

광양만의 오염물질 확산에 관한 수리학적 고찰

김 정 수¹⁾, 盧 —²⁾

A Hydrodynamic study on the Diffusion of Contaminants in Kwangyang Bay, Korea

Jeong-Su Kim, Il Noh

Abstract

Water quality in Kwangyang bay is now becoming worse due to loadings of contaminants from a couple of sources, especially from a constructive spot of the Hadong fire power plant. Consequently, the ocean environment in this area will be destroyed as time passes by.

The bay area shows a semi-diurnal tidal pattern with little diurnal inequality, and the ebb currents were observed a little stronger than the flood currents.

In this shallow and windless coastal area, two-dimensional hydrodynamic and diffusion models were applied for simulating the distribution patterns of contaminants from a couple of sources.

Drogue experiments were performed to verify the diffusion model and the suitable range of turbulent diffusion coefficient in this area was observed to be from 1.0 to 3.0m²/sec.

The simulation model generally showed that most contaminants were concentrated around the Daedo and Yeosuhae bay, not dispersing into the western bay of the study area.

1) 한국해양대학교 해양공학과 석사과정 해양환경 전공

2) 한국해양대학교 해양환경공학과 조교수

1. 서 론

수질예측은 오염물질이 방류된 지점에서 시간이 경과함에 따라 얼마만큼의 양이 어느 정도의 거리까지 확산되는지를 알아야 가능하다. 이러한 예측을 위해서는 동수력학적인 유체의 흐름에 관한 지식과 오염물질들의 다양한 변화과정에 대한 이해가 필수적이다.

본 연구의 대상해역인 광양만에는 광양제철소와 컨테이너부두가 축조되어 있고 여천공단과 신노량 남측지역에는 하동 화력발전소가 건설되어 있다. 이러한 여러 오염원들의 영향으로 만내 수질은 점점 악화되고 있으며, 본 연구는 이와 같이 날로 증대되는 광양만의 수질오염을 종합적으로 평가하고 예측하기 위한 기초연구로서, 수심평균 2차원 해수유동모델과 확산모델을 이용하여 해수유동과 이류 및 확산현상에 의한 오염물질의 분포를 예측하고자 하였다. 또한, 본 모델의 적용성을 검증하기 위해 부표를 이용한 현장 관측실험을 병행하였다. 본 연구의 결과는 점점 악화되고 있는 광양만의 수질을 개선하기 위한 적절한 오염방지대책의 수립에 크게 기여할 것으로 판단된다.

2. 수치모델

2-1. 해수유동모델

(1) 기본 방정식

2차원 운동방정식은 연속방정식과 Navier-Stokes방정식을 수직면에 대해 평균함으로써 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\zeta + h)U] + \frac{\partial}{\partial y} [(\zeta + h)V] = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + g \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} = 0 \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + g \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} = 0 \quad (2-3)$$

여기서, U는 수심 평균한 x방향 유속, V는 수심 평균한 y방향 유속, f는 Coriolis 계수, g는 중력 가속도, ζ 는 수면변위, h는 평균수면하 수심, C는 Chezy 마찰계수를 나타내고 본 연구에서는 바람에 의한 응력은 무시하였다.

(2) 수치해법

본 모델에서는 앞에서 기술한 해수유동방정식 (2-1, 2, 3)을 수치해석으로 풀어 나가기 위해 유한차분법(finite difference method)을 적용하였다.

본 모델에서는 조류·확산 계산에 응용되어, 현재 자주 이용되고 있는 ADI법(alternating direction implicit method)을 사용하였다. ADI법은 양해법과 음해법을 동시에 사용하여 계산하는 방식으로, 해의 수렴성과 연산시간의 경제성 등에서 뛰어난 장점이 있다. 이 방법을 사용하여 차분식을 정식화하면 다음과 같다.

