

3차원 시뮬레이션을 통한 오탉방지막의 오염물질 및 준설토 확산 저감효과 조사

Investigation of Reducing Effect on the Spreading of Dredging Soil and the Diffusion of Contaminant by Silt Protector Curtain through 3D Simulation

홍남식¹

Namseeg Hong¹

1. 서 론

오탉방지막에 의한 확산 방지 효과 메카니즘은 오탉수의 차단 효과와 오탉 입자의 침강 촉진 효과에 의한 것으로 정리할 수 있다. 일반적으로 유속은 수면에 가까울수록 크기 때문에 특히 수면 부근에서 문제가 된다. 오탉방지막이 설치되지 않은 상태에서 수면 부근에 오탉이 발생하면 흐름방향으로 확산되어 농도가 증가된다. 이때, 유속이 크면 확산시간이 짧더라도 멀리까지 확산되기 때문에 희석이 충분하게 되지 않으며 따라서 단시간 내에 고농도의 오탉 영역이 멀리까지 형성된다. 여기서 오탉방지막을 유속이 빠른 수면 가까이 설치하면 오탉확산에 영향을 주는 유속은 작아져서 상대적으로 작은 연직방향의 확산속도와 복합되어 먼 곳으로의 확산에 장시간이 필요하게 되며 그 결과 오탉수는 충분히 희석되며 저농도로 되어간다. 그러므로, 막체의 수심방향 깊이는 중요한 인자임에도 불구하고, 유속의 크기에 관계없이 일률적으로 정해져 비효율적이며, 오탉방지막 설치로 인한 확산 범위 및 농도, 퇴적두께 등을 3차원 수치시뮬레이션을 통하여 산정하므로써 오탉방지막의 효과를 검증하여야 하나, 현재는 단순히 투하농도를 50%로 줄여 수심평균모델을 적용, 수치시뮬레이션을 행함으로써 부정확한 효과검증이 이루어지고 있다.

이미 언급하였듯이 오탉방지막의 수리학적 효과를 정확히 평가하기 위하여 수심평균모델이 아닌 3차원유동모델에 오탉방지막을 표현하는 것이 필수적 선결조건이다. 그러므로, 홍남식 등(2008)이 처음으로 3차원 유동모델에 오탉방지막을 에너지손실차로 보고 표현하여 오탉방지막이 포함된 3

차원 유동모델을 개발하였으며, 이어 홍남식과 강윤구(2008a, 2008b)는 개발된 모델을 울산신항 북방파제 공사에 직접 적용하여 유동장의 변화와 SCP 공사로 인한 부유사확산 저감효과를 평가하였다. 그러나, 부유사확산의 경우 준설토나 기타 토공에 의한 부유사의 거동인 침전, 이류, 확산 및 재부유 등의 결합된 거동을 재현하지 않고 단지, 이류 및 확산에 의한 부유사확산 현상을 재현 하였다.

그러므로, 본 연구에서는 기 개발된 3차원수치모델을 앞서 언급한바와 같이 부유토사의 결합된 거동을 재현하도록 보완하여 3차원 시뮬레이션을 통해 오탉방지막이 준설토로 인한 부유사확산을 어느 정도 저감 시키는지 조사하고, 준설토로 인한 부유사와는 다른 거동현상을 보인 오염물질 확산의 저감효과와 비교 평가하는 것이다. 본 연구에서 적용한 현장은 울산신항 북방파제 1단계구간 공사이며, 울산신항 근처의 유동장 결과는 홍남식과 강윤구(2008)에 수행된 검증유동결과를 사용하였다. 평가 결과, 현행 지방서에서 제시하는 오탉방지막의 깊이로는 준설토로 인한 부유사확산의 경우 침전, 재부유등의 거동특성상 표층 및 저층에서 어느 정도 확산 저감효과를 확인 하였으나, 오염물질의 경우는 단순한 확산거동으로 인해 표층에서만 저감효과가 나타나는 것을 확인하였다.

2. 수학 및 수치모델

본 연구에서 취급할 모델영역의 수심이 수평방향 길이에 비해 상당히 작으므로 식 (1)의 σ 좌표계를 적용하였다.

