

세굴공내 토사입자 산정을 위한 기초 수치실험 Numerical Simulation of Sediment in a Scour Hole

김경환¹, 김동철², 최병호³, 윤성범⁴

Kyung Hwan Kim¹, Dong Chule Kim², Byung Ho Choi³ and Sung Bum Yoon⁴

1. 서 론

윤(2004)은 교각주위 세굴공내에서의 토사입자의 움직임을 세밀히 관찰함으로써 토사입자의 거동 매카니즘에 대한 정성적인 서술과 기존의 세굴산정 수치모형이 흐름이 없는 정수중에서는 하상의 가해지는 전단력이 '0'이 되므로 토사의 수중안식각보다 하상 경사가 급한경우에도 토사의 이동 즉 사태(sliding)가 발생하지 않는 비현실적인 결과들을 주고 있다고 보고한 바 있으며 Yen 등(2001)의 모형은 기존의 수치모형과 달리 하상물질에 가해지는 전단력의 산정에 있어서 흐름의 영향과 토사입자에 가해지는 중력 즉 토사의 중량의 영향이 모두 고려된 점을 지적한 바 있다. 본 연구에서는 FLOW3D의 세굴 모형(sediment scour model) 역시 이러한 기본적인 매카니즘이 고려되었음을 간단한 수치실험의 결과로서 제시하고자 한다.

2. FLOW3D의 세굴 모형

FLOW3D의 세굴 모형(sediment scour model)은 두 부분으로 나누어지는데, 한 부분은 부유사이고 다른 부분은 packed sediment이다. 부유사는 국지적인 압력 구배의 영향으로 인해 유체에 부유 운동한다. 부유사는 유입 경계(inflow boundaries) 또는 packed sediment의 침식으로 인해 생긴다. 이동을 하지 않는 packed sediment는 주변의 입자에

의해 구속된 퇴적물입자를 말한다. 임계 압축 농도(critical packing concentration, input file에서 SCRFCR)에 의해 분리되는 그것의 값은 packed sediment에 의해 점유된 셀의 체적 부분(fraction)을 말한다. packed sediment는 단지 유체에 의한 침식이 될 때, 움직일 수 있다. 유체 상태가 침식되는 것보다 더 빨리 부유사가 packed sediment로 분류되는 상황이라면 부유사는 packed sediment가 될 수 있다.

퇴적물 농도는 질량/체적(e.g. g/cm³ in CGS)의 단위로 저장된다. 고체 체적 부분(fraction), f_s 는 퇴적물에 의해 점유된 전 체적에 대한 부분(fraction)으로서 측정된다. 이것의 값은 미시적인 퇴적물 밀도(ρ_s , input file에는 SCRRHO로서 표기)에 의해 분리되는 두 퇴적 농도의 합으로부터 유도된다. 액체 fraction(fl)은 전 체적의 부분(fraction)에 대한 액체에 의해 점유된 부분이고, $1-f_s$ 와 같다. 고체 프랙션 f_s 는 점성계수와 항력 모형을 위해 사용된다.

평균유체점성계수는 부유사에 의해 증대된다. 이 증가량은 퇴적물 농도와 같이, 고체체적 프랙션이 점착성 고체 프랙션 $f_{s,co}$ 에 다다를 때까지 상승한다. 고체와 같은(solid-like) 움직임은 선형 항력 조건을 투과성 매체를 통한 흐름으로서 운동량 방정식에 넣음으로서 예측될 수 있다. 점성계수는 아래 식 (1)과 같다.

$$\mu^* = \mu_f \left(1 - \frac{\min(f_s, f_{s,co})}{F_{s,CR}} \right)^{-1.55} \quad (1)$$

¹ STI Korea Inc. 차장

² 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정((주)헤인 이엔씨 부설 기술연구소 차장)

³ 성균관대학교 토목환경공학과 교수

⁴ 한양대학교 토목환경공학과 교수

여기서, μ_f 는 액체의 분자 점성계수이고, μ^* 는 혼합물의 평균점성계수이다. $f_{s,CR}$ 은 입체고체프랙션이다. FLOW3D에 사용되는 난류모형은 전 점성계수를 더 상승시킬지도 모른다. 입체 고체 프랙션은 퇴적물 입자가 고체와 유사한 질량 (solid-like mass; 유체의 흐름이 끝나면 항력계수 K 는 무한하다)과 같이 완전하게 구속이 될 때의 고체 프랙션을 말한다. 항력계수는 고체 체적 프랙션의 함수로서 계산되고 식 (2)과 같다.

