

물막이댐 주변에서의 국부세굴현상 모의 Numerical Modeling of Local Scour Around a Cofferd Dam

노준우¹⁾ / 김우구²⁾

Noh, Joon woo / Kim, Woo Gu

요 지

하상변동은 유속에 의해 얻어지는 전단력에 직접적으로 영향을 받게 된다. 특히 교대나 교각, 그 밖에 수제공 등을 비롯한 수공구조물의 설치에 의하여 흐름단면이 급격히 감소되는 구간에서는 이러한 현상이 매우 활발하게 일어나게 되는데 이는 국부세굴의 직접적인 원인이 되기도 한다. 본 논문에서는 단면축소에 기인한 유속증가에 의해서 발생하는 국부세굴현상을 2차원 유한요소 모델을 사용하여 모의하고 주변의 전반적인 하상변동현상을 규명해 보았다. 먼저 2차원 흐름모형으로부터 유속성분을 구하고 전단력을 구한 다음 소류사 이동공식을 적용한 하상토 보존방정식을 풀이함으로써 국부세굴에 따른 하상의 변동을 수치모델로 예측할 수 있게 된다. 본 논문에서는 유한요소법을 이용, 하상토 보존방정식을 계산한 다음 일정시간동안 모델수행을 통해서 변동이 거의 없을 때까지 하상의 변동사항을 순차적으로 모의하고 예측해 보았다. 적합한 구간을 선정하여 단면축소에 기인한 유속증가로 인한 국부세굴을 모의하기 위하여 본 모델을 개발, 적용하였다.

미국 미시시피 강에서 Lock & Dam No. 26을 교체하는 제 1단계 작업 중 물막이댐 건설로 인하여 흐름단면이 약 50% 감소하게 된다. 주로 단면축소 구간을 적용대상으로 선정하여 물막이댐 주변의 하상변동을 모의한 다음 실제 관측치와 비교하여 본 모델의 효용성을 입증하였다. 모형은 기본적으로 유한요소법을 이용해서 하상토 보존 방정식을 풀이한 것으로 van Rijn 소류사 이동공식을 적용하였다. 세굴현상에 기인한 수심증가로 인한 전단력 감소현상도 흐름의 연속조건을 도입하여 모의가능 하게끔 작성하였다.

핵심용어 : 국부세굴, 물막이댐, 하상변동, 유한요소법

1) 한국수자원공사 수자원시스템연구소 선임연구원 (E-Mail : jnoh101@dreamwiz.com)

2) 한국수자원공사 수자원연구원 원장 (E-Mail : wgkim@kowaco.or.kr)

1. 서론

하도의 단면적 감소는 흐름단면을 감소시켜 국부유속이 증가되고 상응하는 전단력과 와류의 발생, 난류흐름이 증가되는 직접적인 원인이 된다. 이와 함께 하상변동도 활발히 진행되어 이러한 요소들이 조합되어 수공구조물의 국부세굴을 초래하게 된다.

세굴현상에 관한연구는 주로 교대나 수제공주변에서 국부 전단력 증가로 발생하는 하상변동에 대하여 진행되어 왔다. Tingsanchali and Maheswaran (1990)은 유선곡률을 수제공의 끝단부 전단력 계산에 도입하여 계산한바 있으며 Ouillon and Dartus (1997)는 k-e 3차원 난류모형을 개발하여 수제공 주변에서의 전단력분포에 대하여 적용하였다. Molinas 등(1998)은 교각주위의 전단력 분포도를 조사하고 증분에 대한 경험적인 공식을 유도하였다.

본 논문에서는 특히 흐름단면 감소에 기인한 전단력 증가에 의한 물막이댐 주변에서의 급격한 하상고변동에 대해서 다루고 있다. 제안된 모델은 하상토 방정식을 유한요소법으로 풀이한 것으로 평형상태는 흐름연속방정식을 도입하여 다루고 있다. 또한 비정상 조건을 다루기 위하여 Lumped 행렬을 채택하여 대각선 행렬로 바꾸어 줄으로써 효율적으로 처리할수 있도록 하였다. 현장결과와 비교를 통하여 본 모델을 검증하고 그 적용성을 평가하였다.