¹ 발표자: 동아대학교 토목공학과 교수

$$\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H} \quad (1)$$

여기서, z 는 실제 연직좌표계, ζ 는 기준면 ($z=0$)상의 자유수면 변위, d 는 기준면하의 수심, 그리고 $H (=d+\zeta)$ 는 총 수심을 나타낸다. 유동모델은 σ 좌표계에서 수심평균 연속방정식, 운동량 방정식, 막체로 인한 에너지손실, 난류모델 및 경계조건등의 지배방정식은 홍남식 등 (2008)에 주어지며, 사용한 격자체계는 Computational cell의 중앙에서는 조위(Water level) η 또는 압력(Pressure) p 를, cell 각 면의 직각방향으로는 유속 u, v, w 를 위치하는 Staggered grid 로서 3차원 지배방정식을 시간과 공간에 대하여 유한차분화 하여 ADI(Alternating direction inte- gration) scheme (Leendertse and Gritton, 1971; Leendertse et al., 1973)이 시간이력 적분을 위하여 기본적으로 적용된다.

용해되어 있거나 부유되어 있는 물질의 이류 및 확산 예측을 하기위해 다음의 식 (2)과 같은 이류-확산식을 그 지배 방정식으로 한다. 여기서, 식 (2)는 물질의 이류항과 확산항 뿐만 아니라, 물질의 용출 및 흡입에 대한 항 또한 포함하고 있다. 식 (2)를 3차 양해유한차분법인 ULTIMATE 방식(Leonard, 1991)을 사용하여 수치해석적으로 풀어낸다. 이 수치해석 기법은 QUICKEST 방법으로부터 변형된 것으로 오염물질의 이동 및 확산을 예측하는 데 많이 사용된다. 이 방법은 비교적 정확하면서도 그 계산시간이 짧은 것이 특징이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(hC) + \frac{\partial}{\partial x}(uhC) + \frac{\partial}{\partial y}(vhC) + \frac{\partial}{\partial z}(whC) = \frac{\partial}{\partial x}\left(hD_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \left(hD_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \left(hD_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) - FhC + S \quad (2)$$

여기서, C : 혼합농도

u, v, w , : x, y, z 방향 속도 성분(m/s)

h : 수심(m)

D_x, D_y, D_z : x, y, z 방향에서 확산계수(m^2/s)

F : 선형감소계수(1/s)

S : $Q_s(C_s - C)$

Q_s : 용출/흡입량($m^3/s/m^2$)

C_s : 용출/흡입 유량에서 혼합농도

위의 식 (2)에서 u 와 v 는 각각 x 및 y 방향으로의 유속과 전제수심을 뜻하는 것으로 유동결과로부터 그 값을 얻는다. 유효분산계수 D_x, D_y , 등은 등방난류확산과 수심평균화에 따른 분산을 포함하며, Elder의 식을 사용하여 구한다.

준설 작업 중에는 일반적으로 많은 양의 부유사

가 발생한다. 이 때, 발생한 부유사는 입자의 크기, 과량과 조류와 같은 주변해역의 흐름으로 인해 일부는 이류, 확산 과정을 거쳐 이동하고, 나머지 일부는 침강하여 해저에 퇴적된다. 그리고, 퇴적된 입자들 중에서 일부는 압밀되고 나머지 일부는 주변흐름으로 인해 침식 및 재부유되어 확산한다. 이와 같은 과정을 반복한 결과, 수면에는 sediment flume이 형성되고 해저에는 퇴적물이 쌓이게 된다. 부유사의 이동 및 확산을 통계학적인 방법으로 이용하여 예측하기 위해, Krone (1962)에 의해 처음 개발된 방법을 적용하였다. Krone에 의해 제시된 퇴적율(Deposition rate)은 다음의 식 (3)과 같이 주어진다.

$$SD = W_g C_b P_d \quad (3)$$

여기서, W_g : 침강속도 (m/s),

C_b : 해저표면농도(g/m^3)

P_d : 퇴적확률, $P_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}$, $\tau_b \leq \tau_{cd}$

