

## 마산만 수중 방류수의 계절별 근역희석을 변화 Seasonal Variations of Near-Field Dilutions of Submerged Multiport-Diffuser Discharges in Masan Bay

강시환\* · 박광순\* · 김상익\* · 유승협\*

See-Whan Kang\*, Kwang-Soon Park\*, Sang-Ik Kim\* and Sung-Hyup You\*

**요 旨** : 본 논문에서는 해양 수중 다공화산관을 통해 하수종말처리장에서 1차 처리된 하·폐수를 해양방류하고 있는 마산만에서 방류수의 근역 희석률에 대한 계절별 변화를 고찰하였다. 방류수역에서 관측된 수온·염분의 수직분포와 대조기·소조기의 유속 자료를 입력하여 CORMIX 모형으로 계절별 희석률을 구하였다. 수심 15 m 내외의 방류수역에서 수직적 등밀도 혼합이 전 층에서 형성되는 겨울철과 가을철 순으로 방류수의 근역 희석률이 가장 높았으며, 수온약층이 점차 깊어지는 여름철에는 희석률이 크게 감소하였다. 주변해수의 유동성에 따른 난류확산이 작은 소조기 정체시에는 여름철의 희석률이 겨울철보다 약 1/4 정도로 작으며, 유속이 큰 대조기에는 두 계절의 차이가 30% 정도로 적었다. 이는 여름철의 조류가 약한 정체시에 방류하수로 인한 수질오염이 마산만 방류수역에 가장 심하게 나타날 것으로 사료된다.

**핵심용어** : 다공화산관, 하수, CORMIX 모형, 희석, 계절 변화, 마산만

**Abstract** □ In this paper, we have studied the seasonal variations of near-field dilutions of wastewater discharged from the submerged mutiport-diffuser in Masan Bay. Seasonal changes of temperature and salinity, and tidal currents were measured at 16 stations in Masan Bay. Based on the observed ambient field data, the seasonal changes of near-field dilutions due to ambient current and density fields were calculated by CORMIX model. Because of the shallow ambient water depth of 15 m, the density profiles are isopycnal in autumn and winter seasons, in which the dilution factors were the highest, 168 with the strong spring-tidal current and 110~120 with the weak neap-tidal current. As the season changes from spring to summer, the dilution factors are considerably reduced by the factor of 2 as the thermocline is getting deepened up to 5m in depth in summer. In the case of a weak ambient current, the dilution factor in summer was reduced to 1/4 of the dilution in winter. However, with strong ambient current the difference between summer and winter dilutions becomes relatively small by 30%. The results indicate that the seasonal variation of near-field dilution is very large up to 4 times with a weak neap-tidal current, but its variations become small under a strong ambient current of spring tide in Masan Bay.

**Keywords** : multiport-diffuser, wastewater, CORMIX model, dilution, seasonal variations, Masan Bay

### 1. 서 론

해양방류관에 의한 하·폐수의 해양방류는 주변해역에 미치는 환경적인 악영향을 최소화하도록 방류초기에 최대한 희석·분산시키는 것이 목적이다. 이러한 하·폐수의 해양방류 처리는 1960년대부터 마이애미 등 미국의 해안도시에서 시작하여 현재는 보편화되고 있으며, 특히 원자력

발전소 온배수의 해양방류 처리방법으로도 이용되고 연구가 활발히 진행되고 있다(Fisher *et al.*, 1979; Roberts *et al.*, 1989; Proni and Dammann, 1994). 해양방류방식은 수표면 근처에 방류하는 표층방류와 깊은 수심의 수중에서 방류하는 수중방류가 있다. 표층방류의 경우는 건설시공의 경제적 이점은 있으나 희석·분산효과가 불량해 특히 하·폐수인 경우에는 악취발생과 미관상의 문제로 수중

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

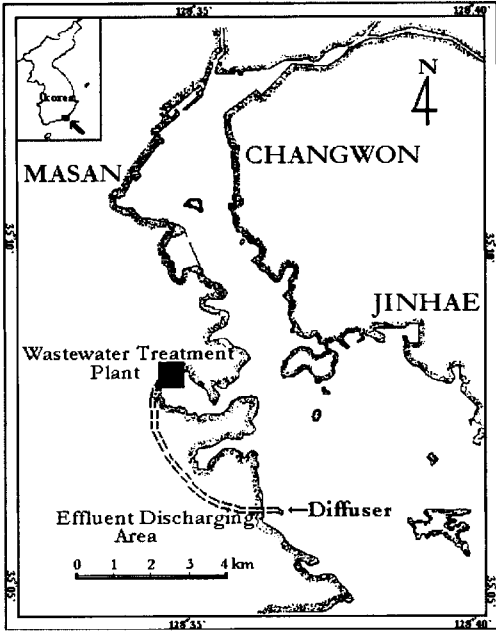


Fig. 1. Site map of the submerged ocean outfall of Masan-Changwon municipal treatment plant.

방류방식을 주로 취하고 있다(Wood *et al.*, 1993). 수중방류방식은 수심이 깊은 외해까지 나가 다수의 방류공을 부착한 확산관을 통해 고속으로 하·폐수를 방류하여 방류수의 큰 운동량, 주변수와의 밀도차에 의한 부력효과, 해수 유동장의 난류성분등을 이용하여 높은 희석과 분산을 유도할 수 있다. 따라서 수중방류의 초기조건과 확산관의 기하학적 형태에 따라 혼합·희석효과가 크게 변하고, 목표로 하는 초기·근역 희석결과를 얻기 위해서는 방류조건, 방류수역의 해양특성에 따라 확산관의 위치, 규모, 형식 등 배치를 적절하게 설계 시공해야한다(서 등, 1998).

마산만과 진해만의 수질오염 문제를 해소하기 위한 대책으로 마산시와 창원시에서 발생하는 도시하수와 공장폐수를 차집하여 하수처리용량 280,000 m<sup>3</sup>/day 규모의 1차처리 시설을 갖춘 하수처리장과 차집관거 공사가 1993년 11월에 완공됨에 따라 경상남도 창원군 구산면 옥계리에서 현재 다공확산관을 통해 해양방류(Fig. 1)를 시행하고 있다. 처리된 하수는 공칭직경 2,000 mm인 방류관을 통하여 해안으로부터 680 m 지점(수심 13 m)까지 이동한 후에 총길이 약 200 m인 다공방류관을 통하여 방류된다. 다공방류관은 해안선과 거의 평행(15도 차이)한 방향으로 총 21개의 Riser가 10 m 간격으로 설치되어 있으며, 각 Riser에는 4개의 포트가 달려있다(마산시, 1996).

본 연구에서는 현재 가동중인 마산·창원 하수종말처리장의 방류시설을 대상으로 마산만의 방류해역에서 계절별로 측정된 수온과 염분 그리고 조류관측자료를 이용하여 수중방류하수의 희석률을 CORMIX 모형으로 구하였으며, 이 결과를 통해 방류해역의 계절별 환경특성에 따른 방류하수의 근역 희석률 변화에 대해 고찰하였다.

