

준설 탁도플룸의 3차원 이송확산 거동 모형

3-D Dispersive Transport Model for Turbidity Plume induced by Dredging Operation

강시환* · 강인남** · 이정렬***

Kang, See Whan · Kang, In Nam · Lee, Jung Lyul

Abstract

In order to predict the dispersion of suspended sediment arising from dredging operation in port and navigation channel, a hybrid model for dispersive transport of turbidity plume was developed using Lee's(1998) hybrid method. Using hybrid modeling scheme advection-diffusion equation was solved by the forward particle-tracking method for advection process and by the fixed Eulerian grid method for diffusion process. To examine numerical model simulation in accuracy, the simulated results for 1-D, 2-D, and 3-D cases were compared with the analytical solutions including Kuo, *et al's* (1985) 3-D mathematical model. The model results were in a good agreement with the analytical solutions and mathematical model for the dispersion of turbidity plume.

Keywords : dredging operation, turbidity plume, advection-diffusion, hybrid method, forward particle-tracking method

요 지

준설작업으로 인해 재부유된 퇴적물로 구성된 탁도플룸의 이송확산 거동을 예측하기 위해 이(1998)가 제안한 수치 해석의 혼합방법(hybrid method)을 사용하여 3차원 수치모형을 개발하였다. 본 모형에서는 이송 및 확산식의 수치해석에 있어 이송 과정은 전방입자추적기법(forward particle-tracking method), 확산 과정은 유한차분기법을 사용하여 수치계산에 있어 무작위 행보(random walk) 방법에 비해 계산시간이 크게 단축되었으며, 수치모의 결과의 정확성도 크게 향상되었다. 본 모형을 검증하기 위하여 1, 2차원 해석해와의 비교, 그리고 Kuo 등(1985)의 3차원 수리해석모형의 계산결과와 비교하였다. 본 모형의 검증 결과는 비교적 해석해와 잘 일치하였다.

핵심용어 : 준설작업, 탁도플룸, 이송확산 거동, 혼합방법, 전방입자추적기법

1. 서 론

항로 준설, 방파제 건설, 호안 축조, 매립 등 다양한 공종의 항만공사로 인해 발생하는 부유토사의 이송확산은 연안 해역에 다양하게 영향을 주고 환경 변화를 초래한다. 이러한 변화 가운데는 공사장 주변 해역에 부유 퇴적물의 탁도를 증가시키고 해저퇴적물에 축적된 각종 오염물질들을 재부상, 용출시키며 광합성을 방해하는 등 주변 생태계의 변화에 영향을 미치고 인근해 어업과 양식장에도 피해를 유발 할 수 있다(IADC/CEDA, 2000). 따라서 항만공사에 있어 특히 준설 작업에 의해 발생하는 부유 오탁물이 얼마나 멀리 이송 확산될 것인가 하는 영향범위를 사전에 예측하고, 이에 대한 적절한 대비책 마련이 매우 중요하다. 탁도플룸(turbidity plume)의 초기 발생원은 준설 Grab작업에 의한 토사 채취 시 해저면의 교란에 의해 일차적으로 발생되고, 준설토사를

수중에서 끌어올리는 동안의 토사유실, 그리고 바지선으로 적재한 후에 다시 씻겨져 내려오는 토사 등 이러한 일련의 반복적인 과정에서 많은 양의 부유토사가 발생된다. 초기 발생원 현장에서는 주변수의 전단 난류 작용으로 수심 전체에 걸쳐 잘 혼합되어 수직적으로 거의 등농도 분포를 갖는 부유토사의 물기등 형상이 나타난다(Kuo 등, 1991; 강 등, 2004). 실제 해역에서는 준설지점의 유속과 수심에 따라 차이가 있을 수 있겠으나, 준설된 부유 토사의 큰 입자들은 비교적 짧은 시간과 거리에서 다시 가라앉게 되며 가벼운 미세입자 퇴적물의 경우에는 주변 해류흐름에 따라 발생원에서 멀리 떨어진 원해역으로 이송확산하게 된다(Kang, 2006).

