

속초 해양방류 하·폐수의 혼합구역에 대한 특성분석 Mixing Zone Analysis of Wastewater Effluent Discharged from Sokcho Ocean Outfall

강시환* · 박연숙* · 김상익* · 이호진*

See Whan Kang*, Yeon Suk Park*, Sang Ik Kim*, and Ho Jin Lee*

요 旨 : 속초 하수종말처리장에서 하·폐수 해양방류에 따른 혼합구역 특성을 파악하기 위해 Huang *et al.*(1996)의 분석방법을 활용하여 혼합구역 모형을 수립하였다. 겨울철인 11월 하순부터 1월까지 약 2개월 동안 속초 해양방류수역에서 매시간 연속 관측된 해류, 해수 밀도의 성층자료, 그리고 하수 방류량자료를 입력한 모형모의를 통해 속초 해양방류수역에서 하수농도의 분포변화를 계산하였으며, 동일 기간에 관측된 조석자료를 토대로 약 15일 간격으로 구분한 기간 동안에 대해 평균한 농도분포를 제시하였다. 이 결과에 의하면 겨울철동안 평균된 최소희석률은 130으로 방류 하수의 혼합·희석이 대체로 양호했다. 그러나 해안에 평행한 연안류와 조류의 주 방향에 따라 방류하수의 혼합구역이 외해보다는 해변 쪽으로 확장되고 있어 인근 해수욕장의 수질악화에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

핵심용어 : 하·폐수 해양방류, 혼합구역특성, 속초 해양방류수역, 최소희석률, 하수 농도분포

Abstract □ Mixing zone characteristics of the wastewater effluents discharged from Sokcho ocean outfall have been investigated using an outfall mixing zone model which was developed on the basis of Huang *et al.*'s(1996) analysis method. The model was applied to Sokcho ocean outfall case and was used to simulate the concentration distribution of wastewater effluents using winter season's data, ie. daily effluent flowrate, ocean current and density stratification data which were measured for two months in the outfall area. Hourly concentration distribution of outfall effluent discharges was calculated and they were averaged for the period of 15 days which covers the ambient flow variability of the neap and the spring tidal currents. The results show that near-field dilution was relatively high with the minimum dilution of 130 for the winter season. The mixing zone was extended to the coastal beach area rather than offshore because of major direction of coastal currents. This may cause a deteriorating impact on coastal water quality, especially to the adjacent swimming beach area.

Keywords : wastewater effluent discharge, outfall mixing zone model, sokcho ocean outfall, minimum dilution, concentration distributions

1. 서 론

최근에는 입해도시의 하·폐수로 인한 연안해역의 환경적 악영향을 최소화시키고 주변 경관에 미치는 영향을 저감하기 위하여, 입해 대도시 하수종말처리장에서 방출되는 대용량의 처리수를 수중 확산관을 통해 고속으로 방

류하여 방류수의 운동량, 주변수와 방류수간의 밀도차, 주변해수의 흐름 등의 상호작용에 의해, 방류된 하·폐수의 희석률을 크게 높일 수 있는 해양수중방류방식이 전세계적으로 널리 활용되고 있다(Wood *et al.*, 1993). 방류된 하수는 방류수심, 해류, 밀도성층 등 방류해역의 해양환경요소와 하수 방류량, 방류수밀도, 확산관 형태 등의 방

*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

류특성 조건에 의해 초기혼합과 근역희석률이 크게 좌우된다(Fischer *et al.*, 1979). 이러한 초기혼합·희석과정을 거쳐 방류하수의 오염물질 농도가 급속히 감소하게 되는 구역을 혼합구역(mixing zone)이라고 하며, 미국의 경우 혼합구역의 경계영역에서 방류된 오염물질의 종류와 유해성 정도에 따라 희석농도를 규제하는 법적혼합구역(regulatory mixing zone)을 설정하여 방류 하·폐수로 인한 환경적 악영향을 최소화하는 규제조치를 취하고 있다(Jirka, 1990).

미국환경청에서는 법적혼합구역의 설정을 위해 CORMIX (Doneker and Jirka, 1990), PLUMES(Roberts *et al.*, 1989) 등의 초기혼합·희석모형을 주로 사용하고 있으나 주변 해수 흐름의 시간적 변화에 따른 방류하수의 연속적인 농도변화를 해석할 수 없는 제한성이 있다. 이러한 비정상상태(unsteady state)의 흐름조건에 대해서 Huang *et al.*(1996, 1999)은 해양방류 근역에서의 혼합·희석에 따른 하수농도의 분포변화를 추정할 수 있는 분석방법을 제안하여 Miami Outfalls에 적용하여 현장관측자료와 비교한 바 있으며, 강등(2001a)도 마찬가지로 해양방류구역에 대해 주변 해류의 연속적 변화와 밀도성층 변화를 고려하여 하수의 초기 희석률, 수면용승(boil) 위치, 이송·확산에 의한 하수농도의 분포변화에 따른 혼합구역범위를 추정한 바 있다.

