

마산·창원 하수종말처리장 증설에 따른 근역희석률 변화 예측 Prediction of Near-Field Dilution Changes Due to Treatment Capacity Expansion of Masan-Changwon Municipal Wastewater Treatment Plant

강시환* · 유승협* · 오병철* · 박광순* · 김상익*
See-Whan Kang*, Seung-Hyup You*, Byung-Cheol Oh*,
Kwang-Soon Park*, and Sang-Ik Kim*

요 旨 : 수중다공확산관을 통해 1차 처리수를 마산만에 방류하고 있는 마산·창원 하수종말처리장의 증설계획에 따른 하수방류량의 증가시 현재의 해양방류시설을 그대로 사용하였을 경우 방류하수의 희석률 변화를 예측하였다. 하수처리시설 증설후 방류량의 증가에 따라 희석률은 큰 폭으로 감소하였다. 이에 대한 개선방안 도출을 위해 현 위치에서 확산관의 배치와 길이를 변경해서 희석률의 개선효과를 CORMIX 모형을 사용하여 조사하였다. 확산관의 길이가 연장되고 확산관축을 해류방향에 대해 평행보다는 직각이 되게 배치했을 경우 희석률은 다소 증가하였으나, 소조기의 약한 해류에서는 희석률의 변화가 거의 없어 현 위치에서의 한계성을 보였다. 하수처리장의 2단계와 3단계의 증설에 대비한 새로운 방류위치선정과 확산관의 최적배치로 희석률을 크게 높일 수 있는 방안을 모형 모의결과로부터 제시하였다.

핵심용어 : 수중다공확산관, CORMIX 모형, 확산관의 최적배치, 근역 희석

Abstract □ For the case of the capacity increase of Masan-Changwon wastewater treatment plant, the changes of near-field dilution rates due to the increased discharges into Masan Bay from the submerged multiport-diffuser were predicted by using CORMIX model. As the increase of wastewater discharges from currently 280,000 m³/day to 720,000 m³/day by 2011, the dilution rates become much lower than the present rates. To enhance the reduced dilution rates, the engineering design changes of diffuser length and alignment were considered as an optimal engineering option. According to the results of the model simulations for these changes, the dilution rates were increased in the strong ambient current of spring tide, but they were not affected by these changes in the weak current of neap tide in Masan Bay. From the analysis of oceanographic survey data, new outfalls sites have been searched. A promising outfalls site is selected and proposed on the basis of maximum obtainable dilution rates predicted by the model simulations.

Keywords : multiport-diffuser, CORMIX model, optimal diffuser alignment, near-field dilution

1. 서 론

임해도시에서 발생하는 방대한 양의 하·폐수는 관로를 통해 하수종말처리장에 차집되어 처리된 후 연안해역으로 방류된다. 해양 수중방류는 하·폐수의 연안 표층방류에 따른 연안수질오염을 저감시키기 위해 해류 등 자연조건을 이용하여 방류하수의 초기·혼합 희석을 최

대화하도록 수심이 깊은 외해에 설치된 수중확산관을 통해 이루어진다(Fig. 1). 최근 임해 도시인구의 증가로 인해 대규모의 오·폐수가 발생됨에 따라 환경에 대한 관심이 증대되면서 해양 수중방류 시설은 좀더 깊은 수심의 외해에 설치되고 있는 추세이다(Wood *et al.*, 1993). 수중다공확산관의 경우 직선형태로 설치된 확산관에 일정한 간격으로 배치된 다수의 포트(port) 혹은 분사구

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

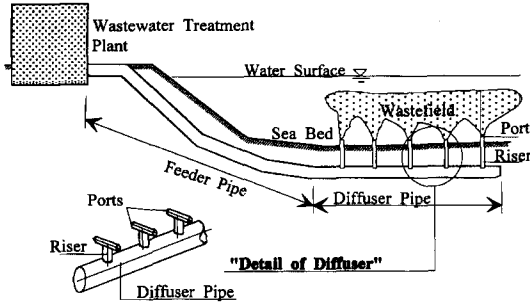


Fig. 1. Ocean outfalls system with a submerged multiport diffuser.

(nozzle)를 통해 고속으로 하수를 해양에 방류하여 방류수가 지나는 운동량(momentum), 주변수와 밀도차에 의한 부력(buoyancy), 주변해역의 난류성분등의 상호작용을 통해 방류수의 높은 희석과 분산을 일으키게 된다. 수중다공확산관을 통한 해양 수중방류는 국내·외에서 날로 강화되고 있는 연안환경 수질기준을 충족시킬 수 있는 가장 실용화 된 엔지니어링 기술로 알려져 있다(Jirka and Akar, 1991). 외국의 경우 수중방류시설에 대한 목표 설계 희석률을 100이상으로 정하여 방류수역에 대한 환경규제를 법적혼합구역(legal mixing zone) 설정을 통해서 실시하고 있으나 국내의 경우 해양방류수에 대한 규제방안이 아직 마련되지 못한 실정이다.

수중방류의 초기조건과 확산관의 기하학적 형태에 따라 방류수의 희석효과가 크게 변하게 되므로 높은 초기희석률을 얻기 위해서는 방류수역의 해양특성을 고려하여 확산관의 기하학적 배치조건을 결정하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 방류수역의 특성에는 방류지점의 해안선의 형태와 수심 등의 지형적인 특성과 주변수 흐름 및 밀도분포 등의 동역학적 특성이 있으며 이를 바탕으로 확산관의 설치수심, 확산관의 형태, 확산관축과 주변수 흐름이 이루는 각도 등의 배치조건을 결정하는 것이 중요하다(서 등, 1998a, 1998b). 따라서 본 논문에서는 미국환경청(U.S. EPA)지원으로 연구 개발된 근역혼합모형인 CORMIX 모형(Akar and Jirka, 1991)을 이용하여 방류조건 변화에 따른 수중다공확산관에서 방류된 하·폐수의 혼합특성과 희석률의 변화를 예측하였다. 이를 토대로 마산·창원 하수종말처리장의 단계별 증설에 따른 방류량의 증가 후에도 현재 설치된 확산관을 그대로 사용할 경우 예상되는 문제점과 초기·근역 희석률의 증대방안 도출을 위해 확산관 구조물의 배치변경 및

길이연장을 시켰을 경우 희석률의 개선효과에 대해서 검토하였다. 하수처리시설의 증설에 따라 방류량이 현재보다 약 3배정도 늘어남에 따라 근역희석률이 크게 저하되어 방류수역 주변의 수질 및 저질 환경이 크게 나빠질 것으로 예상된다. 따라서 이러한 문제해결을 위해 CORMIX 모형모의를 통해서 새로운 방류위치의 선정, 확산관의 최적배치 및 설계조건을 제안하였다.

2. 마산·창원 하수종말처리장의 증설계획

마산·창원 하수처리장은 1978년에 예비조사를 완료하였고 외국건설회사와 합작으로 1981년 4월에 하수처리장의 기본계획을 수립하여 1981년 12월에 실시설계 후 1984년에 착공하였으나 인접지역 주민들의 처리장건설 반대와 주변해역의 수질기준이 크게 강화됨에 따라 1985년에 하수처리방법과 처리용량을 전면 재검토하여 1986년에 최종실시설계가 완료되었다. 마산시와 창원의 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. Table 1에 나타난 바와 같이 1단계 사업에서는 마산시와 창원시에서 발생하는 도시하수와 공장폐수를 차집하여 처리용량 280,000 m³/일 규모의 1차 처리를 한 후 경상남도 창원군 구산면 옥계리(Fig. 2)에서 수중다공확산관을 통해 해양방류를 시행하고 있다. 2011년에 720,000 m³/일 규모의 시설용량을 목표로 총 3단계 증설계획으로 구성된 마산·창원 하수종말처리장은 이미 500,000 m³/일 규모의 2차 처리시설을 건설하는 2단계사업의 실시설계가 1996년 2월에 완료되었다(마산시, 1996). 그러나 3단계 증설후에도 현재 설치된 수중방류시설물을 그대로 사용할 계획으로 있다. 이 시설물은 공칭직경 2 m인 도수관을 통하여 처리된 하수를 해안으로부터 680 m 지점까지 이동한 후 총 길이 210 m인 양방향확산관을 통하여 수심 13 m에서 방류한다. 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).

Table 1. Sewage treatment status of Masan-Changwon wastewater treatment plant.

