

論 文

도시 하수의 해양방류 및 근역혼합특성 분석

김 강 민* · 김 지 연* · 이 중 우**

Analysis of Ocean Discharges of Municipal Water and its Near-Field Mixing Characteristics

K. M. Kim · J. Y. Kim · J. W. Lee

Key Words : 해양 방류(Ocean Discharges), 코넬혼합역전문가시스템(CORMIX, Cornell Mixing Zone Expert System), 희석(Dilution), 혼합특성(Mixing Characteristic), 방류시스템(Outfall System), 근역(Near-field Region)

Abstract

The amount of municipal water has been increased rapidly up to now and it is necessary to treat and dispose the wastewater effectively. The recent trend of the effluent disposal system, after treatment, show a nearshore discharge which has an outfall with length somewhere between the shoreline discharge and an extended deepwater outfall. There is no universal solution to municipal water treatment and disposal and each case must be examined on its merits and on economic, technical and environmental bases.

In this study we focused mostly on the scientific and engineering aspects of ocean disposal through the outfall. For this purpose, we made an investigation to the near-field characteristics of discharged water. We adopted CORMIX model for the analysis of the near-field behavior of discharged water and made some comparison with the existing experimental results.

We also applied it to the Pusan Jungang Effluent Outfall System, which is planned to build in the Gamchun harbour and will be completed in 2011. The model output showed the trajectorial variation of dilution and mixing behavior for three cases of outfall system. Dilution differences have been simulated and found the highest dilution condition under the different displacement of outfall system. On the basis of these outputs it will be proposed the optimum outfall system type and location.

* 정회원, 한국해양대학교 대학원 토목환경공학과

** 정회원, 한국해양대학교 토목환경공학부 교수

1. 서 론

선박 및 해상의 오염물뿐만 아니라 도시하수의 최종착지인 우리의 해역은 여러 측면에서 보호되어야 한다. 특히 최근의 무분별한 연안역 및 항만의 개발로 인해 해수유통구간이 더욱 좁아짐에 따라 증가한 오염물투기량과 더불어 제어에 더욱 더 어려움을 겪고 있다. 우리나라와 같은 해양국가에서는 연안역 개발시 지속적인 수질의 유지를 위해 합리적인 방류방안이 더욱더 시급하다. 하 · 폐수의 해양방류는 방류수역의 주변환경특성을 이용하여 방류초기에 방류수를 최대로 희석 · 분산시켜서 고농도 오염물질로 인한 악영향을 최소화시키는 데 그 의의가 있으며(이, 1999), 본 연구에서는 하수 처리방안의 하나인 하수 확산관을 통한 도시하수방류의 초기 희석과 오염물 거동에 관한 하수의 혼합특성을 예측하고 주변 해역에 미칠 환경영향을 검토한다. 또한 본 연구의 결과는 광역 2차원 수심평균 유동장에서의 확산 모델에 도입하여 보다 현실적인 거동을 파악하는데 이용할 수 있을 것이다.

적용모델은 미국 환경청(U.S. EPA)에서 제공되는 근역혼합모델인 CORMIX 모델로서 오염물질과 독성 오염물질의 초기혼합 및 희석과정을 모의하도록 개발된 전문가시스템(Expert system)이다.(Jirka 등, 1996).

2. 기초이론

2.1 단일제트 이론

단일제트(single jet)를 수중에 방류할 때 주변수와의 밀도차, 온도차 등에 의해 부력효과를 받는 경우는 부력제트(buoyant jet or forced plume), 주변수체와 부력의 차이가 없는 경우는 완전제트(pure jet)라 한다. Fig.1과 같이 초기흐름확립구간(initial zone of flow establishment)이후에는 제트

케적이 자기상사성을 가지며, 속도, 밀도손실, 질량의 분포가 다음과 같은 Gaussian 분포를 따른다.

$$U = U_m e^{-\left(\frac{r}{b}\right)^2} \tag{1}$$

$$\rho_a - \rho = (\rho_a - \rho_m) e^{-\left(\frac{r}{\lambda b}\right)^2} \tag{2}$$

$$C = C_m e^{-\left(\frac{r}{\lambda b}\right)^2} \tag{3}$$

단, U 는 종방향 유속, U_m 은 제트의 케적중앙의 종방향유속, b 는 제트 유효폭, ρ_a 는 주변수 밀도, ρ , ρ_m 은 제트 밀도 및 제트의 케적중앙 밀도, λ 는 유속과 질량사이의 퍼짐율(spreading ratio), C , C_m 은 방류물질의 농도 및 제트의 케적 중앙 농도 등이다(Fischer 등, 1979).

