Journal of the Korean Society
for Marine Environmental Engineering
Vol.4, No. 2. pp. 15~24, May 2001

마산만 해양방류 혼합구역에서의 하수농도 분포 변화

강시환(1), 유승협(1), 김상익(1), 오병철(1), 박광순(1)

Concentration Changes of Wastewater Effluent Discharge in the Mixing Zone of Masan Sea Outfall

by
See-Whan Kang(1), Seung-Hyup You(1), Sang-Ik Kim(1)
, Byung-Cheol Oh(1) and Kwang-Soon Park(1)

요 약

Huang 등[1996]이 제안한 해양방류 혼합구역에 대한 분석방법을 활용하여 마산만 해양방류 해역의 혼합구역에서 주변해수의 흐름과 밀도성층의 변화에 따른 혼합·희석에 의한 수중방류하수의 농도변화분포를 산정하였다. 방류해역에서 5월 중순부터 8월 중순까지 3개월 동안 연속 관측된 조류의 매 시간별 유향과 유속변화에 따른 혼합구역에서의 하수농도분포를 계산하고, 마산만 해수유동에 있어 가장 큰 요소인 조류의 변화를 고려하여 15일 간격으로 방류하수의 평균된 농도분포를 구하였다. 이 결과에 의하면 조류의 유속이 상대적으로 강했던 기간동안에는 혼합구역에서의 평균농도는 매우 낮았고, 유속이 약했던 기간에는 낮은 희석률로 인해 평균농도가 매우 높게 나타났다. 그리고 관측된 조류의 주 방향으로 인해 혼합구역이 방류해역의 서측 해안까지 확장됨을 나타내었으며, 이는 방류해역에서 조사된 퇴적물의 오염도 분포결과와도 잘 일치되었다.

Abstract

The concentration changes of discharged wastewater effluents due to ambient current flows and density stratifications in an outfall mixing zone have been investigated by using the outfall mixing zone analysis of Huang *et al.*[1996]. This analysis was applied to Masan sea outfall case and the concentration distributions of wastewater effluent discharges were simulated using three month period of current-meter data measured in the outfall site. Hourly concentration distributions of wastewater effluents were averaged for the period of 15 days which covers the flow conditions of the neap and the spring tidal currents in Masan Bay. The results show that the wastewater concentrations in the Masan outfall mixing zone were very low due to the higher dilution rates during the period of strong ambient currents and less density stratifications. The higher concentrations in the mixing zone were found in August because of strong density stratifications with low ambient currents. The mixing zone was extended to the west coast beach area because of major tidal current directions. This result can be used to

(1) 정회원, 한국해양연구원 연안·항만공학연구본부

explain the dynamical reasons for the depositional distribution of the contaminated sediments in Masan sea outfall area.

Keywords : Wastewater effluents, Outfall mixing zone, Masan sea outfall, Concentration distribution

1. 서 론

선진국에서는 오래 전부터 임해 대도시 하수종말처리장에서 방출되는 대용량의 처리수를 Fig. 1 에서처럼 긴 도류관을 통해서 연안으로부터 먼 거리의 깊은 수심에서 수중 방류시키는 방식을 채택하고 있다. 수중 확산관을 통하여 고속으로 방류하면 방류수의 운동량과 밀도 차에 의한 부력효과와 함께 주변해수의 흐름을 이용하여 방류 하·폐수의 희석률을 크게 높일 수 있으며 주변 경관에 미치는 영향도 저감할 수 있어 최근에 와서는 방류수로 인한 연안해역의 환경적 악영향을 최소화시키는 수단으로 전세계적으로 널리 사용되고 있다(Wood *et al.* [1993]). 방류된 하수는 방류수심, 조류, 밀도성층 등의 해양환경요소와 방류량, 방류수밀도, 확산관 형태 등의 방류특성 등에 의해 초기혼합 희석률이 좌우된다(Fischer *et al.* [1979]).

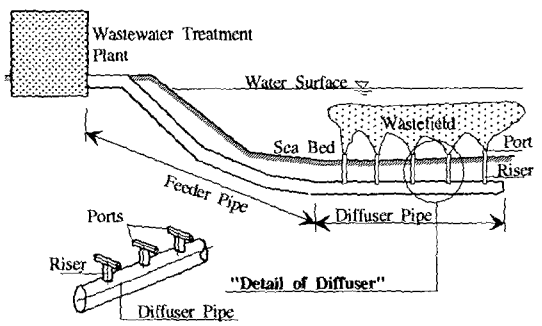


Fig. 1 Ocean outfall system with a submerged multiport diffuser.