Construction phase (year)	Treatment capacity (m ³ /day)	Wastewater amount (m ³ /day)			Treatment level
		Daily average	Daily maximum	Hourly maximum	
1st phase (1993)	280,000	281,105	312,659	480,085	Primary process
2nd phase (2001)	500,000	517,873	569,979	927,231	Primary process +incineration
3rd phase (2011)	720,000	619,571	721,491	1,117,608	

Construction Phase (year)	Parameters	Water quality (mg/l)			Removal rates (%)
		Influent	Effluent	Design water quality	
1st phase (1993)	BOD	173	100	·	42
	COD	303	175	·	42
	SS	222	68	·	69
2nd phase (2001)	BOD	117	18	130	86
	COD	110	17	125	86
	SS	113	16	130	87
3rd phase (2011)	BOD	117	18	130	86
	COD	110	18	130	86
	SS	113	16	130	87

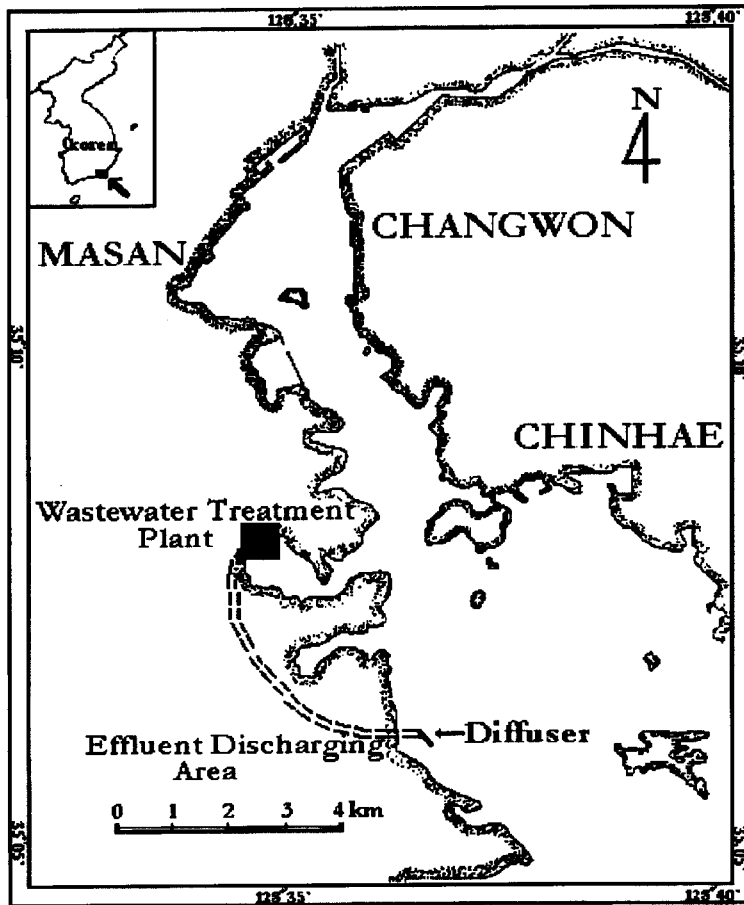


Fig. 2. Site map of the submerged ocean outfalls of Masan-Changwon wastewater treatment plant.

3. 수중다공확산관 방류수의 근역 혼합특성

Fig. 3은 근역혼합 해역에서 형성된 하수장(wastefields)의 모습을 모식적으로 표현한 것이다(Roberts *et al.*, 1989). 하수장의 특성을 정의하는 인자로는 X_i (근역구간 거리), Z_e (상단 하수장 높이), Z_m (회석률이 최소인 지점의 높이), h_e (하수장의 전체 두께), W (하수장의 폭), C (하수장에서의 농도) 등이 있으며 주변 해양조건들을 정의하는 인자로는 h_0 (방류관의 높이), $\rho_a(Z)$ (주변수의 밀도성층 경사), u_a (조류속도), H (총수심), X (확산관으로부터 하류방향으로의 거리), Z (방류공 중심으로부터의 수표면의 높이) 등이 있다. X_i 의 거리, 즉 근역끝에서의 희석률을 초기희석률(initial dilution)이라고 하며 방류해역의 해양환경조건에 대해서 초기희석률을 어떻게 하면 최대로 높일 수 있는가 하는 문제가 해양방류기술의 핵심 사안이다.

근역혼합과정(near-field mixing process)은 크게 수중 부력제트 혼합(submerged buoyant jet mixing)과 방류수역의 경계면 상호작용(boundary interaction)으로 구분된다. Fig. 4에는 방류수역의 환경변화에 따른 부력제트의 거동양상을 나타내었다(Jirka *et al.*, 1996). 방류수의 초기유속 특성은 크게 초기 운동량 흐름률(initial momentum flux)을 갖는 순수제트(pure jet), 초기 부력 흐름률

(initial buoyancy flux)을 갖는 순수플룸(pure plume), 운동량과 부력이 동시에 작용하는 부력제트(buoyant jet)로 구분할 수가 있다. 부력제트의 혼합은 주로 주변수 유속과 밀도성층에 의해 영향을 받게 되는데 주변수 유속에 의해 부력제트는 해류방향으로 기울지게 되며 추가적인 혼합이 이루어지게 된다(Fig. 4(b)). 밀도성층은 부력제트의 수직적인 가속도에 영향을 미쳐 결국 포착고(trap level) 또는 평형상승고(equilibrium terminal level)에서 흐름이 포착(trap)되는 결과를 초래하게 된다(Fig. 4(c)). 다공확산관(multiport diffuser)의 경우 각 방류공에서 방류된 원형부력제트가 서로의 상호작용 없이 각각의 흐름을 지나다가 방류공에서 일정한 거리가 지난 후에 병합(merging)이 일어나게 된다(Fig. 4(d)). 방류수역의 경계면은 수표면 및 수계 바닥과 더불어 수층의 밀도가 급격히 변하는 수온약층(thermocline)을 내부경계면(internal boundary)이라고 하여 경계면에 포함시키게 된다. 방류수의 동역학적 및 기하학적인 특성에 따라 방류수역의 경계면과의 상호작용이 근역에서는 부력제트 혼합과정간의 천이를 일으켜 방류수의 안정도(stability)에 큰 영향을 미치게 된다(Jirka and Harleman, 1979).

주변수의 흐름이 존재하는 경우 일반적으로 해양에서는 해류의 영향이 가장 큰 요소인데 주변유속을 고려한 주변

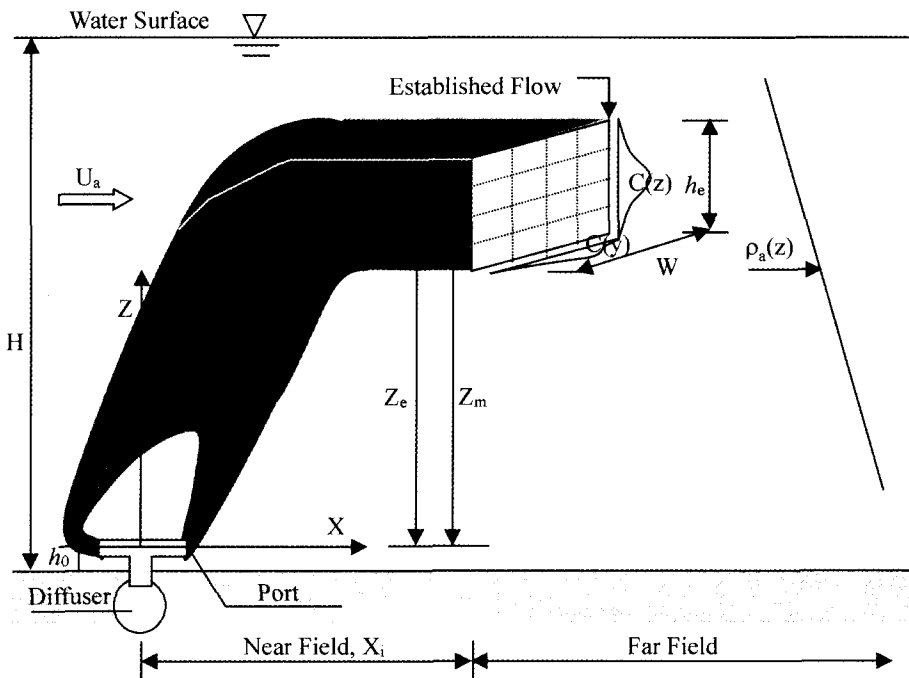


Fig. 3. Wastefield characteristics of submerged diffuser discharges.

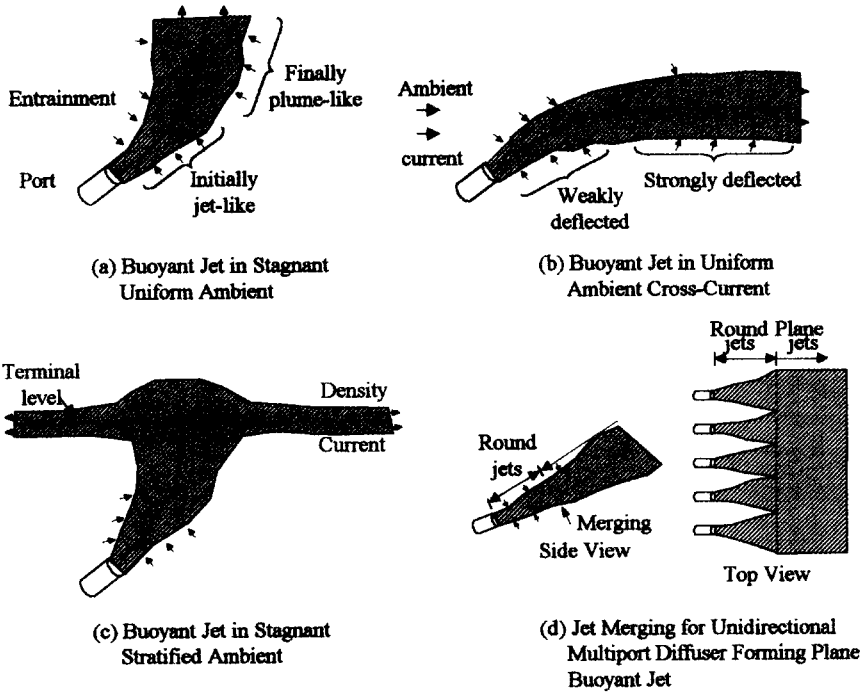


Fig. 4. Buoyant jet mixing flow patterns with different ambient conditions for submerged discharges.

