

해양방류시스템 최적설계를 위한 확산해석

정태성^{1,†} · 강시환²

¹한남대학교 건설시스템공학과

²전북대학교 토목공학과

Diffusion Analysis for Optimal Design of Ocean Outfall System

T. S. Jung^{1,†} and S. W. Kang²

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

²Department of Civil Engineering, Chonbuk University, Chonbuk 561-751, Korea

요 약

하수의 해양방류시스템의 형식과 방류위치 결정을 위해 해수유동모의, 근해역 희석률 모의 그리고 원해역 확산모의가 수행되었다. 방류 후보지점 주변의 조위와 조류는 관측조위 및 조류를 잘 재현하는 2차원 유한요소모형에 의해 수행되었으며, 계산된 조위 및 조류 모의결과에 기초하여 방류 후보지점이 결정되었다. 방류시스템으로는 단일확산관과 다공확산관이 고려되었다. 단일확산관과 다공확산관을 통한 하수 방류의 근역 확산이 CORMIX모형에 의해 검토되었으며, 원역 확산이 2차원 Random-walk 확산모형에 의해 실시되었다. 모의결과로부터 수심, 조류, 방류위치, 방류속도, 확산관 길이 등이 확산범위와 희석률에 미치는 영향이 각각도로 검토되었다.

Abstract – The optimal type and discharging position of ocean outfall of wastewater have been determined by hydrodynamic modeling, near-field dilution modeling, and far-field dispersion modeling. Tide and tidal currents have been simulated by a finite element hydrodynamic model showing good agreements with field observations. Based on the hydrodynamic simulation results candidates of ocean outfall position were preliminary determined. Submerged single port and submerged multi-port diffuser were selected as discharging system alternatives and finally designed by considering tide, tidal currents and water depth. Initial dilution of wastewater discharged from the designed ports has been estimated by CORMIX system. A 2-dimensional random-walk dispersion model has been employed to simulate far-field dispersion of discharged wastewater.

Keywords: Ocean Outfall(해양방류), Dispersion(확산), Diffuser(확산관), Dilution rate(희석률), CORMIX System(CORMIX 모형)

1. 서 론

우리나라 연안역은 산업화와 함께 급격히 도시화가 진행되었으며, 많은 인구가 거주하고 생활하면서 도시하수가 바다로 배출되고, 임해공업단지에서는 다량의 공장폐수를 바다로 배출하여 왔다. 최근에는 연안해역의 수질을 보호하기 위하여 하수처리장을 곳곳에 건설하고 있으나 아직도 상당부분이 단순히 1차 처리 후에 방류하고 있다. 따라서 오염물질의 완전히 제거되지 않은 상태인 하수가 해양으로 유입되어 연안해역의 수질은 심각하게 오염되어 있

는 실정으로 이에 대한 관리대책 수립이 필요한 실정이다.

도시하수 및 공장폐수로 인한 해양오염을 저감시키는 방법은 오염된 하수와 폐수를 완전하게 수처리하여 오염농도를 저감시킨 후에 바다로 방류하는 것이다. 그러나 수처리 과정에서 완전하게 오염물질을 제거하기는 어려우며, 연안해역으로 유입된 오염물질이 연안해역에서 희석되지 않고 정체되어 있을 경우에는 장기적으로 연안수질을 오염시키는 원인이 된다. 특히 우리나라 서해안 및 남해안과 같이 섬으로 둘러싸여 있어 폐쇄성이 강한 연안해역에서는 유입된 오염물질이 외해로 이송·확산되지 못할 경우에는 부영양화, 적조발생, 빈산소 수괴의 형성과 같은 수질 오염을 야기하게 된다(한국해양연구소[1994]). 따라서 연안해역으로 방류되

[†]Corresponding author: jungts@hnu.kr

는 하수의 방류위치를 해양확산을 극대화 할 수 있도록 적절하게 선정하여 연안해역의 수질이 오염되는 것을 최소화할 필요가 있다. 해양방류는 해역 수질기준을 만족하는 범위 내에서 방류되도록 하여야 하며, 이를 위해서는 희석률을 극대화 하여 방류수역에서 발생하는 오염물질의 최고농도를 해역 수질기준을 만족할 수 있도록 낮춰야 한다. 하수관로를 이용하여 차집된 하수를 처리장에서 처리한 후에 도수관로를 통해 수심이 깊고 확산이 잘되는 곳으로 이송하여 수중에서 확산관 등을 통해 희석률을 높여서 방류하여야 수질오염을 줄일 수 있다. 해양방류관에 대한 국내 연구로는 해양방류하수의 혼합특성과 해양환경공학적인 고찰 등에 대한 조사가 수행된 바 있으며(김[1998]; 강 등[1998]). 또한 CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) 모델을 국내 해역에 적용하여 수중다공방류관의 거동특성을 해석한 바 있다(서 등[1999]; 강 등[2000]; 강 등[2001]). CORMIX 모형은 하수 및 온배수의 방류시설 설계에서 희석률 산정을 위해 널리 쓰이는 모형으로써 기존의 적분모형이나 다른 길이축척모형에 비해 실용성이 매우 높은 것으로 알려져 있는데 특히 기존의 적분 모형이 실제 상황의 방류조건에 대한 적용성이 10~20% 정도로 크게 낮은 점에 비해 CORMIX 모형은 80~95%의 높은 적용성이 있는 것으로 알려져 있다(Doneker and Jirka[1991]).

본 연구에서는 해양방류 예정지점 인근해역에 대한 해수유동을 2차원 해수유동 수치모의를 통해 검토하였으며, 계산된 조위 및 조류변화와 경제성 등을 검토하여 해양방류 후보지점을 예비 선정하였다. 예비 선정된 방류 후보지점에서 단일확산관 또는 다공확산관으로 방류하는 해양방류시스템을 설계하고 확산특성을 검토하였다. 단일확산관 방류에 대한 근역 확산특성은 CORMIX1 모형을 사용하여 검토하였으며, 다공확산관 방류로 인한 근역 확산특성은 CORMIX2 모형을 사용하여 검토하였다. 최종적으로 해양방류가 원해역의 수질에 미치는 전반적인 영향을 파악하기 위하여 2차원 입사추적 이송-확산모형을 사용하여 오염물질의 이동 경로와 확산특성을 검토하였다(Fig. 1).