본 논문에서는 하수종말처리장에서의 하수 방류량, 방류구역의 해류, 밀도성층화 등 수리역학적 조건 변화에 따른 혼합구역의 특성을 분석하기 위해 Huang *et al.*(1996)이 제안한 분석 방법을 근간으로 혼합구역분석모형을 수립하여 속초 하수종말처리장의 방류구역에 대해 적용하였으며, 실제 관측된 자료를 모형모의를 위한 입력자료로 사용하여 방류하수의 초기희석률, 수면용승의 위치, 이송·확산에 의한 농도분포와 혼합구역범위를 산정하였다.

2. 해양방류수의 혼합구역 분석모형

2.1 모형의 구성

해양방류하수의 초기거동해석과 혼합희석률 추정을 위해 CORMIX와 PLUMES 모형이 가장 널리 사용되고 있으나, 이 모형들은 주변수 흐름에 대해 정상상태(steady state)를 가정한 수리실험 결과로부터 방류수의 부력제트에 의한 혼합·희석 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.*(1996, 1997)이 제안한 OMZA (Outfall Mixing Zone Analysis) 방법에서는 방류구역 조

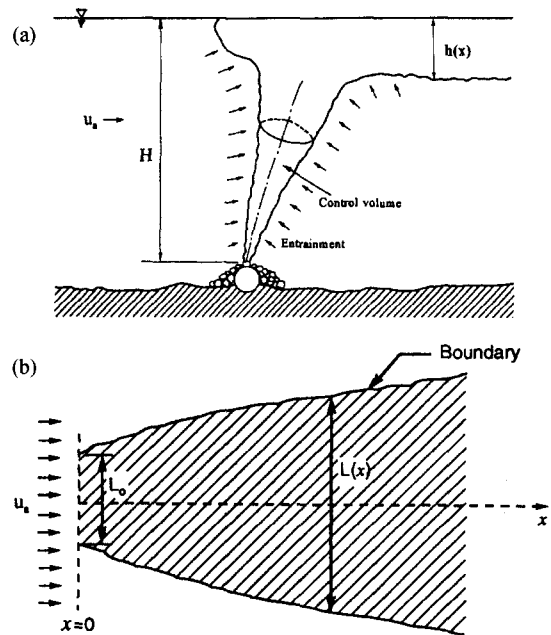


Fig. 1. (a) Definition sketch of rising buoyant jet, and (b). Plan view of subsequent dispersion of a surface plume.

건 즉, 해류, 해수밀도분포 등의 연속적인 시계열 변화를 고려할 수 있도록 하였다.

해양방류구로부터 방류된 하수의 혼합거동 흐름 패턴(Fig. 1)을 살펴보면, 비성층이거나 약성층인 주변류의 흐름이 있는 수체로 방류된 하수는 부력의 영향을 받는 제트의 형태(Fig. 1(a))를 띠며, 수면아래에서의 혼합거동인 부력제트의 상승흐름, 제트의 상승으로 인해 발생하는 수면용승(boil)을 형성하는 흐름, 수표면에 형성된 하수장플룸이 해류에 의해 이송되는 흐름(Fig. 1(b))으로 구분된다. OMZA 모형은 이 흐름 패턴에 기초한 4가지의 결정론적 모델을 이용하여 방류하수의 혼합거동을 해석하였다. 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 구성되어있으며, 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 $H/l_b < 1$ 인 구간을 의미

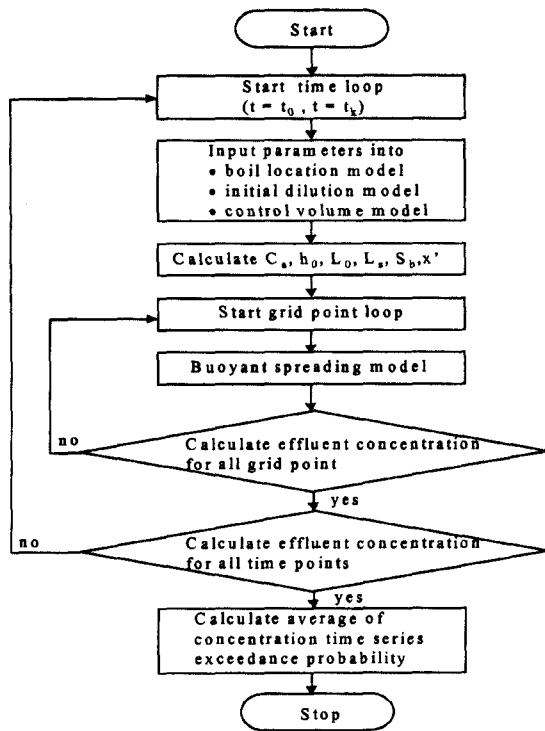


Fig. 2. The flowchart of OMZA model.

