

초기혼합특성을 고려한 입자추적 모형에 의한 수중방류 하수장의 거동 예측 Prediction of Submerged Effluent Transport Using Particle Tracking Model with Initial Mixing Characteristics

김영도¹· 강시환²· 서일원¹· 오병철²· 주진규²
 Kim, Young-Do¹· Kang, See-Whan²· Seo, Il Won¹· Oh, Byung-Cheol²· Chu, Jin-Kyu²

1. 서론

하수처리장의 수중화산관에서 방류되는 부력제트는 초기혼합, 중력확장, 이송-확산 등의 과정이 시간적, 공간적으로 규모가 상이한 범위에서 일어나며, 하수방류 해역의 주변수 흐름은 지형특성과 조석의 영향을 받아 3차원적 비정상류 특성을 나타낸다. 이러한 부력제트의 거동을 모의하기 위해서는 일반적으로 근역과 원역을 분할하여 예측하는 방법을 사용하는데, 초기혼합 과정과 중력확장 과정을 예측하기 위해서는 정상상태를 가정한 특성길이 모형이나 제트적분 모형을 사용하고, 원역으로의 이송-확산 과정을 모의하기 위해서는 농도 모형이나 입자추적 모형 등을 사용한다.

일반적으로 하수는 부유물질, 침전물질, 콜로이드, 용해물질 등의 여러 가지 입자를 포함하고 있고, 이러한 입자들은 유기물과 광물로 구성되어 있으며, 0.1 μ m이하에서 3cm이상까지 다양한 크기를 갖는다(Neves 등, 1995). 실제 자연상태에서 일어나는 물질의 혼합과정은 농도로 표현된 기본식에 의해 설명되기보다는 물질입자 개개의 무작위 움직임으로 표현하는 것이 물리적으로 보다 타당하다(서승원, 1996). 입자추적 모형은 수중화산관에서의와 같이 고농도 오염물질이 점원으로 투입되는 경우에 가장 근접한 해를 얻을 수 있을 뿐만 아니라, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 근역모형에서 계산된 하수플룸의 상승고에 입자를 투입시

킴으로써 근역과 원역을 동시에 예측할 수 있는 전역모형에 사용될 수 있다(김영도 등, 1999).

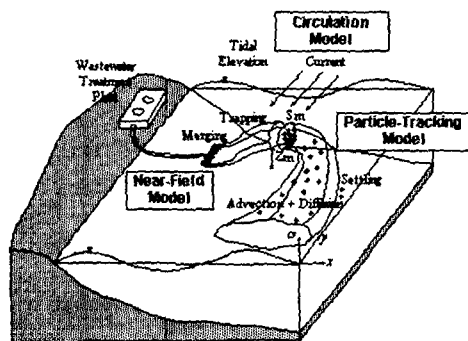


Fig. 1. 입자추적 모형을 이용한 수중방류 하수의 이송-확산 예측

입자추적 모형에서는 이송 과정은 특성곡선법을 이용한 확정론적 방법으로 모의하고, 확산 과정은 무작위 과정으로 가정하여 확률론적 방법으로 모의한다(서일원 등, 1999). 입자추적 모형을 이용하면 이송항의 처리에 따른 수치오차와 원역에서의 공간적으로 불충분한 해로 인한 수치 확산을 소거할 수 있으나, 수리학적인 정보에 대해 흐름 모형에 종속되므로, 흐름 모형과의 시간간격 차이로 인한 불필요한 계산시간과 저장공간을 발생시킨다(Dimou, 1992). 그러므로 작은 시간간격의 흐름 모형에서의 유속장을 입자추적 모형의 시간

¹서울대학교 지구환경시스템공학부 (School of Civil, Urban, and Geosystem Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

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

간격동안에 걸쳐서 평균하는 기법을 사용한다. Dimou(1992)는 Massachusetts 만에 위치한 Boston 항의 하수확산관에, 그리고 Zhang(1995)은 Mamala 만의 Sand Island 하수확산관에 입자추적모형을 적용하여 하수플룸의 거동을 예측한 바 있다.

