

마산·창원 하수종말 처리장의 해양방류 처리수에 대한 초기·근역 희석연구(II)

강시환⁽¹⁾, 유승협⁽²⁾, 오병철⁽¹⁾, 박광순⁽¹⁾

Initial and Near-Field Dilution at the Ocean Outfall of Masan-Changwon Municipal Wastewater Treatment Plant(II)

by

See Whan Kang⁽¹⁾, Sung-Hyup You⁽²⁾, Byung-Cheol Oh⁽¹⁾ and Kwang-Soon Park⁽¹⁾

요 약

1999년 2월에 관측한 수온 및 염분도 분포로부터 마산·창원 하수종말처리장의 해양 수중방류수에 대한 동계의 근역희석을 산정하였다. 소조기의 약한 주변유속과 수온약층에 의해 하수플룸이 포착되어 희석률이 30~40정도로 저조했던 하계의 경우와는 달리 동계 소조기의 경우에는 주변해수의 수직적 등밀도혼합이 전 층에서 형성되어 하수플룸이 수표면까지 상승하며 희석률도 90~130정도로 훨씬 큰 것으로 나타났다. CORMIX2 모형의 모의결과에서도 소조기의 약한 유속($U_a=6.0\text{cm/s}$)의 경우 동계 희석률이 하계 희석률보다 약 3배 정도 증가하였으며 대조기의 강한 유속($U_a=15.5\text{cm/s}$)의 경우에는 두 계절의 희석률 차이가 30%정도로 미미하였다. 이는 수중방류 하수의 근역희석 및 혼합과정이 주변해수의 밀도성층 효과보다는 유동성분에 더 큰 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다.

Abstract

The winter case of the near-field dilution at the Masan outfalls has been studied by field measurements and CORMIX model simulations. Dilution rates of the wastewater discharge in winter were obtained by a salinity deficit method using the field data observed in the neap tidal period of February, 1999. The observed dilution rates in winter season were found to be very high in the range of 90~130 due to the isopycnal mixing of ambient density compared with the summer range of 30~40 under weak neap tidal currents. The results of CORMIX model simulations also show that the winter dilution rates under a weak ambient current ($U_a=6.0\text{cm/s}$) were increased by 3-fold of the summer dilution rates. However, the difference between two seasons becomes small by 30% under a strong current ($U_a=15.5\text{cm/s}$). This result indicates that the dilution and hydrodynamic mixing process of the effluents are more influenced by ambient crossflow condition than by ambient density stratification at the outfalls site.

Keywords: dilution rates, Masan outfalls, near-field dilution, CORMIX model

(1) 정회원, 한국해양연구소

(2) 학생회원, 한양대학교

1. 서론

임해도시의 하수종말처리장에서 처리된 하수의 해양방류방식 중 수로를 이용하여 해안가에서 직접 표층 방류하는 방식은 경제적인 장점이 있지만 방류수의 혼합 및 희석과정이 유입수체에 존재하는 난류성분에 주로 의존하므로 희석효과가 매우 불량하고 해수욕장 등 연안지역의 해안에도 심미적인 악영향을 미치게 된다. 한편, 수중방류방식은 수심이 깊은 외해까지 나간 하·폐수가 다수의 방류공이 부착된 수중다공확산관(submerged multiport diffuser)을 통해 고속으로 방류되어 방류수가 지닌 운동량(momentum), 주변수와 방류수의 밀도차에 의한 부력(buoyancy) 및 해수유동장의 난류성분등이 상호 관련되어 방류수의 높은 희석과 분산을 유도시키게 된다. 따라서 선진국에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 하수종말처리장에서 방출되는 대용량의 처리수를 지하에 매설된 도수관(feeder pipe)을 통해 외해까지 하수를 끌고 나가 심해에서 방류하는 수중방류(submerged discharge)방식을 채택하고 있다(Wood *et al.*[1993]).

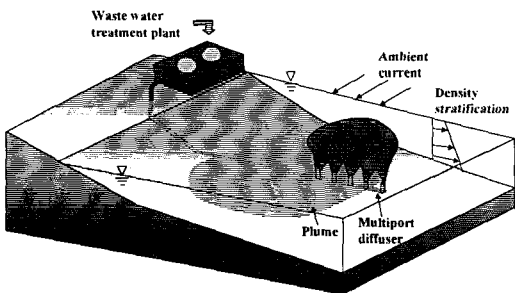


Fig. 1 Wastewater ocean outfalls system

외국의 경우 지난 30여 년간 환경친화적인 방류방식 및 구조물배치, 방류위치 선정에 대한 연구개발을 지속적으로 수행해 오고 있다. 이는 연안 생태계 피해를 최소화하는 동시에 방류수역의 심미적 가치를 높여 연안해역의 이용도를 극대화하려는 목적이 있다. 이를 위해서는 첫째 방류수의 희석·혼합을 최대화 할 수 있는 방류지점의 선정과 최적 방류구조물의 설계가 필요하다. 두 번째는 하수처리장의 하수처리수준을 고려하여야 하고 세 번째는 하수처리장으로 차집되는 하수에 포함된 오염물질을 제한하는 원천 억제(source control)방법 등을 고려하여 설계하여야 한다. Fig. 2에는 도시하수종말처리장(POTW: Public Owned Treatment Works)의 해양방류시설 설계시 고려

되어야 할 사항들을 도시하였다(NRC[1993]).

