

## 방류관 설계인자에 대한 민감도 분석

김 지 연\* · 이 중 우\*\*

Sensitivity Analysis to the Design Factor of Ocean Outfall System

*J. Y. Kim · J. W. Lee*

**Key Words** : 수중 방류(Submerged Discharge), 해양 방류(Ocean Discharge), CORMIX (CORMIX(Cornell Mixing Zone Expert System), 단일확산관(Single-port Diffuser), 다공확산관(Multi-port Diffuser), 방류시스템(Outfall System), 희석(Dilution), 혼합특성(Mixing Characteristic), 근역(Near-Field Region)

### Abstract

A demand of marine outfall system has been much increased for the effective disposal of the wastewater due to population and industrial development at the coastal areas. The outfall system discharges primary or secondary treated effluent into the coastline, or at the deep water, or between these two. The discharge is carried out by constructing a pipeline on the sea bed with a diffuser or with a tunnel, risers and appropriate. The effluent, which has a density similar to that of fresh water, rises to the sea surface forming plume or jet, together with entraining the surrounding salt water and becomes very dilute.

Thus there have been growing interests about plume behaviour around the outfall system. Plume or jet discharged from single-port or multi-port diffuser might cause certain impacts on coastal environment. Near field mixing characteristics of discharged water field using CORMIX model have been studied for effective outfall design various conditions on ambient current, depth, flow rate, effluent concentration, diffuser specification, port specification etc.. This kind of analysis is necessary to deal with water quality problems caused by the ocean discharge. The analyzed result was applied to the Pusan Jungang effluent outfall system plan.

\* 정희원, 한국해양대학교 대학원 항만운송공학과

\*\* 정희원, 한국해양대학교 토목환경공학부 교수

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경

전세계의 많은 연안도시에서 대양 및 호수로 오폐수 방류가 행해지고 있으며, 해양방류를 육지 오염물의 손쉬운 처리 정도로만 여기게 되어 해양의 잠재력을 개발하기도 전에 해양은 그야말로 쓰레기장화 되어가고 있다.

지자체 이후 임해산업입지와 배후 연안도시가 증가하는 등 연안역의 개발과 활용이 증가하므로 인해 도시하수, 공장폐수 등에 의하여 방출되는 오염물질, 하천으로부터 유출되는 하수, 임해 발전소로부터 방출되는 온배수 등도 급증하고 있으며 연안 수질환경도 급변하고 있다. 광양만의 광양공단, 울산만의 각종 중공업단지, 영일만의 맘모스 포항공단 등에서는 불가피하게 어떤 형식으로든 막대한 오염물질을 배출하고 있으며 부산, 인천 등 기존의 대규모 항들도 주변 연안개발의 가속화로 광범위한 해양오염이 발생하고 있다. 따라서 오폐수 방류와 관련된 해양오염의 최소화를 위해서는 방류와 관련한 예측, 설비 및 설계, 관리 및 운용 등에 관한 체계적인 연구가 시급하다.

국내의 경우, 질소나 인 등 영양염에 의한 호소 및 해양의 부영양화 문제가 심각하게 대두하면서 1996년부터 배출수 허용기준이 강화되었다. 그러나 기존 하수처리장의 시설부족과 예산 및 부지확보 문제 등으로 인해 3차 고도 처리시설의 도입이 늦어지고 있으며 따라서 이러한 문제를 해결하는 방안으로 기존의 2차 처리수를 해양방류관을 통해 회석과 확산이 용이한 심해에 방류하는 방법을 제시할 수 있다.

육상의 오폐수 처리방안으로서 1970년대 이후 미국, 캐나다 등과 같은 해양선진국에서는 수중 혹은 심해방류관을 통해 방대한 양의 오폐수를 해양 방류하는 방안이 검토되어 현재 시공 및 운영되어 오고 있다.

국내에서는 수중다공확산관에 대한 연구가 90년

대 초반 이후 발전소 주변의 온배수 방류에 관한 연구를 중심으로 진행되어왔으며 하수확산관에 대한 연구는 최근 몇 년간에 보고되고 있으나 우리나라의 여건에 맞는 방류 시스템의 최적설계 방안 및 다양한 연구방안에 관한 연구가 미흡한 실정이다.

