

## 3차원 粘性土 輸送 모델의 開發과 水營灣의 부유물질 확산

## Development of Three-Dimensional Cohesive Sediment Transport Model and Diffusion of Suspended Sediment at Suyoung Bay

金次謙\* · 李宗燮\*\*

Kim, Cha Kyum · Lee, Jong Sup

## Abstract

Three-dimensional cohesive sediment transport model, COSETM-3, is developed using a finite difference method. The model results are compared with the physical experimental results for the relative concentration with time at the mid-depth of the recirculating flume and are found to be in good agreement. This model is applied to Suyoung Bay in Pusan of Korea to verify the field applicability of the model and to investigate on the SS (suspended solids) diffusion phenomena at the bay. Behaviors of discharging SS from Suyoung River at normal river flow and flood river flow are predicted. The numerical results appear to be reasonable and qualitative agreement with field data. The influence of settling velocity on the concentration distribution of SS is also investigated. In case of not considering settling velocity, SS concentration at surface layer is higher than that at lower layer, but in case of considering settling velocity, SS concentration at lower layer is higher than that at surface layer. The fluctuation of SS concentration at surface layer is large due to the strong mixing, but the fluctuation of the concentration at lower layer is small due to the weak mixing. SS diffusion patterns at flood river flow are similar to those at normal river flow, while the concentration at that flow is so much higher than that at this flow. SS concentration increases with time until the peak discharge occurs, but the concentration decreases with time with decreasing river flow after the peak discharge.

## 要 旨

유한차분법으로 3차원 점성토 수송 모델 COSETM-3을 개발하여 개수로의 중층에서 시간에 따른 부유물의 상대농도에 관한 實驗結果와 비교하였으며, 그 결과 잘 일치하였다. 모델의 現地 適用성과 水營灣의 SS(Suspended Solids) 확산을 조사하기 위해 大潮期 平水時와 洪水時에 모델을 수영만에 적용하여 水營江에서 유출되는 SS의 舉動을 해석하였으며, 그 결과 현지의 SS 거동을 정성적으로 잘 예측하였다. 침강속도가 SS의 농도분포에 미치는 영향에 대해서도 검토하였다. 沈降을 고려하지 않은 경우 SS 농도는 표층이 저층보다 높게 나타났으나, 沈降을 고려했을 경우에는 저층이 표층보다 높게 나타났다. 그리고, 표층에서는 활발한 해수교환으로 인해 SS의 변동폭이 크게 나타났으나, 저층에서는 海水交換이 약하기 때문에 SS의 변동폭이 상대적으로 작게 나타났다. 洪水時 SS 확산패턴은 平水時와 유사하게 나타났으나, SS 농도는 平水時보다 훨씬 높게 나타났다. 침투유량이 발생할 때까지 SS 농도는 점차 증가하였으나, 침투유량이 발생한 이 후부터 SS 농도는 流出量의 감소로 인해 점차 감소하였다.

\* 正會員 · 釜山水產大學校 海洋科學大學 海洋工學科 講師

\*\* 正會員 · 釜山水產大學校 海洋科學大學 海洋工學科 副教授

# 1. 緒 論

沿岸海域에서 준설이나 매립 등의 토목공사시나 홍수시 및 고파랑시에 발생한 浮遊粒子는 潮流 등의 흐름에 의해 周邊海域으로 수송되어 수질을 오염시키거나 항로를 매몰시키게 된다. 그래서, 수질오탁이나 항로매몰을 방지하기 위해서 浮遊物質의 거동을 예측하여야 한다. 이를 위해서는 SS(Suspended Solids)의 鉛直分布를 계산할 수 있는 모델이 요구된다. 沈降을 수반하는 SS의 擴散問題에 있어서는 沈降速度가 큰 역할을 한다. 입경이 1 $\mu\text{m}$  order에서는 沈降速度가 10<sup>-4</sup>cm/s order 정도로서 실질상 침강속도를 거의 무시할 수 있기 때문에 수평 2차원 모델에 의해 보존성 물질로 취급할 수 있다. 입경이 100 $\mu\text{m}$  order 에서의 沈降速度는 1cm/s order 정도이기 때문에 수심 20m에 대해 약 30분 전후에 沈降하게 된다. 그래서, SS의 확산에서 鉛直濃度分布 등의 3차원적인 취급을 필요로 하는 것은 이들 중간영역의 입경이다.

Farmer와 Waldrop<sup>(3)</sup>, Miller<sup>(6)</sup>는 3차원 부유사 수송에 관한 유한차분기법을 개발하였고, Spaulding과 Pavish<sup>(10)</sup>는 Eulerian-Lagrangian marker particle 기법에 근거한 모델을 개발하였으나, 이들은 불규칙한 지형에 대해서는 적용하지 않았다. Chiu<sup>(1)</sup>는 통계적인 접근방법에 의해 부유사 수송 모델을 개발하였고, O'Connor와 Nicholson<sup>(7)</sup>은 혼용된 explicit-implicit 차분기법을 사용하여 3차원 粘性土 輸送 모델을 제시하였다. Hayter와 Pakala<sup>(4)</sup>는 유한요소법을 이용한 3차원 점성토 수송 및 퇴적에 관한 모델을 개발하여 Sampit강에 적용하였다. Sheng<sup>(8,9)</sup>은 지형효과를 충분히 살릴 수 있도록  $\sigma$  좌표변환을 사용하여 유한차분법으로 粘性土 輸送 모델을 개발하여 Mississippi Sound에 적용하였다. 이밖에 堀口等<sup>(11,12,13)</sup>, 鶴谷等<sup>(14)</sup>, 柳等<sup>(15)</sup>, Lepetit와 Hauguel<sup>(5)</sup>, Dyer와 Evans<sup>(2)</sup>, 金次謙과 李宗燮<sup>(17)</sup> 등이 유한차분법을 이용하여 SS의 수송을 해석하였다.

이와 같이 3차원 浮遊物質輸送에 관한 연구는 1970년대 후반부터 활발하게 수행되어 왔으며, 수치해석방법으로는 양해법(explicit method)과 음해법(fully implicit method)이 사용되어 왔다. 현재에는 수치모델의 계산시간, 안정성 및 정확도 등의 향상이

주요 관심사로 대두되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 현재까지 3차원 모델에서는 사용되지 않은 반음해법(semi-implicit method)인 ADI 기법으로 3차원 浮遊物質輸送을 해석하기 위한 수치적 알고리즘을 개발하여 수리실험결과와 비교·검증한 후 水營灣에 적용하여 모델의 현지 적용성을 검토하고자 한다.

## 2. 모델의 開發

### 2.1 基本方程式과 境界條件

3차원 浮遊物質의 輸送에 관한 기본방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(hc)}{\partial t} + \frac{\partial(huc)}{\partial x} + \frac{\partial(hvc)}{\partial y} + \frac{\partial\{h(w+W_s)c\}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(k_x h \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y h \frac{\partial c}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z h \frac{\partial c}{\partial z}) + SST \quad (1)$$

여기서, t=시간, u, v, w=각각 x,y 및 z 방향의 유속, c=부유물질의 농도, h=수심(표층에서는 h=h<sub>1</sub>+ $\zeta$ ), h<sub>1</sub>=표층두께,  $\zeta$ =수면의 승강량, k<sub>x</sub>, k<sub>y</sub>, k<sub>z</sub>=x,y 및 z 방향의 확산계수, W<sub>s</sub>=부유물질의 침강속도, SST=퇴적율과 침식율을 나타내는 sink or source 성분이다. 浮遊物質의 沈降速度 W<sub>s</sub>는 金次謙과 李宗燮<sup>(18)</sup>의 순환식 개수로에서의 실험결과인 실트질 점토의 걸보기 中央沈降速度(W<sub>so'</sub>)인 식 (2)를 사용하였고, 浮遊物質의 鉛直擴散係數 k<sub>z</sub>는 金次謙과 李宗燮<sup>(19)</sup>의 파동장에서의 실험결과인 식 (3)과 (4)를 사용하였다.

$$W_{so}' = 2.35C_o^{0.25} \exp(-8.9\tau_b) \left\{ \exp\left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{bmax}}\right) - 1 \right\} \cdot 10^{-3} (\text{mm/s}), \tau_b \geq \tau_{bmin} \quad (2)$$

$$k_z = \kappa U_* z e^{-1.6z/h}, z/h \leq 0.5 \quad (3)$$

$$k_z = 0.24 \kappa U_* h, z/h > 0.5 \quad (4)$$

여기서,  $\tau_b$ =저면전단응력(N/m<sup>2</sup>), C<sub>o</sub>=부유물질의 초기농도(mg/l),  $\tau_{bmax}$ =퇴적한계 최대저면전단응력,  $\tau_{bmin}$ =퇴적한계 최소저면전단응력,  $\kappa$ =Karman 상수(=0.4), h=수심, U<sub>\*</sub>=마찰속도, z=저면으로부터 높이이다.