준설작업으로 인해 재부유된 퇴적물로 구성된 탁도플룸의 확산거동을 보다 정확하게 예측하기위해 이송확산식에 근거한 다양한 수치 모델링 접근방법이 여러 연구자에 의해 제

*정희원 · 한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원(E-mail : swkang@kordi.re.kr)

**정희원 · (주)한국환경기술단 설계본부(E-mail : byulang@naver.com)

***성균관대학교 토목환경공학과 부교수(E-mail : jilee@skku.edu)

안되었다. Bohlen(1978)은 준설 탁도플룸에 관한 간단한 수학적해를 제안하였고, 이후 Kuo 등(1985, 1991)에 의해 여러 준설 공중에 따른 수리적인 해석해를 근간으로한 모델이 개발된바 있다. Dimou(1993)는 무작위 행보(random walk)에 의한 입자추적모형(particle-tracking model)을 개발하였으며, Johnson 등(2000)도 입자추적기법을 사용하여 준설부유토사의 이송확산을 예측하는 SSFATE 모형을 개발하여 미육군공병단의 준설현장에서 사용하고 있다. 최근 국내에서도 서(1996), 김 등(2000), Kim 등(2001), 정 등(2004), 강 등(2004a; 2004b), Kang (2006)에 의해 부유토사의 이송확산 연구가 수행된 바 있다.

부유물질의 이송 및 확산 과정에 대한 모델링은 그 동안 상당한 발전이 있었으나 아직 모델간의 특징에 따라 이송 또는 확산 처리능력에 있어 단편적인 우월성은 감지되나 두 과정 모두에 대해서는 효과적이지 못했다. 즉, 무작위 행보(random walk)에 의한 라그랑주적(Lagrangian)모델은 이송이 우월한 지역에서는 상당히 효과적이지만 확산이 우월한 지역에서는 많은 개수의 부유 입자가 동원되어야 정확도를 확보할 수 있었다(이 등, 1995). 한편 오일러적(Eulerian)모델은 확산처리 능력에서는 탁월하나 이송의 처리에 따른 수치 진동(numerical oscillation), 수치 확산(numerical diffusion)이 일어나거나 또는 상위 보간(higher interpolation)을 취해야하는 문제점을 안고 있었다(이, 1998). 따라서 오일러적 방법과 라그랑주적 방법을 결합한 Eulerian-Lagrangian 방법이 최근 많이 사용되는데, 이 방법은 수치진동과 수치확산을 줄여 정확성이 크게 개선되었다(서, 1996, 정, 2004 등). 그러나 이런 정확성을 보장하기 위해서는 상위보간 알고리즘이 요구되는데 그에 상응하여 계산시간이 더 요구된다는 문제점이 있고, 특히 지형이 복잡한 연안해역에 적용하는 경우에는 수치모의에 많은 계산시간이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기위해 이(1998)는 전방입자추적기법(forward particle-tracking method)을 사용하여 오염물질의 이송 및 확산에 대한 새로운 혼합 방법(hybrid method)을 제안한바 있는데, 이 방법에 의하면 수치계산이 빠르고 결과가 정확하며 흐름이 우세한 해역에서도 적용 능력이 탁월하였다. 즉, 전방입자추적기법에 의한 수치계산은 할당된 입자가 계속적으로 전방으로 움직이므로 정확한 이송 과정의 예측이 가능하고 보간 기법으로 인한 계산상의 지연이 없고 수치계산이 빠르다는 장점을 갖고 있다. 이런 점에서는 무작위 행보방법에 의한 라그랑주적 방법과는 유사하나, 확산 과정의 계산이 고정된 오일러 격자체계에서의 유한 차분법을 통하여 수행된다는 점에서 차이가 있다. 따라서 격자당 한 개 정도의 입자가 투여되어도 이송 및 확산 거동을 충분히 모의할 수 있다.

본 연구에서는 무작위 행보방법을 이용하여 확산과정을 해석하던 방법과는 달리 유한차분 방법으로 확산과정을 모의하는 전방입자추적방법을 사용한 혼합(hybrid)모형을 개발하여 준설 탁도플룸의 이송 및 확산거동에 대한 1, 2차원의 해석해, 그리고 3차원의 수치해석 모형(Kuo & Hayes, 1985)과 상호 비교하여, 본 모형의 정확도와 신뢰도를 검증하였다.

2. 탁도플룸의 이송확산모형

준설작업으로 인하여 발생된 부유토사는 주변수의 강한 전

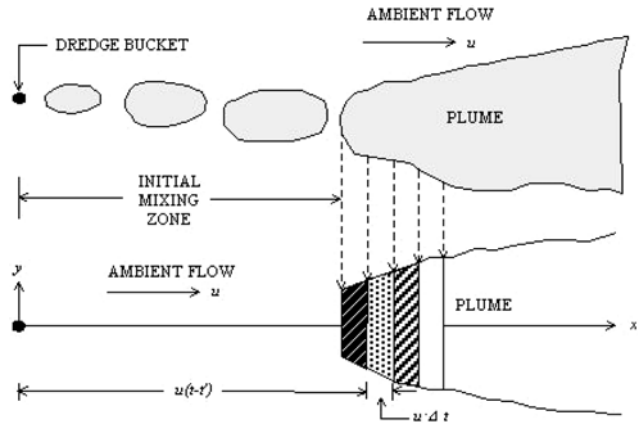


Fig. 1 Hypothetical dredge-induced plume (After Kuo and Hayes (1991))