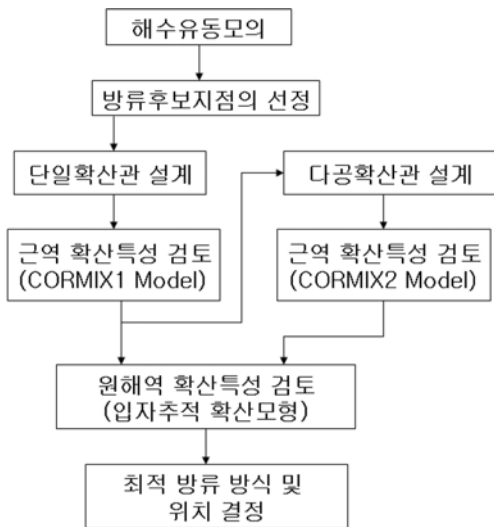


Fig. 1. Flowchart of ocean outfall design.

2. 해수유동 수치모의

방류구 주변 조류분포를 계산하기 위해 해안선이 복잡하게 변화하는 해역에서 효율적인 모형인 유한요소모형(정 등[1992])을 사용하였다. 해수유동모형의 지배방정식인 수심적분된 2차원 천수방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(U^2/H)}{\partial x} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial y} - fV = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_h \frac{\partial}{\partial x} \left[H \frac{\partial(UV/H)}{\partial x} \right] \\ + A_h \frac{\partial}{\partial y} \left[H \frac{\partial(U/H)}{\partial y} \right] + \frac{\tau_{wx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2/H)}{\partial y} - fU = -gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_h \frac{\partial}{\partial x} \left[H \frac{\partial(V/H)}{\partial x} \right] \\ + A_h \frac{\partial}{\partial y} \left[H \frac{\partial(V/H)}{\partial y} \right] + \frac{\tau_{wy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, ζ 는 평균수심으로부터 수위변화, 수심적분유속 $U = \int_{-h}^{\zeta} u dz$, $V = \int_{-h}^{\zeta} v dz$, u 와 v 는 각각 x 와 y 방향의 유속, z 는 수심방향 거리, H 는 총수심($=h+\zeta$), h 는 평균수심, f 는 Coriolis 상수, A_h 는 수평외점성계수, g 는 중력가속도, τ_{wx} 와 τ_{wy} 는 각각 x , y 방향 바람마찰응력, 바닥마찰응력 τ_{bx} 는 $C_b \mu \sqrt{u^2+v^2}$, τ_{by} 는 $C_b \nu \sqrt{u^2+v^2}$, 바닥마찰계수 C_b 는 $\frac{g n^2}{H^{1/3}}$, n 은 Manning의 조도계수이다.

식 (1)-(3)의 수치적분법으로는 Galerkin의 유한요소법(Chung [1978])을 사용하였으며, 노출과 침수에 따라 계산격자망을 배제 또는 포함하는 방법(Kawahara and Umetsu[1986])으로 조건대를 고려하였다.

초기조건은 조위변화와 유속을 0으로 주어 계산을 시작하였으며, 안정적인 모의결과를 얻기 위하여 약 1일간의 예비계산을 수행하였다. 육지경계조건으로는 경계에서 유속의 수직성분이 0이



Fig. 2. Site map of ocean outfall.

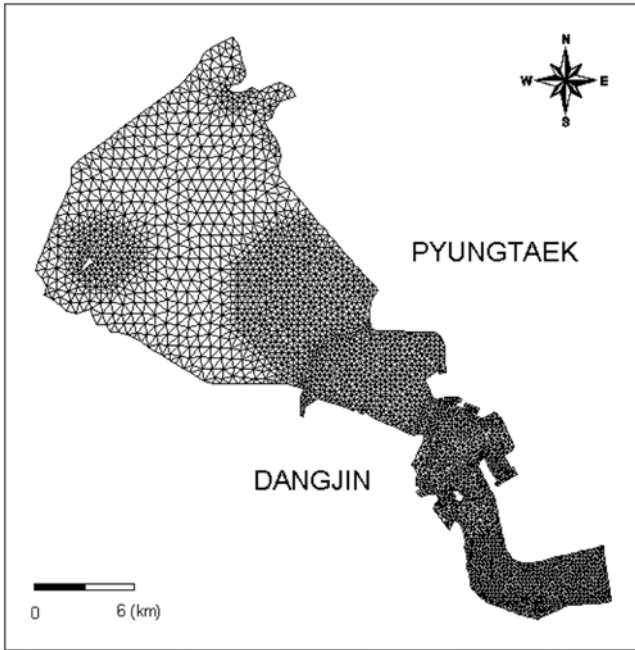


Fig. 3. Finite element grid system for modeling.

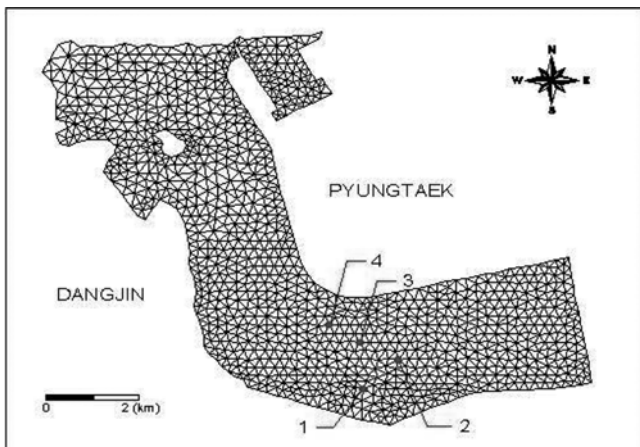


Fig. 4. Grid system around ocean outfall.

되도록 하였으며, 개방경계조건으로는 경계면 선상의 각 격자점에서 주요 4대 분조(M_2 , S_2 , K_1 , O_1)의 합성에 의한 조위를 지정하였다.

아산만에 위치한 연수지방산업단지(Fig. 2) 폐수종말처리수의 해양방류 위치 및 방류방식 선정에 필요한 해수유동 기초자료 확보를 위해 아산만 전체해역을 대상으로 모형을 수립하였으며, 전체 해수유동모델링 해역에 대한 격자망은 Fig. 3과 같고, 해양방류 예정지점 부근에 대한 유한요소 격자망은 Fig. 4와 같다. 수심 자료는 국립해양조사원 발행 수치해도를 참고하였으며, 장래 건설될 하수 처리수 해양방류구 설치지점에서 장래 지형변화를 정확하게 고려하기 위하여 처리장 운영시점의 방류수역 준설계획(해양수산부[2001])을 고려하여 격자망과 수심자료를 정확하게 작성하였다.

