

준설로 인한 부유토사 확산 거동에 대한 수치모의 A numerical simulation of dispersive transport of dredge-induced suspended sediments

강인남¹ · 이정렬¹ · 강시환²

In Nam Kang¹, Jung Lyul Lee¹ and See Whan Kang²

1. 서 론

최근 항만 공사나 항로 유지를 위한 준설공사가 도처에서 시행되고 있다. 준설공사시에 사업자가 우선적으로 판단해야 할 점은 준설로 인한 피해를 최소화해야 한다는 것이다. 이러한 피해들 중에 가장 중요하게 고려되어야 할 것은 준설로 인해 재부유되는 퇴적물들의 확산이다. 이러한 부유토사적물은 주변으로 확산되어 인근어장에 피해를 입히거나, 관광지의 미관을 훼손시켜 환경적인 문제를 야기시킬 수 있기 때문이다. 특히, 산업도시를 끼는 연안에서 준설 공사시 발생하는 부유토사는 중금속과 같은 물질에 오염이 되어 있을 가능성이 높아서 심각한 환경 문제로 부각될 우려가 있다. 이러한 이유로 준설지역에서의 준설작업으로 인한 부유토사의 확산 범위를 효율적이고 보다 정확히 예측하는 기술이 요구되는데, 해외에서는 미 육군 공병단(DOER, 1999)을 비롯하여 많은 연구자들에 의해 이에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 국내에서는 그동안 이에 대한 연구가 부족했으며, 서(1996), Kang *et al.*(2001), 정 등(2002)에 의해 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 이러한 준설 공사시 발생하는 부유토사의 3차원적 이송 및 확산에 대한 예측모형을 개발하였으며, 이를 1차원과 2차원의 경우에는 순간 부하인 경우에 대한 이송·확산 방정식의 정확해와 비교하였고, 3차원에 대한 것은 탁도 플룸에 대한 수학

적 모형(Kuo and Hayes, 1985)과 비교·검증하였다.

2. 모형의 개발

준설작업시에 발생하는 부유토사는 초기에 준설작업으로 인한 해저면의 교란으로 인하여 발생하며, 이는 주변수에 의해 이송되고 확산된다. 준설작업으로 인하여 주변수는 강한 전단작용에 의해 난류 혼합되어 전 수심에 걸친 부유 오락물기둥을 형성하게 된다. 연속적으로 진행되는 준설작업으로 인하여 부유된 퇴적물들은 일정한 흐름에 의해 이송되고, 병합되어 플룸의 형태를 띠게 되는데 이러한 작용을 이상화시켜 나타낸 그림이 Fig. 1에 나타나 있다. 초기 준설 지점에서 부유사의 발생량을 정량적으로 예측하는 것은 부유사 발생량에 영향을 미치는 다양한 국지적 인자로 인하여 많은 어려움이 있다(해양수산부, 2002). 이에 대한 기존의 연구가 Nakai(1978), Blokland(1988), John *et al.*(2000), Dearmaley *et al.*(2000) 등을 포함하여 여러 연구자들에 의해 시도되었고, 국내에서는 해양수산부(2002)에서 시도되었다. 이렇게 초기 준설 발생량 산정에 어려움이 있는 관계로 초기 준설량은 조사된 관측치를 바탕으로 입력 자료를 사용하게 되며, 오락물 부하는 준설지점이 위치한 격자에 전 수주에 걸쳐 일정하게 분포한다고 가정한다.

1 성균관대학교 토목환경공학과 (Corresponding Author : In Nam Kang, Department of Environmental & Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ., Suwon 442-746, Korea, byulsalang@skku.edu)

2 한국해양연구원 연안·항만공학 연구본부 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)

준설작업으로 인하여 부유된 퇴적물은 주변수에 의해 이송되고, 각각의 입자들이 가지는 침강속도로 침강하며, 흐름장 내의 난류특성으로 인하여 확산된다. 또한, 침강속도는 입자의 크기, 형상, 밀도나 응집성 등에 의해 결정된다.