하고, 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 $l_b = B/lu_a^3$ 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_0 는 각각 주변해수밀도와 방류해수밀도이며, g 는 중력가속도이다. 본 논문에 기술된 수식에 사용된 기호는 Fig. 1에 도시되어 있으며, OMZA 모형의 구성과 계산순서는 Fig. 2와 같다.

2.2 모형의 지배방정식

2.2.1 Boil Location Model

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

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

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

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 ($0.1 \leq H/l_b \leq 10$)에 대해서는 선형 중첩을 사용하였다.

2.2.2 Initial Dilution Model

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

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

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

여기서 D_m 는 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).

2.2.3 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 유출특성이란 합은 초기 근역희석률 D_a 와 초기 근역에서의 하수농도 $C_a (C_a = C_0/D_a, \text{ 여기서 } C_0 \text{는 방류하수의 농도}), \text{ 플룸 (plume)의 폭 } (L_0) \text{과 두께 } (h_0) \text{ 그리고 boil의 중심으로부터 control volume의 상/하류의 끝 부분까지의 거리 등을 말한다.}$

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

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

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

2.2.4 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 x 에 대한 플룸의 폭($L(x)$)과 두께($h(x)$)는 수중방류수의 부력확장 실험결과(Doneker and Jirka, 1990)에 의해서 다음과 같이 구해진다.

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

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

여기서 α_1 , α_2 의 상수 값은 $\alpha_1=0.59$, $\alpha_2=1.33$ 으로 Miami Outfalls에서의 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).

$$C(x,y) = 1.832 C_a \frac{h_0}{h(x)} \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{0.273 L_0 + y}{\sqrt{2} \sigma(x)} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{0.273 L_0 - y}{\sqrt{2} \sigma(x)} \right) \right] \quad (8)$$

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

위의 식들은 control volume의 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 농도 분포의 표준편차 값이고, $L(x)=2(3)^{1/2} \sigma(x)$ 이다. 식 (9)는 x , y 의 한 지점에서 Δt 시간 간격으로 계산된 하수농도 ($C(x, y, \Delta t)$)를 합산한 결과에 대해서 총 모의시간 T 로 평균한 농도를 나타낸다.

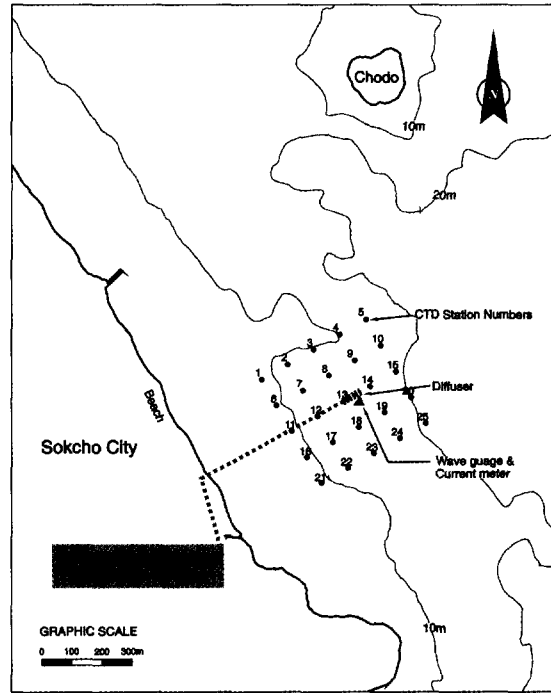


Fig. 3. Field measurement stations in Sokcho outfall area.

3. 연구대상지역 및 현장관측

3.1 속초 하수종말처리장의 해양방류 특성

본 논문의 연구대상인 속초 하수종말처리장의 해양수중방류시설(Fig. 3)은 속초시 대포동에 건설되었으며, 현재 가동중인 마산만과 울산만과는 달리 청정해역으로써 방류하수로 인한 수질악화를 최소화시키는 동시에 세계적인 관광지로서의 주변환경개선을 위한 목적으로 건설되었다(속초시, 1996). 하수종말처리장의 기본설계는 1989년 6월에 착수하여 1993년 2월에 실시설계를 완료하였으며, 해양방류 관거 및 공원화 시설을 위한 추가 공사의 기본 및 실시설계는 1995년 4월에 착수하여 해양방류는 1999년 8월부터 시작되었다. 하수종말처리장의 시설용량은 1단계(1996년)에 46,000 m³/day, 2단계(2011년)에 105,000 m³/day로 계획되었다. 해양방류 관거가 매설된 속초해수욕장 부근의 해저지형은 해안선을 따라 직각방향으로 완만한 경사를 이루고 있으며, 그 경사도는 약 2.8% 정도이다. 조석현상은 반일주조가 우세한 혼합조형으로 대조차 19.4 cm, 소조차 9.1 cm이며, 평균조차는 14.2 cm이다. 속초 해양방류관은 해안에서 435 m 정도 떨어진 수심이 약 15 m