주변수와의 초기혼합·희석과정을 통해 방류하수의 오염물질 농도가 급속히 감소하게 되는 구역을 혼합구역(mixing zone)이라고 하며, 미국의 경우 혼합구역의 경계영역에서 오염물질의 종류와 유해성 정도에 따라 희석농도를 규제하는 법적혼합구역(regulatory mixing zone)을 설정하여 방류 하·폐수로 인한 환경적 악영향을 최소화하는 조치를 취하고 있다(Jirka [1990]). 미국환경청에서는 법적혼합구역의 설정을 위해 CORMIX (Doneker and Jirka [1990]), PLUMES(Roberts *et al.* [1989]) 등의 초기혼합·희석모형을 주로 사용하고 있으나 주변해수 흐름의 시간적 변화에 따른 방류하수의 농도변화분포를 연속적으로 고려할 수 없는 제한성이 있다. 이러한 비정상상태(unsteady state)의 흐름조건에 대해서 Huang *et al.*[1994, 1996]은 해양방류 초기근역에서 혼합·희석에 따른 농도분포를 추정할 수 있는 분석방법을 제안하여 Miami Outfalls에 대해서 현장관측자료와 비교한 바 있으며, Roberts *et al.*[1997]도 조류변화를 고려할 수 있도록 PLUMES 모형을 수정·보완하여 Mamala Bay Outfall(Roberts [1999])에 적용하여 해양방류 혼합구역에서의 하수농도 변화를 추정한 바 있다.

본 논문에서는 방류수역에서 주변해수의 수리역학적 조건 즉, 해수의 유동성과 밀도성층 변화에 따른 혼합구역에서의 하수농도변화를 예측하기 위해 Huang *et al.*[1996]이 제안했던 방법과 강 등[1999, 2000]의 연구결과를 근간으로 혼합구역 분석모형을 수립하여 마산/창원 하수종말처리장의 방류수역에서 5월 중순부터 8월 중순까지 3개월 동안 연속적으로 관측된 해류자료를 모형모의를 위한 입력자료로 사용하여 마산만 해양방류수역에서 방류된 하수 농도의 시간적 분포변화를 추산하였다.

2. 해양방류수의 혼합구역 분석모형

2.1 모형의 구성

해양방류하수의 초기거동해석과 혼합희석률 추정을 위해 CORMIX 와 PLUMES 모형이 가장 널리 사용되고 있으나, 이 모형들은 주변수 흐름에 대해 정상상태(steady state)를 가정한 수리실험 결과로부터 방류수의 부력제트에 의한 혼합희석

특성이 결정되기 때문에 비정상상태의 주변수 흐름에 대해서는 초기혼합 희석률의 불연속적인 결과를 초래할 수 있다(Distante *et al.* [1994], Tomasko [1994]). 이에 반해 Huang *et al.*[1994, 1996]이 제안한 OMZA(Outfall Mixing Zone Analysis) 방법에서는 방류수역 조건 즉, 해류, 해수밀도분포 등의 연속적인 시계열 변화를 고려할 수 있도록 하였다.

해양방류구로부터 방류된 하수의 혼합거동 흐름 패턴(Fig. 2)을 살펴보면, 비성층이거나 약성층인 주변류의 흐름이 있는 수체로 방류된 하수는 부력의 영향을 받는 제트의 형태(Fig. 2(a))를 띠며, 수면아래에서의 혼합거동인 부력제트의 상승흐름, 제트의 상승으로 인해 발생하는 수면용승(boil)을 형성하는 흐름, 수표면에 형성된 하수 장플룸이 해류에 의해 이송되는 흐름(Fig. 2(b))

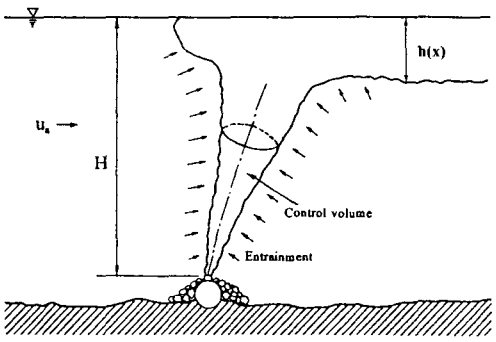


Fig. 2(a) Definition sketch of rising buoyant jet

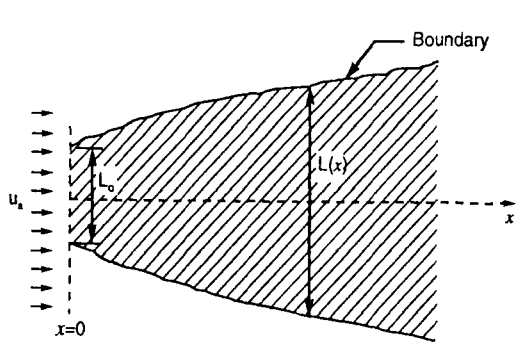


Fig. 2(b) Plan view of subsequent dispersion of a surface plume

으로 구분된다. OMZA 모형은 이 흐름 패턴에 기초한 4가지의 결정론적 모델을 이용하여 방류하수의 혼합거동을 해석한다. 4가지의 결정론적 모델은 다음과 같다. (1) A surface boil location model, (2) an initial dilution model, (3) a control volume model, (4) a subsequent dilution/dispersion model.

