

해역의 수질예측을 위한 입자추적 모델의 개발 및 적용성에 관한 연구

정재훈·한동진·손병현^{*}·윤종성^{**}
부산대학교 환경공학과 · ^{*}한서대학교 환경과학과 · ^{**}인제대학교 토목공학과
(1997년 3월 15일 접수)

A Study on Development and Application of a Particle Tracking Model for Predicting Water Quality in the Sea Area

Jae-Hoon Jeong, Dong-Jin Han, Byung-Hyun Shon^{*}, and Jong-Sung Yoon^{**}

Dept. of Environmental Engineering, Pusan National University.

^{}Dept. of Environmental Science, Hanseo University.*

*^{**}Dept. of Civil Engineering, Inje University.*

(Manuscript received 15 March 1997)

The numerical experiments using a particle tracking model have been performed for predicting the change of water quality and shoreline.

In present study, comparison of the numerical model results with the analytic solution shows that the point of the maximum concentration and the distribution pattern is very similar. The reflection effect from the boundary was newly introduced for making clear the effect of the closed boundary which set limits to application of a particle tracking model. The present model seems to reappear physical phenomenon well. This model shows well qualitative appearance of pollutant diffusion in Kwangan beach.

Therefore, this model is regarded as a useful means for predicting diffusion of pollutant, movement of suspended sand, and change of water quality.

1. 서 론

일반적으로 연안에 유입된 오염물질은 즉시 해역 전체에 고르게 희석되는 것이 아니라 연안에서 외해로 서서히 확산되므로, 연안의 수질은 외해수와 내해수가 얼마나 잘 혼합되는가 하는 해수교환율에 의해 크게 영향을 받는다. 이러한 혼합은 오염물질의 특성과 조석, 고조, 파랑, 지형, 저질의 특성 등의 주변물리량에 영향을 받으므로, 그에 따른 오염물질의 확산은

시간적, 공간적 차원에서 매우 복잡한 양상을 나타내며, 따라서 해역의 수질평가를 위해서는 인근해역의 흐름의 형태와 오염물질의 거동을 미리 파악해 둘 필요가 있다.

수질예측을 위한 오염물질확산과 부유사의 이동에 관한 문제는, 일반적인 확산 방정식을 수치적으로 풀이하여 근사해를 구하는 방법이 외에 입자의 움직임이 random walk하다는 가정하에 수립된 MonteCarlo 방법이 있다. 이러

한 입자추적법은 손쉽게 현상을 재현할 수 있을 뿐만 아니라, 결과의 인식도 용이하여 흐름의 형태를 나타내기 위해 자주 이용되어져 왔다(Chapman and Dortch(1992)). 또한 입자추적법에 의한 확산예측의 가능성에 대해서, 이은주와 권정근(1995)은 실측치와 조류를 외력으로 한 흐름자료를 이용하여 확산방정식에 의한 수치계산, 입자추적의 결과를 비교검토하여, 입자추적법의 적용성을 정성적으로 입증하였다. 그러나, 입자추적법은 폐경계에서의 처리가 불분명할 경우 격자를 따라 입자가 정체하는 경향을 나타내므로, 그 적용에 있어서는 폐경계의 영향이 적은 지역의 유동형태의 관찰에 국한되거나, 경계를 단순화시켜서 적용하는 것이 일반적이었다(申 進(1995)). 따라서 경계의 영향을 많이 받는 지형이나, 복잡한 지형에 적용하기 위해서는 폐경계의 처리를 명확히 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 먼저 부유물질 등의 오염물질 확산을 평가하고 실제현상을 보다 잘 재현하기 위하여, 특히 폐경계에서의 처리를 위해 반사조건을 고려한 입자추적모델을 개발하였다. 입자추적법을 적용하기에 앞서 확산 방정식의 해석해와 입자추적법을 이용한 확산계산의 결과를 정량적으로 비교하여 적용성을 검토하였다. 그리고 실제 해역을 대상으로 흐름의 형태를 해빈류 모델을 이용하여 파악한 후, 난수를 이용한 입자추적법을 통해 오염물질의 이동에 따른 수질의 변화를 예측하여, 이 모델의 적용성에 대해 검토하였다.

2. 유동모델의 개요

일반적으로 해역의 유동은 작용하는 외력에 따라 조류, 해빈류, 취송류 등으로 구분된다. 이러한 흐름은 해역의 수질에 영향을 미치며, 특히 폐쇄성 해역에서는 해수교환이 잘 이루어지지 않는 관계로 수질이 악화되는 경우가 허다하다. 해역에서의 수질을 평가할 경우에는 조류와 취송류에 의한 영향을 파악하는 경우가 많으나, 사빈을 포함하고 있는 천해역에서는 일반적으로 해빈류에 의한 흐름이 지배적이다. 특히, 천해역의 개발행위가 수질에 미치는 영향과 사빈변형 문제를 동시에 평가하기 위해서는 파랑에 의해 생성되는 해빈류에 의한 수질 및 사빈변형의 평가가 우선적으로 이

루어져야 한다. 특히 본 연구에서는 개발된 입자추적모델을 이용하여 수질의 변화와 예측, 사빈변형 등을 평가하기 위해 광안리 해수욕장을 대상으로하여 본 모델의 적용성을 검토하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 광안리 해수욕장 내해의 유동을 재현하기 위해 이 해역의 흐름을 지배하는 파랑에 의한 해빈류모델을 사용하였다.