τ_b : 하상전단응력(N/m^2),

τ_{cd} : 퇴적을 위한 한계 하상전단응력(N/m^2)

점착성토사의 침강속도는 floc크기, 온도, 입자농도, 유기물 함유율 등에 따라 좌우된다. Van Rijn(1989)에 따르면 염분도가 5%이상인물에서의 침강속도는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$W_g = kc^\gamma \quad \text{for } c \leq 10kg/m^3 \quad (4)$$

여기서, W_g 는 floc의 침강속도(m/s), c 는 체적농도, k, γ : 계수로서 $\gamma = 1 \sim 2$ 로 주어진다. Salt flocculation (염분응집)은 해수와 같이 염분이 높은 물에서 활성화된다. 염도를 고려한 Krone의 실험에 따르면 침강속도는 다음과 같다.

$$W_g = k_1 c^{\beta 1} \left\{ 1 + (c^{\beta 1} - 1) \min \left[\frac{S}{S_{min1}} \right] \right\} \quad 0 \leq c \leq 0.3 \text{ kg/m}^3 \quad (5)$$

$$W_g = k_2 c^{\beta 2} \left\{ 1 + (c^{\beta 2} - 1) \min \left[\frac{S}{S_{min2}} \right] \right\} \quad 0.3 \leq c \text{ kg/m}^3 \quad (6)$$

여기서, W_g : 침강속도, $k_1, k_2, \beta 1, \beta 2, \gamma 1$: 상수, c : 침강속도, S : 염분도, S_{min1}, S_{min2} : 염분응집의 중요한계이다. Metha et al. (1989)에 의하면 침식은 다음과 같다.

$$S_E = E \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{ce}} \right)^n, \quad \tau_b > \tau_{ce} \quad (7)$$

여기서, E : 하상의 침식율($g/m^2/s$), τ_{ce} : 침식을 위한 한계 하상전단응력, n : power of erosion Soft, Parly consolidated bed 에 대해서는

$$S_E = E \exp \left[\alpha (\tau_b - \tau_{ce})^{1/2} \right], \quad \tau_b > \tau_{ce} \quad (8)$$

여기서, α : 계수(N/m^2)

해저 전단응력은 Fredsoe(1981)의 제안식을 적

용하였다. 즉, 순수조류만에 의한 전단응력은 식 (10)과 같다.

$$\tau_c = \frac{1}{2} \rho f_c V^2 \quad (9)$$

여기서, τ_c : 하상전단응력(N/m²),

ρ : 유체의 밀도(kg/m³),

$$f_c : \text{조류마찰계수}, f_c = 2 \left\{ 2.5 \left[\ln \left(\frac{30h}{k} \right) - 1 \right] \right\}^{-2}$$

V : 평균조류속도(m/s),

h : 수심(m), k : 하상조도(m)

비점착성 퇴적물의 침강속도는 Van Rijn(1993)의 방법에 따라 계산된다. 즉, 부유물 또는 퇴적물의 직경에 따라 다음식이 적용된다.

$$w_{s,0}^{(\ell)} = \frac{(s^{(\ell)} - 1)g d_s^{(\ell)2}}{18\nu}, \quad 65 \mu\text{m} < d_s \leq 100 \mu\text{m} \quad (10)$$

$$w_{s,0}^{(\ell)} = \frac{10\nu \left[\left(1 + \frac{0.01(s^{(\ell)} - 1)g d_s^{(\ell)3}}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right]}{d_s}, \quad 100 \mu\text{m} < d_s \leq 1000 \mu\text{m} \quad (11)$$

$$w_{s,0}^{(\ell)} = 1.1 [(s^{(\ell)} - 1)g d_s^{(\ell)}]^{0.5}, \quad 1000 \mu\text{m} \leq d_s \quad (12)$$

여기서, $s^{(\ell)}$ 퇴적물 (ℓ)의 상대밀도 $\rho_s^{(\ell)} / \rho_w$

$d_s^{(\ell)}$ 퇴적물 (ℓ)직경

ν 물의 동점성계수 [m^2/s]