위 모델 중 (1), (2), (3)은 방류유체의 부력지배근역(BDNF; buoyancy-dominated near-field)과 부력지배원역(BDFF; buoyancy-dominated far-field)에 대한 근사해로 구성되어 있으며, 특히 (3)은 이 두 영역을 자연스럽게 연결하는 역할을 한다. BDNF와 BDFF의 영역구분은 방류수심 (H)에 대한 플룸/가로흐름의 길이축척 (l_b)의 비로써 결정된다. 부력지배근역(BDNF)은 $H/l_b \ll 1$ 인 구간을 의미하고, 부력지배원역(BDFF)은 $H/l_b \gg 1$ 인 구간을 나타내며, $H/l_b = O(1)$ 인 구간에서는 두 영역간의 천이가 이루어진다(Wood [1993]). 여기서 $l_b = B/u_a^3$ 이며, u_a 는 수심 평균된 조류의 유속이고, $B = Qg_0'$ 로써 방류수의 부력 플럭스(effluent buoyancy flux)이며, Q 는 방류수 흐름률(effluent flowrate)이고, g_0' 는 유효중력가속도라 하며 $g_0' = (\rho_a - \rho_0)g/\rho_a$ 로 정의된다. 여기서 ρ_a 와 ρ_0는 각각 주변해수밀도와 방류하수밀도이며, g 는 중력가속도이다. 본 논문에 기술된 수식에 사용된 기호는 Fig. 2 에 도시되어 있으며, OMZA 모형의 구성과 계산순서는 Fig. 3 과 같다.

2.2 모형의 지배방정식

Boil Location Model

흐름수역에서 수직부력제트로 수중 방류된 하수의 수면용승(boil)의 위치에 대한 근사해를 구하는 식은 다음과 같다(Wright [1997]).

$$S_{b1} = a_1 \frac{H^{4/3}}{l_b^{1/3}} \quad \text{for} \quad \text{BDNF} \qquad (1)$$

$$S_{b2} = a_2 \frac{H^{3/2}}{l_b^{1/2}} \quad \text{for} \quad \text{BDFF} \qquad (2)$$

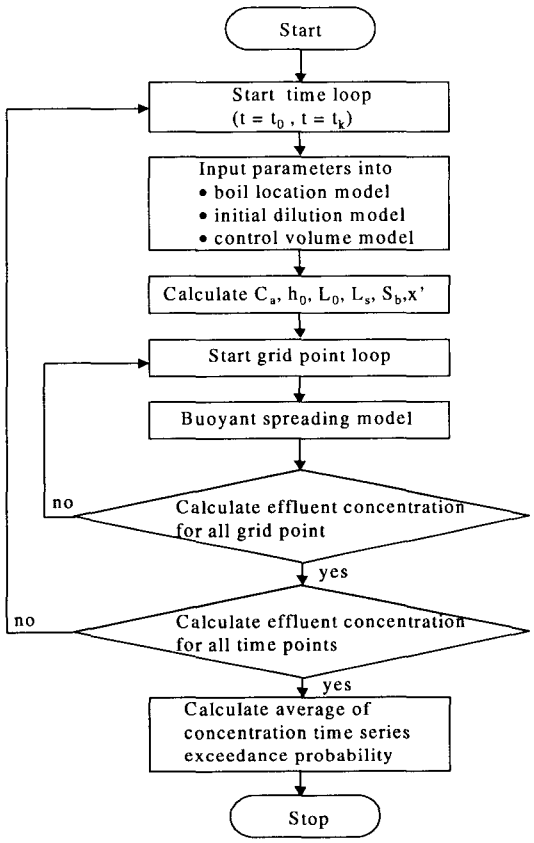


Fig. 3 The flowchart of OMZA model

여기서 S_b 는 방류지점으로부터 보일(boil)까지의 수평거리이며 a_1, a_2 는 방류량과 운동량에 의해 결정되는 상수이고, Doneker *et al.*[1990]에 의해 결정된 $a_1 = 0.5824$, $a_2 = 1.0$ 의 값을 사용한다. 첨자 1과 2는 BDNF와 BDFF 영역을 나타낸 것이다.

위의 두 식은 수평부력제트로 수중 방류될 경우에도 사용 가능하다. 왜냐하면 제트는 방류구로부터 짧은 구간 내에서 수평 방향의 운동량을 잃고 위쪽으로 구부러져 수직부력제트로 방류될 때의 형태로 전환되기 때문이다(Huang *et al.* [1996]). 본 연구에서 사용한 BDNF는 $H/l_b < 0.1$ 인 구간이고, BDFF는 $H/l_b > 10$ 인 구간이다. 또한 이 두 구간사이의 천이구간($0.1 \le H/l_b \le 10$)에 대해서는 선형중첩을 사용하였다.

Initial Dilution Model

흐름수역에서 부력제트에 의한 초기희석에 대한 근사해는 다음 식으로 구할 수 있다(Lee and Neville-Jones [1987]).

$$\frac{D_{m1} Q}{u_a \, l_b^2} = b_1 \left(\frac{H}{l_b} \right)^{5/3} \quad \text{for} \quad \text{BDNF} \qquad (3)$$

$$\frac{D_{m2} Q}{u_a \, l_b^2} = b_2 \left(\frac{H}{l_b} \right)^{2} \quad \text{for} \quad \text{BDFF} \qquad (4)$$

여기서 D_m은 방류수역의 수표면에서의 최소희석률(minimum or centerline dilution)이고 b_1, b_2 는 실험상수이며, $H/l_b < 0.1$에서는 $b_1 = 0.15$, $H/l_b > 0.5$ 에서는 $b_2 = 0.32$, 천이구간에 대해서는 현장실험을 통해서 구한 관계식을 사용하였다(Huang *et al.* [1996, 1998]).