정[2006]은 해수유동 수치모형의 정확성을 검증하기 위하여

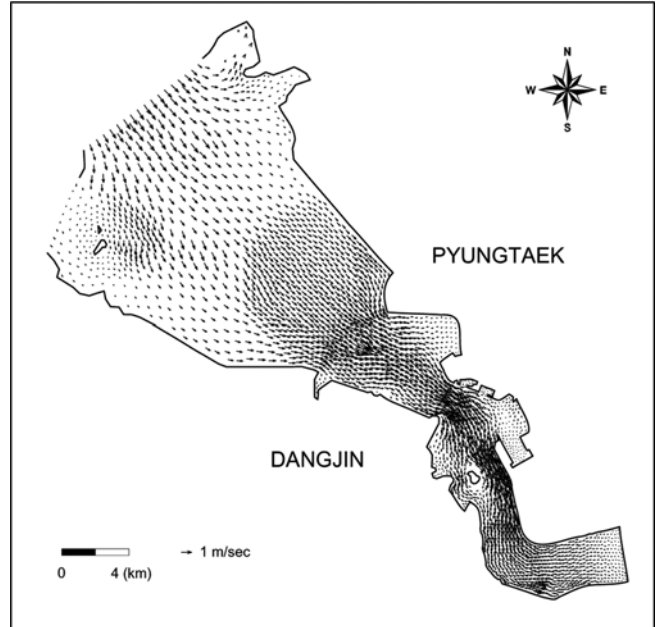


Fig. 5. Flood currents in Asan Bay.

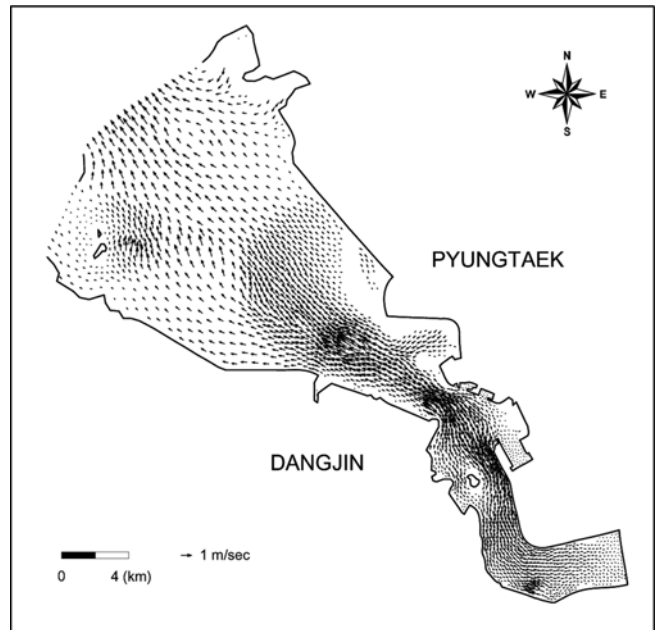


Fig. 6. Ebb currents in Asan Bay.

2003년 8월 14일부터 15일간 관측한 조류자료 및 평택항에서 관측한 조위자료(평택지방해양수산청[2003])와 비교하였으며, 모의 결과가 관측유속과 일치하는 양호한 결과를 보였다. 본 연구에서 사용한 해수유동모형은 정[2006]의 연구에서 사용한 모형과 동일한 모형으로 본 연구를 위하여 방류구 설치 예정해역 주변에서 격자망, 해저지형, 수심의 일부를 수정하였다. 하수 방류예정지점으로 방류지점의 수심 및 주변지형, 처리장으로부터 방류관의 길이 등을 고려하고 해수유동 모의결과를 참조하여 1차로 4개의 정점을 Fig. 2와 같이 선정하였다. Fig. 5와 6은 각각 전체해역에 대한

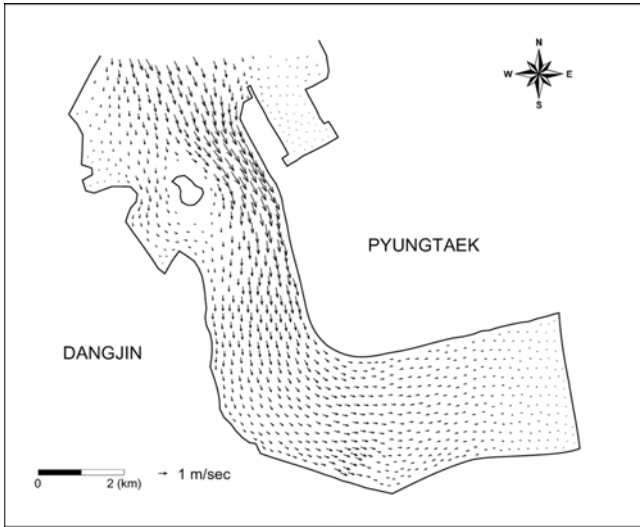


Fig. 7. Flood currents around ocean outfall in spring tide.

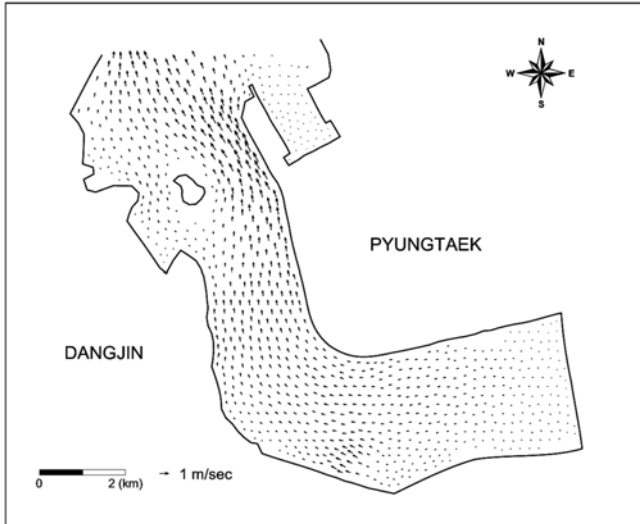


Fig. 8. Ebb currents around ocean outfall in spring tide.