2.1 파랑변형모델의 개요

파랑변형계산에 대해서는 에너지 평형방정식의 해를 구하는 방법을 이용했다. 방향 스펙트럼을 D 로 두고, 외부에너지 출입을 Q , 에너지전파 vector를 \vec{V} 로 하면, 에너지 방정식은 다음 식으로 표시되어진다.

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \nabla \cdot (D\vec{V}) - Q = 0 \quad (1)$$

여기서,

$$\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial f}, \frac{\partial}{\partial \theta} \right\}$$

$$\vec{V} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_f \\ V_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_g \cos \theta \\ C_g \sin \theta \\ \frac{\partial f}{\partial t} \\ \frac{C_g}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right) \end{Bmatrix}$$

$$C_g = \frac{C}{2} \left\{ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2ka} \right\} \quad (2)$$

이고, C_g 는 군속도, C 는 파속, k 는 파수, d 는 수심, f 는 주파수, θ 는 각도이다.

여기서 파의 상태는 시간적으로 변하지 않으며, 성분파의 주기는 변하지 않고, 외부에너지의 출입은 없다고 가정하면, $\partial D / \partial t = df / dt = Q = 0$ 이 되므로, (1)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(DV_x) + \frac{\partial}{\partial y}(DV_y) + \frac{\partial}{\partial \theta}(DV_\theta) = 0 \quad (3)$$

결국, (3)식을 D 에 관해서 풀면, 어떤 지점에 있어서 파의 상태를 알 수 있게 된다. 계산은 연해쪽에 가장 가까운 곳에서 그 지점의 방향 spectrum이 심해파의 방향 spectrum D 와 같다고 조건을 주고 이 지점으로부터 계산을 시작하여 연해측으로 진행한다. 다음에 측방의 경계조건을 주지만 여기에서는 해역측과 육지

측을 나누어서, 해역측은 내의 spectrum을 동일하게 하고, 육지측은 파에너지는 육지에서 흡수되는 것으로 하여서 육지로부터 파에너지는 주어지지 않는 것으로 하여 계산을 진행하여, 어떤 지점의 방향spectrum $D(f, \theta)$ 를 구한다.

쇄파의 영향에 대해서는 습田(1975)의 한계 파고식을 이용하는 방법을 이용하였다. (4)식으로 표현되어진 습田(1975)의 쇄파한계식을 이용하여, 쇄파영역내에서는 계산되어진 파고 식(4)의 한계파고보다도 크지 않는 것으로 해서 계산하였다.

$$H_b/L_0 = A [1 - \exp[-1.5\pi(h_b/L_0)(1 + K \tan \beta)^s]] \quad (4)$$

여기서 $A = 0.12 \sim 0.18$, $K = 15$, $s = 4/3$, H_b : 쇄파파고, h_b : 쇄파수심, $\tan \beta$: 해저구배 이다.

2.2 해빈류모델의 개요

해빈류 계산은 통상 조류계산에 이용되어지는 단층 2차원 천수방정식에 외력으로서, 파에 의해서 일어나는 과잉 flux항(radiation stress항)을 첨가한 것을 기초 방정식으로서 이용하고 있다. 마찰항, 수평혼합항의 취급은 西村(1984)의 연구를 참고하였다. 기초방정식은 다음의 연속방정식과 운동방정식으로 구성되어진다.

(연속방정식)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h + \eta)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(h + \eta)v] = 0 \quad (5)$$

(운동방정식)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + M_x + F_x + L_x = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + M_y + F_y + L_y = 0 \quad (7)$$

여기서,

x, y : x 축은 정선에 평행하며, y 축은 육지에서 바다방향으로 둔다.

t : 시간, h : 정수시 수심,

u, v : 수심 방향으로 평균화된 x, y 방향의 유속성분,

η : 정수면으로부터 평균수위의 변화량,

M_x, M_y : 파에 의한 과잉 운동량(radiation stress항),

F_x, F_y : 파와 흐름에 의한 마찰항,

L_x, L_y : 수평 혼합항 이다.

계산은 (6)-(8)식을 ADI법으로 차분화해서 정상상태에 도달할 때까지 계산했다. 경계조건으로는 연해측에서의 평균수위의 상승량이 0, 측방에서는 수위구배를 0으로 했다.

파에 의한 외력항 (M_x, M_y)은 radiation stress (S_{xx}, S_{xy}, S_{yy})를 이용해서,

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \frac{1}{\rho(h + \eta)} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ M_y &= \frac{1}{\rho(h + \eta)} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

로 나타내어진다. 통상의 정현 진행파의 경우에는 S_{xx} 등은 파고(H), 파향(θ) 등의 계산결과로부터 다음식으로 표현되어진다.

