

2차원 Eulerian-Lagrangian 모형을 이용한 연안해역의 확산해석 Coastal Dispersion Analysis Using Two-Dimensional Eulerian-Lagrangian Model

서 승 원*
Seung Won Suh*

要 旨 : 확산-이송 방정식 모델을 비교, 고찰하여 개선된 2차원 Eulerian-Lagrangian 방법에 의한 수치기법을 수립하였다. 실제해역에서 장기간 단속적으로 방류되는 방조제 공사시의 토사확산을 모의하기 위하여 Fourier 급수를 이용하여 source항을 표현하였다. 연구결과 본 Eulerian-Lagrangian 모형은 장기간의 연속적 및 단속적 연안해역의 확산을 매우 효율적으로 모의할 수 있었다.

Abstract □ An improved two-dimensional Eulerian-Lagrangian convection-dispersion model was established after comparing several models. To simulate long term release of discontinuous suspended solid source from coastal dike construction, source was represented by Fourier transformation. It was concluded that this model can effectively simulate long term coastal dispersion problems.

1. 서 론

최근 연안해역은 주변에 위치한 산업시설과 도시로부터 방류되는 오염물과 각종 연안공사시에 발생하는 토사방류 등으로 인하여 상당한 환경의 피해를 받고 있는데 이로 인한 연안오염을 적절하게 관리하기 위해서는 무엇보다도 먼저 오염물의 확산-이송 거동을 보다 정확히 아는 것이 선행되어야 한다. 그러나 수질관리모델의 기본방정식인 확산-이송방정식은 근본적으로 방정식내에 이송항인 쌍곡형 연산자(hyperbolic operator)와 확산항인 포물형연산자(parabolic operator)가 함께 존재하며, 이송항이 확산항에 비하여 order of magnitude가 최소한 1 이상이고, 실제로 서해안의 대부분 연안해역에서 조석운동에 기인되어 강한 조류가 남북방향으로 연안을 따라 흐르므로 연안해역에서는 확산보다 이송이 오염물의 수송을 전적으로 지배하는 경우가 많아 수치모델화에 난점이 발생한다.

본 연구의 궁극적인 목적은 확산-이송 방정식 모델을 비교 고찰하여, 개선된 Eulerian-Lagrangian 방법에 의한 수치기법을 수립하고, 실제해역에서 장기

간의 모의에 적절하도록 적용능력을 향상시키는데 있다. 특히 단속적으로 방류되는 방조제 공사시의 토사확산이나 연속적으로 방류되는 오염물을 장기간에 걸쳐 효과적으로 모의하는 것 또한 본 연구의 목적이다.

장기간의 연안오염 모의는 검증하고 있는 연안 공사시 발생하는 토사확산이나 연속방류되는 하천수로 인한 오염시에 필수적으로 이용되어야 하나, 아직까지 국내의 연구는 오염원이 발생되고 난후 단 시간 길게는 몇일 정도에 국한하여 예측하고 있다. 그렇지만 실제적으로는 연속 공사시 방류되는 지속적인 농도확산이 더욱 중요하므로 본 연구는 장기간의 연안오염예측에 주안점을 두고 해석한다. 장기적인 방조제 공사시 단속적으로 방류되는 토사확산의 오염원처리에 Fourier 급수를 이용하여 장기적인 확산의 오염원 처리 방안을 제시하였다.

본 Eulerian-Lagrangian 모델의 실제적용은 제한적인 여건하에서 초보 단계로 오염원의 연속 및 단속적 방류의 두가지 경우에 대해 적용하였다. 전자의 경우는 충청남도의 안면도 연안에서 확산을 hindcast 한 것이고 후자는 연안에 화력발전소가 건설예정인

*군산대학교 해양공학과 (Dept. of Ocean Engineering, Kunsan National University, 573-360, Kunsan, Korea)

경기도의 영흥도 일원에 실시하여 건설시 단속적으로 장기간에 걸쳐 발생하는 부유토사 확산을 forecast 하였다.

2. Eulerian-Lagrangian 확산모형

2.1 확산모형비교

확산은 시간과 위치의 변화에 따라 분자확산(10^{-9} m²/s), 난류확산(10^{-3} m²/s) 그리고 종확산(10^3 m²/s)으로 구분할 수 있다. 문제는 이처럼 각 확산 영향도는 크기단위가 크게 다를뿐 아니라 대부분의 해석에서는 이송이 확산보다 더욱 크게 영향을 미쳐 문제 해결에 어려움을 가중시키고 있다.

이와 같은 확산에 관한 해석으로 해석적 해에 의존하거나(Smith, 1989), 입자의 움직임이 random-walk하다는 가정하에 수립된 Monte-Carlo 방법(Dewey & Sullivan, 1982; Dimou, 1989) 그리고 물질 수송에 관한 지배방정식을 수치적으로 풀이하여 근사해를 구하는 방법등으로 나눌 수 있는데 후자에 관한 연구는 많이 있으며, 위의 분류중 가장 현실적으로 이용되고 있는 방법으로써 다음에 후술하는 바와 같이 구분 할 수 있다.