## 2. 해양 수중방류수의 근역 혼합 및 희석

수중방류된 하수의 초기혼합, 희석, 확산이송 과정에 영향을 미치는 주요인자는 방류수심, 주변수의 밀도성층, 방류속도 및 운동량, 주변수의 흐름 등이 있다. Fig. 2는 근역혼합 해역에서 형성된 하수장(wastefields)의 모습을 개략적으로 표현한 것이다(Roberts *et al.*, 1989).

수중확산관에서 해양으로 방류된 하수의 하수장이 형성되는 구역은 크게 근역과 원역으로 구분이 되며 방류하수의 희석과정도 크게 3단계를 거치게 되는데 첫 단계는 제트 형태로 방류된 하수가 운동량과 부력에 의해 부력제트(buoyant jet)로 상승하면서 주변수를 포획 희석하여 하수장(wastefields)을 형성하고 두 번째는 형성된 하수장이 횡방향으로 부력확장(lateral buoyant spreading)하는 단계이고 마지막 세 번째 단계는 주변수역의 해류에 의해 난류확산과 이송(advection)을 하는 단계이다. 하수장이 형성되는 첫 번째 단계까지를 근역이라고 하며, 그 후 천이역(transition zone)을 거쳐 원역으로 옮겨간다(Fig. 2).

방류된 하수의 밀도는 주변해수의 밀도보다 작으므로 제트는 부력 때문에 수표면을 향하여 상승하면서, 가로 흐름의 하류 방향으로도 회전하는 플룸을 형성한다. 플룸은 상승하면서 주변수를 포획하여 희석되므로 주변수와의 밀도

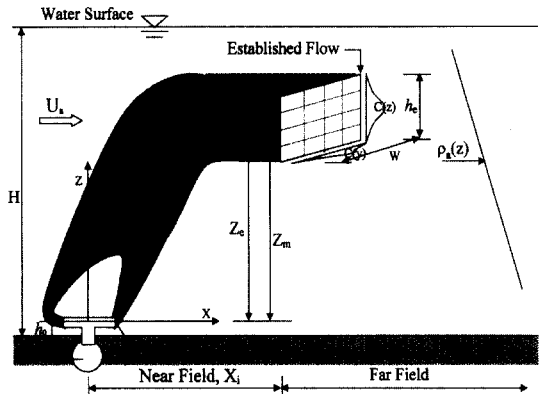


Fig. 2. Schematic of wastefields discharged from a submerged diffuser.

차가 작아져 주변 수역이 밀도성층을 이루고 있다면 플룸의 밀도와 주변수의 밀도가 같아지는 위치에서 플룸은 상승을 멈춘다. 이러한 높이를 포착고(trap level) 또는 평형상승고(equilibrium terminal level)라고 한다. 비성층 수역이라면 플룸은 수표면까지 도달한다. 하류 방향으로 플룸이 이동하면서 방류수의 부력과 운동량에 의한 난류 운동 에너지가 소멸될 때까지 희석률은 증가하는데, 확산관 근처에서 희석률의 증가율이 매우 크다. 근역혼합 구역의 끝으로 갈수록 희석률의 증가 비율은 감소하게 되고, 원역으로 진행함에 따라 희석률은 주변수의 수동 확산에 의존하게 되어 근역에 비해 그 증가율은 아주 미미해진다. Fig. 2에서 정의한  $X_i$ 의 거리, 즉 근역끝에서의 희석률을 초기 희석률(initial dilution)이라고 하며 주어진 해양환경조건에 대해서 어떻게 하면 초기희석률을 최대 높일 수 있는가 하는 문제가 해양방류기술 개발의 핵심 사안이다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 하수장의 특성을 정의하는 인자로는  $X_i$ (근역구간 거리),  $Z_a$ (상단 하수장 높이),  $Z_m$ (희석률이 최소인 지점의 높이),  $h_a$ (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),  $Z$ (해저로부터 수표면의 높이)등이 있다. 근역혼합은 방류량 또는 방류유속, 확산관의 형태 및 주변 해수와의 밀도차, 주변 수역의 밀도분포, 조류의 크기와 방향에 따라 달라지는데, 근역에서의 하수의 혼합과정은 1차적으로 방류방식에 따라 결정된다(김, 1998). Fig. 3은 수중다공확산관 중에서 방출운동량이 주변수의 유동에 거의 영향을 미치지 않는 양방향확산관(alternating diffuser)을 나타내고 있다.  $\beta$ 는 확산관 축과 방류방향이 이루는

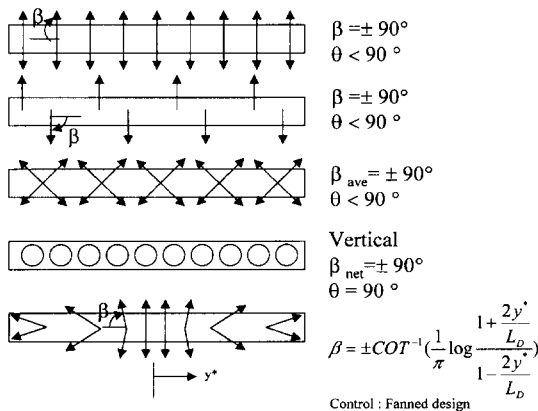


Fig. 3. Configuration of common alternating diffuser types.

평면각도이며  $\theta$ 는 수평면에서 수표면 방향으로의 방류 각도이다. 양방향확산관은 대칭으로 방류됨으로 조석현상에 의하여 주기적으로 흐름의 방향이 변하는 경우에 적합하다. 본 연구의 대상인 마산/창원 하수처리장의 하수확산관은 Fig. 3의 세 번째 형태로서 각 연직유도관의 상단에 4개의 방류공들이 수평으로 설치되어 있다(건설교통부, 1993).

### 3. CORMIX 모형에 의한 근역 희석률 계산

CORMIX(Cornell Mixing Zone Expert System)모형은 미국 환경청(U.S. EPA)의 지원을 받아 오염물질이 자연 수체로 방류되는 경우에 대하여 비전문가가 혼합현상을 해석할 수 있도록 하기 위해 Cornell 대학에서 개발된 길이 축척모형이다(Akar and Jirka, 1996).

CORMIX모형은 BOD, COD, 온도 등과 같은 일반 오염물질과 독성 오염물질의 초기혼합 및 희석과정을 모의하도록 개발된 모형으로서, 수중 단일확산관 방류시 확산해석을 위한 CORMIX1 모형, 수중 다공확산관 방류시 확산해석을 위한 CORMIX2 모형, 표층방류시 확산해석을 위한 CORMIX3 모형으로 구성되어 있다. 특히, 본 연구에서 사용된 CORMIX2 모형은 오염물질이 다공확산관을 통하여 수중으로 방류되는 경우에 혼합현상을 해석하고 초기희석률을 구하기 위한 수치계산모형이며, Fig. 4는 CORMIX2 모형의 다공확산관 배치조건에 따른 입력과라미터를 도시해 놓은 것이다(Jirka and Doneker, 1991).