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} n(1 + \cos 2\theta) - 1/2 & 1/2n \sin 2\theta \\ 1/2n \sin 2\theta & n(1 + \sin 2\theta) - 1/2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, E : 파랑의 Energy 밀도, ρ : 해수 밀도, g : 중력 가속도, n : 군속도와 파고의 비 (C_g/C), θ : 파의 입사각 이다.

파랑과 흐름이 공존하는 장에서의 저면마찰계수 (F_x, F_y)는 다음에 나타나는 西村(1981)의 평가식을 이용하였다.

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \frac{f}{(h + \eta)} \left[\left(w + \frac{u_{wx}^2}{w} \right) u + \frac{u_{wx} \cdot u_{wy}}{w} y \right] \\ F_y &= \frac{f}{(h + \eta)} \left[\frac{u_{wx} \cdot u_{wy}}{w} x + \left(w + \frac{u_{wy}^2}{w} \right) u \right] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

여기서

$$w = [(u^2 + v^2 + u_{wx}^2 + u_{wy}^2 + 2W)^{1/2} + (u^2 + v^2 + u_{wx}^2 + u_{wy}^2 - 2W)^{1/2}] / 2$$

$$W = u \cdot u_{wx} + v \cdot u_{wy}$$

u_{wx}, u_{wy} : 파랑에 의한 저면 유속 평균치의 x, y 방향성분,

$$(u_{wx}, u_{wy} = 2/\pi \cdot \hat{u}_{wb} (\cos \theta, \sin \theta))$$

\hat{u}_{wb} : 미소 진폭파 이론에 의한 저면에서의 물 입자 궤도속도 최대치

$$(\hat{u}_{wb} = \frac{\pi H}{T \cdot \sinh kh})$$

H, T, K : 파랑의 파고, 주기, 파수,

f : 파랑과 흐름이 공존하는 장에서의 마찰계수 이다.

난류에 의한 수평 혼합항 (L_x, L_y)는 다음식으

로 나타내어진다.

$$\left. \begin{aligned} L_x &= -\frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_{xx} \frac{\partial u}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_{xy} \frac{\partial u}{\partial y}) \\ L_y &= -\frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_{yx} \frac{\partial v}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_{yy} \frac{\partial v}{\partial y}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

여기서, $\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yx}, \epsilon_{yy}$: 와동 확산 계수
 와동 확산 계수는 $\epsilon_{xx} = \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \epsilon_{yy} = \epsilon$ 로 해서,
 Longuet-Higgins의 평가식을 이용했다.

$$\epsilon = N\sqrt{g(h + \eta)} \quad (12)$$

여기서, N : 0.01 Euler 무차원 정수
 l : 이안거리

본 연구의 계산시에는 이안거리(l)를 西村에 의한 해빈의 평균구배(s)를 이용하여, 와동 확산계수(ϵ)를 전 영역에 걸쳐 다음식으로 주었다.

$$\epsilon = N \frac{(h + \eta) \sqrt{g(h + \eta)}}{s} \quad (13)$$

3. 입자추적모델의 개요

이상과 같은 기초방정식의 수치해법에 의해 얻어진 흐름결과를 기초로 하여 수질문제를 검토한다. 수질예측은 결과의 인식이 용이하고, 손쉽게 현상의 재현이 가능한 입자추적법을 이용한다. 먼저 난수를 이용한 확산항을 포함하는 입자추적법의 결과와 확산방정식의 해석해를 비교하여 이러한 입자추적법의 적용성에 대해 검토하였다. 그러나 이러한 입자추적법을 실제로 적용할 경우에, 폐경계에서의 처리가 명확하지 않을 때는 경계를 따라 입자가 정체되는 결과가 나타나서 실제 해수의 오염과 확산을 예측하는데 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 문제가 되던 폐경계에서의 처리를 명확히 하기 위해 경계에서의 반사를 새롭게 고려함으로써 현상을 보다 잘 재현할 수 있도록 하였다.

3.1 기초방정식

입자의 이동은 식(14)과 식(15)에 의해 결정된다.

$$x^{(n+1)} = x^n + u \cdot \Delta t + l_x \quad (14)$$

$$y^{(n+1)} = y^n + v \Delta t + l_y \quad (15)$$

l_x, l_y : 난수에 의해 결정되는 확산과 관련된 성분으로서 $l_x = c_x \cdot a, l_y = c_y \cdot b$ 이다.

여기서 a, b 는 (-0.5~0.5)범위의 난수로서

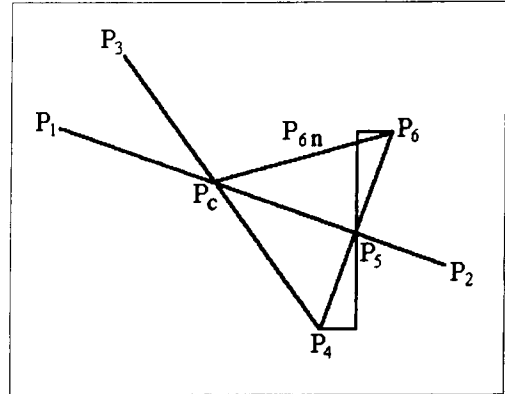


Fig. 1. Reflective boundary.