단작용에 의해 난류 혼합되어 전 수심에 걸쳐 등농도의 부유 오탁물기둥을 형성한다는 가정으로부터 연속적으로 진행되는 준설작업으로 인하여 부유된 퇴적물들은 일정한 흐름에 의해 이송되고, 병합되어 플룸의 형태를 띠게 되는데 이러한 현상을 수리적으로 해석하기 위해 나타낸 것이 Fig. 1에 있다.

2.1 지배방정식

준설작업으로 인하여 발생하는 부유토사에 대한 3차원 이송확산 방정식은 다음과 같다(Fischer 등, 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 후에 서로 중첩시키는 방법을 사용하였다. 즉, 이송과정은 라그랑주적 방법으로 주변유속에 의해 이송되어지는 입자의 연속적인 위치를 파악하고, 각 입자가 위치해 있는 격자의 가운데로 농도를 할당한 후에, 음해 유한 차분법을 이용하여 확산과정을 수행하고, 다시 원래 입자들의 위치로 되돌리는 방식을 사용하였고, 매 격자간, 매 시간당 하이브리드 방법을 적용하였다(이, 1998). 본 모형의 수치 계산과정은 Fig. 2에 있다.

2.2 이송과정의 수치해석

이송과정의 관계식은 다음과 같으며,

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

식 (2)는 이송과정을 물질도함수로 표현한 것이며, 특성곡선법에 의하여 수치해석된다(Burden 등, 1978). 이 식은 주변유속에 의해 특성곡선을 따라 일정하게 이동된다는 것을 의미한다. 입자의 현재 시간에서의 위치를 (x_p^x, x_p^y, x_p^z) 으로 정의할 때, 다음 시간에서의 위치는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

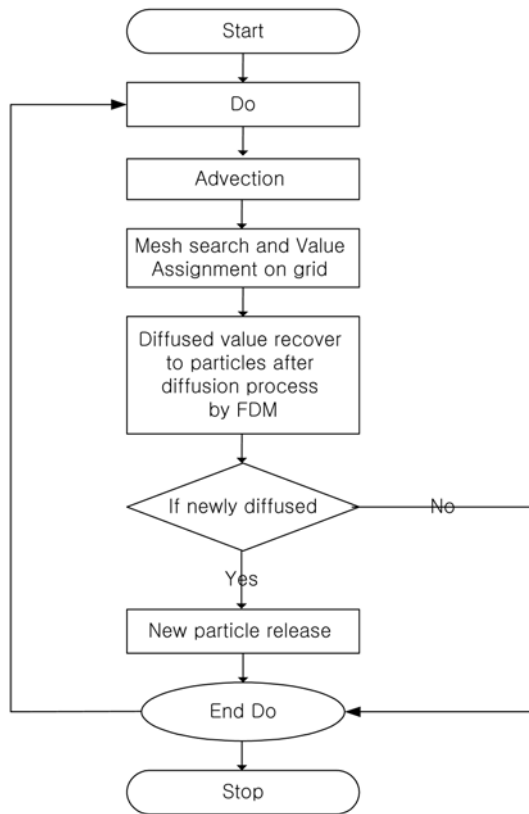


Fig. 2 Flow chart of model computing procedure

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

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

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

여기서 지수 p 는 입자의 입자에 대한 지수로서 불특정 입자이며, n 은 시간단계를 나타낸다. 확산과정의 수치계산은 음해법을 사용하기 때문에 시간 간격(Δt)을 크게 할 수 있지만, 이송과정에서는 시간 간격이 제한적이므로 내부 시간 간격을 사용한다. 이를 사용하여 식 (3)을 다시 표현하면 식 (4)와 같다.

$$x_p^{n+1} = x_p^n + \sum_1^m u_p^n \delta t \quad (4-a)$$

$$y_p^{n+1} = y_p^n + \sum_1^m v_p^n \delta t \quad (4-b)$$

$$z_p^{n+1} = z_p^n + \sum_1^m w_p^n \delta t \quad (4-c)$$

여기서, m 은 내부 시간 간격의 총 개수를 나타내며, δt 는 내부 시간 간격 으로서 $\delta t = \Delta t/m$ 이다.

