

Eulerian-Lagrangian 濃度 및 粒子 結合模型에 의한 沿岸의 浮遊砂 擴散解析 Suspended Solid Dispersion Analysis for Coastal Areas Using Hybrid Concept of Particle and Concentration of Eulerian-Lagrangian Model

徐 承 源*
Seung Won Suh*

要 旨 : 연안에서의 효율적인 확산해석을 위해 연산자 분리기법에 의한 Eulerian-Lagrangian 농도모형과 random walk 방법이 결합된 모형이 수립되었다. 수립한 입자추적모형은 특히 고농도 변화 지역에서 오차 없이 만족스럽게 해석할 수 있는 수단으로 판단된다. 모형실험결과 오염원 방류초기의 $\nabla C \geq 0.005$ 에서 거의 정확해와 일치하는 결과를 얻었고, $\nabla C \leq 0.002$ 에서는 만족스럽지 못한 결과가 유도되어 입자추적모형의 적용한계의 기준으로 제시되었다. 따라서 실제 해역에서의 적용에서 고농도의 오염원이 발생하는 근역에서는 입자추적모형을 적용하고 이후의 전역에 대해서는 농도모형을 이용하여 해석상의 능률 제고와 정도의 향상을 도모할 수 있었다.

Abstract □ In order to simulate the coastal dispersion effectively, hybrid concept of operator split Eulerian-Lagrangian concentration model and random-walk particle tracking model are developed. Especially the random-walk model is adequate for region with steep slope of concentration. According to model tests, it agrees perfectly with analytical solution around the source point for therefore, $\nabla C \geq 0.005$, meanwhile it shows poor results for $\nabla C \leq 0.002$. In trial modeling for real situation therefore, random-walk model is applied for near field henceforth Eulerian-Lagrangian concentration model is adopted for whole domain so that overall performance and accuracy can be achieved by using developed hybrid model.

1. 서 론

해안에서의 오염물의 확산에 대한 연구의 접근방법 중 근자에는 Eulerian 좌표계를 이용할 때의 오차를 제거하고 물리적으로도 만족스러운 형태를 갖는 Lagrangian 접근방법에 의한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 이동 좌표계의 설정등 어려운 점 때문에 양자의 장점을 택한 소위 Eulerian-Lagrangian 혼합방법에 의한 연구 결과가 발표되는데 국내에서는 서(1993a)의 연구에 이어 전과 이(1992) 그리고 서와 김(1994)등이 이에 관한 연구를 주도하고 있으며 매우 만족스러운 결과를 제공하고 있다.

그렇지만 이러한 오차를 줄이는 개선된 수치모형을 이용하더라도 실제로 이용하는 기본방정식은 수체내에 용해된 농도를 포함한 미분방정식이므로 물리적으로

로는 자연 상태에서 일어나는 물질의 확산이 농도로 표현된 기본식에 의해 설명되기보다는 물질입자 개개의 무작위 움직임으로 표현하는 것이 보다 타당할 것이다. 따라서 이와 같은 타당성 때문에 근래에 입자의 무작위 움직임을 표현한 random walk 방법이 국내 연구진들 사이에도 선풍적으로 이용되고 있다(서와 정, 1994; 이와 김, 1995; 김 등, 1995).

그러나 물리적으로 농도모형보다 타당성이 인정된다 하여도 근본적으로 개개 입자의 궤적을 추적하는데 상당한 노력이 소요되고 현실적으로 다수의 입자를 다루기에는 컴퓨터의 제약 등으로 인하여 만족스럽게 이용되지 못하는 못하며, 또한 최종적으로는 추적된 입자들 농도로 변환하는데 어려움이 수반되어 Eulerian 모형처럼 보편화되어 이용되지 못하고 있다. 따라서 이 방법은 국한된 경우에 필히 적용해야 하는 경우나 농

* 蔚山大學校 海洋工學科 (Department of Ocean Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-360, Korea)