2. 지배방정식

하상토 보존법칙의 지배방정식은 다음과 같다.

$$y_s \frac{\partial z}{\partial x_i} + \frac{\partial q_s}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

여기서 y_s =입자의 비중, z =하상고, 그리고 q_s = 단위폭당 유사량

Tanguy 등(1989)은 수제공을 가지는 하도에서의 하상고 분포를 수치적으로 모의하였다. 유사한 연구로는 Brors (1999)에 의한 수중파이프 하단부의 세굴현상을 하상토 방정식을 이용하여 모의한 예를 들 수 가 있겠다. 흐름방정식은 rigid-rigid 개념의 k-e 난류방정식을 채택한 유한요소모델을 사용하여 계산하였고, 하상토 보존방정식은 2차원 유한차분법으로 계산하였다. 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left[-\frac{\partial q_i}{\partial x_i} + D - E \right], \quad i=1,2 \tag{2}$$

여기서 λ =공극, D =단위시간의 퇴적율, E =단위시간내 침식율

소류사 이동공식은 한계전단응력, 전단응력, 그리고 입자지름 등으로 나타낼 수 있다. 그리고 침식과정은 흐름수심과도 밀접한 관계를 가지게 된다. 침식과정에 의한 수심증가는 전단응력을 점진적으로 감소시켜서 결국 평형상태에 도달하게 되면서 침식과정이 더 이상 발생하지 않게 된다. 이와 반대로 퇴적이 발생하는 영역에서는 퇴적작용으로 인하여 수심이 감소되므로 전단응력이 증가하게 되는 결과를 초래하게 된다.

3. 모델설명

하상고변화 과정은 다음과 같이 2차원 하상토 보존방정식으로 표현할 수 있다.

$$(1-\lambda) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

여기서 λ =공극, z =하상고, q_{sx} =x 방향유속에 의한 유사량, q_{sy} =y 방향유속에 의해 얻어지는 유사량.

상기 지배방정식을 유한요소방정식으로 표현하면,

$$\delta J_e = \int_{V_e} \{N\}^T \{z \cdot\} + \int_{V_e} \{ \delta z \}^T \{N\} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right] \{q_{sx}\} dV + \int_{V_e} \{ \delta z \}^T \{N\} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right] \{q_{sy}\} dV \quad (4)$$

여기서, N =형상함수, δz =가중함수, 그리고 V =단위높이를 가지는 단위체적
 식 (4)의 $\{z \cdot\}$ 을 얻기 위해서는 시간항을 커패시티 행렬 $[C]$ 로 바꾸어 주어야한다. 식
 (4)는 특정시간에서의 시간 t 에서 다음과 같이 행렬형태로 기술 가능하다.

$$[C]\{z \cdot\} = -\{q'\}_t \quad (5)$$

여기서, $q' = x, y$ 방향에 대한 유사량의 변위량
 윗식에서 볼 수 있듯이 만약 커패시티 행렬 $[C]$ 가 대각선 행렬로 구성된다면 $\{z \cdot\}$ 는 매우
 쉽게 계산가능하다. 이러한 계산상의 편리를 위해서 몇가지의 커패시티 행렬을 대각선행
 렬로 바꾸는 방법이 연구 발표되었다. 식에서

$$C(I, J) = \sum_{j=1}^{NPE} \int_{V_e} N_{j\mu} N_{j\nu} dV \quad (6)$$

형상함수의 합산은 항상 1이 되므로 윗식의 대각선 항은

$$C(I, I) = \int_{V_e} N_{i\mu} dV, \quad C(I, J) = 0, \quad I \neq J \quad (7)$$

이 방법은 분포형을 가지는 점원을 각 절점에 분포시켜서 적절하게 분산 해석하는 방법과
 비슷한 해석방법이다.

또한 소류사 이동공식은 Van Rijn의 공식을 채택하여 적용하였다. 유사량은 다음과 같이 결
 정된다.

$$q_b = 0.053 \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g \right]^{0.5} d_{50}^{1.5} d_*^{-0.3} T \quad (8)$$

여기서 $d_* = d_{50} \left[(s-1) \frac{g}{v_m^2} \right]^{1/3}, \quad T = \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c}$

식 (8)을 부연설명하면 특정지점에 부여되는 하상의 전단응력이 한계전단응력을 초과할 때
 세굴현상이 발생하며 한계전단응력 미만일 경우 발생유사량은 0 이 된다. 한계전단응력은
 다음식과 같이 계산된다.

$$\tau_c = 0.047 (\rho_s - \rho) g d_{50} \quad (9)$$

각 유속분포에 상응하는 전단응력은 다음과 같이 주어진다.

$$\tau = \rho g \frac{n^2 |VV|}{(H+h)^{1/3}} \left(\frac{H}{h} \right)^2 \quad (10)$$

여기서 n 은 마닝조도계수이고 Strickler 의 공식을 채택하여 $n = d_{90}/26$ 로 구할 수 있다.