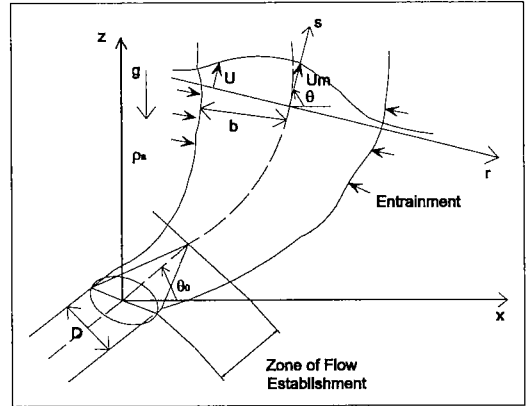


Fig. 1 Schematics of a round buoyant jet

종방향에 대한 체적플럭스(volume flux)는 다음과 같다.

$$Q = 2\pi \int_0^\infty U dr = \pi U_m b^2 \tag{4}$$

Morton 등(1956)에 의하면 제트 유효폭 b 와 횡방향 유속 v_e , 제트 중앙의 평균유속 U_m 은

$v_e = -\alpha U_m$ 와 같은 관계가 있다. 이 때, α 는 연행계수(entrainment coefficient)이며, 종방향의 체적플럭스의 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{dQ}{ds} = 2\pi b \alpha U_m \quad (5)$$

연행계수는 실험을 통해 얻어지는데, 국부 Froude수, F_L 의 함수로 표현된다.(Albertson 등, 1950; Hirst, 1971).

$$F_L = \frac{U_m}{\left(\frac{\rho_a - \rho_m}{\rho} gb\right)^{1/2}} \quad (6)$$

Fox(1970)는 연직방향으로 방류시 연행계수를 식 (7)로, Hirst(1971)는 Fox의 이론을 확장하여 일정한 각으로 방류할 때의 연행계수를 식 (8)로 표현하였다.

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\alpha_2[\lambda]}{F_L^2} \quad (7)$$

$$\alpha = \alpha_1 + \frac{\alpha_2[\lambda]}{F_L^2} \sin \theta \quad (8)$$

단, θ 는 제트 궤적이 수평면과 이루는 각이다 (Fischer 등, 1979 ; Wood 등, 1993).

2.2 다공제트 이론

방류공 직경 D , 초기방류유속 U_0 , 방류공 간격 l 인 다공확산관의 경우에 천이구간의 외곽부터는 슬롯제트(slot jet)와 같은 거동을 보이며, 무한수체에 방류되는 원형제트의 경우에 유속분포는 축대칭을 이루는 Gaussian분포를 따른다(Wood 등, 1993).

$$u(x, y, z) = U(z) \frac{\exp(-y^2/b)}{\sum_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\left(\frac{x_l+n}{b_l}\right)^2\right\}} \quad (9)$$

단, $y_b = y/b$, $x_l = x/l$, $b_l = x/l$ 이며 n 은 방류공수이다. 농도장의 유속분포는 식 (9)에 b 대신 $b_T (= \lambda b)$ 를 쓰며, 퍼짐율은 원형제트에서 1.07, 2차원 슬롯제트에서 1.35의 값으로 한다(Wood 등, 1993).

- ① $b/l \ll 1$: 원형제트로 축방향 대칭의 유속분포
 - ② $b/l \gg 1$: 슬롯제트와 같은 2차원 유속분포
- 다공확산관에서의 유속분포식 (9)를 이용하여 임의 단면에서의 하나의 방류공이 차지하는 체적플럭스, q 를 표현하면 다음과 같다.

$$q = \int_A u(x, y, z) dA = I_q U(z) bl \quad (10)$$

2.3 등슬롯확산관 이론

천이구역 이후에는 해석의 용이함을 위해서 다공확산관을 등슬롯확산관(equivalent slot diffuser)의 형태로 해석하는데, 이때 등슬롯확산관의 폭 B 는 다음과 같이 정의할 수 있다(Cederwall, 1971).