우리 나라의 대표적인 해양 수중방류시설은 1993년 11월에 처음 방류를 시작한 마산/창원 하수종말처리장을 비롯하여 울산만에 형성된 공업단지에서 배출되는 하수의 효율적인 처리를 위해 1995년에 준공된 용연(울산) 하수처리장과 1997년에 준공된 온산 하수처리장이 있으며 최근에 방류를 시작한 속초 하수처리장이 있다(강 등[1999b]).

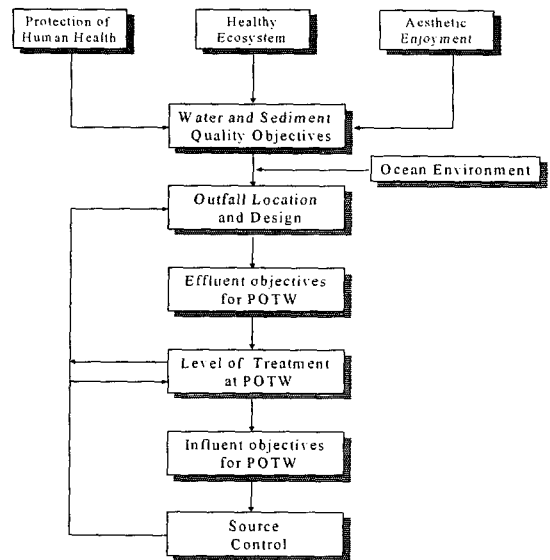


Fig. 2 Overview of water and sediment quality driven approach for design of municipal wastewater disposal system

본 논문의 연구대상인 마산/창원 하수종말처리장은 마산만과 진해만의 수질오염 문제를 해소하기 위한 대책으로 마산시와 창원시에서 발생하는 도시하수와 공장폐수를 차집하여 하수처리용량 280,000m³/일 규모의 1차 처리시설을 갖춘 하수처리장과 차집관거 공사가 1993년 11월에 완공됨에 따라 경상남도 창원군 구산면 옥계리 해안에서 약 680m 거리의 수심 14m 수중에서 총 길이 210m 인 수중다공확산관을 통해 해양방류를 시행하고 있다(Fig. 3).

본 논문에서는 앞서 발표된 논문(강 등[1999a])에 이어 1998년도 하계관측의 동일 정점에 대해 1999년 동계에 측정된 수온과 염분도 자료를 이용하여 방류수의 동계 현장희석률을 산정하였다. 이 결과는 수온과 염분도의 동계 실측자료를 입력해 모의한 CORMIX2 모형의 희석률 모의결과와

비교하였으며, 하계의 근역희석을 결과와도 상호 비교하였다.

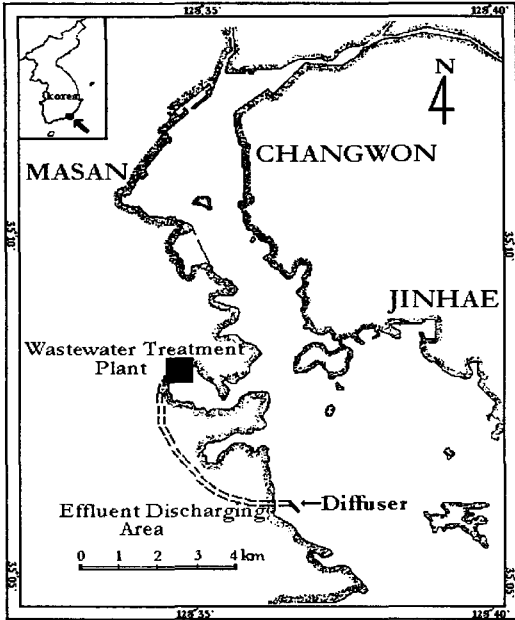


Fig. 3 Site map of the submerged ocean outfalls of Masan-Changwon wastewater treatment plant

2. 수중방류수의 근역 혼합거동

수중방류수의 혼합과정은 크게 두 가지 혼합구간으로 구분할 수가 있다. 첫 번째 구간은 초기 제트(jet)의 운동량 흐름률(momentum flux), 부력 흐름률(buoyancy flux), 방류조건이 제트의 궤적과 혼합에 영향을 미치는 구간으로서 이 구간을 근역(near-field)이라 한다. 방류된 하수가 방류지점에서 멀어지면서 초기 방류특성의 영향이 점차 줄어들게 되고 오히려 주변해수의 난류특성과 유속 및 밀도성층 구조가 방류수의 부력확장(buoyant spreading)과 수동적 확산(passive diffusion)을 일으켜 플룸의 혼합거동에 영향을 미치게 된다. 이 구간을 원역(far-field)이라고 일반적으로 정의한다(Roberts *et al.*[1989]).

Fig. 4는 근역혼합 해역에서 형성된 하수장(wastefields)의 모습을 개략적으로 표현한 것이다. 여기서 하수장의 특성을 정의하는 인자로는 X_i (근역구간 거리), Z_e (상단 하수장 높이), Z_m (희

석률이 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 (해저로부터 수표면의 높이) 등이 있다. X_i 의 거리, 즉 근역끝에서의 희석률을 초기희석률(initial dilution)이라고 하며 어떻게 하면 주어진 해양환경조건에 대해서 초기희석률을 최대한으로 높일 수 있는가 하는 문제가 해양방류기술 연구개발의 핵심 사안이라고 할 수 있다.