$$\xi_{i,j}^{(n+(1/2))} = -P_{i,j} U_{i+(1/2),j}^{(n+(1/2))} + Q_{i,j} \tag{2-4}$$

$$U_{i-(1/2),j}^{(n+(1/2))} = -R_{i-1,j} \xi_{i,j}^{(n+(1/2))} + S_{i,j} \tag{2-5}$$

$$\xi_{i,j}^{(n+1)} = -p_{i,j} V_{i,j+(1/2)}^{(n+1)} + q_{i,j} \tag{2-6}$$

$$V_{i,j-(1/2)}^{(n+1)} = -r_{i,j-1} \xi_{i,j}^{(n+1)} + s_{i,j-1} \tag{2-7}$$

여기서, $P_{i,j}$, $R_{i-1,j}$, $S_{i,j}$, $p_{i,j}$, $q_{i,j}$, $s_{i,j-1}$ 는 $(n+(1/2))\Delta t$ 또는 $(n+1)\Delta t$ time step보다 전 단계에서 결정된 기지량이다.

2-2. 확산 모델

확산모델의 기본방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (\mathbf{D} \nabla C) + S \tag{2-8}$$

여기서, C는 오염물질의 농도, \mathbf{V} 는 유속벡터, ∇ 는 gradient 연산자, \mathbf{D} 는 난류확산텐서, 그리고 S는 생성 및 소멸을 각각 나타낸다.

본 연구에 사용된 확산모델은 라그랑지적 입자추적법을 채택하고 있다. 즉, 오염물질을 개별 입자의 모임으로 보고 시간의 경과에 따른 개별 입자의 위치를 추적 하되, 이류성분은 유속에 의해 그리고, 확산성분은 임의행보이론(random-walk theory)에 의해 계산된다.

오염물질의 이류는 해수유동모델에서 계산한 속도 \mathbf{V} 에 의해 일어난다. 만약, 임의의 시간에 i번째 입자의 x, y, z좌표가 X_i^o, Y_i^o, Z_i^o 라고 한다면 Δt_p time step 후의 입자의 새로운 좌표는 다음과 같이 주어진다.

$$X_i = X_i^o + u \Delta t_p \tag{2-9}$$

$$Y_i = Y_i^0 + v \Delta t_p \quad (2-10)$$

$$Z_i = Z_i^0 \quad (2-11)$$

여기서, Δt_p 는 오염물질의 이동을 관측하는 동안의 시간간격이다.

한편, 오염물질은 난류확산에 의해서도 이동되는데, 임의 입자의 확산에 의한 이동거리는 다음 식과 같이 표현된다.

$$S_k = [R]_0^1 \sqrt{12 D_k \Delta t_p} \quad (2-12)$$

여기서, D_k 는 확산계수, $[R]_0^1$ 은 난수를 나타낸다.

따라서 입자의 총 이동거리는 해수유동에 의한 이동거리와 난류확산에 의한 이동거리를 합쳐 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$X_i = X_i^0 + u \Delta t_p + S_k \cos \theta \quad (2-13)$$

$$Y_i = Y_i^0 + v \Delta t_p + S_k \sin \theta \quad \text{단, } \theta = 2\pi [R]_0^1 \quad (2-14)$$

식 (2-13), (2-14)는 각각 Δt_p time step후의 i 번째 입자의 위치를 나타낸다.

3. 모델의 적용 및 실험

3-1. 해수유동모델

본 논문에서 사용한 모델은 크기가 작은 섬들을 표현하는데 용이하도록 가로, 세로 각각 150m 간격으로 격자를 구분하여 가로 방향 격자수 $NX=182$ 개, 세로 방향 격자수 $NY=186$ 개로 하였다. 모델에서 수심은 해도상의 수심자료를 이용하여 유속 계산에 이용하였고, 바다의 거칠기와 관련되어 해수유동에 영향을 주는 Chezy계수는 다음 식에서 계산하였다.

$$C_0 = 1/0.026$$

$$C = C_0 \cdot H^{1/6} \quad (H \text{는 수심}) \quad (3-1)$$

계산시간간격($\Delta t/2$)은 계산의 안정성 및 수렴성을 지배하는 인자로서, 다음 안정조건(stability condition)을 고려하여 10.35초로 하였다.

$$\frac{\Delta t}{2} \leq \frac{a \Delta s}{\sqrt{g h_{\max}}} \quad (3-2)$$

여기서, Δs 는 격자간격, h_{\max} 는 대상해역의 최대수심, g 는 중력가속도, Δt 는 시간간격, a 는 1~3의 값을 갖는 상수를 나타낸다.