3차원 부유물질의 수송모델에서 제 경계조건은 다음과 같다.

1) 海面

水面을 통한 퇴적물의 수송은 없는 것으로 하였다. 즉, 상방향으로의 확산율과 하방향으로의 침강률이 같다.

$$(w+W_s) c - k_z \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

2) 底面

底面에서 net flux 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$W_s c - k_z \frac{\partial c}{\partial z} = D - E \quad (6)$$

여기서, D=단위면적당 부유물의 퇴적물(kg/m<sup>2</sup>/s), E=단위면적당 저지의 부상물(kg/m<sup>2</sup>/s)이다. 퇴적물 D는 다음과 같이 정의하고, 부상물 E는 본 연구에서 고려하지 않았다.

$$D = -W_s c_b = -W_s \bar{c} \quad (7)$$

여기서, c<sub>b</sub>=저면 부근에서 퇴적물의 농도,  $\bar{c}$ =최하층에서 퇴적물의 평균농도, β=최하층에서 퇴적물의 평균농도  $\bar{c}$ 로부터 저면부근에의 농도를 환산하기 위한 계수(=5.0)이다.

2.2 有限差分方程式과 數値解法

본 모델은 金次謙<sup>(16)</sup>이 사용한 해수유동 좌표계와 동일한 그림 1의 유한차분격자상에서 ADI 법으로 해석하였다. 전반 시간단계 (n+1/2)Δt에서는 x축 방향으로 적분하여 식 (1)의 좌변 제 1항, 2항 및 우변 제 1항만 ζ, u, c에 대하여(n+1/2)Δt 시간단계의 값을 취하고, 그 외의 항에 대해서는 nΔt 시간단계의 값을 취한다. 후반 시간단계 (n+1)Δt에 대해서는 y축 방향으로 적분하여 식 (1)의 좌변 제 1항, 3항 및 우변 제 2항의 ζ, v, c에 대해 (n+1)Δt 시간단계의 값을 취하고, 그 외의 항에 대해서는 (n+1/2)Δt 시간단계의 값을 취한다. 이와 같이 하여 농도 c를 1/2Δt 시간단계마다 x, y 방향으로 반복 하면서 저층부터 표층까지 수치적분하여 계산한다. 유속 u, v 및 w는 金次謙<sup>(16)</sup>의 3차원 해수유동해석 결과를 입력자료로 사용한다.

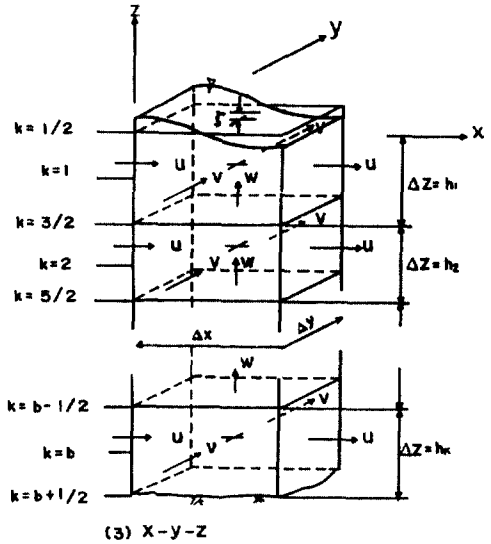
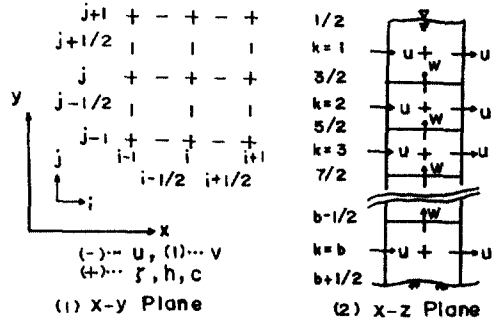


그림 1. 3차원 모델의 좌표계와 변수들의 위치

따라서, 전반 시간단계 (n+1/2)Δt에서 점(i,j,k)의 농도 c<sub>ijk</sub><sup>n+1/2</sup>은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} & (c_{ijk}^{n+1/2} h_{ijk}^{n+1/2} - c_{ijk}^n h_{ijk}^n) \\ & + \frac{\Delta t}{2\Delta x} (h_{ijk}^{n+1/2} u_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} c_{i+1,j,k}^n - h_{i-1/2,j,k}^{n+1/2} u_{i-1/2,j,k}^{n+1/2} c_{i-1,j,k}^{n+1/2}) \\ & + \frac{\Delta t}{2\Delta y} (h_{i,j,k}^{n+1/2} v_{i,j+1/2,k}^n c_{i,j+1,k}^n - h_{i,j-1/2,k}^{n+1/2} v_{i,j-1/2,k}^n c_{i,j-1+d,k}^n) \\ & + \frac{\Delta t}{2} \{ (w_{i,j,k-1/2}^n + W_s) c_{i,j,k-e}^n - (w_{i,j,k+1/2}^n + W_s) c_{i,j,k+1-l}^n \} \\ & - \frac{\Delta t}{2\Delta x^2} \{ h_{ijk}^{n+1/2} (k_x)_{ijk}^{n+1/2} (c_{i-1,j,k}^{n+1/2} - c_{ijk}^{n+1/2}) \} \\ & + \frac{\Delta t}{2\Delta x^2} \{ h_{i-1,j,k}^{n+1/2} (k_x)_{i-1,j,k}^{n+1/2} (c_{ijk}^{n+1/2} - c_{i-1,j,k}^{n+1/2}) \} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\Delta t}{2\Delta y^2} \{h_{i,j,k}^n (k_y)_{i,j,k}^n (c_{i+1,k}^n - c_{i,j,k}^n)\} \\
& + \frac{\Delta t}{2\Delta y^2} \{h_{i,j-1,k}^n (k_y)_{i,j-1,k}^n (c_{i,j,k}^n - c_{i,j-1,k}^n)\} \\
& - \frac{\Delta t}{2} \left\{ (k_z)_{i,j,k} \frac{(c_{i,j,k-1}^n - c_{i,j,k}^n)}{\Delta z} - (k_z)_{i,j,k+1} \frac{(c_{i,j,k}^n - c_{i,j,k+1}^n)}{\Delta z} \right\} \\
& - \frac{\Delta t}{2} SST=0 \quad (8)
\end{aligned}$$

여기서, 아래첨자 a, b, c, d, e 및 f는 上流差分(up wind difference)을 취하기 위한 파라메타로서 0 또는 1의 값을 갖는다. 즉, 이에 대한 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
a=0 & \text{ if } u_{i+1/2,j,k}^n \geq 0, & a=1 & \text{ if } u_{i+1/2,j,k}^n < 0 \\
b=0 & \text{ if } u_{i-1/2,j,k}^n \geq 0, & b=1 & \text{ if } u_{i-1/2,j,k}^n < 0 \\
c=0 & \text{ if } v_{i,j+1/2,k}^n \geq 0, & c=1 & \text{ if } v_{i,j+1/2,k}^n < 0 \\
d=0 & \text{ if } v_{i,j-1/2,k}^n \geq 0, & d=1 & \text{ if } v_{i,j-1/2,k}^n < 0 \\
e=0 & \text{ if } (w_{i,j,k-1/2}^n + W_s) \geq 0, & e=1 & \text{ if } (w_{i,j,k-1/2}^n + W_s) < 0 \\
f=0 & \text{ if } (w_{i,j,k+1/2}^n + W_s) \geq 0, & f=1 & \text{ if } (w_{i,j,k+1/2}^n + W_s) < 0
\end{aligned}$$

식 (8)을 농도 c에 관하여 다시 정리하면 식 (9)와 같다.

$$aa_{i,j,k}^{n+1/2} c_{i,j,k}^{n+1/2} + ab_{i,j,k}^{n+1/2} c_{i+1,j,k}^{n+1/2} + ac_{i,j,k}^{n+1/2} c_{i+1,j,k}^{n+1/2} = ad_{i,j,k}^n \quad (9)$$

차분방정식의 유도과정과  $aa_{i,j,k}^{n+1/2}$ ,  $ab_{i,j,k}^{n+1/2}$ ,  $ac_{i,j,k}^{n+1/2}$ ,  $ad_{i,j,k}^n$ 에 대한 정의는 金次謙<sup>(16)</sup>의 논문에 수록되어 있다.