이에 본 연구는 수치실험에 기존의 CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) 관련 연구를 토대로 하여 보다 나은 합리적인 설계 파라메타를 구하기 위하여 본 연구의 주관심 영역인 초기혼합 및 희석영역과 관련하여 영향을 미치는 방류조건별 민감도를 추적하였다.

### 1.2 연구의 목적 및 방법

하수를 해양으로 방류하는 방법에는 여러 가지가 있으며 이중 해안가에 인접하여 수표면에 방류하는 표층방류는 경제적으로는 타당하나 오염물의 혼합 및 희석과정이 수체에 존재하는 난류성분에 의존하는 수동적인 방법으로 그 희석효과가 불량하다. 반면 수중방류는 관로를 일정거리의 외해로 끌고 나가 해저면에서 고속방류에 운동량과 주변수의 밀도차에 의한 부력효과를 이용하여 방류구 부근의 희석률을 높이는 방법이므로 방류구 시스템의 조건 및 기하학적 형상에 따라 혼합 및 희석현상이 다양하게 변화하며 목표하는 희석효과를 능동적으로 조절할 수 있다는 장점이 있다.

일반적인 심해방류관의 수심이 70m 이상인 점을 감안할 때 우리의 동해안은 수중방류가 충분히 가능한 수심조건을 가지고 있으며, 따라서 국내실정에 맞는 다양한 해양방류관의 형상 및 배치에 대한 연구가 필요하다. 방류관의 유형에 따라 단일확산관(single-port diffuser)과 다공확산관(multi-port diffuser)이 있으며 특히 다공확산관은 방류각 및 개수, 간격 등에 따라 다양한 경우의 수를 만들어낸다(이 및 서, 1997).

이에 본 연구는 도시하수의 해양방류시 환경적 영향을 최소화하는 즉 희석의 효과를 극대화하는 수중방류관의 최적설계 방안을 찾아내고 나아가

해양방류와 관련하여 해양환경의 보호에 유익한 대안을 제시하고자 한다.

## 2. 기초이론

### 2.1 난류제트 이론

혼합구역이 제트의 중심선을 관통하는 지점까지를 흐름발달영역(zone of flow establishment)이라고 하며, 흐름확립영역(zone of established flow)은 제트의 중심부가 교란되기 시작하는 지점부터 시작된다(Fig. 1). 와류영역의 확장으로 주변수를 계속 연행하므로써 제트 중심부의 속도는 계속 감소하여 중심선의 최대유속은 초기 유속보다 작아진다. 두 영역간의 경계를 명확히 정의하기는 어려우며, 확립유체영역의 끝은 대략 중심선의 유속이 영이 되는 지점까지로 본다(Albertson et al. 1948).

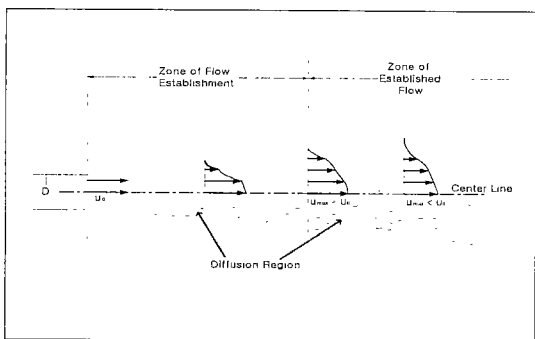


Fig. 1 Classification of zone of flow establishment and zone of established flow

Fig. 2는 난류제트의 부력효과, 밀도성층화, 조류효과, 주변난류, 제트간섭 등의 주변수 조건에 따른 플룸의 거동을 보여준다.

오폐수의 수중방류시 부력제트는 밀도 프루드수(Froude) 수(식(5)), 속도올  $k = \frac{u_j}{u_a}$ , 유량 플럭스

올  $V = \frac{u_a H}{q}$ , 방류각도  $\theta$  등 네 가지의 무차원수

로 표현된다. 단 슬롯제트로 가면 수심이 무한대이므로  $k, F, \theta$ 로 함축되며 벽제트(wall jet)는  $k$ 와  $\theta$ 로 표시된다(Cederwall, 1971). Fan(1967)은  $k, F$ 로 희석률 및 제트궤적을 나누었다. 특히  $F$ 를 통해 강제연행 및 유상(upstream)의 유무를 확인할 수 있다.