대조기 창조류와 낙조류의 분포도이고, Fig. 7과 8은 각각 방류 예정지점 부근에 대한 대조기 창조류와 낙조류의 분포도이다. 방류 후보지점의 수심은 조시 및 위치에 따라 1.2~16.4 m로 크게 변화하며, 대조기 평균유속은 16.5~29.2 cm/sec, 소조기 평균유속은 9.5~13.2 cm/sec로 대조기 유속이 소조기 유속의 약 2배이다.

3. 근해역 확산 수치모의

3.1 해양방류관 설계

수중방류 확산관 설계는 확산관의 형태와 설치 위치, 도수관 및 확산관의 크기 및 길이, 연직유도관과 방류공의 형상 및 직경을 결정하는 것이다(Jirka and Akar[1991]). 또한 해양방류 위치는 해양방류에 따라 발생하는 방류구 인근해역에서 고농도의 발생을 억제하고, 수질오염을 최소화하도록 확산관의 위치를 선정해야 한다. 도수관 및 확산관, 연직유도관 또는 방류공의 크기와 간격은 일련의 복잡하고 반복적인 혼합특성 계산과 수리계산을 통하여 희석률이 극대화 되도록 설계되어야 한다. 해양방류하수의 설계유량은 폐수처리장의 설계조건인 9,600톤/일을 사용하였다.

확산관의 형태로 수중단일확산관과 수중다공확산관으로 결정하고, 각 방류관에 대해서 방류위치 및 설계제원에 따른 근역 확산특성을 비교·검토하였다. 확산관의 배치형태는 조류방향에 대해서 확산관의 축이 직각되게 수평으로 방류하도록 하여 방류하수의 희석률을 극대화하도록 하였다. 관로내의 유속은 부유물질의 퇴적이 발생하지 않도록 최소한 0.5 m/sec 이상을 유지할 수 있도록 하였으며, 확산관의 설치는 조류와 파랑 등의 작용으로 바닥에서 부유되는 퇴적물로 인한 매몰과 방류수 제트로 인한 해저면 저층퇴적물의 교란 및 재부상이 발생하지 않도록 해저면에서 1m 높은 위치에서 방류되도록 하였다. Fig. 2에 제시된 4개 정점에 대해 확산특성이 검토되었다. 방류후보지점별 평균수심은 정점 1에서 5.2 m, 정점 2에서, 7.4 m, 정점 3에서 10.3 m, 정점 4에서 12.3 m이며, 수심이 얕고 유속이 느려 희석률이 가장 낮을 것으로 예상되는 대조기 저조시 수심은 정점 1에서 1.2 m, 정점 2에서 3.4 m, 정점 3에서 6.3 m, 정점 4에서 8.3 m이다. 대조기 최강유속은 56.1~82.0 cm/sec이며, 대조기 평균유속은 16.5~29.2 cm/sec로 정점 4에서 가장 크고 정점 3, 2, 1 순으로 작아진다(Table 1).

3.2 단일확산관 설치시 근역확산 모의

근해역 확산모형으로는 전세계적으로 널리 사용되는 CORMIX 시스템을 사용하여 근역 확산을 모의하였다. CORMIX 시스템은 단일확산관 방류시 근역확산을 모의할 수 있는 CORMIX1 모형(Jirka and Donekar[1991]), 다공확산관 방류시 근역확산을 모의할 수 있는 CORMIX2 모형(Jirka and Akar[1991]), 표층방류시 확산 해석을 위한 CORMIX3 모형으로 구성되어 있다(Donekar and Jirka[1991]). 희석률 검토는 대조기 최강유속(Case 1)과 평균유속

Table 1. Water depth and tidal flow at the ocean outfall sites.

정점	수심 (m)					유속 (cm/sec)			
	평균	대조기		소조기		대조기		소조기	
		고조시	저조시	고조시	저조시	최강	평균	최강	평균
1	5.2	9.31	1.18	6.91	3.4	58.5	16.5	25.9	11.3
2	7.4	11.51	3.38	9.11	5.6	56.1	20.3	20.9	9.5
3	10.3	14.41	6.28	12.01	8.5	75.7	25.7	24.7	11.7
4	12.3	16.41	8.28	14.01	10.5	82.0	29.2	27.3	13.2

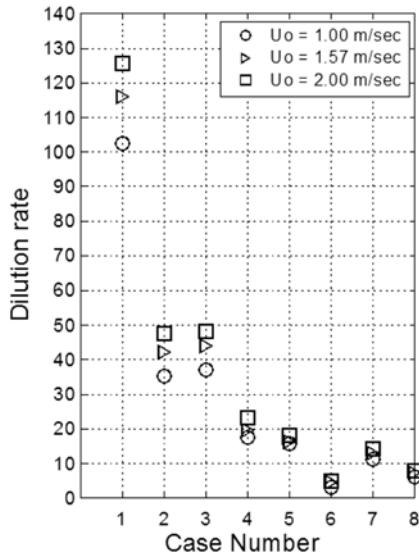


Fig. 9. Near-field dilution rate of single-port diffuser at various out-fall velocities.

(Case 2), 소조기 최강유속(Case3)과 평균유속(Case 4), 대조기 고조시(Case 5)와 저조시(Case 6), 소조기 고조시(Case 7)와 저조시(Case 8) 조건에 대해 실시하였다. 단일확산관 방류에 대한 근역희석률 검토에서 제안된 방류 후보지점 중 대조기 저조시 수심이 1.2 m인 정점 1은 수심이 얇아 방류구 바로 위에 해수면이 위치하여 희석효과가 거의 없었다. 방류유속에 따른 희석률 변화를 파악하기 위하여 방류유속 1 m/sec, 1.57 m/sec, 2 m/sec인 조건에 대해 정점 2에서 계산한 근역희석률은 Fig. 9와 같다. 검토된 방류유속에 변화에 따른 희석률 변화는 그림에서와 같이 30% 이내로 크지 않았다. 한편 근역희석률은 조석조건에 따라 최소 3에서 최대 125까지 크게 변화했다. 조석조건별 근역희석률은 Case 1과 같이 주변유속이 큰 경우에 크게 나타났으며, 수심이 가장 얇고

흐름이 없는 대조기 저조시(Case 6)에 가장 작았다. 정점별로 주변유속 유무에 따라 비교한 결과(Fig. 10)는 전반적으로 수심이 깊고, 주변유속이 큰 정점 4에서 희석률이 높게 나타났으나, 가장 큰 희석률은 대조기 최강유속시 정점 3에서 나타났다. 정점별 근역희석률의 차이는 5배 이내로 나타났다. 모의결과를 요약해 보면, 방류유속 변화에 따라 근역희석률 변화는 30% 이내로 크게 차이가 없었으나, 조석조건에 따라서는 최대 약 40배의 차이를 보였고, 정점별로는 수심이 깊고 주변유속이 빠른 위치에서 전반적으로 크게 나타났으나 정점별 차이는 최대 약 5배 이다. 특히하게도 최대 근역희석률은 정점 3에서 대조기 최강유속시에 발생하여 반드시 수심이 깊고 유속이 강한 경우에 희석률이 높지 않을 수 있다는 결과를 보였다. 이는 단순히 수심과 유속만을 고려하여 방류시스템을 결정할 것이 아니라 확산모의를 통해 희석률을 정확하게 검토하여 방류시스템을 설계할 필요가 있음을 의미한다.