도를 표현한 방정식으로써는 그 이동 경로의 추적 등이 곤란한 경우 등에 사용되는 것이 바람직하다. 그러나 이러한 기본적인 면을 간과한 채 국내에서 연구된 결과들은 random walk의 적용에만 집중하므로써 입자의 수가 많아지면 많아질수록 경제적으로 유리하지 못한 방법을 채택하고 있다. 더욱이 국내의 기존 random walk에 대한 연구는 단지 고정격자체계상에서 수동역학적인 결과를 이용하고 확산에 대해서만 무작위 행보의 방법을 적용하고 있으며 입자들의 추적에 주안점을 두고 농도로의 변환이나 종국적으로 농도로 전환하지는 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 연안에서의 부유사 확산이나 오염물의 이송-확산을 효율적으로 모의하고자 입자추적 방법과 농도로 표현된 방법을 결합한 모형을 지하수의 확산에 대하여 연구 발표한 Tompson 등(1988), 그리고 해역에서 Dimou(1989)가 제시한 방법을 응용하고 전회의 연구(서, 1993a)에서 Eulerian-Lagrangian 개념에 입각하여 장기간의 단속적 방류에 따른 연구를 수행하였던 결과를 토대로 고농도 발생 인근 해역(near field)에서는 random walk 개념에 의한 Eulerian-Lagrangian 입자추적모형으로 그리고 원역에서는 Eulerian-Lagrangian 농도모형에 입각하여 전 해역의 확산현상을 조화롭게 해석하고자 한다. 입자추적 모형 운용시 적정 입자수 및 영향의 범위를 제시한 Moeller(1993)의 연구결과를 참고하여 해석하여 고농도 발생 인근에서 농도의 급경사에 기인된 수치적 불안정과 오차를 제거하고 Eulerian-Lagrangian 농도 모형의 안정된 장점을 겸비하도록 한다. 그러나 본 연구는 Eulerian-Lagrangian 농도 및 입자결합모형의 초기적인 연구로써 연속적인 연구의 일차적인 결과만을 기술한다.

2. Eulerian-Lagrangian Random Walk 모형

입자추적모형은 무작위 운동에 의한 오염예측방법으로 Monte-Carlo 방법인 random walk 개념에 입각한 것이며 근본적으로 대상영역내에 농도개념이 아닌 입자가 존재한다고 고려한 것이다. 현재에는 지표수와 지하수의 모든 분야의 확산해석에 폭 넓게 이용되고 있으나 특히 지하수의 해석에 광범위하게 적용되고 있다(Tompson 등 1988). 이 방법은 수학적인 통계개념으로 출발하여 시도되었으나 개개 입자의 운동을 묘사하

기 위해서는 막강한 computer를 필요로 하므로 근래에 까지 보편적으로 이용되지는 못하였으나 이론적으로는 꾸준히 연구되고 있는 분야이다 (Jozsa, 1989). Random walk 개념에 대하여 간략히 살펴보면 다음과 같다. 입자의 위치를 다음과 같이 확정적인 인자 a와 확률론적인 인자 b의 관계로 표현하면 소위 비선형의 Langevin 방정식이 된다(Tompson 등 1988).

$$\frac{dx_i}{dt} = a(x_i, t) + b(x_i, t)\xi(t) \quad (1)$$

여기서 ξ 는 난수이다. 식 (1)을 적분하면 다음의 식을 얻는다.

$$x_i(t+dt) - x_i(t) = a(x_i(t), t)dt + \int_t^{t+dt} b(x_i(s), t)\xi(t)dt \quad (2)$$

윗식을 차분형태로 고쳐 쓰면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta x_i^n = x_i^n - x_i^{n-1} = a(x_i^{n-1}, t^{n-1})\Delta t + b(x_i^{n-1}, t^{n-1})\Delta W(t^n) \quad (3)$$

이 관계를 전형적인 수송방정식에 대입하고 정리하여 유사성 원리에 따라 식을 비교하면 다음의 관계를 얻게 된다(Dimou, 1989).

$$a = u_i - \frac{\partial D_{ij}}{\partial x} \quad (4)$$

$$b = \sqrt{2D_{ij}} \quad (5)$$

$$\Delta W(t_n) = Z_n \sqrt{\Delta t} \quad (6)$$

여기서 Z는 난수로 평균 0, 분산 1의 관계가 있다. 따라서 입자의 움직임은 확률론적인 부분 $a(x_{n-1}, t_{n-1})\Delta t$ 과 이와는 별도로 독립된 무작위 Markovian 성분 $b(x_{n-1}, t_{n-1})\Delta W(t_n)$ 으로 구성된다.

3. 수심적분 2차원 확산에서의 Random Walk

Source/sink를 무시한 수심 적분된 2차원 물질 수송식의 보존형태는 다음식 (7)로 표현된다.

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial(uch)}{\partial x} + \frac{\partial(vch)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[hD_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[hD_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right] \quad (7)$$

이식을 변형하면 다음의 식 (8)을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(ch)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left[\frac{D_{xx}}{h} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} D_{xx} + u \right] ch \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[\left[\frac{D_{yy}}{h} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} D_{yy} + v \right] ch \right] \\ & = \frac{\partial^2}{\partial x^2} (D_{xx}ch) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (D_{yy}ch) \end{aligned} \quad (8)$$

영역내에 분포된 물질의 총량을 M이라고 하면 $M_p(x, t) = pc$ 의 관계가 성립되고 식 (3)과 비교하면 다음의 식을 얻는다(Dimou, 1989).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(a - \frac{1}{2} \frac{\partial b^2}{\partial x} \right) c \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{2} b^2 \frac{\partial c}{\partial x} \right] \quad (9)$$