4. 모형의 검증 및 적용

이 소류사 이동모형을 자연하천을 대상으로 적용해 보았다. 대상하천은 Mississippi 강의 물
 막이 댐 건설에 의하여 하폭이 거의 50 % 감소하는 구역을 대하여 하상고 변동상황을 모의
 해 보았다. 하천의 폭은 460 m, 하도의 길이는 6520 m 에 달하는 영역을 모형의 적용구간
 으로 선정하였고 그림 1. 에 하도의 형상과 함께 메쉬 생성프로그램을 이용하여 제작한 유
 한요소망이 나와 있다. 건설되는 물막이댐은 하도의 흐름단면을 약 50% 감소시키며 이 구

간에서는 유속증가로 인한 세굴현상이 매우 활발하게 진행된다. 하상변동상황을 모의하기 위해서는 먼저 유속성분을 구해내고 이를 토대로 전단응력을 계산하게 된다. 그림 2.는 2차원 동수역학모형을 사용하여 계산된 유속분포를 보여준다.

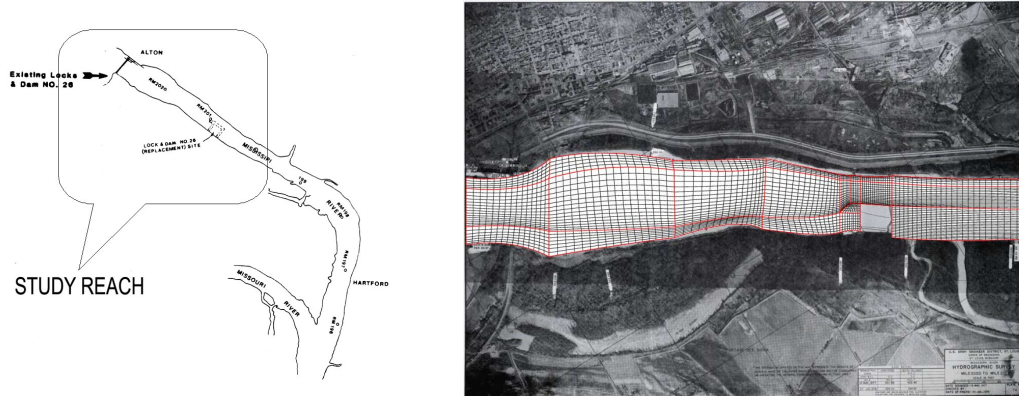


그림 1. Mississippi 강의 모형적용구간과 유한요소망

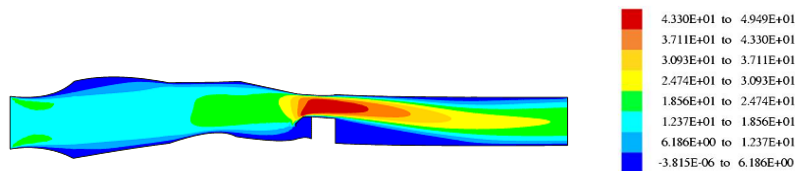


그림 2. 모의구간의 유속분포도

모의시간을 각각 1일, 3일, 그리고 10일에 걸쳐서 설정한 후 그 양상을 관찰해 보았다. 각각의 시점에서 계산된 최심하상고는 초기 하상고 361 ft를 기준으로 5.13ft, 10.4 ft, 그리고 18.45 ft로 계산되었으며 그 결과가 그림 3.에 순차적으로 표현되어 있다. 주어진 공극률은 0.6으로 가정하고 계산하였다.

모의결과로부터 알 수 있듯이 단면감소에 따른 유속증가에 기인한 세굴현상은 상류부로부터 출발해서 점진적으로 하류부로 이동, 천이해 감을 파악할 수 있었고, 세굴현상 자체가 수면을 증가시켜 더 이상의 하상저하는 이루어지지 않고 평형상태에 점차적으로 접근되는 물리적 현상 또한 잘 표현해 주고 있다.