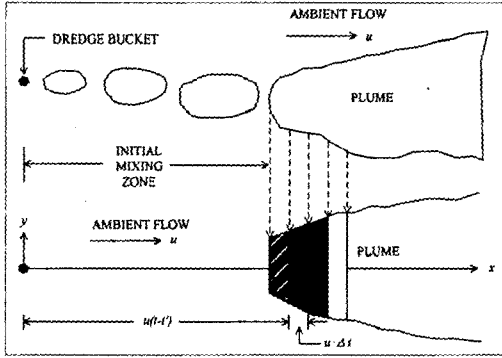


Fig. 1. Hypothetical Dredge-induced Plume (Kuo and Hayes, 1991).

2.1 지배방정식

준설 작업으로 인하여 발생하는 부유토사에 대한 3차원 이송확산 방정식은 다음과 같다(Fischer *et al.*, 1979).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

여기서 C 는 부유사의 농도이고, K_x, K_y, K_z 와 u, v, w 는 각각 x, y, z 방향에 대한 확산계수 및 유속성분이다.

물리적으로 이송과정과 확산과정은 동시에 발생하는 것이지만, 본 모형에서는 각각의 과정의 선형성에 기초하여 각각의 과정을 따로 모의한 후 서로 중첩시키는 방법을 사용하였다. 다시 말하면, 이송과정은 라그랑주적 방법(Lagrangian method)으로 주변유속에 의해 이송되어지는 입자의 연속적인 위치를 파악하고, 각 입자가 위치해 있는 격자의 가운데로 농도를 할당한 후에, 음해유한 차분법을 이용하여 확산과정을 수행하고, 다시 원래 입자들의 위치로 되돌리는 방식을 사용하였다(이, 1998). 확산과정은 ADI 기법을 사용하였다. 본 모형에 대한 흐름도가 Fig. 2에 나타나 있다.

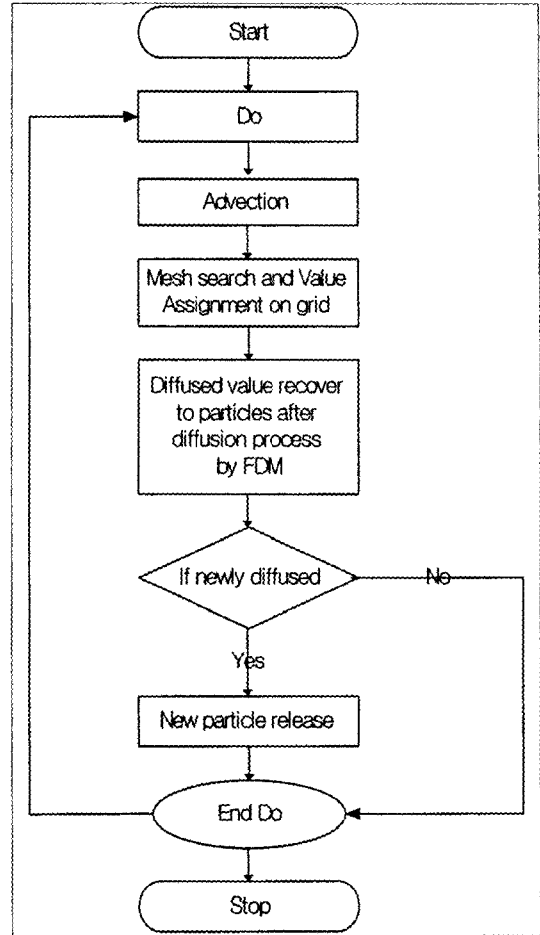


Fig. 2. Flow chart of computing procedure.

2.2 수치해석

흐름이 지배적인 영역에서, 본 방법은 이송과정과 확산과정에 대한 정확한 해 뿐만 아니라 수행 시간에도 상당히 효율적이다. 순수 라그랑주적 입자추적 모형이 확산과정을 모의하는데 많은 입자를 필요로 하는데 비하여 본 방법은 고정된 오일러 격자(Eulerian grid)에서 유한 차분법을 이용하기 때문에 많은 수의 입자를 필요로 하지 않는다. 따라서, 확산과정을 모의하는데 계산시간을 적게 들이고도 정확한 결과를 얻을 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 본 모형은 이송과정과 확산과정을 서로 분리하여 모의하게 된다.