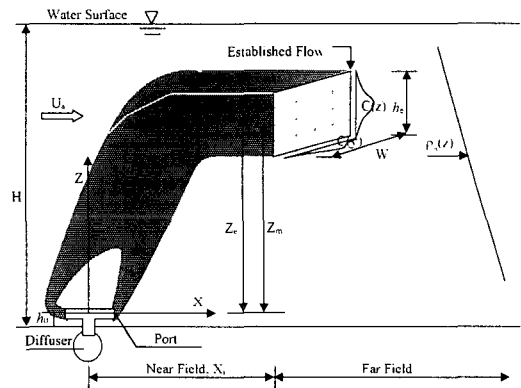


Fig. 4 Schematic of wastefields discharged from a submerged diffuser

근역혼합과정(near-field mixing process)은 크게 수중 부력제트 혼합(submerged buoyant jet mixing)과 방류수역의 경계면 상호작용(boundary interaction)으로 구분할 수 있다. 그리고 방류구에서의 방류 유속특성에 따라 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.

Fig. 5에서는 방류수역의 해류와 밀도성층에 따른 부력제트의 거동양상(Jirka *et al.*[1996])을 보여주고 있는데, 부력제트의 혼합은 주로 주변수의 유속과 밀도성층에 의해 영향을 받게 된다. 주변 유속에 의해 부력제트는 해류방향으로 기울어지고 추가적인 혼합이 이루어지며(Fig. 5(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. 5(c)). 다공확산관(multi-

port diffuser)의 경우 각 방류공에서 방류된 원형 부력제트가 서로의 상호작용 없이 각각의 흐름을 지나다가 방류공에서 일정한 거리가 지난 후에 병합(merging)이 일어나게 된다(Fig. 5(d)).

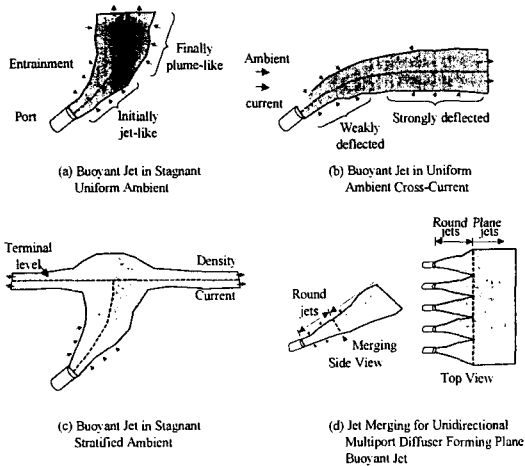


Fig. 5 Typical buoyant jet mixing flow pattern under different ambient conditions

방류수역의 경계면은 수표면 및 수계 바닥과 더불어 수층의 밀도가 급격히 변하는 수온약층(thermocline)을 내부경계면으로 볼 수 있다. 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]).

3. 마산만 수중방류시설의 동계 희석률 관측

3.1 현장 관측

마산만 하수종말처리장 방류구 주변의 수온 및 염분도 관측지점은 Fig. 6과 같다. 마산만의 조류가 약한 저조시인 1999년 2월23일에 수행된 동계관측에서는 CTD(Conductivity-Temperature-Depth)를 하강, 상승시키면서 오전과 오후로 나누어서 측정하였다. 현장희석률을 산정하기 위해 방류구 주변의 측정지역을 격자로 계획하여 측정을 수행하였으며 정점사이의 거리는 약 400m 로 설정하였다. 방류관이 설치되어 있는 곳인 정점 9를 중심으로 총 16개의 관측정점의 위치를 정하고 현장

에서 GPS(Global Positioning System)를 이용해 위치를 파악하였다. 관측 시간은 오전 8시14분부터 10시10분, 오후에는 12시38분부터 14시47분까지 관측하였다.

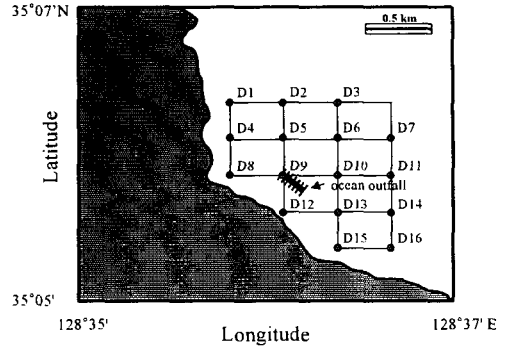


Fig. 6 Station map of field measurement at the Masan outfall

Fig. 7은 1999년 2월에 측정된 동계의 염분 및 수온자료이다. 동계의 경우 하계 때와는 달리 수온약층이 소멸하고 표층과 저층의 염분도와 수온이 전 수심에 걸쳐 일정한 양상을 보이고 있다. 측정된 수온은 약 7°C에서 일정하며 염분도의 경우 32~33‰의 범위에서 거의 변화가 없이 나타났다.