2.1.1 Eulerian 개념에 의한 수송모형

기존에 연구발표된 대부분의 모형들은 이 방법에 의한 것으로, 이의 장점은 고정좌표계의 편리함을 이용하는 것이다. 해석방법은 수치화에 따라 유한차분법과 유한요소법으로 구별되고 있다. 그러나 이 Eulerian 방법에서 공간적인 진동이 나타나는 것이 발견되었고(Roache, 1976), 이송이 확산에 비하여 지배적일 때 수치 확산이 발생하며, Courant 數 $Cr = u\Delta t/\Delta x$ 가 1일 때 인위적인 확산이 없어지나 실제 적용에서 $Cr=1$ 을 만족하기란 불가능하다.

2.1.2 Lagrangian 개념에 의한 수송모형

이 방법은 앞의 Eulerian 개념과는 달리 이동좌표계를 이용하므로써 쌍곡형 연산자가 소거되어 Cell Reynolds 수로 알려진 Peclet 수 $Pe = u\Delta x/D$ 가 큰 경우에도 Eulerian 개념모형과는 달리 wiggle이라는 진동이 나타나지 않는 안정된 해가 얻어질 수 있다.

Thomson 등(1984)은 유선을 따른 격자이동을 이용하여 해석하였으나 이동좌표계에 의존하므로 해석시 요소생성이 매우 중요하고 이에 따른 어려운 점이 발생된다고 논의하였다.

2.1.3 Eulerian-Lagrangian 혼합개념에 의한 수송모형

전술한 바와 같이 오염물의 확산-이송을 다루는 수송모형에서 Eulerian 개념에 의한 것은 고정좌표계를 이용하는 유리한 점이 있는 반면 수치적인 확산과 진동의 truncation 오차가 나타나고, Lagrangian 개념에 의하면 이러한 오차는 제거할 수 있으나 이동좌표계를 이용해야 하는 어려운 점이 발생한다. Eulerian-Lagrangian 혼합개념에 의한 수송모형은 두가지 접근방법의 장점만을 취하여 해석하기 위한 것이라고 할 수 있다.

근래에 국외에서는 Ahsan과 Bruno(1992)의 3차원적인 연구와 국내의 연구로는 일차원의 종확산에 관하여 유한차분법을 적용하여 검토한 연구(전·이, 1992)와 2차원의 유한요소모형을 이용하여 해석한 연구 등 (서, 1991, 1992)이 있다.

Eulerian-Lagrangian의 원리는 Baptista(1987)와 같이 수송방정식을 이송과 확산의 2단계로 분할하는 것이다. 해석편의상 1차원계에서 살펴보면 식 (1)로 표현되는 수송방정식에 C^* 라는 보조변수를 도입하고 이송과 확산의 두 부분으로 분할하면 식 (2)와 (3)과 같이 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + (kC \pm S) \quad (1)$$

$$\frac{C^* - C^{n-1}}{\Delta t} + \left(u \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{n-1} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{C^n - C^*}{\Delta t} = \left(D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right)_n + (kC \pm S)_n \quad (3)$$

여기서 C 는 농도(M/L³), u 는 단면평균유속(L/T), D 는 확산계수(L²/T), k 는 반응계수(T⁻¹) 그리고 S 는 생성 혹은 소멸항(M/L³)이다.

식 (2)에 의한 이송모형은 적절한 초기 및 경계조건을 가지고 특성곡선을 따라 후방추적하고 전시간 단계에서의 입자위치를 결정하여 공간적인 보간을 취하면 이점에서의 농도값을 알 수 있게 된다.

식 (3)으로 표현되는 확산방정식을 Holly와 Priessman(1977), Holly와 Usseglio-Polatera(1984)는 FDM을 이용하였고, Neuman(1981)이나 Cheng 등(1984)은 FEM을 이용하여 해석하였다. 확산모형에서의 시간적분으로 음해법이 이용된다면 적분시간간격에 구애

받지 않고 안정된 해를 구할 수 있다.

2.2 Eulerian-Lagrangian 혼합방법

Eulerian-Lagrangian 모형도 개념에 따라 세가지로 구분된다. 첫째는 concentration 개념이고 둘째는 particle 운동개념 그리고 세번째는 농도와 입자추적 운동을 동시에 고려한 방법으로 구분할 수 있다.

1) Eulerian-Lagrangian 농도예측방법 (Eulerian-Lagrangian/C)

이 방법은 전형적으로 수송방정식을 확산과 이송의 두 부분으로 나누고 이송부분은 point-to-point 추적 방법(후방특성곡선방법)으로 해석하고 확산부분은 전형적인 FDM이나 FEM을 이용하여 해석하는 것이다 (Baptista, 1987; Cheng 등, 1984).

2) Eulerian-Lagrangian random-walk 방법(Eulerian-Lagrangian/P)

무작위 운동의 입자추적에 의한 오염예측방법은 전술한 고전적인 방법중 Monte-Carlo 방법인 random-walk 개념에 입각한 것으로 근본적으로 대상영역내에 농도개념이 아닌 입자가 존재한다고 고려한 것이다.

이 방법은 수학적인 통계개념으로 출발하여 시도되었으나 개개 입자의 운동을 묘사하기 위해서는 막강한 computer를 필요로 한다. 따라서 근래에까지 보편적으로 이용되지는 못하였으나 이론적으로는 꾸준히 연구되고 있는 분야이다(Jozsa, 1989).