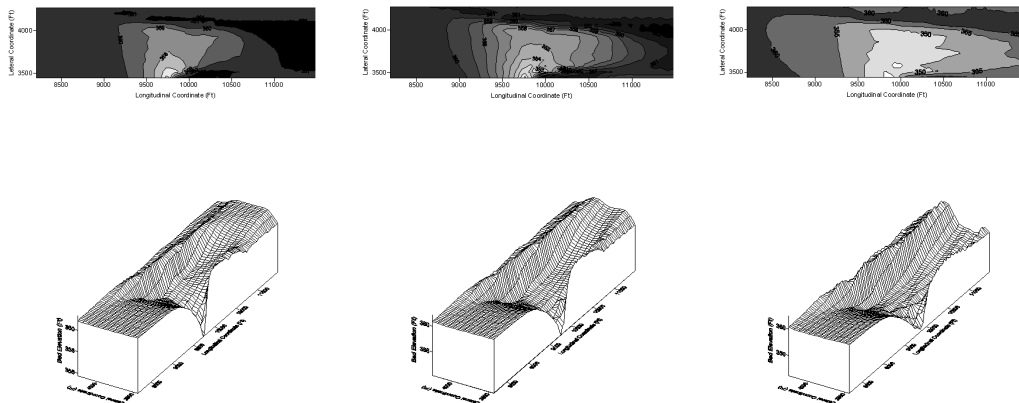


그림 3. 1일(24시간), 3일, 10일의 모의시간별 단면축소부에서의 하상변동

5. 결론 및 정리

본 연구에서는 동수역학모델의 유속성분을 전단응력계산에 직접적으로 적용하여 하상토 보존방정식을 계산함으로써 2차원적인 세굴현상을 모의하였다. 기본적으로 정상상태의 흐름을 가정하고 비정상상태의 하상고 변동을 모의하는 내용이 된다. 측정값과 비교한 결과 제안된 모형은 비교적 실측치를 잘 반영하였고 본모형의 적용성을 입증해 준다.

결과적으로 본 모형을 사용하여 계산된 값은 실측치를 잘 반영하고 있으며, 수리구조물 설계상의 문제에서 기초의 깊이를 설계하는 데에도 효과적으로 사용될 수 있을 것이다. 덧붙여서, 본 모형을 하천설계에 이용하여 다양한 흐름조건에서 매우 심각한 세굴현상이 발생하는 지점을 파악하고 이러한 일련의 과정을 모의하는데도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

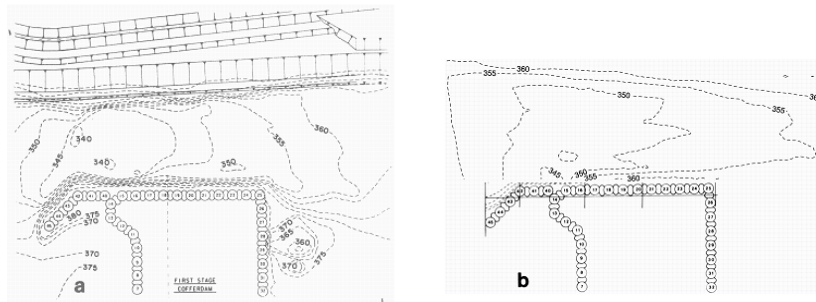


그림 4. 실측치와 계산값의 비교

참고문헌

- Brors, B. (1999). "Numerical modeling of flow and scour at pipelines." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 125 (5), pp. 511-523.
- Heinrich, J.C., Huyakorn, P.S., Zienkiewicz, O.C., and Mitchell, A.R., (1977). "An Upwind Finite Element Scheme for Two Dimensional Convective Transport Equation." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. (11) pp. 627-643.
- Molinas, A., Khiereldin, K., and Wu (1998) "Shear stress around vertical wall abutments." *Journal of hydraulic engineering*, ASCE, Vol. 124 (8), pp. 822-830.
- Ouillon, S., and Dartus, D. (1997). "Three Dimensional Computation of Flow Around Groyne" *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123 (1), pp. 962-970.
- Rajaratnam, N., and Nwachukwu, B. (1983). "Flow Near Groyne-Like Structures." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 109 (3), pp. 463-480.
- Tanguy, J. M., Dhatt, G., Frenette, M., and Monadier, P. (1989). "Modelisation of solid bed-load transport with the finite element method." *La Houille Blanche*, Paris, France, Vol. 3-4, pp. 263-267 (in French).
- Tingsanchali, T., and Maheswaran, S. (1990). "2-D Depth Averaged Flow Computation near Groyne." *Journal of Hydraulic Engineering*, 116 (1), pp. 71-86.
- Zienkiewicz, O. C. (1989). "The Finite Element Method." (4th ed. Vol. 2) McGraw-Hill