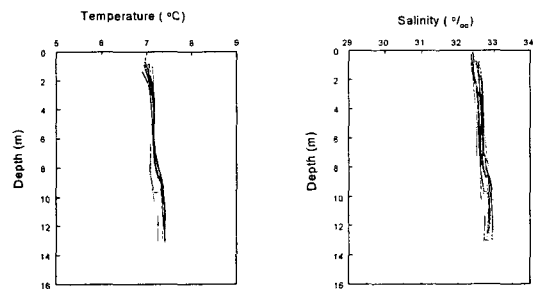


Fig. 7 Temperature and salinity profiles measured at the Masan outfall in winter

3.2 염분도를 이용한 희석률 계산

염분도를 통한 희석률 계산은 CTD(conductivity-temperature-depth)를 통해 온도와 염분도의 수평·수직분포를 측정된 후 염분도 부족(salinity

deficit) 정도를 분석하여 초기희석률을 구한다(Tsai and Proni[1997]). 염분도를 통한 희석률 계산은 염료를 이용한 계산방법과 함께 가장 경제적으로 희석률을 계산할 수 있는 방법이며 염분도를 고려한 초기희석률을 계산하는 식은 다음과 같다(Proni *et al.*[1994]).

$$D_m = \frac{S_{ac} - S_e}{S_{ac} - S_m} = \frac{\Delta S_e}{\Delta S_m} \quad (1)$$

여기서 D_m 은 초기희석률(initial dilution), S_{ac} 는 주변수 염분도(characteristic ambient salinity), S_m 는 최소 염분도(minimum salinity), S_e 는 방류수 염분도(effluent salinity), ΔS_m 는 최대 염분도 부족(maximum salinity deficit), ΔS_e 는 방류수의 염분도 부족(salinity deficit in effluent)이다. 각 정점에서의 깊이별 염분도를 통해 희석률을 산정하기 위해 각 정점의 수심별 염분도의 수평적인 분포 특성을 중별 등염분선(isohaline)을 시행하였다. Fig. 8에는 마산만 방류수역에서 동계에 측정되었던 표층에서의 오전과 오후의 등염분선을 나타내었다.

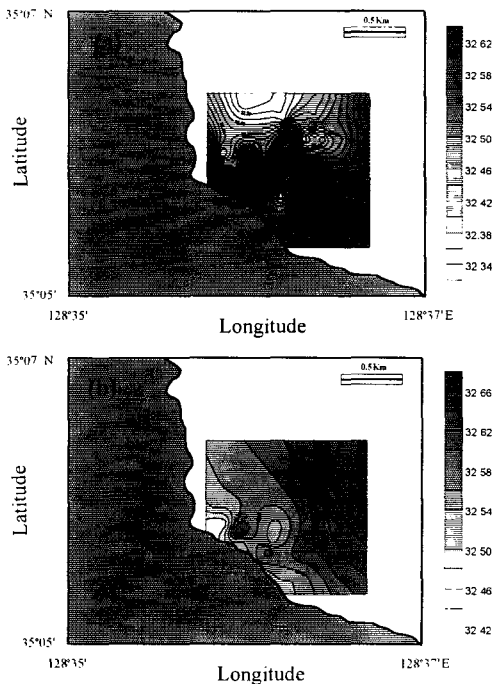


Fig. 8 Isohaline contours of salinity field data at the 1m depth of the Masan outfall area in winter [(a)Morning, (b)Afternoon]

Table 1에는 염분도 분포로부터 계산된 수표면 근처의 희석률을 산정하여 나타내었다. 깊이별 등염분선을 분석하여 최대염분도를 주변해수의 염분도로 보고 담수가 방류되어 주변 해수의 염분도에 영향을 미쳤다는 가정하에서 최소 염분도를 구하여 식(1)으로써 희석률을 계산하였다.

Table 1 Dilutions obtained from salinity data in winter

Depth	Winter	
	Morning	Afternoon
0~1m	108	136
1~2m	96	181
≥2m	125	204

동계 때의 현장희석률은 오전에 96~125 정도의 희석률을 나타냈으며 오후의 경우는 희석률이 증가한 것으로 나타났는데 136~204 정도의 희석률을 나타내었다. 오후의 수심 1m 이하에서의 180이상의 희석률이 다른 수심에 비해 높게 나타나는 데 이는 CTD를 통한 염분도 측정의 오류이거나 400m 격자로 설정된 정점을 이동시 현장의 많은 제약으로 인해 정확한 위치선정의 어려움 또한 현장희석률 산정에 오류를 범할 수 있을 것으로 본다.

4. CORMIX2 모형에 의한 희석률 계산

4.1 CORMIX 모형입력

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 길이축척모형이다(Akar and Jirka[1996]).

본 연구에서 사용된 CORMIX2 모형은 오염물질이 다공확산관을 통하여 수중으로 방류되는 경우에 혼합현상을 해석하고 초기희석률을 구하기 위한 수치계산모형이며, Fig. 9는 CORMIX2 모형의 다공확산관 배치조건에 따른 입력파라미터를 도시해 놓은 것이다(Jirka and Akar[1991]).

입력자료는 확산관의 특성, 방류수역의 수리학적 자료, 방류수의 특성 자료 등이다. 확산관의 특

성에는 확산관 길이(L_D), 확산관 축에 대한 방류각도(β), 해류에 대한 방류각도(σ), 해류에 대한 확산관 축의 방향(γ), 수평면에 대한 방류공의 방류각도(θ), 해안선으로부터의 확산관 거리(DISTB), 방류관 직경(D), 방류관 높이(h_0) 등이 있다. 방류수역의 수리학적 자료에는 조류의 속도(U_a), 방류수심(HD), 방류해역의 폭(BS), 밀도 분포 등이 있으며 방류수의 특성에는 방류수의 밀도($\Delta \rho_0$), 농도(C_0), 방류유속(u_0) 등을 입력하게 된다.

