

# 입자추적법을 이용한 해양방류구 모델링

정 연 철\*

\*한국해양대학교 운항시스템공학부 교수

## Ocean Outfall Modelling with the Particle Tracking Method

Yun-Chul Jung\*

\*Division of Ship Operating Systems Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

**요 약** : 오염물질 확산모델링시 기존의 유한차분모델의 단점을 보완하기 위해 입자추적법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 Princeton Ocean Model에 결합하여 사용할 수 있는 3차원 입자추적모델을 개발하였으며 이를 다양한 수치실험을 통해 검증하였다. 또한 미국 플로리다주 탬파만의 해양방류구 모델링에 적용함으로써 모델의 유용성을 확인하였다. 예상대로 입자추적모델은 기존의 유한차분모델에 비해 적은 확산범위를 나타내었으며, 이는 기존의 유한차분모델이 안고 있는 수치확산에 따른 오차로 추정된다. 새로이 개발된 모델은 다양한 해양확산모델링에 유용하게 응용될 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 입자추적법, 수치확산, 해양방류구, 시그마격자, 포커플랑크방정식

**Abstract** : To overcome the weaknesses of conventional finite difference model in pollutant dispersion modelling, the particle tracking method is used. In this study, a three dimensional particle tracking model which can be used in Princeton Ocean Model was developed and verified through the various numerical tests. Usability of the model was also confirmed through the ocean outfall modelling in Tampa Bay, Florida. As it is expected, random walk model showed the less dispersion in a range compared to the conventional finite difference model and its reason is estimated due to an error from numerical diffusion which the conventional model holds. This newly developed model is expected to be used in various ocean dispersion modelling.

**Key words** : particle tracking method, numerical diffusion, ocean outfall, sigma grid, Fokker-Planck equation

## 1. 서 론

연안해역은 두 가지 관점에서 중요하게 이용되고 있다. 하나는 위락시설로서의 이용가치이고, 또 하나는 육상으로부터 방류된 오염물질의 수용 및 처리장소로서의 이용가치이다. 해양으로 유입되는 육상기원 오염물질은 해당 해역의 자정(self purification) 또는 희석 능력을 초과하여 배출되었을 때 오염은 축적되고 그 결과 여러 가지 환경문제가 야기된다. 육상에서 발생하는 각종 오염물질 가령, 원자력발전소의 냉각수(cooling water), 하수처리장의 방류수 등을 처리할 때 해양방류구(ocean outfall)를 통한 해양으로의 직접배출 방법이 자주 이용되고 있는데, 이 경우 컴퓨터 모델링을 통한 오염물질의 확산예측을 통해 적절한 방류구의 위치 및 방류 수량을 결정하는 것이 필수적이다.

해양에 방류된 오염물질의 확산과정은 편미분 방정식인 이류·확산 방정식의 지배를 받는다. 이 지배방정식의 수치해는 크게 두가지 방법으로 얻어지는데, 하나는 유한차분법(finite difference method)이나 유한요소법(finite element method)과 같은 농도개념에 기초한 재래적인 수치해법이고, 다른 하나는 오염물질을 여러 작은 입자들의 덩어리로 보고 개별입자의 운

직임을 추적함으로써 전체 오염물질의 이류·확산 과정을 모델링하는 입자추적법(particle tracking method)이다. 후자는 전자에 비해 비교적 최근에 해양에서의 물질확산 과정의 모델링에 응용되고 있는데 다음과 같은 특징을 지닌다(Hunter, 1987; Dimou and Adams, 1993).

첫째, 재래식 수치해법의 경우 지배방정식중 이류항(advection term)의 처리에 어려움이 많지만 입자추적법의 경우 고정도의 처리가 가능하다.

둘째, 재래식 수치해법의 경우 오염원의 처리가 격자단위의 농도로써 지정된다. 따라서 소위 수치확산(numerical diffusion)에 따른 오차의 발생이 필연적인데 비해 입자추적법은 이러한 오차가 없다.

셋째, 입자추적법의 경우 계산부하는 입자의 수에 비례하고 입자가 놓여있는 영역에 집중되는데 비해, 재래식 수치해법은 계산부하가 전 영역에 고루 분산된다. 따라서 해양방류구 모델링과 같은 오염원 주변의 이류, 확산 과정을 모델링하는 경우 입자추적법이 더 경제적이다.

넷째, 입자추적법에 있어서 개별입자 추적개념은 해양에서의 다양한 확산과정을 모델링하는데 있어서 편리하다. 예컨대 입자의 개별 확산특성(생물체의 변이에 따른 다양한 반응동적 거동, 다양한 크기를 가진 입자의 침전 등)을 부여할 수 있으므로 재래식 수치해법에서 다룰 수 없는 다양한 모델링 기법의 도입

\* 정희원, jung515@hanara.kmaritime.ac.kr, 051)410-4286

이 가능하다.