3.3 다공확산관 설치시 근역확산 모의

평균수심이 얇고 주변수의 조류 유속이 상대적으로 약해서 전반적으로 방류하수의 희석률이 저조한 대조기 저조시에도 희석률을 증가시키기 위한 방안으로 다공확산관을 설계하고, 다공확산관 해석용 근해역 확산모형인 CORMIX2 모형을 사용하여 희석률을 계산하였다. 다공확산관을 통한 해양 수중방류는 국제적으로 강화되고 있는 해양환경 수질기준을 충족시킬 수 있는 희석률을 얻기 위한 가장 실용적인 수단으로 알려져 있다(Jirka와 Akar[1991]). 확산관 길이에 대한 희석률 변화를 보기위해 도수관에서의 방류유속은 1 m/sec로 고정하고, 확산관의 길이를 10 m, 15 m, 20 m, 30 m로 변화시키면서 근역희석률을 계산하였다. 다공확산관의 형상은 조석에 따른 주변유속의 방향변화에 따라 희석률이 크게 감소되지 않도록 연직도수관(riser)이 4개, 방류공이 16개인 양방향 다공확산관으로 설계하였다. 확산관에서 설계 방류유속은 1.38 m/sec 이다. 다공확산관의 길이별 정점 2와 정점 3에서 희석률 모의결과는 Fig. 11과 같다. 모의결과에 의하면 확산관의 길이가 15 m와 30 m인

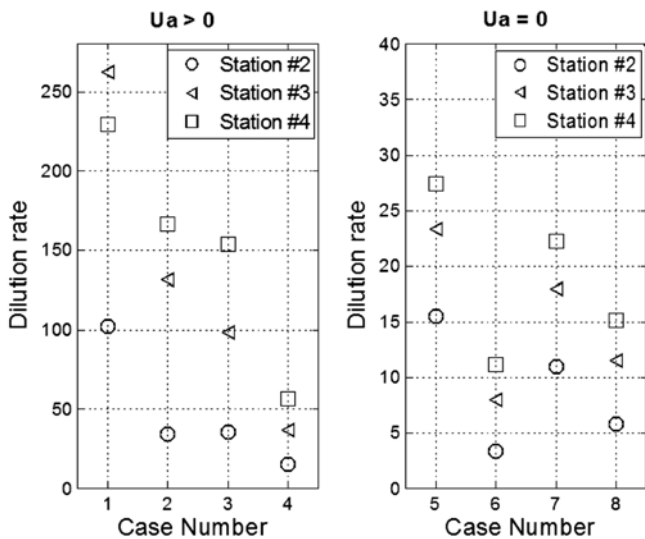


Fig. 10. Near-field dilution rate of single-port diffuser installed at station #2, #3 and #4.

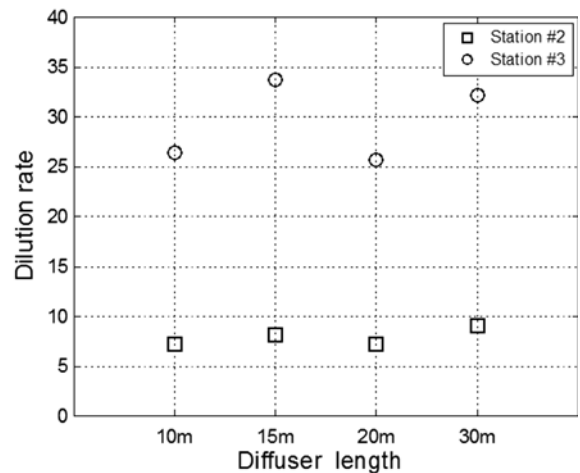


Fig. 11. Near-field dilution rate of multi-port diffuser at various diffuser lengths.

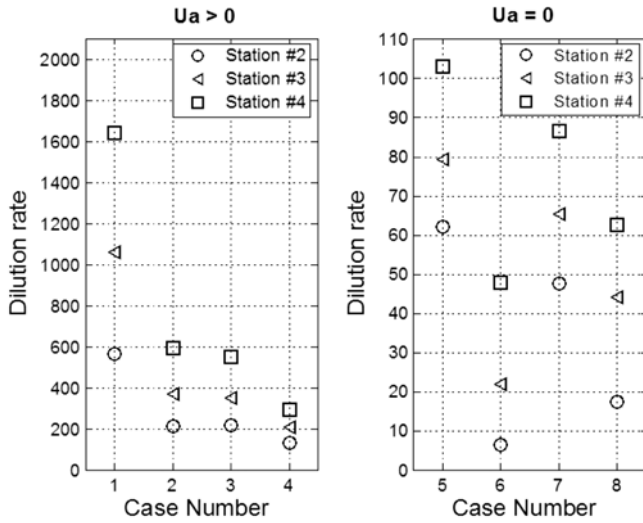


Fig. 12. Near-field dilution rate of multi-port diffuser installed at station #2, #3 and #4.