모델의 원리는 입자가 수동역학적 특성에 따라 자유롭게 이동되고, 그 위치 및 수가 예측되며, 이 자료는 다시 농도로 전환되어 편리하게 전 대상영역에서 농도를 해석할 수 있다. 관점에 따라서는 이 방법이 보다 자연적이고 물리적인 것처럼 인식될 수 있다. 그러나 단점은 질량보존을 만족하기 어렵다는 것이고, 중요한 것은 입자의 수가 너무 많을 때 tracking하는 과정에서 이들의 수와 위치를 conversion하는데 상당한 계산상의 노력이 요구된다는 것이다.

3) Eulerian-Lagrangian/C & P 결합방법 (Eulerian-Lagrangian/CP)

위의 두 방법의 장점을 채택하기 위하여 제안되나 아직까지 폭넓게 이용되고 있지 못하며 지속적인 연구가 기대되는 방법이다. Eulerian-Lagrangian/C에서 sharp concentration을 계산할 때를 제외하고는 만족스럽게 해석되므로 고농도가 방류되는 인근에서만

Eulerian-Lagrangian/P의 방법을 이용하고, 기타의 영역에서는 Eulerian-Lagrangian/C를 이용하는 결합 방법이 제안되나, 여전히 개개 particle의 위치를 node상으로 mapping하는데 어려움이 남는다.

2.3 2차원 Eulerian-Lagrangian (Eulerian-Lagrangian/C) 모형

2차원 직각좌표계에서 Index notation을 이용하여 물질수송방정식을 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i^* \frac{\partial C}{\partial x_i} = D_{ij} \frac{\partial^2 C}{\partial x_i \partial x_j} + kC \pm S \quad (4)$$

이때의 u_i^* 는 결보기 유속으로서 다음과 같이 표현된다(Baptista *et al.*, 1984).

$$u_i^* = u_i - \frac{1}{h} \frac{\partial(hD_{ij})}{\partial x_j} \quad (5)$$

여기서, C 는 부유사의 농도 (M/L^3), t 는 시간(T), x_i 는 좌표계, D_{ij} 는 $x=1, 2$ 방향의 확산계수(L^2/T), u_i 는 i 방향의 유속(L/T), k 는 반응계수(T^{-1}), S 는 오염원의 sink 혹은 source(M/L^3T)이고, h 는 수심(L)이다.

2.3.1 이송과 확산항 분리

지배방정식인 식 (4)는 쌍곡형과 포물형 연산자를 포함하고 있어 수치적인 풀이가 어려우므로 다음과 같이 C^f 라는 보조 변수를 도입하고 이송항과 확산항으로 분리하여 정리하면 아래의 식과 같이 분할된다.

$$\frac{C^f - C^{n-1}}{\Delta t} + \left(u_i^* \frac{\partial C}{\partial x_i} \right)_{n-1} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{C^n - C^f}{\Delta t} = \left(D_{ij} \frac{\partial^2 C}{\partial x_i \partial x_j} \right)_n + (kC \pm S)_n \quad (7)$$

여기서 Δt 는 적분시간 간격, $n, n-1$ 은 시간단계로 n 이 $n-1$ 보다 Δt 의 지체를 나타낸다. Eulerian-Lagrangian 모형에서 계산은 독립적으로 수행되어 이송방정식이 먼저 계산되고 난 후에 확산방정식이 계산된다.

2.3.2 이송방정식해석

이송방정식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{DC}{Dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u_i^* \frac{\partial C}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

이 식은 농도 C 가 다음의 특성곡선 혹은 궤적에서 항상 일정함을 의미한다.

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i^*(x, y, t) \tag{9}$$

따라서 시간단계 n , 절점 j 의 위치를 $P \equiv (x_j, y_j)$ 라 하면 이점은 시간단계 $n-1$ 에서 ($P', n-1$)이었고, 특성곡선을 따른 후방추적을 통하여 P' 가 결정된다. 이로부터 $C(P', n-1)$ 는 시간대 $n-1$ 에서의 공간적인 보간을 통하여 결정된다. 본 연구에서는 공간적인 보간으로 Galerkin의 가중잔차 유한요소 방법을 이용하였다.

이송모형은 기존의 Eulerian 모형에서 매 시간적 분점에서 이송항을 계산하는 것과는 달리 주기적인 조석흐름의 경우에 이송항이 한번만 계산되어진 후 이 특성곡선을 따른 추적의 자취가 저장되어 계속되는 확산모형에 이용되므로 주기성이 있는 장기간의 연안 오염 모의에는 매우 효과적이다.

2.3.3 확산방정식해석

위의 식 (7)로 표현된 확산방정식에 포함된 미지의 농도 C 는 다음과 같은 근사해가 도입되어 전형적인 유한요소법에 의거 개개의 유한요소 절점에서 구해진다.

$$C(x, y, t) \equiv \hat{C}(x, y, t) = \bar{C}(x, y, t) + \sum_{j=1}^N \alpha_j(t) \cdot \phi_j(x, y) \tag{10}$$

여기서 \bar{C} 는 필수경계조건으로서 경계역의 밖에서는 0, 경계에서는 기지의 값을 갖는다. α_j 는 절점 j 에서의 미지치, ϕ 는 보간함수이며, N 은 유한요소의 총절점수이다.