해수유동 및 물질확산과 같은 해양에서의 물리적 제 과정을 모델링하는 도구로서 컴퓨터모델의 이용은 이미 오래 전부터 보편화되었으며 현재 세계적으로 다양한 모델이 개발되어 응용되고 있다. Princeton Ocean Model(이하 POM 모델)은 그 중의 하나로 Princeton University의 Jeorge Mellor 교수가 1970년대 말 처음 개발한 3차원 해수유동모델로 현재 세계적으로 널리 이용되고 있으며 강 하구, 연안해역은 물론이고 대양에도 적용이 가능한 범용모델이다(Blumberg and Mellor, 1987).

따라서 본 연구에서는 POM 모델과 결합하여 운용할 수 있는 3차원 입자추적모델(particle tracking model)을 개발하고 이를 검증한 후 실 해역의 해양방류구 모델링에 적용하고자 한다.

## 2. 모델의 개요

### 2.1 POM 모델

POM 모델은 Princeton University의 Jeorge Mellor 교수에 의해 1970년대 말 처음 개발되어 여러 차례 수정, 보완되었으며 강 하구, 연안해역은 물론이고 대양에도 적용이 가능한 범용모델이다. 모델은 3차원이며 지배방정식의 수치해법으로서 해양 모델에 가장 널리 이용되고 있는 유한차분법(finite difference method)을 채택하고 있다. 유한차분 격자체계는 Arakawa-C 방식으로, 그리고 격자의 모양은 수평방향으로 지형표현 능력이 우수한 Orthogonal Curvilinear Grid를 그리고 수직방향으로는 복잡한 수심에 대한 적용성이 뛰어난 Sigma Grid를 각각 채택하고 있다. 모델은 또한 난류모델(turbulence model)을 내장하고 있어서 수직혼합과정의 계산이 사실적으로 이루어지고 있다. 기타 모델에 대한 자세한 정보는 관련 웹 페이지(POM homepage, 2002)에서 참조할 수 있다. 질량보존, 운동량보존, 그리고 온도 및 염분 보존을 기술하는 POM 기본방정식의 Cartesian Version은 관련 문헌에서 쉽게 발견할 수 있다. 이 방정식을 수평방향 Orthogonal Curvilinear Grid 및 수직방향 Sigma Grid 상에서 다시 정리하면 다음과 같다(Blumberg and Herring, 1987; Zhenjiang, 1998).

$$h_1 h_2 \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u D) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 v D) + h_1 h_2 \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (h_1 h_2 u D)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u^2 D) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 u v D) + h_1 h_2 \frac{\partial \omega u}{\partial \sigma} + \\ & D u \left( -v \frac{\partial h_2}{\partial \xi_1} + u \frac{\partial h_1}{\partial \xi_2} - h_1 h_2 f \right) = -g h_2 D \frac{\partial \eta}{\partial \xi_1} - \frac{g h_2 D^2}{\rho_0} \\ & \int_{\sigma}^0 \left( \frac{\partial \rho}{\partial \xi_1} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial \xi_1} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma - \frac{h_2}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial \xi_1} + \frac{\partial}{\partial \xi_1} (2 A_m \frac{h_2}{h_1} \\ & D \frac{\partial u}{\partial \xi_1}) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (A_m \frac{h_1}{h_2} D \frac{\partial u}{\partial \xi_2}) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (A_m D \frac{\partial v}{\partial \xi_1}) + \\ & \frac{h_1 h_2}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_m \frac{\partial u}{\partial \sigma}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (h_1 h_2 v D)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u v D) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 v^2 D) + h_1 h_2 \frac{\partial \omega v}{\partial \sigma} + \\ & + D v \left( -u \frac{\partial h_1}{\partial \xi_2} + v \frac{\partial h_2}{\partial \xi_1} - h_1 h_2 f \right) = -g h_1 D \frac{\partial \eta}{\partial \xi_1} - \frac{g h_1 D^2}{\rho_0} \\ & \int_{\sigma}^0 \left( \frac{\partial \rho}{\partial \xi_2} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial \xi_2} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right) d\sigma - \frac{h_1}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial \xi_2} + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (2 A_m \frac{h_1}{h_2} \\ & D \frac{\partial v}{\partial \xi_2}) + \frac{\partial}{\partial \xi_1} (A_m \frac{h_2}{h_1} D \frac{\partial v}{\partial \xi_1}) + \frac{\partial}{\partial \xi_1} (A_m D \frac{\partial u}{\partial \xi_2}) + \\ & \frac{h_1 h_2}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_m \frac{\partial v}{\partial \sigma}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & h_1 h_2 \frac{\partial (\theta D)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u \theta D) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 v \theta D) + h_1 h_2 \frac{\partial (\omega \theta)}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left( \frac{h_2}{h_1} A_m D \frac{\partial \theta}{\partial \xi_1} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left( \frac{h_1}{h_2} A_m D \frac{\partial \theta}{\partial \xi_2} \right) + \frac{h_1 h_2}{D} \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial \omega}{\partial \sigma}) + h_1 h_2 \frac{\partial R}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & h_1 h_2 \frac{\partial (s D)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u s D) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 v s D) + h_1 h_2 \frac{\partial (\omega s)}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left( \frac{h_2}{h_1} A_m D \frac{\partial s}{\partial \xi_1} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left( \frac{h_1}{h_2} A_m D \frac{\partial s}{\partial \xi_2} \right) + \frac{h_1 h_2}{D} \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial s}{\partial \sigma}) \end{aligned} \quad (5)$$