정의에 의해서 평균(\bar{x})이 0이며, 분산(σ^2)은 1/12이다. 또 l_x 의 분산(σ_x^2)은 $\sigma_x^2 = c_x^2 \cdot \sigma^2$ 로 나타내고, 이 때 확산계수와 이동거리 l_x 의 분산(σ_x^2)과의 관계는 식 (16) 같다.

$$K_x = \frac{1}{2} \frac{\sigma_x^2}{\Delta t} \quad (16)$$

따라서, $c_x = \sqrt{24\Delta t \cdot K_x}, c_y = \sqrt{24\Delta t \cdot K_y}$ 이다.

그러므로 위치 x^n, y^n 에서의 유속을 u, v라고 하면, 하나의 시간step후의 입자의 위치는 식 (17), (18)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x^{(n+1)} = x^n + u \cdot \Delta t + \sqrt{24 \cdot \Delta t \cdot K_x} \cdot a \quad (17)$$

$$y^{(n+1)} = y^n + v \cdot \Delta t + \sqrt{24 \cdot \Delta t \cdot K_y} \cdot b \quad (18)$$

또 입자추적결과를 비교를 위해 해수교환률 및 잔존율을 다음과 같이 정의하여 사용하였다. 먼저 반복계산을 통해 입자의 최종 위치를 나타낸 후 외부로 유출한 입자의 수를 총 투입 입자 수로 나눈 것을 입자의 잔존율(Residual rate)로 정의한다.

$$RR(\%) = \frac{(\text{초기입자수} - \text{유출입자수})}{\text{초기입자수}} \quad (19)$$

따라서, 해수교환율(Sea water exchange rate)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SER(\%) &= \frac{(\text{초기입자수} - \text{최종 잔존입자수})}{\text{초기입자수}} \\ &= 100 - RR \end{aligned} \quad (20)$$

3.2 경계에서의 반사조건의 고려방법

경계에서의 반사는, 먼저 반사하는 경계를 선택한 다음, 선택된 경계에서의 반사를 반사율을 고려하여 계산한다.

먼저 경계를 나타내는 두 점을 $P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2)$ 로

$z_2(X_2, Y_2)$ 라 하고, 하나의 시간간격에서 입자의 시점을 $P_3(X_3, Y_3)$, 입자의 종점을 $P_4(X_4, Y_4)$ 라 하면 경계를 나타내는 직선과 입자의 이동을 나타내는 직선은 각각 다음과 같다.

$$(X_1 - X_2) \cdot (Y - Y_1) = (Y_1 - Y_2) \cdot (X - X_1) \quad (21)$$

$$(X_3 - X_4) \cdot (Y - Y_3) = (Y_3 - Y_4) \cdot (X - X_3) \quad (22)$$

이 두 직선의 교점은 $Pc(Xc, Yc)$ 이다.

$$Xc = (-\Delta X_{34}(\Delta Y_{12} \cdot X_1 - \Delta X_{12} \cdot Y_1) + \Delta X_{12}(\Delta Y_{34} \cdot X_3 - \Delta X_{34} \cdot Y_3)) / D$$

$$Yc = (-\Delta Y_{34}(\Delta Y_{12} \cdot X_1 - \Delta X_{12} \cdot Y_1) + \Delta Y_{12}(\Delta Y_{34} \cdot X_3 - \Delta X_{34} \cdot Y_3)) / D$$

여기서 $\Delta X_{12} = (X_1 - X_2)$ $\Delta Y_{12} = (Y_1 - Y_2)$
 $\Delta X_{34} = (X_3 - X_4)$ $\Delta Y_{34} = (Y_3 - Y_4)$ $D = -\Delta Y_{12} \cdot \Delta X_{34} + \Delta Y_{34} \cdot \Delta X_{12}$ 이다.

구한 교점이 선분 P_1, P_2 사이에 있는지를 판단하기 위해 점 P_1 과 점 P_2 사이의 거리를 D_{12} , 점 Pc 와 점 P_1 , 점 P_2 사이의 거리를 D_{1c} , D_{2c} 라 하면 다음 조건의 경우에만 교점이 선분 P_1, P_2 상에 존재한다.

$$(D_{1c} \leq D_{12}) \cap (D_{2c} \leq D_{12})$$

마찬가지로 교점이 선분 P_3, P_4 사이에 있는지의 판단은 다음과 같다.

$$(D_{3c} \leq D_{34}) \cap (D_{4c} \leq D_{34})$$

교점이 선분 P_1, P_2 와 선분 P_3, P_4 사이에 있다면, 즉 두 선분이 만난다면, 입자의 시점(P_3)에서 교점(Pc)사이의 거리(D_{3c})가 가장 작은 경우를 여러 가지 경계 중에서 반사계산을 위한 경계로 선택한다.