근사해 C 를 확산방정식 (7)에 대입하고 Galerkin의 가중잔차 유한요소법을 적용한다. 가중함수로서 보간함수인 ϕ 를 취하여 유한요소영역에 관하여 적분하였을 때 생성되는 오차를 최소화시킨다. 이와같은 일련의 과정을 거쳐 수립된 전체영역에 관하여 조합된 유한요소식은 다음의 행렬식으로 표현된다.

$$M\dot{\underline{\alpha}} + (B + A)\underline{\alpha} = \underline{p} \tag{11}$$

여기서 M 은 질량행렬, B 는 확산행렬, A 는 반응이 고려된 행렬 그리고 \underline{p} 는 생성 혹은 소멸과 경계조건이 고려된 열벡터로 각각의 유한요소내에서는 다음과 같다. $\underline{\alpha}$ 는 유한요소 절점에서의 미지의 농도를 표현

하는 열벡터이다.

$$M = \iint \phi_m \phi_n dA \tag{12}$$

$$A = \iint D_{ij} \frac{\partial \phi_m}{\partial x_i} \frac{\partial \phi_n}{\partial x_j} dA \tag{13}$$

$$B = \iint \phi_m \phi_n dA \tag{14}$$

$$\underline{p} = \iint \phi_m S dA - \int \phi_m q dT \tag{15}$$

여기에서 m, n 은 유한요소의 절점을 의미한다.

윗 식에는 1계미분인 $\dot{\alpha}$ 이 포함되어 있으므로, 공간연속성은 보간함수가 최소한 1계 미분가능한 부분 연속이면 만족한다. 그러므로 매 유한요소에서 보간함수는 최소한 선형이면 되나 실제적으로는 너무나 과도한 수치확산과 damping이 보고되는 경우도 있으므로 본 연구에서는 2차 보간함수를 이용하였다.

시간에 관한 이산화는 후방 Euler 음해법을 이용하므로써 적분시간 간격에 구애받지 않고 무조건적으로 안정적인 결과가 얻어지도록 하였다.

2.4 수동역학해석

본 연구에서는 전술한 Eulerian-Lagrangian/C 모델의 입력자료로 활용하기 위하여 Westerink 등(1984, 1988)이 제안한 조화유한요소 방법을 이용하였다. 이 모델은 2차원의 수심평균화된 연속식과 운동량식을 기본식으로 하고 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [u(h + \eta)]}{\partial x} + \frac{\partial [v(h + \eta)]}{\partial y} = 0 \tag{16}$$

여기서

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - f v + c_f \frac{\sqrt{(u^2 + v^2)}}{h + \eta} u - \frac{\tau_x^b}{\rho h} + \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = 0 \tag{17}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + f u + c_f \frac{\sqrt{(u^2 + v^2)}}{h + \eta} v - \frac{\tau_y^b}{\rho h} + \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \tag{18}$$

여기서 η 는 평균해면으로부터의 수면변위(L), h 는 수면에서 해저까지의 수심(L), u, v 는 $x=1, 2$ 방향의 유속성분(L/T), g 는 중력가속도(L/T²), f 는 Coriolis

계수(Γ^{-1}), c_n 는 해저마찰계수, τ 는 수표면 마찰응력 (M/LT^2) 그리고 ρ 는 밀도(M/L^3)이다.

개방경계로는 해수면 변위가 정의되는 식 (19)의 Φ_n 와 유출입이 정의되는 식 (20)의 Γ_Q 로 나눌 수 있고, Galerkin의 방법에 따라 윗 식에 가중함수 $\delta\eta$, δu , δv 를 곱하고 유한요소 영역에 관하여 적용하면 아래의 식 (21), (22), (23)을 얻을 수 있다.

$$\eta(x, y, t) = \eta^*(x, y, t) \quad \text{on } \Gamma_n \quad (19)$$

$$Q(x, y, t) = Q^*(x, y, t) \quad \text{on } \Gamma_Q \quad (20)$$

$$\iint_{\Omega} \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [u(h+\eta)]}{\partial x} + \frac{\partial [v(h+\eta)]}{\partial y} \right\} \delta \eta d\Omega + \int_{\Gamma_Q} (Q_n + Q_n^*) \delta \eta d\Gamma = 0 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \left(h \frac{\partial u}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - fhu + \lambda u \right) \delta \eta d\Omega \\ & = \iint_{\Omega} \left(\lambda u - c_f \frac{h}{h+\eta} \sqrt{(u^2+v^2)} u \right. \\ & \quad \left. - h \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right) \delta u d\Omega \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \left(h \frac{\partial v}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - fhu + \lambda v \right) \delta v d\Omega \\ & = \iint_{\Omega} \left(\lambda v - c_f \frac{h}{h+\eta} \sqrt{(u^2+v^2)} v \right. \\ & \quad \left. - h \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) \delta v d\Omega \quad (23) \end{aligned}$$

상기식을 전영역에 관하여 조합하면 다음의 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\underline{M}_n \dot{\underline{\eta}} - \underline{D} \underline{U} = \underline{F}_n^{in} + \underline{F}_n^{nl} \quad (24)$$

$$\underline{M}_c \dot{\underline{U}} + \underline{M}_f \underline{U} + \underline{M}_c \underline{U} + g \underline{D}^T \underline{\eta} = \underline{P}_{\Delta}^{nl}{}_{mc} + \underline{F}_{conv}^{nl} \quad (25)$$