2.3 확산과정의 수치해석

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

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

여기서 $K_x=K_y=K_z=K$ 로 가정하여 다음과 같이 ADI 기법을 사용하면 1차원적인 연산자의 곱으로 정의된다.

$$|1 - \alpha \Delta t K D_{xx}| \Delta \tilde{C}^* = \Delta t K (D_{xx} \tilde{C} + D_{yy} \tilde{C} + D_{zz} \tilde{C}) \quad (6-a)$$

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

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

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(이, 1998). 그리고 확산 계수는 모든 방향으로 같다고 가정하였다. 또한 C^* 는 x 방향에 대하여 계산한 결과이고, C^{**} 는 y 방향에 대하여 계산한 결과이며, $\Delta \tilde{C} = \tilde{C} - \tilde{C}$ 를 의미한다.

3. 1차원 및 2차원 해석해와의 비교

본 모형의 정확성에 대한 검증을 위하여 Table 1에서와 같이 여러 경우에 대해서 해석해와 비교하였다. 부유사가 순간적으로 유입되고, 일정한 유속과 확산계수를 갖는 경우에 대한 이송확산 방정식의 2차원 해석해는 다음과 같다 (Fischer 등 1979).

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

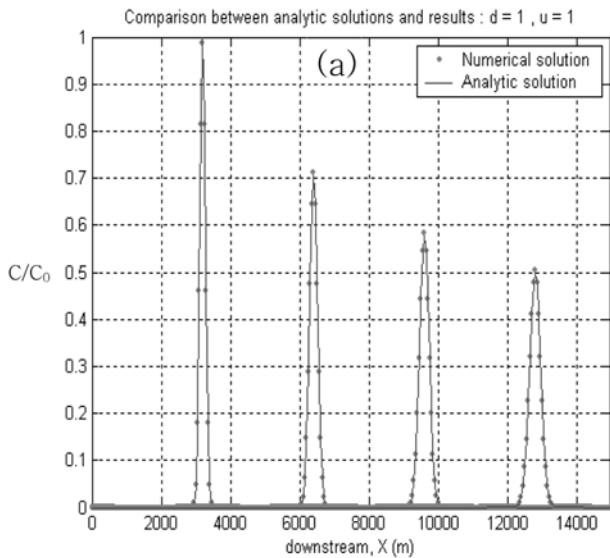
여기서 x_0 , y_0 는 입자의 초기 위치를 나타내고, M 은 2차원의 경우 단위면적당 부유토사의 초기 부하질량이다. 유속이 지배적인 경우와 확산이 지배적인 경우에 대한 1차원과 2차원에 대하여 본 모형과 해석해와 비교한 그림이 Fig. 3~4에 나타나 있다. 연직방향축의 값은 초기농도에 대한 계산농도의 비(C/C_0)이다. Fig. 3에서는 1차원 해석해와 12,800초 동안 수치모의 된 본 모형의 결과를 비교하였으며, Fig. 3(a)는 이송이 지배적인 경우로서 3,200초 간격으로 결과를 제시하였고, Fig. 3(b)는 확산이 지배적인 경우로서 1,600초 간격으로 결과를 제시하였다. 본 모형의 수치계산 결과에서는 수치 진동이나 수치 확산이 나타나지 않았으며 해석해와도 정확히 일치하였다.

Fig. 4는 2차원 문제에 대한 모형의 검증결과이며, 1차원에서와 마찬가지로 이송이 지배적인 흐름과 확산이 지배적인 흐름에 대하여 해석해와 비교하여 3,600초 간격으로 결과를 제시하였다. 본 모형의 수치모의 결과에서 나타났듯이 2차원의 해석해와도 정확히 일치하였다.