경우가 양호한 희석률을 보였다. 시공비 등의 경제적인 면을 고려할 때 확산관 길이를 15 m로 결정하였다. Fig. 12는 확산관 길이 15 m인 확산관에 대해 조석조건별 각 정점에서 모의한 결과이다. 정점 4에서 수중 다공확산관을 통해서 해양 방류된 하수의 희석률이 가장 높았으며, 특히 수심이 얇고 유속이 미약하여 희석률이 가장 저조한 주변 환경 조건인 Case 6의 경우에도 50 정도의 근역희석률을 얻을 수 있었다. 정점별 차이는 단일 확산관보다 약간 큰 최대 약 7배였으며, 조석조건별 차이는 최대 약 100배에 달해 40배인 단일관방류에 비해 크게 나타났다. 이는 다공관은 여러 개의 방류공으로 통해 방류함으로 인해 단일 방류공을 통해 방류하는 단일확산관에 비해 방류관경의 크기가 작아 수심 및 주변 유속에 의해 확산이 크게 영향을 받은 것으로 추정된다. 최대 희석률을 보이는 정점 4에서 단일확산관과 다공확산관 설치시 희석률 (Table 2)을 비교해 보면, 최대희석률을 보이는 대조기 최강유속 조건(Case 1)에서는 근역희석률이 단일확산관 방류시에 230.4에서 다공확산관 방류시에 1640.7로 7.1배 증가 하며, 수심이 얇아 희석률이 가장 작은 대조기 저조시에는 단일확산관 방류시에 11.1에서 다공확산관 방류시에 47.9로 4.3배 증가하였다. Table 2의 정점 4에서 결과를 보면, 다공확산관은 단일확산관에 비해 근역희석률을 3.6 ~ 7.1배 증가시키는 효과가 있어 아산만과 같이 수심이

Table 2. Near-field dilution at Station #4.

Case number	Depth(m)	Ambient velocity(m/s)	Dilution		B/A
			single-port(A)	multi-port(B)	
1	12.31	0.82	230.4	1640.7	7.1
2	12.31	0.29	165.7	593.4	3.6
3	12.31	0.27	153.7	556.1	3.6
4	12.31	0.13	56.4	285.9	5.1
5	16.41	0	27.7	103.1	3.7
6	8.28	0	11.1	47.9	4.3
7	14.01	0	22.2	86.7	3.9
8	10.5	0	15.1	62.7	4.2

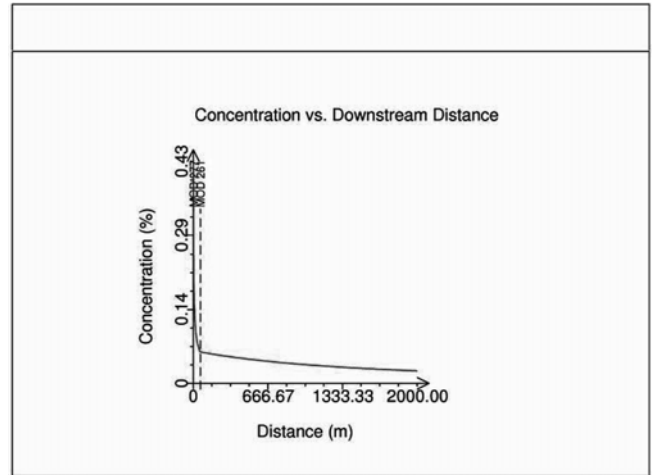


Fig. 13. An example of near-field dilution rate at the downstream.

얇은 해역으로 해양방류시에는 해양오염을 저감시킬 수 있는 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. Fig. 13은 CORMIX2 모형에서 제시되는 모의결과의 한 예로 정점 4에서 대조기 최강류 조건에서 조류 흐름방향으로 오염물질의 농도변화이다. 초기 100m 이내에서 급격하게 농도가 감소하는 모습을 볼 수 있다. 이외에도 본 논문에는 제시되지 않았지만 CORMIX2 모형은 수표면에서 확산플룸의 평면분포와 연직분포 등을 그림으로 보여준다.

4. 원해역 확산 수치모의

본 연구에서는 오염물질의 이송-확산 과정을 비교적 정확히 모의할 수 있으며, 그 결과의 가시화에 용이한 입자추적모형을 수립하고, 검증 및 적용하였다. 특히 입자추적모형은 이송-확산방정식의 이송항 차별화 과정에서 발생하는 수치분산을 저감할 수 있어 확산문제 해석에 널리 사용되고 있다.

수심적분된 2차원 오염물질 이송-확산방정식은 다음과 같다 (Fischer 등[1979]).

$$\frac{\partial Hc}{\partial t} + \frac{\partial UHc}{\partial x} + \frac{\partial VHc}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_{yy} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_{xx} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \quad (4)$$

여기서, c 는 오염물질의 농도, D_{xx} , D_{yy} , D_{zz} 는 확산계수이다.

처리수의 해양방류로 인해 야기되는 오염물질의 원해역 확산을 평가하기 위하여 입자추적법을 사용하는 2차원 이송-확산모형을 수립하고, 오염물질의 확산범위를 계산하였다. 본 연구에서 사용한 입자추적모형은 이송-확산방정식의 이송항 차분화 과정에서 발생하는 수치분산을 저감할 수 있어 확산문제 해석에 널리 사용되고 있다(Dimou and Adams[1993]). 본 연구에서 사용한 입자추적모형에 대해서는 정 등[2004]과 정 등[2008]에 계산방법, 검증과

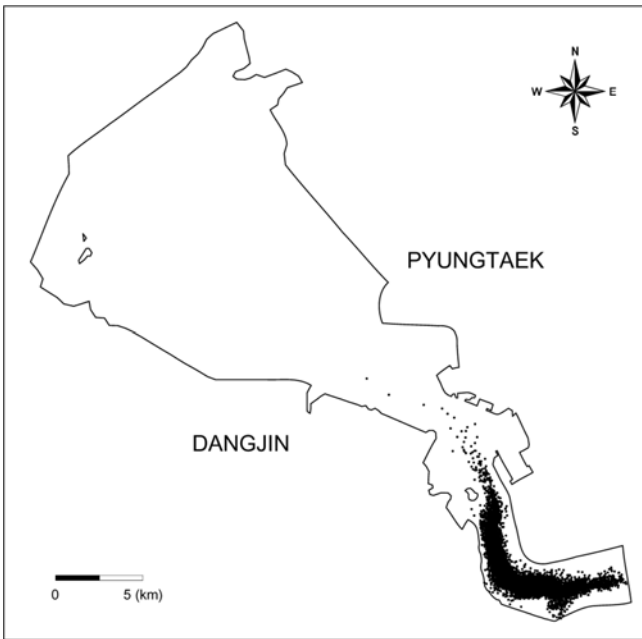


Fig. 14. Distribution of particles released at station #2 at low water of spring tide.