2.2.1 이송과정

이송 과정은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{D\hat{C}}{Dt} = \frac{\partial \hat{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \hat{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \hat{C}}{\partial y} + w \frac{\partial \hat{C}}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

식 (2)는 이송과정을 물질도함수로 표현한 것이며, 특성곡선법에 의하여 수치해석 된다. 이 식은 주변유속에 의해 특성곡선을 따라 일정하게 이동된다는 것을 의미한다. 입자의 현재 시간에서의 위치를 (x_p^n, y_p^n, z_p^n) 으로 정의할 때, 다음 시간에서의 위치는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$x_p^{n+1} = x_p^n + u \Delta t \quad (3-a)$$

$$y_p^{n+1} = y_p^n + v \Delta t \quad (3-b)$$

$$z_p^{n+1} = z_p^n + w \Delta t \quad (3-c)$$

확산과정이 음해법을 이용하게 되므로 시간 간격(Δt)을 크게 할 수 있지만, 이송과정에서는 시간간격의 사용이 제한적이다. 따라서, 내부 시간 간격을 사용한다. 이러한 내부 시간 간격을 사용하여 식 (3)을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \sum_k^m u_k^n \delta t \quad (4-a)$$

$$y_p^{n+1} = y_p^n + \sum_k^m v_k^n \delta t \quad (4-b)$$

$$z_p^{n+1} = z_p^n + \sum_k^m w_k^n \delta t \quad (4-c)$$

여기서 δt 는 내부 시간 간격으로서, $\delta t = \Delta t/m$ 이다. 일반적으로 2-3개의 추적이 가능하도록 내부 시간 간격을 정하는 것이 바람직하다(이, 1998).

2.2.2 확산과정

이송 과정에 의한 농도를 \hat{C} 로 표시하고, 확산 과정에 의한 농도를 \tilde{C} 이라고 하면 확산과정에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \tilde{C}}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 \tilde{C}}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \tilde{C}}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \tilde{C}}{\partial z^2} \quad (5)$$

이 식은 다음과 같이 ADI 기법을 사용하여 1차원적인 연산자의 곱으로 정의된다.

$$\begin{aligned} [1 - \alpha \Delta t K D_{xx}] \Delta \tilde{C}^* \\ = \Delta t K (D_{xx} \hat{C} + D_{yy} \hat{C} + D_{zz} \hat{C}) \end{aligned} \quad (6-a)$$

$$[1 - \alpha \Delta t K D_{yy}] \Delta \tilde{C}^{**} = \Delta \tilde{C}^* \quad (6-b)$$

$$[1 - \alpha \Delta t K D_{zz}] \Delta \tilde{C} = \Delta \tilde{C}^{**} \quad (6-c)$$

여기서 α 는 음해계수로서 1/2이상이면 무조건 안정조건으로 본 연구에서는 음해계수를 1로 두었고, D_{xx} , D_{yy} , D_{zz} 는 중앙차분 연산자로서 이차 미분항을 근사 처리하는 것으로 유한차분기법을 통하여 얻어진다. 그리고, 확산 계수는 모든 방향으로 같다고 가정하였다. 또한 C^* 는 x 방향에 대하여 계산한 결과이고, C^{**} 는 y 방향에 대하여 계산한 결과이고, $\Delta \tilde{C} = \tilde{C} - \hat{C}$ 를 의미한다.