본 연구에서는 연직성분이 고려된 3차원 입자추적 모형의 지배방정식을 σ 좌표계에서 유도하여 3차원 해류모형과 연계하고, 무차원해석에 의해 계산된 근역혼합 특성을 입자정보의 초기값으로 반영함으로써 하수플룸의 근역 혼합특성과 원역 이송-확산 거동을 동시에 예측할 수 있는 수치모형을 개발하였다. 또한 개발된 모형을 적용하여 마산만 수중확산관의 하수플룸의 혼합거동을 예측하였다.

2. 입자추적 모형

2.1 지배방정식

직교좌표계에서의 3차원 이송-확산 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial VC}{\partial y} + \frac{\partial WC}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 C 는 농도, t 는 시간, x 는 동향, y 는 북향, z 는 연직상향이 양인 좌표축이고, U, V, W 는 각각 x, y, z 방향의 유속성분이며, A_H, K_H 는 각각 수평방향과 연직방향의 확산계수이다. 수평방향으로 해수위(η)의 변화가 작다는 가정하에 σ 좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(DC)}{\partial t} + \frac{\partial(UDC)}{\partial x} + \frac{\partial(VDC)}{\partial y} + \frac{\partial(\Omega C)}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H D \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H D \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 D 는 총수심으로 수심(H)과 해수위의 합을 나타내며, σ 는 변화된 연직상향 좌표축, Ω 는 σ 방향의 유속성분이다. 식(2)는 다음과 같이 정리될 수 있다(김영도 등, 2000).

$$\begin{aligned} & \frac{\partial DC}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left\{ U + \frac{1}{D} \frac{\partial A_H D}{\partial x} \right\} DC \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left\{ V + \frac{1}{D} \frac{\partial A_H D}{\partial y} \right\} DC \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\left\{ \frac{\Omega}{D} + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \right) \right\} DC \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$= \frac{\partial^2}{\partial x^2} [A_H DC] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} [A_H DC] + \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} \left[\frac{K_H}{D^2} DC \right]$$

여기서, 입자위치에 대한 조건확률함수, $\phi(=DC)$ 를 정의하고, 이송항, 확산계수, 좌표축을 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U + (1/D) \partial(A_H D) / \partial x \\ V + (1/D) \partial(A_H D) / \partial y \\ (\Omega/D) + (1/D) \partial(K_H/D) / \partial \sigma \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} BB^T = \begin{bmatrix} D_{11} & & \\ & D_{22} & \\ & & D_{33} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} A_H & & \\ & A_H & \\ & & K_H/D^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$X = [X_1, X_2, X_3] = [x, y, \sigma] \quad (6)$$

식(4)에서 식(6)의 행렬식을 이용하여 식(3)을 텐서 형태로 나타내면 식(7)과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i} (A_i \phi) = \frac{\partial^2}{\partial X_i \partial X_j} \left(\frac{1}{2} B_{ik} B_{jk} \phi \right) \quad (7)$$

식(7)은 Fokker-Planck 방정식으로서, 입자위치 $X(t)$ 는 비선형 Langevin 방정식에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다(Zhang, 1995).

$$\frac{dX}{dt} = A(X, t) + B(X, t) Z_n \quad (8)$$

여기서 Z_n 은 평균이 0이고 단위표준편차를 갖는 독립적인 무작위수이다. 입자의 위치를 시간에 대해 차분화하면 식(9)와 같다.

$$X_i^{n+1} = X_i^n + A_i \Delta t + \xi_i \quad (9)$$

여기서 ξ_i 는 확산항이고, 위첨자 $n+1$ 은 계산할 시간 단계이고 n 은 전 시간단계이다.