선택된 경계에서의 반사를 위해서, 경계(선분 P_1, P_2)에 수직이며 입자의 종점(P_4)을 지나는 직선식을 구한다.

$$-(Y_1 - Y_2) \cdot (Y - Y_4) = (X_1 - X_2) \cdot (X - X_4) \quad (23)$$

따라서 경계와 입자의 종점(P_4)에서 경계에 내린 수선과의 교점은 $P_5(X_5, Y_5)$ 이다.

$$X_5 = (\Delta Y_{12}(\Delta Y_{12} \cdot X_1 - \Delta X_{12} \cdot Y_1) + \Delta X_{12}(\Delta Y_{12} \cdot X_4 + \Delta Y_{12} \cdot Y_4)) / (\Delta Y_{12}^2 + \Delta X_{12}^2)$$

$$Y_5 = (-\Delta X_{12}(\Delta Y_{12} \cdot X_1 - \Delta X_{12} \cdot Y_1) + \Delta Y_{12}(\Delta Y_{12} \cdot X_4 + \Delta Y_{12} \cdot Y_4)) / (\Delta Y_{12}^2 + \Delta X_{12}^2)$$

그러므로 구하는 점 $P_6(X_6, Y_6)$ 은 식(24), (25)과 같다.

$$X_6 = X_5 + (X_5 - X_4) \quad (24)$$

$$Y_6 = Y_5 + (Y_5 - Y_4) \quad (25)$$

반사율을 C 라고 한다면 반사율을 고려한 입자의 종점 $P_6n(X_6n, Y_6n)$ 은 식(26), (27)과 같다.

$$X_6n = Xc + (X_6 - Xc) \cdot C \quad (26)$$

$$Y_6n = Yc + (Y_6 - Yc) \cdot C \quad (27)$$

3.3 입자추적모델의 검증

3.3.1 해석해와의 비교

모델의 검증을 위해 다음과 같은 확산방정식을 적용한다. 흐름방향을 x 축으로 하고 수심방향을 z 축으로 하고, 평균유속을 U , 주어진 영역에서의 유속을 $u = U + \beta y + \gamma z$ 라고 한다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (U + \beta y + \gamma z) \frac{\partial c}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (28)$$

여기서, U : 평균유속

β, γ : y 방향 유속변화율, z 방향 유속변화율

K_x, K_y, K_z : 각각 x, y, z 방향의 확산계수이다.

이 경우 순간적인 방출량을 M 이라하면 그 해는 다음과 같다.

$$c(x, y, z, t) = \frac{M}{(4\pi)^{3/2} (D_x K_y K_z)^{1/2}} \times \exp \left[-\frac{(\xi - (1/2)(\beta y + \gamma z)t)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4K_y t} - \frac{z^2}{4K_z t} \right] \quad (29)$$

여기서 $\xi = x - Ut$

$Dx = Kx + Sx$

$Sx = (1/12)(K_y \beta^2 + K_z \gamma^2)t^2$ 이다.

이 3차원적인 해를 가지적으로 나타내기가 곤란하므로, 다음과 같은 2차원의 해를 이용하여 입자추적법의 결과치와 비교하였다.

$$c(x, y, t) = \frac{M}{(4\pi)^{2/2} (D_x K_y)^{1/2}} \times \exp \left[-\frac{(\xi - (1/2)\beta y \cdot t)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4K_y t} \right] \quad (30)$$

입자추적의 결과는 입자의 최종위치에서 가장 가까운 격자점을 그 입자의 최종 위치로 보며, 보다 안정적인 결과를 얻기 위해 최종결과는 주위의 8점을 포함한 9개점의 평균을 그 격자점의 입자수로 계산하였다. 또 계산된 각 격자점의 입자수는, 2차원의 경우에 대표평면($\Delta x \times \Delta y$)의 입자수이므로, 해석해에서 얻어진 각 지점의 농도와 비교하기 위해서 평면의 면적으로 나누어 계산하였다. 즉 투입 농도를 M , 투입입자수를 N_t , 계산후의 임의의 격자점에서 입자수를 N_{xy} 라고 하면, 그 격자점의 농도

Table 1. Condition for calculating analytic solution and numerical model

계산 영역	2000m×1500m
격자 간격	$\Delta x = \Delta y = 50m$
시간 간격	20초
투입지점 및 초기농도	X=11, Y=11, $C_0 = 500ppm$
확산 계수	$K_x = K_y = 2 \times 10^9 cm^2/s$
평균 유속	$U = 30cm/s$
유속 변화율	$\beta = 0.001 (cm/s)/cm$

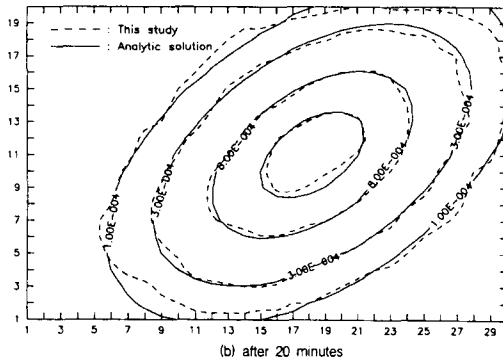
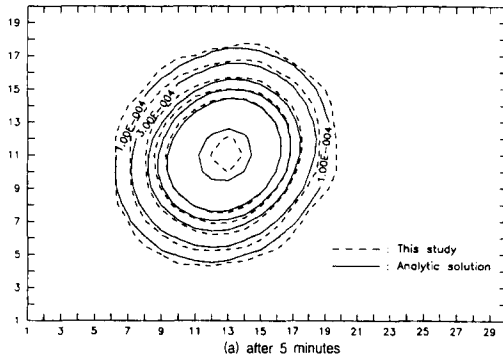


Fig. 2. Comparison of the particle tracking with the analytic solution.