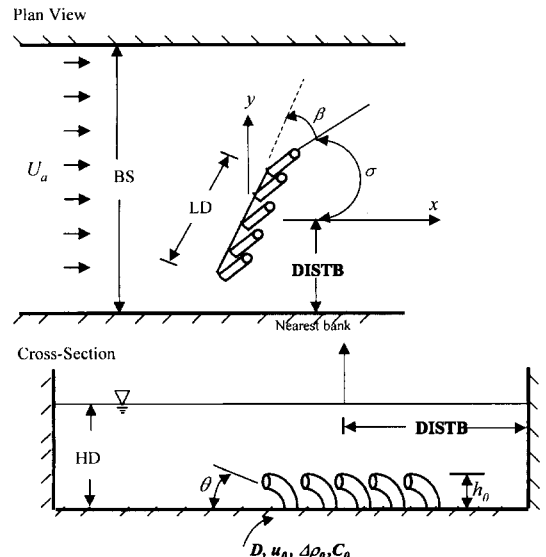


Fig. 4. Definition diagram for CORMIX2.

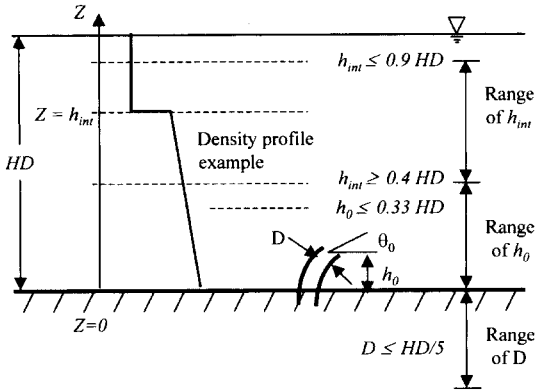


Fig. 5. Limits of applicability of CORMIX2.

입력자료는 확산관의 특성, 방류해역의 수리학적 자료, 방류수의 특성 자료 등이다. 즉, 확산관의 특성에는 확산관 길이(LD), 확산관 축에 대한 방향( $\beta$ ), 조류에 대한 방류각( $\rho$ ), 해안선으로부터의 방류관 거리(DISTB), 방류관 직경(D), 방류관 높이( $h_0$ ) 등이 있으며 방류해역의 수리학적 자료에는 조류의 속도( $U_a$ ), 방류수심(HD), 방류해역의 폭(BS), 밀도 분포 등이 있다. 방류수 특성 자료에는 방류수의 밀도( $\Delta\rho_0$ ), 농도( $C_0$ ), 방류속도( $u_0$ ) 등이 있다. CORMIX2 모형을 적용할 때 제한요소들이 있는데 Fig. 5에 나타나 있다.

즉, 방류관의 높이  $h_0$ 는 총수심(HD)의 1/3을 넘지 않아야 하며, 방류관의 직경은 수심의 1/5를 초과하지 않아야 한다. 주변수의 밀도분포가 Fig. 5와 같이 불연속적인 형태라면 이 지점은 수심의 40%와 90% 사이에 있어야 한다(Akar and Jirka, 1996). CORMIX2 모형은 방류관의 특성에 따른 근역에서의 혼합과정을 정확하게 모의할 수 있어 방류수의 희석과정과 거동현상을 보다 정밀히 파악할 수 있을뿐만 아니라 초기희석률을 높이기 위한 대안까지도 제시해 주는 것이 특징이다. 다만 CORMIX2 모형은 거의 모든 수계에 적용이 가능하나 적용 해역의 단면과 수심을 일정하게 가정해야 하는 문제점이 있어 적용 해역에 해양구조물 등이 존재하거나 수계 바닥면이 일정치 않아 변화가 심한 곳에서는 적용성의 한계가 있다(김, 1998).

CORMIX모형의 마산만 방류해역에 대한 현장적용 검증을 위해 1998년 하계에 방류수역에서 오전과 오후에 두 차례에 걸쳐 조류의 정체시에 관측된 수온과 염분자료(채 등, 1999)를 토대로 CORMIX모형의 계산결과와 관측된 희석률 비교한 결과는 Fig. 6와 같다.(강 등, 1999). Fig. 6에는 미국 Miami의 수중 다공확산관으로부터 해양방류된

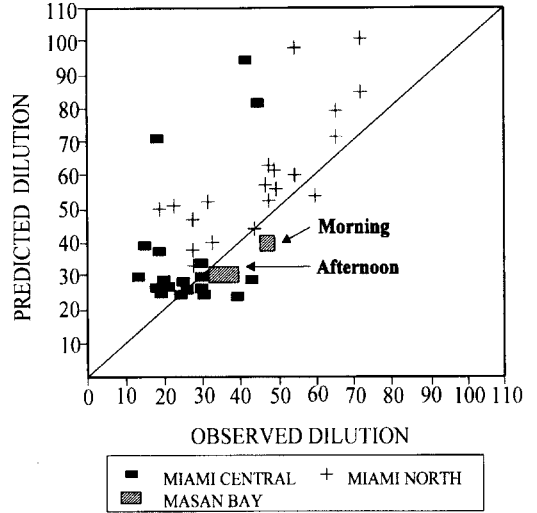


Fig. 6. Comparisons of the observed and predicted dilutions at the Masan outfall with Miami outfalls' data.

하수의 근역희석률과 플룸의 이동확산 경로를 추적 조사하기 위한 SEFLOEII(Southeast Florida Ocean Outfall Experiment, 1991-1994) 실험(Proni et al., 1994)에서 나타난 CORMIX2 모형의 검증결과와 본 연구대상인 마산만 방류시설의 희석률 산정 결과를 함께 도시하여 비교하였다. 먼저 SEFLOEII 결과에서는 CORMIX2 모형에 의한 예측결과가 현장관측 희석률 값보다는 상당히 높고 넓게 퍼져 있지만 강 등(1999)의 연구에서 나타난 희석률 예측결과는 현장관측과 비교적 잘 일치되고 있음을 알 수가 있다. 이러한 결과는 Miami 수중 방류에 비해 마산만 방류수심이 얕고, 마산만 하계의 성층효과와 소조기의 흐름이 거의 정체되어 난류에 의한 혼합희석의 영향이 작아 희석률이 낮았기 때문인 것으로 사료된다.