이를 근거로 원형부력 제트(round buoyant jet) 문제를 해석하면 속도는 다음과 같다(Fan, 1969).

$$U = U_m e^{-(r/b)^2} \quad (1)$$

밀도 손실 및 농도는 아래와 같다.

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

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

여기서  $r$ 는 단면분포의 특성길이이며  $\lambda$ 은 원형제트의 난류 Schmidt 수로서 보통 1보다 조금 큰 값이다.

Morton et al.(1956)에 의하면 제트의 유효폭(effective width)인  $b$ 에서의 횡방향 유입유속,  $v_e$ 는 다음과 같다.

$$v_e = -\alpha U_m \quad (4)$$

여기서 연행계수는 실험을 통해, 다음과 같은 국부 프루드 수,  $F_L$ 의 함수의 형태로 표현되는 것으로 알려져 있으며, 많은 연구자에 의해 연행계수를 구하기 위한 연구가 수행되고 있다(Albertson et al., 1950).

$$F_L = \frac{U_m}{\left(\frac{\rho_a - \rho_m}{\rho} gb\right)^{1/2}} \quad (5)$$

또한, Fox(1970)는 연직방향으로 방류시 연행계

수를 식 (6)으로, Hirst(1971)는 Fox의 이론을 확장하여 일정한 각  $\theta$ 로 방류될 때의 연행계수를 식 (7)로 표현하였다. 일반적으로 원형제트의 경우에는 0.082이며 슬롯제트는 0.16으로 한다.

$$a = a_1 + \frac{a_2(\lambda)}{F_L^2} \quad (6)$$

$$a = a_1 + \frac{a_2(\lambda)}{F_L^2} \sin \theta \quad (7)$$

여기서  $\lambda$  또한 원형제트인 경우에는 1.16이며, 슬롯제트의 경우에는 1.0 이다(Koh and Fan, 1970).

2.2 수중다공확산관 이론

천이구간에서의 유속분포는 각각의 원형제트의 유속을 선형적으로 중첩하여 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다(Wood et al., 1993).

경계의 영향을 받지 않는 확산관 내측의 유속분포는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$u(x, y, z) = U(z) \frac{\exp(-y_b^2) \sum_{n=0}^{+\infty} \exp\left\{-\left(\frac{x_l+n}{b_l}\right)^2\right\}}{\sum_{n=0}^{+\infty} \exp\left\{-\left(\frac{n}{b}\right)^2\right\}} \quad (8)$$

여기서,  $y_b = y/b$ ,  $x_l = x/l$ ,  $b_l = x/l$  이며  $n$ 은 방류공의 개수이다. 농도장의 유속분포는 식(3.18)에  $b$ 대신  $b_l (= \lambda b)$ 를 대입하는 식으로 표현된다. 일반적으로 방류공에서 떨어진 거리  $l$ 과  $b$ (nominal half width)는 선형관계를 가지는데 그 비례상수를 퍼짐상수(spread constant)라 하며 이에 따라 퍼짐율(spreading ratio)이 결정된다.  $b/l \ll 1$ 일 경우는 원형제트로 측방향 대칭의 유속분포를 가지며,  $b/l \gg 1$ 일 경우는 슬롯제트와 같은 2차원 유속분포를 가진다. 다공확산관의 경우에 초기방류지점에서 일정거리까지 각각의 방류공에서 방류되는 제

트는 독립적인 원형제트의 거동을 보이거나 천이구간(transition zone)이후부터는 제트들이 병합하면서 2차원 슬롯제트(slot jet)와 유사한 형태를 보인다. 천이구역 이후부터는 다공확산관을 등슬롯 확산관(equivalent slot diffuser)의 형태로 보면 해석이 용이해진다.