따라서 확산식과 random walk식을 비교하면

$$\Delta x = \left[\frac{D_{xx}}{h} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} D_{xx} + u \right] \Delta t + \sqrt{2D_{xx}\Delta t} Z_{n1} \quad (10)$$

$$\Delta y = \left[\frac{D_{yy}}{h} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} D_{yy} + v \right] \Delta t + \sqrt{2D_{yy}\Delta t} Z_{n2} \quad (11)$$

이 된다. 따라서 위식이 2차원 random walk을 제어하는 기본식이 되며 random walk에 의한 변위는 다음과 같은 두 부분으로 구성된다. x방향에 대해서 고려하면 확정론적인 부분에 의하여 이송되는 영향과

$$a_x = \left[\frac{D_{xx}}{h} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} D_{xx} + u \right] \quad (12)$$

확산에 의한 항

$$\sqrt{2D_{xx}\Delta t} Z_{n1} \quad (13)$$

으로 구성되며, 이송에 의한 영향은 실제의 이송유속 u, 확산계수의 공간적 변화에 의한 가상의 유속 $\partial D_{xx}/\partial x$, 수심의 공간적 변화에 의한 가상의 유속 $(D_{xx}/h)(\partial h/\partial x)$ 등 3부분으로 구성된다.

즉, 본 입자추적에 의한 방법에서는 이송-확산의 영향이 실제의 이송유속, 인근격자 사이의 수심변화와 확산계수의 차에 따라 이송되며, 확산은 임의의 무작위 성향을 함께 지니게 된다.

4. 모형검증

수립한 random-walk에 의한 확산이 여하히 계산되는지를 살펴보기 위하여 다음과 같이 해석적으로 해를 구할 수 있는 단순한 경우에 모형을 적용하였다. 계산은 일차원적인 방향으로의 이송확산이 있는 영역으로 취하였으며, 이 경우 연속적으로 오염원이 방류될 때 해석적인 해는 다음과 같다.

$$(x, t) = \frac{m}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp \left\{ - \frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2} \right\} \quad (14)$$

여기서 $\sigma_x^2 = \sigma_{0x}^2 + 2Dt$ 이고, $\bar{x} = x_0 + ut$ 이며 아래첨자 0는 초기 방류점의 위치를 의미한다. 그림 1과 같은 영역에서 해석해와 수치해와의 비교가 그림 2에 수록되었다. 이송의 영향을 크게 취하여 $u=10$ m/s, $D=10$ m²/s 그리고 입자의 수를 1000개와 5000개로 구분하여 수치실험 결과는 전반적으로 해석해와 수치해가 일치하는 만족스러운 경향을 보이나 특히 시간이 경과되면서 확산의 임의성에 기인되어 입자수와는 무관하게 해석해와는 편이된 성향을 보인다. 그렇지만 방류초기에는 매우 만족스럽게 해석해와 일치되므로 본 연구에서 추진하는 바와 같이 고농도의 방류구 인근에서 적용성이 높음을 알 수 있다.

그러나 위의 해석적인 해는 수심이 일정한 제한된 경우이므로 공간적으로 수심의 변화가 있는 해역에서의 검증으로는 부적절 할 수 있다. 따라서 수심의 변화를 고려하기 위하여 1차원 이송확산 방정식을 기술하면 다음과 같고,

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{D}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial c}{\partial x} \right) = 0 \quad (15)$$

이송이 없고 순수 확산만 있으며 수심이 지수적으로 $h(x) = h_0 \exp(ax)$ 와 같이 변한다고 가정하면 위식 (15)는 다음처럼 변환될 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} - aD \frac{\partial c}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0 \quad (16)$$

즉, aD가 가상의 유속으로 작용하는 경우로 간주됨으로 해석적으로 해가 구해지고 이는 위에서 적용하였던 식 (14)의 지수항을 $\bar{x} = x_0 - aDt$ 로 치환하면 된다.

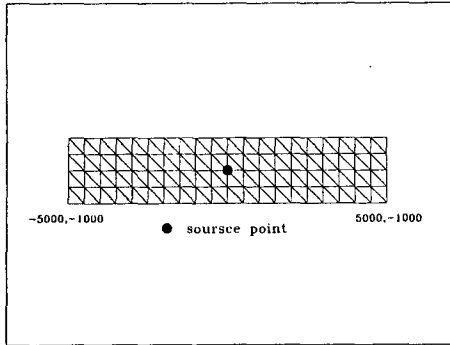


Fig. 1. FEM grids of random-walk particle simulation.