$$K = \begin{cases} 0 & f_s < f_{s,co} \\ \frac{f_{s,CR} - f_{s,co}}{f_{s,CR} - f_s} \left[\frac{f_{s,CR} - f_{s,co}}{f_{s,CR} - f_s} \right] & f_{s,co} < f_s < f_{s,CR} \\ \infty & f_s > f_{s,CR} \end{cases} \quad (2)$$

식 (3)은 모멘트 방정식으로 대입시킨 것이다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + g - Ku \quad (3)$$

거시적 밀도($\bar{\rho}$)는 고체체적 프랙션의 선형함수로 식 (4)와 같이 가정한다.

$$\bar{\rho} = \rho_L + f_s(\rho_s - \rho_L) \quad (4)$$

여기서, ρ_s 와 ρ_L 은 각각 퇴적 입자와 액체의 미시적 밀도를 말한다. 표류(drift)는 입자의 부력 때문에 생기는 퇴적입자의 침강(settling)이다. 표류 속도(drift velocity)는 식 (5)와 같다.

$$u_{drift} = \frac{f_L d^2}{18\mu} \frac{\nabla P}{\rho} (\rho_s - \rho_L) \quad (5)$$

여기서, d 는 평균 퇴적입자 직경(mean sediment particle diameter)이고, μ 는 액체점성이다. $\nabla P/\rho$ 는 역학 포텐셜 구배(mechanical potential gradient) 또는 물체가속도(body acceleration)이다. $\nabla P/\rho$ 는 압력에서 가능수치진동(possible numerical oscillation)의 효과를 제거하기 위해 중력의 10배까지로 제한된다. 액체 자유수면의 근접하여, $\nabla P/\rho$ 는 g 에 의해 대체된다. 표류(drift)는 고체의 실제에 의해 제한되기 때문에, f_L 은 식 (5)에 포함된다. 완전한 고체가 되면($f_L=0$)인 곳에서는, u_{drift} 는 '0'이 된다.

packed bed of sediment의 표면에서 유체전단응력은 퇴적물을 없애기 위해 움직인다. 표면으로부터 침식된 양은 유체전단응력, 입계전단응력과 유체와 고체 밀도들의 함수이다. 입계 shields parameter (critical Shields parameter)는 다양한 입자 직경과 밀도를 가진 packed sediment interface(계면)으로부터 입자를 부유시키기 위해 필요한 최소 전단응력과 상호 연관된다(식 (6)).

$$\theta_{crit} = \frac{\tau_{crit}}{g(\rho_f - \rho_s)d} \quad (6)$$

여기서, τ_{crit} 는 입자의 부유를 야기 시키는데 요구되어지는 바닥 표면에서의 최소전단응력이다.

이 모형은 부유-소류사 모형인데, 이것은 대부분의 퇴적물 이동이 부유와 이송에 의한 것으로 가정하는데, 유체에서 퇴적물 입자는 packed sediment 계면(interface)에서 떨어져 나간다. 액체에서 계면(interface)에서의 퇴적물 농도는 다른 연구자들(Li and Cheng; Olsen and Kjellesvig, 1999; Van Rijn, 1989)에 의해 예측된다. 이 모형들에서 농도는 초과 응력($\tau - \tau_{crit}$)의 1.5승의 함수이다. 이것에 대해서 다른 연구 결과들이 있으나 생략한다.