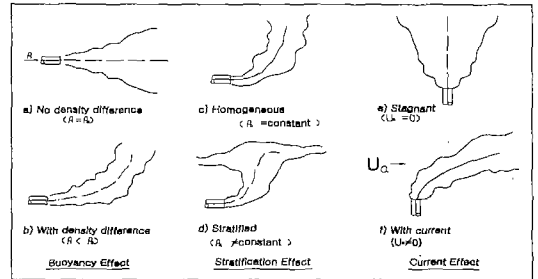


Fig. 2 Effects of the environmental conditions on the jet behavior

2.3 근역혼합 및 희석의 특성

초기희석에 대한 정확한 예측은 방류관 모델의 실험에 있어서 가장 중요한 단계가 된다. 균질의 정체된 유체에서의 초기희석 예측은 수학적으로 구하는 것이 어렵지 않으나, 해양과 같이 유동적인 환경하에서 방류장(큰 밀도 프루드 수)의 초기희석을 수학적으로 찾아내는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 초기 희석은 다공확산관의 기하학적 형태, 방류운동량 및 부력특성, 주변해저의 지형, 주변수의 유속 및 수심, 밀도성층화의 정도 등에 영향을 받는다. 방류된 제트는 주변수와 유속차에 따른 전단 난류확산으로 인해 주변수와 연행을 야기하면서 제트의 폭은 증가되고 제트의 유속 및 농도는 감소된다.

3. 실험 및 분석

수치실험에 기존의 CORMIX 관련 연구 및 매뉴얼 등을 토대로 하여 보다 나은 합리적인 프로그램

사용의 사례를 제안하고자 본 연구의 주관심영역인 초기 혼합 및 희석영역과 관련하여 영향을 미치는 방류조건상의 민감도를 추적하였다. 분석에 사용한 인자는 방류수심, 주변유속 등과 같은 주변수 조건, 유량, 방류수 농도 등과 같은 방류수 조건, 확산관 길이, 방류공의 높이 및 크기, 방류공의 기하학적 배치 등과 같은 확산관 조건 등으로 나눈다 (Muellenhoff et al., 1985). 부분적으로만 시행되어 온 각 인자별 비교를 방류관 설계의 관점에서 보다 다양한 인자를 선정하여 희석률(dilution), 하수장의 두께(wastefield thickness), 플룸의 상승고(height of rise)에 대한 민감도를 실험하였다.

본 실험에서 사용하는 입력 데이터는 부산중앙하수처리장을 근거로 하였으며 이는 Table 1과 같다.

여름과 겨울, 계절별 인자 중에서 해수의 밀도값은 추후 부산하수처리장의 방류구가 위치할 수역을 대상으로 조사된 값으로 겨울에는 균일한 밀도값인 1026.2 kg/m<sup>3</sup>을 적용하고, 여름에는 해수면부

근에는 1021.6 kg/m<sup>3</sup>과 해저면 부근에는 1023.6 kg/m<sup>3</sup>로 성층화된 밀도분포를 적용하였다. 사용된 인자별 희석, 하수장의 두께, 플룸의 상승고의 실험결과는 아래와 같다.

### 3.1 주변유속

대상해역에서 주변유속은 거의 조류가 지배적이며 위치에 따라서는 0.1~1.0m/sec의 다양한 값을 나타내고 있으며 여기서는 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9m/sec에 대해 실험하였고 그 결과는 Fig. 6과 같다. 조류속도 0.3m/sec를 기점으로 하수장의 두께와 희석률이 거의 일정해지고 있으며 이는 방류수의 방류속도에 기인한 방류속도와 주변조류가 혼합하여 희석에 긍정적으로 영향을 주는 속도가 있음을 의미한다. 다공확산관의 겨울에는 조류속도가 커질수록 플룸이 거의 수면 가까이 포착되고 하수장 두께도 거의 수심 전체에 걸쳐 형성되어 완전 수직혼합의 양상을 보인다.