$$B = \frac{\pi D^2}{4l} \quad (11)$$

방류시 희석률의 주요변수인 밀도프루드수(densimetric Froude number)는 식(12)와 같으며, 등슬롯확산관의 개념 및 방류물질의 초기농도 (ρ_0)를 사용하면 식(13)과 같이 정리된다.

$$F_n = \frac{U_0}{\left(\frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_a} gD\right)^{1/2}} \quad (12)$$

$$F_s = \frac{U_0}{\left(\frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_a} gB\right)^{1/2}} \quad (13)$$

2.4 근역혼합과정

오염물 플룸은 하수장이 형성되는 근역(N.F.R.; Near-Field Region), 잔류부력에 의한 횡방향 부력 확장단계인 중간역(Intermediate zone), 이류 및 수동확산단계인 원역(F.F.R.; Far Field Region)으로 구분되며, 본 연구에서 논의될 근역은 Fig. 2에 나타나있다.

일반적으로 근역혼합거동은 확산관의 형태, 해저지형, 제트의 부력 및 방류특성에 의해 영향을 받으며 흐름의 안정성 여부가 희석률 결정에 주요인자가 된다.

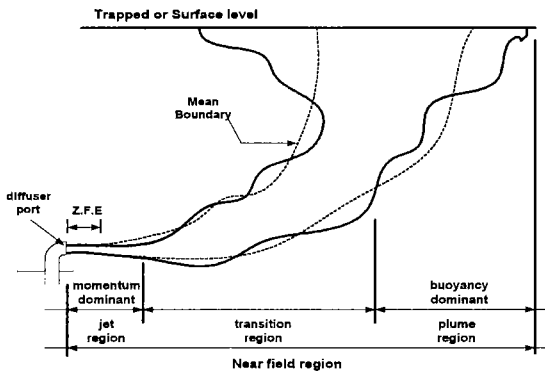


Fig. 2 Detailed near-field region

3. 모델의 수립 및 적용

CORMIX 1 과 2 모델은 단면경계 및 수심을 일정하게 가정하므로 단면경계나 적용 수계의 바닥이 불규칙할 경우에는 오염물 확산의 검토시 주의를 요한다. 또한 근역혼합모델로 원역에 대한 해석시 정확성이 떨어지는 점도 있다(Table 1 참조).

감천항 매립지를 중심으로 2011년 준공예정인 부산 중앙하수처리장을 그 대상으로 하며, 방류자료는 보고서(부산광역시, 1998)의 자료를 사용하고, 확산관 자료는 임의 자료를 이용하였다.(Fig. 3 참조)

예상방류량은 140,000m³/day, 수질변수는 해역의 수질등급 기준인 COD농도 20mg/ℓ, 방류수 밀도는 1000m³/kg으로 한다. 단일 확산관의 경우에는 수평상향 30° 방류이며, 다공 확산관의 경우에는 불구속 해역에 적합한 양방향 확산관으로 조류방향과 직교배치(perpendicular alignment)이며, 확산관 길이는 100m이다. 확산관에는 11개의 연직유도관(riser)을 등간격으로 설치하며, 대칭으로 방류공 2개를 부착한다. 대상해역은 Fig. 3과 같으며, 상하층의 밀도분포는 Table 2와 같다. 조류속도는 Station 1, 2, 3 각각 0.15, 0.20, 0.25m/sec이며, 이는 수심평균한 경우의 유속치이다.

Table 1 Features of CORMIX 1 & 2 programs

	CORMIX 1	CORMIX 2
Port	Single	Multiple
Discharge angle	Arbitrary	Arbitrary
Density profile	Arbitrary	Arbitrary
Current speed	Constant with depth	Constant with depth
Current angle to the diffuser	Arbitrary	Arbitrary

Table 2 Density distribution

Classification(kg/m ³)		Winter	Summer
Station A	surface	1026	1019.5
	bottom	1026	1022.0
Station B	surface	1026.2	1021.6
	bottom	1026.2	1023.6
Station C	surface	1026.3	1021.6
	bottom	1026.3	1023.7