그러나 상기 식에는 아직까지 시간의존 변수인 $\dot{\underline{\eta}}$ 와 $\dot{\underline{U}}$ 가 있어 이들 시간 의존 변수를 식 (26)과 같이 조화급수로 간주하여 대입하고 정리하면 최종적으로 식 (27), (28)과 같은 조화유한요소 모델을 얻을 수 있다(Westerink 등, 1988).

$$\underline{A}(t) = \left(\sum_{j=1}^{N_t} \hat{A}_j e^{i\omega_j t} \right) \quad (26)$$

$$i\omega_j \underline{M}_n \hat{\underline{\eta}}_j - \underline{D} \hat{\underline{U}}_j = \hat{\underline{F}}_n^{in} + \hat{\underline{F}}_n^{nl} \quad (27)$$

$$i\omega_j \underline{M}_c \hat{\underline{U}}_j + \underline{M}_f \hat{\underline{U}}_j + \underline{M}_c \hat{\underline{U}}_j + g \underline{D}^T \hat{\underline{\eta}}_j = \hat{\underline{P}}_{\Delta}^{nl}{}_{mc} + \hat{\underline{F}}_{conv}^{nl} \quad (28)$$

여기서 $i = \sqrt{-1}$ 이고, ω_j 는 조석의 j 번째 분조의 각속도를 의미한다. 기타의 행렬은 기본방정식으로부터 유도된 것으로 본 논문은 확산에 관하여 보다 비중있게 다루고 있으므로 이에 관해서는 Westerink 등 (1988)의 연구결과를 참조하기 바란다.

일반적으로 연안수동역학 해석에 대한 유한요소법도 양해법과 음해법으로 대별되는 시간진행법이 현재까지 광범위하게 이용되고 있으나 경제적인 면에서 조화모형에 비하여 만족스럽지 못한 것으로 간주된다. Kawahara 등(1978)은 특히 조류운동이 주기적임에 착안한 연구결과를 발표하였고, Westerink 등(1988)도 최소자승 조화해석방법에 근거하여 조류운동을 해석하였다. 이 방법의 장점은 시간진행방법에 비하여 지배방정식에 포함된 시간미분항이 자연스럽게 소멸되어 계산의 효율이 증대되고, 더우기 조화기법을 응용하므로써 실제에 부합되는 결과를 제공할 수 있다는 것이다.

3. 모델적용

3.1 장기예측의 필요성

대부분 연안에서의 공사는 짧게는 수개월에서 길게는 수년 혹은 10여년 이상씩 계속 진행되는 대단위 토목공사로써 공사시 투입되는 사석재 및 성토재가 장기적인 부유사 발생원으로 주변해역에 영향을 끼친다. 선진외국에서 활성적으로 실용되고 있는 연안 도시 하수처리를 위한 ocean outfall을 통한 장기적인 오수처리 역시 주변 생태계에 악 영향을 끼친다. 그러나 컴퓨터 자원 및 경제적인 제약으로 인하여 실제로는 극히 짧은 기간동안의 예측결과가 연안오염의 해석 및 관리의 방편으로 이용된다. 문제는 단기간의 예측 결과가 실제적인 결과를 제공하지 못한다는 점이며, 장기간을 평가하는데는 거의 현실성이 없다는 점이다.

수개월 혹은 수년씩 계속되는 장기간의 오염물 방류를 효과적으로 관리하고 그 저감방안을 모색하기 위해서는 역시 장기간의 오염확산 예측이 뒤따라야 한다. 그렇지만 기존의 시간적분에 의존하는 모델로는 장기간 예측이 극히 어려운 점을 감안하면 확산 모델이 적분시간에 크게 영향을 받지 않고 특히 주기

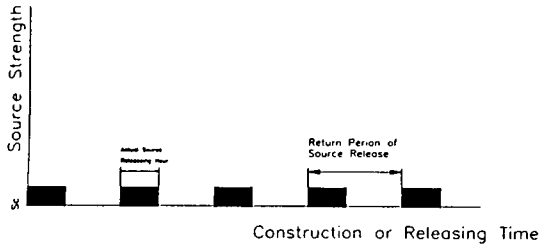


Fig. 1. Periodic discontinuous source from coastal construction. It has return period of $T=1$ day and actual releasing hours (h_r). It was assumed that $h_r \leq T/2$. S_c is source strength. This step function was represented as Fourier series.

적인 흐름에는 Eulerian-Lagrangian/C 모델이 장기간의 경제적인 그리고 안정적인 해석수단으로 이용되는 것이 기대된다.

3.2 장기간 발생하는 단속적 오염원의 처리

먼저 장기간에 걸쳐 지속적으로 발생하는 오염원을 수치모델의 매 적분시간에 처리하면 문제없이 해결된다. 그러나 방조제 축조시 공정에 따라 축조되는 단속적인(discontinuous) 부유사 발생원을 모델에 입력으로 표현하는 것과 ocean outfall에서 조류가 외해로 향하는 특정시간에만 운용해야 할 때의 오염발생원의 처리는 기존의 Eulerian 시간적분법은 물론이고 Eulerian-Lagrangian/C 해석에서조차도 수행되지 못하고 향후의 연구과제로 남겨졌었다(Lee, 1990).

그러나 실제적인 현안은 효과적으로 이와 같은 장기적인 discontinuous source를 고려하는 것이므로 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 오염물이 discontinuous step function으로 발생한다고 가정하였다(서, 1992).