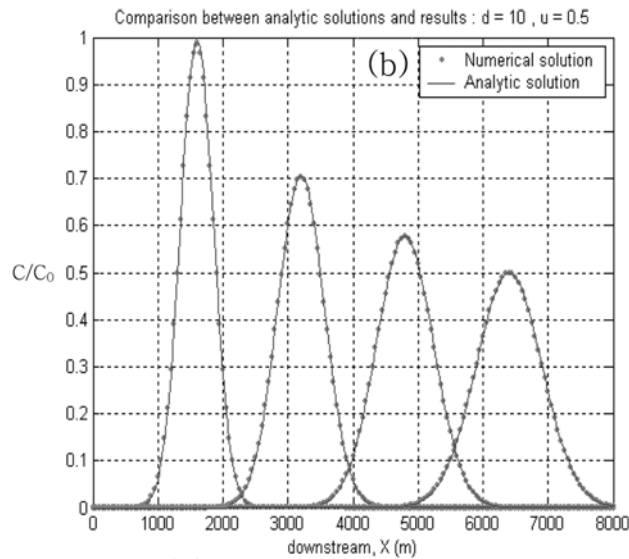
본 모형(FPTM)의 수치확산 실험결과를 무작위 행보

Table 1. Test cases for the verification of forward particle-tracking model

Case	1-1	1-2	2-1	2-2
Dimension	1-D	1-D	2-D	2-D
$u(m/s)$	1	0.5	1	0.5
$v(m/s)$	0	0	1	0.5
$D(m^2/s)$	1	10	1	10

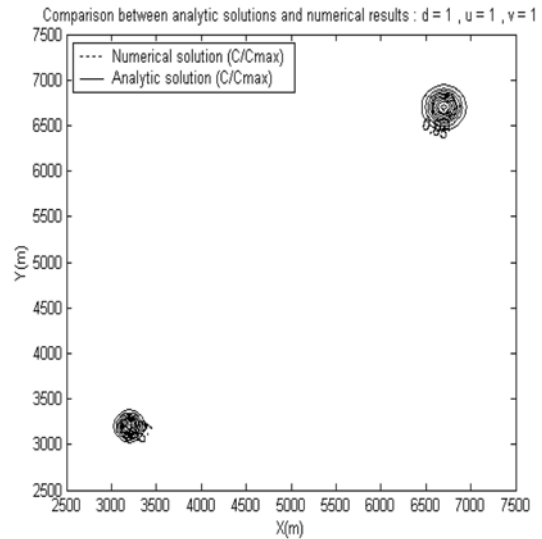


(a) Advection dominated flow
 $(K_x = 1 \text{ m}^2/\text{sec}, u = 1 \text{ m}/\text{sec})$

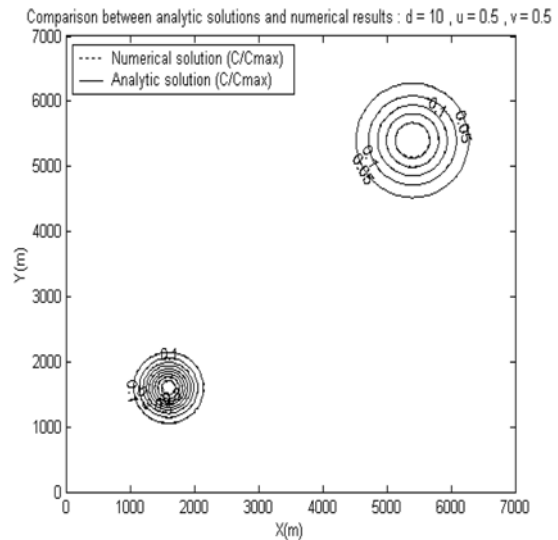


(b) Diffusion dominated flow
 $(K_x = 10 \text{ m}^2/\text{sec}, u = 0.5 \text{ m}/\text{sec})$

Fig. 3 Model verification for 1-D analytic solution



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



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

Fig. 4 Model verification for 2-D analytic solution

(random walk)에 의한 라그랑주적 모형의 계산결과와 해석해를 비교한 것이 Fig. 5에 있다. 여기서 계산격자는 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$, 계산시간의 간격은 10초이며 확산계수는 $10 \text{ m}^2/\text{sec}$ 로 가정하였다. 무작위 행보방법에 의한 확산실험결과에서 보는 바와 같이 10^5 개 정도의 많은 입자가 있어야만 해석해에 근접하는데, 이는 수치모의계산에 있어 많은 시간이 소요됨을 알 수 있다. 이에 비해 본 모형(FPTM)의 경우에는 계산격자점에 각기 한 개씩 주어진 2500개의 입자가 소요됨으로써 계산시간을 크게 줄일 수 있었다.

4. 3차원 이송확산 모형에 대한 검증

4.1 준설 탁도플룸 거동의 3차원 해석해

본 모형을 3차원 해석해와 비교하기 위하여 준설 탁도플룸에 대한 수학적 모형(Kuo 등, 1985)의 결과와 비교하였다.

이 모형의 근간은 cutter suction 준설시에 바닥면에서 발생한 부유사가 흐름방향으로 플룸의 형태를 띠면서 흘러갈 경우에 대한 3차원 해석해로서, Frenkiel(1953)에 의해 제안된 “확산원판(spreading disk)”이라는 개념의 확산 모형을 기초로 하였다. 또한 Fig. 6과 같이 복잡한 지형의 변화로 인하여 주변수의 방향이 일정하지 못하는 것으로 인하여 플룸의 형태가 하류방향으로 직선의 형태가 되지 않지만, 본 모형에서도 Kuo 등(1985)이 제안한 바와 같이 플룸의 이송형태를 직선으로 가정하였다.

