

침식을 측정결과를 사용하는 유사이동모형의 적용

Application of Sediment Transport Model Using Observed Erosion Rates

정태성* / 크랙 존스** / 윌버트 릭***
Jung, Tae Sung / Jones, Craig / Lick, Wilbert.

Abstract

A 2-dimensional numerical sediment transport model using erosion rates in undisturbed conditions has been developed and applied to calculating the suspended sediment concentrations and bed level changes in the Lower Fox River. The model reduces inaccuracy of sediment model by using the accurate erosion rates obtained in a flume (called Sedflume). The flume has been developed to measure erosion rates as a function of sediment depth and at the situation of high shear stresses such as flood event. Both mechanisms of suspended load and bedload transport are included in the model. The model results were verified for the description of sediment transport in a straight channel and the sediment transport during flood event in the Lower Fox River. The results of Lower Fox River simulation showed good agreements with the observed SS concentrations. This model can be used to simulate sediment transport under the high shear conditions such as flood.

Keywords : sediment model, erosion, Sedflume, suspended load, bedload

요 지

현장에서 교란하지 않고 채취한 유사 시료의 침식률을 측정된 결과를 직접 활용하여 침식률을 계산하는 2차원 유사이동 수치모형을 수립하고, 적용성을 검토하기 위하여 미국 팍스강에서 홍수시 유사 수송과정을 모의하였다. 큰 전단응력 하에서도 침식률 측정이 가능한 Sedflume을 사용하여 현장에서 채취된 시료의 침식률이 깊이별, 전단응력별로 측정되었다. 수치모형은 침식률 측정자료를 모형에서 직접 사용하며, 부유사와 소류사 이동을 모두 고려한다. 개발된 모형은 1차원 직선수로에서 유사수송에 대해 검증되었다. 홍수시 팍스강의 유사 수송과정을 모의하고 부유사 농도의 시간변화에 대해 검증한 결과, 모의결과가 관측치와 잘 일치하여 현장 침식률 값을 직접 사용하는 모형이 효과적임을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 유사모형, 침식, Sedflume, 부유사, 소류사

1. 서 론

유사 수송에 관한 연구는 자연 하천, 연안 해역 등에서 발생하는 홍수, 해일, 파랑, 수공구조물의 건설로 인한 침식 및 퇴적 등과 같은 퇴적환경 변화, 세립사에 흡

착되어 이동하는 오염물질의 이동·확산에 따른 수질 오염, 준설 공사 또는 악기상시 고농도 탁도 발생에 의한 생태계의 교란 등과 관련하여 주로 수행되어 왔다.

유사의 이동·확산과정을 설명하고 규명하기 위해서 사용할 수 있는 방법으로는 현장조사, 수리실험, 수치실험 등을 사용할 수 있다. 현장조사는 실제 자연수괴

* 한남대학교 토목환경공학과 교수

Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea
(E-mail: jungts@hannam.ac.kr)

** Ph.D Student, Dept. of Mechanical and Environmental Engineering, University of California at Santa Barbara, USA

*** Professor, Dept. of Mechanical and Environmental Engineering, University of California at Santa Barbara, USA

에서 유사 수송에 영향을 미치는 모든 요인과 변수를 포함하여 충분한 자료가 확보되면, 정확하게 침식과 퇴적현상을 설명할 수 있다. 그러나 현장에서 양질의 관측자료 획득을 위해서는 많은 경비와 인력, 시간이 소요되고, 현황파악에는 유용하나 장래 퇴적환경 변화를 예측하는 데 제한성을 갖고 있다. 이 외에도 유사 연구에 수리모형이 활용되고 있으나, 이 방법은 실제 자연현상을 가시적으로 볼 수 있다는 장점은 있으나 모형제작에 비용과 시간이 많이 소요되며 무엇보다도 유사 입자의 정확한 상사에 문제점이 있다. 수치모형은 예측과 평가에 있어 가변성이 우수하나 모형 내에서 퇴적과 침식현상을 표현하기 위하여 각종 경험식을 사용하여야 하며, 사용하는 경험식들이 상당한 오차를 가지고 있는 단점이 있다. 따라서 유사 이동연구에 있어서 장래에 대한 예측 및 유사 이동현상 규명을 위해 가장 효율적인 방법은 현장조사와 수리실험 자료에 기초한 수치모형이며, 수치모의를 통하여 복잡한 유사의 퇴적 및 침식, 확산과정을 규명하기 위한 연구가 많이 수행되어 왔다(Mehta 등, 1989). 유사와 물 사이 경계에서 침식, 퇴적 현상을 정확히 묘사하기 위한 연구는 대부분 실험 결과에 의존하고 있으며, 그 동안 많은 연구가 이루어져 왔다. 그러나 아직도 퇴적 및 침식과정에 대한 많은 부분이 규명되지 않고 있다. 최근에 미국 캘리포니아대학의 연구팀은 Sedflume이라는 침식률 실험 장치를 개발하여 현장에서 교란되지 않고(undisturbed), 즉 자연에 존재하는 유사의 특성(함수비, 입도분포 등)을 그대로 유지하도록 하여 채취하고, Sedflume을 사용하여 유사의 침식률을 측정하였다(McNeil 등, 1996; Roberts 등, 1998). 이 장치는 현장 유사의 침식률을 정확히 측정할 수 있을 뿐만 아니라 홍수시와 같은 큰 바닥마찰 조건에 대해서도 하상 침식률을 양호하게 측정할 수 있다. 기존에 유사 침식률 측정에 널리 사용되어 온 순환수로와 같은 개수로는 큰 마찰용력 조건에서 침식률 측정이 불가능하다(정태성, 2001a). 자연하천에서는 바닥마찰이 큰 홍수시 하상 침식과 유사 분포변화가 대부분 발생한다. 따라서 큰 마찰용력 작용하에서 침식률과 퇴적률의 측정은 하상변동 등의 유사 이동-확산 과정의 규명 및 예측에 있어서 매우 중요하다. 정태성(2001b)은 침식률 측정 자료를 활용하는 경계좌표에서 2차원 모형을 수립하여 1차원 수로에서 비점착성 유사의 장갑화 현상을 모의하고, 사용한 침식률 계산방법의 정확성을 보인 바 있다.