Control Volume Model

control volume은 Fig. 2(b) 에 도시되어 있는 구역으로, boil을 포함하며 jump가 발생할 경우에는 수리학적 도수(hydraulic jump)까지 포함한다. control volume 모델은 control volume의 유출특성(outflow)을 예측하기 위한 모델이며, Initial dilution 모델과 subsequent dilution 모델을 연결시키기 위한 모델이다. control volume의 유출특성이라 함은 초기 근역희석률 D_a와 초기 근역에서의 하수농도 C_a($C_a = C_0/D_a$, 여기서 C_0 는 방류하수의 농도), 플룸(plume)의 폭 L_0 와 두께 h_0 그리고 boil의 중심으로부터 control volume의 상/하류의 끝 부분까지의 거리 등을 말한다.

플룸의 폭은 BDNF와 BDFF에 대해 각각 구하고, 천이구간에 대해서는 수면용승(boil) 산정 시와 같이 선형중첩을 이용한다. 플룸의 두께는 구간에 상관없이 다음의 식으로 구해진다.

$$h_0 = \frac{D_a \, Q}{u_a \, L_0} \qquad (5)$$

이 모델에서 구한 D_a, L_0 그리고 h_0 는 subsequent dilution 모델의 초기 값으로 사용되었다.

Subsequent Dilution/Dispersion Model

방류하수의 플룸의 subsequent dilution/dispersion은 방류구로부터 수백 미터(meter)에 걸쳐 발생하는 부력확장과 그 이후의 구역에서 발생하는 해류에 의한 난류확산으로 구성된다. 본 연구의 관심대상은 방류구 근처에서의 농도분포이므로 본 연구에서는 난류확산에 의한 영향은 무시하였다.

플룸이송의 중심축 방향 x에 대한 플룸의 폭 $L(x)$과 두께 $h(x)$는 수중방류수의 부력확장 실험결과(Doneker and Jirka [1990])에 의해서 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{L(x)}{L_0} = \left[3\,\alpha_2\left(\frac{l_b}{L_0}\right)^{1/2}\frac{x}{L_0}+1\right]^{2/3} \quad (6)$$

$$\frac{h(x)}{h_0} = \left[\frac{L(x)}{L_0}\right]^{\alpha_1-1} \quad (7)$$

여기서 α_1, α_2 의 상수 값은 $\alpha_1 = 0.59$, $\alpha_2 = 1.33$ 으로 Miami Outfalls 에서의 현장관측으로부터 Huang *et al.*[1996]에 의해 구해졌다. 보존성 물질에 대한 확산이론(Fischer *et al.* [1979])에 근거해서 플룸의 농도 분포식은 식 (8)과 같이 유도된다(Huang *et al.* [1996]).

$$C(x,y) = 1.832\,C_a\frac{h_0}{h(x)}\frac{1}{2}\times \quad (8)$$

$$\left[\mathrm{erf}\left(\frac{0.273\,L_0+y}{\sqrt{2}\sigma(x)}\right)+\mathrm{erf}\left(\frac{0.273\,L_0-y}{\sqrt{2}\sigma(x)}\right)\right]$$

$$\overline{C(x,y)} = \frac{\sum C_i(x,y,\Delta t)}{T} \quad (9)$$

위의 식들은 control volume 의 하류 끝부분의 중심을 $x=0$ 로 두어 계산한 것이며, y 는 플룸이송의 중심방향인 x 축에 수직인 방향이다. 식 (8)에서 $\sigma(x)$는 플룸폭에 대한 농도분포의 표준편차 값이고, $L(x) = 2(3)^{1/2}\sigma(x)$ 이다. 식 (9)는 x, y 의 한 지점에서 Δt 시간 간격으로 계산된 하수농도 $C_i(x,y,\Delta t)$ 를 합산한 결과에 대해서 총 모의시간 T 로 평균한 농도를 나타낸다.

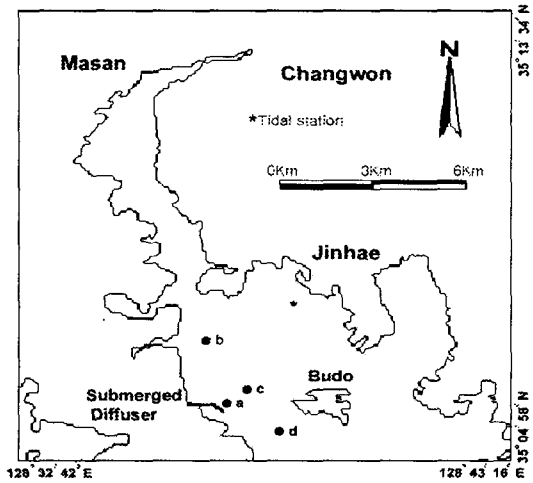


Fig. 4 Location map of the submerged ocean outfalls of Masan-Changwon POTW
(a, b, c, d : field survey sites of deposited sediments)