#### 4. 마산만 수중방류수의 근역희석률 산정방법 및 계산결과

##### 4.1 현장 관측 및 모형 입력자료

해양수중방류관이 설치된 마산만 입구해역에서의 수온(T)과 염분(S)의 수직·수평적 분포에 대한 계절별 변화를 파악하기 위한 현장 관측조사가 1991~1993년에 걸쳐 강 등(1993)에 의해 수행되었다. T/S 관측 정점은 Fig. 7에 표현되어 있다. 여기서 마산만 안쪽의 정점 1을 기점으로 진행한 외해의 가덕수로 정점 16까지의 정선을 따라 4차(2월, 4월, 6월, 11월)에 걸쳐 각 정점에서 T/S 분포조사

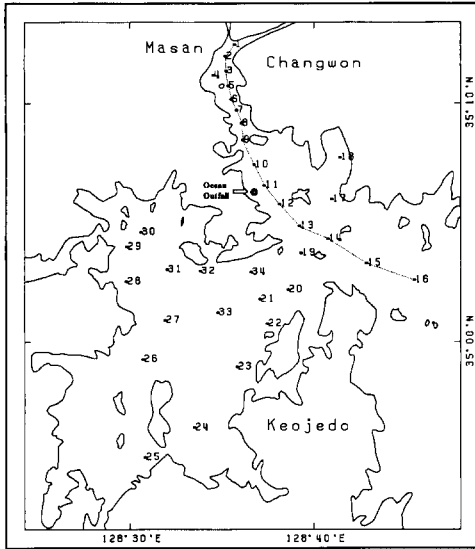


Fig. 7. Station map of field measurement in Masan Bay.

를 통해 수온과 염분의 계절별 변화를 파악하였다(강 등, 1993).

Fig. 8은 정점 1부터 정점 16까지 정선을 따라서 관측된 하계의 연직 T/S 분포도이고 Fig. 9은 동계의 연직

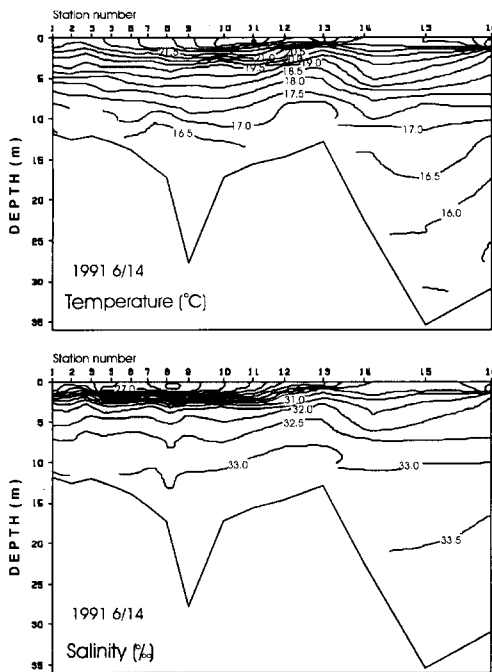


Fig. 8. Vertical structure of observed temperature and salinity profiles in Masan Bay in summer.

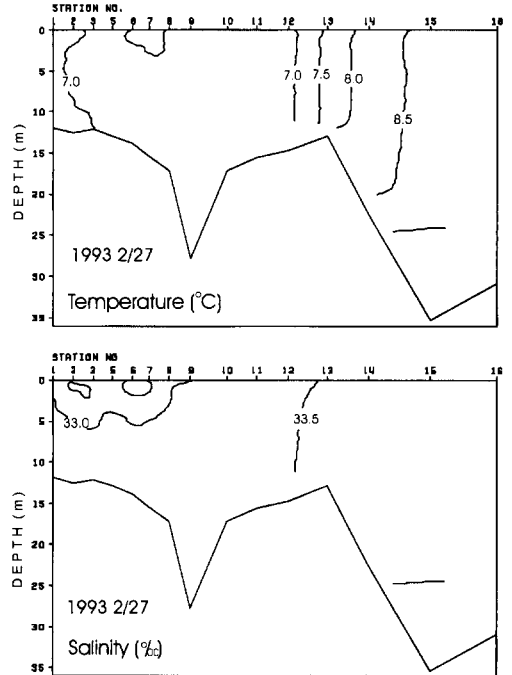


Fig. 9. Vertical structure of observed temperature and salinity profiles in Masan Bay in winter.

T/S 분포도이다.

수중방류관은 정점 10과 정점 11사이의 옥계 앞 바다에 위치하고 있어, 이 두 정점에서 계절별로 관측된 T/S 자료를 계절별 희석률 계산을 위한 CORMIX모형의 입력자료로 사용하였다. Fig. 10는 정점 11에서의 계절별 T/S 연직분포를 나타내고 있다. 여기서 봄철에 기온상승에 따른 성층화가 표층에서부터 시작되어 여름철에 갈수록 수온 약층이 수심 5 m 내외로 점점 깊어지며 가을철과 겨울철에는 기온하강에 따라 15 m 내외의 얇은 수심과 강한 조류에 의해 전 층에 걸쳐 등밀도혼합(isopycnal mixing)이 활발히 이루어지고 있음을 보여주고 있다.

이러한 계절별 T/S 분포로부터  $\sigma_t$ 를 계산하여 Fig. 11과 같이 근사값을 취하여 주변해수의 밀도분포에 대한 모형입력자료로 사용하였다.

마산만의 마산/창원 하수처리장 건설지(건설교통부, 1993)에 의하면 마산/창원 하수처리장의 도수관은 해안에서 약 680 m 떨어진 해역의 확산관까지 해저 2.0 m 지점에 매설되어 있고, 확산관의 길이는 약 200 m이다. 확산관에는 21개의 연직유도관이 해저면에서 0.8 m 높이까지 돌출되어 있으며, 각 연직유도관의 상단에는 4개씩의 방류공이 수평 방류하도록 부착되어 있다. 도수관 및 확산관의

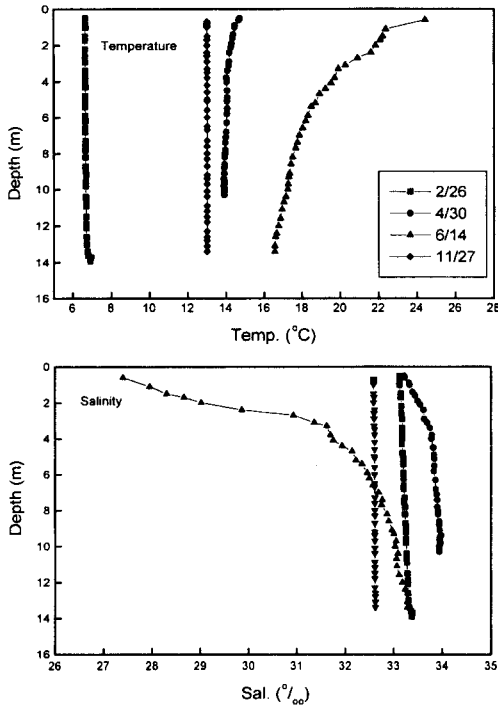


Fig. 10. Seasonal variations of observed temperature and salinity profiles at the station 11.