상기 방정식에는 정수압가정(hydrostatic approximation)이 도입되었으며 각 부호의 정의는 다음과 같다.  $t$ 는 시간, 그리고  $\eta$ 는 해면변위이고;  $H_o$ 와  $D(D=H_o+\eta)$ 는 각각 평균수심과 순간수심;  $\xi_1$ 과  $\xi_2$ 는 각각 수평방향 Orthogonal Curvilinear 좌표;  $u$ 와  $v$ 는 각각  $\xi_1$ 과  $\xi_2$ 방향의 유속;  $h_1$ 과  $h_2$ 는 각각 Cartesian 좌표로부터 Curvilinear 좌표로의 변환을 주는 Transformation Metric Coefficient이다.

$\sigma$ 는  $\sigma=(z-\eta)/(H_o+\eta)$ 로 정의되는 수직좌표이며, 여기서  $z$ 는 Cartesian 수직좌표이다. 따라서  $\sigma=0$ 은 수면을, 그리고  $\sigma=-1$ 은 해저바닥을 각각 의미한다.  $\omega$ 는  $\sigma$ 면에 수직방향 유속이고 Cartesian 수직유속  $w$ 와는 다음의 관계가 있다.

$$\begin{aligned} \omega = w - \frac{1}{h_1 h_2} \left[ h_2 u \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial \xi_1} + \frac{\partial \eta}{\partial \xi_1} \right) - h_1 v \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial \xi_2} + \frac{\partial \eta}{\partial \xi_2} \right) \right] \\ - \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$f=2\Omega \sin \phi$ 는 Coriolis Parameter이고, 여기서  $\Omega=7.29 \times 10^{-5}/s$ 로서 지구자전 각속도이고  $\phi$ 는 위도이다.  $g$ 는 중력가속도,  $P_a$ 는 대기압,  $\theta$ 는 포텐셜온도,  $s$ 는 염도,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\rho_o$ 는 배경밀도,  $R$ 는 태양복사열,  $K_m$ 과  $K_h$ 는 수직와동점성계수로서 전자는 운동량 후자는 염분 및 온도에 대한 계수이다.  $A_m$ 은 수평와동점성계수인데, 소위 다음과 같은 Smagorinsky 공식에 의해 계산된다.

$$A_m = C_1 h_1 h_2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( -\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

여기서  $C_1$ 은 상수로서 0.1의 값을 가진다.  $A_h$ 는 온도 및 엽분 혼합을 위한 수평와동점성계수이며  $A_h = C_2 A_m$ 이다.  $C_2$ 는 보통 1.0의 값을 가진다.

## 2.2 입자추적모델

입자추적모델에서 입자의 위치  $x(t)$ 는 다음과 같은 비선형 Langevin 방정식으로 표현된다.

$$\frac{dx}{dt} = A(x, t) + B(x, t)\zeta(t) \quad (8)$$

여기서  $A(x, t)$ 는  $x(t)$ 의 변화에 영향을 주는 확정론적인 힘(deterministic forces)을 나타내는 벡터이고,  $B(x, t)$ 는 무작위적인 힘(random forces)을 나타내는 텐서(tensor)이다. 그리고  $\zeta(t)$ 는 난수를 나타내는 벡터로서 해양에서의 무작위적 물질혼합 특성을 의미한다.  $W(t) = \int_0^t \zeta(s)ds$ 로 정의하고 Ito 가정을 도입하면 식 (8)은 소위 다음의 Ito 확률미분방정식(stochastic differential equation)이 된다(Gardinar, 1985).

$$dx = x(t+dt) - x(t) = A(x, t)dt + B(x, t)dW(t) \quad (9)$$

여기서  $W(t)$ 는 Random Wiener Process로서  $\langle dW \rangle = 0$  (평균이 0),  $\langle dWdW \rangle = Idt$  (제곱이  $dt$ 에 비례)의 조건을 만족한다. 식 (9)을 차분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta x_n = x_n - x_{n-1} = A(x_{n-1}, t_{n-1})\Delta t + B(x_{n-1}, t_{n-1})\sqrt{\Delta t}Z_n \quad (10)$$

여기서  $Z_n$ 은 평균이 0이고 표준편차가 1인 난수(random number)를 나타내는 벡터이다. 만약 입자의 수  $N \rightarrow \infty$ 이고 계산시간 간격  $\Delta t \rightarrow 0$ 이면 식 (10)은 다음의 Fokker-Planck 방정식과 일치한다(Dimou and Adams, 1993).