본 연구에서는 현장 침식률 측정자료를 사용하는 2차원 모형을 하천의 유사 이동모의에 적용하였다. 파스강 바닥에서 코아링을 통해 교란하지 않고 채취한 시료

에 대해 Sedflume으로 측정된 유사의 깊이별, 바닥마찰용력별 침식률 측정결과를 바닥에서 침식률 계산시 사용하였다. 모형의 정확성을 검증하기 위하여 홍수시 파스강의 유사이동을 모의하고, 부유사 농도변화 관측자료와 비교검증하였다.

2. 수치모형의 개요

수립된 수치모형은 평면 2차원 모형으로 수심방향으로 잘 혼합된 천수역에서 모의에 적합하다. 물의 2차원 유동 및 유사 이동·확산 모형의 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.

2.1 물의 유동 방정식

자연수괴에서 물의 유동은 수심방향으로 잘 혼합된 특성을 갖는 경우에 다음과 같은 수심적분된 2차원 천수방정식으로 표현할 수 있다.

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

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

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

여기서, η 는 평균수면으로부터 수위변화, 단위폭당 유량 $U = \int_{-h}^{\eta} u \, dz$, $V = \int_{-h}^{\eta} v \, dz$, u 와 v 는 각각 x 와 y 방향의 유속, z 는 수직상향이며, H 는 총수심 ($=h + \eta$), A_h 는 수평 와점성계수, g 는 중력가속도, τ_{wx} 와 τ_{wy} 는 각각 x , y 방향 바람마찰용력, 바닥마찰용력 $\tau_{bx} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2}$, $\tau_{by} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2}$, 마찰계수 $C_f = \frac{gn^2}{H^{1/3}}$, n 은 Manning의 조도계수이다.

2.2 유사 수송방정식

유사 수송은 크게 물과 함께 움직이는 부유사와 바닥경계를 따라 물의 움직임보다 느리게 움직이는 소류

사로 구분할 수 있다. 부유사는 물속에 존재하는 난류에 의한 입자의 연직운동이 유사 입자의 침강속도보다 클 때 발생한다. 일반적으로 입자크기가 200 μm 보다 작은 경우는 주로 부유사로, 큰 경우는 주로 소류사로 이동한다. 물속에 존재하는 유사는 여러 크기의 입자가 혼합되어 있으며, 일반적으로 각 입자그룹의 평균 입자에 대하여 부유사와 소류사로 분리하여 각각의 이동을 계산한다. 본 연구에서도 입도분포를 갖는 유사에 대해 일정간격의 입자크기별로 분류하고, 각 구간의 평균입경에 대하여 유사이동을 계산하였다.

부유사 수송방정식은 다음과 같다. 입도분포를 갖는 유사를 입경이 다른 여러 입자로 구성되어 있다고 생각하면, 각 입자의 수심적분된 평면 2차원 부유사 확산방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(UC)}{\partial x} + \frac{\partial(VC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(D_h H \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(D_h H \frac{\partial C}{\partial y}) + Q_s \quad (4)$$

여기서, C 는 입자의 농도, D_h 는 수평 확산계수, Q_s 는 물과 유사사이 바닥경계층에서 유출입량(=부유사 침식률 E_s - 부유사 퇴적률 D_s)이다. 바닥경계를 통한 침식 및 퇴적 과정은 그림 1과 같다.

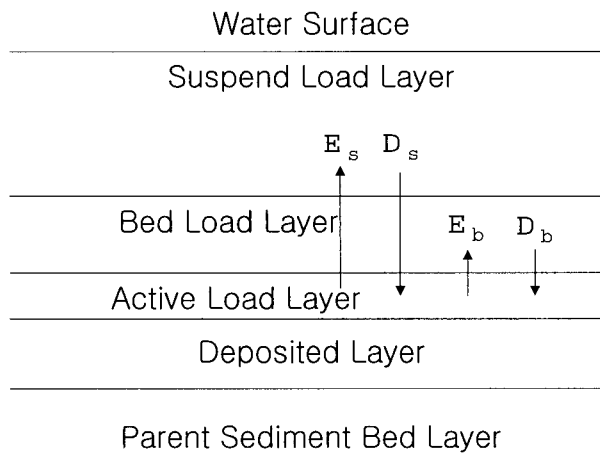


그림 1. 유사이동 체계도

유사 입자의 소류사 이동은 각 수평계산격자에 대하여 다음과 같은 박스모형에 의하여 계산한다.

$$V \frac{dC_b}{dt} = \sum_{l=1}^4 Q_l + S \quad (5)$$

여기서, C_b 는 소류사 농도, V 는 각 수평격자에서 소류사 수송부분의 체적으로 격자의 수평면적과 소류사 수

송두께의 곱에 의하여 계산되며, Q_l 은 직사각형 격자의 수평경계면 l 을 통한 소류사 수평수송량, S 는 물-유사 경계면에서 소류사 유출입량으로 소류사 침식률 E_b 와 소류사 퇴적률 D_b 의 차이이다.