2.2 유속보간법과 경계처리

입자의 이송을 위한 유속성분은 입자와 근접해 있는 교호 격자(staggered grid)상의 8개 유속값을 이용해 선형보간하여 구하였다. Fig. 2는 U 에 대한 보간을 나타낸 것으로, 입자가 x 방향에 대해서 i 번째 격자 내부에 위치하면 U 는 U_i, U_{i+1} 을 사용하고, y 방향에 대해서 j 번째 격자 내부에 위치할 때, 중심선 이전에 위치하면

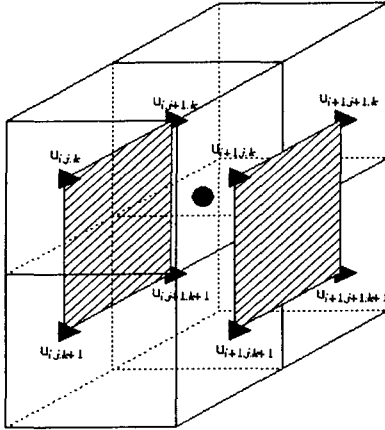


Fig. 2. 교호 격자상의 유속 보간법

U_{j-1} , U_j 을 사용하고, 중심선 이후에 위치하면, U_j , U_{j+1} 을 사용하였다. z 방향에 대해서도 y 방향과 같은 방법을 적용하였다. 또한 V 와 Ω 에 대해서도 U 와 마찬가지로 교호 격자상의 8개 유속값을 이용해 선형보간하였다.

수평방향의 경계 처리에 있어서는 개경계일 경우 입자는 외부로 손실되고 폐경계일 경우 다시 내부점으로 반사시켰다. Fig. 3은 x 방향에 대한 폐경계에서의 반사방법을 나타낸 것으로 a 지점에 있던 입자가 b 지점까지 이동할 때 c 지점으로 반사되는 경우, c 지점의 위치는 식(10)을 이용해 계산하였다.

$$X_c = X_a + U\Delta t - (1 + \gamma)\Delta x \quad (10)$$

여기서 γ 는 반사율 계수이고, y 방향과 z 방향의 반사에 대해서도 같은 방법으로 처리하였다.

2.3 근역혼합특성을 반영한 입자정보

이송-확산 방정식을 지배방정식으로 하는 원역모

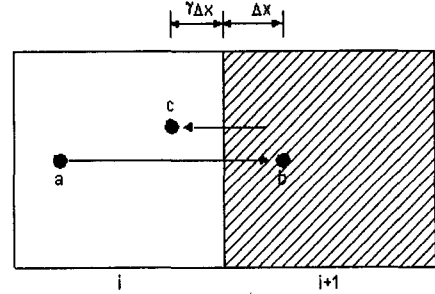


Fig. 3. 폐경계에서의 입자반사 처리방법

형은 전단류에 의한 하수플룸의 유입과정을 모의하기 위해서는 작은 격자크기를 사용해야 하므로, 근역모형을 이용한 결과를 원역모형의 초기조건으로 모의하는 것이 보다 경제적이다. 방류로 인한 주변수 흐름의 변화를 무시할 수 있다고 가정하면 근역모형에 의해 계산된 회석률과 오염원의 상승높이를 이용하여 오염부하량만을 부여함으로써 하수플룸의 전체 혼합거동을 예측할 수 있다(Zhang, 1999).

본 연구에서는 입자의 방류위치와 입자 개개의 농도를 부여하기 위하여 Table. 1의 무차원식을 이용하여 근역 혼합특성을 계산하였다. Table. 1은 Roberts 등(1983)이 입자의 방향과 속도를 가진 정상상태의 가로흐름이 있는 선형 밀도성층 수역으로 방류하는 경우 회석률과 하수장의 형태를 연구한 실험 결과를 정리한 것이다. 여기서 F 는 Roberts Froude수, θ 는 확산관과 주변수와의 각도, l_b 는 플룸/성층화 특성길이, z_e 는 최종상승고, h_e 는 플룸두께, z_m 는 평형상승고, x_i 는 초기혼합 길이, S_m 은 최소회석률, q 는 단위길이당 방류량, N 은 성층화계수, b 는 부력흐름률, w 는 플룸폭을 나타낸다. Fig. 4에 제시한 계산절차를 이용하여 연속적으로 방류되는 하수플룸의 전체적인 거동을 예측하였다.