3. 마산만 해양방류 혼합구역의 농도분포 추정

3.1 마산만 해양방류시설

마산시와 창원시의 생활하수 및 공장폐수를 처리하는 마산/창원 하수처리장은 1차 처리된 하수를 진해만의 외해에 방류함으로써 마산항의 수질을 개선하고 수역 이용도를 높여 인접지역의 쾌적한 환경조성에 이바지할 목적으로 건설되었다. 하수처리장의 1단계공사는 1989년 9월에 준공되었고, 해양방류시설은 1990년 12월에 완공되었으며 1993년 5월에 차집시설 공사를 마친 후에 1993년 11월부터 본격적인 가동에 들어갔다. 마산시와 창원시에서 발생하는 도시하수와 공장폐수를 차집하여 처리용량 280,000 m³/day 규모의 1차 처리를 한 후 경상남도 창원군 구산면 옥계리(Fig. 4)에서 수중다공확산관을 통해 해양방류를 시행하고 있다. 이 시설물은 처리된 하수를 공칭직경 2 m 인 도수관을 통하여 해안으로부터 680 m 지점까지 이동한 후 총 길이 210 m 인 양방향확

산관을 통하여 수심 13 m 에서 방류된다. 확산관은 해안선과 거의 평행한 방향(약 15°)으로 총 21개의 연직유도관이 10 m 간격으로 설치되어 있으며, 각 연직유도관에는 4개의 포트(직경: 0.2 m)가 부착되어 총 방류공수는 84개이다(마산시 [1996]).

3.2 계산 입력자료

해양방류 혼합구역의 농도분포계산을 위한 입력자료는 Table 1에 있다. 마산만 방류해역에서 5월 중순부터 8월 중순까지 수심 5 m 에서 1시간 간격으로 연속 관측된 해류자료를 사용하였다. 동기간에 관측된 해류는 Fig. 5에 도시되어있다. 방류수역의 해수밀도 분포는 강 등[1993]의 현장 관측자료로부터 표층수의 밀도는 5월과 6월에는 1022 kg/㎥, 7월과 8월에는 1018 kg/㎥ 로, 저층의 해수밀도는 5월과 6월에는 1025 kg/㎥, 7월과 8월에는 1024 kg/㎥ 로 구하였다. 방류수심은 13 m, 방류량은 2.315 ㎥/s, 직경 0.2 m 의 방류관이 해저면으로부터 0.8 m 높이에 설치되어있는 조건을 부여하였다(강 등 [1999]). 혼합구역의 수평적 농도분포는 확산관위치를 중심으로 50 m 간격의 계산격자점에서 1시간 간격으로 방류수 농도분포를 계산하였다. 그리고 Fig. 5 에 도시한 해류자료에 나타난 바와 같이 조석에 의한 왕복성 조류가 우세하였다. 반일주조가 우세한 마산만의 조류를 감안하여 유속이 약한 소조기와 유속이 강한 대조기를 포함한 15일 동안에 대해 하수농도를 평균하였다.

3.3 혼합구역의 하수농도 분포

Fig. 6 은 수중확산관에서 방류되는 하수농도를 1.0 으로 기준 하였을 때 방류하수의 15일 동안의 평균된 혼합·희석 농도장분포를 나타낸 것으로 마산만 방류수역에서 관측된 3개월 동안의 연속적인 해류변화를 고려한 결과이다. 관측된 해류에는 바람에 의한 풍성류, 조석잔차류 등이 포함되어 있으나 조류성분이 가장 우세한 것으로