Table 1. Characteristics of Sokcho ocean outfall

Parameters	Sokcho outfall
Discharge depth (m)	12.4
Discharge off shore (m)	435
Diffuser length (m)	50
Number of ports	24
Diameter of ports (m)	0.225, 0.25
Port orientation	Horizontal
Average discharge(m ³ /s)	0.176
	0.241
	0.278
	0.244
	0.240

내외인 지점에 해안선에 수직으로 설치되어있으며, 50 m 길이의 확산관에는 6개의 연직유도관이 10 m 간격으로 배치되어있다. 각 연직유도관에는 4개의 방류공이 설치되어 있으며 방류공 직경은 0.225 m, 0.25 m이다. 해저면에서 방류공 중심까지의 높이는 1.15 m이고 방류수심은 12.4 m이다. 위에서 기술한 속초 하수종말처리장의 해양방류시설에 대한 특성은 Table 1에 정리되어있다.

3.2 속초 방류구역의 현장관측

속초시 하수종말처리장 방류구 주변의 수온 및 염분에 대한 수직·수평적 분포를 측정하기 위하여 Fig. 3에 나타난 바와 같이 DGPS(Differential Global Positioning System)를 사용하여 총 25개의 관측정점을 100 m 간격으로 설정하였다. 확산관이 위치한 정점 S13에서는 RCM-9 해류 관측계기를 수심 6.3 m에 설치하여 2000년 11월 25일부터 2001년 1월 20일까지 57일에 걸쳐 매시간 별 해류, 수온 및 염분도를 관측하였다.

방류구역의 밀도성층분포는 속초 하수확산관 지점에서 10월 22일과 2월 17일에 걸쳐 수심 1 m 부터 13 m까지

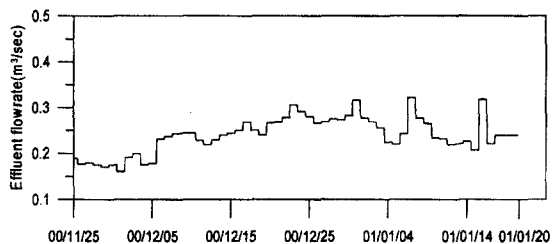


Fig. 4. Effluent flowrates measured at Sokcho wastewater treatment plant.

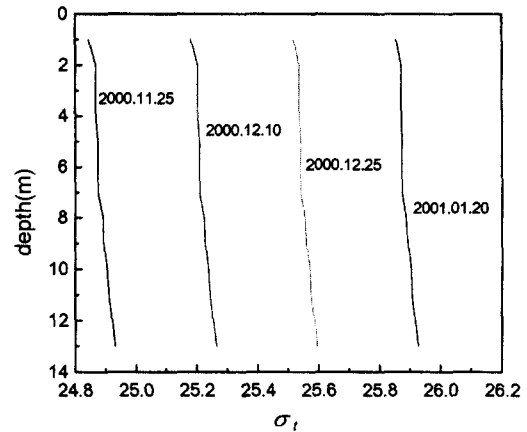


Fig. 5. Density(σ_t) profiles measured in Sokcho outfall area.

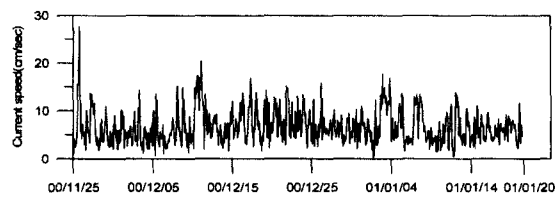


Fig. 6. Ocean currents measured at Sokcho outfall.

매 수심별로 측정하였으며, 그 분포성향을 Fig. 5에 도시하였다. 측정지역에서의 밀도분포는 상층과 하층의 밀도차가 약 0.06으로 매우 미약하므로 전형적인 겨울철의 성향인 수직적 등분포를 형성함을 알 수 있다. 속초 해양방류구역에서의 해류의 유속과 유향은 2000년 11월 25일부터 2001년 1월 20일까지 1시간 간격으로 연속 관측된 자료이다. 관측된 유속의 시계열변화는 Fig. 6과 같고 57일 평균해류는 0.067 m/sec 이며, 0.003~0.276 m/sec의 범위를 갖는다. Fig. 7은 관측된 해류의 크기와 방향성 분포를 나타낸 극산포도(polar scatter diagram)이며, 해류는 해안선에 평행한 북서-남동 방향을 따르는 유동경향을 보인다. Fig. 8은 수중확산관에 설치한 파고조위계기에 의해 관측된 해수면의 수위변화에서 조석성분을 분리해서 나타난 것이다.