Table 2. Computational conditions of the numerical model

파랑의 제원			
방향	파고(m)	주기(sec)	비고
S10°W	10	15	설계파
SSE	5.2	9	설계파
SE	1.02	7.27	통상파랑(가을)

$C_{x,y}$ 는 식(31)와 같이 나타낸다.

$$C_{x,y} = \frac{M}{N_T \cdot (\Delta X \cdot \Delta Y)} \times (N_{x-1,y-1} + N_{x,y-1} + N_{x+1,y-1})$$

$$N_{x-1,y} + N_{x,y} + N_{x+1,y} + N_{x-1,y+1} + N_{x,y+1} + N_{x+1,y+1}) / 9 \quad (31)$$

계산조건은 Table 1과 같다.

이 조건에서 각각 5분, 20분경과후의 결과에 대한 해석해와 입자추적결과를 Fig. 2에서 비교하였다. Fig. 2에서 해석해(실선)와 입자추적 결과(점선)를 비교해 보면, 시간에 따라 최대농도가 나타나는 지점과 확산범위가 해석해와 입자추적법의 결과와 유사하게 나타나 입자추적에 의한 확산예측이 타당한 것으로 생각된다.

3.3.2 실제지형에서 반사를 고려하였을 때와 의 비교

폐경계에 대한 처리를 하지 않고 입자추적을 행한 경우와 식 (25), (26)을 이용하여 경계에서의 반사를 고려한 입자추적법을 적용한 경우의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 폐경계에서의 처리가 명확하지 않을 때(Fig. 3-(a))는 폐경계를 따라 입자가 정체되는 결과가 나타나서 실제 해역에서의 해수의 확산이나 부유물질 등의 오염물질 확산현상과는 다소 동떨어진 결과를 나타내고 있다. 한편, 폐경계에서의 반사조건을 고려한 경우(Fig. 3-(b))에는 폐경계에 일단 도달한 입자가 그 자리에 잔류하지 않고 일부가 반사되어 해역으로 유출입되는 현상을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 반사율의 변화를 주어 계산을 실시하였을 경우에 경계부에서의 반사율에 의해 입자의 반사정도가 크게 좌우되고 있다. 따라서 경계의 특성에 따른 반사율의 적용에 주의를 요할 필요가 있을 것으로 생각된다.

4. 실제해역에의 적용

4.1 대상영역 및 계산조건

대상영역은 부산의 대표적인 해수욕장인 광안리 해수욕장으로, 최근 주변해역의 매립으로 연안물리량이 변화되어 사빈의 변형과 함께 수질의 변화가 발생하고 있으나 이러한 변화가 어떠한 형태로 안정화 될지를 알 수 없으므로 구조물의 설치가 검토되고 있다. 따라서 수질의 변화를 예측할 수 있는 모델의 도입이 필수적이므로, 이 모델을 이용하여 50년 빈도의 두 가지 설계파랑(S10°W, SSE)과 통상파랑(SE)에 대한 현황의 수치계산을 실시하여 적용성을 검토하였다. 각 파향의 제원은 Table 2에 정리하

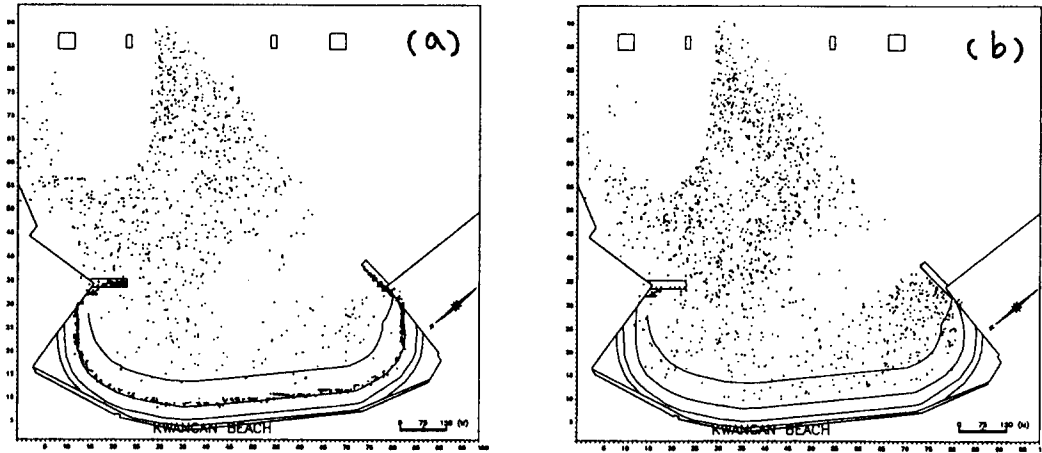
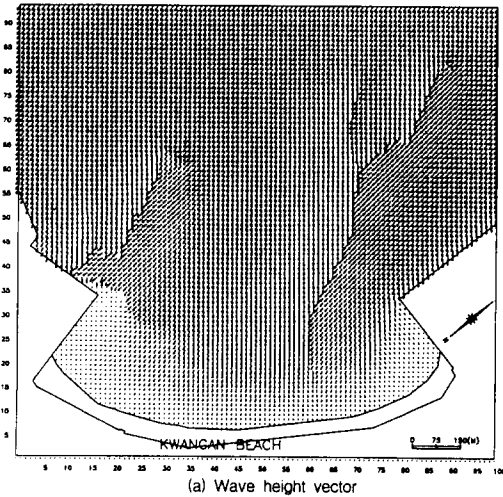
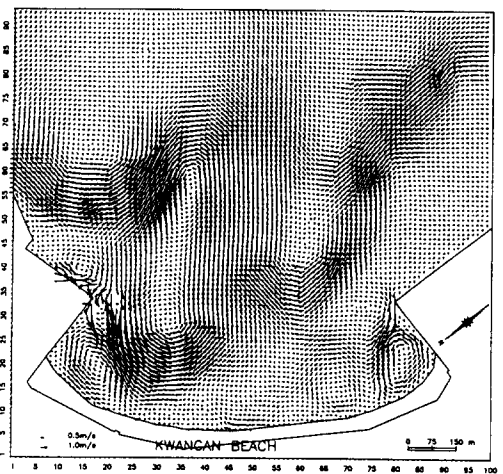