연구해역의 평균조석을 재현하기 위하여 주기가 12시간 25분인 M_2 분조의 조화 상수를 문헌[5]에서 구하여 경계조건으로 설정하였다. 경계조건은 남해대교에서의 M_2 분조의 반조차는 106cm이고, 지각은 265° , 여수의 반조차는 100cm, 지각은 256.8° , 그리고 평산은 99cm의 반조차와 256.6° 의 지각을 각각 경계조건으로 설정하였다. 그리고, 육지경계에서는 경계면을 통한 해수의 유출입은 영, 즉 $u \cos \theta + v \sin \theta = 0$ 의 조건이 주어졌다. 여기서 θ 는 x축과 해안법선이 이루는 각도를 말한다. 따라서 모델에서 x축 방향의 경계에서는 $v=0$, y축 방향의 경계에서는 $u=0$ 의 조건이 주어지게 된다. 하천경계에서는 하천의 유속이 주어지며, 섬진강의 유속은 0.3 ㎍, 그 외 다른 지천은 0.1 ㎍로 주어졌다. 이상의 입력자료를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Input data for the hydrodynamic model

인 자 (Parameters)	입력데이터 (Input data)
수 심	해도 (Korean chart No. 236) 참조
계산시간간격	10.35초
Coriolis coeff.	$f=2\omega \sin \varphi$, $\omega=2\pi/(24 \times 60 \times 60)$, $\varphi=34^\circ 9.0' N$
하천의 유속	섬진강=0.3 ㎍, 그 외 지천=0.1 ㎍

3-2. 확산모델

확산모델은 해수유동모델에서 얻어진 유속과 조위가 정상상태에 도달한 이후에 한 조석주기를 택하여 그 때의 유속 및 조위를 기초 수리자료로 이용하였다. 격자의 구성은 해수유동모델과 동일하고, 계산시간간격(Δt)은 다음 안정조건을 고려하여[1] 600초로 하였다.

$$\left(\frac{u}{\Delta x} + \frac{v}{\Delta y} \right) \leq \frac{1}{\Delta t} \tag{3-3}$$

여기서, u, v 는 x, y 방향의 최대 유속

Δt 는 시간간격

비보존성물질의 분해과정은 시간이 경과함에 따라 다음 식과 같이 1차 분해되는 것으로 가정하였다.

$$\frac{dC}{dt} = -K \cdot C \quad (3-4)$$

여기서, C는 오염물질의 농도, K는 분해계수, t는 경과시간을 각각 나타낸다. 분해계수 K는 오염물질에 따라 달라지지만, 본 연구에서는 e-folding time을 7일로 선택하였다. 이상의 입력 자료를 정리하면, Table 2와 같다.

Table 2. Input data for the diffusion model

인 자 (Parameter)	입력데이터 (Input data)
격자간격	$\Delta x = \Delta y = 150$ m
수 심	해도 (Korean chart No. 236) 참조
계산시간간격	600초 (10분)
분해계수	$1/(7 \cdot 24 \cdot 3600)$ sec ⁻¹
확산계수	1.0m ² /s

3-3. 부표추적실험

모델의 적용성을 검증하기 위해 현장실험을 통한 결과와의 비교가 필수적이다. 본 연구에서는 모델에 대한 검증을 위해 96년 10월 10일과 11일 양일에 걸쳐 부표추적실험을 실시하였다. 부표추적실험은 2대의 GPS(KODEN KGP-911)와 부표(drogue)를 이용하여 실시하였고, 바람에 의한 영향을 고려하기 위해 풍향풍속계(대전계기제작소 P형 풍향풍속계 No. 5587)를 이용하여 풍속 및 풍향을 관측하였다. 그리고, 부표는 Fig. 1에 도시된 것처럼 6개의 위치에 각각 띄워서 시간의 경과에 따른 부표의 이동 형태를 관측하였고, 연구지역의 낙조시에 띄워서 창조로 바뀌는 시간까지 추적하였다. 모델에서 사용한 평균조석에 맞추기 위해 중조기에 실험을 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 해수유동모델