4. 속초 해양방류구역에 대한 모형모의

4.1 모형입력자료

Fig. 4는 2000년 11월 25일부터 2001년 1월 20일까지 속초 하수종말처리장에서 모니터링 된 일방류량 자료를 CMS 단위로 환산하여 도시한 것이다. 모의기간 중 일 평

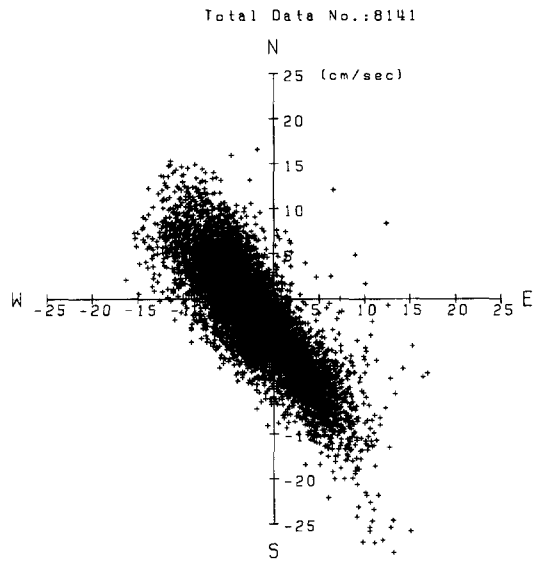


Fig. 7. Polar scatter diagram of observed ocean currents.

균 방류량은 $0.24 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 최대 방류량은 $0.322 \text{ m}^3/\text{sec}$, 최소 방류량은 $0.16 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다.

대상지역의 겨울철 밀도분포는 앞에서 설명한 바와 같이 상층과 하층에 걸쳐 일직선에 가까운 등분포를 보이므로 측정된 수심 1 m의 값을 수표면의 밀도 값으로 대치하고 수심 13 m의 밀도 값을 해저면의 밀도 값으로 취해 총 모의 시간에 대해 매 시간별로 입력하였다. 해류의 입력자료는 방류량자료와 밀도자료와 마찬가지로 매시간별로 유속 및 유향을 입력하였으며, 측정된 해류의 각도는 정북방향에 대한 시계방향으로의 각도를 실제 식에서 사용하는 각도인 정동방향에 대한 시계방향으로의 각도로 환산하여 사용하였다.

4.2 모형모의 및 계산결과

OMZA 모형의 계산격자망은 Fig. 9에서와 같이 방류지점을 중심으로 사방 1 km에 대해 10 m 격자간격으로 구성하였으며, 각 격자점에서 1시간 간격의 방류하수의 농도분포를 계산하여 약 15일 동안에 대해 각각 합산한 후 평균하였다. 해류의 조류성분의 영향을 고려해서 대조기에서 소조기로의 변환이 이루어지는 경계를 기준으로 약 15일 간격의 4구간으로 분리하여 모형모의를 수행하였다. 모의기간 구분의 선정기준이 된, 속초 방류수역에서 관측된 조석에 의한 수위변화를 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 9는 모의에 사용된 모형격자망으로써 대문자 X, Y는 Global 좌표를 소문자 x, y는 local 좌표를 나타낸다. 변

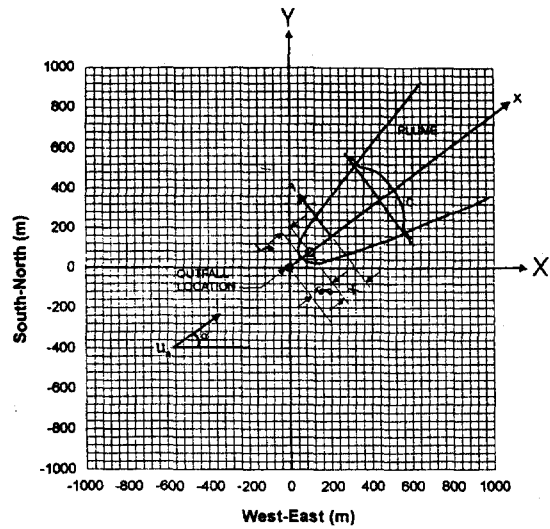


Fig. 9. Grids, fixed global and translating local coordinates, and sketch of plume.