Table 1. 차원해석에 의한 근역혼합 특성 계산식 (Roberts 등, 1983)

	$F(\theta = 90^\circ)$			$F(\theta = 0^\circ)$		
	~0.1	0.1~1	1~10	~0.1	0.1~1	1~10
z_e/l_b	2.6		$2.6F^{-1/6}$	2.6		$2.6F^{-1/24}$
h_e/l_b	1.8	2.0	$2.0F^{-1/8}$	1.8	2.0	
z_m/l_b	1.7	1.9	$1.9F^{-1/9}$	1.7	1.9	$1.9F^{-1/9}$
x_i/l_b	2.0	$8.5F^{1/3}$		2.0	$10F^{1/6}$	
$S_m q N / b^{2/3}$	0.97	$1.19F^{1/6} - 0.52$		0.97	$1.25F^{1/9}$	
$w(x)$	$0.7xF^{-1/3}$			$1 + 0.17[(x/l_b)F^{-1/3}]^{1/2}$		

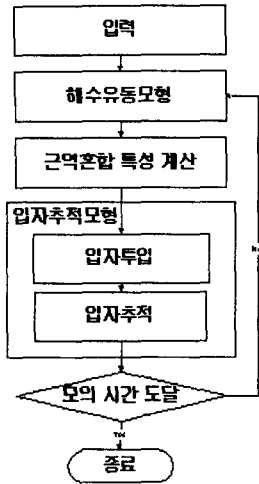


Fig. 4 입자추적을 이용한 하수플룸의 혼합거동 예측

3. 모형의 적용

3.1 마산만 하수확산관의 개요

마산·창원 하수종말 처리장은 마산만과 진해만의 수질오염 문제를 해소하기 위하여 1993년 11월에 하수처리용량 280,000m³/일 규모의 1차처리 시설의 하수처리장과 차집관거 공사를 완공하여, 현재 경상남도 창원군 구산면 옥계리 해안에서 수중방류를 시행하고 있다. 처리된 하수는 공칭직경 2,000mm인 방류관을 통하여 해안으로부터 약 680m 떨어진 수심 14m의 수중에서 총 길이 210m인 수중다공확산관을 통해 방류된다. Fig. 5는 수중확산관의 위치도를 나타낸 것으로 해안선과 거의 평행한 방향으로 총 21개의 연직유도관이 10m 간격으로 설치되어 있으며, 각 유도관에는 4개의 방류공이 설치되어 있다(Kang 등, 1999).

3.2 조석류 계산

조석에 의한 3차원 해수유동을 모의하기 위해 POM 모형(Blumberg 등, 1987)을 사용하였으며, POM 모형은 정수압가정과 Boussinesq 가정을 취하였고, Arakawa-C 격자체계를 사용하여 연직방향에서 음해법(implicit scheme)으로 차분화하였고 계산효율을 위해 시간에 대해 모드분리방법이 사용되었다.

마산·진해만에 적용하기 위해 Fig. 6에서와 같이 수평방향으로 Δx 와 Δy 가 500m인 등방 격자

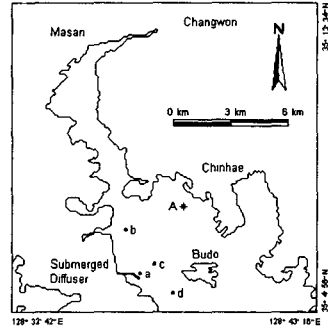


Fig. 5. 마산·창원 하수종말 처리장 수중확산관의 위치도

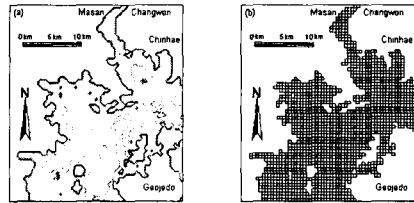


Fig. 6. 조석류 계산을 위한 대상영역; (a) 수심도 (b) 수평격자

와 12개의 연직방향 σ 격자층을 사용하였다. x - y 평면상의 폐경계에서는 법선유속이 0인 조건을 사용하였으며, 개방경계에서는 변량의 값을 식(18)와 같이 4개의 조석성분(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)을 경계조건으로 하였고, 4조석주기의 예비계산을 통하여 초기조건의 영향을 제거하였다.

$$\eta(x, y, t) = \sum a_i(x, y) \cos\{\omega_i t - g_i(x, y)\} \quad (18)$$

여기서 $a_i(x, y)$, ω_i , $g_i(x, y)$ 는 각각 i 분조에 대한 진폭, 각속도, 지각이다.