Table 1 Summary of input data

Classification	Station C
Analysis situation	unbounded
Average depth $H_A$	24m
Discharge depth $H_D$	23.3m
Diffuser Length	200m
Current speed $u_a$	0.20m/sec
Friction value Darcy-Weisbach f	0.025
Wind speed $u_w$	2m/sec
Distance from the shore to the diffuser	c1: 950m c2: 850m
Vertical angle of discharge $\theta$	0°
Horizontal angle of discharge $\sigma$	c1:90° c2:0°
Alignment angle $\gamma$	90°
Relative orientation angle $\beta$	90°
Average diameter $D_0$	0.2m
Port height $h_0$	0.8m
Discharge flow rate $q_0, Q_0$	2.78m <sup>3</sup> /sec
Water quality standard mg/l	2

### 3.2 방류수심

방류수심을 10, 30, 50, 70, 90m로 하여 여름과 겨울, 계절별로 단일확산관(CORMIX 1) 및 다공확산관(CORMIX 2)을 적용하였다(Fig. 7). 단일확산관은 수심에 따른 밀도성층화효과가 거의 나타나지 않으나 다공확산관은 특히 70m 이후에 밀도성층화 효과가 크게 나타났다.

여름의 다공확산관은 30m 이후부터는 수심의 증가에 따른 하수장의 두께 및 플룸의 상승고 변화가 거의 확인되지 않는데 이는 주변수가 밀도성층화 되어있을수록 수심의 증가에 따른 희석률의 증가가 적어지고, 수심이 증가할수록 플룸이 점점 더 수면 아래에 포착되는 경향을 뜻한다.

겨울에 단일 및 다공확산관에서 희석률과 하수장 두께는 초기의 수직혼합이 활성화되어 수심의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 양상을 보여서 주변수의 밀도분포가 균일한 경우 수심이 중요한 인자임을 알 수 있다.

### 3.3 방류량

총방류량은 감천항 중앙하수처리장을 50% 가동할 때의 방류량인  $1.39 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 최소로 하여 가동율 50% 씩을 증가하므로써 1.39, 2.78, 4.17, 5.56,  $6.95 \text{ m}^3/\text{sec}$ 의 유속을 적용하였으며 결과는 Fig. 8과 같다. 방류량은 방류공 직경과의 상관관계에서 유속 및 프루드 수를 결정하는 인자로 회석을 및 흐름의 형상을 결정한다. 똑같은 유량을 적용했을 때 단일 및 다공확산관의 회석을 차이가 크게 나타났다.

단일확산관의 경우에는 유량의 증가에 따른 회석을, 하수장두께, 플룸의 상승고의 변화가 거의 없으나 다공확산관의 경우에는 전반적으로 유량에 회석이 반비례하고 있다. 다공확산관의 경우에는 유속이 낮을 때에는 회석의 수준이 높으나 속도가 빨라지면 회석에 앞서 수평방향으로 이동성분이 증가하여 상대적 회석율은 감소할 수밖에 없으며 초기 회석은 역시 성층화된 여름이 겨울보다 적게 나타났다.

### 3.4 방류수 농도

방류공에서 배출되는 초기 방류수의 농도를 5, 15, 25, 35,  $45 \text{ mg/l}$ 로 변화시켜 실험하였으며 수중 방류의 경우에는 방류수의 초기농도는 회석률과 플룸의 거동에 전혀 영향을 주지 않는 것을 알 수 있었다.

### 3.5 확산관 길이

확산관의 길이는 국내외적으로 규모에 따라 100m 내외에서 2000m 이상까지 다양한데 본 실험에서는 국내에서 최근 선택되고 있는 100m에서 500m까지로 하여 실험하였으며 배치형태는 해안선에 조류가 평행한 형태를 취하였다.

단일 확산관의 경우에는 방류관 길이의 확장은 해안선에서 거리의 증가, 즉 도수관의 길이 증가와 같은 효과로 나타나므로 어느 정도 수심이 확보된

상태에서는 회석에 전혀 영향을 주지 않았다. 단, 다공인 경우에는 확산관의 길이가 증가함에 따라 회석도 점진적으로 증가하는 효과를 가져온다. 여름의 경우에는 확산관 길이 200m를 기점으로 회석률은 거의 변하지 않았으나 하수장의 두께는 200m의 14.88m에서 500m의 5.33m로 1/3 가량 감소하여 확산관의 길이 연장이 플룸의 형태, 즉 두께는 얇고 폭은 넓은 형태로 변화시킬 수 있었다(Fig. 9).