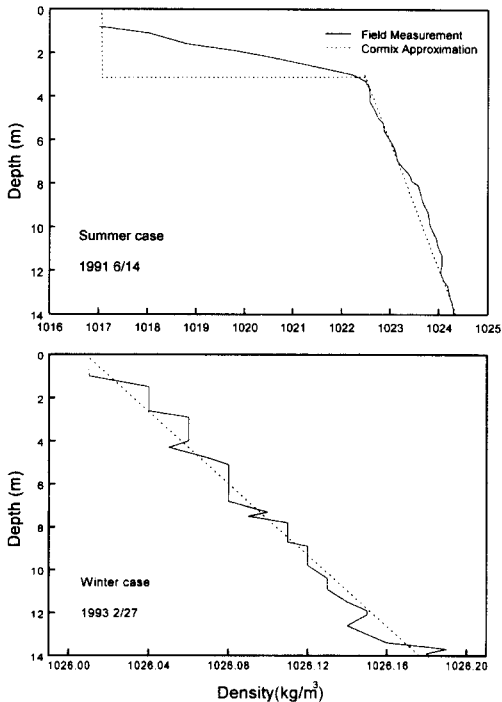


Fig. 11. Density profile input for CORMIX2 model simulations at the Masan outfall site.

Table 1. Input data of CORMIX2 model simulations for the Masan outfall discharges.

Model parameters	Input data
주변수 구속여부	unbounded
Manning 조도계수	0.030
조류속도	0.035 m/s(neap tide) 0.155 m/s(spring tide)
최근 해안선	오른쪽
해안선에서 처음 확산관까지의 거리	680 m
해안선에서 마지막 확산관까지의 거리	733.59 m
방류공수	21
방류공직경	0.2 m
방류공높이	0.8 m
조류방향에 대한 확산관의 평면각	15°
방류유량	2.315 m³/s

직경은 2,000 mm이고, 연직유도관은 1,350 mm, 방류공의 직경은 각각 200 mm이다. 확산관의 형태는 양방향확산관(Fig. 3)으로, 확산관축은 조류방향과 약 15도 편향되게 설치되어 있는 것으로 모의하였다. 하수종말처리장 시설은 수차례의 수정을 거쳐 2단계로 계획되었으며, 계획시 추정 하수량은 1단계 완료시(1993년) 281,105 m³/day, 2단계 완료시(2001년) 517,873 m³/day이다(마산시, 1996). 이에 따라 하수종말처리장이 1993년 11월에 1단계 공사가 완료되어 1995년 현재 200,000 m³/day의 하수를 1차처리 후 방류하고 있다. 방류수량이 1단계 준공시보다 수량이 작은 이유는 마산시와 창원시에서 발생한 하수가 완전하게 하수차집관거로 유입되어 하수종말처리장에서 처리된 후에 방류되지 않고, 오염된 하수의 대부분이 마산만으로 직접 유입되기 때문이다(강 등, 1998). 방류유량은 모형에 적용하기 위해 단위를 환산하여 2.315 m³/s로 모의하였으며 조류속도는 소조기를 0.035 m/s, 대조기를 0.155 m/s를 기준으로 모의하였으며 조석의 효과는 고려하지 않았다. Table 1은 CORMIX2 모형의 기본입력자료를 정리한 표이다.

Table 2는 관측시기의 대기온도 등 기상자료로부터 구한 방류수 밀도와 바람의 세기에 대한 모형입력자료이다.

#### 4.2 계절별 회석률 계산결과

CORMIX2 모형에서 모의된 방류수의 흐름 양상을 확산관을 중심으로부터 플룸 궤적 평면을 따라 플룸의 형상을 묘사한 것이 Fig. 12과 13에 나타나 있다. 플룸의 중심위치를 X성분(상·하류방향)과 Y성분(해안선과 직각인 방향), Z성분(수심)으로 나타내었다. X성분중 음수는 확

**Table 2.** Input data for discharged waste water density and wind speed in Masan Bay.

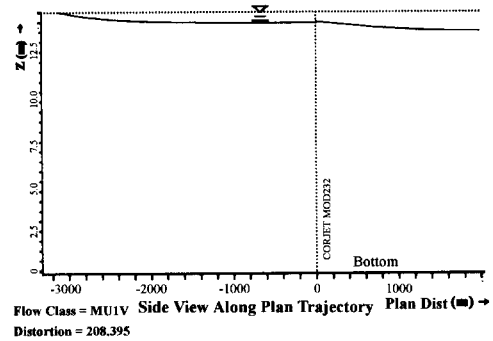
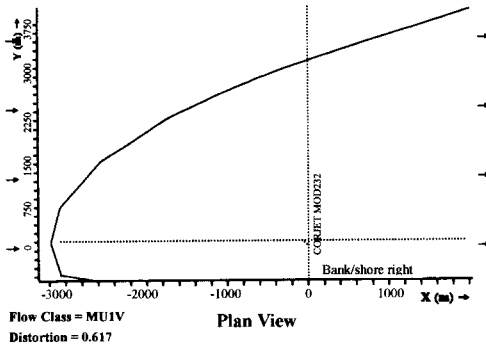
Date	Density of discharge water(kg/m <sup>3</sup> )	Wind speed(m/s)
1993년 2월	999.96	2.4
1993년 4월	999.38	2.7
1991년 6월	997.57	2.6
1998년 7월	995.67	2.0
1992년 11월	999.76	1.9

산관측에 대해서 내만(북서방향) 쪽으로 이동한 플룸을 나타낸 것이고 양수는 확산관에서 외만(남동방향) 쪽으로 확산된 플룸을 나타내고 있다. Z 성분은 확산관 위치를 기점으로 상승한 플룸의 중앙선 위치를 나타낸 것이다.

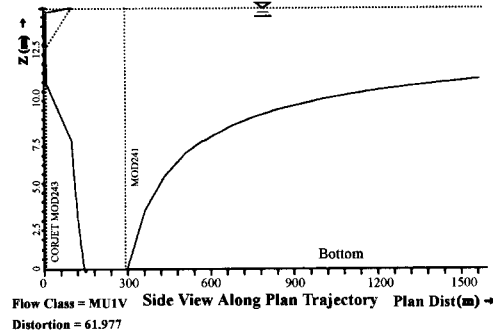
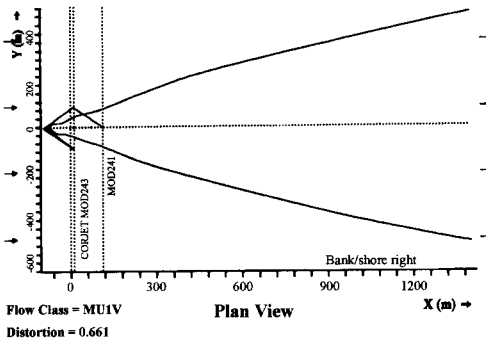
CORMIX 모형에 의해 계산된 방류하수의 근역 회석률에 대한 계절별 변화 결과가 소조기 정체시와 대조기의 강한 주변 유속시로 구분하여 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 여기서 수중방류된 하수장의 근역혼합경계 위치는

X, Z 좌표, 근역회석률, 그리고 플룸체적의 수직·수평확산 폭을 나타내고 있다.