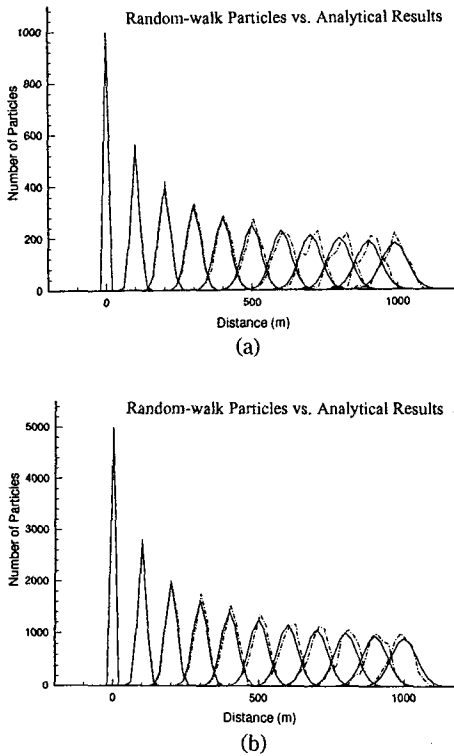


Fig. 2. Comparison of random-walk particles distribution with analytical solution. (a) 1000 particles, (b) 5000 particles. Solid lines show analytical distribution with every 10 seconds, whereas dashdots show corresponding numerical one. $u=10$ m/s, $D=10$ m²/sec, $h=10$ m.

수치실험은 이송유속이 없다고 가정하고 ($u=0$ m/s), $D=10$ m²/s 그리고 $h(x)=5\exp(0.0003x)$, $-5000 \leq x \leq 5000$ 으로 취하여 10 km에 걸쳐 수심이 1.1~22.4 m까지 지수적으로 서서히 증가하는 연안해역에서의 해저경사를

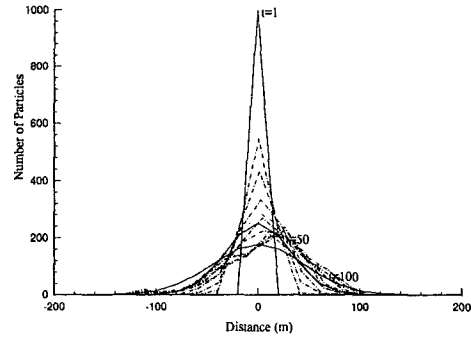


Fig. 3. Comparison of random-walk particles (1000) distribution with analytical solution in sloping channel. Solid lines show 1, 50 and 100 seconds after the first releasing of analytical particles, whereas dashdots show every 10 seconds of distribution for numerical results. $u=0$ m/s, $D=10$ m²/sec and $h=5 \exp(0.0003x)$ m, $-5000 \leq x(m) \leq 500$.

표현하도록 하였다. 그림 3에 표현된 실험결과는 수로 바닥이 수평이고 이송과 확산을 고려한 앞서의 실험에서와 같이 농도경사에 따라서 수치해와 정확해가 편향된 결과를 나타냄을 알 수 있다.

이들의 결과를 정량화하여 표현하면 무차원화한 입자(농도)의 변화인 $\nabla C \geq 0.005$ [L⁻¹]에서는 입자추적에 의한 결과가 정확해와 거의 일치되는 것으로 나타나 농도의 변화가 심한 이러한 영역에서는 입자추적방법을 적용하고, $\nabla C \leq 0.002$ [L⁻¹]에서는 다소 해석적해와 일치하지 않는 결과가 나타나므로 농도를 이용한 Eulerian-Lagrangian 방법을 이용하는 것이 효율적인 것으로 판단된다. 따라서 실제해석의 경우에는 입자를 오염원에서 방류한 후에 인근역에서 농도의 변화기울기를 판정한 후에 위의 어느 기준에 속하는지를 파악하여 적용할 수 있는 기준을 제시한다.

5. Eulerian-Lagrangian 농도모형과 결합

전술하였던 바와 같이 입자추적방법에 의해서만 전체의 오염 확산을 계산하는 것은 경제적인 면에서 불리하므로 공간적으로 고농도 변화가 있는 source의 근처에서 본 입자추적모형을 적용하고, 공간적으로 농도의 변화가 크지 않은 원역에서는 기존의 농도모형을 적용하여 해석하는 것이 바람직하다. 그러나 문제는 역학하 이러한 공간적인 영역을 구분하는 것이나 또한 입자추적에 의하여 계산된 다수의 입자들을 계산영

역위의 격자체계에 여하한 방법으로 농도로 변환하는
나가 관건이 된다.

대부분의 수치모형에서 계산된 결과는 개개 입자의
위치의 확인보다는 전반적으로 관심 있는 대상영역에
서의 농도의 변화를 파악하는 것이 중요하므로 본 연
구에서도 최종적인 계산의 결과는 농도로써 표현토록
한다.