유속은 하류방향으로 일정하고, 흐름방향으로의 확산은 주변 유속에 의해 이송되는 것에 비해 작으므로 무시될 수 있다. 수심방향으로는 침강속도가 고려되며, 수평방향으로 유속이 없이 확산만 존재한다고 가정하고, 흐름방향으로의 유속만을 고려하였다. 준설 작업시에 흐름방향으로 주변유속이 일정한 경우에 대한 3차원 해석해는 다음과 같다.

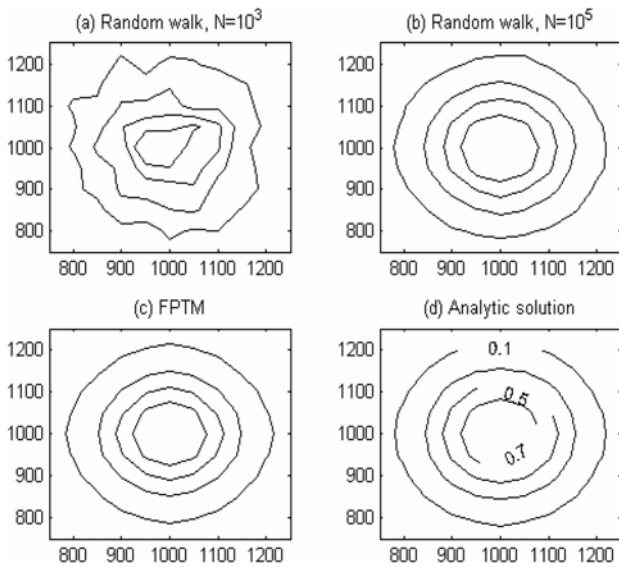


Fig. 5 Comparison of model simulations with analytic solution for 2-D diffusion case

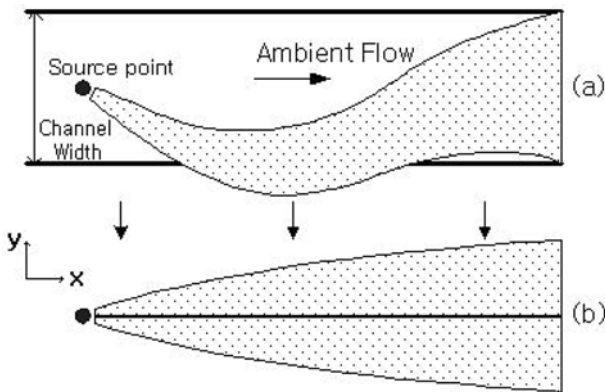


Fig. 6 Hypothesized dredged-induced plume (After Kuo *et al.* (1985)) (a) Actual turbidity plume, (b) Transformed plume.

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

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 따라 즉, $y=y'$ 인 곳에서 농도는 최고가 된다. 따라서 식 (8)에 $y=y'$, $z=0$ 를 대입하면 다음과 같이 중심선 농도 즉, 거리에 따른 최고 농도(c_m)에 대한 식을 얻을 수 있다.

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

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.

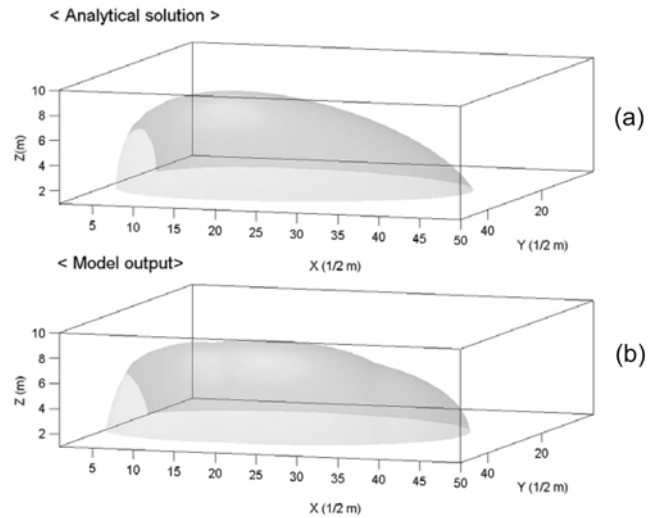


Fig. 7 Model verification for 3-D analytic solution (surface concentration : 4 g./m^3) (a) Kuo *et al.*'s(1985) analytic solution, (b) Model simulation result