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (A_i f) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left( \frac{1}{2} B_{ik} B_{jk} f \right) \quad (11)$$

Curvilinear 및 Sigma 격자상에서 보존성 물질  $c$ 의 이류·확산방정식은 다음과 같이 주어진다(식 (5) 참조).

$$\begin{aligned} & h_1 h_2 \frac{\partial(cD)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi_1} (h_2 u c D) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} (h_1 v c D) + h_1 h_2 \frac{\partial(\omega c)}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left( \frac{h_2}{h_1} A_h D \frac{\partial c}{\partial \xi_1} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left( \frac{h_1}{h_2} A_h D \frac{\partial c}{\partial \xi_2} \right) + \\ & \frac{h_1 h_2}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( K_h \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Curvilinear 및 Sigma 격자상에 입자추적모델을 적용하려면 그에 상응하는 Fokker-Planck 방정식이 존재하는지를 증명해야 한다. 먼저 식 (12)을 다음과 같이 정리한다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(h_1 h_2 c D)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left( \frac{u}{h_1} h_1 h_2 c D \right) + \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left( \frac{v}{h_2} h_1 h_2 c D \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{\omega}{D} h_1 h_2 c D \right) = \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left( \frac{A_h}{h_1^2} h_1 h_2 D \frac{\partial c}{\partial \xi_1} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left( \frac{A_h}{h_2^2} h_1 h_2 D \frac{\partial c}{\partial \xi_2} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_h}{D^2} h_1 h_2 D \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Fokker-Planck 방정식처럼 우변을 2차 도함수의 형태로 나타내기 위해 다음 항을 양변에 더한다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left( \frac{A_h}{h_1^2} h_1 h_2 D \right) C \right] + \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left( \frac{A_h}{h_2^2} h_1 h_2 D \right) C \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_h}{D^2} h_1 h_2 D \right) C \right] \end{aligned} \quad (14)$$

새로운 종속변수  $f = h_1 h_2 D C$ 를 정의하기 위해 식 (13)을 다음과 같이 정리한다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (h_1 h_2 D C) + \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left[ \left[ \frac{u}{h_1} + \frac{1}{h_1 h_2 D} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left( \frac{A_h}{h_1^2} h_1 h_2 D \right) \right] \right. \\ & \left. h_1 h_2 D C \right] + \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left[ \left[ \frac{v}{h_2} + \frac{1}{h_1 h_2 D} \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left( \frac{A_h}{h_2^2} h_1 h_2 D \right) \right] \right. \\ & \left. h_1 h_2 D C \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[ \left[ \frac{\omega}{D} + \frac{1}{h_1 h_2 D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_h}{D^2} h_1 h_2 D \right) \right] \right. \\ & \left. h_1 h_2 D C \right] = \frac{\partial^2}{\partial \xi_1^2} \left( \frac{A_h}{h_1^2} h_1 h_2 D C \right) + \frac{\partial^2}{\partial \xi_2^2} \left( \frac{A_h}{h_2^2} h_1 h_2 D C \right) + \\ & \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} \left( \frac{K_h}{D^2} h_1 h_2 D C \right) \end{aligned} \quad (15)$$

괄호([ ])안의 항을 다음과 같이 정의한다.

$$A_1 = \frac{u}{h_1} + \frac{1}{h_1 h_2 D} \frac{\partial}{\partial \xi_1} \left( \frac{A_h}{h_1^2} h_1 h_2 D \right) \quad (16)$$

$$A_2 = \frac{v}{h_2} + \frac{1}{h_1 h_2 D} \frac{\partial}{\partial \xi_2} \left( \frac{A_h}{h_2^2} h_1 h_2 D \right)$$

$$A_3 = \frac{\omega}{D} + \frac{1}{h_1 h_2 D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_h}{D^2} h_1 h_2 D \right)$$

행렬의 형태로 나타내면

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

또한 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}
 D_{11} &= \frac{A_h}{h_1^2} \\
 D_{22} &= \frac{A_h}{h_2^2} \\
 D_{33} &= \frac{K_h}{D^2}
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

대각행렬의 형태로 나타내면

$$\frac{1}{2} BB^T = D = \begin{bmatrix} D_{11} & & \\ & D_{22} & \\ & & D_{33} \end{bmatrix}
 \tag{19}$$

$x = [x_1, x_2, x_3] = [\xi_1, \xi_2, \sigma]$ 를 정의하면 식 (15)을 텐서 형태로 다음과 같이 쓸 수 있다(Zhang, 1995).