CORMIX2 모형은 거의 모든 수계에 적용이 가능하나 적용 해역의 단면과 수심을 일정하게 가정해야 하고 밀도분포 고려시 실제 관측치를 모형에서 정의하는 세 가지 형태로 근사값을 취하게 된다(Jirka *et al.*[1996]). 주변 해류유속은 전 수심에 걸쳐 평균된 값을 입력하게 되므로 유속의 수층변화가 심한 해역의 경우 모형 적용에 실효성이 감소된다.

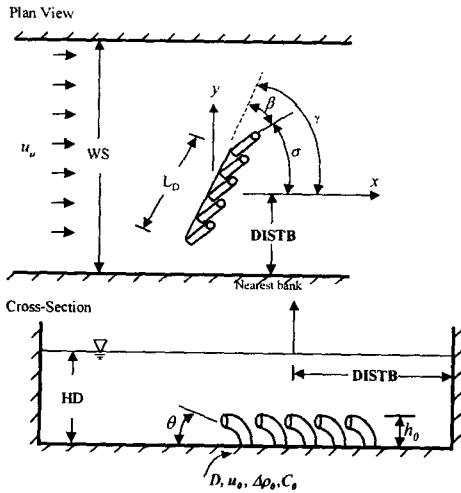


Fig. 9 Definition diagram for CORMIX2

마산만의 마산/창원 하수처리장 건설지(건설교통부[1993])에 의하면 마산/창원 하수처리장의 도수관은 해안에서 약 680m 떨어진 해역의 확산관까지 해서 2.0m 지점에 매설되어 있고, 확산관의 길이는 210m 이다. 확산관에는 21개의 연직유도관이 해저면에서 0.8m 높이까지 돌출되어 있으며, 각 연직유도관의 상단에는 4개씩의 방류공이 수평 방류하도록 부착되어 있다. 도수관 및 확산관의 직경은 2m 이고, 연직유도관은 1.35m, 방류

공의 직경은 각각 0.2m이다.

동계에 측정된 방류수역의 해양환경특성 중 하계와 가장 큰 차이를 보이는 것이 방류수역의 밀도분포이다. 밀도분포의 경우 하계에 입력된 수온약층으로 인한 이층구조의 밀도분포 대신 선형적인 변화를 보이는 밀도분포를 하계 때와 마찬가지로 오전과 오후로 나누어서 입력하였다 (Fig. 10). 해류속도의 경우 Fig. 11에 나타난 방류구 인접지역에서 측정된 수심 5m에서의 유속자료중 소조기의 6.0cm/s를 평균유속으로 입력하였다. 방류유량은 2.315m³/s, 방류수의 밀도는 999.96kg/m³로 입력하였다. Table 2에는 모형의 입력자료를 나타내었다.

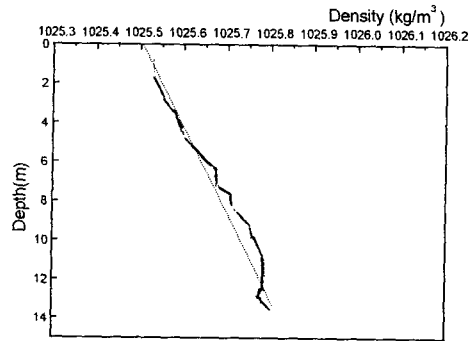


Fig. 10 Density profile input of CORMIX2 model simulations at the Masan outfall site in winter

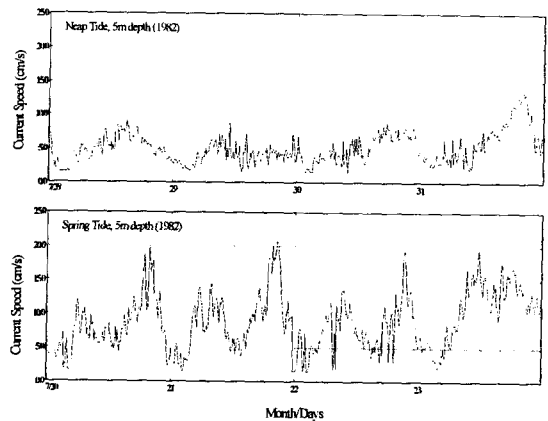


Fig. 11 Ocean currents measured during the neap and spring tidal periods

Table 2 Input data of CORMIX2 model simulations for the Masan outfall in winter

Model parameters	Input data
water body	unbounded
Manning's factor	0.030
ambient velocity	6.0cm/s(Neap tide) 15.5cm/s(Spring tide)
nearest bank	right
distance from bank to diffuser	680m
port number	84
port diameter	0.2m
port height	0.8m
effluent density	999.96 kg/m ³
flow rate	2.315 m ³ /s

4.2 현장관측 결과비교

동계의 주변유속이 약한 소조기에 관측된 자료를 입력하여 모형으로 모의된 플룸의 양상을 Fig. 12에 나타내었다. 플룸의 중심위치로부터 X성분은 해안선과 평행한 상·하류방향이며 Y성분은 해안선과 직각인 방향인 방향을 나타낸다. Z성분은 해저의 확산관 위치를 기점으로 상승한 플룸의 중앙선 위치를 나타낸 것이다. 모형에서 정의하는 근역 회석률을 S로 나타내었다. 동계의 경우 수표면에 도달한 플룸이 횡방향으로 넓게 퍼지는 양상을 보이고 있다.