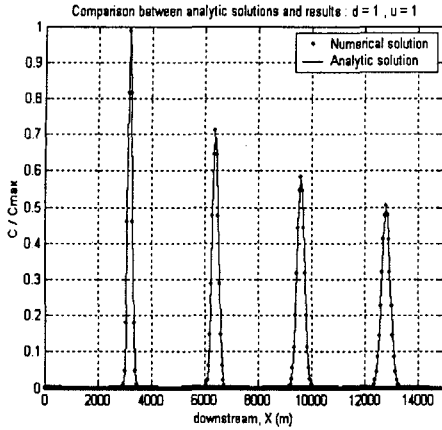
3. 모형의 검증

3.1 1차원 및 2차원 문제에 대한 검증

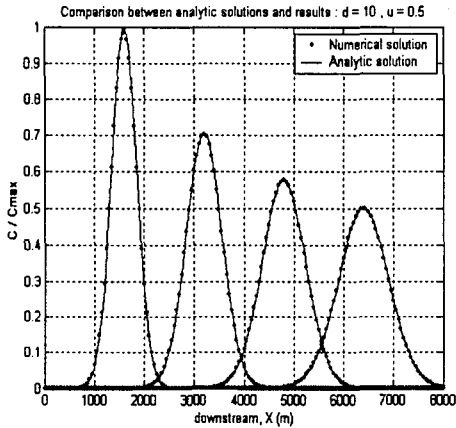
본 모형의 정확성에 대한 검토를 위하여 해석해와 본 모형의 결과를 비교하였다. 부유사가 순간적으로 유입된 경우에 일정한 유속과 확산계수에 대한 2차원 이송-확산 방정식에 대한 해석해는 다음과 같다(Fischer *et al.*, 1979).

$$c(x, y, t) = \frac{M}{4\pi Kt} \exp \left[-\frac{(x_0 - Ut)^2 + (y_0 - Vt)^2}{4Kt} \right] \quad (7)$$

유속이 지배적인 경우와 확산이 지배적인 경우에 대한 1차원과 2차원에 대하여 본 모형과 해석해와 비교한 그림이 Fig. 3 ~ Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 3에는 1차원 문제에 대한 해석해와 본 모형의 결과를 비교하였고, (a)는 3200초, (b)는 1600초 간격으로 결과를 제시하였다. Fig. 3(a)는 이송이 지배적인 흐름장에서의 비교이고, 그림 Fig. 3(b)는 확산이 지배적인 흐름장에서의 수치해와 해석해에 대한 비교이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 본 모형의 결과는 수치 진동이나 수치 확산이 없이 해석해와 정확히 일치하는 것을 알 수 있다.



(a) Advection dominated flow
 $(K_x = 1 \text{ m}^2/\text{sec}, u = 1 \text{ m/sec})$



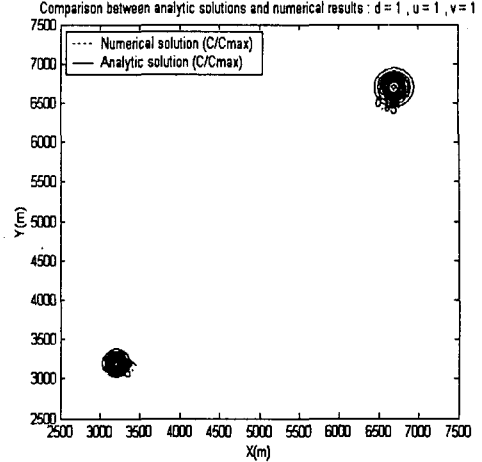
(b) Diffusion dominated flow
 $(K_x = 10 \text{ m}^2/\text{sec}, u = 0.5 \text{ m/sec})$

Fig. 3. Model Verification for 1-D solution.

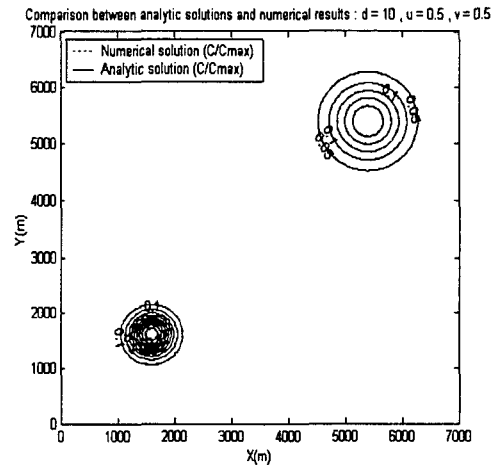
Fig. 4에서는 2차원 문제에 대한 검증은 시도하였으며, 1차원에서와 마찬가지로 이송이 지배적인 흐름에서와 확산이 지배적인 흐름에 대하여 해석해와 비교하였다. (a) 와 (b) 모두 3600초 간격으로 결과를 제시하였으며, 본 모형의 결과와 해석해가 정확히 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 2차원 문제에서도 마찬가지로 본 모형의 결과는 만족스럽게 나타나는 것을 알 수 있다.