5.1 Eulerian-Lagrangian 농도모형

2차원 직각좌표계에서 index notation을 이용하면 물
질수송방정식은 다음과 같이 기술된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = D_{ij} \frac{\partial^2 C}{\partial x_i \partial x_j} + kC \pm S \quad (17)$$

여기서, C는 부유사의 농도(M/L^3), t는 시간(T), x_i 는
좌표계, D_{ij} 는 $x=1, 2$ 방향의 확산계수 (L^2/T), u_i 는 x_i 방
향의 유속(L/T), k는 반응계수(T^{-1}), S는 오염원의 sink
혹은 source(M/L^3T) 이고, h는 수심(L) 이다.

이와 같은 기본식을 가지고 수심평균한 유한요소
Eulerian-Lagrangian 방법에 의해 확산예측을 한 것은 서
(1993a)에 상세히 기술되어 있어 본고에서는 생략한다.

5.2 고정격자로 입자 투영

확산해석에서 종국적으로는 오염원 발생 인근 지점
의 고농도 보다도 이것이 이송 확산되어 미치는 영향
의 정도인 원역에서의 농도에 관심이 집중되고 결과적
으로는 Eulerian-Lagrangian 농도모형에 의하여 전체적
인 계산을 수행하므로 초기의 입자추적에 의한 결과를
농도로 변환하는 과정이 필수적이다.

입자의 설정된 시간이 경과된 후 매 입자의 위치가
확인되며 특히 오염원 근처의 요소에서는 주의를 기울
인다. 본 연구에서는 유한요소의 가변격자체계를 이용
하고 매 입자가 동일한 질량으로 이루어졌다고 가정하
고 입자의 요소에서의 농도는 다음과 같이 산정하였다.

$$c_{el} = m \frac{P_{el}}{(A_{el} \bar{h}_{el})} \quad (18)$$

여기서 m은 계산에 이용된 총질량을 입자의 수로 나
눈 개개의 입자가 갖는 질량이며 P는 입자의 개수 A
는 유한요소의 면적 그리고 \bar{h} 는 요소내의 평균수심이
다. 위의 식으로 산정된 요소내의 농도는 다시 유한요

소모형화 과정에서 이용한 선형보간함수를 이용하여
절점에서의 값으로 치환된다.

입자추적에 의한 방법이 질량보존을 완벽하게 묘사
하지만 현실적으로는 위와 같이 농도로 변환할 때의
보간상의 오차가 발생할 소지가 있다. 즉, 입자의 요소
내에 균등하게 입자가 위치한 경우에는 이렇게 유한요
소모형화 할 때의 보간기법을 이용하더라도 만족스럽
지만 그렇지 않고 비균등하게 분포된 경우나 요소의
형상이 정삼각형을 이루지 않았을 경우 등은 보간시에
완벽하게 투영되지 못하는 점이 남아 있어 향후에 이
에 대한 보다 심도 있는 연구가 추진되어야 할 것이다.

Moeller(1993), Moeller 와 Adams(1993)는 1, 2차원
입자추적 문제에서 오염발생원 근처의 Gaussian
plume의 적정 크기를 결정짓는 연구를 수행하여
Gaussian 분포의 분산 σ 와의 함수로써 Gaussian 분포
농도곡선의 퍼짐 크기 H를 추적에 이용한 입자의 개
수 N과의 관계로써 다음과 같이 제안하였다. 물론 이
용된 입자의 수가 많아지면 많아질수록 전체적인 오차
는 감소하지만 수치적인 노력이 상대적으로 증가되는
데 오차해석에서는 200개에서 5000개의 입자로서 총
질량 1.0×10^5 Kg을 표현하였다.

$$\left(\frac{H}{\sigma} \right)_{opt} = 3.02N_p^{-0.188} \quad (19)$$

여기서 σ 는 $\sqrt{2Dt}$ 이고, $D_x=D_y=D$ 로 가정되었다. 그렇
지만 앞에서 살펴본 바와 같이 전체적인 입자의 개수
가 미치는 영향보다는 농도분포의 공간적인 변화가 더
욱 크게 영향을 미침을 알 수 있었으며 따라서 본 연구
에서는 상기식과 모형의 검증에서 얻은 결과인 $\nabla C \geq$
0.005의 값에 의하여 유한요소격자에 투영하는 범위를
가능하였다.

6. 시험적용

6.1 수동역학모의

본 연구에서 제안하는 Eulerian-Lagrangian 입자 및
농도 결합모형을 이용하여 실제에서의 오염확산을 모
의하고자 대상해역으로 현재 공사가 활발히 진행 중에
있는 군장국가공단 조성사업해역을 선정하여 부유사
확산으로 인한 연안수질예측에 적용한다.

금강하구는 새만금공사 및 항만시설공사 그리고 공

단조성사업등 다수의 공사가 활발히 진행중에 있어 이로 인한 조류흐름의 변화와 조석체계의 변화가 예상되어 다수의 연구자들이 이 해역에 대한 연구를 수행하여 수동역학의 변화를 평가한 결과들이 있다. 본 연구에서는 군산외항 인근에서 활발히 추진중에 있는 도류제 공사와 방조제 축조공사시에 발생하는 부유사의 확산을 효과적으로 모의하고자 본 연구에서 제안하는 Eulerian-Lagrangian 입자 및 농도추적모형을 이용하여 해석한다.