동계에 모의된 플룸의 특성 및 근역에서의 회석률을 Table 3에 나타내었다. 동계의 모의된 결과를 보면 상층과 저층의 밀도의 차이가 거의 나타나지 않는 동계의 방류수역의 특성으로 인해 방류된 플룸이 수표면까지 도달하는 결과를 나타냈다. 회석률은 오전의 경우 86~87정도로 모의되었으며 오후의 경우 90~91정도의 회석률을 나타내어 오후의 회석률이 오전보다 약간 크게 나타났다. 이는 앞에서 산정한 현장회석률이 오전보다는 오후에 높게 나타난 것과 동일한 결과이다. 회석률이 거의 일정한 값들을 유지하는 것은 동계의 경우 수온 및 염분자료의 수직분포 관측치가 정점마다 거의 일정하여 방류수역의 밀도분포의 입력자료가 거의 동일하기 때문인 것으로 사료된다.

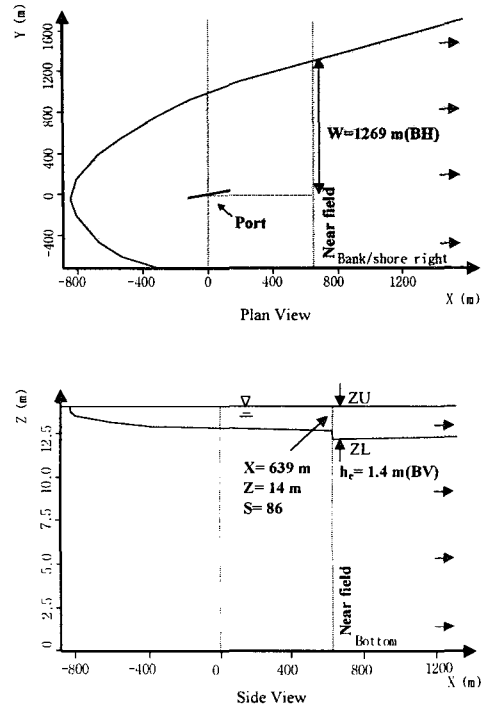


Fig. 12 CORMIX2 prediction of the wastefield transport at the Masan outfall in winter

Table 3 Characteristics of plume and near-field dilution factors predicted by CORMIX2 in winter

Time	Station	Plume position		Dilution	BV	BH	ZU	ZL	Cumulative time	
		X(m)	Z(m)						sec	hrs
Morning	D05	639.7	14.0	86	1.4	1269.9	14.0	12.6	10616	2.9
	D06	642.1	14.0	86	1.4	1274.8	14.0	12.6	10657	2.9
	D09	642.3	14.0	87	1.4	1275.3	14.0	12.6	10661	2.9
	D10	642.9	14.0	86	1.4	1276.4	14.0	12.6	10670	2.9
	D13	643.5	14.0	87	1.4	1277.8	14.0	12.6	10681	2.9
Afternoon	D05	644.0	14.0	90	1.5	1273.3	14.0	12.5	10650	2.9
	D06	645.2	14.0	90	1.4	1275.7	14.0	12.6	10670	2.9
	D09	644.1	14.0	90	1.4	1273.5	14.0	12.6	10652	2.9
	D10	644.3	14.0	91	1.4	1273.9	14.0	12.6	10655	2.9
	D13	644.2	14.0	91	1.4	1273.8	14.0	12.6	10655	2.9

모형에서 정의된 근역구간의 거리는 639~645m 이고, 방류된 하수의 수표면에서의 수직 두께는 1.4m의 하수장이 형성되는 것으로 나타났으며 수평확산폭은 1269~1277m로 모의되었다. 방류후 상승한 플룸의 상단높이는 플룸이 수표면까지 도달하는 14m이고 하단의 높이는 12.6m으로 나타났다. 모형이 정의하는 근역구간경계까지 하수장이 도달하는 시간은 3시간 정도가 되었다.

Fig. 13에서는 미국 Miami의 수중다공확산관으로부터 해양방류된 하수의 초기희석률과 플룸의 이동확산 경로를 추적하기 위한 SEFLOE II (Southeast Florida Ocean Outfall Experiment, 1991-1994) 실험(Proni and Dammann[1994])의 결과와 본 논문의 연구지역인 마산만 방류시설의 동계의 희석률 산정 결과를 함께 비교하였다. SEFLOE II 결과에서는 CORMIX2 모형에 의한 예측결과가 현장관측 희석률 값보다는 상당히 높고 넓게 퍼져 있는 양상을 보이고 있으며 본 연구의 결과에서는 현장희석률이 모형결과보다 높게 나타나고 있다. 이는 SEFLOE II의 현장희석률은 boil(수표면에 도달한 수중방류 하수장)을 추적하면서 염분도 변화 자료를 통해 추정하였고 본 논문의 경우 방류구 인접지역에 동일간격의 격자를 설정하여 염분도 변화를 측정하였기 때문에 나타난 현장관측방법의 차이로 생각된다. 특히 오후의 경우 현장희석률이 크게 나타난 이유는 이동관측 중에 주변해류 유속의 증가에 따른 결과로 사료된다.

