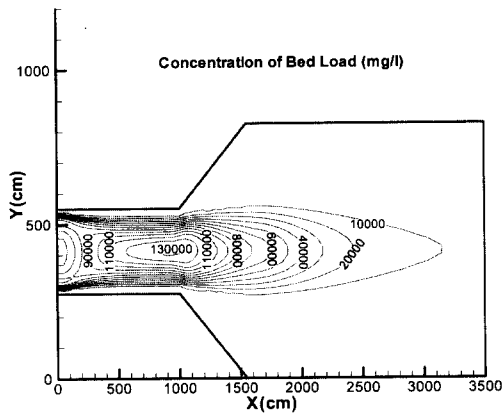
(b) 실험 4

그림 10. 부유사 농도분포

그림 10은 부유사 농도분포이다. 단일 입자로 구성된 경우는 최대농도가 500 mg/l 이상을 보이고 있으나, 혼합퇴적물 경우는 장감화 현상으로 인하여 최대농도가 약 400 mg/l였다. 소류사 농도분포(그림 11)는 부유사 농도분포처럼 큰 차이는 보이지 않지만 부유사 농도분포와 마찬가지로 혼합퇴적물의 농도가 약간 감소하는 모습을 보였다. 단일입자의 경우 14만 mg/l의 농도선이 그림에 나타나나 혼합퇴적물의 경우에는 나타나지



(a) 실험 3

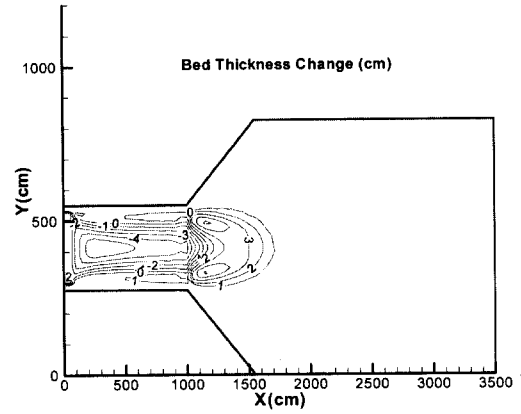


(b) 실험 4

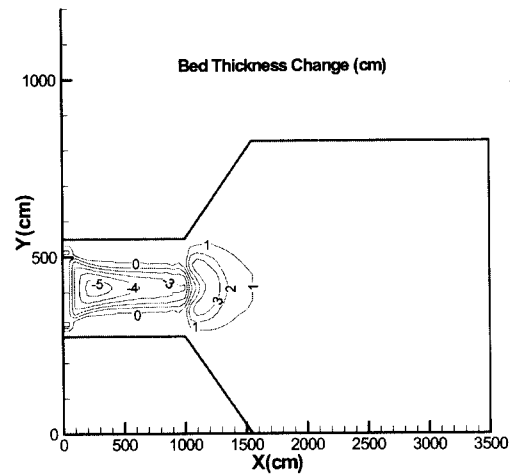
그림 11. 소류사 농도분포

않고 있으며, 13만 mg/l의 등농도선 내부의 면적이 단일입경 퇴적물에 비하여 혼합퇴적물이 작았다. 하상변화(그림 12)를 살펴보면, 단일입경 퇴적물을 사용한 경우에 비하여 혼합입경을 사용한 경우가 침식 및 퇴적 두께가 약간 작게 나타났다. 입경분포에 관계없이 그 분포양상은 거의 동일하였다. 이상과 같이 혼합입경을 사용한 경우의 최고 농도분포가 단일입경을 사용한 경우보다 작은 이유는 장갑화 현상으로 인하여 하상에 있는 세립자는 하류로 이동하고 하상에는 비교적 조립자가 남아있어 침식발생이 억제되기 때문이다. 그림 13은

실험 4의 평균입경 분포로 바닥마찰응력이 크게 작용하는 수로 중앙에서는 강한 침식현상으로 퇴적물의 평균입경이 커지고, 수로 가장자리에서는 세립자의 퇴적으로 평균입경이 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이상과 같은 계산결과로부터 서로 다른 크기의 입자가 균일한 비율로 혼합된 혼합입경으로 구성된 경우는 장갑화 현상으로 인하여 단일입경으로 구성된 경우에 비하여 장기적으로 침식과 퇴적이 적게 일어난다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 실험 3