개발된 모형의 목표는 the packed bed interface 위의 모든 곳에서 침식되는 국지적인 플럭스를 예측하는 것이다. 경계층에서의 속도의 특징적인 측정은 전단속도($\sqrt{\tau/\rho}$)이다. 본 고에서 모든 실험 모형은 그 값 아래 어떤 침식도 일어나지 않는 입계 전단응력을 포함한다. 그러므로, sediment가 the packed bed interface에서 부유되는 비율을 산정하려면 $\sqrt{\tau - \tau_{crit}/\rho}$ 를 구해야 한다. 세굴 부유(scour lift)를 위한 결과 식은 식 (7)과 같다.

$$u_{lift} = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_{crit}}{\rho}} \quad (7)$$

여기서, n_s 는 the packed bed surface에 법선벡터이다. α (input file에서 SCRALP로 표기)는 packed surface에서 부유된 입자 비율의 무차원 parameter이다. α 는 1이거나 1보다 작다.

repose 각은, 정지유체지역에서 packed sediment에 의해 얼마 정도의 각도에서 지지될 수가를 말한다. FLOW3D 퇴적 세굴 모형(sediment scour model)에서, repose각(ζ)은 각도로 입력된다(input file에는 SCRANG로 표기), 실제각(φ)은 중력벡터와 the packed interface 법선벡터의 내적으로 구한다(식 (8)).

$$\varphi = n_{interface} \cdot g |g| \quad (8)$$

여기서, $n_{interface}$ 는 표면법선벡터이고, g 는 중력벡터이다. 모형은 경사진 interface의 입계전단응력(τ_{crit})을 대체함으로써 수행된다. φ 가 0일 때(즉, 중력에 관련한 수평면), 유효입계전단응력(effective critical shear stress)은 입계전단응력(τ_{crit}^0)과 같다. 경사진 interface에서 입계전단응력은 식 (9)와 같다.

$$\tau_{crit} = \tau_{crit}^0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \zeta}} \quad (9)$$

국지 interface slope (φ)는 repose 각(ζ)과 같을 때, τ_{crit} 는 0이다; sediment는 shearing action에 의해 interface로부터 침식된다. 또한 모형은 φ 가 ζ

보가 클 때, τ_{crit} 의 음(negative)값을 예측한다. 이런 영역에서 유체의 shearing action이 없더라도 sediment는 자연적으로 침식된다.

이 체계에서 부유사 운동은 이송확산(advection-diffusion) 방정식으로 표현이 되는데, sediment의 표류(drifting)와 부유(lifting)의 효과도 부가적으로 포함된다(식 (10)).

$$\left(\frac{\partial c_s}{\partial t}\right)_x + u \cdot \nabla c_s = 0$$

$$D \nabla^2 c_s = u_{lift} \nabla c_s - u_{drift} \nabla c_s \quad (10)$$

여기서, u 는 국지유체속도(local fluid velocity)이고, u_{lift} 와 u_{drift} 는 각각 국지속도이다. u_{lift} 는 국지전단응력이 τ_{crit} 를 초과하는 packed sediment interface 근처를 제외하고 모든 곳에서 0이다. D 는 확산계수이고, FLOW3D에서 그것은 input file에서 분자확산계수 CMSC로 지정하거나, 난류확산계수 승수(multiplier) RMSC로 지정됨으로써 설정된다.

3. 정수중의 수중안식각 실험

정수중의 수중 안식각 실험을 위하여 모형을 그림 1과 같이 구성하였는데 계산격자는 x방향 cell은 120개(cell 크기 1.0cm), y방향 cell은 1개(cell 크기 1.0cm), z방향 cell은 60개(cell 크기 1.0cm)로서 총 계산 cell수는 7,200개이다. 세굴모형에 입력된 파라미터는 Table 1과 같으며, FLOW3D가 여러 난류 기법의 선택이 가능하지만 본 실험에서는 RNG(Renormalized Group theory) 기법을 택하였다. 중앙입경 0.015mm, 0.2mm, 2.0mm, 5.0mm, 0.43mm에 대한 실험을 실시하였는데 중앙입경과 토사입자의 밀도에 따른 critical shields number를 그림 2의 Shields 곡선에서 구하였다.