수 Froude 수에 의해 하수장의 초기혼합특성과 희석률이 결정이 되며, 주변수 Froude 수는 다음과 같이 정의된다 (Roberts, 1979, 1980).

$$F = u_a^3 / j_0 \tag{1}$$

여기서 u_a 는 주변수 유속, $j_0 (= g'_0 q_0)$ 은 초기부력흐름률 (initial buoyancy flux)이다.

q_0 는 초기체적흐름률 (initial volume flux)이며, g'_0 는 유효중력가속도 (reduced gravitational acceleration)로 다음과 같다.

$$g'_0 = g'_0 = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a} \tag{2}$$

여기서 ρ_a 는 주변수의 밀도이며 ρ_0 는 방류수의 초기밀도이다.

$F < 0.1$ 경우에는 주변유속이 너무 약해 초기혼합 희석 과정에 거의 영향을 미치지 못한다. 최소 수표면 희석률 (minimum surface dilution), S_m 은 다음과 같다 (Roberts, 1979).

$$S_m = 0.27 \frac{j_0^{1/3} H}{q_0} \tag{3}$$

여기서 H 는 방류수심이다.

그러나 $F > 0.1$ 일 경우에는 주변수의 가로흐름 (crossflow)에 의해 포획이 활발히 일어나고 확산관측과 해류가 이루는 각이 희석률에 큰 영향을 미치게 된다. Fig. 5에는 주변수 Froude 수에 대한 확산관 배치각도의 변화에 따른 희석률의 변화를 보여주고 있다 (Roberts *et al.*, 1989). 주변유속이 증가하면 희석률도 증가하고, $F \sim 100$ 정도에서는 확산관측 방향이 해류방향에 평행한 0° 에서 직각인 90° 로 변하면 희석률도 4배정도 증가된 것을 보

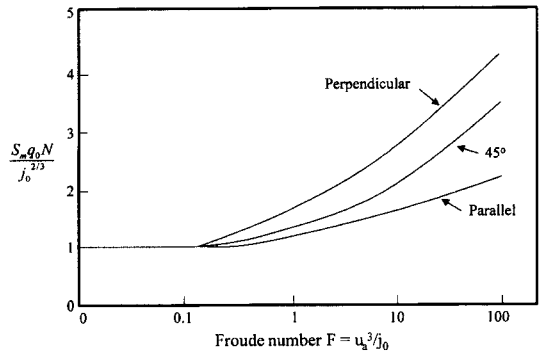


Fig. 5. Minimum initial dilution for multiport diffuser in cross-flow as a function of alignment angles.

여주고 있다. 따라서 회석률을 높이기 위해서는 확산관 축이 주변해류의 주방향에 대해 직각이 되게 배치되어야 함을 알 수 있다. F 가 0.1에서 100사이에서 확산관축이 90°로 배치된 직각배치의 경우 밀도성층을 고려시 최소회석률(S_m)과 최대상승고(z_{max})는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Roberts, 1979).

$$S_m = 0.4 \frac{j_0^{1/3} z_{max} F^{1/6}}{q_0} (2.19 F^{1/6} - 0.52) \quad (4)$$

$$z_{max} = 2.5 \frac{j_0^{1/2}}{u_a^{1/2}} \left(-\frac{g \Delta \rho_a}{\rho_a \Delta z} \right)^{1/2} \quad (5)$$

4. 하수처리시설의 증설 · 확장에 따른 회석률 변화

4.1 CORMIX 모형의 모의 입력자료

마산/창원 하수종말처리장은 2001년에는 500,000 m³/일 규모의 처리용량으로 증설하게 되며 일평균 하수량은 517,873 m³/일로 늘어나고 2011년에는 720,000 m³/일의 처리용량 규모로 일평균 하수량은 619,571 m³/일로 늘어나게 된다(Table 1). 장래 증설에 따른 하수방류량의 증가에도 불구하고 현재의 수중방류시설을 그대로 사용할 계획을 근거로 CORMIX 모형 모의를 통해 방류하수의 회석률 변화를 예측하였다. CORMIX 모형은 미국 환

경청(U. S. EPA)의 지원으로 오염물질의 자연수체 방류시 혼합현상을 해석할 수 있도록 하기 위해 Cornell대학에서 개발된 길이축척 모형이다(Akar and Jirka, 1991). 이 모형은 강 등(1999a, 1999c, 2000)에 의해 마산만 방류해역의 하계와 동계의 현장 관측회석률과 비교 검증한 바 있으며, 대체로 양호한 결과를 나타냈다. 일평균 하수방류량은 2001년 (2단계시)에 6.0 m³/s에서 2011년(3단계시)에는 7.17 m³/s로 증가되며, 방류구 인접지역의 수심 5m에서 관측된 해류유속 자료(Fig. 6)로부터 구한 소조기의 6.0 cm/s와 대조기의 15.5 cm/s를 평균유속으로 사용하였다(한국해양연구소, 1992). 그리고 주변해수의 성층효과가 고려된 하계와 비성층 수피의 동계시에 대해서 각각 모의하였다. 방류수역의 밀도분포 및 해양환경 조건은 강 등(1999c, 2000)에 의해 마산만 방류수역에서 관측되었던 하계와 동계자료를 모의 입력자료로 사용하였다. Fig. 7에서는 관측된 수온 및 염분도분포로부터 구한 해수 밀도의 연직분포와 모형입력을 위한 근사치를 보여주고 있다(강 등 1999c, 2000). Table 2는 모형의 모의 입력자료를 정리한 표이다.

또한 마산/창원 하수종말처리장의 2, 3단계 증설 후 방류하수량의 증가에 따른 회석률 감소에 대한 기술적 대안 마련을 위해 확산관 길이를 300 m, 400 m로 연장시켰을 경우, 그리고 연장된 확산관의 경우에 대해 조류방향과 거의 평행한 현재의 확산관 배치형태를 유지

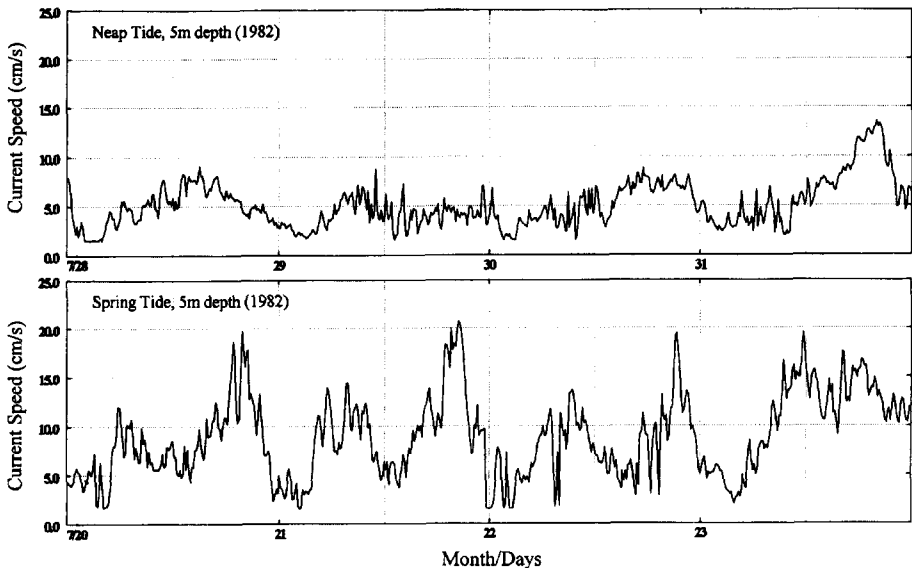


Fig. 6. Ocean currents measured in Masan outfall area during the spring and the neap tidal periods.

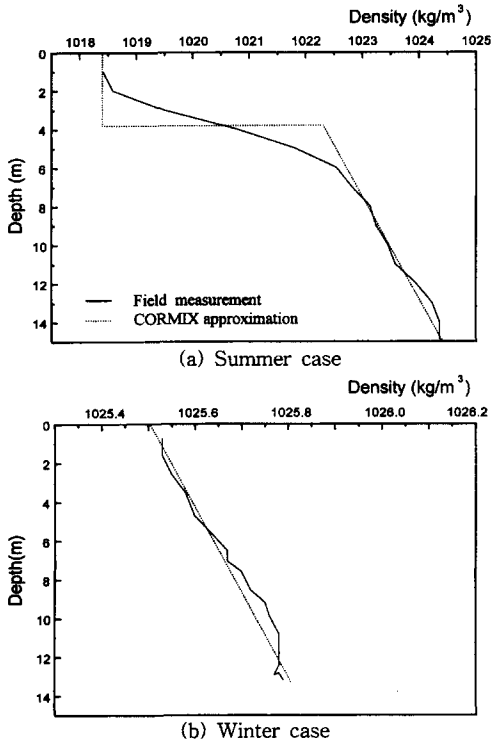


Fig. 7. Ambient density profiles for CORMIX model input.