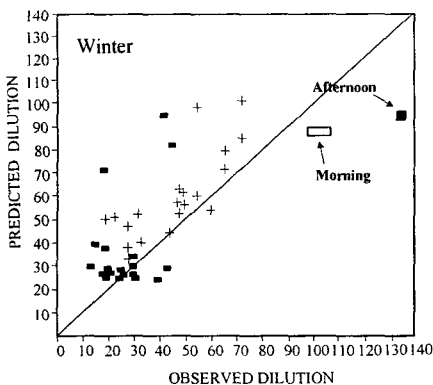


Fig. 13 Comparisons of the Masan outfalls' dilutions with Miami outfalls' results

4.3 하계와 동계의 모의결과 고찰

마산만 해양방류수역의 하계 및 동계의 희석률을

방류구 인접지역에서 관측된 수온 및 염분도 자료를 바탕으로 소조기와 대조기로 구분하여 모의하였다. 해류속도는 방류인접지역에서 측정된 수심 5m에서의 유속자료중 소조기를 6.0cm/s, 대조기를 15.5cm/s를 평균유속으로 정하여 모의하였다 (Fig. 11). 방류밀도는 하계의 경우 995.67kg/m³, 동계의 경우 999.96kg/m³로 방류유량은 2.315m³/s로 균일하게 모의하였다. Table 4에는 방류구위치의 정점 9에서 관측된 수온과 염분의 수직적 분포에서 구한 sigma-t(σ_t)를 입력하여 소조기와 대조기의 해류유속에 대한 근역희석률의 모의결과를 나타내었다.

Table 4 Characteristics of plume and near-field dilution factors predicted by CORMIX2 for the neap and spring tide case

Season	Tidal Currents	Plume position		Dilution	BV	BH	ZU	ZL
		X(m)	Z(m)					
Summer	Neap (0.06m/s)	195.4	8.3	29	1.5	387.0	9.1	7.6
	Spring (0.155m/s)	102.3	10.0	120	10.0	91.5	10.5	0.5
Winter	Neap (0.06m/s)	644.1	14.0	90	1.4	1273.5	14.0	12.6
	Spring (0.155m/s)	120.4	14.0	168	14.0	92.3	14.0	0.0

Fig. 14에는 하계와 동계에 모의된 대조기의 하수장 이송양상을 나타내었다. 하계의 모의결과를 보면 수온약층이 형성된 수심 6m 내외에서 하수장이 포착되었다. 하계 소조기의 약한 유속의 경우 1.5m 두께의 하수장이 수온약층에 포착되어 희석률이 29정도로 저조하였으나, 대조기의 강한 유속의 경우에는 하수장의 두께가 10m로 증가되면서 희석률도 120정도로 증가하였다. Fig 14(a)에 나타난 바와 같이 하수장이 수온약층 위로는 상승하지 못하는 양상을 보였다.

동계의 경우 주변해수의 유속이 거의 정체된 소조기의 경우 Fig. 12에 나타난 바와 같이 방류수의 부력제트에 의해 수표면까지 하수장이 상승하여 확산하는 양상을 나타낸다. 수평적 확산폭도 1000m 이상으로 넓게 퍼지는 양상을 보이고 있으

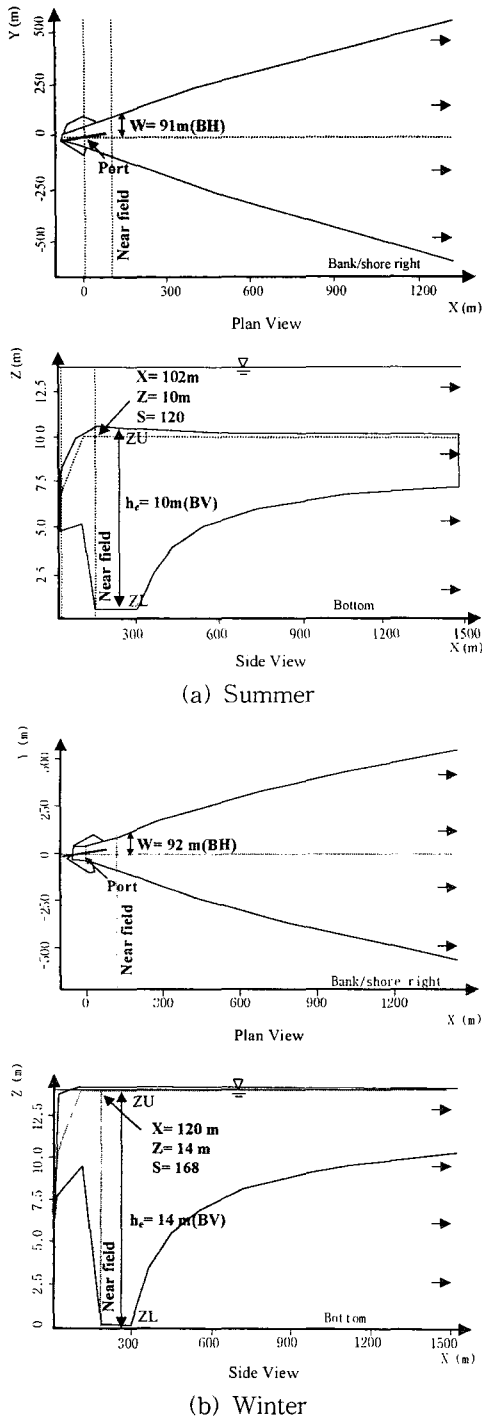


Fig. 14 CORMIX2 prediction of the wastefield transport for the spring tide case ($U_a = 15.5 \text{ cm/s}$) at the Masan outfall

며 회석률은 90정도로 나타났다. Fig. 14(b)의 대조기에는 수평적 확산폭이 92m 정도로 크게 축소되나 강한 난류성분으로 인해 하수장이 전 수심에 걸쳐 혼합되기 때문에 회석률은 168 정도로 크게 증가하였다.