Fig. 3 Location map

4. 실험결과 분석

단일확산관의 경우 흐름의 형태는 H1과 S4로 진 자는 수평방류로 초기 제트가 주변 유속에 의해 꺾이며, 전체적으로 안정된 흐름이며, 후자는 부력플룸의 거동이 지배적이고 주변류에 의해 심하게 휘어지고 수중에 포착되는 흐름이다. Station A에서는 동하계가 흐름양상이나 근역 혼합특성이 유사하다. 수심이 얇아 밀도 성층현상이 방류조건에 비해 미약하며, 근역경계에서의 희석률은 동하계 각각 49.6, 37.4이며, 혼합영역의 거리가 긴 동계가 높다. Station B는 방류수심이 깊어지고 주변조류가 강하며 주변해역의 밀도분포가 균일하여 플룸의 꺾적이 길어지므로 연행이 많아져 체적플럭스가 증가한다. Station C는 Station B와 거의 유사하나, 주변조류와 주변수역의 성층화가 높아 더욱더 휘어지고, 플룸의 폭과 두께도 얇아진다.(Fig. 4 참조)

다공확산관의 경우 흐름의 형태는 동계는 MU2, 하계는 MS5이며, Fig. 5에 나타난 바와 같이, 매우 불안정하다. 하계에는 초기의 제트운동량에 의해 수평 운동량을 가지며 주변류와 밀도 균형점에서

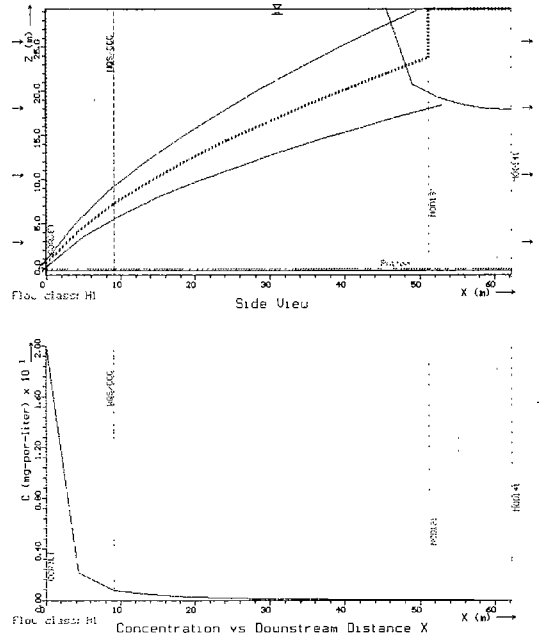


Fig. 4 CORMIX 1 output diagrams of Station C in winter

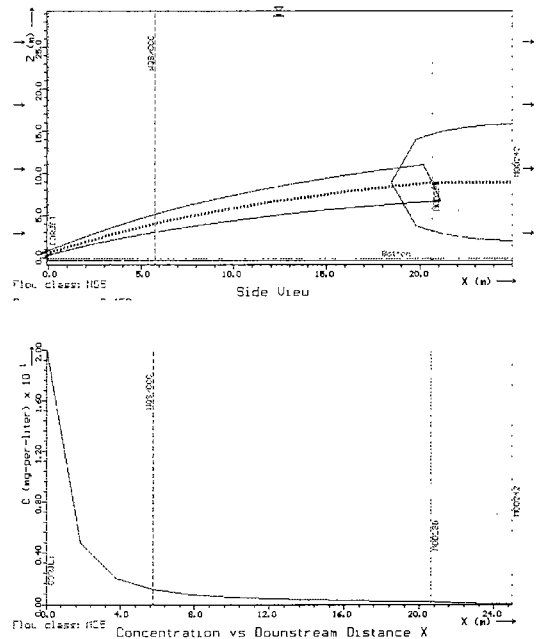


Fig. 5 CORMIX 2 output diagrams of Case C in summer

포착되며 점차 완전수직혼합의 양상을 보인다.

Station A와 같이 비교적 수심이 얇은 천해에서 수중방류를 적용하면, 집중적인 근역혼합에 의해 단일확산관과 비해 상당한 희석효과가 나타났으며, 하계에는 주변류와 선형 밀도성층현상으로 플룸은 수중에 포착되어 서서히 진행되며, 이는 전 단난류연행이 희석의 중요한 작용인자이므로 분석된다.

Fig. 6은 근역에서의 희석률을 비교한 것으로 수심이 깊을수록 근역에서의 희석률은 증가한다. 즉, 수심이 깊을수록 초기제트는 주변수와의 상호작용으로 동력학적 에너지가 감소하므로 하수는 희석된다.