Table 2. CORMIX model input data for Masan outfalls' case study.

Model input parameters	Masan outfalls' case
water body	unbounded
manning's factor	0.030
ambient velocity (cm/s)	6.0 (neap tide) 15.5 (spring tide)
wind speed (m/s)	2.0
nearest bank	right
port number (diffuser length)	84 (210 m) 124 (300 m) 168 (400 m)
port diameter (m)	0.2
port height (m)	0.8
diffuser alignment angle (degree)	15 (parallel) 90 (perpendicular)
effluent density (kg/m ³)	995.67(summer) 999.96(winter)
flow rate (/s)	2.315 (1st phase) 6.0 (2nd phase) 7.17 (3rd phase)
diffuser type	alternating diffuser

한 경우와 직각되게 배치를 변경했을 경우에 대해서 방류하수의 회석률 변화를 예측하였다. 확산관 제원에 대

한 모형 입력시 방류공의 간격은 10 m로 설정하여 300 m의 확산관의 경우 전체 방류공의 수를 현재의 84개에서 124개로 확산관의 길이가 400 m인 경우 164개로 증가시켜 모의하였다.

4.2 단계별 증설후 근역회석을 변화 예측

Fig. 8에는 마산/창원 하수종말처리장의 2단계와, 3단계 증설 완공 후에 증가된 방류량에 대해 현재의 방류 시설, 즉 210 m의 수중확산관을 통해 방류했을 경우 회석률 증감 변화를 파악할 수 있도록 현재의 1단계 회석률결과(강 등, 1999c, 2000)와 함께 비교하였다. 방류 하수장(wastefield)이 해류방향으로 이동된 거리에 대한 회석률 모의결과를 보면 방류량의 증가시(2단계: 517,873 m³/일, 3단계: 619,571 m³/일) 하계와 동계 모두 현재보다 근역회석률이 큰 폭으로 감소하였다. 그러나 2단계와 3단계의 증설에 따른 회석률의 변화는 큰 차이가 없었다. 이는 Table 1에서 나타난 바와 같이 현재의 방류량에 비해 2단계 증설 후 방류량이 2배 이상 증가하나 2단계와 3단계의 증설후 방류하수량의 차이는 상대적으로 작기 때문이다. 현재상황(1단계)에서의 근역계거리 하계의 경우 소조기의 약한 유속(6 cm/s)에 대해 200 m내외가 되며, 대조기의 강한 유속(15.5 cm/s)에서는 100 m 정도가 된다. 그러나 동계의 경우에는 약한 유속에서는 600 m 내외, 강한 유속에서는 100 m 정도가 되며 이 경계거리를 기준으로 2, 3단계 증설후의 상황에 대한 예측결과를 비교함으로써 장래 예상되는 문제를 파악하고자 하였다.

하계성층시의 경우 1단계시 주변유속의 강약에 따라 26~120 범위의 회석률에 비해 2단계시에는 17~53 범위로, 3단계의 경우 15~46 범위로 회석률이 감소하였다. 즉 현재의 방류시설을 그대로 사용할 경우에는 방류량이 증가할수록 회석률은 반비례로 감소하는 결과를 초래하였다. 2, 3단계의 증가된 방류량으로 현재의 확산관을 그대로 사용할 시에는 소조기의 약한 유속에서는 회석률이 20이하로 매우 저조했으며, 대조기의 강한 유속에서도 수중방류시설의 일반적인 목표 설계회석률인 100 정도에 크게 못 미치는 것을 알 수 있다.

동계의 비성층시에는 소조기의 약한 유속과 대조기의 강한 유속에 대해 1단계의 경우 90~168 범위로 회석률 변화 폭이 매우 큰 것에 비해 2단계의 경우 47~74, 3단계의 경우 43~63 정도로 주변유속의 강약에 따른 회석률 변화폭이 방류량의 증가에 따라 더욱 작아지고 있

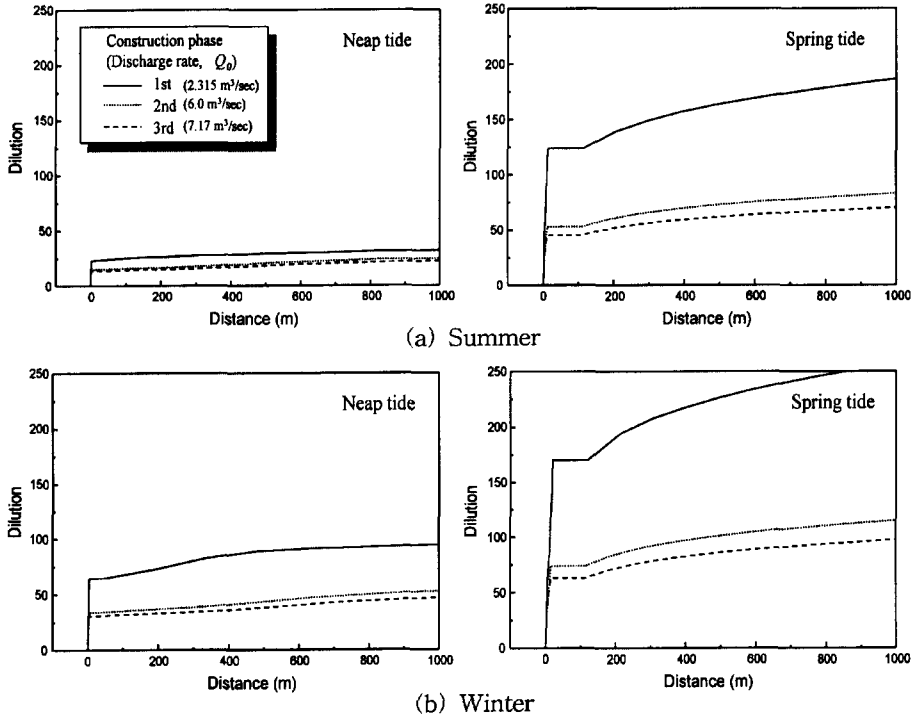


Fig. 8. Comparisons of dilution rates along the downstream distance for the treatment capacity increases by 2011.

음을 알 수 있다. 동계의 경우도 하계의 경우와 마찬가지로 2, 3단계의 방류량이 증가함에 따라 희석률이 크게 감소하였다. 강 등(1999a)의 계절별 희석률 비교에서 나타났듯이 희석률이 가장 높은 동계의 강한 유속시에도 2단계 증설후에는 근역희석률이 100에도 훨씬 못 미치는 것으로 나타났다. 따라서 2단계와 3단계의 증설·확장시에 현재 방류시설을 그대로 사용하는 것은 방류하수의 저조한 혼합희석으로 인해 방류수역과 인근해역의 수질과 퇴적물 오염을 더욱 악화시켜 심각한 환경문제가 예견됨을 보여주고 있다.

4.3 확산관 연장 및 배치변경시 근역희석률 변화 예측

마산/창원 하수종말처리장의 증설·확장에 따른 방류량의 증가시에는 현재의 확산관을 그대로 사용하게 되면 방류하수의 근역희석률이 현재보다 크게 저하되어 수중방류시설의 원래 목적과 기능을 제대로 못하게 될 것이다. 이에 대한 1차적 대안으로써 현재의 방류지점에서 확산관의 길이를 210 m에서 300 m와 400 m로 연장했을 경우 어느 정도가 희석률이 증가될 것인지, 그리고 주변해수의 주흐름 방향과 거의 평행한 상태에 놓

인 확산관 배치를 흐름방향과 직각이 되도록 배치를 변경했을 경우에도 희석률의 개선효과가 있는지를 파악하기 위해서 수치 모의하였다. Fig. 9와 10에 나타난 희석률은 방류수가 해류에 의해 이동되면서 형성된 하수장의 이동거리에 대한 희석률 변화를 나타낸 것이다. Table 3에서는 방류구로부터 200 m의 이동거리의 상호 비교를 위한 각 대안에 대해서 예측된 희석률을 정리하였다.