각 경계면을 통한 단위시간당 소류사 수송량 Q_l 은 다음과 같다.

$$Q_l = u_b \delta_b b_l C_b \quad (6)$$

여기서, u_b 는 소류사 이동속도, δ_b 는 소류사 이동두께, b_l 은 소류사 이동방향에 직각방향 격자폭이다.

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

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

$$\delta_b = 3 d d_*^{0.7} T^{0.5} \quad (8)$$

여기서, $T = \frac{(\tau_b - \tau_{cb})}{\tau_{cb}}$, τ_b 는 바닥마찰응력, 침식한계응력 τ_{cb} 는 바닥에 있는 유사 이동하기 시작할 때의 마찰응력으로 실험으로부터 구할 수 있으며, s 는 유사 비중 (≈ 2.65), g 는 중력가속도, d 는 유사 평균입경, $d_* = d [(s-1)g/\nu^2]^{1/3}$, ν 는 물의 동점성계수이다.

2.3 물-유사 경계조건

하상에 있는 유사는 큰 유속 하에서는 침식하여 소류사 및 부유사로 이동하고, 유속이 느려지면 물과 함께 이동 중에 있던 부유사와 저층 경계부근에서 하상과 접촉하며 이동하던 소류사가 바닥에 퇴적한다. 유사 침식률(E)은 부유사가 되는 부유 침식률(E_s)과 소류사가 되는 소류 침식률(E_b)로 구분할 수 있다(그림 1). 전체 침식률은 자연하천에서 코아링을 통해 얻은 교란되지 않은 상태의 현장유사 시료에 대하여 Sedflume를 이용하여 깊이별, 전단응력별로 구할 수 있다(McNeil 등, 1996). 침식률 측정을 위한 시료채취는 단면적이 15 cm \times 10 cm인 직사각형 PVC관을 사용하여 하상에 있는 시료를 채취 가능한 깊이까지 코아링하는 방법으로 이루어졌다. 모형에서 임의 깊이, 임의 바닥마찰응력 하에서 침식률은 Sedflume를 사용하여 구한 전단응력별 수심별 침식률로부터 다음과 같이 선형 내삽하여 구한다.

$$E = \frac{\tau_{m+1} - \tau_b}{\tau_{m+1} - \tau_m} \frac{Z_0 - Z}{Z_0} E_m^{L+1} + \frac{\tau_b - \tau_m}{\tau_{m+1} - \tau_m} \frac{Z_0 - Z}{Z_0} E_{m+1}^{L+1} + \frac{\tau_{m+1} - \tau_b}{\tau_{m+1} - \tau_m} \frac{Z}{Z_0} E_m^L + \frac{\tau_b - \tau_m}{\tau_{m+1} - \tau_m} \frac{Z}{Z_0} E_{m+1}^L \quad (9)$$

여기서, Z 는 퇴적층의 현재 두께, Z_0 는 초기 퇴적층의 두께, E_m 은 전단응력이 τ_b 보다 작은 경우의 침식률, E_{m+1} 은 전단응력이 τ_b 보다 큰 경우의 침식률, L 과 $L+1$ 은 연직층의 위치를 의미한다. 현재 바닥면의 위치는 연직층 L 과 연직층 $L+1$ 사이이다.

모형에서 저층 퇴적층은 바로 침식 가능한 활성층(active layer), 활성층을 제외한 침식 가능 층인 퇴적층(deposited layer), 침식되지 않는 비활성층(parent bed layer)으로 구분하였다(그림 1). 퇴적층은 침식이 우세할 때는 활성층으로 퇴적이 우세할 때는 압밀현상을 겪으며 최종적으로 비활성층이 된다. 활성층 두께 L_a 는 van Niekerk 등(1992)에 의하면 다음과 같다.

$$L_a = 2 d_{50} \frac{\tau_b}{\tau_{cb}} \quad (10)$$

여기서, d_{50} 은 중앙입경이다.

부유사량과 전유사량의 비 $\frac{q_s}{q_t}$ 는 Guy 등(1966)이 다양한 크기의 유사와 흐름조건에 대해 개수로에서 유사량을 측정하고 결과를 이용하였다. 실험결과를 정리하여 마찰속도를 침강속도로 나눈 값 u^*/w_s 과 q_s/q_t 에 대하여 그림 2와 같이 도시하고, 다음과 같은 근사식을 얻었다.

$$\begin{aligned} \frac{q_s}{q_t} &= 0, \tau_b \leq \tau_{cs} \\ &= [\log_{10}(\frac{u^*}{w_s}) - \log_{10}(\frac{u_{*c}}{w_s})] / [\log_{10}4 - \log_{10}(\frac{u_{*c}}{w_s})], \\ &\tau_b > \tau_{cs} \text{ and } \frac{u^*}{w_s} < 4 \\ &= 1, \tau_b > \tau_{cs} \text{ and } \frac{u^*}{w_s} \geq 4 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, 마찰속도 u^* 는 $\sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$, 부유 한계마찰속도 u_{*c} 는 $\sqrt{\frac{\tau_{cs}}{\rho}}$, τ_{cs} 는 부유한계응력, w_s 는 입자 침강속도이다.