수평면에서 소류사량의 이송크기와 방향을 포함하기 위한 시뮬레이션을 위하여 Van Rijn(1993)이 개발한 다음과 같은 근사법이 적용되어진다.

$$|S_b| = 0.006 \rho_s w_s d_{50}^{(\ell)} M^{0.5} M_e^{0.7} \quad (13)$$

S_b = 소류사량 (kg/m/s)

M = Wave와 Current에 의한 퇴적물 유동수로서

$$M = \frac{v_{eff}^2}{(s-1)gd_{50}}$$

$$M_e = \text{초과된 퇴적물 유동수로서 } M_e = \frac{(\nu_{eff} - \nu_{cr})^2}{(s-1)gd_{50}}$$

$$\nu_{eff} = \sqrt{\nu_R^2 + U_{on}^2}$$

여기서, ν_{cr} = 초기운동을 위한 한계수심평균속도 (m/s), ν_R = 같은 수심평균속도의 크기는 계산되는 바닥층에 속도 또는 가상로그 속도 분포로부터 계산된다.

그림 1에서 보듯이 수평방향으로는 0.2m의 정사각형격자를 수심방향으로는 10층 등간격을 사용하여 실험수조모델을 수립하였다. 경계조건은 상류단은 수위조건을 하류단은 유량조건을 주었다. 또한, 상류의 1개 지점에 0.01kg/m³ 농도를 지속적으로 투하하면서 1일 동안 시뮬레이션을 수행하였으며 투하한 토사는 cohesive sediment로 보았다. Initial Concentration 및 Initial Thickness 는 각각 0으로 보았으며, 침강속도는 Van Rijn 식에서 $k_1 = 0.0002$ m/sec, $k_2 = 10-6$ m/sec, $c_1 = 200$ g/m³, $c_2 = 10000$ g/m³, $m_1 = 0$, $m_2 = 1$ 을 적용하였다. 퇴적 한계전단응력 = 0.06 N/m² (Krone 제안식 적용, Factor=24.88), 침식 한계전단응력 = 0.05 N/m², Erosion coeff. $E = 0.05$ g/m²/s, Bed material density $\rho = 1.65 \times 10^5$ 을 적용하였다.

그림 2 부터 그림5는 3차원 모델 적용결과를 나타내는 것으로 수로방향의 중앙단면을 따라 부유사농도를 나타낸 것이다. 막체의 깊이가 증가함에 따라 상류로 부터의 확산을 효율적으로 제어하나, 80% 막체설치시는 오히려 막체 하류의 농도가 증가하는데 이는 유동패턴이 하류에 나타나기 때문인 것으로 사료된다. 즉 막체의 효율적인 깊이는 주변 유속장에 따라 조심히 산정하여야 하며, 수심평균치는 상·하류 모두 농도가 증가하는 경향이 있다. 그러나, 본 절에서 다룬 예는 전 수로단면을 막체로 차단하는 경우로서, 일부 구간만 차단하는 현장적용에는 무리가 있어 보이나, 현장에 설치된 막체의 중앙부분에서는 유사한 결과를 보일 것으로 기대된다.