여기서,  $c_{i,j,k}^{n+1/2}$  을 기지라 하면 다음식이 얻어진다.

$$c_{i,j,k}^{n+1/2} = E_{i+1,j,k}^{n+1/2} c_{i+1,j,k}^{n+1/2} + Q_{i+1,j,k}^{n+1/2} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } E_{i+1,j,k}^{n+1/2} = - \frac{ac_{i,j,k}^{n+1/2}}{ab_{i,j,k}^{n+1/2}}$$

$$Q_{i+1,j,k}^n = \frac{ad_{i,j,k}^n - aa_{i,j,k}^{n+1/2} c_{i-1,j,k}^{n+1/2}}{ab_{i,j,k}^{n+1/2}} \quad (11)$$

다음에 식 (9)에서 i를 i+1로 치환하면

$$aa_{i+1,j,k}^{n+1/2} c_{i+1,j,k}^{n+1/2} + ab_{i+1,j,k}^{n+1/2} c_{i+2,j,k}^{n+1/2} + ac_{i+1,j,k}^{n+1/2} c_{i+2,j,k}^{n+1/2} = ad_{i+1,j,k}^n \quad (12)$$

식 (12)에 식 (10)을 대입하면

$$aa_{i+1,j,k}^{n+1/2} (E_{i+1,j,k}^{n+1/2} c_{i+1,j,k}^{n+1/2} + Q_{i+1,j,k}^{n+1/2}) + ab_{i+1,j,k}^{n+1/2} c_{i+2,j,k}^{n+1/2} + ac_{i+1,j,k}^{n+1/2} c_{i+2,j,k}^{n+1/2} = ad_{i+1,j,k}^n \quad (13)$$

$$(aa_{i+1,j,k}^{n+1/2} E_{i+1,j,k}^{n+1/2} + ab_{i+1,j,k}^{n+1/2}) c_{i+1,j,k}^{n+1/2} = -ac_{i+1,j,k}^{n+1/2} c_{i+2,j,k}^{n+1/2} + ad_{i+1,j,k}^n - aa_{i+1,j,k}^{n+1/2} Q_{i+1,j,k}^{n+1/2} \quad (14)$$

$$c_{i+1,j,k}^{n+1/2} = E_{i+1,j,k}^{n+1/2} c_{i+2,j,k}^{n+1/2} + Q_{i+1,j,k}^{n+1/2} \quad (15)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
E_{i+1,j,k}^{n+1/2} &= - \frac{ac_{i+1,j,k}^{n+1/2}}{ab_{i+1,j,k}^{n+1/2} + aa_{i+1,j,k}^{n+1/2} E_{i+1,j,k}^{n+1/2}} \\
Q_{i+1,j,k}^{n+1/2} &= \frac{ad_{i+1,j,k}^n - aa_{i+1,j,k}^{n+1/2} Q_{i+1,j,k}^{n+1/2}}{ab_{i+1,j,k}^{n+1/2} + aa_{i+1,j,k}^{n+1/2} E_{i+1,j,k}^{n+1/2}} \quad (16)
\end{aligned}$$

따라서, 식 (15)에서 i+1을 i로, i+2를 i+1로 치환하면  $c_{i,j,k}^{n+1/2}$ 은 다음과 같이 된다.

$$c_{i,j,k}^{n+1/2} = E_{i+1,j,k}^{n+1/2} c_{i+1,j,k}^{n+1/2} + Q_{i+1,j,k}^{n+1/2} \quad (17)$$

여기서,  $E_{i+1,j,k}^{n+1/2}$ 과  $Q_{i+1,j,k}^{n+1/2}$ 은 식(16)에서 i+1을 i로, i+2를 i+1로 치환했을 때의 값을 나타낸다. 후반 시간단계 (n+1)Δt에 대해서는 x를 y로, u를 v로 치환하여 전반 시간단계와 동일한 방법으로 하면 된다. 이와 같이 전반과 후반의 시간단계를 Δt 시간씩 증가시키면서 연속적으로 반복하여 원하는 시간까지 계산한다. 이상의 計算過程에 의해 농도 c를 저층부터 표층까지 수치적분함으로써 3차원 浮遊物質의 輸送을 해석하는 프로그램 COSETM-3 (Cohesive Sediment Transport Model - 3 dimension)을 개발하였다.

### 2.3 水理實驗結果와 比較

COSETM-3을 연직2차원 水槽(그림 2)에 적용하여 沈降實驗結果<sup>(18)</sup>와 수치모델결과의 비교로서 모델의 정확도 및 안정성을 검증하고자 한다. 수평격자간격은 Δx=1m, 연직간격은 Δz=0.05m, 시간간격은 Δt=1초로 하였다.

검증은 初期濃度 C<sub>0</sub>=2,338 mg/l, 底面剪斷應力 τ<sub>0</sub>=0.305 N/m<sup>2</sup>인 경우에 대해 하였으며, 流速의

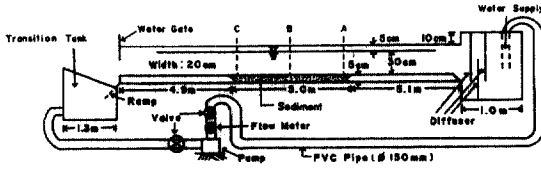


그림 2. 순환식 개수로 실험장치의 구조도

연직분포는 실험결과<sup>(18)</sup>에 근거하여 對數分布로 주었다. 농도의 주입방법은 전 수조에서 초기농도로 균일하게 한 다음 수조의 하류단으로 흘러나온 농도가 동일한 농도로 상류단으로 유입하는 것으로 하였다. 본 검증에서는 沈降實驗結果<sup>(18)</sup>와 비교·검토하기 위해 浮上은 고려하지 않고 沈降만 고려하였으며, 計算條件은 표 1과 같다.

표 1. 순환식 개수로에서 부유물질 수송의 계산조건

변 수	사용된 값
수평격자간격	$\Delta x = 1 \text{ m}$
연직격자간격	$\Delta z = 0.05 \text{ m}$
시간간격	$\Delta t = 1 \text{ sec}$
수평와동확산계수	$k_x = 1 \text{ m}^2/\text{s}$
연직와동확산계수	식 (3)과 (4)
초기농도	$C_0 = 2,338 \text{ mg/l}$
저면전단응력	$\tau_b = 0.305 \text{ N/m}^2$
침강속도	식 (2)

이상의 計算條件 및 方法에 의해 그림 2의 C점의 中層에서 計算된 結果를 水理實驗結果와 함께 그림 3에 나타냈다. 시간의 경과에 따른 농도의 감소현상이 수치실험결과와 거의 유사하게 나타났다. 沈降實驗에서 濃도의 鉛直分布差가 아주 작고, 또한 中層에서 濃도가 鉛直平均濃度로 거의 대표되는 것으로 나타났기 때문에 본 연구에서는 中層에 대해서만 서로 비교하였다.