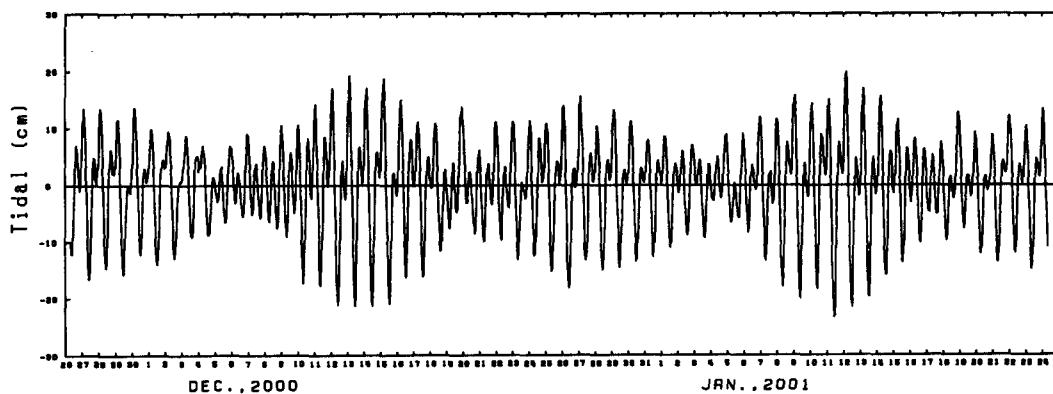


Fig. 8. Tidal elevations measured at Sokcho outfall.

Table 2. Model simulation results of mixing zone characteristics for Sokcho outfall in winter season

Averaged values of the simulation period	Simulation period				
	2000.11.25~ 2000.12.5	2000.12.6~ 2000.12.19	2000.12.20~ 2001.1.3	2001.1.4~ 2001.1.20	2000.11.25~ 2001.1.20
Effluent flowrate (m ³ /sec)	0.179	0.241	0.278	0.244	0.240
Current speed (m/sec)	0.060	0.073	0.072	0.063	0.067
point + (TM)	(165903,520573)	(165883,520673)	(165893,520573)	(165903,520573)	(165883,520623)
Maximum concentration at +	0.00745	0.00920	0.00809	0.00779	0.00772
Minimum dilution at +	134	109	124	128	130
Boil location (m)	7.4	8.0	7.0	6.2	7.1

환식은 다음과 같다.

$$x = X\cos\alpha + Y\sin\alpha - S_b - x' \quad (10)$$

$$y = Y\cos\alpha - X\sin\alpha \quad (11)$$

여기서 α 는 global X축(정동방향)과 해류방향이 이루는 각도이고, x' 은 수면용승(boil)의 중심으로부터 control volume의 하류의 끝부분까지의 거리이다. 부력지배근역(BDNF)에서는 $x'=3H$ 이고, 부력지배원역(BDFF)에서는 $x'=0.6H$ 이며, 천이구간에서는 선형보간한 값을 사용하였다(Huang *et al.*, 1996).

모의기간에 대한 OMZA 모형의 결과 값을 Table 2에 나타내었다. 이 값들은 1시간 간격으로 모형에 의해 계산된 결과를 Table 2에 나타난 기간(15일, 57일)동안에 대해 평균한 값이다. 겨울철 해수의 등밀도 성층분포로 인하여 수중확산관으로부터 방류된 하수가 수표면까지 상승하게 되므로 하수플룸의 포착고는 전체수심(13.55 m)과 동일하다. 하수의 수표면 용승인 보일(boil)의 위치는 해류 유속이 클수록 그리고 방류량이 적을수록 거리가 증가함을 알 수 있다. 방류하수의 혼합 회석은 해류유속의 크기와 방류량의 증감에 따라 크게 영향을 받고 있는데 즉, 해류의 유속이 크면 회석률도 높았고, 해류의 유속이 작을 때는 회석률도 따라서 낮았다. 또한, 하수 방류량의 증감에 따라서도 회석률의 변화가 나타나는데 방류량의 증가 시에는 회석률이 감소하며, 방류량의 감소 시에는 회석률은 증가했다. 2000년 11월 25일부터 2001년 1월 20일까지 약 15일 동안의 4구간에 대해 평균된 최소회석률의 범위는 109~134이며 전체 모의기간인 57일에 대해 평균된 최소회석률은 130으로 나타났다. 이는 해양방류시설 설계시의 일반적인 목표 회석률인 100을 넘는 양호한 결과로서 방류하수의 혼합 회석이 활발히 일어나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 수중확산관에서 방류되는 하수농도의 기준을 1.0으로 설정하였을 때, 방류하수의 15일 동안 평균된 농도분포를 나타낸 것이다. 여기서 하수농도의 등분포선 값이 0.001과 0.005인 경우의 회석률은 각각 1000과 200에 해당되며, 최대농도(최소회석률)가 나타난 위치의 TM 좌표와 값들은 Table 2에 있다. Fig. 10에 나타난 속초 수중방류하수의 농도분포를 살펴보면 해안선을 따라 넓은 범위에 걸쳐서 이송 확산이 일어나고 있다. 즉, 해류의 속도가 큰 경우에는 해류에 의해서 방류된 하수가 넓은 범위에 걸쳐 혼합·회석되지만 해류의 속도가 작은 경우에는 혼합·회석구간이 축소되는 것으로 나타났다. 특히, 하·폐수의 오염물질이 Fig. 7에서 나타난 해류의 주 방향에 따라 외해보다는 연안의 해안선을 따라 확산 이동해 가는 형태를 보이고 있다. 따라서 방류하수의 혼합구역도 북서·남동 방향의 해안선을 따라 밀집되어 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