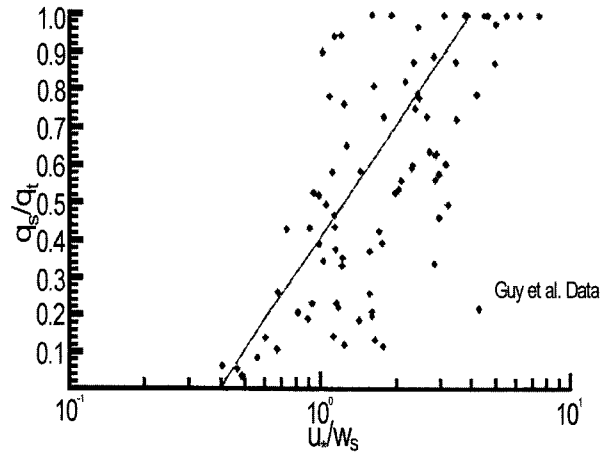


그림 2. 전유사량에 대한 부유사량의 비

부유사의 퇴적률은 입자의 침강속도와 바닥층에서 부유사의 농도 C_t 의 곱으로 표현할 수 있다. 그러나 실제 자연상태에서는 난류로 인하여 모든 입자가 침강하지 않으므로 확률 개념을 사용하여 부유사 퇴적률을 다음과 같이 표현하였다.

$$D_s = P_s w_s C_t \quad (12)$$

여기서, 퇴적확률 P_s 는 물의 흐름이 정지상태인 경우에 1이며, 유속증가로 난류가 증가함에 따라 감소한다. 비점착성 유사에 대해서는 Gessler(1967)가 제안한 다음 식을 사용하였다

$$P_{s,k} = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^Y e^{-\frac{1}{2}x^2} dx \quad (13)$$

여기서, $Y = \frac{1}{\sigma} [\frac{\tau_{cd}}{\tau} - 1]$, σ 는 전단응력의 표준편차로 0.57, τ_{cd} 는 퇴적한계응력이다.

Cheng(1997)은 점착성과 비점착성 유사를 포함하는 기존 실험자료를 분석하여, 다음과 같은 침강속도 식을 제안하였다.

$$w_s = \frac{\nu}{d} [\sqrt{25 + 1.2d^2} - 5]^{1.5} \quad (14)$$

입자크기가 작아 쉽게 부유하고 확산되는 점착성 유사와 부유사 농도는 잘 혼합된 흐름장에서 깊이에 따라 크게 변화하지 않으나 비점착성 부유사의 농도는 깊이에 따라 크게 변하는 것으로 알려져 있다. 따라서 점착

성 유사의 경우는 모형계산결과인 수심평균 농도를 바닥농도 대신 사용할 수 있으나 비점착성 유사의 퇴적을 산정시는 바닥층 농도를 구해야 한다. 부유사 모형의 계산결과인 수심평균농도와 바닥경계층 농도의 비는 van Rijn(1984b)을 참고하였다.

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

$$P_s = 1 - \frac{\tau}{\tau_{cs}} \quad (15)$$

소류사에 대해서는 침식량과 퇴적량이 같다는 국지 평형을 생각하면, 다음과 같은 침식률 계산식을 도출할 수 있다.

$$E_b = P_s w_s C_e \quad (16)$$

여기서, C_e 는 소류사 평형농도로 $0.11778 \frac{T}{d_*}$ 이다.

입자 k 의 소류사 침식률을 $E_{b,k}$ 라 하면, 식 (16)으로부터 입자 k 의 소류사 퇴적확률 P_k 는 다음과 같다.

$$P_k = \frac{E_{b,k}}{w_{s,k} C_{t,k}} \quad (17)$$

2.4 지배방정식의 수치해석

물의 유동과 유사 수송에 관한 방정식들을 유한차분화한 후에 각각의 계산격자요소에 대하여 적분하여 계산하는 체적적분법(Volume Integral Method)을 사용하여 수치해석하였다. 본 연구에서 사용한 체적적분법은 수평 계산영역을 직사각형 격자로 분할하고, FTCS (Forward Time and Centered Space)법을 사용하여 차분화한 식을 각 계산격자와 계산시간간격 Δt 에 의해 만들어지는 유한체적($\Delta x \times \Delta y \times \Delta t$)에 대해 적분하여 유한차분식을 구한다(Lick 등, 1986). 이 과정에서 Taylor급수가 이용되며, 이러한 과정을 거치면 시간과 공간에 대하여 2차의 정도를 갖는 차분식이 얻어진다. 이 방법은 경계처리에 유리한 장점을 가지고 있다.

3. 1차원 수로에서 장갑화 현상에 대한 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 cm에 대하여 수치실험하였다. 복합유사의 초기 입경분포는 그림 3의 Exp.(t = 0)와 같다. 계산결과는 수치실험결과(Vogel 등, 1992)와 비교되었다. 모의시 침식률은 전체밀도 1.95 g/cm^3 인 유사에 대해 Sedflume을 사용해서 측정된 결과(그림 4)를 식 (9)를 사용하여 내삽하는 방법으로 구하였다. 바닥마찰응력은 Vogel 등(1992)이 MIDAS 모형(1차원 모형)을 이용한 연구와 동일하게 Manning의 조도계수 0.017을 사용하였다. 계산시작 600분후 모의결과는 세립자의 비율은 감소하고 조립자의 비율이 증가하는 장갑화 현상을 비교적 정확히 재현하여, 실험치와 거의 일치하였다. 따라서 직접 측정된 침식률을 사용하는 방법이 비교적 양호하게 유사 이동과정을 모의하는 데 활용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