Table 1. 실험 Case별 파라미터

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Average Particle Diameter	0.015	0.2	2.0	5.0	0.43
Density of the Sediment Particles	1,529	1,835	1,937	2,345	2,650
Critical Shields Number	0.450	0.040	0.045	0.055	0.030
Critical Sediment fraction	0.430	0.430	0.430	0.430	0.430
Scour Erosion Adjustment	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Cohesive Sediment Fraction	0.350	0.350	0.350	0.350	0.350
Sediment Drag Factor	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Angle of repose	30.0	33.0	48.0	45.0	29.0

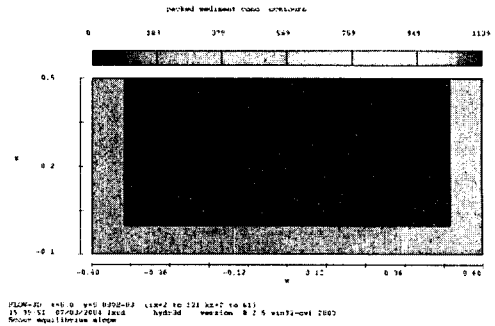


Fig. 1 모형의 초기 상태(Unit : meter)

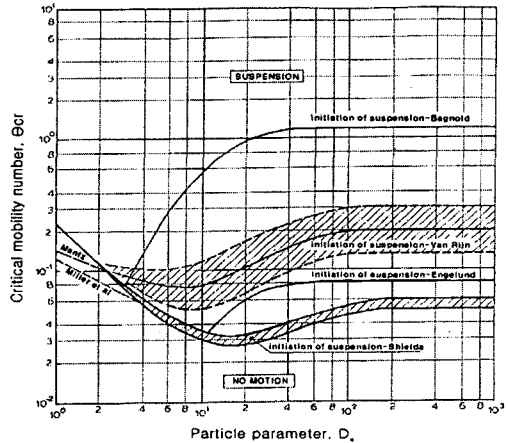


Fig. 2 입자의 거동시작과 부유시작과의 관계(Van Rijn, 1989)

$$D_* \leq 4, \quad \theta_{cr} = 0.240 D_*^{-1}$$

$$4 < D_* \leq 10, \quad \theta_{cr} = 0.140 D_*^{-0.64}$$

$$10 < D_* \leq 20, \quad \theta_{cr} = 0.040 D_*^{-1.0}$$

$$20 < D_* \leq 150, \quad \theta_{cr} = 0.013 D_*^{0.29}$$

$$150 < D_*, \quad \theta_{cr} = 0.055$$

s : 비중 (ρ_s/ρ), ρ_s : 토사입자의 밀도
 ρ : 해수의 밀도, g : 중력 가속도

D_{50} : 저질의 중앙입경, ν : 점성계수
 D_* : 입자직경 계수 $\left(= D_{50} \left\{ \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right\}^{1/3} \right)$

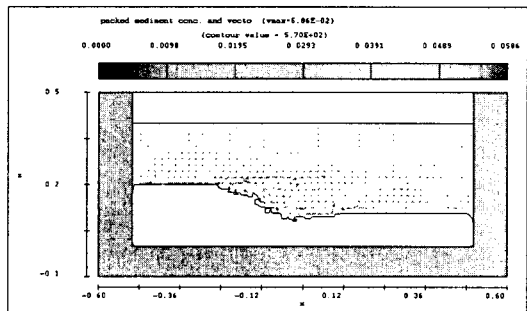


Fig. 3 Scour equilibrium slope ($D = 0.015\text{mm}$, $\phi = 30^\circ$)

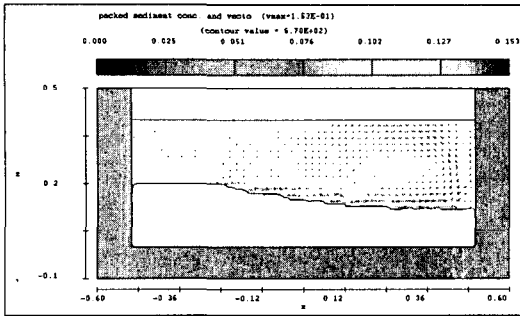


Fig. 4 Scour equilibrium slope ($D = 0.2\text{mm}$, $\phi = 33^\circ$)

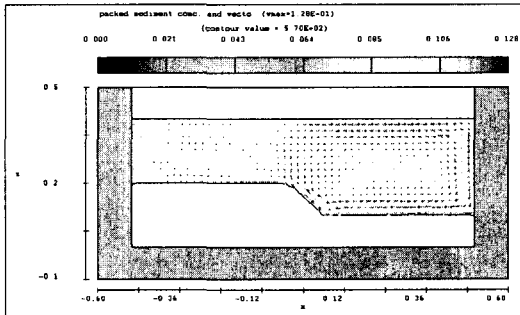


Fig. 5 Scour equilibrium slope ($D = 2.0\text{mm}$, $\phi = 48^\circ$)