3.2. 3차원 문제에 대한 검증

3.2.1. 탁도 플룸에 대한 해석해



(a) Advection dominated flow
 $(K_x = K_y = 1 \text{ m}^2/\text{sec}, u = v = 1 \text{ m/sec})$



(b) Diffusion dominated flow
 $(K_x = K_y = 10 \text{ m}^2/\text{sec}, u = v = 0.5 \text{ m/sec})$

Fig. 4. Model Verification for 2-D solution.

본 모형에 대한 3차원적인 결과를 비교하기 위하여 탁도 플룸에 대한 수학적 모형(Kuo *et al.*, 1985)의 결과와 비교하였다. 이 것은 cutter suction 준설시에 바닥면에서 발생한 부유사가 흐름방향으로 플룸의 형태를 띠면서 흘러갈 경우에 대한 해석해로서, Frenkiel(1953)에 의해 제안된 “확산원판(spreading disk)”이라는 개념의 확산모형을 기초로 하였다. 또한 Fig. 5와 같이 복잡한 지형의 변화로 인하여 주변수의 방향이 일정하

지 못하는 것으로 인하여 플룸의 형태가 하류방향으로 직선의 형태가 되지 않지만, 본 모형에서는 이것을 직선의 형태로 가정하였다.

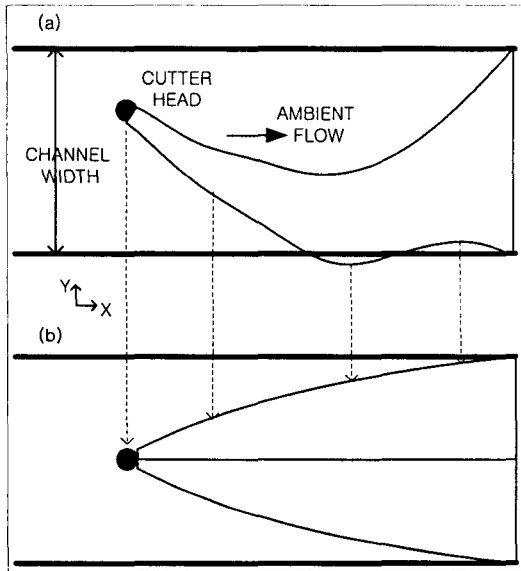


Fig. 5. Hypothesized Dredged-Induced Plume : (a) Actual Turbidity Plume, (b) Transformed Plume (Kuo et al., 1985).

유속은 하류방향으로 일정하고, 흐름방향으로의 확산은 주변 유속에 의해 이송되는 것에 비해 작으므로 무시된다. 수심방향으로는 침강속도가 고려되며, 수평방향으로 유속이 없이 확산만 존재한다고 가정하고, 흐름방향으로의 유속만을 고려하였다. 준설작업시에 흐름방향으로 주변유속이 일정한 경우에 대한 해석해는 다음과 같다.

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi(k_y k_z)^{1/2} x} \exp \left[-\frac{(y-y')^2}{4k_y \frac{x}{u}} - \frac{\left(z - z' + w \frac{x}{u} \right)^2}{4k_z \frac{x}{u}} \right] \quad (8)$$

여기서, Q 는 발생량이고, u 는 x 방향 유속, k_y , k_z 는 y , z 방향에 대한 확산계수이다. 그리고, 흐름방향은 x 방향이다. y' , z' 은 각각 임의의 시간에서 부유사 입자의 발생원으로부터의 거리이다. 따라서, 바닥면($z'=0$)에서 흐름 방향을 따라서, 즉, $y=y'$ 인 곳에서 농도는 최고가 된다. 따라서, 식(8)에 $y=y'$, $z'=0$ 를 대입하면 다음과 같이 중