오염물이 균일한 농도로 일정 재현기간(T)을 지나며 특정시간 동안(h_r) 방류된다면, 오염원을 나타내는 $S(t)$ 함수는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$S(t) = S_c \quad (0 \leq t \leq h_r) \tag{29}$$

$$S(t) = 0 \quad (h_r \leq t \leq T), \quad S(t+T) = S(t) \tag{30}$$

본 연구에서는 공사의 작업시간이 $h_r \leq T/2$ 인 관계가 있다고 가정하였다. 이유는 방조제 공사시의 dumping이 주간에 이루어지고, outfall에서의 방류도 최소한 ebb tide내에서 이루어지기 때문이다.

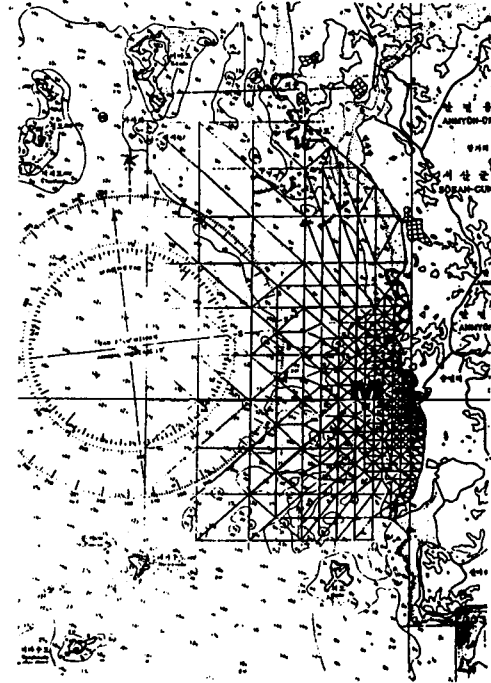


Fig. 2. Map showing study area for continuous source simulation, which is the western coastal part of Anmyun Island, Chungnam with overlapped finite element grids. This linear grid system is for hydrodynamic analysis and quadratic grid for dispersion analysis. It consists 1231 nodes and 582 elements. It was assumed that continuous source was located at the horizontally rightest of point M.

따라서 위의 오염방류함수는 다음과 같이 Fourier 급수로 표현할 수 있다.

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \cos \omega t + b_n \sin \omega t\} \tag{31}$$

여기서, a_0, a_n, b_n 은 Fourier 급수의 계수를 나타낸다. 본 연구에서는 $n=20$ 까지의 부분합으로 표현하였다.

3.3 연속적인 부유물 확산해석

연안에서 발생된 부유물이 장기적으로 방류될 때의 영향을 모의하기 위하여, 대상해역으로 Fig. 2와 같이 충청남도 안면도 연안을 택하여 해석하였다. 조류해석에는 그림과 같이 325개의 절점과 582개의 선형 유한요소로 분할하였고, 확산해석에서는 1231개의 절점과 582개의 요소로 분할하였다(서, 1991).

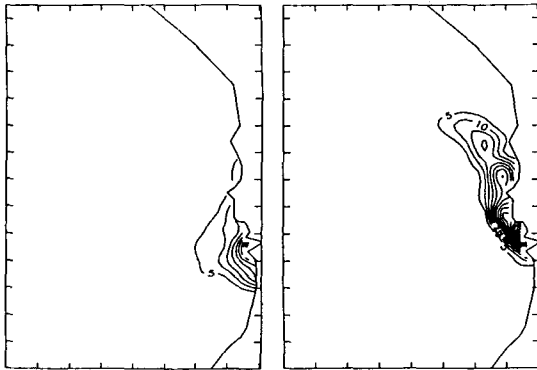


Fig. 3. Simulated relative concentrations in percent (a) at ebb tide, (b) at flood tide, during the first tidal cycle of computation from high water slack of spring tide.

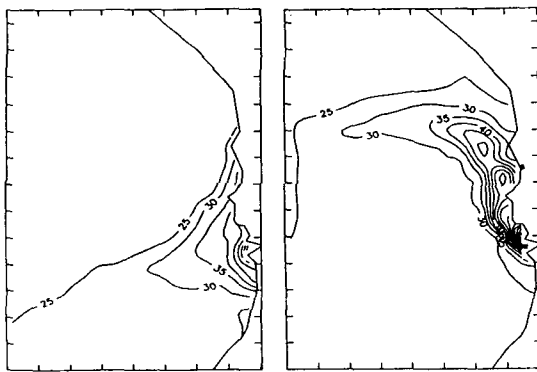


Fig. 4. Simulated relative concentrations in percent (a) at ebb tide, (b) at flood tide, during the last tidal cycle of one month computation from high water slack of spring tide.

확산의 수치실험에서 부유물은 보존성이라고 가정하여 반응계수를 고려하지 않았고, 침강도 고려하지 않았다. 본 연구에서 대상으로 선택한 해역에 적용한 조석의 분조는 반일주조로 M_2 와 S_2 조이다. 이 경우에 Fig. 2의 방류점에서 부유물이 대조의 고조를 기준으로 1개월간 연속 방류될 때, 특정적으로 초기의 확산과 1개월 후의 창낙조시 확산농도 분포를 Fig. 3(a), (b) 및 Fig. 4(a), (b)에 초기발생농도 대비율로 도시하였다. 확산계수는 주변해역의 수동역학적 특성을 고려하여 $12 \text{ m}^2/\text{sec}$ 의 값을 이용하였고 적분시간 간격은 1.5 태음시로 하였다. 개방경계조건으로는 $\partial C/\partial n = 0$ 을 취하였다.