수심 14 m의 전 층에 걸쳐 수직적 등밀도 혼합층을 형성하고 있는 겨울철의 소조기 유속과 대조기 유속조건에서 하수장의 혼합·확산 이동상황을 Fig. 12에서 보여주고 있다. 방류구 주변해수의 유속이 3.5 cm/s로 거의 정체된 소조기의 경우 방류수의 부력젯트에 의해 표층부까지 수직 상승하여 혼합·확산 이동하는 양상을 나타내며, 근역의 수평적 중심위치는 방류관으로부터 약 2 km, 하수플룸의 두께는 1 m, 수평적 확산의 반폭은 약 4 km 넓로 넓게 퍼지는 양상을 나타내고 있으며 모형에서 정의된 근역혼합 구역 끝에서의 회석률은 122로 나타났다. 한편 주변해수의 유속이 가장 큰 대조기의 최대유속(15.5 cm/s)에는 방류 초기의 부력젯트가 해류방향으로 휘면서 표층으로 상승하고 강한 난류성분에 의해 크게 혼합되면서 14 m의 전 수심에 걸쳐 하수장을 형성한다. 따라서 근역의 수평적 경계는 120 m로 소조시에 비해 크게 축소되고, 수평적 확산

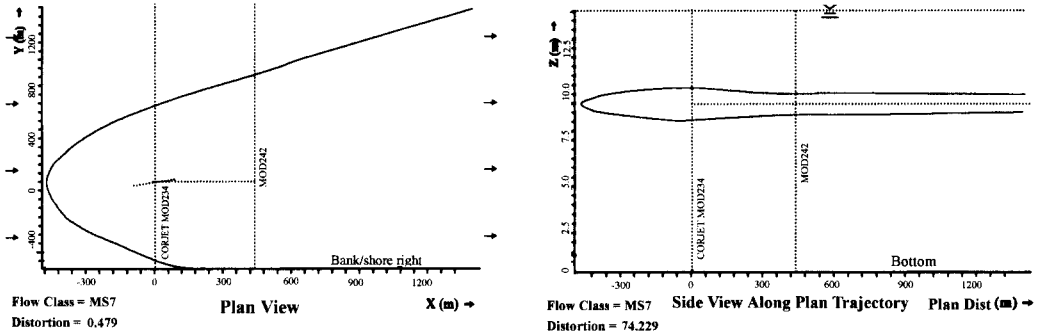


(a) neap tidal current ( $U_a=3.5\text{cm/sec}$ )

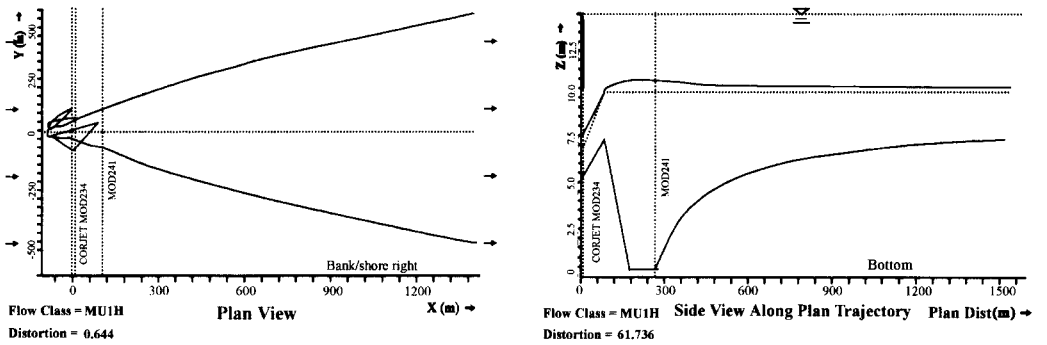


(b) spring tidal current ( $U_a=15.5\text{cm/sec}$ )

**Fig. 12.** CORMIX2 prediction of the wastefield transport at the Masan outfall in winter.



(a) neap tidal current ( $U_a=3.5\text{cm/sec}$ )



(b) spring tidal current ( $U_a=15.5\text{cm/sec}$ )

Fig. 13. CORMIX2 prediction of the wastefield transport at the Masan outfall in summer.

Table 3. Position, near-field dilution factors, thickness, half width of plume predicted by CORMIX for the neap tide case.

Date and station	Plume position	Dilution		Vertical thickness (m)	Horizontal half width (m)
		X (m)	Z (m)		
93.2.26(st.10)	1985.6	14.0	121	1.0	3966.8
93.2.26(st.11)	1985.2	14.0	121	1.0	3965.9
93.4.30(st.10)	606.7	12.2	65	1.8	1208.4
93.4.30(st.11)	579.3	12.2	70	2.0	1153.9
91.6.14(st.10)	442.8	9.9	33	1.3	882.8
91.6.14(st.11)	435.6	9.9	34	1.3	868.3
98.7.31(D10)	427.9	9.0	29	1.2	853.5
98.7.31(D13)	438.9	9.0	29	1.1	875.3
92.11.27(st.10)	1899.6	14.0	110	1.0	3794.8
92.11.27(st.11)	1902.7	14.0	110	1.0	3800.9

반폭도 93 m로 좁은 형태를 보인다. 그러나 전 수심에 걸쳐 방류수가 혼합되기 때문에 회석률은 169로 소조기의 122에 비해 크게 증가되었다.

한편 여름철의 소조기 유속과 대조기 유속조건에서 하수장의 혼합·확산 이동상황은 Fig. 13와 같은데, 여름철의

경우에는 수심 5 m 내외에서 형성된 수온약층에서 부러져 트에 의해 상승한 하수장이 주변수밀도와 평형상태가 되는 평형 상승층(equilibrium terminal layer)을 이루며 해류의 수평적 흐름에 의해 수온약층에서 포착된 형태로 이동 확산됨을 보여주고 있다. 소조기 유속의 경우에는 근역의 수



**Table 4.** Position, near-field dilution factors, thickness, half width of plume predicted by CORMIX for the spring tide case.