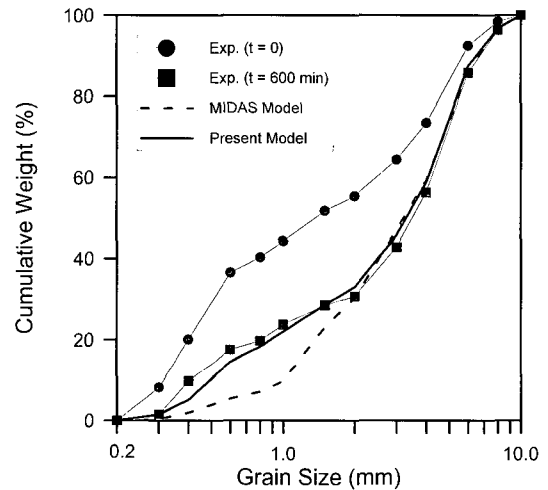


그림 3. 1차원 수로에서 입도분포 변화 모의결과의 비교

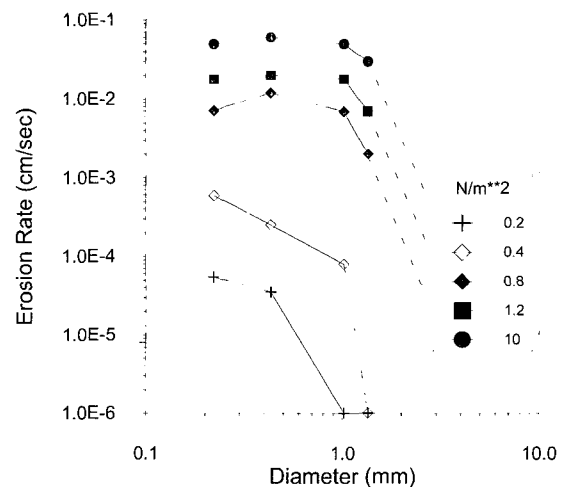


그림 4. 입경별 전단응력별 침식률 측정결과

4. 홍수시 팍스강 유사 수송 모의

위와 같은 과정을 통해 수립된 모형의 검증 및 정상 반응을 확인한 후에 모형의 현장 적용성을 검토하기 위하여 팍스강(그림 5)에서 홍수시 유사 이동현상을 모의하고 관측자료와 비교하였다. 팍스강은 미국 Wisconsin 주에 위치하고 있으며, 하천수는 미시간호의 Green 만으로 흐른다. 이 강은 1960년대 말까지 제지공장에서 나온 PCB가 강으로 직접 유입된 곳으로 부유사에 흡착되어 이동하다가 하상에 침전되어 있는 PCB 오염유사로 인해 하천바닥과 물이 심하게 오염되어 있다. 지금까지 많은 연구가 있었으며, 유입된 PCB의 대부분이 DePere댐과 Green만 사이에 퇴적되어 있다고 알려져 있다. 팍스강의 유사이동에 대해서는 Gailani 등(1991)이 수치모델링을 수행한 바 있다. 그들의 연구는 본 연구와는 달리 교란된 현장 퇴적물을 가지고 실험실에서 재구성한 시료에 대해 측정된 침식률을 모형에서 사용하여 현장에서 발생하는 실제 침식률을 정확히 고려하지 못하였으며, 소류사를 무시하고 부유사 이동만 모의하였다. 이 지역의 최근 연구의 관심사는 오염된 퇴적물의 얼마만큼이 Green 만으로 이동하느냐, 어떻게 오염된 퇴적물을 처리할 것인가 등이다. 본 연구에서도 저감대책 수립에 참고하기 위해 PCB로 오염된 유사의 홍수시 이동특성을 수치모의를 통해 평가하였다.

모델 적용영역은 DePere Dam에서 Green Bay까지 11 km 구간으로 수심분포도는 그림 6과 같다. 상류와 육지경계 부근은 대체로 수심이 얇고, 하류는 수심이 깊으며, 최대 약 10 m이다. 저층 유사는 주로 실트로 구성되어 있으나 수로 중앙에는 모래로 구성되어 있고, 일부 지역은 실트와 모래가 혼합되어 있다. 모델영역으로 유입되는 유량은 주로 DePere Dam에 의하여 조절되며, 모델 영역 하류부에 위치한 East River를 통하여 일부 유량이 팍스강으로 유입된다. 유량의 연변화는 30 ~ 280 CMS이다. 모의를 위하여 DePere Dam에서 Green Bay 방향으로 90 m, 하천에 횡방향으로 30 m의 격자를 구성하였다. 댐을 통한 유입량과 부유사 농도는 측정된 일평균 값이 사용되었다. 기존 연구(Gailani 등, 1991)와 마찬가지로 East River에서의 값은 자료부재로 유입량은 댐방류량의 1/10을, 농도는 DePere Dam에서와 동일한 값을 사용하였다.