속초 하수종말처리장에서 하수방류량, 방류수역의 해류, 밀도성층화 등 수리역학적 조건 변화에 따른 해양방류하수의 혼합구역 특성을 분석하기 위해 Huang *et al.*(1996)이 제안한 분석방법을 근간으로 혼합구역분석(OMZA)모형을 수립하였으며, 속초 하수방류수역에서 실제 관측된 자료를 모형입력자료로 사용하여 방류하수의 초기회석률, 수면용승의 위치, 이송·확산에 따른 하수 농도의 분포와 혼합구역범위를 모형모의를 통해 추산하여 혼합구역에 대한 특성을 분석하였다. 혼합구역 분석모형의 모의기간인 2000년 11월 25일부터 2001년 1월 20일까지 겨울철의 57일에 대해 평균된 최소회석률은 130으로써 해양방류시설 설계시의 목표회석률인 100을 넘는 양호한 혼합·회석 결과를 나타냈다. 그러나 방류해역에서 관측된 해류의 주 방

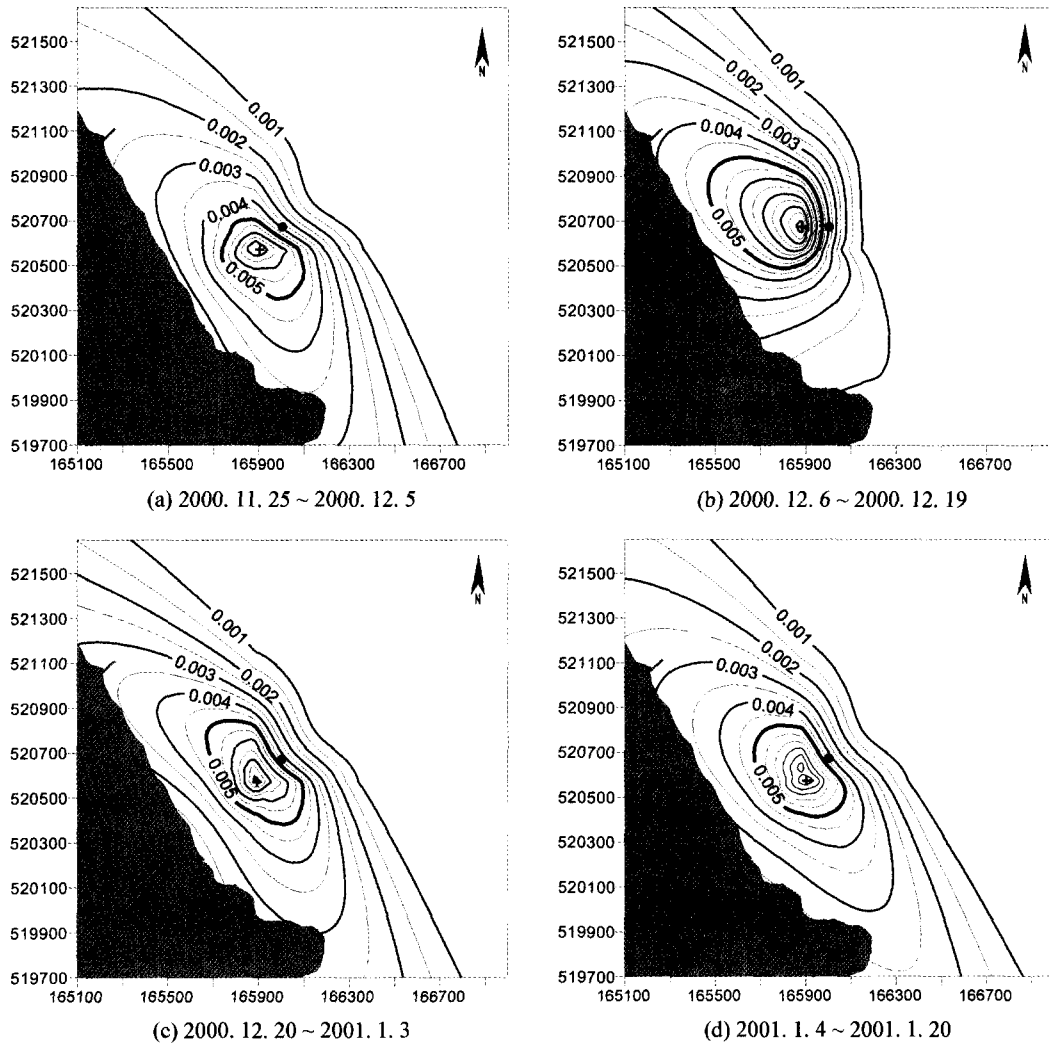


Fig. 10. Wastewater effluent concentration fields averaged for 15 days in Sokcho outfall area.