### 3. 水營灣의 浮遊物質 擴散特性

#### 3.1 計算條件

본 연구에서 개발된 모델 COSETM-3을 水營灣(그림 4)에 적용하여 平水時와 50년 빈도의 洪水時에 水營江에서 유출되는 부유물질(SS)의 확산을 예측

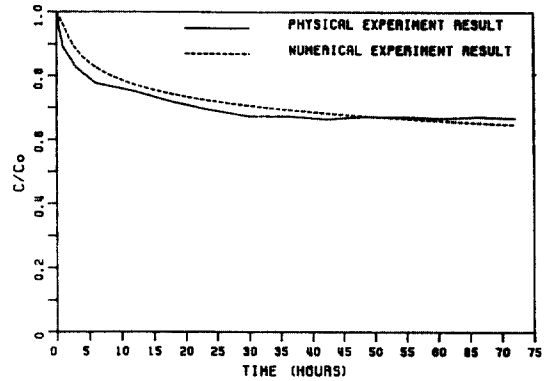


그림 3. 증층에서 시간에 따른 상대농도 C/C<sub>0</sub>의 비교

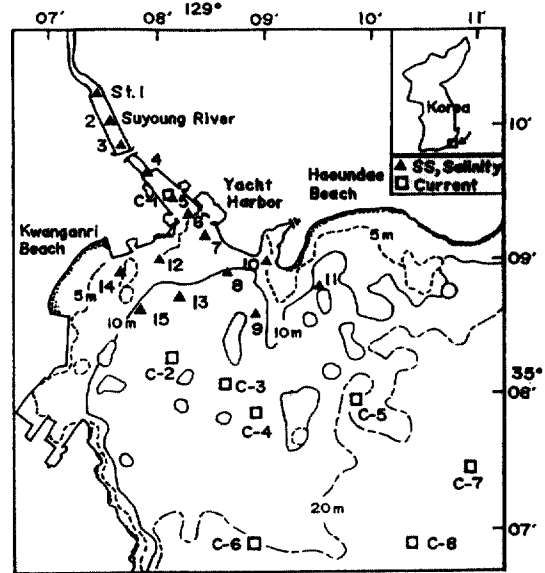


그림 4. 수영만의 수심도

하였다. 이 때 流動場은 金次謙<sup>(16)</sup>에 의한 해수유동 모델 BACHOM-3을 이용하여 계산한 결과를 사용하였다. 平水時에는 i) 沈降速度가 없고, 저면에서 net flux가 없는 경우, ii) 沈降速度를 고려하여 저면에서 퇴적만 일어나는 경우에 대해 수치실험하였다. 洪水時에는 沈降速度를 고려하여 저면에서 퇴적만 일어나는 경우에 대해서만 수치실험하였다.

平水時와 洪水時 동일하게 水營江 상류단에서 SS 농도로 100 mg/l가 연속적으로 투입되는 것으로 하였고, 전 영역에서 SS의 초기농도는 10 mg/l인 것으로 하였다. 계산시간간격은  $\Delta t = 150$  초, 수평

격자간격은  $\Delta x = \Delta y = 150$  m이고, 연직방향으로는 4층으로 분할하였다. 수평확산계수  $k_x$ 와  $k_y$ 는 金次謙과 李宗燮<sup>(20)</sup>의 현지관측결과에 근거하여  $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 를 사용하였고, 연직확산계수는 식 (3)과 (4)를 사용하였다. 沈降速度는 식 (2)를 사용하였으며, SS의 확산에 사용된 계산조건 및 제 계수들의 값은 표 2와 같다.

표 2. 수영장에서 부유물질 수송의 계산조건

변 수	사용된 값
수평격자간격	$\Delta x = \Delta y = 150 \text{ m}$
연직격자간격	Level 1 : 2 m(0~2 m) Level 2 : 3 m(2~5 m) Level 3 : 4 m(5~9 m) Level 4 : 9 m 이하
시간간격	$\Delta t = 150 \text{ sec}$
수평확산계수	$k_x = k_y = 10 \text{ m}^2/\text{s}$
연직확산계수	식 (3)과 (4)
침강속도	식 (2)
개경계에서 SS 유입농도	10 mg/l
초기 SS 농도	10 mg/l
수영장에서 유출되는 SS 농도	100 mg/l

본 연구에서 사용한 沈降速度나 鉛直擴散係數는 황해안 영광해역 퇴적물에 대한 실험결과이다. 따라서, 모델의 現地 適用性도 영광 해역에 대하여 검토해야 하지만, 관측자료의 결핍으로 인해 水營灣에 적용하였다. 또한, 水營江에서 유출되는 SS는 주로 공장폐수나 생활배수로 구성되 있기 때문에<sup>(20)</sup> 본 수치실험에서 사용한 계산조건과는 성질이 다르다. 그러나, 沿岸海域에 분포하는 SS의 粒徑과 鑛物成分은 장소마다 다르고, 또한 염분에 따라서도 응집현상이 다르기 때문에 그 특성을 장소마다 다 고려하는 것은 곤란하다. 따라서, 본 연구에서는 水營江에서 粘性土 100 mg/l이 연속적으로 유출된다는 가정 하에서 浮遊泥의 擴散特性을 해석하였다.

### 3.2 結果 및 考察

#### 1) 平水時 擴散特性

본 모델을 水營灣에 적용하여 沈降을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대해 각각 계산하였다.

평수시 수영장의 유출량은 부산시<sup>(21)</sup>의 조사보고에 의해  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 하였다. 전 영역에서 초기농도는  $10 \text{ mg/l}$ 로 일정하게 하고, 水營江 상류단에서 浮遊泥가  $100 \text{ mg/l/s}$  유입하는 것으로 하여 계산하였다. 沈降을 고려하지 않은 경우 그림 4의 St. 5에서 76시간부터 126시간까지 계산된 결과를 그림 5에 나타냈다. 그림 5에서 실선은 level 1에서의 결과이고, 점선은 level 2에서의 결과이다. level 1에서는 활발한 海水交換으로 인해 SS의 변동이  $10 \sim 15 \text{ mg/l}$ 로 비교적 크게 나타났으나, level 2에서는 해수의 연직교환이 약하기 때문에 SS의 변동이  $10 \sim 12 \text{ mg/l}$ 로 비교적 작게 나타났다. 이것은 水營江에서 유출하는 SS가 level 1에만 국한되고, level 2에서 SS 농도의 변동은 연직혼합에 의해서만 지배되기 때문이다.

沈降을 고려하지 않은 경우 SS의 水平的 擴散特性을 알아보기 위해 level 1과 level 2에서 계산된 결과를 그림 6에 나타냈다. 平水時 SS의 확산은 level 1과 level 2에 거의 국한되기 때문에 본 연구에서는 level 1과 level 2에서의 결과만 나타냈다. 그림 6의 (a)는 落潮流時(고조 4시간 후) level 1에서 계산된 결과이고, (b)는 落潮流時 level 2에서 계산된 결과이다. 그림 6의 (c)는 漲潮流時(저조 4시간 후) level 1에서 계산된 결과이고, (d)는 漲潮流時 level 2에서 계산된 결과이다. level 1과 level 2에서 SS의 확산패턴은 조류의 방향에 따라 漲潮流時에는 광안

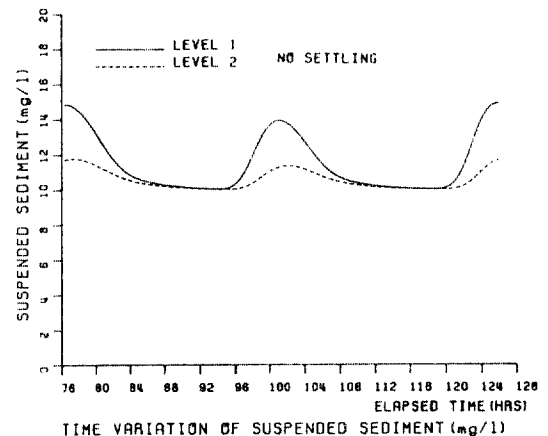
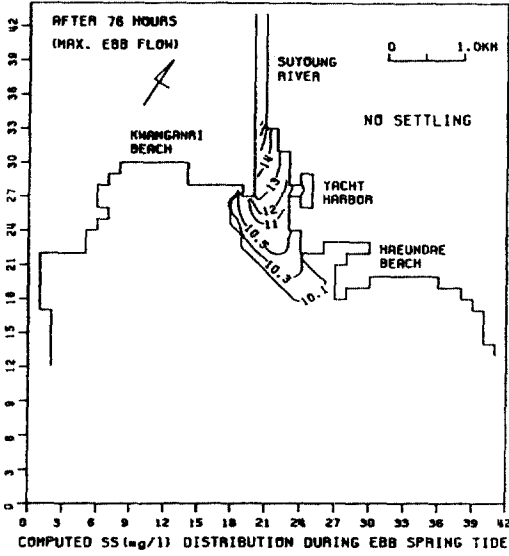
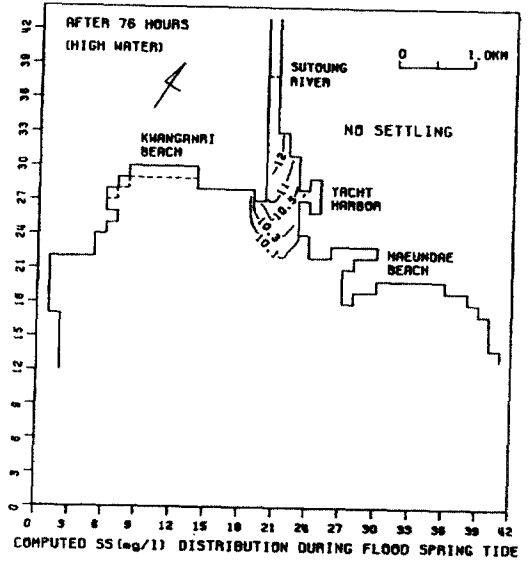