Fig. 7은 Fig. 5의 A지점에 위치한 진해검조소에서 측정된 조위자료의 4개분조에 대한 분석값과 계산된 조위를 비교한 것이다. 모형에서 계산된 조위값이 실측치와 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 9는 확산관이 위치한 지점에서 수심별 조류의 유속 분포를 나타낸 것이다. 하수플룸의 이송-확산 과정이 주변 유속장에 따라 크게 좌우되며, 특히 하계의 밀도 성층화된 경우에는 하수플룸이 수온약층에 포획되어 있어 조석 유속의 연직 분포는 매우 중요하다. Fig. 10은 표

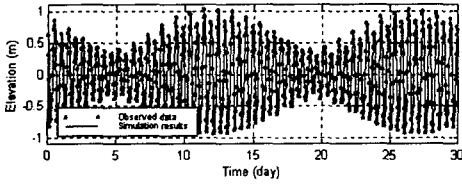


Fig. 7. 진해검조소 관측조위와 모형 계산조위의 비교

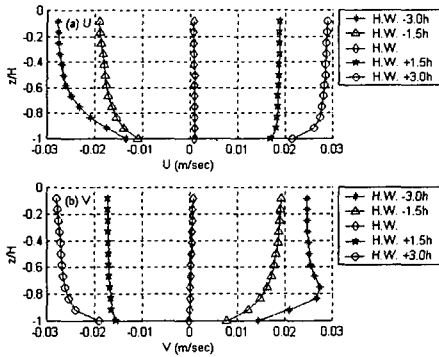


Fig. 9. 확산관이 위치한 지점의 대조시 시간별, 수심별 유속분포

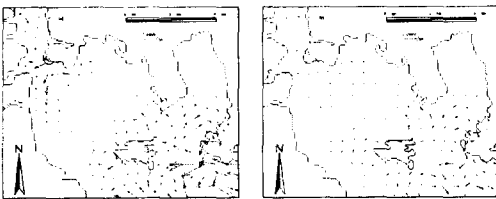


Fig. 10. 15일동안의 조석간차류 (a) 수표면 (b) 바닥면

층과 저층에서 15일동안의 간차류를 나타낸 것이다. 수심이 깊어질수록 유속의 크기가 작아 간차류의 세기가 약해지며, 이러한 조류의 연직변화는 방류오염물질의 초기위치에 따라 이동되는 궤적을 달리하게 한다.

3.3 하수플룸의 거동에 축

미국 EPA에서는 Boston항의 하수확산관에서 나오는 세립자들에 관한 실험을 통하여 입자의 침강속도들의 분포를 Table 2와 같이 실험을 통해 구하였다(Dimou, 1992). 마산만 하수확산관의 경우도 1차처리후 수중방류하고 있어 분포를 이와 유사한

것으로 가정하였다.

Table 2. Boston항 하수 확산관의 입자 침강속도

Percentage	Settling Velocity
5	0.001
20	0.0001
35	0.00001
40	do not settle

Fig. 11은 해저면에 침전된 입자는 흡착된다고 가정하여 입자의 침강속도($w_s=10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}$ m/s)를 갖는 하수플룸의 궤적을 나타낸 것이다. 15일 동안의 조석간차류에 의한 입자의 이송궤적이 침강속도에 따라 달라짐을 알 수 있다. 즉, 침강속도가 작은 세립자일수록 초기방류위치로부터 멀리 이송됨을 보여주고 있다. 강시환 등(1999)의 마산만 해양확산관 주변수와 밀도경사를 조사하여 계절에 따른 하수플룸의 회석율과 포획고에 관한 연구에 의하면, 여름철에는 해수의 밀도성층화로 인해 하수플룸이 바닥면에서 약 9m 높이의 수온약층에서 포획됨을 알 수 있다. 겨울철 하수플룸이 수표면에 도달하는 경우에 입자를 수표면에 투입하여 모의한 것과 여름철 하수플룸이 포획된 경우에 입자를 9m 높이에서 삽입하여 모의한 하수플룸의 궤적을 Fig. 11에서 비교하였다. 두 경우의 이송궤적은 매우 유사하나 수중포획시 침강속도가 가장 작은 세립자의 경우 부도의 영향을 크게 받아 더 이상 이동되지 못하고 넓게 분포됨을 보여주고 있다.