Fig. 3. Effect of taking into the reflection from the boundary.



(a) Wave height vector



(b) Nearshore current velocity vector

Fig. 4. Results of numerical calculation by the current model.

였다.

4.2 결과 및 고찰

먼저 해빈류계산결과(S10°W과향)를 Fig. 4에 나타내었다. 파고분포를 보면 중앙부가 높게 나타나지만 전반적으로 사빈근처에서 높은 파고가 나타나서 사빈의 안정성에 문제가 있다는 것을 예상할 수 있고, 흐름에 있어서는 좌우에서 유입된 흐름이 중앙에서 유출하는 형태이며, 해수욕장의 우측에서 순환류가 잘 형성된 반면에 좌측에서는 이런 흐름이 적은 것으로 나타난다. 입자추적계산 결과(Fig. 5)에서는 이러한 흐름의 형태를 잘 반영하여, 시간에 따라 중앙에서 유출하는 흐름을 나타내었으며, 해수욕장의 좌측에서 다소 입자가 잔류하여, 현재 해수욕장의 좌측에서 빨과 같은 흙이 퇴적되는 현상과 중앙부의 침식현상과 비교해 볼 때 흥미있는 결과라고 생각된다.

5. 결 론

연안의 개발에 따라 해역에 구조물이 설치될 경우에는 반드시 수질 및 사빈변형에 대한 고려가 있어야 하므로, 이러한 수질 및 사빈의 변화를 예측할 수 있는 모델에 대한 연구의 필요성은 매우 크다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 오염물질의 확산이나 부유사의 이동 등에 적용되는 입자추적법의 결과를 해석해와 정량적으로 비교함으로써 그 적용성을 평가하였으며, 입자추적법의 적용을 제한하던 폐경계에서의 처리를 명확히 하기 위해 경계에서의 반