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (A_i f) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left( \frac{1}{2} B_{ik} B_{jk} f \right)
 \tag{20}$$

결국 Curvilinear 및 Sigma 격자상에서 Fokker-Planck 방정식이 존재함을 알 수 있으며 입자추적모델의 기초가 되는 차분식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \xi_1(t + \Delta t) &= \xi_1(t) + A_1 \Delta t + \sqrt{2D_{11} \Delta t} Z_n \\
 \xi_2(t + \Delta t) &= \xi_2(t) + A_2 \Delta t + \sqrt{2D_{22} \Delta t} Z_n \\
 \sigma(t + \Delta t) &= \sigma(t) + A_3 \Delta t + \sqrt{2D_{33} \Delta t} Z_n
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

### 3. 모델의 검증 및 적용

#### 3.1 모델의 검증

2장에서 제시된 기본 차분식(식 (21))에 기초하여 입자추적모델이 코딩되었으며 수립된 모델이 적절히 실행되는지 여부를 확인하기 위해 몇가지 경우에 대해 수치실험을 수행하였다. 실험에 사용된 입력자료를 요약한 것이 Table 1이다.

Table 1 Input data for test runs

Test Case	Geometry	Slope(m/m)	$A_h(m^2/sec)$	$K_h(m^2/sec)$
Case 1	straight	0	0.5	$10^{-5}$
Case 2	straight	30/250	0.5	$10^{-5}$
Case 3	straight	30/250	5.0	$10^{-5}$
Case 4	irregular	0	3.0	$10^{-2}$

##### 1) Case 1

Fig. 1은 수심이 70미터로 일정한 직선수로에서 x축 방향으로  $0.2m/s$ 의 일정한 유속이 흐를 때의 실험결과이다. 계산격자는 x축 방향 28개 (격자간격 1,000미터), y축 방향 10개(격자간

격 250미터), 그리고 z축 방향 9개(격자간격 10미터)로 각각 구성되었다. 계산시간간격은 60초이고 총 계산시간은 48시간이다. Fig. 1-(a)는 한 개의 입자가 x-y 수평면상에서 순수 이류유속(advection velocity)에 의해 움직이는 궤적을 나타내며, 이는 해석해(analytical solution)와 거의 일치한다. Fig. 1-(b)는 매 10 계산스텝마다 10개의 입자를 방출하였을 때 48시간 후의 x-y 수평면상 입자분포이다. 첫 계산스텝에서 방출된 입자의 y축 방향으로의 퍼짐(spreading) 정도에 대한 표준편차는 298.6미터로 계산되었는데, 이는 해석해에 의한 계산결과인  $(2A_h t)^{1/2} = 290$  ( $t=84,000s, A_h=0.5m^2/s$ )미터와 비교할 때 매우 근사한 값이다. 마지막으로 Fig. 1-(c)는 Fig. 1-(b)와 동일한 조건에서 x-z 수직면상 입자분포를 나타내는데, 마찬가지로 첫 계산스텝에서 방출된 입자의 z축 방향으로의 퍼짐 정도에 대한 표준편차는 1.35미터이고, 이는 해석해에 의한 계산결과  $(2K_h t)^{1/2} = 1.23$  ( $t=84,000s, K_h=10^{-5}m^2/s$ )미터와 매우 근사한 값이다.