### 3.6 방류 각도

수평면에 대한 방류각을  $0^\circ \sim 90^\circ$ 로 했을 경우에 단일확산관의 경우에는 방류각도에 따라 회석의 변화가 거의 없으며 회석률도 50 미만의 대단히 적은 값을 나타내며 형성되는 하수장도 대단히 적은 두께로 수면에서 포착되고 있다. 다공확산관의 경우에는 특히 여름의 경우  $15^\circ$  이후에는 회석률이 거의 일정하며  $0^\circ$ 와  $15^\circ$  사이의 수평방류각이 회석을 증가시키는 조건이 된다.

본 실험에 의하면  $12^\circ$  내외가 플룸이 보다 상층에 형성되며 플룸의 폭을 증가시키므로써 회석을 증가시키는 수평방류각으로 나타났다.

하수확산관의 경우에 초기의 강한 운동량보다 주변수의 밀도차에 의한 부력이 플룸의 상승에 더 강한 역할을 하기 때문에 특정한 방류각도 범위를 제외하고는 방류각도가 회석률에 미치는 영향은 적다. 그러나 수평방류각의 증가는 수심이 얇은 경우에 관로세굴을 유발하는 플룸의 하상부착(bottom boundary attachment)을 제어할 수 있는 수단이 될 수 있다.

### 3.7 방류공 직경

단일확산관은 방류유속 약  $4 \text{ m/sec}$ 를 기준으로 정해진 방류공의 직경 0.8m를 기준으로 방류유속 및 밀도 프루드 수의 변화를 위해 0.6~1.0m를 대상으로 분석하였다. 방류공 직경이 커질수록 방류유속은 감소하며, 즉 방류공 직경 0.6m에서 하나의 방류공으로부터의 유속이  $9.832 \text{ m/sec}$ 에서 0.8m의

3.54m/sec까지 유속이 증가할수록 희석률이 38.7에서 20.5로 감소하였다. 하수장의 두께도 여름의 경우 최대 5.9에서 3.32로 절반 가까이 감소하였다.

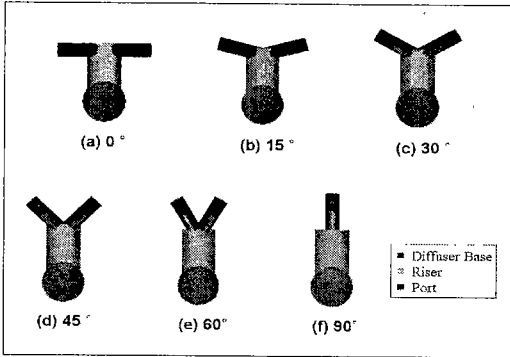


Fig. 3 Port type in relation to port angle

다공확산관은 하나의 방류공 유속이 약 4m/sec의 경우인 방류공 직경 0.2m를 기준으로 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3m를 적용하였으며 겨울의 경우에는 희석의 변화가 거의 없으나 여름의 경우에는 방류공 직경 0.1m일 때 방류유속 16.089m/sec에서 0.3m일 때 1.788m/sec로 변화함에 따라 희석률이 최대 347.8에서 205.4로 크게 변화하였다.

결국 방류공의 직경과 방류유속 간에 반비례가 성립하는 것을 알 수 있다. 방류공의 직경은 방류량과 연계하여 방류속도를 결정하며 방류속도가 커지게 되면 일반적으로 초기운동량이 증가하게 되고, 이에 따라 초기 발달흐름영역의 길이가 길어지게 되어 희석의 증가를 가져온다고 예상된다. 실제 설계에서는 최소방류유속이 3~8m/sec를 유지해야 희석의 효과를 피할 수 있다(Wood et al., 1993).

3.8 방류공 간격

기존의 이론에 근거하여(Almquist and Stolzenbach, 1976) 확산관의 길이 200m에 연직유도관의 수와 간격을 고려한다. 동일한 방류공수 36개를 기준으로 총 3가지 경우를 실험하였다.