향이 속초 해안에 평행하므로, 방류된 하·폐수가 외해쪽 보다는 북서-남동 방향의 해안선을 따라 해변 쪽으로 확산 이동해 감에 따라 혼합구역도 인근해변으로 확장되고 밀집된 것으로 나타났다. 특히 속초 해안은 관광명소로써 해수욕장을 포함한 해변위락시설이 방류수역 인근에 산재해 있어 방류하수의 정체로 인한 오염물질의 누적현상으로 인해 수질에 미칠 악영향이 우려된다.

그리고 본 모형의 모의기간 동안에 방류된 평균하수량은 약 21,000 m³/day로써 1단계 완료 시에 46,000 m³/day, 2단계 완료 시에 105,000 m³/day인 하수처리용량을 감안하면 현재보다 방류량이 약 2~5배정도 증가하게 될 것이

며, 이러한 방류량 증가에 따라 방류하수의 희석률도 마찬가지로 해양방류시설의 경우에서 나타난바와 같이 현재보다 급격히 떨어져 절반이하로 감소하게 될 것이다(Kang et al., 2000). 이에 따라 혼합구역도 해안을 따라 더욱 넓게 확장되고 해변 쪽으로 밀집되어 방류하수로 인해 속초연안의 수질에 미칠 영향이 현재 보다 더욱 클 것으로 예상되며 향후 해변위락시설 이용에도 크게 영향을 미치게 될 것이다. 따라서 이러한 문제해결을 위해서는 강 등(2000)이 시도한 바 있는 해양 방류시설의 새로운 위치 선정 및 수중확산관 배치를 위한 조사연구가 향후 필요하다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 G-7 환경공학기술개발사업인 “해양방류관의 적정배치를 위한 실용화 기술 개발” 사업의 일환으로 수행되었다. 본 연구에 사용된 하수처리방류량자료를 제공해주신 속초시 수질환경사업소 업무담당소장님께 감사드립니다.

참고문헌

1. 강시환, 유승협, 김상익, 오병철, 박광순, 2001a. 마산만 해양방류 혼합구역에서의 하수 농도분포 변화, 한국해양환경공학회논문집, 4(2), 한국해양환경공학회(인쇄중).
2. 강시환, 이호진, 김상익, 박광순, 김영도, 2001b. 속초 하수종말처리장의 해양방류 하수에 대한 연속적인 근역혼합특성, 2001년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회.
3. 강시환, 오병철, 유승협, 김영도, 주진규, 2000. 근역과 원역모형을 이용한 해양방류지점 위치선정분석, 2000년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 801-804.
4. 속초시, 1996. 속초시 하수종말처리장 추가공사 기본 및 실시설계보고서.
5. Distant, 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.
6. Doneker, 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.
7. 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.
8. Huang, H., Fergen, R.E., 1997. A model for surface Plume Dispersion in an Ocean Current, *Proc. of the 27th Congress of the Int'l Assoc. for Hydraulic Research Water Resources Engineering Division, ASCE*, pp. 370-375.
9. Huang, H., Fergen, R.E., Proni, J.R. and Tsai, J.J., 1996. Probabilistic analysis of ocean outfall mixing zones, *J. Environ. Eng., ASCE*, 122(5), pp. 359-367.
10. Huang, H., Fergen, R.E., Tsai, J.J. and Proni, J.R., 1999. Evaluation of mixing zone models: CORMIX, PLUMES and OMZA with field data from two Florida ocean outfalls, *Environmental Hydraulics, Lee, Jayawardena & Wang(eds)*, Balkema, Rotterdam, pp. 249-254.
11. Jirka, G.H., 1990. *Technical Guidance Manuals for Performing Waste Load Allocation, Book: Estuaries*, U.S. Environmental Protection Agency.
12. Kang, S.W., You, S.H. and Na, J.Y., 2000. Near-Field Mixing Characteristics of Submerged Effluent Discharges into Masan Bay, *Ocean Research*, 22(1), pp. 45-56.
13. Lee, J.H.W., and Neville-Jones, P., 1987. Initial dilution of horizontal jet in crossflow, *J. Hydr. Div., ASCE*, 113(5), pp. 615-629.
14. Tomasko, D., 1994. CORMIX1 sensitivity analyses for produced water discharged into the Gulf of Mexico, *Argonne National Laboratory*, Argonne, Illinois.
15. Wood, I.R., 1993. Asymptotic solutions and behavior of outfall plumes, *J. Hydr. Engrg., ASCE*, 119(5), 555-580.
16. Wood, I.R., Bell, R.G. and Wilkinson, D.L., 1993. *Ocean Disposal of Wastewater. World Scientific*, Singapore.
17. 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.

Received August 27, 2001

Accepted September 12, 2001