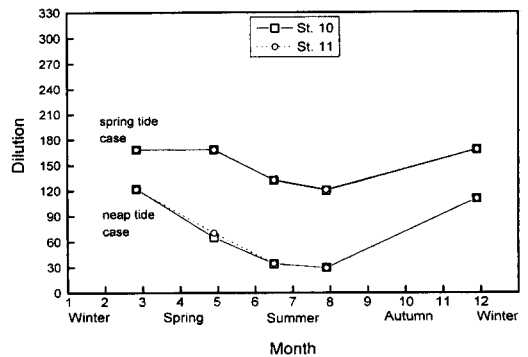
Date and station	Plume position (m)		Dilution	Vertical thickness (m)	Horizontal half width (m)
	X (m)	Z (m)			
93.2.26(st.10)	119.3	14.0	168	4.0	92.9
93.2.26(st.11)	119.2	14.0	168	14.0	92.9
93.4.30(st.10)	121.5	14.0	168	14.0	93.0
93.4.30(st.11)	119.7	14.0	168	14.0	92.0
91.6.14(st.10)	103.3	11.0	132	11.0	90.8
91.6.14(st.11)	104.3	11.0	132	11.0	90.9
98.7.31(D10)	102.5	10.0	120	10.0	91.5
98.7.31(D13)	101.6	10.0	121	10.0	90.4
92.11.27(st.10)	119.5	14.0	168	14.0	92.8
92.11.27(st.11)	119.5	14.0	168	14.0	92.8

평적 경계가 430 m 정도로 겨울철에 비해 약 1/5 정도 축소되고 수직적으로는 방류구로부터 9 m 높이까지만 하수장이 상승하게 됨에 따라 혼합회석이 매우 저조하다. 여름철 소조기의 회석률은 29정도로 겨울철에 비해 1/4 정도로 작다. 한편 대조시 최대유속의 경우에는 해저의 확산 관에서부터 수온약층 높이까지 전 층에 걸쳐 난류혼합이 활발하여 근역 하수장의 두께는 10 m 정도로 크고 수평적 확산 반폭은 90 m 정도로 좁다. 회석률은 120정도로 겨울철의 170에 비해 약 30% 정도 작으나 해수유동이 미약한 소조기의 여름철과 겨울철의 4배에 달하는 회석률 변화폭에 비해서는 훨씬 적게 나타났다.

가을철(11월)의 경우에는 겨울철(2월)과 마찬가지로 수온 약층이 없고, 전 수심에 걸쳐 수직적 등밀도혼합이 활발해져 방류하수의 부력저항에 의해 표층까지 상승하여 1 m 두께로 수평적으로 넓게 확산 이동됨을 보여주고 있다. 소조기의 경우에는 겨울철보다는 회석률이 약간 작은 110이며, 대조기의 경우에는 168로 겨울철과 거의 같은 회석률 값을 갖는다. 봄철(4월)과 초여름(6월)의 경우에는 대기 온도가 상승함에 따라 해수면의 표층에서부터 수온약층이 형성되기 시작하여 점차 수심 3~4 m 정도로 깊어지므로 하수플룸이 표층까지는 도달하지 못하고 수온약층에서 포착됨을 알 수 있다. 수온약층이 수심 3 m 정도에서 형성된 봄철 소조기의 경우 회석률이 70정도이며, 대조기의 경우에는 168로 수온약층이 없는 겨울철과 가을철의 회석률과 거의 같은 값을 갖는다. 수온약층이 수심 4 m 정도로 깊어진 초여름의 경우에는 소조기에는 회석률이 34정도로 봄철에 비해 절반으로 떨어지고 여름철과 거의 근사한 값을 갖는다. 한편 대조기에는 132정도로 봄철뿐만 아니라 가을철과 겨울철에 비해 30% 미만으로 낮으나 그 차이가

계절에 따른 회석률의 변화폭이 크지 않다.

Fig. 14는 방류수역에 인접한 두 관측지점인 정점 10과 정점 11에서 관측된 수온과 염분의 수직적 분포에서 구한  $\sigma_t$  를 각각 입력하여 소조와 대조시의 조류유속에 대한 방류하수의 근역회석률을 CORMIX 모형으로 계산한 결과를 보여주고 있다. 겨울(2월), 봄(4월), 초여름(6월), 여름(7월), 가을(11월)의 순으로 회석률의 계절별 변화를 보면 소조기의 약한 유속의 경우에는 겨울철에서 여름철까지는 약 1/4정도로 크게 감소하고, 가을철에는 겨울철보다는 약간 작으나 거의 같은 회석률을 보인다. 그러나 대조기의 강한 유속의 경우에는 겨울과 여름철의 두 회석률 사이의 차이가 30% 정도로 작다. 이는 방류수의 초기·혼합 회석 과정에서 밀도성층의 효과보다는 주변해수유동의 난류성분에 의해 더 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 사료된다. 본 연구의 회석률의 예상치가 김(1998)에 의해 예측되었던 미산만 수중방류시의 30~50의 범위의 회석률과는 상당히 큰 차이를 보이고 있는 이유는 김(1998)의 회석률 산정결



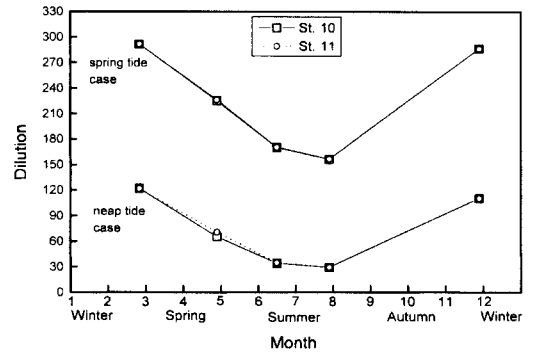
**Fig. 14.** Seasonal variations of dilution factors under the neap and spring tidal current conditions.

**Table 5.** Position, near-field dilution factors, thickness, half width of plume predicted by CORMIX for the spring tide case at the same plume position as the dilution factors were calculated for the neap tide case.

Date and station	Plume position		Dilution	Vertical thickness (m)	Horizontal half width (m)
	X (m)	Z (m)			
93.2.26(st.10)	2000.0	14.0	291	3.3	689.1
93.2.26(st.11)	2000.0	14.0	291	3.3	688.9
93.4.30(st.10)	638.7	14.0	225	5.9	292.9
93.4.30(st.11)	573.6	14.0	225	5.9	293.5
91.6.14(st.10)	434.7	11.0	170	5.2	245.6
91.6.14(st.11)	435.5	11.0	170	5.2	246.0
98.7.31(D10)	434.1	10.0	156	4.7	250.2
98.7.31(D13)	433.5	10.0	156	4.7	249.0
92.11.27(st.10)	1906.5	14.0	286	3.4	657.3
92.11.27(st.11)	1906.5	14.0	286	3.4	657.7

과는 CORMIX모형 이외의 다른 모형과의 비교를 위해 주변수와의 밀도관계 또는 주변수의 밀도성층에 의해 플룸이 포착되어 하수장이 가로흐름 방향으로 회전하면서 수직상향과 수평방향으로 확산되는 지점인 확산관에서 하류방향으로 10 m 이내에서의 희석률의 결과이고 본 연구에서 모의된 결과는 확산관에서 모형에서 정의하는 근역경계에서의 희석률이기 때문에 희석률의 결과가 상대적으로 크게 나타나게 되는데 이때의 확산관에서 근역경계의 거리는 계절별로 소조기에는 400~2000 m 범위까지 나타나며 (Table 3) 대조기에는 거의 일정하여 100 m 부근에서 희석률을 나타내고 있다(Table 4). 또한 본 연구에서는 희석률에 가장 큰 영향을 미치는 주변수의 속도를 실제적인 대조기와 소조기로 구분하여 모의하였으며 밀도성층도 계절별로 실질적인 성층화의 영향을 현장자료를 근거로 하여 모의한 결과이기 때문에 희석률의 산정결과에서 큰 차이를 보이고 있다.