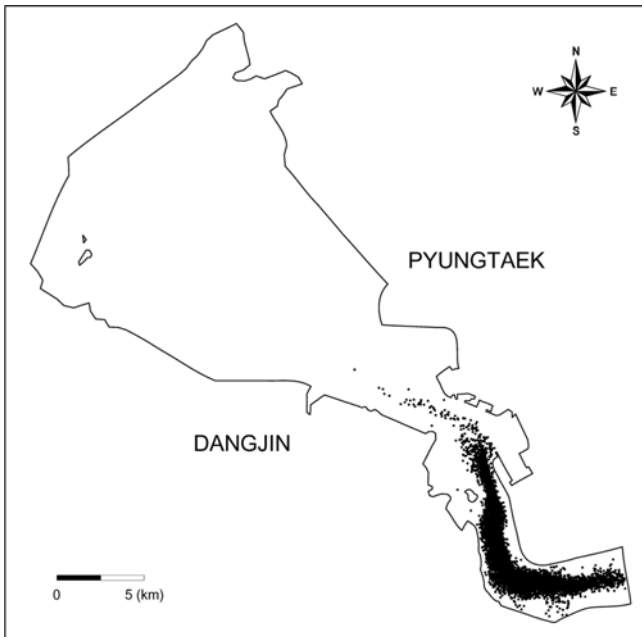


Fig. 15. Distribution of particles released at station #3 at low water of spring tide.

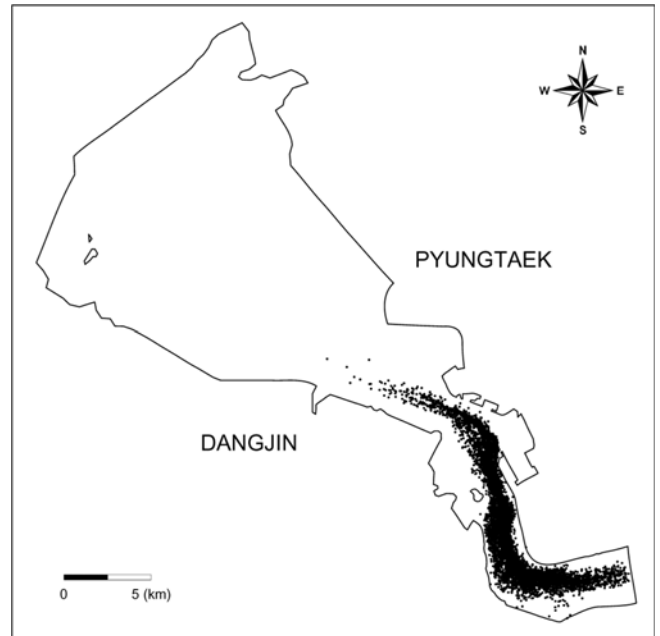


Fig. 16. Distribution of particles released at station #4 at low water of spring tide.

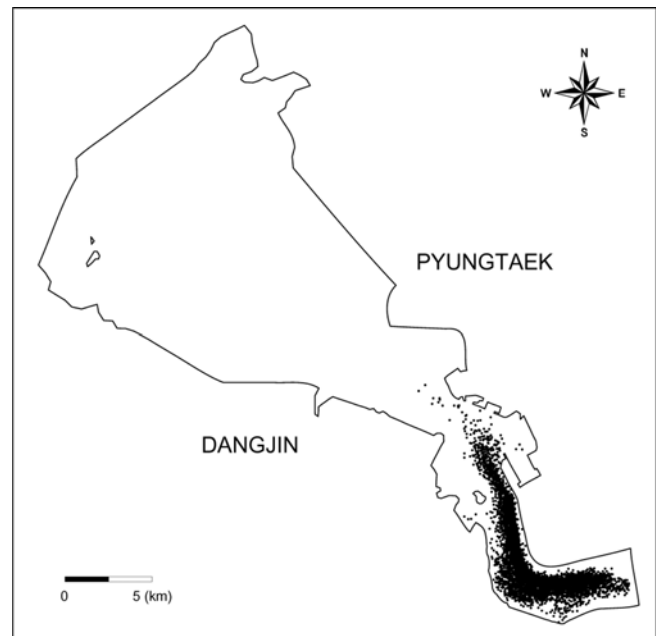


Fig. 17. Distribution of particles released at station #4 at low water of neap tide.

정 등이 자세히 설명되어 있다. 확산계수는 현장 부표추적자료에 기초하여 산정한 값들의 평균치인 $3.4 \text{ m}^2/\text{sec}$ 를 사용하였다(인천 항건설사무소[1996]). 매 5분마다 1개씩 30일간 연속적으로 입자를 방출하여 얻은 최종결과이다. Fig. 14-16은 각 정점에서 방류한 하수가 외해로 가장 멀리 확산하는 대조기 낙조시의 입자분포도이다. 정점 2에서 방류한 경우는 내만에 주로 입자가 머무는 데 비해 정점 4에서 방류한 경우가 외해로 보다 멀리 확산하는 모습을 보였다. 이는 정점 4의 위치가 보다 외해 쪽으로 있으며, 방류

지점의 조류 크기가 더 강하기 때문에 외해로 잘 확산되는 것으로 판단된다. 정점 3에서 방류하는 경우는 정점 2와 정점 4에서 각각 방류한 경우의 중간상황의 확산양상을 보였다. 정점 4에서 소조기 저조시(Fig. 17)는 대조기 저조시 보다는 확산범위가 작았으나 정점 2와 3의 대조기 확산범위와는 거의 유사하였다. 따라서 방류위치가 원해역 확산에 있어서 중요한 인자임을 모의결과로부터 확인할 수 있었으며, 방류위치에 따른 확산특성 차이는 장기적인 수질에 큰 영향을 줄 것이다.