현재 확산관의 평행배치 상황에서 다만 확산관을 연장시켰을 경우 Fig. 9에서 보는 바와 같이 확산관의 길이가 길수록 희석률이 증가되었다. 그러나 하계 소조기의 약한 주변유속에 대해서 확산관의 길이를 현재보다 2배인 400 m로 연장시켰을 경우에도 2단계와 3단계 증설후 희석률은 25 이하에서 거의 변하지 않고 개선효과도 미미하였다. 동계 소조기의 경우에는 확산관 길이를 연장할수록 희석률의 개선효과는 있었지만 대조기 강한 유속의 경우에 비해서는 그 증가폭이 작았으며, 50 정도의 희석률을 보이고 있다. 이는 현재의 마산만 방류수역위치에서는 확산관 길이를 연장해도 희석률을 크게 증가시키지 못함을 알 수 있다. 그리고 하계 대조기

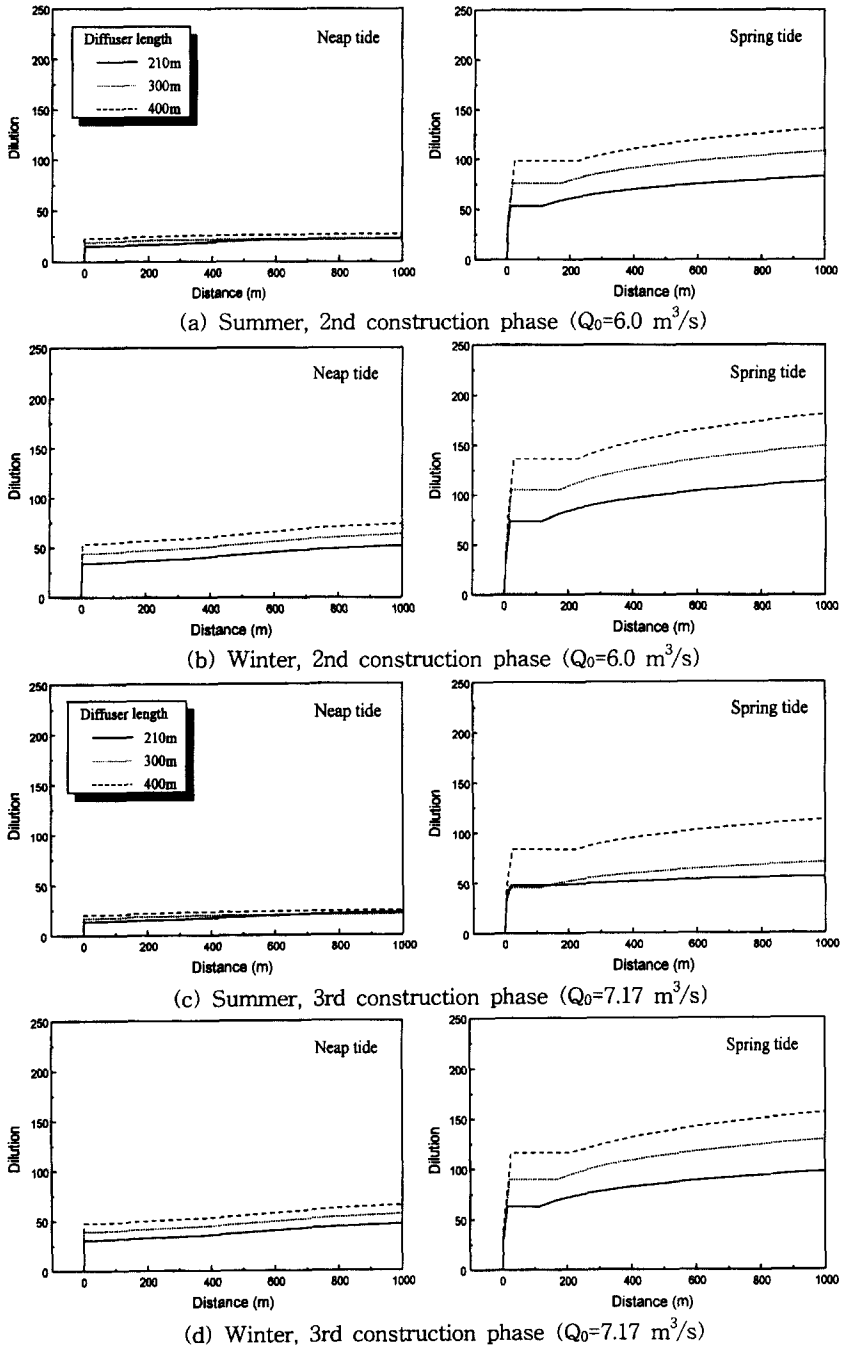


Fig. 9. Comparison of dilution rates along the downstream distance for different diffuser lengths in parallel alignment to current direction.

의 강한 유속에 대해서는 확산관을 400 m로 연장해도 회석률이 100 이하로 나타났다. 그러나 동계 대조기의 경우에는 2단계시 300 m, 3단계시 400 m로 확산관을 연

장하면 Fig. 9에서 나타난 것처럼 100 이상의 회석률을 얻을 수 있었다.

현재는 확산관의 배치가 해류방향에 대해 거의 평행

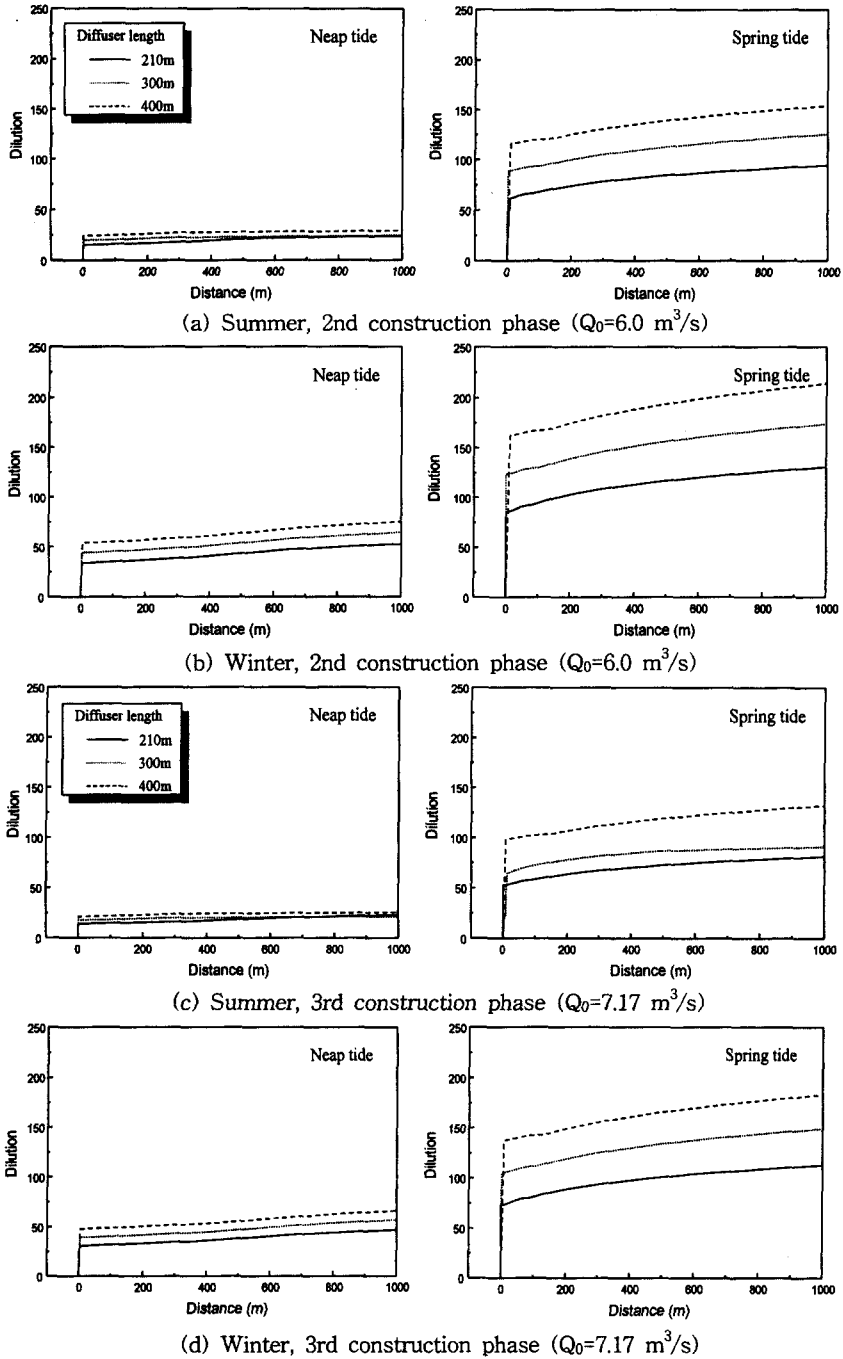


Fig. 10. Comparison of dilution rates along the downstream distance for different diffuser lengths in perpendicular alignment to current direction.

(15°)으로 놓여있는데 이를 직각으로 변경시켰을 경우 Fig. 10에서처럼 소조기에는 희석을 변화가 거의 없었다. 그러나 대조기의 강한 유속에서는 일년 중 희석률이 가

장 저조한 하계에도 2단계 증설 후에는 300 m, 3단계 증설 후에는 400 m의 연장된 확산관으로 100 이상의 희석률을 얻을 수 있었다. 희석률이 가장 높은 동계에는

Table 3. Predicted dilution rates at 200 m downstream distance for different outfall designs and construction phases.