침식률은 그림 5의 정점들에서 코아링한 유사 퇴적층 시료를 Sedflume을 사용하여 측정된 값을 이용하였다(McNeil 등, 1996). 정점 8에서의 값은 평균 입자크기가 20 μm 인 세립사로 구성된 하천 가장자리에서 침식률을 계산하는 데, 정점 11에서의 값은 평균 입자크기

가 50 ~ 100 μm 인 실트질 유사의 침식률 산정에, 정점 14에서 값은 100 μm 이상인 입자로 구성된 영역(수로중앙)에서 침식률 산정에 이용되었다. 그림 5의 정점들에서 채취한 유사의 입도분포 분석결과와 연최대 홍수량의 일정방류로부터 산정한 마찰응력분포를 토대로 하여 모델영역의 하상 유사에 위에서 언급한 8, 11, 14 정점의 특성을 갖는 퇴적층중 하나라고 정의하였다. 침식률 측정자료는 유사의 연직위치에 따른 침식률 변화가 고려될 수 있도록 전 퇴적층을 11개로 분할하여 입력하였다. 초기 입경분포는 그림 7과 같다. 평균입경크기가 육지경계부근에 있는 회색부분에서 27 μm , 흰색부분에서 75 μm , 검은색 부분에서 200 μm 이다. 초기 조건으로 코아링한 유사를 조사한 결과와 모형 민감도 분석결과로부터 하상에 약 0.3 cm 두께의 새로이 퇴적된 유사인 활성층이 존재한다고 정의하였으며, 입자구성비는 5 μm 와 50 μm 의 입자를 동일한 비율로 분포시켰다. 유사 입자구성은 관측결과를 단순화하여 5, 50, 300 μm 크기입자가 혼합되어 있다고 가정하였다. 새로이 퇴적된 유사의 침식률은 Fox River 유사를 재구성하여 Sed-flume에서 측정된 침식률을 이용하였다. 그림 8은 침식률 측정자료의 한 예로 그림 5의 정점 11에서 침식률의 전단응력별 깊이별 변화이다. 바닥마찰응력이 증가함에 따라 침식률이 증가하며, 깊이가 증가함에 따라 압밀에 의하여 체적밀도가 증가하여 침식률 크기가 감소하는 모습을 보이고 있다.