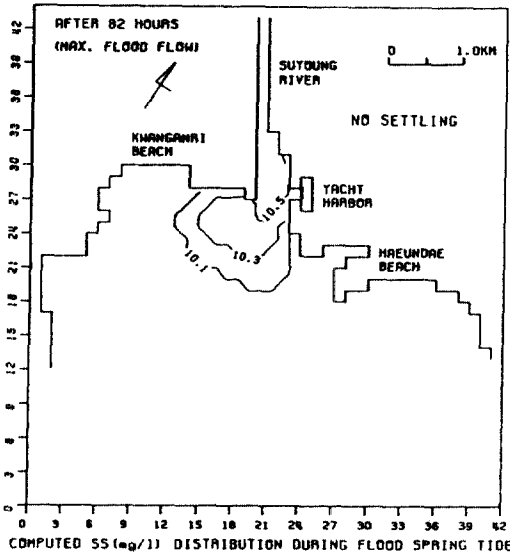
그림 5. 대조기 평수시 침강효과를 고려하지 않았을 경우 St.5에서 계산된 부유물질의 시간적 변화



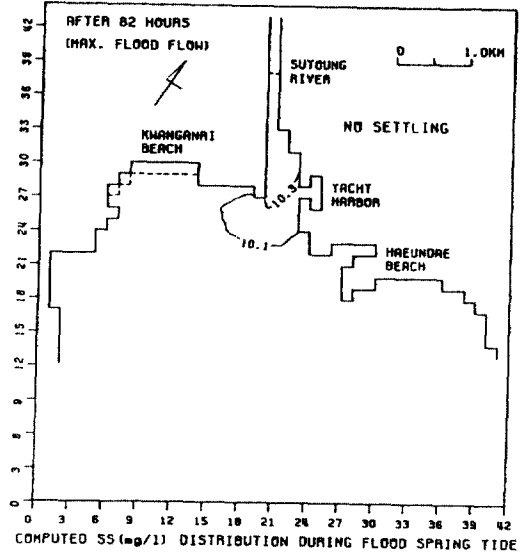
(a) Ebb flow at level 1



(b) Ebb flow at level 2



(c) Flood flow at level 1



(d) Flood flow at level 2

그림 6. 대조기 평수시 침강효과를 고려하지 않았을 경우 부유물질의 농도분포

리 해수욕장 방향으로 확산되고, 落潮流時에는 해운대 해수욕장 방향으로 擴散되는 양상을 보여주고 있다. 沈降效果를 고려하지 않았을 경우, 落·漲潮流時 동일하게 level 1에서 농도가 level 2에서의 농도보다 높고, 또한 擴散範圍도 넓게 나타났다.

沈降을 고려한 경우 그림 4의 St. 5에서 76시간 부터 126시간까지 계산된 결과를 그림 7에 나타냈다. 그림에서 실선은 level 1에서 계산된 결과이고, 점선은 level 2에서 계산된 결과이다. 沈降을 고려하지 않은 경우와는 대조적으로 SS의 농도는 level 2에서

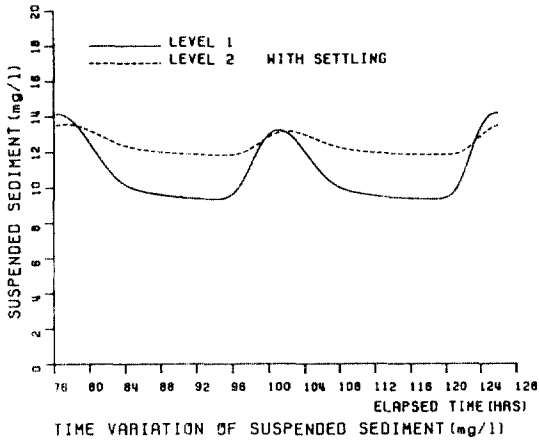


그림 7. 대조기 평수시 침강효과를 고려했을 경우 St. 5에서 계산된 부유물질의 시간적 변화

높고, level 1에서 낮게 나타났다. 고조 약 4시간 후부터 저조에 이르기까지는 level 1의 농도가 level 2의 농도보다 다소 높거나 거의 같고, 저조부터 고조에 이르기까지는 level 2의 농도가 level 1의 농도보다 높다. 이것은 level 1에서는 고조부터 저조에 이르기까지 水營江에서 流出되는 SS의 영향을 크게 받기 때문에 SS 농도가 높게 나타났고, 저조부터 고조에 이르기까지는 외해수의 유입으로 인해 SS의 농도가 희석되기 때문에 SS 농도가 낮게 나타났다. level 2에서 SS 농도는 level 1에서 沈降된 SS로 인해 전반적으로 level 1의 농도보다 높게 나타났으나, SS의 변동폭은 작다. level 2에서 SS의 변동폭이 작은 것은 海水交換이 잘 일어나지 않기 때문인 것으로 생각된다.

沈降을 고려한 경우 SS의 수평적 분포를 그림 8에 나타냈다. level 1에서는 沈降效果를 고려하지 않은 경우보다 SS의 농도가 낮고, 擴散範圍도 좁게 나타났으나, level 2에서는 SS의 沈降으로 인해 沈降效果를 고려하지 않은 경우보다 SS의 농도가 높고, 확산범위도 넓게 나타났다. 침강효과를 고려하지 않은 경우와는 상반되게 落·漲潮流時 동일하게 level 2에서 농도가 level 1에서의 농도보다 높고, 또한 확산범위도 넓다. SS의 확산패턴은 조류 및 유출수의 이동방향에 따라 낙조류시에는 해운대 해수욕장, 창조류시에는 광안리 해수욕장 방향으로 확산되었으며, 이와 같은 현상은 金次謙과 李宗燮<sup>(20)</sup>의 현지

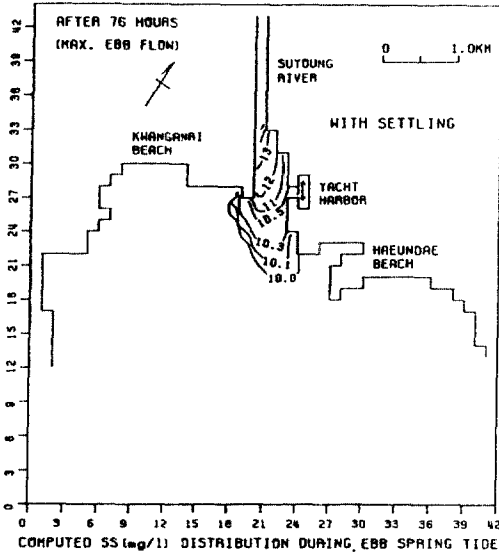
관측결과인 그림 9의 확산형태와 유사하다. 平水時 SS의 현지관측 및 수치계산결과에 의하면, 水營江 河口에서 SS 농도는 낙조류시에 높고, 창조류시에 낮게 나타났다. 이 결과로부터 水營江 河口의 SS는 주로 하천에서 유출되는 성분으로 구성되어 있다는 것을 알 수 있다.