5. 결 론

해수유동 모의결과인 수심과 유속에 기초하여 4개의 처리수 방류후보지점을 예비 선정하고, 해수유동 모의결과와 방류량 자료 등을 토대로 단일확산관과 다공확산관 설치에 대한 확산 효과를 검토한 결과로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 단일확산관 모의에서 방류유속(1~2 m/sec)에 따른 희석률 변화를 검토한 결과, 방류유속 변화는 근역희석률을 30%이내로 변화시켜 방류유속은 근역확산에 큰 영향을 미치지 않았다. 한편 단일확산관에 대한 근역희석률은 조석조건에 따라 최소 3에서 최대 125까지 크게 변화하였다. 조석조건별 근역희석률은 주변 유속이 빠른 대조기 창조시와 낙조시에 가장 크며, 수심이 가장 얇고 주변유속이 약한 대조기 저조시에 가장 작았다. 전반적으로 수심이 깊고, 유속이 빠른 정점 4에서 희석률이 높게 나타났으나, 가장 높은 희석률은 정점 4보다 수심과 최대 유속이 작은 정점 3에서 대조기 최강류시에 나타나 반드시 수심이 깊고 유속이 빠르다고 희석률이 높지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 앞으로 추가적인 연구가 필요한 부분이다. 다공확산관 모의에서 확산관 길이에 대한 희석률 변화를 보기위해 확산관의 길이를 10~30 m로 변화시켜 가면서 모의한 결과, 확산관 길이 15 m와 30 m의 결과가 거의 유사한 희석률을 보여 반드시 확산길이가 길다고 확산측면에서 좋은 것이 아니라 주변유속과 수심 등의 특성에 맞춰서 설계해야함을 확인할 수 있었다. 다공확산관을 통해서 수중으로 방류하는 경우에는 수심이 얇고 유속이 미약하여 희석률이 가장 낮은 대조기 저조시에도 50 정도의 양호한 근역희석률을 얻을 수 있었다. 정점별 희석률의 차이는 단일 확산관과 비슷하였으며, 조석조건별 차이는 최대 약 100 배에 달해 40배인 단일확산관 방류에 비해 크게 나타났다. 정점 4에서 단일확산관과 다공확산관 설치시 희석률을 비교해 보면, 다공확산관은 단일확산관에 비해 근역희석률을 3.6~7.1배 증가시키는 효과가 있어 본 연구 대상해역과 같이 수심이 얇은 해역으로 해양방류시에는 해양오염을 저감시킬 수 있는 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. 처리수의 해양방류로 인해 야기되는 오염물질의 원해역 확산을 평가하기 위하여 입자추적법을 사용하는 2차원 이송-확산모형을 수립하여 오염물질의 확산범위를 계산한 결과, 외해 쪽에 가까운 위치에서 방류하는 경우가 하수를 외해로 보다 멀리 확산시켜 방류위치가 원해역 확산을 증가시키는 데 있어서 중요한 인자임을 확인할 수 있었으며, 이는 장기적인 관점에서 방류

해역의 수질을 양호하게 관리하기 위해서는 가능한 외해와 해수 교환이 잘 되는 지점에 방류관을 설치해야 함을 의미한다. 본 연구결과는 해양방류관의 최적 방류위치와 방류관 형식을 결정하는데 있어서 과학적인 접근방법의 표준으로 널리 활용될 수 있을 것이며, 앞으로 환경적으로 지속가능한 연안해역 개발을 위해 환경영향을 최소화하기 위해서는 해양방류 방식 및 확산 평가방법에 대한 연구에 보다 많은 관심을 가져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의한 연구결과입니다.

참고문헌

- [1] 강시환, 김영도, 이호진, 김상익, 한성대, 2001, "해양수리특성의 변화를 고려한 연속적 근역혼합거동", 한국해양환경공학회지, 4(4): 12-20.
- [2] 강시환, 유승협, 오병철, 박광순, 2000, "마산-창원 하수종말 처리장의 해양방류처리수에 대한 초기 근역희석연구(II)", 한국해양환경공학회지, 3(1): 35-44.
- [3] 강시환, 정태성, 1998, "연안방류시설의 적정배치를 위한 해양환경 공학적 고찰", 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, 101-106.
- [4] 김창시, 1998, 근역혼합모형을 이용한 해양방류 하수의 혼합 특성 예측. 석사학위논문, 서울대학교.
- [5] 서일원, 박문현, 1999, "CORMIX모형의 국내해양방류시설에 대한 적용성 검토", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 297-300.
- [6] 인천환경건설사무소, 1996, 아산항 II단계 개발사업 실시설계용역 수치모형실험.
- [7] 정태성, 2006, "투수성 호안제체를 통한 해수교환을 고려한 해수유동모의", 한국해양-해양공학회지, 18(4), 301-307.
- [8] 정태성, 김창식, 1992, "이동경계를 고려한 유한요소 해수유동모형", 한국해양-해양공학회지, 4(3), 687-699.
- [9] 정태성, 김태식, 2008, "목포해역의 해수유동 및 담수확산 예측시스템", 한국해양환경공학회지, 11(1), 13-23.
- [10] 정태성, 김태식, 강시환, 2004, "준설공사시 부유사 확산 예측시스템의 개발", 한국해양-해양공학회지, 16(1), 47-55.
- [11] 평택지방해양수산청, 2003, 평택(아산)항 외곽호안 축조공사 구조 및 수리계산서 제2권 해양조사.
- [12] 한국해양연구소, 1994, 폐쇄성 연안해역의 수질관리기술 연구(II), 한국해양연구소 연구보고서 BSPN 00241-720-2.
- [13] 해양수산부. 2001. 평택항 종합개발 기본계획 정비용역 보고서.
- [14] Chung, T.J., 1978, Finite Element Anaysis in Fluid Dynamics, McGraw-Hill, Inc.
- [15] Dimou K.N. and Adams, E.E., 1993, "A random-walk, particle tracking model for well-mixed estuaris and coastal water, Estuarine", Coastal and Shelf Science, 37, 99-110.
- [16] Doneker, R.L. and Jirka, G.H., 1991, "Expert system for mix-

- ing-zone analysis and design of pollutant discharges”, Journal of water Resources Planning and Management, 117(6): 679-696.
- [17] Fischer, H.B., Imberger, J., List, E.J., Koh, R.C.Y., and Brookes, N.H. 1979. Mixing in inland and coastal water. Academic Press, New York.
- [18] Jirka, G.H. and Akar, P.J., 1991, “Hydrodynamic classification of submerged multiport-diffuser discharges”, J. of Hydraulic Eng., ASCE, 117(9): 1113-1128.
- [19] Jirka, G.H., and Doreker, R.L., 1991, “Hydrodynamic classification of submerged single-port discharges”, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117(9): 995-1112.
- [20] Kawahara, M. and Umetsu, T., 1986, “Finite element method for moving boundary problems in river flow”, Int. J. for Numer. Meth. in Fluids, 6, 89-112.
-
- 2009년 3월 13일 원고접수
 2009년 3월 30일 심사완료
 2009년 4월 20일 수정본 채택