수동역학적인 해석은 확산의 해석에 필수적으로 이용되므로 확산과 함께 연계하여 이용할 수 있는 모델을 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 전회의 연구(서, 1994)에서 만족스럽게 새만금해역의 동수역학적인 변화를 해석할 수 있었던 2차원 조화유한요소 모델(TEANL)을 선정하였다. 기본방정식은 다음과 같으며, 상세한 모델의 수립과정은 전회의 연구에 상세히 수록되어 본고에서는 생략한다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = -\frac{\partial(u\eta)}{\partial x} - \frac{\partial(v\eta)}{\partial y} \quad (20)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - fv + \lambda u =$$

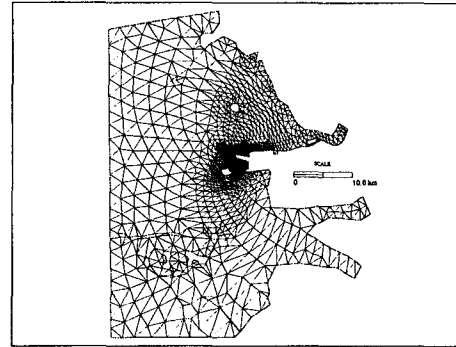
$$\left[\lambda - c_f \frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{h+\eta} \right] u - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (21)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + fu + \lambda v =$$

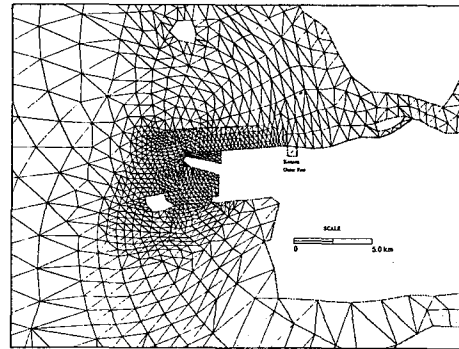
$$\left[\lambda - c_f \frac{\sqrt{(u^2+v^2)}}{h+\eta} \right] v - \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (22)$$

여기서 η 는 평균해면으로부터의 수면변위(L), h 는 평균해면에서 해저까지의 수심(L), u, v 는 x, y 방향의 유속성분(L/T), g 는 중력가속도(L/T²), f 는 Coriolis 인자(T⁻¹), c_f 는 해저마찰계수 그리고 η 는 선형화된 마찰인자이다.

외적인 강제조건을 외해경계에 부여되는 조석의 진폭으로 본 연구해역을 포함하는 연구의 결과(서, 1993b)에서 추출한 M2, S2 분조의 조위 및 위상각을 입력하였다. Fig. 4(a)에는 1995년 12월의 상황을 재현하기 위한 금강하구 도류제축조 사업구역을 포함하는 전체해역에 대한 유한요소 이산화망이 도시되고 있고 Fig. 4(b)에는 확대도시한 그림이 표현되었다. 연구대



(a)



(b)

Fig. 4. Finite element grids for (a) entire domain and (b) for interesting region.

상 해역의 조석형태수가 0.20으로써 반일주조가 우세하여 조석의 여러분조 중 대표적인 분조로 주태음반일주조와 주태양반일주조를 이용하였다.

대상해역에서 해저마찰에 영향을 미치는 조도계수는 0.0020~0.0025의 범위의 값을 사용하였다. 본 연구는 순수하게 조석의 영향에 따른 순환과 이로 인한 영향을 살펴보기 위하여 시도되었으므로 바람에 의한 순환은 연구에서 제외하였다.

모형실험은 공사의 영향정도를 파악하기 위하여 1995년 12월 당시의 상황을 설정하여 실험을 실시하였는데 이용된 유한요소수와 절점수는 각각 2311과 1356개이다.

6.2 Eulerian-Lagrangian 입자 및 농도모형 실험

모형의 검증에서 검토한 바와 같이 초기 방류된 고농도의 공간적인 변화가 급한 곳에서는 무작위행보에 의한 입자추적방법이 효과적으로 이용될 수 있고, 근역 이외에서는 농도를 이용한 예측방법이 보다 경제적