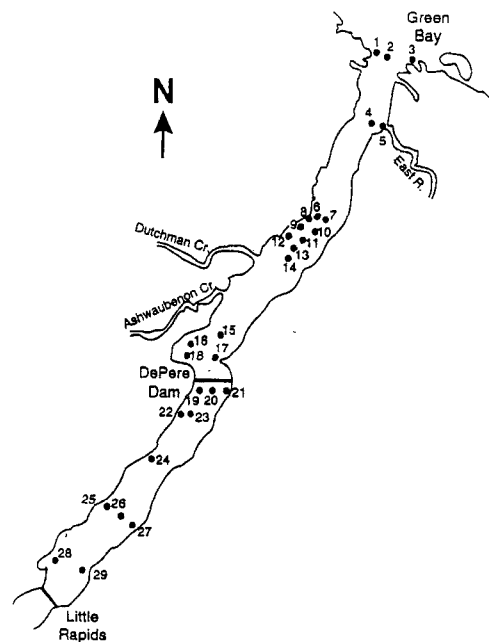


그림 5. 모델링 영역의 지형과 유사 시추위치도

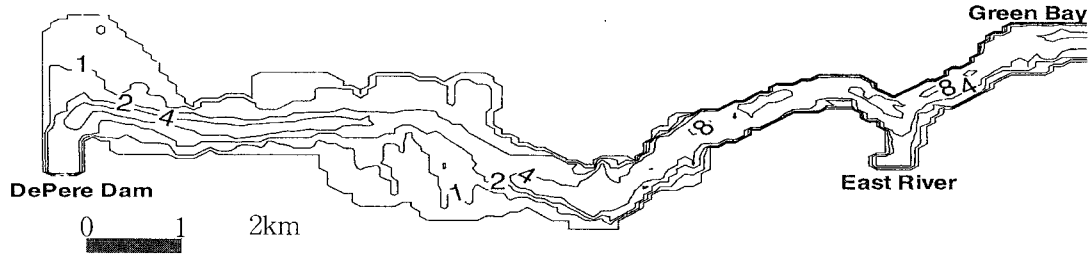


그림 6. Lower Fox 강의 수심분포

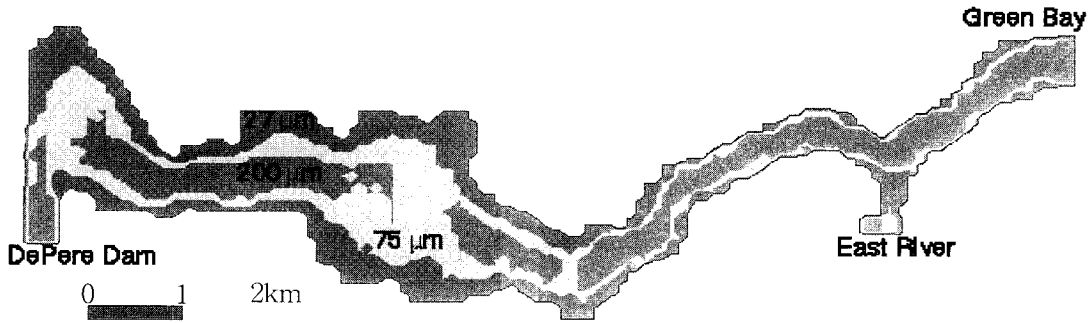


그림 7. 유사이동 모의를 위한 초기 입경분포

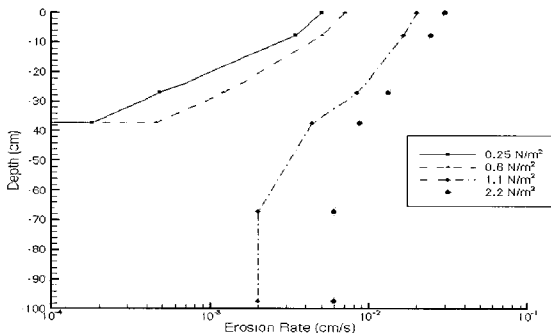


그림 8. 11번 정점 퇴적물의 침식을 측정결과

모의 기간인 1989년 5월 22일부터 6월 20일까지 댐에서 방류량의 변화, 댐에서의 SS 농도 변화, 강하류인 Green Bay 입구에서의 SS 농도 변화는 그림 9와 같다. 관측초기에 유량이 약 $150\text{m}^3/\text{sec}$ 로 증가함에 따라 부유사 농도가 약 130 mg/l 로 증가한다. 유량이 5년 빈도 홍수량인 $425\text{m}^3/\text{sec}$ 에 도달했을 때, 댐에서의 부유사 농도는 190 mg/l 까지 증가하며, 유량이 감소함에 따라 50 mg/l 로 감소한다. 모의영역의 하류인 Green Bay에서의 농도변화는 전반적으로 댐에서의 농도변화와 동일한 변화양상을 보였으며, 홍수가 시작하는 초기에는 약간의 유량증가에도 농도가 크게 증가하는 모습을 보였다. 상류단 경계조건으로 댐에서의 방류량과 부유사 농

도를 입력하여 모의하였으며, 하류부에서 부유사 농도 관측자료와 비교한 결과는 그림에서 보는 바와 같이 전반적으로 잘 일치하였다(그림 10). 모의시 댐에서의 입경분포는 예비모의결과를 토대로 그림 11과 같이 나타내었다.

모의시작 30일후 퇴적층 두께 변화(그림 12)를 보면, 수로 중앙부에는 주로 침식이, 수로 가장자리에는 주로 퇴적이 발생하였다. 퇴적깊이는 상류부에서 최대 19 cm , 침식깊이는 하류부에서 최대 7.5 cm 이다. 상류의 협수로부와 수로 중앙부에서는 0.5 cm 정도의 침식이 발생하였고, 댐과 East River 하류에서는 퇴적이 발생하였다. 최

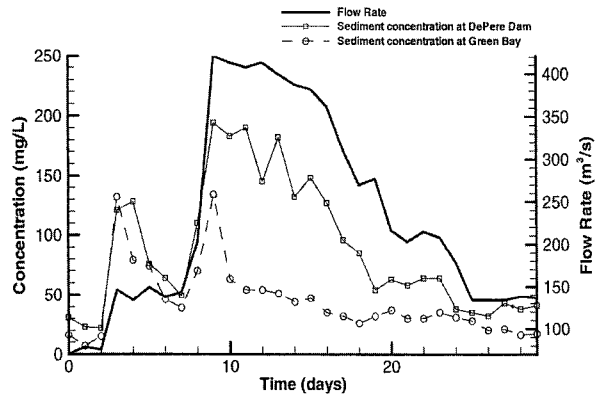


그림 9. USGS의 유량과 부유사 농도 관측결과

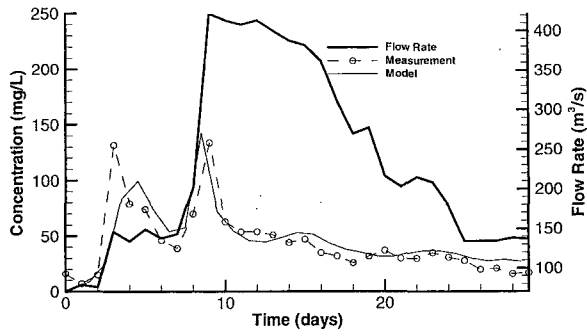


그림 10. 부유사 농도 시간변화의 비교

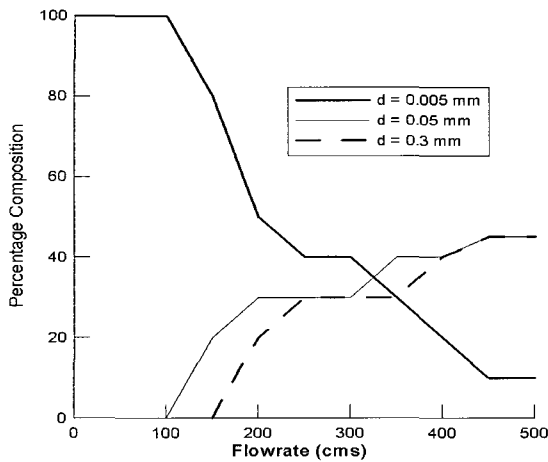


그림 11. DePere Dam에서 유량과 입경분포의 관계

대유량시 상류 협수로부에서 유속은 최대 약 40 cm/sec에 달하였으며, 하류부 일부 지점에서 유속은 최대 약 80 cm/sec로 이때 발생하는 바닥마찰응력은 최대 $1.6 N/m^2$ 이었다(그림 12와 13). 이상과 같은 모의결과는 침식률을 조절변수로 사용하지 않고 현장 침식률 측정자료에 기초하여 계산하는 방법을 사용해서 얻은 결과이다. 부유사 농도변화에 대한 계산결과가 전반적으로 관측자료와 일치함에 따라 본 방법이 유사 수송현상을 비교적 정확히 모의할 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