(b) 실험 4

그림 12. 하상변화(+는 퇴적, -는 침식)

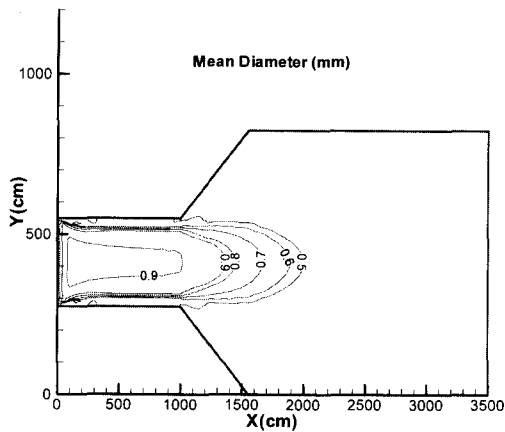


그림 13. 평균입경(실험 4)

5. 결 론

침식률 측정자료를 사용하여 모형의 정확도를 향상시킬 수 있는 경계밀착좌표계에서 2차원 퇴적물 수송모형이 개발되었다. 개발된 모형을 사용하여 1차원 수로에서 장감화 현상을 모의한 결과, 침식률 산정에 경험식을 사용한 MIDAS모형에 비하여 직접 침식률을 측정하여 사용한 본 모형결과가 수리실험자료에 보다 일치하였다. 이는 침식률 측정자료를 사용하는 모형이 정확할 수 있을 가능성을 의미하며, 현재 널리 사용되고 있는 침식률 산정식이 개선될 필요가 있다는 것을 말한다. 또한, 2차원 확장수로에서 장감화 현상을 모의한 바에 의하면, 장감화 현상으로 인하여 평균입경이 증가함에 따라 침식이 억제되어 침식깊이가 감소하며, 부유사와 소류사 농도도 시간이 지남에 따라 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 수송량의 비가 침식률에 대한 비와 같다고 가정하여 비교적 좋은 결과를 얻었으나 이에 대한 실험적인 연구가 필요하다. 현재 현장에서 채취된 각란되지 않은 시료를 직접 사용하여 측정된 침식률 결과와 본 모형을 사용하여 실제 자연하천에서 홍수시 퇴적물 수송을 모의하기 위한 연구를 진행중에 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 1999년도 해외 Post-doc. 연구지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 대하여 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 정태성 (2001). "홍수시 하천 퇴적물의 침식률 추정." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 34(5), pp. 53-59.
- 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.
- Cheng, N.S. (1997). "Simplified settling velocity formula for sediment particle." *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 133(2), pp. 149-152.
- 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.
- Hydroqual, Inc. (1997). *Modeling suspended load transport of non-cohesive sediments in the Hudson River*. General Electric Company, Albany, NY.
- Lick, W., Ziegler, K., and Lick, J. (1986). "Interior and boundary difference equations for hyperbolic differential equations." *Numerical Method for Partial Differential Equations*, 2, pp. 157-172.
- 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.
- 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.
- Spaulding, M.L. (1984). "A vertically averaged circulation model using boundary-fitted coordinates." *J. of Physical Oceanography*, 14, pp. 973-982.
- Thompson, J.F., Warsi, Z.U.A., and Mastin, C.W.

- (1985). Numerical grid generation. North-Holland.
- van Niekerk, A., Vogel, K.R., Slingerland, R.L., and Bridge, J.S. (1992). "Routing of heterogeneous sediments over movable bed: Model development." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 118(2), pp. 246-262.
- van Rijn, L.C. (1984a). "Sediment transport, Part I: Bed load transport." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110(10), pp. 1431-1456.
- van Rijn, L.C. (1984b). "Sediment transport, Part II: Suspended load transport." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110(11), pp. 1613-1641.
- 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.
- 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.

(논문번호:01-061/접수:2001.08.11/심사완료:2001.11.26)