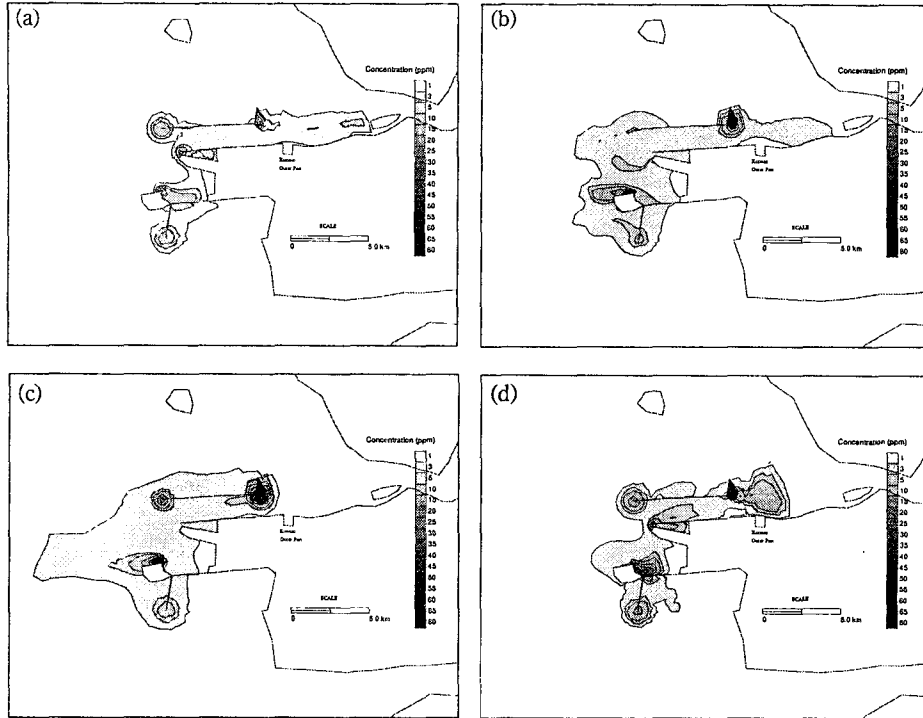


Fig. 5. Modelled suspended solid dispersion in ppm for (a) high (b) ebb (c) low (d) flood tides.

으로 정도 있게 예측할 수 있으므로 본 연구에서는 앞서의 Eulerian-Lagrangian 농도를 이용한 연구에서 행하였던 방법에 따라 입자추적과 농도를 고려한 방법에 의하여 예측하였다.

앞서 해석한 해수유동의 개방경계로 설정한 곳을 부유사확산 해석의 개방경계로 취했는데 이는 부유토사 방출지점으로부터 충분히 멀리 떨어진 지점으로써 이곳의 경계에서는 내부의 부유사확산이 영향을 받지 않는 농도(0 ppm)를 취하였고, 최초 계산시작 단계의 배경 농도도 역시 0으로 하였다. 확산에 영향을 미치는 평면적인 확산계수는 $10 \text{ m}^2/\text{sec}$ 을 취하였다.

본 수치실험은 초기의 연구로써 오염원을 가정하여 실시하였는데, 현재 공사가 진행중인 도류제와 방조제 인근에서의 부유사 발생원단위를 15000 g 으로 가정하였고, 공사시간은 주간에만 이루어진다는 가정 하에 하루에 10시간씩 발생원단위가 수치모형에 입력으로 이용되었다. 본 입자 및 농도결합모형에 의한 해석에서 부유사 발생원에서의 입자 방출수는 모형의 실험에서 검토한 결과 입자수에는 민감하게 반응하지는 않으나 총 5000개로 하였다. 본 부유사의 확산에 관한 수치실

험은 조류의 영향만을 고려하여 바람에 의한 영향은 무시하였으며 침강속도 등은 당 해역에서 조사된 성과로부터 발취하여 $1.0 \times 10^{-4} \text{ /day}$ 의 값을 이용하였다.

Eulerian-Lagrangian 농도 및 입자를 결합한 모형을 초기 적용한 결과를 그림으로 표현하여 이중 일부를 Fig. 5에 수록하였다. 조류운동에 따라 확산양상이 달라지며 공사가 실시되는 반경 2 km 이내에서 대체적으로 5 ppm의 부유사 확산증가가 유발되고 비응도 북측을 기점으로 축조중인 호안공사로 인하여 대부분의 확산은 비응도 우상의 매립예정지 내에서 분포됨을 알 수 있다. 창조시의 부유사 확산은 북측도류제의 시공 끝단인 유부도로부터 근산 내항의 인공섬까지 그 영향이 미미하게 미치는 것으로 보이고, 낙조시는 비응도 서측 약 5 km까지 1 ppm의 농도증가를 유발하는 것으로 예상되었다. 본 수치실험에서는 퇴적토사의 재부유 등이 고려되지 않았고 퇴적된 토사가 조류나 파랑에 의하여 이동되는 기작을 동시에 모의하지 않아 단지 경향만을 추론하게 한다. 향후의 연구에서는 이와 같은 복합적인 효과를 표현할 수 있는 모델을 개발하여 운용하는 것이 실제해역에서의 해수유동과 퇴적환경

의 변화를 이해하는데 도움이 될 것이다.