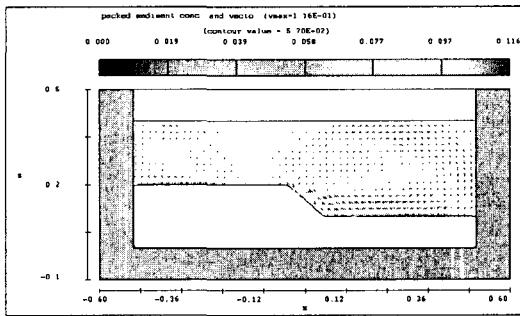


Fig. 6 Scour equilibrium slope ($D = 5.0\text{mm}$, $\phi = 45^\circ$)

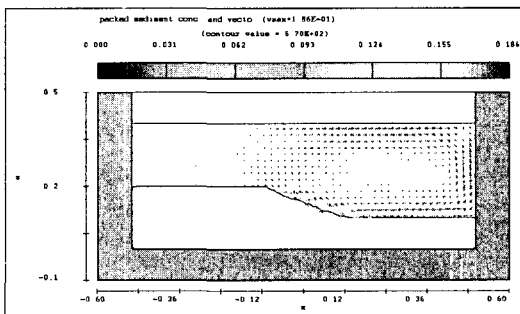


Fig. 7 Scour equilibrium slope ($D = 0.43\text{mm}$, $\phi = 29^\circ$)

Fig. 3에서 Fig. 7에는 Table 1에 제시된 5경우의 중앙 입경과 수치실험 상수에 따른 정수중에서의 수중안식각이 형성된 결과가 제시되어 세굴공 내의 토사의 슬라이딩 운동의 물리과정이 FLOW3D의 세굴모형은 이 물리과정을 만족스럽게 재현함을 입증하였다.

4. 결론

본고에 서술된 기초적인 수치실험에 의해 극지 세굴의 세굴공 내의 경사면에서의 토사의 슬라이딩 현상이 FLOW3D의 세굴모형에서 만족하게 재현됨을 제시하여 교각 주위의 3차원 흐름과 세굴 시뮬레이션(김 등, 2004)의 수치모형에 의한 기본적인 접근방향은 타당한 것이 조사되었다. 그러나 현실적인 상황에서의 장기적인 바닥의 변화를 시뮬레이션을 통해 고찰하기에는 아직도 컴퓨터 능력이 부족한 것으로 보인다.

참고 문헌

- 김동철, 김경환, 최병호 (2004). 교각주위의 3차원 흐름과 세굴시뮬레이션 접근, 조석환경에서의 국지세굴 워크샵 논문집 (2004). 113-127.
- 윤성범 (2004). 세굴공내 토사입자 거동의 실험적 관찰, 조석 환경에서의 국지 세굴 워크숍 논문집 (2004), pp. 31-36.
- Chatterjee, S.S., Ghosh, S.N. and Chatterjee, M. (1994). Local scour due to submerged horizontal jet, *J. Hydraulic Engineering*, 120(8), 973-992.
- Chen, W.F. (1995). *The civil engineering handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, 39, 201-225.
- Li, Y., Liu, D., Chen, B., Dong, G., Li, L. (2003). The Numerical Simulation of Local Scour around a Large Cylinder due to Wave-Current Action.
- Miyamoto, Y. (2000). Personal communication with C. W. Hirt.
- Olsen, N.R.B. (1997). A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option, Version 1.5a: User's Manual. Div. of Hydr. Eng., The Norwegian Inst. of Tech.
- Olsen, N.R.B. and Kjellesvig, H.M. (1999). Three-dimensional numerical modelling of bed changes in a sand trap, *J. Hydraulic Research*, 37, 189-198.

Van Rijn, L.C. (1989). State of the art in sediment transport modeling, Sediment transport modeling: proceedings of the international symposium, New Orleans, LA, American Society of Civil Engineers, August 1989, 13-32.

Yen, C.L., Lai, J.S., Chang W.Y. (2000). Modeling of 3D Flow and Scouring around Circular Piers, Proc. Natl. Sci. Council. ROC(A), 25(1), 17-26.