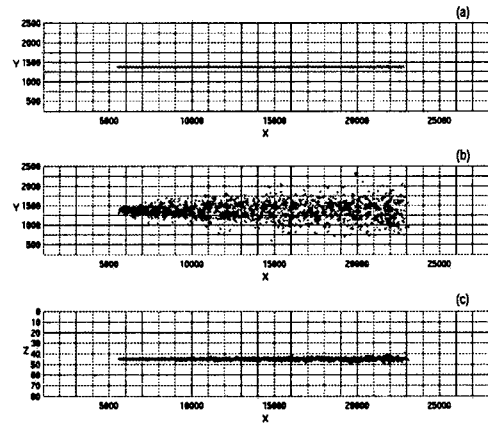


Fig. 1 Test results for case 1

##### 2) Case 2

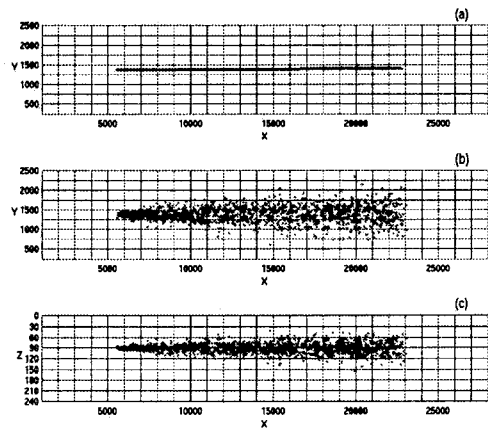


Fig. 2 Test results for case 2

Fig. 2는 경사수심(30/250m)을 가진 직선수로에서 x축 방향

으로 0.2m/s의 일정한 유속이 흐를 때의 실험결과이다. 격자 및 계산조건은 case 1과 동일하다. Fig. 2-(a)는 한 개의 입자가 순수 이류유속에 의해 움직이는 궤적을 나타낸 것인데 수심의 경사에 따른 y축 방향의 미약한 Pseudo Velocity(가상유속: 실제 유속이 아닌 파라미터 성분의 구배에 의해 발생하는 가상의 유속)에 의해 약간의 경사궤적이 나타나고 있다(x=5,500m일 때 y=1,375m, x=22,780m일 때 y=1,407m). Fig. 2-(b)은 case 1과 유사하게 보이지만 실제로는 Pseudo Velocity 만큼의 차이가 있다. Fig. 2-(c)는 case 1의 경우와 달리 x-z 수직면상에서 넓게 퍼진 입자분포로 보이고 있는데, 이는 입자의 분포가  $\sigma$ 면을 따라 발생하고 이 경우  $\sigma$ 면이 수심의 경사만큼 경사되어 있기 때문에 발생하는 현상이다.

3) Case 3

Fig. 3은 case 2와 마찬가지로 경사수심(30/250m)을 가진 직선수로에서 x축 방향으로 0.2m/s의 일정한 유속이 흐를 때의 실험결과이다. 계산격자 및 계산조건의 대부분은 case 2와 동일하나 수평확산계수  $A_h$ 를 10배 큰 5.0으로 실험하였다(Table 1 참조).

Fig. 3-(a)는 한 개의 입자가 순수 이류유속에 의해 움직이는 궤적을 나타낸 것인데, case 2와는 달리 y축 방향의 커다란 Pseudo Velocity(그 크기는 확산계수의 크기에 비례함, 식 (15) 참조)에 의해 강한 경사궤적이 나타나고 있다. Fig. 3-(b)와 3-(c)는 case 1 및 case 2의 경우와 달리 큰 확산계수 및 강한 Pseudo Velocity에 의해 y축, z축 방향으로 각각 입자가 넓게 분포하는 것을 볼 수 있다.

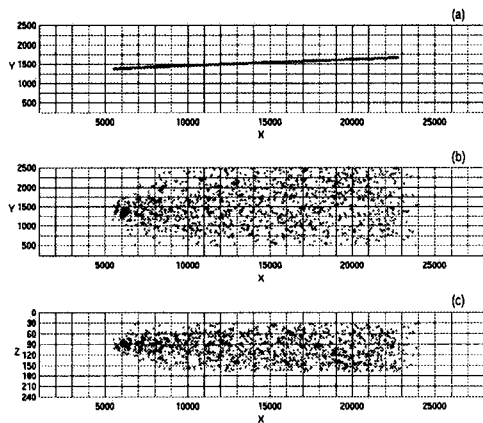


Fig. 3 Test results for case 3

4) Case 4

Fig. 4는 불규칙한 격자상에서 이류유속은 없고 순수 확산 항에 의한 확산실험의 결과를 나타낸 것인데, 불규칙 격자임에도 원형의 순수확산의 형태가 잘 재현되고 있음을 확인할 수 있다. 계산조건은 1,500개의 입자를 순간 방출시켰으며 계산시간간격은 60초, 총 계산스텝은 1,000스텝이다. 입자의 평균 이동거리는

거의 0이고, x축 방향의 표준편차는  $\sigma_x=606.9m$ , 그리고 y축 방향의 표준편차는  $\sigma_y=599.8m$ 로 각각 계산되었는데, 이는 해석해  $\sigma_t=(2A_h t)^{1/2}=600m$  ( $t=60,000s, A_h=3.0 m^2/s$ )와 비교하여 매우 근사한 값을 알 수 있다.

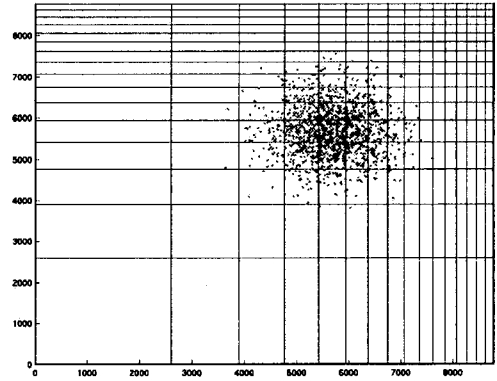


Fig. 4 Test result for case 4

3.2 모델의 적용

모델의 적용성을 검토하기 위하여 이를 실 해역에 적용하였다. 적용된 해역은 미국 플로리다주 서해안의 중부에 위치한 탬파만이며 해당지역의 지형 및 계산격자는 Fig. 5와 같다. 계산격자는 Curvilinear Grid이며 가로 70개, 세로 100개, 그리고 수심방향 11개의 층으로 각각 구성되었다. 탬파만은 플로리다주 최대의 만이며 만 상부에는 크고 작은 여러 개의 강이 있어서 많은 양의 담수가 만내로 유출되어 해수와 혼합을 이루는 담수성 만이다. 만 내의 평균수심은 4미터 정도로 매우 얇은 편이고, 유속도 가장 강한 곳이 수 m/s로 약한 편이어서 오염물의 정체가 우려되는 지역이다.