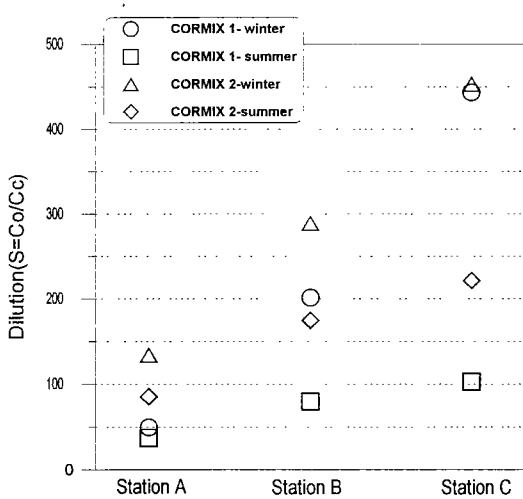


Fig. 6 Dilution at the edge of N.F.R.

5. 희석인자별 중요도 분석

가장 적합한 결과를 보이는 Station C를 대상으로 희석인자별 중요도를 분석한다.

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9와 같이 방류수심과 주변유속이 클수록 플룸의 궤적이 길어져 희석률이 증가하며, 총방류량이 많을수록 주변수 유입에 의한 희석은 감소하고, 방류공 간격은 병합으로 인한 주변

수와의 상호작용 면적이 적어지므로 감소인자가 된다. 오염물 농도, 방류각도, 방류공 직경 등은 희석에 거의 영향을 끼치지않는데 이는 하수확산관의 경우, 온배수확산관과는 달리 주변수와의 밀도차로 인한 부력운동량이 절대적이기 때문이다.

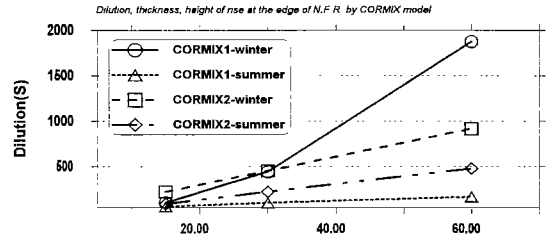


Fig. 7 Dilution computed by CORMIX model according to the variation of port depth

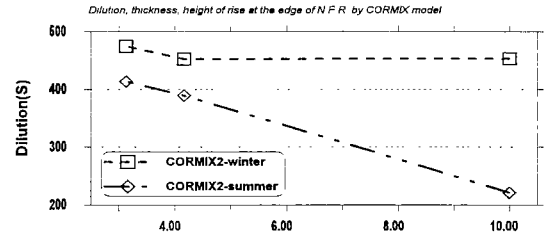


Fig. 8 Dilution computed by CORMIX model according to the variation of port spacing

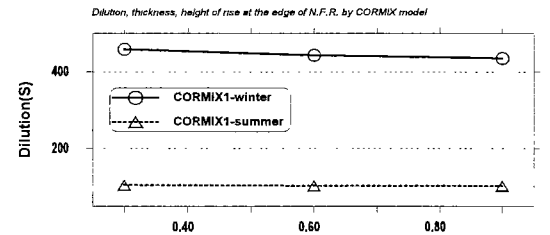


Fig. 9 Dilution computed by CORMIX model according to the variation of port diameter

6. 확산모델에의 적용성 검토

근역혼합특성이 파악됨에 따라 기존의 확산모델에서 단순히 점원(point source)으로 처리하는 것은 결과에 상당한 차이를 가져올 것이 예상되므로 본 연구에서 검증한 모델에서의 방류원을 사용한 경우와의 차이를 검토하였다.

지배방정식은 기존의 연구(최, 1998)를, 모델의 수립은 기존의 연구(Gug 등, 1999)를, 수치계산은 ADI(Alternating Direction Implicit)법에 기초한 평면 2차원 단층 모델을 사용하였다. 실험조건은 격

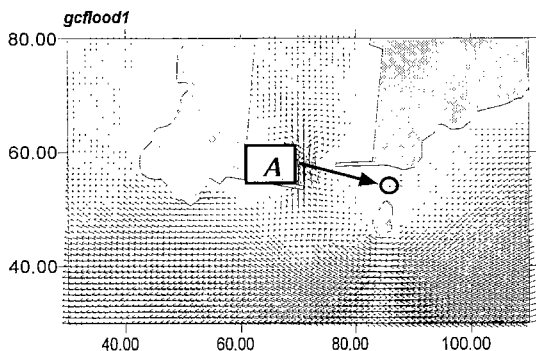


Fig. 10 Calculated result (max. flood tide)