실험결과에서 알 수 있듯이 방류초기 수시간 내에는

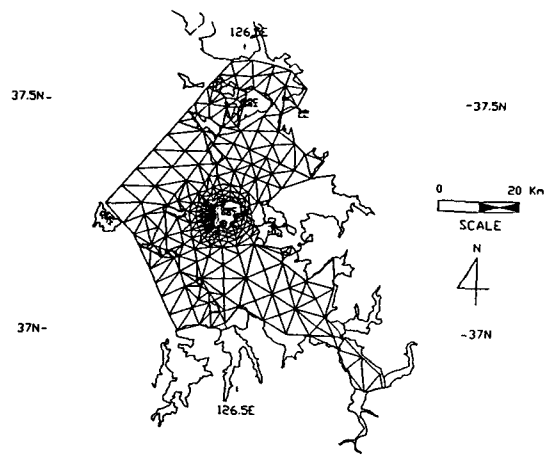


Fig. 5. Finite element mesh around Yeongheung Island for simulation of discontinuous suspended solids from dike construction of southern part of it. Study area was discretized as 1631 quadratic nodes and 727 elements.

5% 내외의 미미한 영향만 나타나다 1개월 후에는 최소 25% 이상의 영향이 주변해역에 미치고 있음을 알 수 있고 장기간의 모의가 중요한 것으로 사료된다.

3.4 단속적인 부유물 확산해석

단속적인 부유물에 관한 수치해석의 대상해역으로 Fig. 5에 보이는 경기도의 영흥도를 선정하여 남단에서의 제방축조 공사로 인한 영향을 예측하였다.

방조제 축조시 발생하는 부유물은 시공방법, 성토 재료 성분 그리고 체질시의 조류 특성에 따른 복합적인 영향을 받으며, 특히 부유물은 성토재중 세립질 입자와 퇴적물의 세굴등에 기인된다고 할 수 있다.

본 논문에서는 일일 약 4500 m^3 의 성토재가 전술한 3.2에서와 같이 하루 10시간씩 단속적으로 작업시간에 따라 투입된다는 계획하에 수치실험을 실시하였다. 침강계수는 입도 및 비중에 따라 달라지나 $2.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 의 대표적인 값으로 취하였고, 재부상등은 고려하지 않았다. 앞의 경우와 같이 대상해역에 적용한 조석의 분조는 반일주조로 M_2 와 S_2 조이다. 확산계수는 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 의 값을 이용하였다.

부유물 확산 영향을 살펴보기 위하여, 727개의 요소와 1631개의 절점으로 구성되는 유한요소 격자체계에서 먼저 제 1회 사장의 남측양단에서 방조제가 추진되는 경우를 설정하였다. 모델 적용시의 적분시간

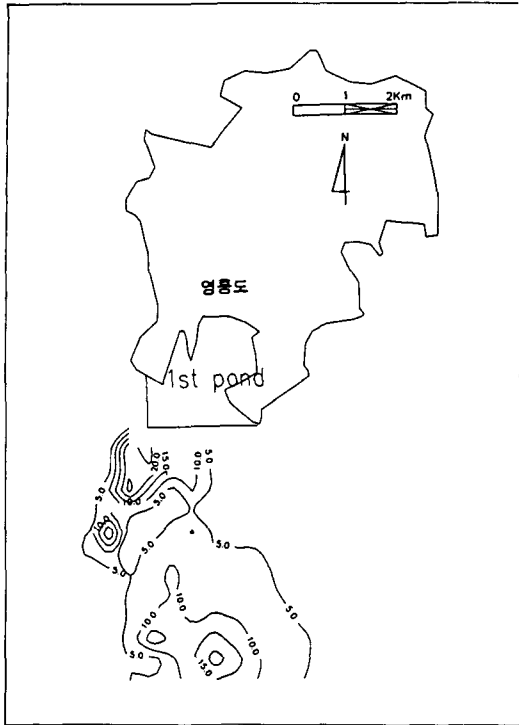


Fig. 6. Simulated suspended solid concentration in ppm at ebb tide after 3 months simulation.

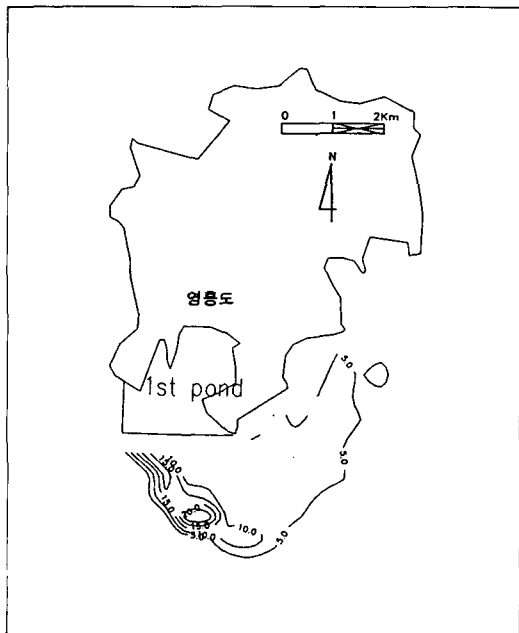


Fig. 7. Simulated suspended solid concentration in ppm at flood tide after 3 months simulation.