5. 결론

국내에서 최초로 수중다공확산관을 통해 약 $200,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 의 1차처리 하수를 방류하고 있는 마산·창원 하수종말처리장의 초기·근역 회석률을 하계와 동계의 실제 현장관측자료를 통해 회석률을 산정하였고 CORMIX2 모형으로 비교 고찰하였다. 강 등[1999a]에 의해 산정된 하계의 초기·근역 회석률은 30~40 정도로 매우 낮아 방류수의 오염물질에 의한 마산만 방류수역의 오염이 가중될 수 있음을 보여주었다. 특히 하계의 밀도성층에 따른 하수장의 회석과 확산범위가 크게 제한 받기 때문에 방류수의 오염물질로 인해 방류수역 주변의 수질과 퇴적물 오염을 더욱 가중시키게 될 것이다.

동계의 경우 하계조사와 동일한 정점에서 관측된 수온과 염분도분포를 통한 현장회석률 산정에서는 하계시의 30~40 값보다 높은 96~136 정도의 회석률을 나타내었으며 모형의 결과 또한 86~91 정도의 회석률 모의결과를 나타내었다. 동계시에는 주변해역의 밀도분포가 수직적인 등밀도 혼합을 이루고 있어 주변해수의 유속장 변화에 대해 상대적으로 영향이 적음을 알 수 있다. 동계와 하계에 관측된 수온과 염분도 자료를 바탕으로 소조기와 대조기에 대한 모의에서는 소조기의 약한 유속의 경우 동계의 회석률이 하계보다 70% 정도 크나, 대조기의 경우에는 두 계절간의 회석률 차이가 30% 정도로 작았다. 이는 동계와 하계의 계절별 해양환경요인의 변화에 따라 회석률이 크게 변하고 있고 특히 주변해역의 유동장과 밀도성층의 정도에 따라 근역회석률이 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

현장회석률의 산정시 염분도를 통한 방법과 함께 염료를 이용한 회석률 산정의 방법도 같이 병행하는 것이 좀더 정확한 현장회석률 산정에 도움을 줄 것으로 생각된다. 또한 본 연구의 동계 및 하계의 현장관측 시점이 소조시의 약한 유속의 영향을 받고 있는 점을 감안하면 주변해수의 흐름이 강하고 난류에 의한 혼합회석과 횡방향 부력확장이 큰 경우에 대한 조사연구가 향후 수행되어야 할 것이다.

후기

본 연구는 환경부의 G-7 환경공학기술개발사업인 “해양방류관의 적정배치를 위한 실용화 기술개발” 사업의 일환으로 수행되었으며, 연구 지원에 도움을 주신 국립환경연구원 홍길표 전문위원님께 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] 강시환, 유승협, 오병철, 1999a, “마산·창원 하수종말처리장의 해양방류처리수에 대한 초기·근역 희석연구(Ⅰ)”, 한국해양환경공학회지, 2(2), 66-69.
- [2] 강시환, 오병철, 서일원, 1999b, “임해도시 하수처리장의 해양방류시설에 대한 고찰”, 한국해양환경공학회 추계학술대회논문집, 67-72.
- [3] 건설교통부 부산권수도건설사무소, 1993, 마산/창원하수처리장 건설지.
- [4] 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 Laboratory, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, N.Y.
- [5] Jirka, G.H., and Harleman, D.R.F., 1979, “Stability and mixing of a vertical plane buoyant jet in confined depth”, J. Fluid Mech., Vol. 94, No. 2, 275-304.
- [6] Jirka, G.H. and Akar, P.J., 1991, “Hydrodynamic classification of submerged multipoint-diffuser discharges”, J. Hyd. Eng., Vol. 117, No. 9, 1113-1129.
- [7] 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.
- [8] Tsai, J.J., and Proni, J.R., 1997, “Initial and near-field subsequent dilution at the key west outfall”, NOAA, Proc. WEFTEC'95, Vol. 4, 139-146.
- [9] Proni, J.R., Huang, H. and Dammann, W.P., 1994, “Initial dilution of Southeast Florida ocean outfalls”, J. Hyd. Eng., Vol. 120, No. 12, 1409-1425.
- [10] 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, Vol. 4, 147-157.
- [11] National Research Council(NRC), 1993, *Managing Wastewater in Coastal Urban Areas*, National Academy Press, Washington D.C. 231-294
- [12] 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. Hyd. Div., ASCE, Vol. 115, No. 1, 1-70.
- [13] Wood, I.R., Bell, R.G. and Wilkinson, D.L., 1993, *Ocean Disposal Wastewater*, World Scientific, Singapore.