Fig. 12는 Table 2의 침강속도를 갖는 하수입자 방류시 15일간의 모의결과를 전체 방류입자와 퇴적입자의 분포로서 나타낸 것이며, 여기서 등분포선은 시간당 방류된 입자총량의 15%를 등간격으로 나타낸 것이다. 입자추적 모형의 계산 시간간격은 5분이며, 일정한 개수의 입자를 연속적으로 방류하였고, 하수플룸의 확산계수는 Dimou (1992)가 Boston 항의 하수확산관을 모의하는 데에 사용한 값을 참고하여, 수평확산계수는 $1.0\text{m}^2/\text{s}$, 연직확산계수는 $0.00001\text{m}^2/\text{s}$ 를 적용하였다. 마산 내만이 진해만 외해에 비해 조류의 세기가 상대적으로 약하기 때문에, 15일동안 수송된 하수플룸의 입자가 마산 내만쪽으로 보다 넓게 분포되고 있음을 보여주고 있다. 또한 침강속도가 큰 조립자들은 대부분 확산관 주변에 퇴적되는 양상을 보여주고 있으며, 이는 Table 3에 나타낸 바와 같이 Fig. 5의 a,b,c,d 지점에서의 중금속 퇴적물 조사(권영택 등, 1998) 결과와도 유사한 퇴적양상을 보인다.

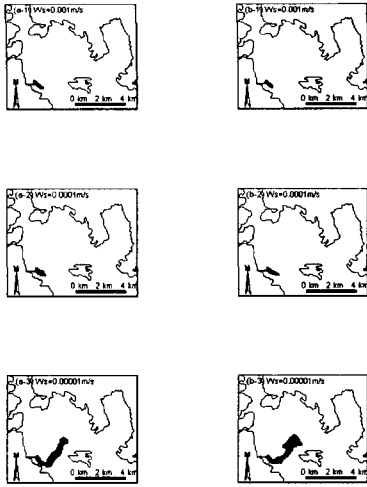


Fig. 11. 침강속도에 따른 하수플룸의 궤적;
(a) 수표면 도달시 (b) 수중포획시

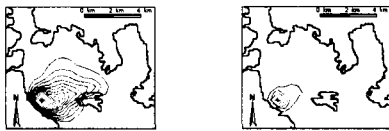


Fig. 12. 침강속도와 포획고를 고려한 입자분포:
(a) 전체입자 (b) 침전입자

4. 결론

σ 좌표변환된 물질수송 방정식을 유도하여 3차원 해류모형과 연계함으로써 3차원 입자추적 모형을 개발하였으며, 이 모형을 적용하여 마산만 하수확산관으로부터 해양방류된 하수플룸의 원역 이송-확산 과정을 모의하였다. 확산관 주변과 방류 인근해역에 퇴적되는 오염물질을 예측하기 위하여 하수입자의 침강속도에 따른 이송궤적을 상호 비교하였고, 근역모형에서 계산된 밀도성층화에 의한 포획고에 입자를 투입함으로써 수중 방류수의 근역 혼합특성을 고려하였다. 15일의 장기간의 이송-확산 과정이 모의된 계산결과에서는 침강속도가 비교적 큰 입자들은 확산관 주변과 인근 육계해안에 퇴적되었으며, 침강속도가 작은 세립자의 하수플룸은 약 3 km 정도로 동쪽의 부도방향으로 이송되어 마산만내에 그대로 정체되어 침전, 퇴적되고 있음을 확인할 수 있었고, 이러한 경향은 최근의 방류퇴적물 분포 조사결과와도 대체로