일반적으로 하수 플룸의 수평적 근역경계거리는 소조기에 비해 대조기의 강한 유속으로 크게 축소되므로 소조기의 근역경계 거리(Table 3)에서와 같은 위치에서 구한 대조기 희석률은 Table 5에 있으며 소조기의 희석률과 함께 Fig. 15에서 상호 비교하였다. 이는 대조기에 모형에서 모의된 근역경계에서의 희석률을 무시하고 주변수에 의한 수동적인 난류확산과 조류에 의한 플룸 이동시의 희석률을 나타내고 있다. 따라서 소조기의 근역경계 거리와 유사한 거리에서 대조기 희석률 결과는 Fig. 2에서 정의된 원역희석률로 간주되며, 계절별 희석률의 변화 폭은 근역에서의 결과보다 크게 나타났다. 겨울과 여름의 희석률을 서로 상호 비교해보면 각각의 희석률이 290과 156으로 2배 정도로 그 차이가 크게 나타난다. 이는 여름철의 경우에는 하



**Fig. 15.** Seasonal variations of dilution factors under the spring tidal current conditions at the same near-field boundary of neap tidal case.

수플룸이 수온약층에 포착되어 난류확산에 의한 혼합희석이 겨울철에 비해 크게 약해진데 기인됨을 알 수 있다.

### 5. 결 론

국내에선 처음으로 1993년 11월부터 1차 처리수를 수중 다공확산관을 통해서 마산만에 방류하고 있는 마산·창원 하수종말처리장에 대한 수중방류 하수의 근역 희석률을 방류해역에서 실제 관측된 수온·염분 분포자료를 사용하여 CORMIX 모형으로 계산하였다. 이러한 결과를 통해 마산만 방류수역의 계절별 해양환경변화에 따른 방류하수의 희석률 변화에 대해서 비교 고찰하였다. 김(1998), 강·정(1998)에 의해서 당 처리시설의 단계별 확장계획에 나타난 설계조건을 토대로 COD 농도의 가중치를 CORMIX 모형의 수치실험결과로써 제시한 바 있으나 방류해역의 계절별 해양환경요인 변화에 따른 방류하수의 근역희석률 변

화에 대해서는 파악하지 못했다. 본 연구결과에서 나타난 바와 같이 해양수중방류하수의 근역회석률은 주변해수의 유동장과 밀도성층의 정도에 따라 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 해수유동이 미약한 소조기의 경우에는 계절별 회석을 변화 폭이 4배 정도나 크며 특히 여름철에는 겨울철에 비해 1/4 정도로 작다. 봄철의 대기온도 상승으로 수온약층이 해수면의 표층에서 형성되기 시작해서 점차 깊어져가는 봄철과 여름철 사이에는 근역회석률이 약 1/2 정도로 감소하는 차이를 보이고 있다. 이러한 회석을 감소는 방류하수에 포함된 오염물질이 여름철의 낮은 회석률로 인해 방류해역에 주로 남게되며 수질과 퇴적물 오염을 더욱 가중시키게 될 것이다. 이는 권·이(1998)에 의해 조사 보고된 방류해역의 오염진행추이를 수리역학적으로 설명할 수 있는 결과로 사료된다. 주변해수의 강한 유동장에 의해 하수장의 난류혼합이 활발한 대조기의 경우에는 계절별 회석을 변화폭의 차이가 최대 30% 정도로 크질 않았고, 특히 하계 성층시에는 대조기의 강한 유속으로 인해 저조시의 근역회석률보다 4배 정도로 큰 것으로 나타났다. 그러나 가을철과 겨울철의 경우 주변해수의 밀도가 수직적으로 등밀도 혼합층을 형성하고 있어 주변해수의 유속장 변화가 여름철에 비해 상대적으로 적게 영향을 받는 것으로 나타났다. 향후 실제해역에서 수중방류하수장의 확산이동 상황을 보다 정밀히 추적 모니터링 할 수 있는 음향탐지(acoustic monitoring) 등의 기술을 활용하여 방류수역의 해양환경요인 변화에 따른 근역회석을 변화에 대한 지속적인 연구조사가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 G-7 환경공학기술개발사업인 “해양방류관의 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, 정태성, 1998. 연안방류시설의 적정배치를 위한 해양환경공학적 고찰, 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 101-106.
- 강시환, 유승협, 오병철, 1999. 마산·창원 하수종말 처리장의 해양방류 처리수에 대한 초기·근역 회석연구, 한국해양환경공학회지(계제 예정).
- 건설교통부 부산권수도건설사무소, 1993. 마산/창원하수처리장 건설지.
- 김창시, 1998. 근역혼합모형을 이용한 해양방류 하수의 혼합특성 예측, 서울대학교 토목공학과 석사학위논문.
- 권영택, 이찬원, 1998. 하수종말처리장 처리수의 해양방류와 퇴적물의 중금속 오염, 한국해양환경공학회지, 1(1): 83-92.
- 마산시, 1996. 마산·창원 하수처리장 2차 확장사업 환경영향평가서.
- 서일원, 이재형, 김창시, 1998. 오염물질의 해양방류기술(IV); 하수확산관의 설계 및 시공, 한국수자원학회지, 31(4): 78-88.
- 채장원 등, 1999. 진해·마산만 수질환경 관리모형 개발(II), 한국해양연구소, BSPE 98703-01-1147-2.
- Akar, P.J. and Jirka, G.H., 1996. CORMIX2: An expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged multipoint diffuser discharges, *Tech. Report*, DeFrees Hydraulics Lab., School of Civil and Environmental Engrg., Cornell Univ., Ithaca, N.Y.
- Jirka, G.H. and Doneker, L.D., 1991. Hydrodynamic classification of submerged multipoint-diffuser discharges, *J. Hydraul. Engrg.*, 117(9), pp. 1113-1129.
- Fisher, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J. and Brooks, H., 1979. *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, New York, N.Y.
- Proni, J.R., Huang, H. and Dammann, W.P., 1994. Initial dilution of Southeast Florida ocean outfalls, *J. Hydraul. Engrg.*, 120(12), pp. 1409-1425.
- Proni, J.R. and Dammann, W.P., 1994. Worst case effluent discharge conditions and adaptive processing of effluents for Southeast Florida outfalls, *Proc. WEFTEC '95*, 4, pp. 147-157.
- 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. Hydraul. Div.*, ASCE, 115(1), pp. 1-70.
- Wood, I.R., Bell, R.G. and Wilkinson, D.L., 1993. *Ocean Disposal of Wastewater*, World Scientific, Singapore.

Received March 10, 1999

Accepted April 21, 1999