그리고, 流出水의 擴散을 보다 시각적으로 선명하게 알아보기 위해 1989년 12월 15일 부산시에서 항공촬영한 사진을 그림 10에 나타냈다. 중랑기상대 부산측후소에서 측정한 강우량 기록표에 의하면, 1989년 12월 13일 13.0 mm의 降水量을 기록하고 있다. 하구역에서 전선이 해운대 해수욕장 방향으로 형성되어 있다. 이와 같은 현상은 現地觀測과 數值計算에 의한 落潮流時의 SS 확산패턴과 유사하다.

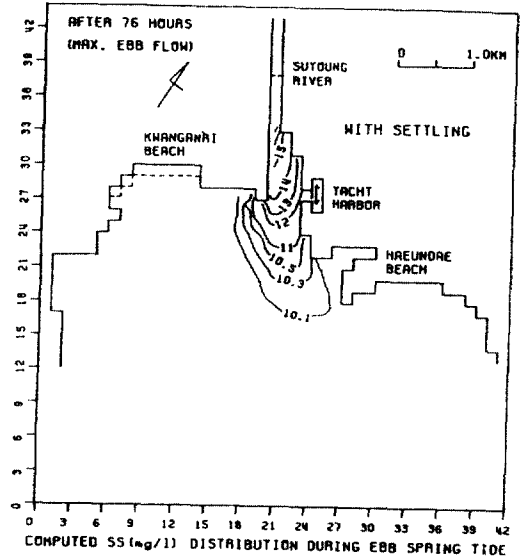
## 2) 洪水時 擴散特性

洪水時에는 沈降을 고려한 경우에 대해서만 SS 확산을 수치실험하였다. 수영강의 홍수량은 부산시<sup>(21)</sup>의 조사보고에 의해 50년 빈도의 설계홍수량인 1,130 m<sup>3</sup>/s를 사용하였다. 설계홍수량에 대한 홍수 수문곡선은 Nakayasu의 단위유량도로 주었으며<sup>(16)</sup>, 고조시를 시점으로 하여 25시간 연속방출하는 것으로 하였고, 침투유량은 저조시(방출 6시간 후)에 발생하도록 하였다. 시간에 따른 확산특성을 平水時의 경우와 비교하기 위해 level 1과 level 2에서 계산된 결과를 그림 11~12에 나타냈다. 유출 6시간 후에는 SS 농도 10.1 mg/l의 等濃度線이 우단 개경계까지 이르고 있다. 유출 6시간 후(저조시)까지는 level 1에서의 농도가 level 2에서의 농도보다 높고, 또한 확산범위도 넓다. 그리고, 유출 6시간 후까지는 유출량의 증대로 인해 level 1과 level 2의 河口域에서 SS 농도가 증가하였다. 유출 9시간 후(창조류)에는 SS 농도 10.1 mg/l의 等濃度線이 이미 外海 開境界面을 넘어섰고, 이 때부터 河口域에서는 level 2에서의 농도가 level 1에서의 농도보다 높게 나타났다. 유출 9시간 후 level 1에서의 SS 농도는 유출 6시간 후 level 1에서의 농도보다 낮게 나타났으나, 유출 9시간 후 level 2에서의 SS 농도는 유출 6시간 후 level 2에서의 농도보다 높게 나타났으나, 유출 6시간 이 후부터는 유출량의 감소로

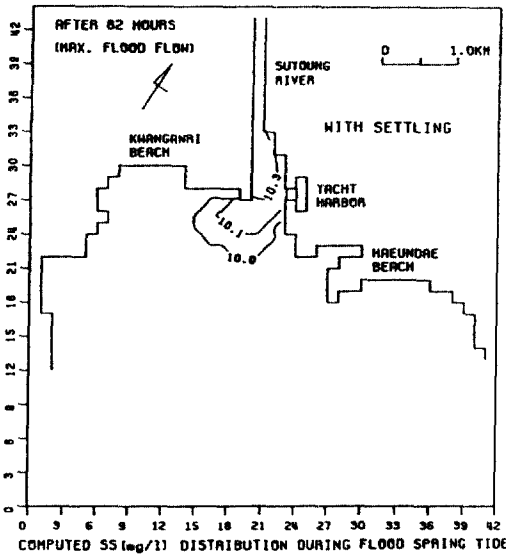




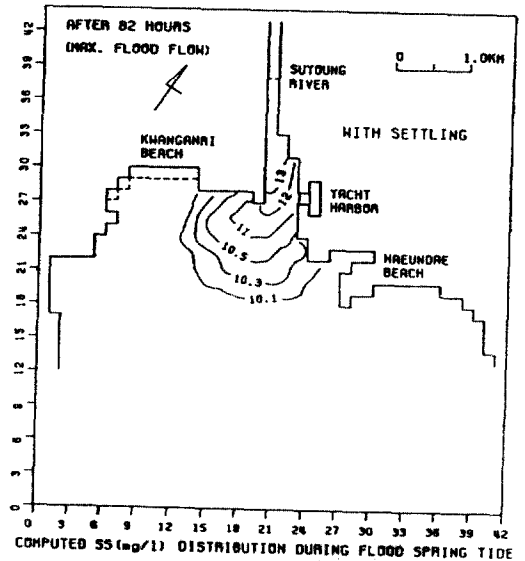
(a) Ebb flow at level 1



(b) Ebb flow at level 2



(c) Flood flow at level 1



(d) Flood flow at level 2

그림 8. 대조기 평수시 침강효과를 고려했을 경우 부유물질의 농도분포

인해 level 1에서는 SS 농도가 점차 감소하게 된다. 한편, level 2에서 SS 농도는 SS의 沈降으로 인해 유출 9시간 후가 유출 6시간 후보다 높게 나타났다. 流出 12시간 후(고조시)에는 유출 9시간 후에 비해 流出量의 감소로 인해 河口域에서 SS 농도가 낮게

나타났다.

洪水時 SS 擴散에 대한 수치계산결과에 의하면, 落潮流時와 漲潮流時의 확산패턴은 平水時와 유사하게 나타났으나, 하구역에서 SS 농도는 平水時보다 훨씬 높게 나타났다. 침두유량이 발생할 때(저조시)