현장 침식률 측정자료를 직접적으로 이용하여 침식률을 계산하였으며, 모형내 조절변수를 감소시킨 2차원 유사 수송모형을 팍스강에 수립하였으며, 홍수시 발생하는 부유사 농도분포 및 지형변화를 성공적으로 모의하였다. 모형 검증을 위해 수행한 1차원 수로에서 장감화 현상 모의결과도 수리실험결과와 일치하는 양호한 계산결과를 보였다. 현장에서 교란되지 않고 코아링한 유사 시료에 대해 Sedflume을 사용하여 수심별 바닥마찰응력별 침식률을 측정된 결과를 직접 사용하여 미국 팍스강에서 홍수시 유사 수송을 모의한 결과, 계산된 부유사 농도분포는 실험자료와 일치하는 매우 양호한 계산결과를 보였다. 따라서 유사모형에서 사용되는 침식률 계산방법의 불확실성을 감소시켰다. 현재의 연구

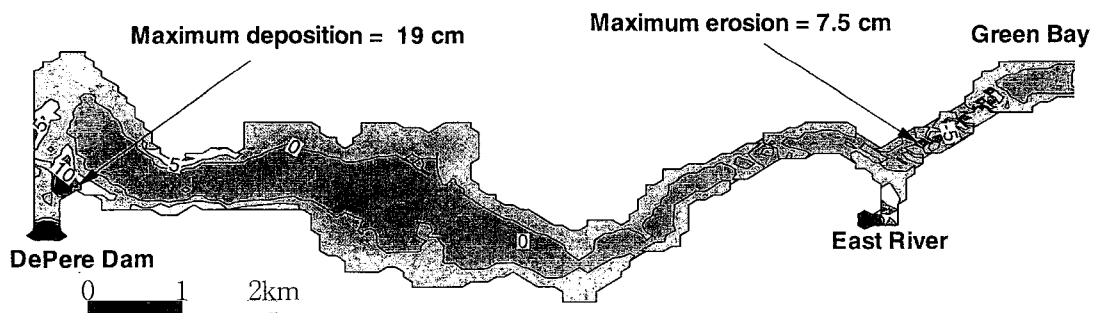


그림 12. 퇴적층 두께의 변화량 분포도

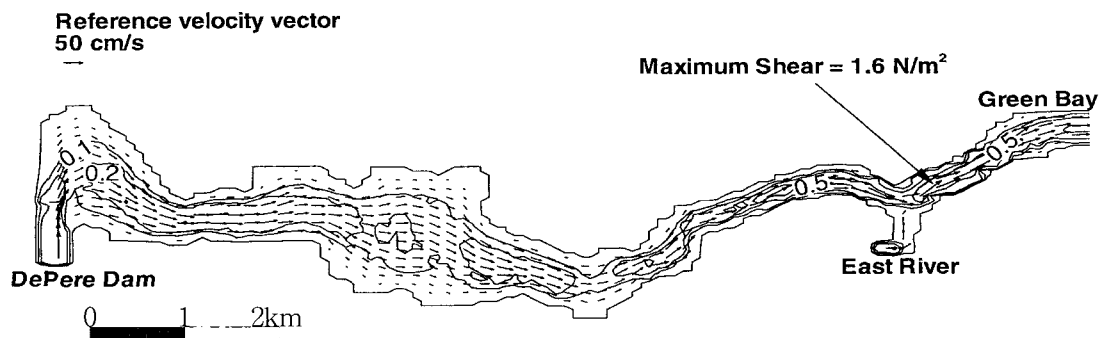


그림 13. 5년빈도 홍수량 방류시 유속분포도

결과를 부유사 농도에 대해서만 검증은 실시하였다. 그러나 추후 유사 입도분포 변화, 지형변화 등에 대한 추가검증이 요구되며, 이를 위한 현장관측도 필요하다. 또한, 현재는 침식률에 대해서만 측정자료를 직접 이용하였으나 퇴적률도 유사이동에 있어 매우 중요한 요소이다. 따라서, 현장 퇴적률을 직접 관측하기 위한 연구가 앞으로 필요하다. 이외에도 모형의 예측성을 높이기 위해서는 점착성 유사의 응집과정 등에 관한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- 정태성 (2001a). "홍수시 하천 퇴적물의 침식량 추정." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제34권 제5호, pp. 53-59.
- 정태성 (2001b). "침식률 측정자료를 이용한 2차원 퇴적물 수송모형의 개발." **한국수자원학회논문집**, 제34권, 제6호, pp. 687-699.
- 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, Vol. 133, No. 2, pp. 149-152.
- Gailani, J., Ziegler, C.K., and Lick, W. (1991). "The transport of sediments in the Fox River." *J. of Great Lakes Research*, Vol. 17, pp. 479-494.
- 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.
- Guy, H.P., Simons, D.B., and Richardson, E.V. (1966). *Summary of alluvial channel data from flume experiments, 1956-1961*. Geological Survey Professional Paper 462-I, Washington, D.C.
- Lick, W., Ziegler, K., and Lick, J. (1986). "Interior and boundary difference equations for hyperbolic differential equations." *Numerical Method for Partial Differential Equations*, Vol. 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, Vol. 122, No. 6, pp. 316-324.
- Metha, 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 Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 8, pp. 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 Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 12, pp. 1261-1267.
- 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, Vol. 118, No. 2, pp. 246-262.
- van Rijn, L.C. (1984a). "Sediment transport, Part I: Bed load transport." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 10, pp. 1431-1456.
- van Rijn, L.C. (1984b). "Sediment transport, Part II: Suspended load transport." *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 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, Vol. 118, No. 2, pp. 263-279.

(논문번호:04-83/접수:2004.09.03/심사완료:2004.11.25)