심선 농도 즉, 거리에 따른 최고 농도(c_m)에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$c_m(x, z) = \frac{Q}{4\pi(k_y k_z)^{1/2} x} \exp \left[-\frac{\left(z + w \frac{x}{u} \right)^2}{4k_z \frac{x}{u}} \right] \quad (9)$$

이 식에서 가라앉은 퇴적물은 재부유되지 않는다고 가정하고, 부유된 퇴적물은 그 자체의 침강하려는 경향으로 인하여 수표면에서의 경계조건은 무시된다. 식(9)에서 정의된 것이 중심선 농도라고 하고, y 방향에 대해서도 확장을 하면 다음과 같이 된다.

$$c(x, y, z) = c_m(x, z) \exp \left(-\frac{y_c^2}{4k_y \frac{x}{u}} \right) \quad (10)$$

여기서, y_c 는 플룸 중심축에 대한 수평적인 거리를 나타낸다.

3.2.2. 해석해에 대한 비교

준설 작업에 기인하여 바닥면으로부터 부유사가 발생하여 주변 수역의 난류특성으로 인해 확산되고, 다시 입자의 침강특성으로 인해 가라앉는 과정을 모의하기 위해, 바닥에서 매 시간마다

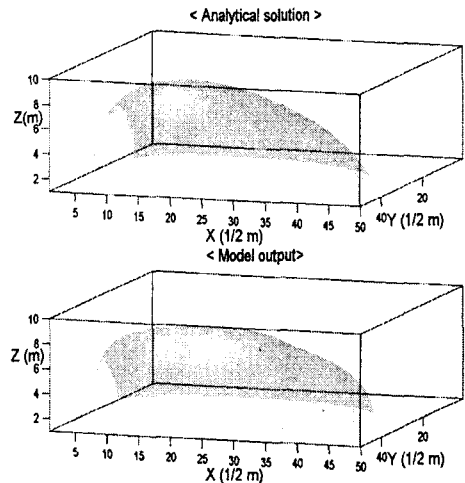


Fig. 6. Model Verification for 3-D solution (Surface concentration : 4 g/m³).

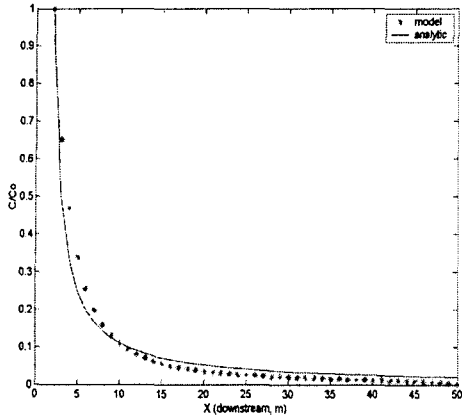


Fig. 7. Comparison of bottom layer (0~1m) concentrations calculated from 3-D model with analytical solutions along the x-axis.

부유사가 연속적으로 발생하도록 하였고, 시간 간격은 0.5초, 격자 간격은 수평방향으로 0.5m, 연직 방향으로 1m로 두었으며, 수심이 10m인 지점에 대하여 모의를 하였다. 유속은 x 축의 방향으로 일정한 흐름($u = 0.5\text{m/s}$)이고, 대표침강속도는 0.05 m/s 이며, x, y, z 각 방향에 대한 확산계수는 $1\text{m}^2/\text{s}$ 로 모의하였다. 이에 대한 3차원적인 결과가 Fig. 6에 나타나 있으며, 흐름방향을 따라 바닥면에서의 최고농도를 해석해와 비교한 결과가 Fig. 7에 나타나 있다.