Table 3. 지점별 표층퇴적물의 중금속 함량 (mg/kg) (권영택 등, 1998)

Metal Site	Zn	Pb	Cd	Ni	Cu	Cr	Hg
A	305.1	46.8	2.73	34.9	54.9	57.6	0.18
B	243.9	34.4	0.98	23.3	46.3	47.6	0.15
C	148.2	22.9	0.42	24.3	27.4	42.6	0.10
D	127.0	30.0	-	19.0	24.7	36.7	0.08

일치하였다. 향후 연구로 개발된 3차원 입자추적 모형을 근역모형과 보다 유기적으로 결합시켜 수중방류된 하수플룸의 근역 혼합특성과 원역 이송-확산 거동을 동시에 예측할 수 있는 결합모형으로 발전되어야 할 것이다.

사사

본 연구는 환경부의 G-7 환경공학기술개발사업인 "해양방류관의 적정배치를 위한 실용화 기술 개발" 사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- 강시환, 박광순, 김상익, 유승협(1999) 마산만 수중 방류수의 계절별 근역회석을 변화. 한국해양안·해양공학회지, 한국해양·해양공학회, 제 11권, 제 2호, pp. 116-126.
- 권영택, 이찬원(1998) 하수종말 처리장 처리수의 해양 방류와 퇴적물의 중금속 오염. 한국해양환경공학회지, 한국해양환경공학회, 제 1권 제 1호, pp. 83-92.
- 김영도, 강시환, 서일원, 오병철, 주진규(2000) 3차원 입자추적 모형에 의한 수중방류하수의 이송-확산 예측. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제출중
- 김영도, 서일원, 강시환, 오병철(1999) 수중다공 확산관 방류수의 근역혼합특성 해석을 위한 근역모형과 원역모형의 결합연구. 1999년도 추계 학술대회 논문집, 한국해양환경공학회, pp. 75-80.
- 서승원(1996) Eulerian-Lagrangian 농도 및 입자 결합모형에 의한 연안의 부유사 확산 해석. 한국해양안·해양공학회지, 한국해양·해양공학회, 제 8권 제 2호, pp. 185-192.
- 서일원, 정태성(1999) 2차원 Random-Walk 모형을

- 이용한 자연하천의 평 확산 해석. 한국수자원학
회논문집, 한국수자원학회, 제 32권 제 1호,
pp.61-70.
- Blumberg, A. F. and Mellor, G. L. (1987) A
description of a three coastal ocean
circulation model, three dimensional shelf
models. *Coastal And Estuarine Sciences*, 5,
N.Heaps, Ed., American Geophysical Union.
- Dimou, K. (1992) *3-D hybrid Eulerian-
Lagrangian / particle tracking model for
simulating mass transport in coastal water
bodies*. PhD dissertation, Department of
Civil and Environmental Engineering, MIT.
- 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.
- Kang, S. W., Oh, B. C., Park, K. S., and You,
S. H. (1999) Near-field dilution of
wastewater effluents discharged from
submerged ocean outfalls in Masan Bay. *KSCE
J. Civ. Engrg.*, KSCE, Vol. 3, No. 4, pp.
395-405.
- Mellor, G. L. (1998) *Users guide for a
three-dimensional, primitive equation,
numerical ocean model*.
- Neves, M. J. and Fernando, H. J. S. (1995)
Sedimentation of particle from jets
discharged by ocean outfalls: a theoretical
and laboratory study. *Wat. Sci. Tech.*, Vol.
32, No. 2, pp. 133-139.
- Roberts, P. J. W., Snyder, W. H., and
Baumgartner, D. J. (1989) Ocean outfalls. I:
Submerged wastefield formation. II: Spatial
evolution of submerged wastefield. III:
Effect of diffuser design on submerged
wastefield. *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 115,
1-70.
- Zhang, Z. Y. (1995) *Ocean outfall modeling -
Interfacing near and far field models with
particle tracking method*. PhD dissertation,
Department of Civil and Environmental
Engineering, MIT.
- Zhang, Z. Y., and Adams, E. E. (1999)
Prediction of near field plume
characteristics using far field circulation
model. *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 125,