간격은 $T/8$ 로 하였다. 확산계수는 *drogue* 측정 실험에서 제시된 값의 범위중 $10 \text{ m}^2/\text{sec}$ 를 취하였다. 수치실험은 대조의 창조시부터 방류되기 시작하는 부유사의 확산분포를 3개월간 연속 모의하여, 특정적으로 대조시의 창조와 낙조시의 농도분포를 Fig. 6(a), (b) 및 Fig. 7(a), (b)에 도시하였다.

본 경우 역시 단속적으로 장기간에 걸쳐 방류되는 영향으로 단기간의 예측보다는 연안에서의 부유사 확산이 창조시는 대개 인근 2 km 내의 영역에 10~15 ppm 정도의 분포를 이루는 것으로 나타났다. 낙조시는 확산영역이 더욱 남측으로 진행되어 4 km 해역까지 10~15 ppm의 농도분포양상을 나타내는 것으로 예측되었다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 2차원의 Eulerian-Lagrangian 유한요소 모형이 기존의 Eulerian 모형에 비하여 장기간의 연속모의가 용이하고, 특히 단속적으로 지속되는 오염원의 처리에 매우 효율적이었음을 알 수 있었다. 현재의 연구는 제한된 여건하에서 오염원의 방류를 수개월로 국한하여 실시하였으나, 그 이상의 수년간에 걸친 연속모의도 수월하여 본 모형을 이용함으로써 오염물의 장기적인 확산 뿐만 아니라 연안의 퇴적환경의 변화 등도 예측가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 1991년도 교육부 학술연구진흥재단의 지방대학육성 연구비 조성의 지원에 의하여 수행되었기에 재단에 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

- 서승원, 1991. Eulerian-Lagrangian 모형에 의한 장기간의 연안오염모의, 대한토목학회 학술발표회 논문집: 734-737.
- 서승원, 1992. Eulerian-Lagrangian 방법을 이용한 연안에서의 확산-이송 해석, 학술진흥재단 최종보고서: p. 60.
- 전경수, 이길성, 1992. 특성곡선을 고려한 이송확산 방정식의 유한차분법, 대한토목학회 학술발표회 논문집: 81-84.
- Ahsan, Q. and Bruno, M.G., 1992. Three-dimensional Eulerian-Lagrangian transport model, *Estuarine and coa-*

- stal modeling. *Proceeding of 2nd conference. ASCE*: 1-12.
- Baptista, A.E., Adams, E.E. and Stolzenbach, K.D., 1984. Eulerian-Lagrangian analysis of pollutant transport in shallow water, R296, Ralph M. Parsons Lab., MIT.
- Baptista, A.E., 1987. Solution of advection-dominated transport by Eulerian Lagrangian methods using the backwards method of characteristics, Ph.D. thesis, MIT.
- Cheng, R.T., Casulli, V. and Milford, S.N., 1984. Eulerian-Lagrangian solution of the convection-dispersion equation in natural coordinates. *Water Resources Research*, **20**(7): 944-952.
- Dewey, R.J. and Sullivan, P.J., 1980. Longitudinal dispersion calculation in laminar flows by statistical analysis of molecular motions, *J. of Fluid Mechanics*, **125**: 203-218.
- Dimou, K., 1989. Simulation of estuary mixing using a 2-dimensional random walk model. M.Sc. Thesis, MIT.
- Holly, F.M. and Preissman, A., 1977. Accurate calculation of transport in two dimensions. *J. Hydraulic Engineering ASCE*, **103**(11): 1259-1277.
- Holly, F.M. and Usseglio-Polatera, J., 1984. Dispersion simulation in two-dimensional tidal flow, *J. of Hydraulic Engineering ASCE*, **110**(7): 905-926.
- Jozsa, J., 1989. 2-Dimensional 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 Technical Co.
- Kawahara, M. and Hasegawa, K., 1978. Periodic Galerkin finite element method of tidal flow, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, **12**: 853-871.
- Lee, J.J., 1990. Contaminated sediment transport in Boston Harbor, M.Sc. Thesis, MIT.
- Neuman, S.P., 1981. A Eulerian-Lagrangian numerical scheme for the dispersion convection equation using conjugate space-time grids, *J. of Computational Physics*, **41**: 270-294.
- Roache, P.J., 1976. *Computational fluid dynamics*, Hermosa Publishers.
- Smith, R.W., 1989. Review of recent developments in mixing and dispersion, in *Hydraulic and environmental modeling of coastal, estuarine and river waters*, eds Falconer, R.A. et al., Gower Technical Co.
- Thomson, N.R., Sykes, J.F. and Lennox, W.C., 1984. A Lagrangian porous media mass transport model, *Water Resources Research*, **20**(3): 391-399.
- Westerink, J.J. et al., 1984. TEA: A linear frequency domain finite element model for tidal embayment analysis, MIT, Energy Laboratory No. MIT-EL 84-012.
- Westerink, J.J. et al., 1988. A frequency-time domain finite element model for tidal circulation based on the least-squares harmonic analysis method, *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, **8**(7) : 813-843.