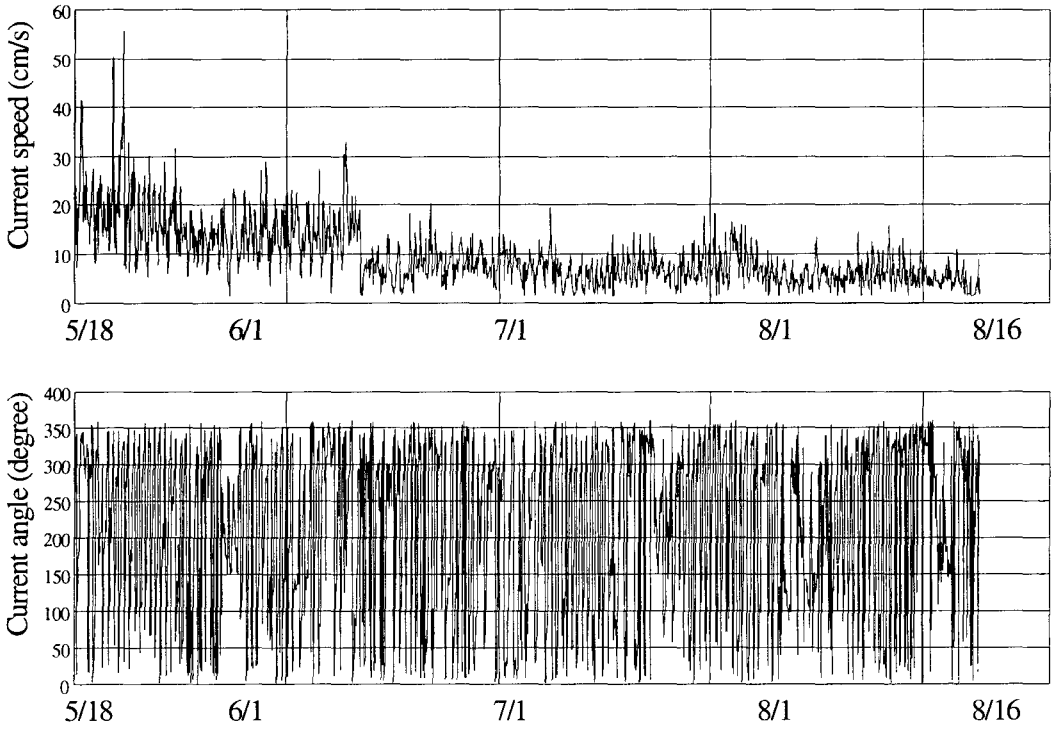
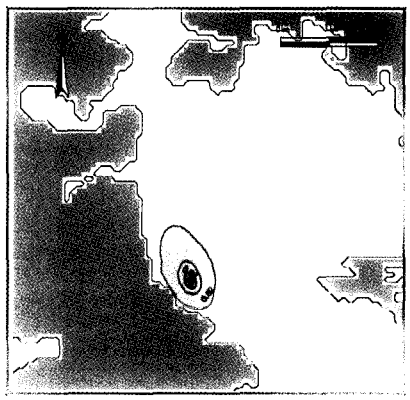
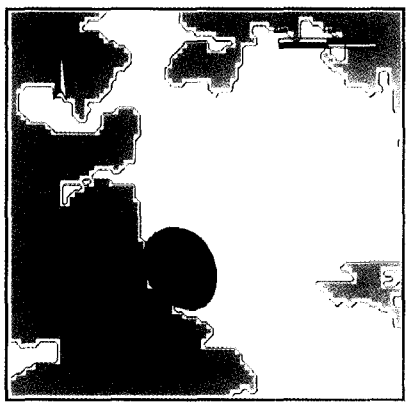


Fig. 5 Current speeds and directions measured at Masan outfall site

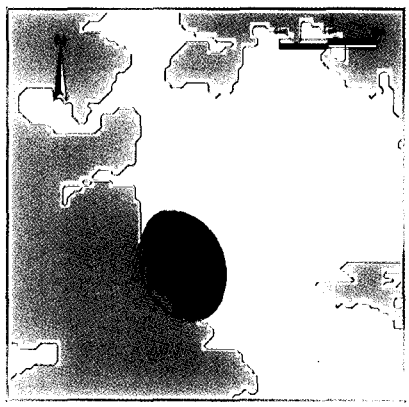
(a) 18 May - 30 May.



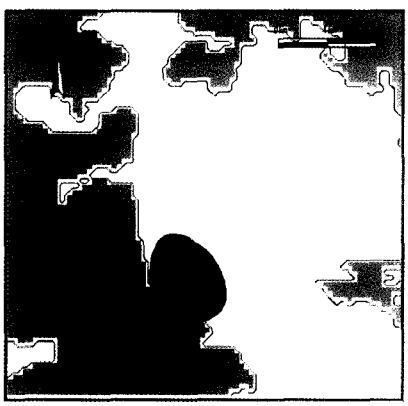
(b) 1 Jun. - 15 Jun.



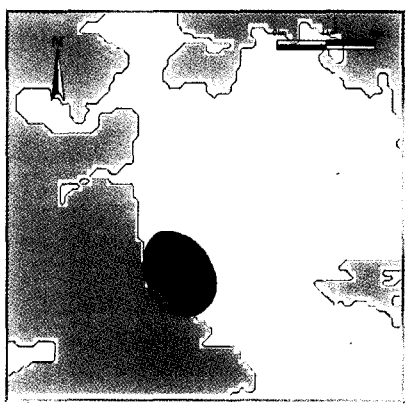
(c) 16 Jun. - 30 Jun.



(d) 1 Jul. - 15. Jul.



(e) 16 Jul. - 31 Jul.



(f) 1 Aug. - 16 Aug.

Fig. 6 *Distribution of 15-day averaged concentrations of wastewater effluents discharged from Masan sea outfall*

Table 1 Input data for the mixing zone analysis of Masan sea outfall

Parameters	Masan outfalls' case
Total depth (m)	13
Flow rate (㎥/s)	2.315
Port diameter (m)	0.2
Port height (m)	0.8
Discharge type	Horizontal discharge
Surface ambient density (kg/㎥)	1022(May, Jun.), 1018(Jul., Aug.)
Bottom ambient density (kg/㎥)	1025(May, Jun.), 1024(Jul., Aug.)
effluent density (kg/㎥)	998(May, Jun.), 995(Jul., Aug.)