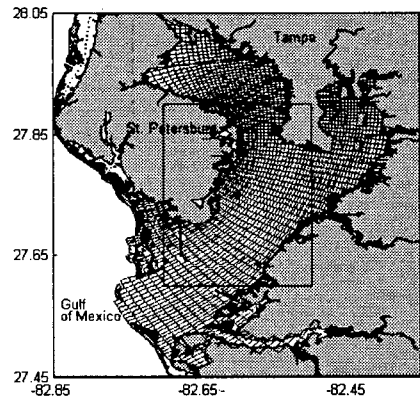


Fig. 5 Grid for Tampa Bay

Fig. 5에서 검은 점으로 표시된 지점은 해양방류구의 위치(위도 27.75N, 경도 82.6W)를 나타낸 것이며 수직면상 방류구

의 위치는 해저면상 1m에 위치하고 있다. 중앙부의 직사각형 상자는 확산실험의 결과를 도시한 구역이다(Fig. 6(a), 6(b) 및 Fig. 7(a), 7(b) 참조). 확산계산을 위한 계산조건은 매 시간스텝마다 10개의 입자를 연속적으로 방출하였으며 계산시간간격은 60초, 총 계산시간은 48시간이다. 그리고 수평확산계수( $A_h$ )는 Smagorinsky 공식으로부터 수직확산계수( $K_h$ )는 POM의 난류모델로부터 각각 계산되었다.

마찬가지로 부분적으로 약간의 농도 차이와 함께 확산 범위에 있어서 상당한 차이를 보여주고 있다.

두 모델의 계산결과 중 확산 범위의 차이는 앞에서 이미 언급하였듯이 기존 유한차분 농도모델이 안고 있는 수치확산(numerical diffusion)에 의한 오차때문인 것으로 판단되나 그 원인에 대해서는 좀 더 심도있는 연구 및 검토가 필요할 것으로 판단된다.