Construction phases	Diffuser alignment to current direction	Diffuser length	Summer		Winter	
			Neap-tidal current ($u_a=6$ cm/s)	Spring-tidal current ($u_a=15.5$ cm/s)	Neap-tidal current ($u_a=6$ cm/s)	Spring-tidal current ($u_a=15.5$ cm/s)
2nd	Parallel	210 m	17	62	39	87
		300 m	21	81	50	112
		400 m	25	98	60	137
3rd		210 m	15	52	35	73
		300 m	19	59	44	96
		400 m	22	84	53	116
2nd	Perpendicular	210 m	17	75	39	104
		300 m	22	103	50	143
		400 m	26	125	61	175
3rd		210 m	16	64	35	89
		300 m	20	75	45	122
		400 m	23	107	54	149

2단계에서는 200 m, 3단계에서는 300 m의 확산관으로 100 이상의 회석률을 얻을 수 있었다. 선진국에서 임해 대도시하수의 수중방류시설에 대해서는 목표 설계 회석률을 100 또는 그 이상으로 설정해주고 있다. 마산만 해양 방류시설의 경우 유속이 약한 소조기에는 확산관의 길이를 현재보다 두 배인 400 m로 연장시키고, 확산관을 수직배치로 변경해도 현 상태의 회석률보다 크게 개선되지 않았다. 그러나 대조기의 강한 유속에는 2단계에서는 저조한 하계회석률을 높이기 위해서 직각배치로 300 m 정도의 확산관 길이가 요구된다. 한편 동계의 경우에는 평행배치의 300 m, 직각배치의 210 m 확산관에서도 100 이상의 목표 회석률에 도달할 수 있다. 3단계 방류량에 대해서는 하계에는 400 m 확산관의 직각배치가 요구되며 동계에는 400 m 확산관의 평행배치 또는 300 m 확산관의 주 해류방향에 대한 직각배치에서 100 이상의 근역회석률을 얻을 수 있었다.

4.4 회석률 개선을 위한 새로운 방류지점 제안

수중확산관의 최적 설계는 혼합구역에서 방류수의 근역 회석률을 최대한으로 하는 것이 주목적이다. 설계자가 원하는 회석률을 얻기 위해서 가장 먼저 고려되어야 할 사항은 해양방류 위치 선정과 확산관의 배치형태라고 할 수 있다. 마산·창원 하수종말처리장의 양방향 확산관의 경우 순운동량이 미약하므로 회석률은 부력플럭스나 주변유속에 의해 주로 결정되나 수중확산관의 길이 길수록 회석률은 증가하며, 특히 양방향확산관은 일

방향확산관이나 축방향확산관에 비해서 보다 길이가 긴 확산관이 요구된다(Jirka *et al.*, 1996).

외국의 경우 도시하수의 수중확산관의 설치는 주변 해양환경 여건을 고려하여 높은 목표회석률을 얻기 위하여 Table 4에서 보는 바와 같이 방류수심이 30 m 이상인 깊은 수심과 주변유속이 큰 해역에 수중방류시설의 설치위치가 선정되며 정밀한 현장 관측자료와 수리실험을 바탕으로 확산관의 최적배치 등 설계제원을 결정하여 시공을 한다(강 등, 1999b). 그러나 현재 가동중인 마산·창원 하수종말처리장의 하수확산관의 위치는 해안선과의 거리가 680 m 정도로 짧고 수심도 13 m 정도로 얕으며, 방류구역의 해류유속도 소조기에는 최대 10 cm/s 내외, 대조기에는 최대 20 cm/s 정도로 약해서 특히 하계성총시 소조기의 약한 유속에서는 회석률이 30 미만으로 저조한 상태다(강 등, 1999a).

앞의 예측된 결과에서 볼 수 있듯이 2단계와 3단계 증설시 방류량이 증가되면 현재 사용하고 있는 수중확산관을 통한 방류시에는 회석률이 매우 큰 폭으로 감소하게 된다. 방류시설 현재의 위치에서 확산관을 연장하거나 해류방향에 대해 평행배치에서 직각배치로 변경해도 회석률이 다소 증가되나 근원적인 해결방안이 될 수 없음을 Table 3의 예측된 결과로부터 알 수 있다. 회석률을 크게 개선할 수 있는 새로운 방류지점 위치를 제안하기 위해 해류유속이 비교적 강하고 수심 20 m 이상이 되는 방류해역의 조건을 기준으로 새로운 위치를 선정하여 회석률 변화를 예측하였다. 마산·진해만에서

Table 4. Present status and engineering design of foreign ocean outfalls.

Ocean outfalls	Year of operation	pipe diameter (m)	pipe length (m)	discharge depth (m)	diffuser length (m)	diffuser diameter (m)	ports diameter (cm)	ports spacing (m)	flow rate (m ³ /s)	discharge velocity (m/s)	Q/L (m ² /s)	area ratio
Sanitation Districts of Los Angeles County White Point No. 1	1937	1.52	1524	34	116	1.52	21 23	5.5				0.94
Sanitation Districts of Los Angeles County White Point No. 2	1947	1.83	2072	47	65.8	1.05 ~1.83	20 ~23	7.3				0.85
Sanitation Districts of Los Angeles County White Point No. 3	1956	2.3	2,400	61 ~64	731	1.52	16 ~19.1	7.3	6.57	2.44	0.0090	0.63
City of Los Angeles at Hyperion	1960	3.7	8,390	59	2,410		17.1 ~20.7	121.9	18.42	3.96	0.0076	0.44
San Diego	1963	2.7	3,510	61 ~64	820		20.3 ~22.9	121.9	10.27	4.57	0.0125	0.39
Sanitation Districts of Los Angeles County White Point No. 4	1965	3.0	2,270	50 ~58	1,350		5.1 ~9.1	15.2	9.65	2.74	0.0071	0.51
Metro. Seattle (West Point)	1965	2.4	930	64 ~73	180		11.4 ~14.6	7.6	5.49	1.83	0.0305	0.60
Sanitation Districts of Orange County	1971	3.0	6,520	53 ~59	1,830		7.5 ~10.5	30.1	12.74	3.96	0.0070	0.45
Honolulu (Sand Island)	1975	2.1	2,780	67 ~72	1,030		7.6 ~9.0	30.1	4.64	3.05	0.0045	0.44
Sanfrancisco	1990	3.66	6,400	22.9				10.97	6.22, 19.72			
South Bay Ocean Outfall	1998	3.35	5,800	25	1,200	2.1			15.2			
Boston Outfall	1998	8.2	15,000	32	2,000		370	20	56.0			
Sydney Malabar	1990	1.8 7.6	3,000 ~4,000	60 ~80				25				
WRC Outfalls	Gosport										0.91	0.44
	Bridport										0.38	0.41
SEFLOE II Outfalls	Holly-wood		3,050			1.52						0.19
	Broward		2,130			1.37						0.16
	Miami-Central		5,730		39	1.22		9.8				0.90
	Miami-North		3,350		110	0.61		0.61				1.14

관측된 해양자료(강 등, 1993)를 검토하였는데 T/S 관측 정점은 Fig. 11에 나타내었다. 총 34개 정점중에서 방류해역으로 적합하다고 판단되는 정점 19와 34의 수온

및 염분도를 통해 계산된 6월, 9월, 11월의 밀도분포를 Fig. 12에 나타내었다. 수직적인 밀도분포를 보면 6월의 경우 표층에서부터 성층화가 형성되고 있으며 9월에는

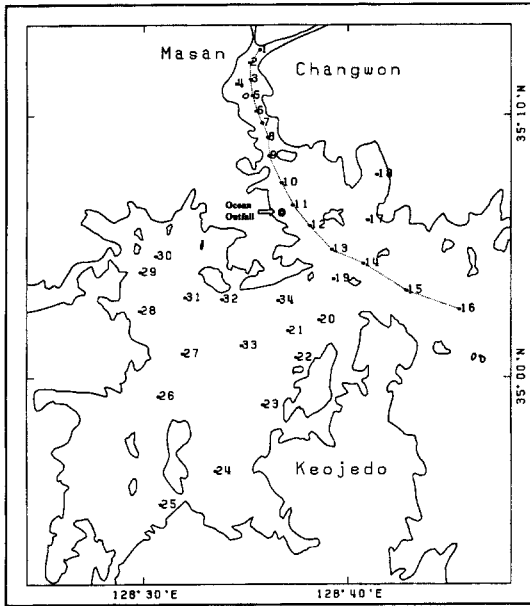


Fig. 11. Station map of field measurements in Masan-Jinhae Bay.

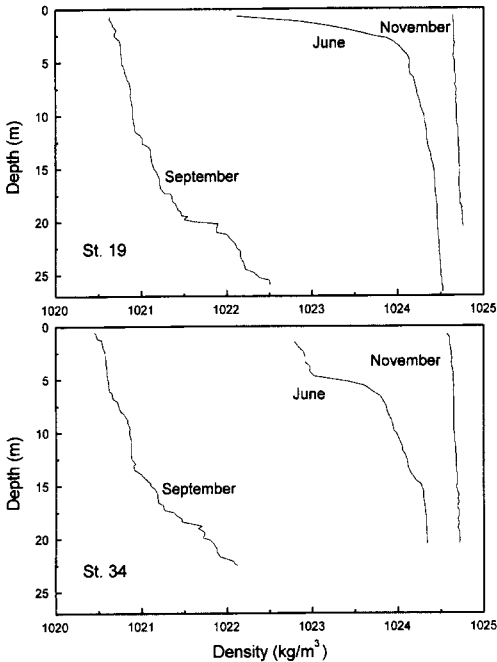


Fig. 12. Seasonal density profiles observed in the proposed outfall sites.