나타났다(강 등 [1993]). 마산만의 방류수역에서는 약 6시간마다 조류(창조류와 낙조류)의 흐름방향이 남-북 방향으로 바뀌고 있으며, 이러한 주변수 흐름변화의 영향으로 하수의 혼합 희석정도와 혼합구역의 영역도 크게 변하게 된다. 따라서 확률적 방문빈도개념을 도입하여 50 m 간격의 각 계산격자점에서 주변유속의 변화로 인한 하수농도의 변화 값과 방문빈도수에 따른 15일 동안 평균된 희석농도의 값을 결정할 수 있다. 미국환경청에서 채택하고 있는 법적혼합구역에서의 규제농도 기준은 이러한 하수농도의 확률적 방문빈도분석을 통해 설정된다(Huang et al. [1996]). 여기서, 확률적 방문빈도분석이라 함은 수질규제를 위한 오염물질농도가 미리 설정된 법적혼합구역의 경계 끝에서, 하수에 포함된 오염물질의 농도가 수질기준을 초과하는 횟수(방문빈도)와 농도를 초과확률적으로 분석하는 방법을 말한다.

Fig. 6 에 나타난 마산만 수중방류하수의 희석농도 분포를 살펴보면 조류유속이 강했던 5월 중순부터 6월 중순까지의 기간동안에는 주변수의 빠른 흐름으로 인해 초기희석률이 증가하여 혼합구역에서 낮은 하수농도분포를 보이고 있으며, 유속이 약했던 7월과 8월의 경우에는 하계의 성층효과(강 등 [1999])로 인해 초기희석률이 더욱 낮아져 높은 하수농도분포를 보이고 있다. 특히 수괴의 성층이 심한 8월의 경우 확산관 인접수역에 방류하수가 정체되고 있음을 알 수 있다. 그리고 하수 농도장의 분포범위와 형상은 대상기간의 해류상황에 따라 약간씩 차이를 보이고 있으나, 해안선에 평행한 조류의 주 방향에 따라 북서-남동향으로 대칭적이면서 마산만의 내부인 북쪽으로 더욱 확장된 모습을 나타내고 있다. 수중확산관의 위치로부터 약 700 m 떨어진 해안까지도 혼합구역이 포함되어 있어 방류하수로 인한 오염이 극심할 것으로 예상된다. 이러한 방류하수의 농도분포 결과는 Table 2 에서 나타난 바와 같이 권영택 등[1998]에 의해 Fig. 4 의 a, b, c, d 지점에서 조사된 해저퇴적물의 중금속 함량분포와도 잘 일치됨을 알 수 있다. 김영도 등[2000]의 입자추적모형에 의한 방류하수의 이송 확산 예측결과에 의하면 침강속도가 큰 조립자들은 대부분 확산관 주변에 퇴적되고 있어 방류수역의 퇴적물 오염 또한 크게 악화될 것으로 예상된다.

Table 2 Field survey data of deposited contaminants in Masan outfall area(Kwon and Lee [1998])

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

4. 결 론

우리 나라의 대표적인 해양방류시설인 마산/창원 하수종말처리장의 하·폐수 방류에 의한 혼합구역에 대해서 Huang *et al.*[1996]이 제안했던 혼합구역 분석방법과 강 등[1999, 2000]의 CORMIX 모형에 의한 연구결과를 근간으로 혼합구역분석모형을 수립, 적용하여 주변 해수의 유동성과 밀도성층변화에 따른 하수농도의 분포변화에 대해 고찰하였다. 이 분석방법은 매순간 변화하는 주변 해수의 수리역학적 조건 즉, 유속, 유향, 수온, 염분변화에 따른 방류수의 농도분포 예측이 가능하므로 혼합구역의 범위와 규제농도의 설정이 가능하다. 우리 나라의 경우 연안해역수질기준과 배출허용기준에만 의존하여 연안수질을 규제·관리하고 있는 상태로, 미국의 경우처럼 해양방류수역의 법적혼합구역 설정에 의한 제도적 장치는 아직 마련되지 못한 실정이다. 법적혼합구역은 주변수역의 해양학적, 생태학적, 경제·사회적 특성들을 고려하여 방류수에 의한 주변환경요소를 최소화하고 수질을 보전하기 위해 일정한 거리 혹은 면적에 대해 오염물질의 농도가 미리 설정된, 규제농도 이하로 혼합·희석되도록 제한하는 구역이다.

마산만 방류해역에서의 하수농도의 분포결과에서는, 유속이 상대적으로 강하고 해수밀도의 성층화가 덜 발달된 봄철인 5월의 경우 방류수가 수표면까지 용승되면서 초기혼합·희석이 활발해져 혼합구역에서는 낮은 하수농도분포를 보였다. 그러나 여름철로 접어들면서 성층화가 점진적으로 심화되고 수온약층이 깊어지는 6월, 7월, 8월의 경우 수온약층에서 방류수가 포착되므로 초기혼합·희석이 저조하여 방류된 하수의 농도 값이 높게 분포됨을 알 수 있다.