임의 지점에서 수위변화를 조사한 결과 4조석이 경과하면서 안정상태에 도달하였다. 따라서 4조석 후의 1조석 동안의 유속자료중 창·낙조시 최강유속을 벡터로 플롯하여 Fig. 2, 3에 각각 나타내었고, 유속을 기록하여 확산모델의 입력자료로 사용하였다. 이 해역의 창조시 흐름과 낙조시 흐름은 대체적으로 여수해만과 대도

사이의 수로 및 묘도수로에서 강한 흐름을 나타내고 있다. 그리고, 내만과 여러 섬들이 산재되어 있는 지역에서는 비교적 흐름이 약하게 나타났다. 노량수도와 하동화력발전소 주변의 해역에서는 대체적으로 왕복 조류가 강하게 나타나고 있는 반면, 여수해만과 POSCO사이의 수로에서는 타원형의 조류패턴이 강하게 나타났다. 실제 해역에 대한 모델의 계산결과의 적용성을 검토하기 위하여 1982년 4월 15일부터 5월 14일까지 이[3]가 관측한 관측결과와 본 모델에 의한 계산결과를 Fig. 1에서 나타난 두 지점 C1, C2에서의 조류타원도로써 나타내었다(Fig. 4).

C1지점과 C2지점에서 비교한 값들을 살펴보면, C1지점에서 관측한 유속은 모델에서 계산한 값보다 약간 작게 나타났고, C2에서의 유속값은 계산값보다 관측값이 약간 크게 나타났으나, 모델에서 계산된 유향 및 유속과 관측된 유향 및 유속은 대체로 유사한 형태를 나타내고 있다. 한편 광양만의 해수 흐름은 창조류 보다 낙조류가 강하게 나타나고 있다.

4-2. 부표추적 실험

실험당일 바람에 의한 부표의 이동을 고려하기 위해서 풍향풍속을 측정하였는데, 관측 값은 0 % ~ 1 %의 범위의 값을 나타내어 부표의 이동에 거의 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

화력발전소 주변 해역에서 실험한 부표중 A, B, C부표의 이동경로는 Fig. 5에 나타냈고, D와 E지점에서는 자료를 얻는데 실패하였다. D부표는 B부표와 동시에 추적을 하였는데, 두 부표간 거리가 너무 멀었고, 추적하는 고무보트의 사고로 인해서 D부표의 위치를 파악하는데 실패하였다. 그리고, E부표는 육지와 근접한 해역에 투하되어, 부표가 이동하던중 육지에 상륙함으로써 자료획득에 실패하였다. 그리고, 묘도 수로에 투하된 F부표는 부력계산 착오로 인해 띄운지 수 분만에 가라 앉았다. 부표추적실험 결과, 여수해만에서는 조류에 의한 영향이 크지만 섬들이 산재하고 수로의 폭이 좁은 대도 주변에서는 난류에 의한 영향을 많이 받는것을 관측할 수 있었다.

4-3. 확산 모델

본 연구에서 사용한 확산모델은 오염원에서 오염물의 입자를 10분마다 20개씩 1

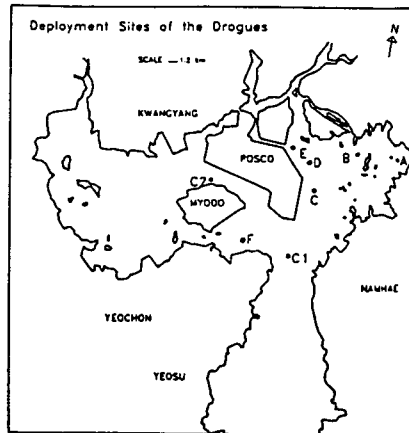
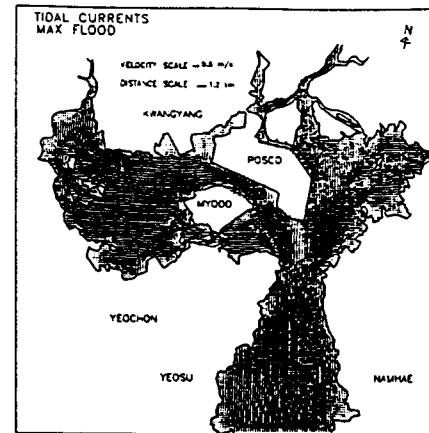