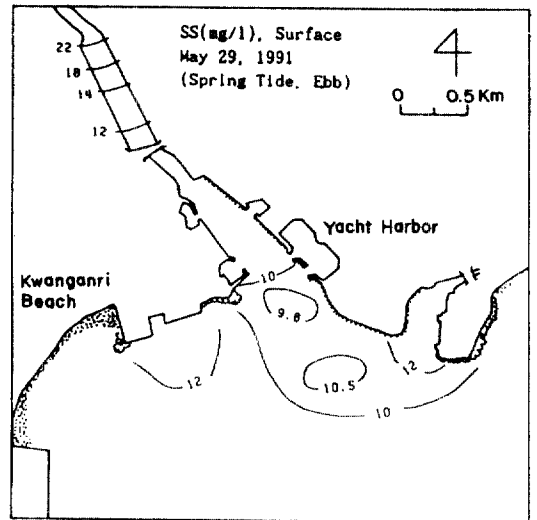
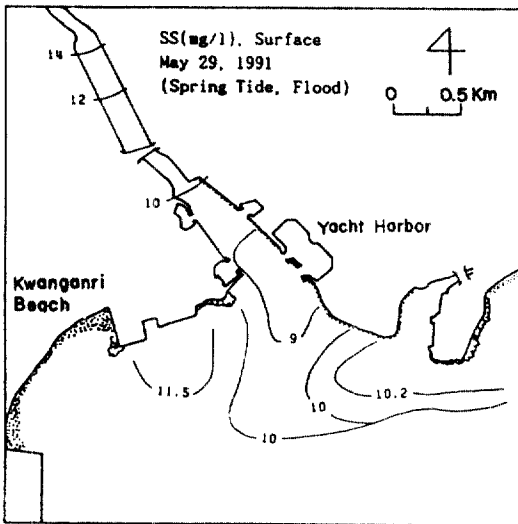
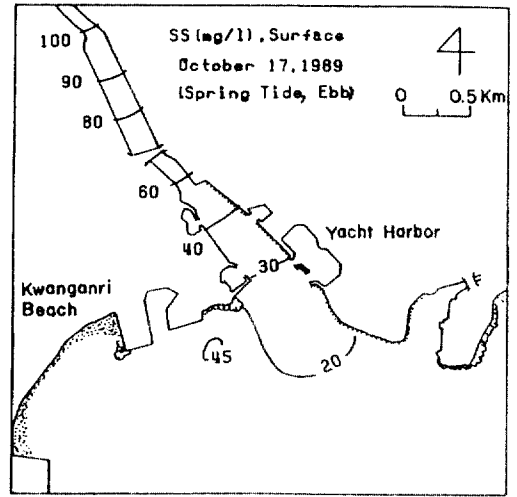
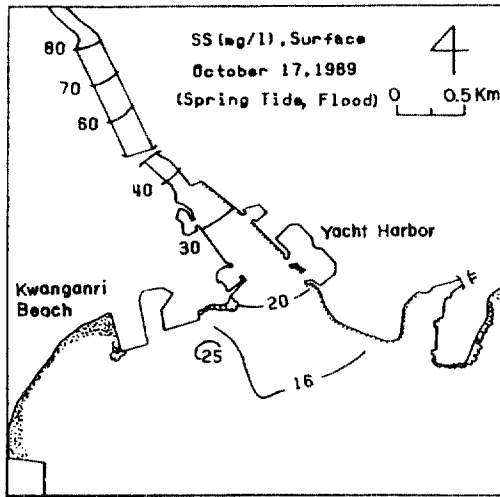
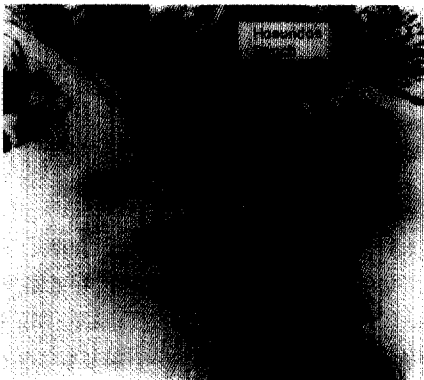
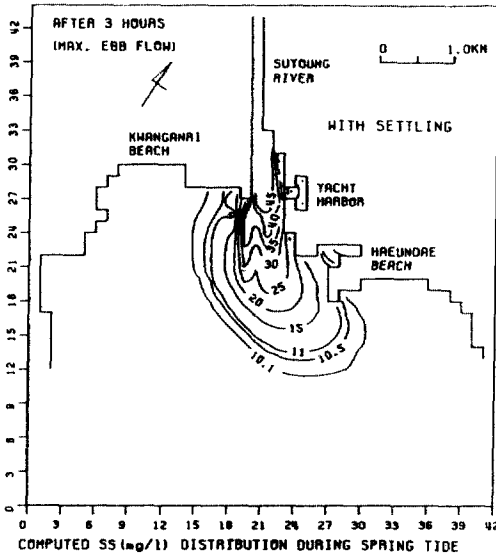


그림 9. 수영만에서 관측된 부유물질의 농도분포

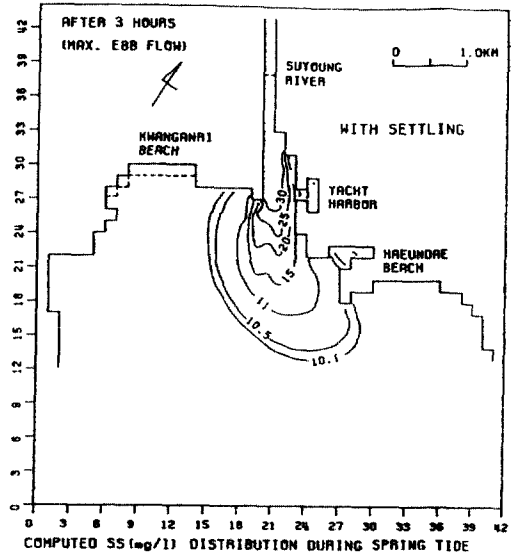


까지는 level 1과 level 2에서의 SS 농도는 점차 증가하였고, level 1에서의 농도가 level 2에서의 농도보다 높게 나타났다. 그러나, 침투유량이 발생한 이 후부터는 level 2에서의 농도가 level 1에서의 농도보다 높고, 擴散範圍는 이 전보다 훨씬 넓다. SS 농도는 침투유량이 발생한 이 후부터는 유출량의 감소로 인해 점차 감소하였다.

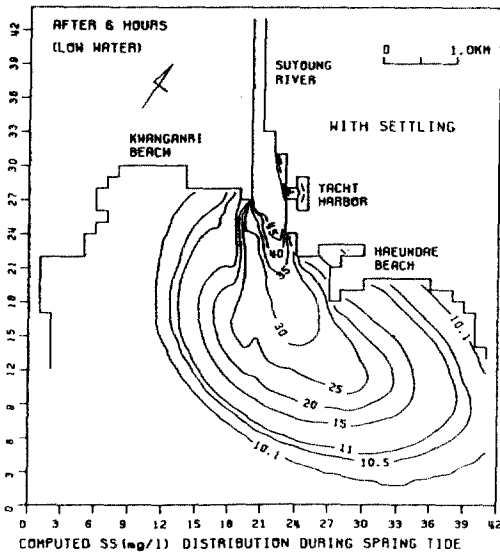
그림 10. 1989년 12월 15일 수영강 유출수의 확산형태(부산시, 미발행)



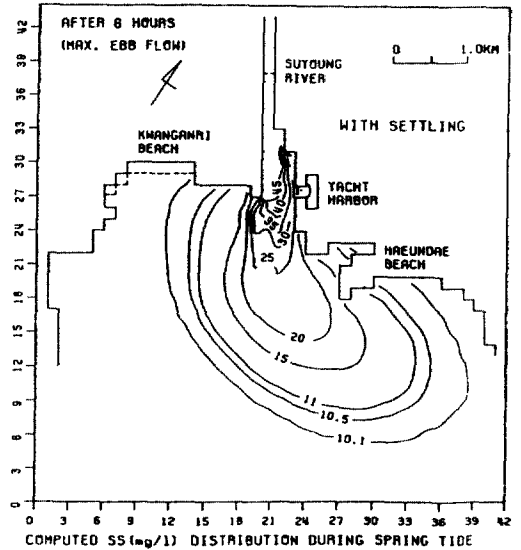
(a) 3 hours after flood discharge starting at level 1



(b) 3 hours after flood discharge starting at level 2



(c) 6 hours after flood discharge starting at level 1



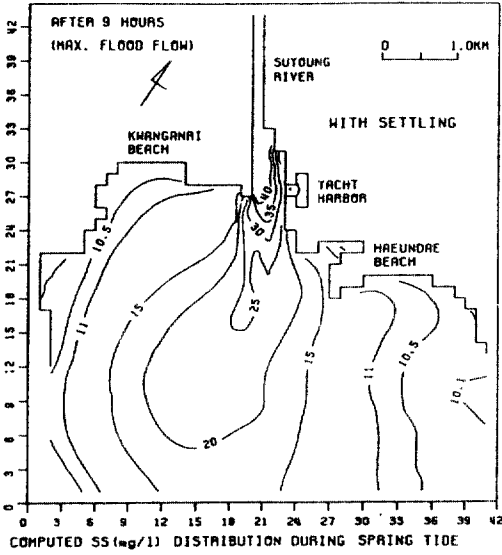
(d) 6 hours after flood discharge starting at level 2

그림 11. 대조기 홍수시 유출 3시간 및 6시간 후의 부유물질의 농도분포

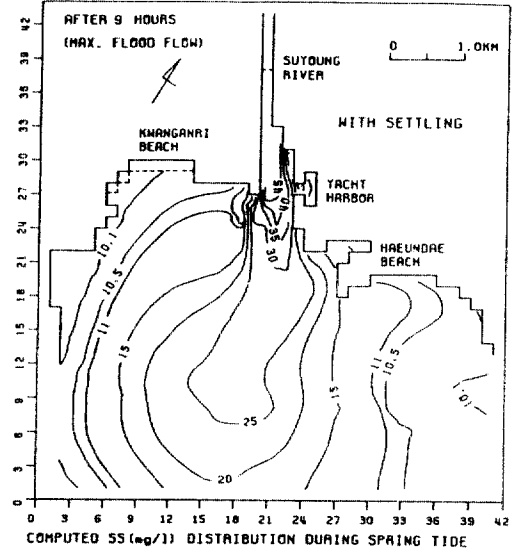
#### 4. 要約 및 結論

유한차분법으로 3차원 浮遊物質의 수송 모델 CO-

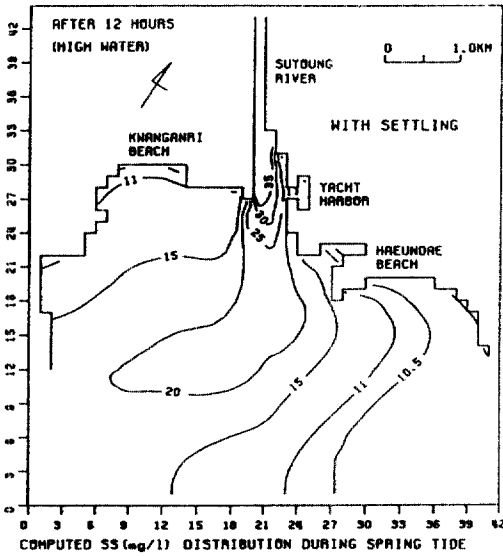
SETM-3을 개발하여 水理實驗結果와 비교하였으며, 그 결과 水理實驗結果와 잘 일치하였다. 모델의 현지 적용성과 水營灣의 SS 확산특성을 조사하기 위해