기존의 random walk에 관한 다수의 연구는 전 영역에서 전체의 계산을 입자추적방법을 적용하였기 때문에 오염원 발생 근처의 인근역 이외에서도 모든 입자에 대하여 모두 추적을 하고 농도로 변환하는 노력이 소요되었고 이들의 위치를 농도로 변환하는데 수반되는 오차를 소거하기 어려웠으나 본 연구에서 제한한 방법은 필요한 경우에만 입자를 이용하여 추적하고, 이를 농도로 변환한 이후에는 전체영역에 대해서 농도로써 계산하므로 계산상의 효율이 높아졌다.

7. 결 론

효율적으로 연안에서의 확산이송을 모의하기 위하여 연산자 분리기법에 의한 Eulerian-Lagrangian 농도 모형에서 오염원의 발생인근에서의 고농도 변화를 입자추적방법을 이용하여 해석한 본 연구에서 방류초기의 고농도를 다수의 입자들로 표현하여 random walk 모형화 방법으로 해석한 결과는 다음과 같다.

수립한 입자추적모형은 오염원 인근의 고농도 방류시 기존 확산모형에서 급작스런 공간적인 농도분포에 기인되어 나타났던 오차 없이 매우 만족스럽게 해석할 수 있는 수단으로 판단된다. 모형실험에서는 $\nabla C \geq 0$. 005에서 거의 정확해와 일치하는 결과를 얻었고, $\nabla C \leq 0.002$ 에서는 만족스럽지 못한 결과가 유도되어 입자추적모형의 적용한계의 기준으로 이용되었다. 따라서 실제 해역에서의 적용은 고농도의 오염원이 발생되는 근역에서는 입자추적모형을 적용하고 이후의 전역에 대해서는 농도모형을 이용하여 해석상의 능률을 제고할 수 있었다. 본 모형을 금강하구 군산항 도류제사업 공사시의 부유사 확산에 대하여 시험 적용하여 비선형의 2차원 조화유한요소모형으로 해수유동해석과 함께 일대 해역의 부유사확산 분포 경향을 Eulerian-Lagrangian 입자/농도를 결합하여 모의한 결과로는 만족스러운 결과가 유도되었다. 그러나 입자를 농도로 변환하는데 수반될 수 있는 오차의 저감이나 입자를 농도로 변환하는 적절한 시점의 결정 등에 대해 향후 지속적인 연구가 요구된다.

謝 辭

본 연구는 한국학술진흥재단의 94년 자유공모(02-

E-0098)과제 지원에 의하여 이루어 졌으며 이에 심심한 사의를 표한다.

참고문헌

- 김지원, 양운모, 권정곤, 1995. 수영만 해역의 오염물질 거동에 대한 수치평가모델의 개발, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 489-492.
- 이종섭, 김호진, 1995. Random Walk 모형에 의한 확산해의 민감도 분석, 대한토목학회논문집, 15(5): 1267-1277.
- 전경수, 이길성, 1992. 특성곡선을 고려한 이송확산 방정식의 유한차분법, 대한토목학회 학술발표회논문집, 81-84.
- 서승원, 1993(a). 2차원 Eulerian-Lagrangian 모형을 이용한 연안해역의 확산해석, 한국해양·해양공학회지, 5(3): 173-181.
- 서승원, 1993(b). 연안수동역학 모의를 위한 시간진행 및 조화유한요소모형 특성, 한국해양·해양공학회지, 5(4): 406-413.
- 서승원, 1994. 방조제 축조 영향해석에서의 유한요소모형, 한국해양·해양공학회지 6(2): 196-204.
- 서일원, 김대근, 1994. Eulerian-Lagrangian 방법을 이용한 1차원 종화산방정식의 수치모형, 한국수문학회지, 155-166.
- Dimou, K., 1989. Simulation of estuary mixing using a 2-dimensional random walk model, M.S. Thesis, MIT.
- Jozsa, J., 1989. 2-dimsnsional particle model for predicting depth-integrated pollutant and surface oil slick transport in rivers, in *Hydraulic and environmental modeling of coastal, estuarine and river water*, eds. Falconer, R.A. et al., Gower Tehcnical Co.
- Tompson, N.R., Sykes, J.F. and Lennox, W.C., 1984. A Lagrangian porous media mass transport model, *Water Resources Research*, 20(3): 391-399.
- Moeller, J.C., 1993. Comparison of Eulerian-Lagrangian, random walk, and hybrid methods of modeling pollution transport, M.S. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Mass. Institute of Technology.
- Moeller, J.C. and Adams, E.E., 1993. Comparison of Eulerian-Lagrangian, random walk and hybrid methods of modeling pollution transport, *Proc. 3rd Inter. Conf. on Estuarine and Coastal Modeling*, ASCE, Oak Brook, Illinois, 609-623.