Fig. 1. Deployment sites of the drogues

Fig. 2. Computed tidal currents
at maximum flood flow

주일 동안 연속 방출하였고, 오염물질들의 확산형태는 1주일을 전후하여 정상 (steady)상태로 되었다. 그리고, 확산계수는 $1.0\text{m}^2/\text{s}$ 으로 추정하였다.

(1) 화력발전소로부터 방출된 오염물질

화력발전소로부터 방출된 오염물질의 분포는 Fig. 6에 나타난 것처럼 노량수도를 통해 여수해만으로 흐르는 강한 낙조류에 의해 주로 이동되고, 1주일후 여수까지 영향이 미친다. 창조류와 낙조류의 반복에 의해 묘도와 POSCO까지 영향을 미치지 않지만, 낙조류가 창조류보다 강한 연구해역의 해수유동특성으로 인해 컨테이너 부두가 위치한 내만에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 한편, 노량수도를 통해 인접한 진주만 쪽으로의 오염물질의 이동은 거의 나타나지 않았다.

(2) POSCO로부터 방출된 오염물질

POSCO로부터 방출된 오염물질은 묘도수로의 강한 낙조류에 의해 내만으로는 매우 적은 양이 이동되고 대부분 여수해만을 통해 외해로 이동되고 있다(Fig. 7). 그리고, 최강창조시와 최강낙조시에는 조류에 의해 확산거리가 큰 반면 고조와 저조시에는 난류에 의한 영향이 비교적 크게 나타났다. 또한, 여수해만의 남쪽 부근에서는 난류에 의한 확산이 크게 나타났다. 창조시 오염물질은 대도쪽으로 거의 이동하지 않고 묘도수로를 통해 대부분 이동하는 것으로 나타났다.

(3) 광양 컨테이너 부두로부터 방출된 오염물질

컨테이너 부두로부터 방출되는 오염물질들은 연구해역 서측 내만에 국한되어 분포하는 양상을 띄고 있으며, 여수해만으로는 매우 적은 양이 이송되는 특징을 보이고 있고, 대도쪽으로는 전혀 이송되지 않는 것으로 나타났다(Fig. 8).

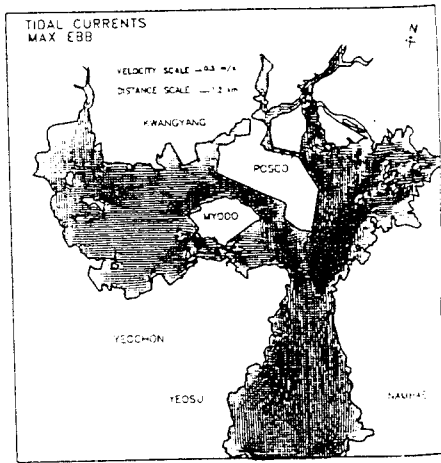


Fig. 3. Computed tidal currents at maximum ebb flow

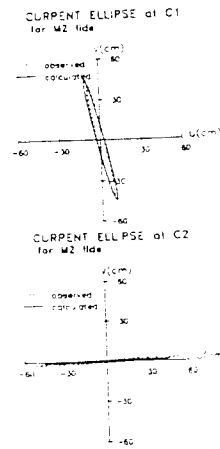


Fig. 4. Comparison of the tidal current ellipses between computed and observed results