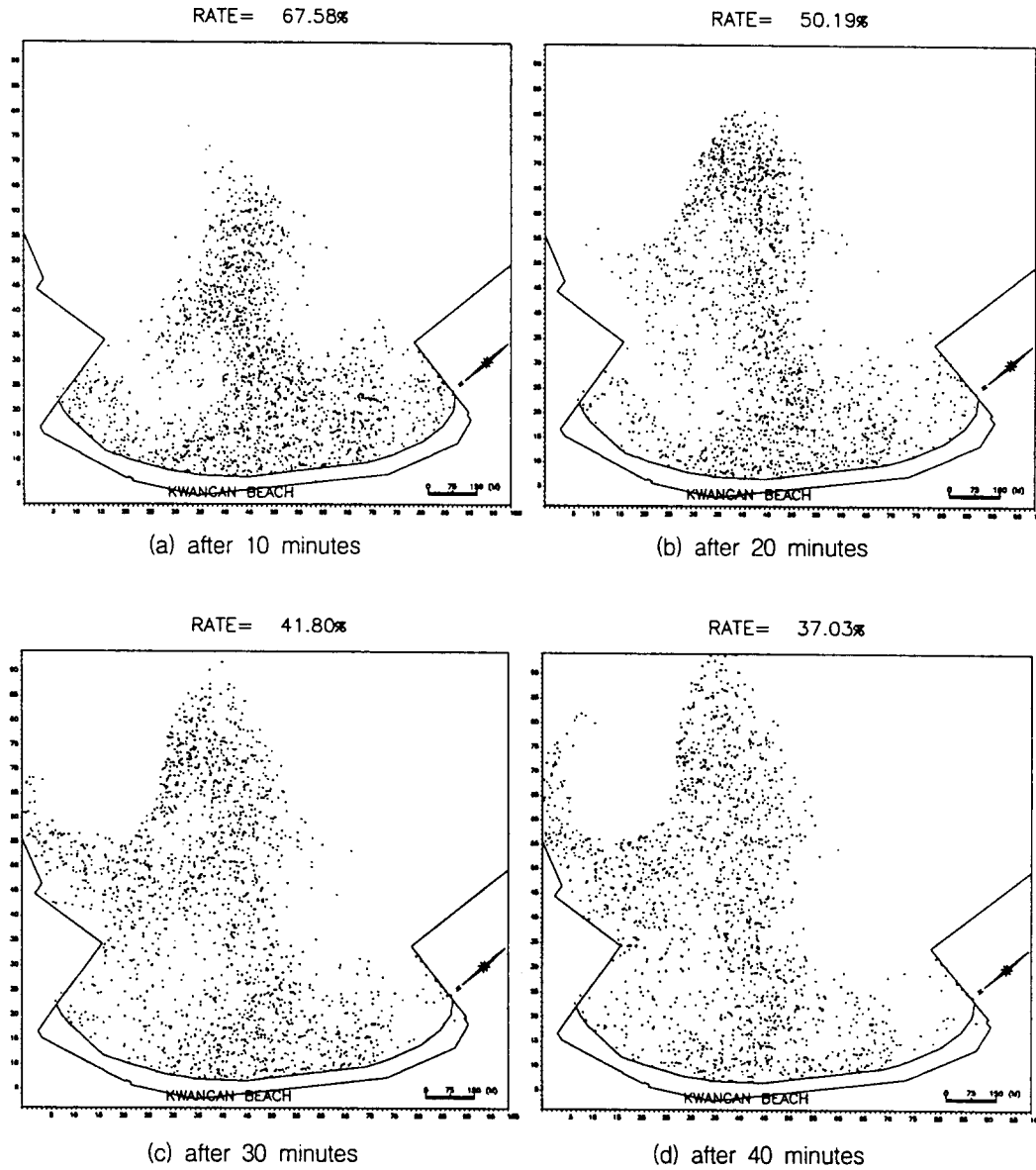


Fig. 5. Results of numerical calculation by the particle tracking model.

사를 고려함으로써, 물리적인 현상을 좀더 잘 재현할 수 있도록 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1). 해석해와 본 입자추적모델에 의한 확산 결과를 비교해 보면, 시간에 따라 최대농도가 나타나는 점이 유사하였으며 확산범위도 거의 일치하여, 본 입자추적모델은 실제수역에서의 수질예측에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

2). 폐경계에서의 반사조건을 고려하지 않은 경우와 반사경계를 설정한 경우를 비교해 보면, 전자의 경우에는 경계에서 입자가 정체될 뿐만 아니라, 구조물에 입자가 정체되어, 현상을 잘 재현하지 못하는 것으로 나타났으나, 반면에 폐경계에서의 처리를 반사하는 경계로 처리할 경우에는 비교적 현상을 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다.

3). 이 모델을 광안리 해수욕장을 대상으로 적용해 본 결과에 의하면 실제해역에서의 오염물질 확산에 따른 정성적인 현상을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

따라서 반사하는 경계를 도입한 입자추적법은, 해역의 수질변화를 예측하기 위한 모델로서 적절하다고 사료되므로, 연안의 오염물질 확산이나 해안공사시에 나타날 수 있는 수질의 변화, 부유사의 이동 등에 다양하고 폭넓게 적용가능할 것으로 생각된다. 그러나, 본 모델을 이용하여 실제해역에서 보다 신뢰성이 있는 예측결과를 얻기 위해서는 실측결과와의 비교를 통해 모델내의 파라메타에 대한 검증이 이루어져야 할 뿐만 아니라, 경계의 특성을 고려한 반사율에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

이은주·권정곤 : 수영만 해역의 오염물질 거동에 대한 수치평가모델의 개발, 대한환경공학회지, Vol. 17, No. 8, pp. 723~733, 1995

R.S. Chapman and M.S. Dortch : 3-D

Particle tracking for the New York bight, Estuarine and coastal modeling, 1992

Longuet-Higgins, M.S. : Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 2" Jour. of Geophysical Research, Vol. 75, No. 33, pp. 6790~6801, 1970

合田良實 : 海域における波浪の碎波變形, 港灣技術研究所報告, 第14卷, 第3號, 1975年, pp.59 ~106

高山, 池田, 永井 : 廣天端幅潛堤の越波低減效果に關する不規則波實驗, 第35回海岸工學講會論文集, pp. 587~591, 1988年.

西村仁嗣, 丸山康樹, 櫻井 力 : 海浜流の數値解析法について, 第31回海岸工學講演會論文集, pp. 396~400, 1984年.

西村仁嗣 : 岩石海岸における海浜流の數値モデル, 堀川清司編, 海岸環境工學センタ-報告, No.13, p. 140~147, 1981年

中辻 啓二, 末吉壽明, 山根伸之, 藤原建紀 : 三次元粒子追跡による流動構造の解明, 海岸工學論文集, 41卷, pp. 326~330, 1995年