성층화가 수심 15 m 이상으로 깊어지는 양상을 보이고 있다. 11월의 경우 성층화가 소멸되고 전 수심에 걸쳐 밀도분포가 균일한 양상을 보여주고 있다.

마산만에서 측정된 해양환경자료를 바탕으로 2개 지점을 Fig. 13에서와 같이 제안하였다. 제안 1의 방류관 설치지점은 수심이 22 m이고 해안선에서 확산관까지의 거리는 1400 m이며, 제안 2의 방류관 설치지점은 수심 25 m이고 해안선에서의 거리는 2100 m 정도 된다. 두 지점에서의 소조기 평균유속은 각각 10, 11 cm/s이며(한국해양연구소, 1997) 해양환경조건은 강 등(1993)에 의해 관측된 계절별 수온 및 염분자료중 6월, 9월, 11월 자료를 모형모의에 사용하였다. 수중확산관의 길이는 200 m, 400 m로 모의하였으며 확산관의 배치는 주 해류방향에 대해 직각되게 하였다. Table 5에는 모의결과를 나타내었다. 플룸의 중심위치로부터 X성분은 해안선과 평행한 상·하류방향이며 Z성분은 해저의 확산관 위치를 기점으로 상승한 플룸의 최대 높이를 나타낸 것이다. 모형에서 정의하는 근역 회석률을 S로 나타내었다. Table 5에 나타난 모의결과를 보면 전체적으로 제안 2의 방류관 설치위치에서 제안 1의 경우보다는 회석률이 높게 나타났다. 이는 방류수심이 더 깊고 주변 해류유속이 약간 더 세기 때문인 것으로 판단된다. 주변해수의 수직적 등밀도분포를 갖는 11월에 회석률이 제일 높게 나타났으며 해수의 성층으로 혼합회석이 크게 제한 받는 9월에는 회석률도 가장 낮게 나타났다. 앞의 모의결과와 마찬가지로 확산관길이가 증가됨에 따라 회석률도 높게 나타났으며, 2단계와 3단계 증설에 따른 방류량의 증가시 회석률은 낮아졌다. 마산·진해만의 해수밀도가 성층화된 6월과 9월의 회석률 예측결과에서는 모두 100 이상으로 이는 현재 위치에서 30 미만인 하계 성층시의 낮은 회석률과 비교해 볼 때 크게 개선됨을 보여준다. Table 5의 결과는 하수장이 수표면에 도달한 후에 초기 모멘텀 혹은 부력이 소진하는 근역 경계구간 끝(Fig. 3)에서 회석률을 나타내고 있다. Table 6에는 수표면에 도달한 하수장의 회석률과 Roberts(식 4)의 간략식에 의해 계산된 회석률의 결과를 나타내었다. 회석률 계산결과를 보면 CORMIX 모형에 의한 결과와 회석률 간략식으로 계산된 결과가 어느 정도 일치하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 제안된 새로운 지점으로 확산관 위치를 변경하는 것은 주변환경에 미칠 영향을 고려해야 하는 것이 가장 중요하다. 이를 위해서는 방류수의 근역 혼합과정뿐만 아니라 원역에서의 혼합과정은 주변수 흐름의 난류성분에 의한 부력확장(buoyant spreading)과 수동확산(passive diffusion)과정을 거치면서 해류에 의

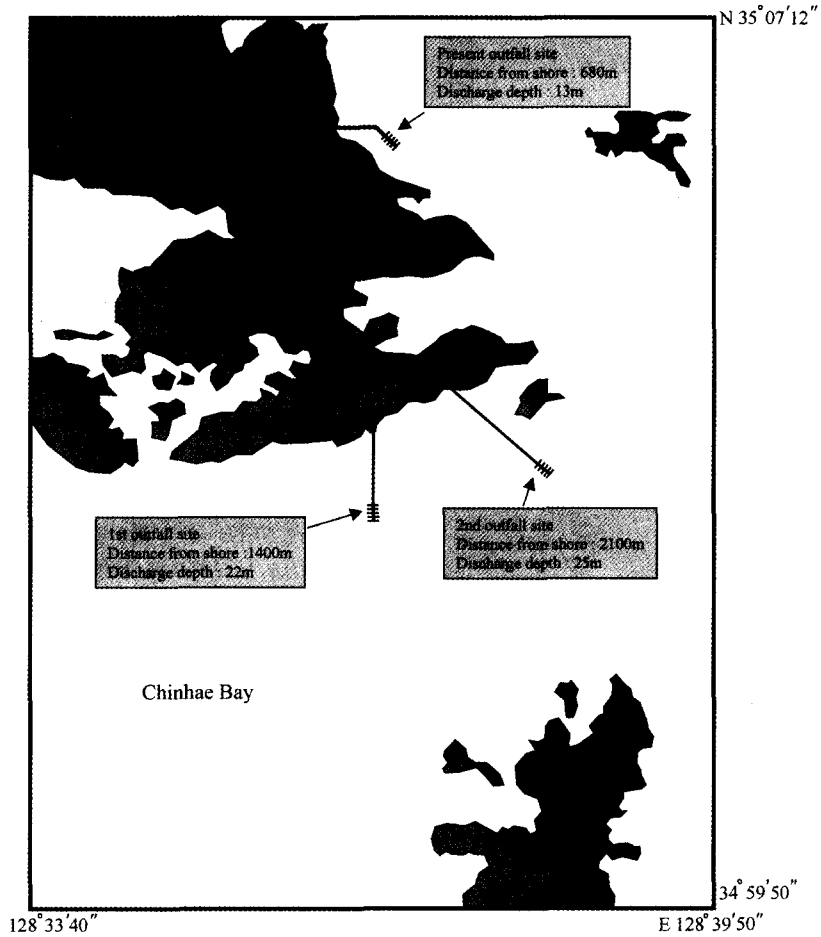


Fig. 13. Location map of new outfalls sites proposed for Masan-Changwon municipal wastewater treatment plant.

Table 5. Near-field dilution rates and plume characteristics predicted for the case of neap tidal currents at the proposed new outfall sites.

New outfall sites (Discharge depth(H), Ave. tidal current(u_{neap}))	Diffuser length	Constru- ction phases	June			September			November		
			X(m)	Z(m)	S	X(m)	Z(m)	S	X(m)	Z(m)	S
1st proposed site (22m, 10cm/s)	200m	1st	43.6	17.0	362	28.7	21.2	248	51.6	21.2	480
		2nd	42.4	21.2	200	33.9	21.2	155	36.5	21.2	198
		3rd	38.4	21.2	173	34.2	21.2	142	33.9	21.2	171
	400m	1st	41.5	17.0	537	22.0	17.1	335	63.3	21.2	952
		2nd	50.0	21.2	326	30.0	21.2	216	43.4	21.2	368
		3rd	51.5	21.2	298	31.1	21.2	198	43.5	21.2	311
2nd proposed site (25m, 11cm/s)	200m	1st	72.1	21.5	535	31.1	21.2	266	63.3	24.2	567
		2nd	55.7	24.2	252	36.6	24.2	163	50.6	24.2	250
		3rd	51.3	24.2	215	37.1	24.2	148	47.3	24.2	214
	400m	1st	58.9	21.5	722	23.7	16.5	354	76.9	24.2	1126
		2nd	60.4	21.5	413	32.6	22.1	232	63.0	24.2	477
		3rd	55.1	21.5	348	33.4	24.2	209	59.4	24.2	400

Table 6. Surface dilution rates and plume characteristics predicted by CORMIX model and Roberts' formula(Eq. 4) for the case of neap tidal currents at the proposed new outfall sites.

(1) CORMIX Model

New outfall sites (H, u_a)	Diffuser length (j_o, F)	Constru-ction phases	June			September			November		
			X(m)	Z(m)	S	X(m)	Z(m)	S	X(m)	Z(m)	S
1st proposed site (22 m, 10 cm/s)	200 m ($j_o=0.002942,$ $F=0.33$)	1st	30.9	17.0	128	19.8	21.2	88	39.8	21.2	170
		2nd	29.2	21.2	71	22.7	21.2	55	27.4	21.2	70
		3rd	25.8	21.2	61	22.7	21.2	50	25.1	21.2	60
	400 m ($j_o=0.001471,$ $F=0.6798$)	1st	32.7	17.0	190	16.5	14.7	119	49.0	21.2	337
		2nd	38.7	21.2	115	22.3	21.2	77	35.6	21.2	130
		3rd	39.7	21.2	105	23.1	21.2	70	33.3	21.2	110
2nd proposed site (25 m, 11 cm/s)	200 m ($j_o=0.002942,$ $F=0.4524$)	1st	53.8	21.5	189	23.8	18.1	94	49.4	24.2	200
		2nd	39.5	24.2	89	27.4	24.2	58	39.0	24.2	88
		3rd	35.9	24.2	76	27.6	24.2	53	36.2	24.2	76
	400 m ($j_o=0.00147,$ $F=0.905$)	1st	47.1	21.5	256	18.2	14.2	125	60.0	24.2	398
		2nd	46.9	21.5	146	24.6	19.0	82	49.0	24.2	169
		3rd	42.4	21.5	122	25.2	24.2	74	46.2	24.2	141

(2) Roberts' formula(Eq. 4)

1st proposed site (22 m, 10 cm/s)	200 m	1st	91	113	113
		2nd	44	44	44
		3rd	37	37	37
	400 m	1st	192	166	240
		2nd	92	92	92
		3rd	77	77	77
2nd proposed site (25 m, 11 cm/s)	200 m	1st	130	110	147
		2nd	57	57	57
		3rd	47	47	47
	400 m	1st	271	179	306
		2nd	105	93	118
		3rd	88	99	99

해 원역으로 이송된다. 최근 들어 방류수에 의한 수질과 퇴적물 오염에 미칠 환경영향을 파악하고 예측하기 위해 다양한 방법을 통해 근역 모형과 원역 모형을 결합하려는 연구가 시도되고 있다(김 등, 1999; Zhang and Adams, 1999).