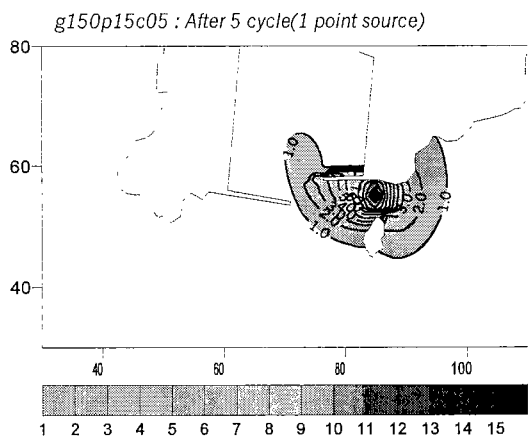


Fig. 11 Diffusion from the point source after 5 periods.

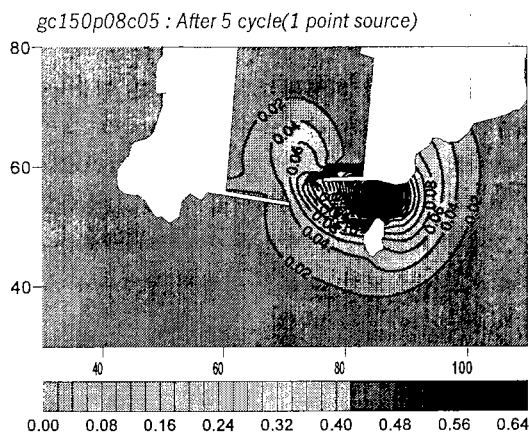
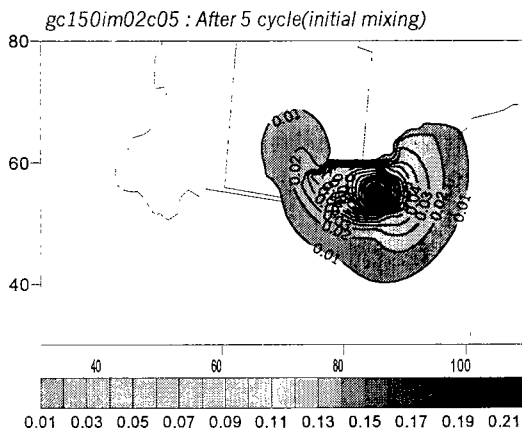


Fig. 12 Comparison of diffusion between the depth average source and processed source after 5 periods.

자(grid)의 수는 96×38 , 간격은 50m이며, 시간간격은 유동장에서는 4sec, 확산실험에서는 20sec로 하였다. 농도값은 점원방류시 COD 15mg/l의 값으로, 초기회석 과정을 거친 후의 오염원 농도값은 점원 방류시에는 실제 근역 혼합의 실험치인 0.2mg/l를 입력값으로 하였다. 여기서, 플룸이 표면에 이를 때의 플룸직경이 95~100m에 상당하여 처리수 방류원의 적용 격자를 2×2 로 늘어나는 것으로 하였다. 또한, 초기회석 과정을 거친 경우에 0.2mg/l의 범위가 2×2 의 격자로 이루어진 것을 1개의

격자에 해당하는 양으로 변환하면 농도가 0.8mg/l 이 되고 이를 다시 점원으로 하여 확산결과를 비교하였다. 단기간의 결과치를 비교하기 위하여, 창조류 시의 확산실험을 시행하였으며 계산영역에서의 창조류는 Fig. 10과 같은데 점 A는 해양방류구의 위치이다. 유동장에서 오염물 확산은 Fig. 11의 기존 점원 방류시와 Fig. 12와 같이 초기회석의 과정을 거친 후의 농도와 면적을 고려한 오염원을 5조석주기 후의 창조류 기간동안 방류할 때로 구분하였다. 5 조석주기 후의 결과, 초기회석을 적용하면 확산의 범위가 커지면서 농도와 회석률은 감소한다. 또한, 감전항 방파제를 따라 내항쪽으로 유도되는 성분과 두도 주위에서 외해측으로 방사되어 나가는 성분으로 구분되는데 주로 방류지점인 두도 주위에서 상당히 회석되었으나 플룸은 이분근에서 머무르는 형태를 나타내었다.