Fig. 6에서 볼 수 있는 바와 같이 확산거리 및 확산폭 등은 해석해와 비교적 잘 일치한다. 그러나 이송된 입자가 격자 사이에 위치할 경우 두 격자에 일정한 비율로 농도가 할당이 되어야 하지만 한 격자에 일방적으로 할당이 되어 확산과정을 수행하는 경우에 격자간 농도 경사가 완만하게 나타나지 않는 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제는 하나의 입자가 한 격자에 할당이 되어 그 격자의 농도를 표현하던 것을 더 많은 입자들로 그 격자의 농도를 표현하는 방식이나, 한 입자가 표현하는 농도를 양 격자에 분배하는 방식을 사용하여 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다.

Fig. 6에 제시한 결과로부터, x 축을 따라 바닥면에서의 해석해와의 농도를 비교한 그림이 Fig. 7에 나타나 있다. 여기서 발생 초기의 농도는 비교적 잘 일치하고 있으며, 하류 쪽으로 갈수록 해석해보다 낮게 산정되는 것을 볼 수 있는데, 경계

의 영향을 받은 것으로 사료되며, 추후 수정·보완이 필요하다.

4. 결론 및 고찰

준설시 발생하는 3차원 부유사의 이동모형을 개발하여, 이를 해석해와 비교하였다. 본 모형의 2차원에 대한 해석해 및 타 모형과의 비교 및 개선 사항은 이(1998)의 기존 연구에 자세하게 수록되어 있으며, 본 연구에서는 3차원 모형의 개발 및 해석해와의 비교를 중심으로 다루었다. 해석해와의 비교에 있어서 전체적인 플룸의 형태를 비교적 잘 재현하고 있다. 추후 현장에서의 적용성에 대한 검토를 위하여 현장 관측치와 비교 및 검증할 계획에 있다.

감사의 글

본 논문은 해양수산부의 R & D 사업 “부유토사 발생량 평가 및 오탐방지막 효율에 관한 연구용역”의 연구지원에 의해 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

- 서승원., 1996. Eulerian-Lagrangian 농도 및 입자 혼합모형에 의한 연안의 부유사 확산해석. 한국해양해양공학회지., 8(2), pp. 185-192.
- 이정렬., 1998. 전방추적법에 의한 오염물질의 전송모델., 한국해양해양공학회지. 10(1), pp. 37-44.
- 정태성, 김태식, 강시환. 2002. 부유사 확산예측 시스템의 개발. 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집. pp. 71-76.
- 해양수산부., 2002. 부유토사 발생량 평가 및 오탐방지막 효율에 관한 연구용역(III). p. 461.
- Blokland, T. 1988. Determination of dredging -induced turbidity. Terra et Aqua, IADC, 38: 3-12.
- Dearnaley, M.P., Stevenson, J.R., Spearman, J. 1999., Environmental Aspects of Aggregate Dredging. Report SR 548., HR. Wallingford.
- DOER Technical Notes, 1999. U. S. Army Corps Engineers, Waterway Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H. 1979. Mixing in inland and coastal

- waters. Academic Press, New York, N.Y., p. 252.
- Frenkiel, F.N., 1953 "Turbulent Diffusion : Mean Concentraion Distribution in a Flow Field of Homogeneous Turbulence." *Advance in Applied Mechanics*. Vol. 3. pp. 61-107.
- John, S.A., S.L. Challinor, M. Simpson, T.N. Burt and J. Spearman. 2000. Scoping the assessment of sediment plumes from dredging. Construction and Industry Research and Information Association of the UK, Pub. No. CIRIA C547.
- Nakai, O. 1978. Turbidity generated by dredging projects. *Proc. of the third United States-Japan experts meeting*, EPA-600/3 -78-084, pp. 1-47.
- Kang,S.W., Kim,Y.D. J.C.Lee,B.C.Oh, Park,K.S., 2001. "Transport of dredge-induced sus- pended sediments in Asan bay." *Jr. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers.*, Vol. 12, pp. 152-157.
- Kuo, A.Y., Welch, C.S., and Lukens, R.J., 1985. Dredge induced turbidity plume model., *Jr. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg.*, Vol. 111, No. 3, pp. 476-494.
- Kuo, A.Y. and Hayes, D.F., 1991. Model for turbidity plume induced by bucket dredge., *Jr. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engrg.* Vol. 117, No. 6, pp. 610-623.