5. 결 론

본 논문에서는 국내에서 처음으로 1993년 11월에 완공되어 1차 처리된 하수를 수중다공확산관을 통해 마산만에 방류하고 있는 마산·창원 하수종말처리장의 3단계 증설계획에 따른 하수방류량의 증가시 현재의 확산관 시설배치로 방류했을 경우 회석을 변화를 CORMIX 모형

으로 고찰하였다. 2단계와 3단계 증설에 따른 회석을 감소문제에 대한 해결방안 모색을 위해 현재 방류지점에서 확산관의 길이 연장과 배치조건을 변경시켜 방류수의 초기혼합·회석에 대한 개선효과를 정량적으로 파악할 수 있도록 하였다.

마산·창원 하수종말처리장의 증설에 따른 하수방류량의 증가에도 불구하고 현재의 확산관시설로 방류하게 되면 2단계와 3단계 증설의 하수방류량이 증가될수록 회석률은 그와 반대로 크게 감소하게 되며, 방류수역과 인 근해역에 심각한 수질 및 퇴적물오염이 예상된다. 감소된 회석률을 높이기 위한 대안으로서 현 위치에서 단지 확산관의 길이연장과 배치를 직각되게 변경했을 경

우에 대해서 1차적으로 검토하였다. 확산관 길이가 현재보다 1.5~2배 정도 연장되고 해류방향에 대해 확산관 배치가 현재의 평행보다는 직각배치로 했을 때 회석률이 증가하였으나, 소조기의 약한 유속, 즉 6 cm/s 미만일 때는 회석률의 개선효과가 거의 없었다. 다른 계절에 비해 회석률이 가장 높은 동계의 경우에도 방류수역의 유속이 약한 소조기에는 2단계와 3단계 증설 후 현재의 210 m 확산관으로는 회석률이 매우 저조하며 대조기의 강한 유속에도 목표 회석률 100에 도달하기 위해서는 300 m 이상의 확산관 연장이 필요한 것으로 나타났다. 대조기의 해류유속이 15 cm/s 정도로 마산만 방류수역에서 관측된 강한 해류임을 감안하면 보다 긴 확산관을 배치해도 현재의 방류위치에서는 회석률을 크게 높일 수가 없다고 판단된다.

확산관의 현재 위치에서 회석률을 개선할 수 있는 다른 대안으로서는 수중방류시설의 설계시 확산관의 축은 해류방향과 직각이 되도록 배치하는 것이 회석률을 좀 더 높일 수 있으므로 현재의 방류위치에서 해류방향과 거의 평행한 평행배치의 단점을 보완하고 해류방향과 직각을 이루는 기회를 최대한 확보할 수 있도록 직각배치의 새로운 확산관을 추가하는 Y자형 확산관의 설치도 고려해 볼 수 있다. 또한 현재 자연낙차(~15 m 내외)에 의한 방류유속이 작아 방류관 내에 퇴적물 침전에 의해 방류구가 막혀 제기능을 못할 가능성도 있어 외국의 해양방류 시설에서처럼 펌프시설로 현재보다 높은 방류유속을 유지할 필요가 있다. 날로 오염이 심각해지고 있는 마산만의 경우 하수종말처리장의 단계별 증설 후 해양방류에 의한 오염문제가 더욱 심각해질 것으로 예상되므로 향후 2, 3단계 처리시설 증설시에는 수중확산관의 새로운 위치선정과 배치설계가 필요하다. 따라서 2단계와 3단계의 증설에 대비해서 주변 평균유속이 저조시에도 최소한 10 cm/s 이상이 되고, 방류수심도 20 m 이상이 되는 새로운 위치선정이 필요하며, 본 논문에서 제안 검토한 Fig. 13의 방류지점에 수중확산관을 설치했을 경우에는 현재 위치에서보다 근역회석률이 크게 개선할 수 있으나 원역에서의 오염물 확산거동등을 예측하여야 하며, 경제성 및 시공성등에 대해 향후 보다 면밀한 조사와 대안검토가 필요할 것으로 본다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 G-7 환경공학기술개발사업인 “해

양방류관의 적정배치를 위한 실용화 기술 개발” 사업의 일환으로 수행되었으며, 연구 지원에 도움을 주신 국립환경연구원 홍길표 전문위원님께 감사를 드립니다.

참고문헌

- 강시환 등, 1993. 폐쇄성 연안해역의 수질관리기술 연구(I), 한국해양연구소, BSPN 00205-613-2.
- 강시환, 박광순, 김상익, 유승협, 1999a. 마산만 수중방류수의 계절별 근역회석률 변화, 한국해양·해양공학회지, 11(2): 116-126.
- 강시환, 오병철, 서일원, 1999b. 임해도시 하수처리장 해양방류시설에 대한 고찰, 한국해양환경공학회 1999년도 추계 학술대회 논문집, 67-72.
- 강시환, 유승협, 오병철, 박광순, 1999c. 마산·창원 하수종말처리장의 해양방류처리수에 대한초기·근역 회석연구(I), 한국해양환경공학회지, 2(2): 66-69.
- 강시환, 유승협, 오병철, 박광순, 2000. 마산·창원 하수종말처리장의 해양방류처리수에 대한 초기·근역 회석연구(II), 한국해양환경공학회지, 3(1): 35-44.
- 김영도, 서일원, 강시환, 오병철, 1999. 수중다공확산관 방류수의 근역혼합특성 해석을 위한 근역모형과 원역모형의 결합 연구, 한국해양환경공학회 1999년도 추계학술대회논문집, 75-80.
- 마산시, 1996. 마산·창원 하수처리장 2차 확장사업 환경영향평가서.
- 서일원, 이재형, 김창시, 이대수, 강금석, 1998a. 오염물질의 해양방류기술(III); 온배수 확산관의 설계 및 시공, 한국수자원학회지, 31(3): 116-125.
- 서일원, 이재형, 김창시, 1998b. 오염물질의 해양방류기술(IV); 하수확산관의 설계 및 시공, 한국수자원학회지, 31(4): 78-88.
- 한국해양연구소, 1992. 진해만 해양관측자료집(I)-'82-'83년도 조류, 조석 및 기상관측자료.
- 한국해양연구소, 1997. 진해·마산만 수질환경 관리모델 개발(I).
- Akar, P.J. and Jirka, G.H., 1991. CORMIX2: An expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged multiport diffuser discharges, *Tech. Rep.*, DeFrees Hydraulics Lab., School of Civil and Environmental Engrg., Cornell Univ., Ithaca, N.Y.
- Jirka, G.H. and Harleman, D.R.F., 1979. Stability and mixing of a vertical plane buoyant jet in confined depth, *J. Fluid Mech.*, 94(2), pp. 275-304.
- Jirka, G.H. and Akar, P.J., 1991. Hydrodynamic classification of submerged multiport diffuser discharges, *J. Hydr. Engrg.*,

- ASCE, **117**(9), pp. 1113~1129.
- Jirka, G.H., Doneker, R.L. and Hinton, S.W., 1996. Users manual for CORMIX: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. Office of Science and Technology, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.
- Roberts, P.J.W., 1979. Line plume and ocean outfall dispersion, *J. Hydr. Div.*, ASCE, **105**(5), pp. 313~331.
- Roberts, P.J.W., 1980. Ocean outfall dilution: Effect of currents, *J. of Hydr. Div.*, ASCE, **106**(5), pp. 769~782.
- Roberts, P.J.W., Snyder, W.H. and Baumgartner, D.H., 1989. Ocean outfalls, I: Submerged wastefields formation, II: Spatial evolution of submerged wastefields, III: Effect of diffuser design on submerged wastefields, *J. Hydr. Div.*, ASCE, **115**(1), pp. 170.
- Wood, I.R., Bell, R.G. and Wilkinson, D.L., 1993. *Ocean Disposal of Wastewater*, World Scientific, Singapore.
- Zhang, X.-Y. and Adams, E.E., 1999. "Prediction of near field plume characteristics using far field circulation model." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, **125**, 233-241.
-
- Received March 16, 2000
 Accepted April 24, 2000