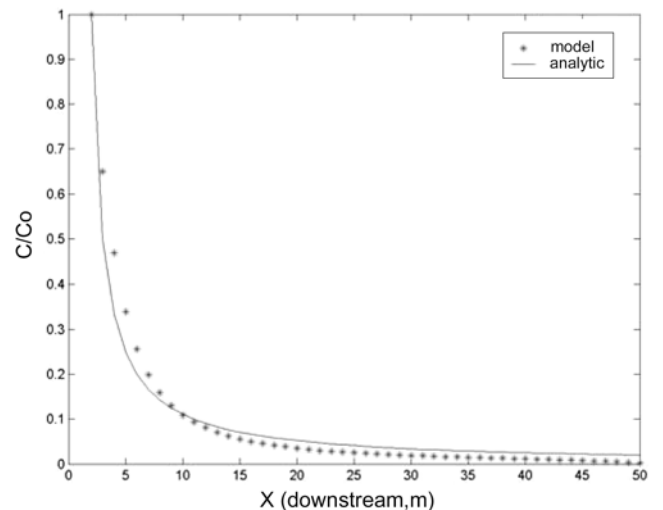


Fig. 8 Comparison of 3-D model result with analytic solutions along the bottom layer (0~1 m)

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

여기서 y_c 는 플룸 중심축에 대한 수평적인 거리를 나타낸다.

4.2 3차원 해석해에 대한 모형의 비교검증

준설 작업에 의해 해저로부터 부유토사가 발생하여 주변 수역의 해수흐름과 난류특성으로 인해 이송 및 확산되고, 다시 입자의 침강특성으로 인해 가라앉은 과정을 모의하기 위해, 해저면에서 매 시간마다 부유토사가 연속적으로 발생하도록 하였고, 시간 간격은 0.5초, 격자 간격은 수평방향으로 0.5 m, 연직 방향으로 1 m로 두었으며, 수심이 10 m인 지점에 대하여 본 모형의 수치모의를 하였다. 유속은 x 축의 방향으로 일정한 흐름($u=0.5 \text{ m/s}$)이고, 대표 침강속도는 0.05 m/s 이며, x , y , z 각 방향에 대한 확산계수는 $1 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 가정하였다. 이에 대한 3차원적인 모형의 모의 결과가 Fig. 7에 나타나 있으며, 흐름방향을 따라 해저면(0~1 m)에서의 최고

농도를 해석해와 비교한 결과는 Fig. 8에 나타나 있다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 확산거리 및 확산폭등 준설 탁도플룸의 이송 및 확산거동 형상은 Kuo 등(1985)의 수학적 모형결과와 비교적 잘 일치하였다. Fig. 8의 흐름방향에 대한 거리별 초기 농도의 감소비율에서 보는 바와 같이 해석해와 비교해서 약간의 차이를 나타내고 있는데, 이는 본 모형에서는 이송된 입자가 격자 사이에 위치할 경우 두 격자에 일정한 비율로 농도가 할당이 되어야 하나, 한 격자에 일방적으로 할당이 되어 확산과정을 수행하는 경우에 있어서는 격자간 농도 경사가 완만하지 않아서 이러한 문제를 야기시킬 수 있다. 문제해결의 방안으로는 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 사용하면 보다 근접한 결과를 얻을 수 있게 될 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 항만준설작업으로 인해 재부유된 퇴적물로 구성된 탁도플룸의 거동을 예측하기 위해 수치 해석에 있어 혼합방법(hybrid method)을 사용하여 3차원 이송확산 모형을 제안하였다. 본 모형에서 사용한 혼합방법은 부유퇴적물의 이송확산식에서 이송과정은 전방입자추적기법(forward particle-tracking method)을 사용하였으며, 확산 과정은 유한 차분기법을 사용하였다. 이는 기존의 혼합 방법인 오일러-라그랑주적 방법과는 달리, 보간기법의 사용 없이 수행되며 무작위 행보에 의한 라그랑주적 방법과 같이 많은 입자가 요구되지도 않는다. 따라서 수치계산에 있어 계산시간이 크게 단축되며, 수치모의 결과의 정확성도 크게 향상 될 수 있다.