5. 결 론

모델의 적용성을 검증하기 위해 모델에서 사용한 평균조석주기에 맞추어 부표추적실험을 하였고, 본 연구에서는 확산계수의 값을 $1.0\text{m}^2/\text{s}$ 으로 추정하였다. 해수유동모델과 확산모델을 적용한 결과, 만내의 조류는 거의 일정한 주기로 창·낙조류가 흐르고, 창조류보다 낙조류가 비교적 강하게 나타났다. 그리고, 만내의 오염물질의 확산형태는 조류에 의해 크게 좌우되나, 난류에 의해서도 부차적으로 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 확산모델을 통해 오염원별 오염물질의 확산을 시뮬레이션한 결과, 1) 화력발전소에서 배출되는 오염물질은 제철소와 공단이 밀집되어 있는 연구해역 서측내만보다는 대도 주변해역과 여수해만사이의 해역에 많이 분포된다는 것을 알 수 있었다. 특징적인 것은 연구해역내 여러 오염원들로부터 노랑수도를 통해 진주만으로 빠져나가는 오염물질의 확산은 거의 없는 것으로 나타났다.; 2) 광양제철소에서 방출되는 오염물질들은 묘도수로와 여수해만에 걸쳐 넓게 분포하는 양상을 띄지만, 여수해만을 통해 내만으로 흐르는 조류의 영향으로 대도쪽으로는 이송은 거의 없는 것으로 나타나고 있으며.; 3) 광양 콘테이너부두에서 방출되는 오염물질의 입자들은 연구해역 서측내만에 국한되어 분포하며, 대도쪽으로는 거의 이송되지 않는 양상을 나타냈다.

본 연구와 관련하여 앞으로 더 연구해야 할 과제는 연구해역의 난류 확산계수의 정확한 추정과 더욱 정확한 조석 및 수심의 입력이 필요하며, 연구지역의 정확한 오염물질의 확산을 예측하기 위해서 앞으로 다양한 수치기법을 사용한 3차원 해수유동모델과 확산모델의 적용이 필요하다.

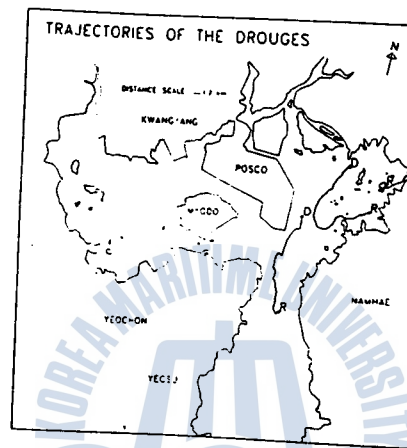


Fig. 5. Trajectories of the drogues. D represents the deployment site of each drogue, and R, the recovered site.

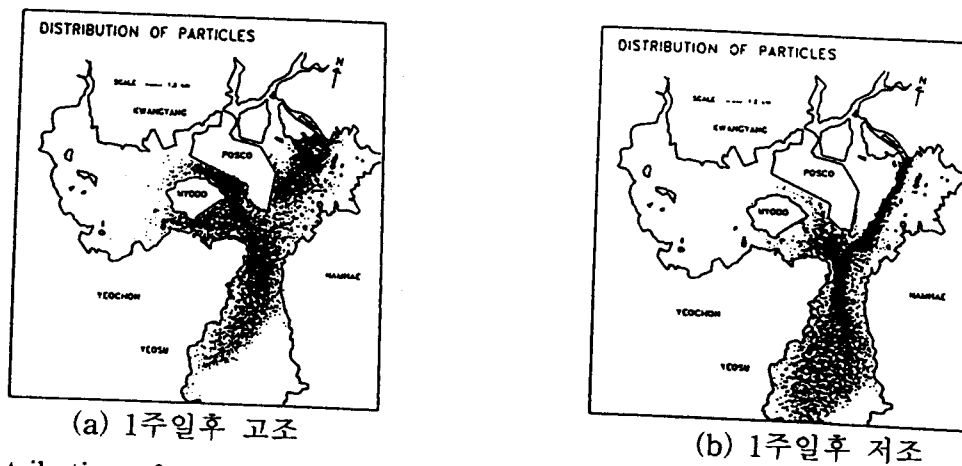
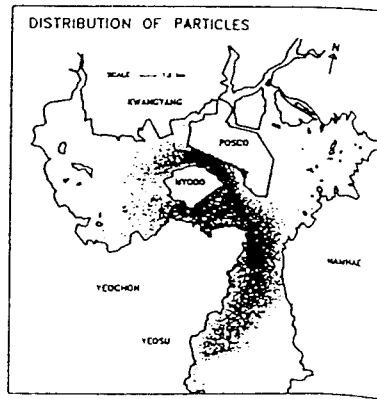
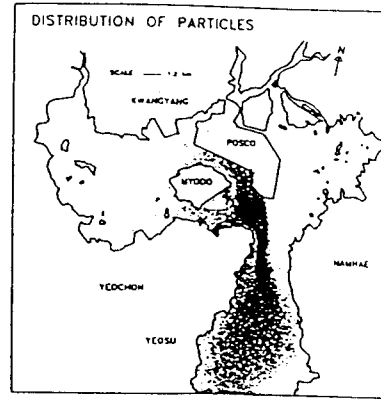