초기회석 과정 후의 오염원과 단순점원에 대한 수치계산결과, 차이가 확인되며 현재 사용하고 있는 2차원 확산모델에 의한 수치계산의 단순한 점원 해석으로는 상당한 오류를 범하게 됨을 유추할 수 있다.

7. 결론 및 제언

상기의 분석결과를 토대로 결과를 요약하면

① 실제 자료에 근거한 CORMIX 모델의 검증결과, 밀도분포의 부정확성에서 생기는 오차를 고려한다면 근역혼합특성에서 만족할 만한 수준으로 나타났다.

② 초기회석과정 후에 얻어진 오염원과 기존의 점원을 이용한 2차원 확산모델의 수치실험 결과, 해석상에 차이가 발생하였으며 단순한 점원해석에 대한 재고가 필요하다.

③ 동·하계 모두 방류수심 15m에서의 회석률은 비슷하나, 30m, 60m로 수심이 깊어질수록, 다공확산관보다는 단일확산관이 증가율이 높다.

④ 회석률은 주변유속이 빠를수록, 하계보다 동

계가 증가율이 높았으며, 주변해역의 밀도분포가 균일한 경우 주변유속이 더 큰 영향을 미친다.

⑤ 동계와 같이 주변수의 밀도분포가 균일한 경우에는 방류량이 작을 때엔 회석률이 높지만, 방류량이 증가하면 동하게 모두 회석률이 거의 일정해진다.

⑥ 방류 오염물의 농도의 변화에 대한 회석률의 값은 변화가 없었다.

⑦ 방류 각도의 변화에 따른 전체적인 회석률의 변화는 미약하였으며, 하수확산관의 경우 초기 방류운동량보다 부력운동량이 지배적이기 때문이다.

⑧ 확산관의 길이를 100m로 고정하고 방류공의 간격을 변경하면 동하게 모두 방류공의 간격이 클수록 회석률은 감소하였으며, 이는 방류공의 수가 증가함에 따른 주변수와의 상호작용의 증가에 기인한다.

또한, 대부분의 국내연구는 하수확산관의 근역혼합특성 분석시 현장적용에만 의미를 부여하며, 검증없이 CORMIX 모델을 적용하고 있다. 이에 본 연구에서는 CORMIX 모델에 대한 검증을 행하고, 실제 현장에 적용하여 각 회석인자별의 중요도를 현장중심으로 파악하였다. 앞으로 이 분야에 대한 연구발전을 위해 물리실험 자료와 같은 기초자료의 지속적인 축적이 필수적이다.

참고문헌

- 1) 부산광역시(1998), 부산 중앙하수처리장 건설사업
- 2) 이중우(1999), 대도시인근 폐쇄수역 및 항만에서의 수질개선 방안, 제1회 해양환경보전세미나자료, 한국해양감시단.
- 3) 국승기 (1998), 폐쇄성 해역에 있어서의 새로운 수질개선책에 관한 연구, 한국항만학회지 제 12권, 제 1호, pp. 95~104.
- 4) 최성용, 국승기, 김강민, 이중우(1998), 항만개발에 따른 수질변화 및 개선책에 관한 연구, 한

- 국항만학회지 제 13권, 제 1호, pp. 123~131.
- 5) Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jenson, R.A. and Rouse, H.(1950), Diffusion of submerged jets, Trans., ASCE, Vol. 115.
 - 6) Fox, D. G.(1970), Forced plume in a stratified fluid, J. of Geophysical Research, Vol. 70, No. 33.
 - 7) Fischer et. al.(1979), Mixing in inland and coastal waters, ACADEMIC PRESS.
 - 8) Hirst, E.(1971), Buoyant jets discharged to quiescent stratified ambients, J. of Geophysical Research, Vol. 76, No. 30.
 - 9) Jirka, Gerhard H., Donerker, Robert L., Hinston, Steven W. (1996), User's manual for CORMIX, Office of Science and Technology, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C
 - 10) Morton, B.R., Taylor, G.I. and Turner, J.S.(1956), Trubulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, Proc. Roy. Soc., London, A234.
 - 11) Wood, I.R., Bell, R.G. and Wilkinson, D.L.(1993), Ocean disposal of wastewater; World Scientfic.