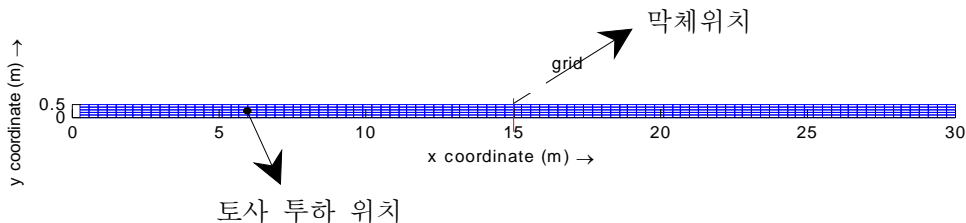


그림 1. 토사 투하 및 막체 위치

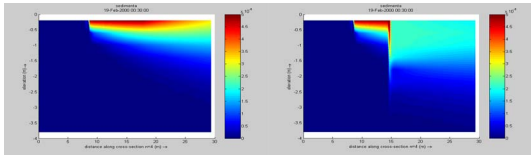


그림 2. 미설치

그림 3. 30% 설치

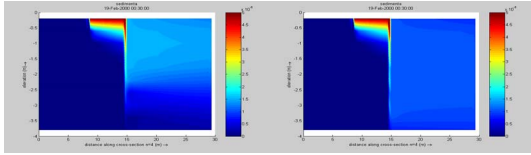


그림 4. 50% 설치

그림 5. 80% 설치

3. 현장 적용

본 연구에서 적용한 해역은 울산신항 북방과제 공사에 설치될 오탉방지막의을 대상으로 하였으며 막체의 설치수심은 3m이다.그림 6부터 그림8은 여러 시나리오중 1개 시나리오의 임의 시간에서의 표층, 중층 및 저층에서의 확산농도분포를 나타낸것이며, 모든 결과로부터 허니장적용시 현행 시방서에서 제시하는 오탉방지막의 깊이(3m)로는 준설로 인한 부유사확산의 경우 침전, 재부유등의 거동특성상 표층 및 저층에서 어느 정도 확산 저감효과를 확인 하였으나, 오염물질의 경우는 단순한 확산거동으로 인해 표층에서만 저감효과가 나타나는 것을 확인하였다.

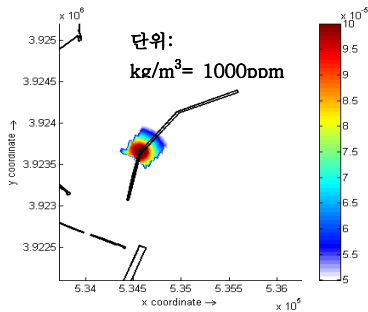


그림 6 표층의 부유사농도 분포

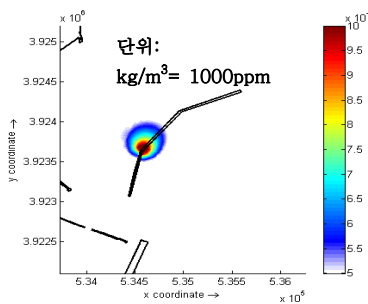


그림 7. 중층의 부유사농도 분포

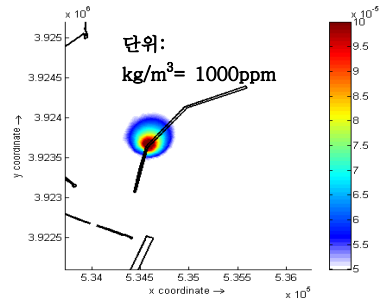


그림 8. 저층의 부유사농도 분포

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 시뮬레이션을 통해 오탉방지막이 준설토로 인한 부유사확산 및 오염물질 확산의 저감효과를 평가하였으며 평가 결과, 현행 시방서에서 제시하는 오탉방지막의 깊이로는 준설로 인한 부유사확산의 경우 침전, 재부유등의 거동특성상 표층 및 저층에서 어느 정도 확산 저감효과를 확인 하였으나, 오염물질의 경우는 단순한 확산거동으로 인해 표층에서만 저감효과가 나타나는 것을 확인하였다.

참고문헌

- 홍남식, 김가야, 강운구 (2008). “오탉방지막을 포함하는 3차원 흐름 수치모델”, 한국해양공학회지, 제22권, 제3호, pp 1-7.
- 홍남식, 강운구 (2008a). “오탉방지막을 포함하는 3차원 흐름 수치모델의 현장적용”, 한국해양양추계학술대회, 목포, 대한민국.
- 홍남식, 강운구 (2008b). “오탉방지막을 포함하는 3차원 흐름 수치모델의 현장적용”, 한국해양양추계학술대회, 울산, 대한민국.
- Jager, B. and Schijndel, S.V. (2000). 3D Computations around Structures, Report Q2487, WL | Delft Hydraulics, Delft, Netherlands.
- Stelling, G.S. and Leendertse, J.J. (1991). “Approximation of Convective Processes by Cyclic ACI Methods”, Proceedings of 2nd ASCE Conference on Estuarine and Coastal Modelling, Tampa.