Fig. 6. Distribution of contaminant particles from Hadong fire power plant

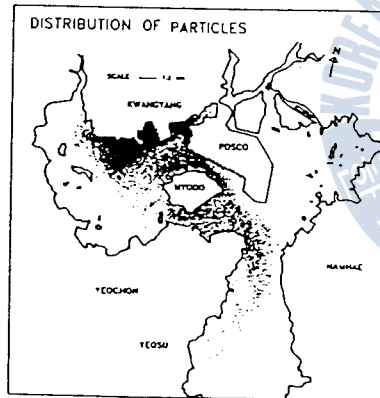


(a) 1주일후 고조

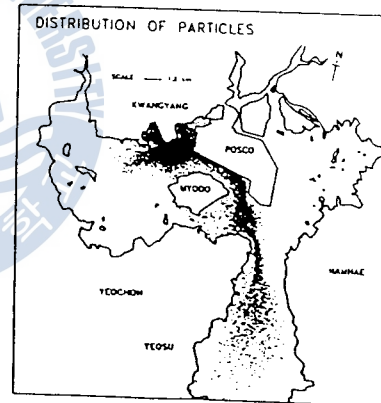


(b) 1주일후 저조

Fig. 7. Distribution of contaminant particles from POSCO



(a) 1주일후 고조



(b) 1주일후 저조

Fig. 8. Distribution of contaminant particles from Kwangyang container port

6. 참고문헌

1. Al-Rabeh A. H., H. M. Cekirge, and N. Gunay, 1989, "A stochastic simulation model of oil spill fate and transport", *Appl. Math. Modelling*, Vol.13, pp.322-329.
2. 정 언철, 1992, "수영만의 수질 모델링에 관한 연구", 부산수산대학교 환경공학과 석사학위논문, pp.59.
3. 이 석우, 1994, 한국항만수리지, pp.118-119.

4. 부산수산대학교 해양과학공동연구소, 1996, "제 3차년도 하동화력발전소 주변어업 피해조사연구", pp.11-61 .
5. Leendertse, J. J. and E. C. Gritton, 1971, "A Water-Quality Simulation Model for Well Mixed Estuaries and Coastal Seas", Vol. 3, Jamaica Bay Simulation, R-709-NYC, The New York City Rand Institute.
6. 이 문진, 1991, "연안역 확산 수치모델에 적합한 와확산계수의 추정", 부산수산대학교 해양학과 석사학위논문, pp.49.
7. Okubo, A., 1971, "Ocean diffusion diagrams", *Deep Sea Research*, 18, 789-802.
8. Choi, B. H., 1980, "A tidal model of the Yellow Sea and Eastern China Sea", KORDI Report, 80-02.
9. Fischer, H. B., 1970, "A Method for Predicting Pollutant Transport in Tidal Waters", Hydraulic Laboratory, Univ. of California, Berkeley.