본 모형을 검증하기 위하여 1-2차원의 해석해에 대해 이송과 확산이 각기 우세한 경우에 대해서 수치 모의한 결과를 비교하였으며 그 결과는 해석해와 잘 일치하였다. 특히, 한 지점에 순간적으로 부하된 부유퇴적물의 경우에서 나타났듯이 라그랑주적 방법의 경우 확산계수가 클수록 더 많은 부하 입자가 있어야만 해석해에 근접하나 본 모형의 경우 확산 계수의 크기에 상관없이 해석해에 가장 근접함을 보였다. 그리고 Kuo등(1985)이 제안한바 있는 3차원 탁도플룸의 수리해석모형의 계산결과와 비교하였으며, 본 모형의 계산 결과는 Kuo등의 해석해 모형의 결과와도 비교적 잘 일치하였다. 따라서 이송과정을 입자 추적하고 확산 과정을 유한 차분하는 혼합 방법을 사용한 본 모형은 다양한 흐름과 다양한 오염물질의 공급원을 갖는 강하구 및 해안의 수리환경조건에도 쉽게 적용될 수 있으며, 특히 항만 인근해역의 복잡한 3차원적 해수 유동구조와 변동성을 고려해야 할 경우 준설 탁도플룸의 이송 및 확산 거동을 예측함에 있어 본 모형이 보다 효율적일 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 한국해양연구원의 연구정책지원사업 “연안항만

공사 준설부유토사의 확산거동 예측모형 연구개발”의 연구지원에 의해 수행된 연구결과의 일부입니다.

참고문헌

- 강시환, 김상익, 강인남, 정태성(2004) 준설 부유퇴적물의 초기 확산 거동 모의. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권 제1-B호, pp. 63-68.
- 김영도, 강시환, 서일원, 오병철(2000) 3차원 입자추적 모형에 의한 수중방류 하수의 이송확산 예측. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제20권 제6-B호, pp. 843-852.
- 서승원(1996) Eulerian-Lagrangian 농도 및 입자 결합모형에 의한 연안의 부유사 확산해석, **한국해양·해양공학회지**, 한국해양안·해양공학회, 제8권 제2호, pp. 185-192.
- 이정렬(1998) 전방추적법에 의한 오염물질의 전송모형. **한국해양·해양공학회지**, 한국해양안·해양공학회, 제10권 제1호, pp. 37-44.
- 이종섭, 김호진(1995) random walk 모형에 의한 확산해의 민감도 분석. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제15권 제5호, pp. 1267-1277.
- 정태성, 김태식, 강시환(2004) 준설공사시 부유사 확산예측시스템의 개발. **한국해양안해양공학회지**, 한국해양안·해양공학회, 제16권 제1호, pp. 47-55.
- Bohlen, W.F. (1978) Factors governing the distribution of dredge-resuspended sediment. *Proc. 16th Coastal Eng. Conf., ASCE*, pp. 2001-2019.
- Burden, R.L., Faires, J.D., and Reynolds, A.C. (1978) Numerical Analysis. Prindle, Weber & Schmidt, Inc. Boston, pp. 579.
- Dimou, K.N. and Adams, E.E. (1993) A random-walk particle tracking model for well-mixed estuarine and coastal waters *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 37, pp. 99-110.
- 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., pp. 252.
- Frenkiel, F.N. (1953) Turbulent Diffusion : Mean Concentration Distribution in a Flow Field of Homogeneous Turbulence. *Advance in Applied Mechanics*. Vol. 3. pp. 61-107.
- IADC/CEDA (2000) Effects, ecology and economy. Environmental aspects of dredging. Inter Asso Dredging Co. Vol. 6. The Netherlands
- Johnson, B.H., Anderson, E., Isaji, T., and Clarke, D.G. (2000) Description of the SSFATE numerical modeling system. DOER Technical Notes Collection (TN DOER-E10), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- Kang, S.W. (2006) Modelling transport of suspended sediment caused from dredging operation. *Journal Ocean Science & Technology*, Korean Assoc. Ocean Science & Technology Societies, Vol. 3, No. 1, pp.38-43.
- Kim, Y.D., Seo, I.W., Kang, S.W., and Oh, B.C. (2001) Modeling the mixing of wastewater effluent discharged from ocean outfalls using a hybrid model. *Coastal Engineering Journal*, JSCE. Vol. 43, No. 4, pp. 259-288.
- Kuo, A.Y., Welch, C.S., and Lukens, R.J. (1985) Dredging induced turbidity plume model. *J. of Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE. Vol. 111, No. 3, pp. 476-494.
- Kuo, A.Y. and Hayes, D.F. (1991) Model for turbidity plume induced by bucket dredge. *J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE. Vol. 117, No. 6, pp. 610-623.

(접수일: 2006.6.1/심사일: 2006.7.29/심사완료일: 2006.8.5)