그리고 하수 농도장의 분포범위와 혼합구역의 형상은 15일 간격으로 구분된 기간동안의 주변수흐름에 따라 약간씩 차이를 보이고 있으나, 대체로 해안선에 평행한 조류의 주 방향을 따라 북서-남동향으로 대칭적이면서 마산만 내부인 북쪽으로 보다 확장된 모습을 나타내고 있다. 또한 방류수의 확산·이동이 주로 왕복성 조류의 잔차류를 따라 마산 내만 쪽으로 이송됨에 따라 방류수가 외해 쪽으로 빠져나가지 못하며, 특히 수중확산관의 위치로부터 약 700 m 떨어진 해안까지도 혼합구역이 포함되어 있어 방류하수의 오염물질이 인근해변에도 영향을 미치게 될 것이다. 이에 대한 대책마련이 시급할 것으로 사료되며, 방류수로 인한 주변환경에 미치는 영향범위를 보다 정확히 파악하기 위해서는 방류수역에서의 계절적인 변화요인이 고려될 수 있도록 장기 연속관측자료에 의한 혼합구역분석모형의 장기간 모의분석이 필요하다.

사 사

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

참고문헌

[1] 강시환 등, 1993, 폐쇄성 연안해역의 수질관리기술 연구(I), 한국해양연구소, BSPN 00205-613-2.

[2] 강시환, 유승협, 오병철, 박광순, 1999, "마산·창원 하수종말처리장의 해양방류처리수에 대한 초기·근역 희석연구(Ⅰ)", 한국해양환경공학회 논문집, 제 2권, 제 2호, 66-69.

[3] 강시환, 유승협, 오병철, 박광순, 2000, "마산·창원 하수종말처리장의 해양방류처리수에 대한 초기·근역 희석연구(Ⅱ)", 한국해양환경공학회 논문집, 제 3권, 제 1호, 35-44.

[4] 권영택, 이찬원, 1998, "하수종말 처리장 처리수의 해양방류와 퇴적물의 중금속 오염", 한국해양환경공학회지, 한국해양환경공학회 논문집, 제 1권, 제 1호, 83-92.

[5] 김영도, 강시환, 서일원, 오병철, 2000, "3차원 입자추적 모형에 의한 수중방류 하수의 이송-확산 예측", 대한토목학회 논문집, 제 20권, 제 6-B호, 843-852

[6] 마산시, 1996, 마산·창원 하수처리장 2차 확장사업 환경영향평가서.

[7] Distante, D., O'Neil, R., Apicella, G.A., and Tipping, H., 1994, CORMIX model nearfield dilution evaluations for 12 water pollution control plant discharges, *WEFTEC'94, 67th Annual Conference & Exposition*, Chicago, Illinois, Oct. 15-19.

[8] Doncker, R.L., and Jirka, G.H., 1990, Expert system for hydrodynamic mixing zone analysis

of conventional and toxic submerged single port discharges(CORMIX1), *Rep. No. EPA/600/3-90/012*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

[9] Fischer, H.B., E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger, and H. Brooks, 1979, *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York, N.Y.

[10] Huang, H., Fergen, R.E., Proni, J.R., and Tsai, J.J., 1996, "Probabilistic analysis of ocean outfall mixing zones", J. Environ. Eng., ASCE, Vol. 122, No. 5, 359-367.

[11] Huang, H., Proni, J.R., and Tsai, J.J., 1994, "Probabilistic approach to initial dilution of ocean outfalls", J. Water Environ. Res., Vol. 66, 787-793.

[12] Jirka, G.H., 1990, *Technical Guidance Manuals for Performing Waste Load Allocation, Book III: Estuaries*, U.S. Environmental Protection Agency.

[13] Jirka, G.H., Doneker, R.L. and Hinton, S.W., 1996, *User Manual for CORMIX: A Hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharge into surface waters*, Office of Science and Technology, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.

[14] Roberts, P.J.W., 1999, "Modeling Mamala Bay outfall plumes", J. Hydr. Engrg., ASCE, 125(6), 564-573.

[15] Roberts, P.J.W., Snyder, W.H. and Baumgartner, D.H., 1989, "Ocean outfalls, I: Submerged wastefield formation, II: Spatial evolution of submerged wastefields, III: Effect of diffuser design on submerged wastefields", J. Hydra. Div., ASCE, Vol. 115, No 1, 1-70.

[16] Roberts, P.J.W., and Sternau, R.F., 1997, "Mixing zone analysis for a coastal wastewater discharge", J. Envir., ASCE, 123(12), 1244-1250.

[17] Wood, I.R., 1993, "Asymptotic solutions and behavior of outfall plumes", J. Hydr. Engrg., ASCE, 119(5), 555-580.

[18] Wood, I.R., Bell, R.G. and Wilkinson, D.L., 1993, *Ocean Disposal of Wastewater*, World Scientific, Singapore.

[19] Wright, S.J., 1977, Effects of ambient crossflows and density stratification on the characteristics behavior of round turbulent buoyant jets, *Rep. KH-R-36*, W.M.Keck Lab. of Hydr. and Water Resour., California Inst. of Technol., Pasadena, Calif.