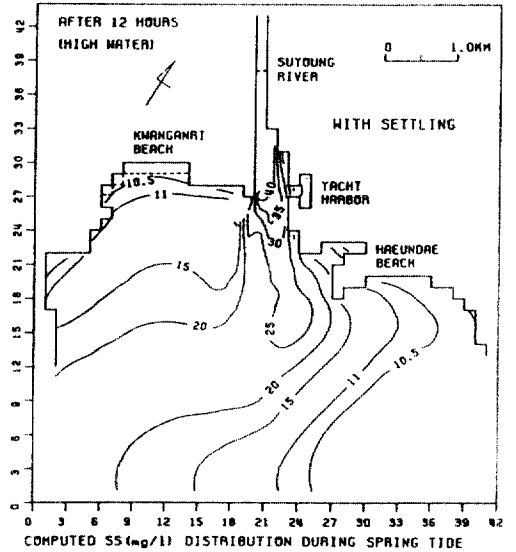
(a) 9 hours after flood discharge starting at level 1



(b) 9 hours after flood discharge starting at level 2



(c) 12 hours after flood discharge starting at level 1



(d) 12 hours after flood discharge starting at level 2

그림 12. 대조기 홍수시 유출 9시간 및 12시간 후의 부유물질의 농도분포

본 모델을 수영만에 적용하여 大潮期 平水時와 洪水時에 水營江에서 유출되는 SS의 舉動을 해석하였으며, 그 결과 현지의 SS 거동을 정성적으로 잘

예측하였다. 水營江河口에서 SS 농도는 낙조류시보다 높게 나타났으며, 이 결과로부터 水營江河口의 SS는 주로 하천에서 流送되는 성분으로

구성되어 있다는 것을 알 수 있다. 침강속도가 SS의 농도분포에 미치는 영향에 대해서도 검토하였다. 沈降을 고려하지 않은 경우 SS 농도는 표층이 저층보다 높게 나타났으나, 沈降을 고려했을 경우에는 저층이 표층보다 높게 나타났다. 그리고, 표층에서는 활발한 해수교환으로 인해 SS의 변동폭이 크게 나타났다. 저층에서는 海水交換이 약하기 때문에 SS의 변동폭이 상대적으로 작게 나타났다. 洪水時 SS 확산패턴은 平水時와 유사하게 나타났다. SS 농도는 平水時보다 훨씬 높게 나타났다. 침투유량이 발생할 때(저조시)까지 SS 농도는 점차 증가하였으나, 침투유량이 발생한 이 후부터 SS 농도는 流出量의 감소로 인해 점차 감소하였다.

본 연구에서 개발된 COSETM-3은 현지에서 浮遊物質의 輸送을 정도 높게 예측할 수 있을 것으로 생각된다. 앞으로는 粘性土의 부상과정을 표현하는 모델을 구축하여 파와 흐름이 공존하는 現地 海洋에서 亂流效果, 浮上 및 沈降을 동시에 고려할 수 있는 모델에 대한 연구가 요구된다.

### 参 考 文 獻

1. Chiu, C. L., "Stochastic model of motion of solid particles", *J. Hydraulic Division*, ASCE, Vol. 93, 1967, pp. 203-218.
2. Dyer, K. R. and Evans, E. M., "Dynamics of turbidity maximum in a homogeneous tidal channel", *J. Coastal Research*, Special Issue No. 5, 1989, pp. 23-30.
3. Farmer, R.C. and Waldrop, W.R., "A model for sediment transport and delta formation", *Coastal Sediment '77, Proc. 5th Symp. Waterway, Port, Coastal and Ocean Division*, ASCE, 1977, pp. 102-115.
4. Hayter, E. J. and Pakala, C. V., "Transport of inorganic contaminants in estuarial waters", *J. Coastal Research*, Special Issue No. 5, 1989, pp. 217-230.
5. Lepetit, J. P. and Hauguel, A., "A numerical model for sediment transport", *Proc. 16th Coastal Engrg. Confer.*, Vol. 3, 1978, pp. 1715-1723.
6. Miller, H. P., "Three-dimensional free-surface suspended particles transport in the South Biscayne Bay", Florida, *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, Vol. 4, 1984, pp. 901-914.
7. O'Connor, B. A. and Nicholson, J., "A three-dimensional model of suspended particulate sediment transport", *Coastal Engineering*, Vol. 12, 1988, pp. 157-174.
8. Sheng, Y. P., "Mathematical modeling of three-dimensional coastal currents and sediment dispersion: Model development and application", *Technical Report CERC-83-2*, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., Also ARAP Report No. 458, Princeton, NJ, 1983, 288 pp.
9. Sheng, Y. P., "Modeling bottom boundary layer and cohesive sediment dynamics in estuarine and coastal waters", *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*, A. J. Mehta, ed., Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Vol. 14, Springer-Verlag, New York, 1986, pp. 360-400.
10. Spaulding, M. L. and Pavish, D., "A three-dimensional numerical model of particulate transport for coastal waters", *Continental Shelf Research*, Vol. 3, 1984, pp. 55-67.
11. 堀口孝男, 富田 勇, 堀江 毅, "三次元モデルによる流れと擴散の數値解法について", 第24回海岸工學講演會論文集, 1977, pp. 443-447.
12. 堀口孝男, 富田 勇, 堀江 毅, "三次元モデルによる流れと擴散の數値解法について(その2)", 第25回海岸工學講演會論文集, 1978, pp. 508-512.
13. 堀口孝男, 曾我部隆久, 堀江 毅, "三次元モデルによる流れと擴散の數値解法について(その3)", 第26回海岸工學講演會論文集, 1979, pp. 600-604.
14. 鶴谷廣一, 村上和男, 入江 功, "多層レベルモデルによる航路埋設の豫測計算", 第36回海岸工學講演會論文集, 1989, pp. 379-383.
15. 柳 哲雄, 磯邊篤彦, "河口域での懸濁粒子の舉動に關する數値實驗", 沿岸海洋研究ノト, 第25卷 第1號, 1987, pp. 61-66.
16. 金次謙, "粘着性土砂의 輸送機構와 3次元 輸送 모델", 부산수산대학교 해양공학과 박사학위논문, 184 pp.
17. 金次謙, 李宗燮, "河口에서 Two-level 모델에 의한 海水流動 및 擴散에 관한 數値實驗", **한국수산학회지**, 第24卷 第1號, 1991, pp. 59-69.
18. 金次謙, 李宗燮, "실트질 점토의 沈降特性에 관한 연구", **大韓土木學會論文集**, 第11卷 第3號, 1991, pp. 85-93.
19. 金次謙, 李宗燮, "파-흐름의 共存場에서 실트질 점토의 浮上特性", **韓國 海岸·海洋工學會誌**, 第4卷 第1號, 1992, pp. 26-33.
20. 金次謙, 李宗燮, "水營灣의 潮流, 鹽分 및 浮游物

質의 분포,” 한국수산학회지, 第25卷 第5號, 1992,  
pp. 359-370.

實驗 報告書”, 1984, 398 pp.

(接受 : 1992. 9. 21)

21. 釜山直轄市, “水營灣 開發地區 數值 및 水理模型