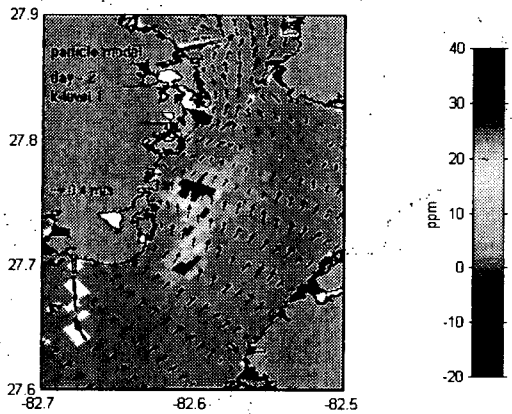


Fig. 6(a) Results for conventional model

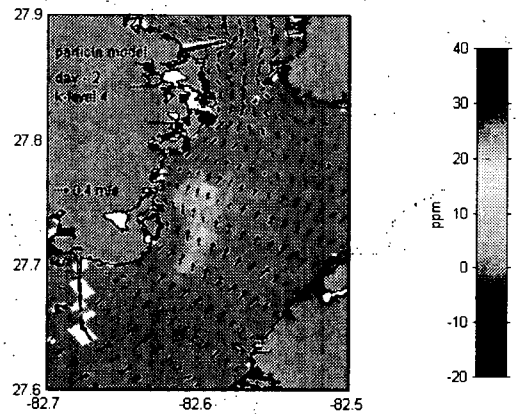


Fig. 7(a) Results for particle model

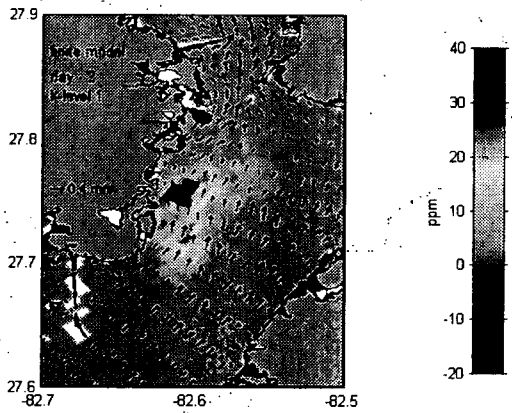


Fig. 6(b) Results for finite model

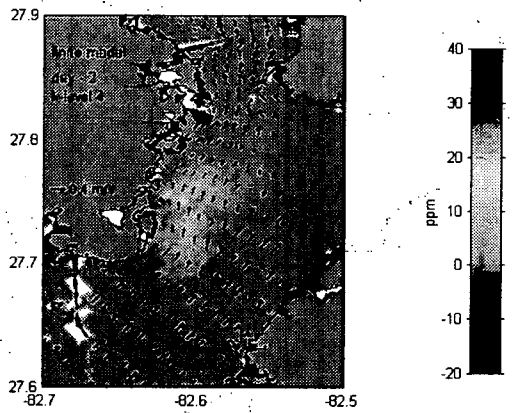


Fig. 7(b) Results for finite model

Fig. 6(a)는 입자추적모델의 계산결과 중 Level 1의 농도분포를, 그리고 Fig. 6(b)는 기존의 유한차분 농도모델(POM 모델 내에 있는 온도 및 염분확산 모델을 이용함)의 계산결과 중 Level 1의 농도분포를 각각 나타낸 것이다. 두 그림 모두 물의 흐름을 따라 방류지점을 중심으로 남북방향으로 확산되는 비슷한 확산 양상을 보여주고 있다. 그러나 부분적으로 약간의 농도 차이와 함께 확산 범위에 있어서 상당한 차이를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 입자추적모델의 계산결과 중 Level 4의 농도분포를, 그리고 Fig. 7(b)는 유한차분 농도모델을 이용한 계산결과 중 Level 4의 농도분포를 각각 나타낸 것이다. Fig. 6(a) 및 6(b)와

#### 4. 결론

기존의 확산모델은 농도개념에 기초한 재래적인 수치해법을 채택하고 있기 때문에 수치확산에 따른 오차의 발생이 불가피하며, 동시에 점원 오염원의 지정이 불가능하여 오염원 주변의 확산현상을 규명하는데 한계가 있었다. 이에 비해 입자추적모델은 농도모델이 안고 있는 이러한 단점들을 해소할 수 있을 뿐만 아니라 개별입자의 특성부여가 용이하므로 반응동적 입자추적모델 등 다양한 기법의 확산모델링이 가능한 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 해양모델링 도구로 이미 널리 사용되고 있는 기존의 POM 모델과 결합하여 사용할 수 있는 3차원 입자추적 모델을 개발하였으며, 다양한 수치실험을 통해 개발된 모델을 검증하고 동시에 미국 플로리다주 템파만의 해양방류구 모델링에 적용하여 그 적용성을 예시하였다.

개발된 입자추적모델은 POM 모델에서 채택하고 있는  $\sigma$  Grid 및 Curvilinear Grid 상에서 운용되기 때문에 POM 모델의 우수한 적용성을 그대로 이용할 수 있고, 따라서 다양한 분야의 확산모델링에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구와 관련하여 앞으로 더 연구해야 할 과제는 오염원 근처에서의 다양한 물리적 특성을 가진 혼합현상을 입자추적모델을 통해 재현하는 모델링 기술과 이를 가시화(visualization) 하는 기법에 대한 연구가 더 필요하다고 생각된다. 또한 본 연구에서 시간상의 제약으로 미처 규명하지 못했지만 기존의 농도모델과 입자추적모델 사이에 나타난 확산범위의 차이와 관련하여 그 원인에 대한 좀 더 심도있는 검토가 필요할 것으로 생각된다.

## 후 기

본 논문은 한국해양문화재단의 2000년도 해양계 대학교수 해외과건연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- [1] Blumberg, A. Z. and G. L. Mellor, "A Description of A Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Models", Vol. 4 *AGU*, Washington, DC, 1-16, 1987.
- [2] Blumberg, A. F. and H. J. Herring, "Circulation modelling using orthogonal curvilinear coordinates", *Three-Dimensional Models of Marine and Estuarine Dynamics*, edited by Nihoul, J. C. J. and Jamart, B. M., Elsevier Oceanography Series, 45, 55-88, 1987.
- [3] Dimou K. Nadia and E. Eric Adams, "A Random-walk Particle Tracking Model for Well-mixed Estuaries and Coastal Waters", *Estuarine, Coastal and Shelf Science* Vol. 37, 99-110, 1993.
- [4] Gardinar C. W., "Handbook of Stochastic Methods for Physics, Chemistry and the Natural Sciences", *Springer-Verlag*, 1985.
- [5] Hunter J. R., "The Application of Lagrangian Particle-tracking Technique to Modelling of Dispersion in the Sea", *Numerical Modelling: Application to Marine Systems*, edited by J. Noye, North-Holland, 1987.
- [6] Li, Zhenjiang, "Upwelling Circulation on the West Florida Continental Shelf", Ph. D. Thesis, Dept. of Marine Science, USF, 1998.
- [7] POM homepage, [http://www.aos.princeton.edu/WWW\\_PUBLIC/htdocs.pom/](http://www.aos.princeton.edu/WWW_PUBLIC/htdocs.pom/), 2002.
- [8] Zhang, X. Y., "Ocean Outfall Modelling - Interfacing near and far field models with particle tracking method", Ph. D. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, MIT, 1995.

원고접수일 : 2002년 8월 29일  
원고채택일 : 2002년 11월 28일