방류공 사이의 간격이 증가할수록 희석률은 감소하고 하수장의 두께는 증가한다. 보통 제트의 병합은 방류공간의 거리 3~5배 정도의 거리에서 발생하는 것으로 알려져 있으며 방류공 간격이 클수록 병합은 상층부에서 발생하게 되는 것이다.

3.9 방류공 개수

총 11개의 연직유도관에 양방향확산관으로 각각 1개(총 11개), 2개(총 22개), 4개(총 44개), 6개(총 66개)가 부착되는 경우를 실험하였다(Fig. 4).

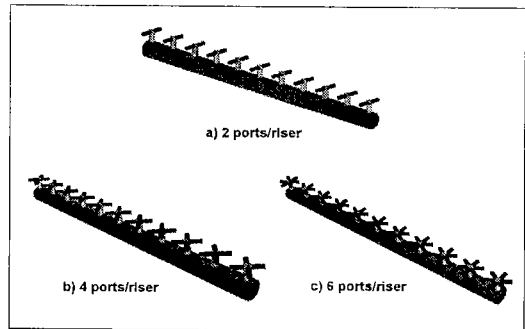


Fig. 4 Diffuser type in relation to port number (EA)

방류공의 개수가 증가하면 단위시간당 방류량이 증가되고 희석에 양(+)의 효과를 주지만 방류유속이 3m/sec 미만으로 적절한 방류유속이 확보되지 않으므로 인해 오히려 희석을 떨어뜨린다. 따라서 방류공의 개수나 기하학적 형상의 차이에 따른 다양한 변수를 추적하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

3.10 방류공 높이

방류공의 높이는 바로 연직유도관에 방류공이 바로 부착되는 경우인 0으로 시작하여 1.0, 2.0, 3.0, 4.0m 까지 실험하였으며 방류공의 높이는 수심과의 관계, 항해상의 위험여부 및 투포과정에서의 손상여부, 선박통항 및 어로 행위 등 해역 이용과 관

계되는데, 수심이 충분히 확보되는 수중방류의 경우에는 전체 수심 및 확산관의 길이에 비해 이러한 방류공 높이는 지극히 미미한 수치이므로 희석과는 무관한 결과를 보였다.

### 3.11 방류공 배치에 따른 확산관 형태

조류방향에 수직인 일방향 확산관(unidirectional diffuser) (a), 양방향확산관(alternating diffuser) (b), 축방향 확산관(staged diffuser) (c), 하나의 연직 유도관(riser)에 하나의 방류공을 부착하는 양방향 확산관의 변형 (d)와 조류방향에 수평으로 외해쪽으로 방류공을 부착하는 Tee 확산관 (e) 등(Fig. 5) 다섯 가지에 대해 근역의 플룸 거동을 실험하였다.

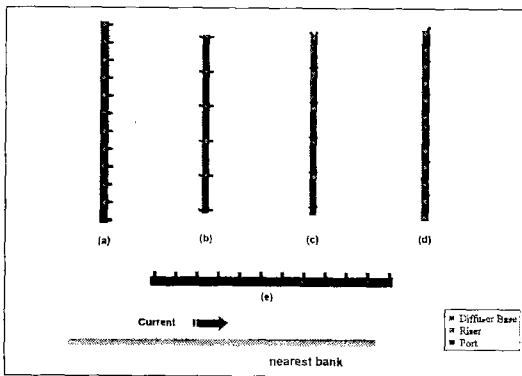


Fig. 5 Diffuser type in relation to port displacement

여름에는 확산관의 형태에 따른 희석률의 변화는 크지 않으나 하수장의 두께는 (b)의 경우에 가장 적으며 (c)의 경우에 가장 크게 나타났다. 플룸의 상승고는 (c)의 경우에만 수면에 포착되며 나머지 네 가지 경우에는 모두 수중에 포착되었다.

겨울에는 (b)의 경우에 희석률이 크게 떨어지며 하수장의 두께도 최저로 나타났다. 그러나 플룸의 상승고는 모든 경우에 밀도성층화에 의한 부력효과에 의해 모두 수면에 포착되었다(Fig. 5). 이러한 결과는 확산관에 부착되는 방류공의 기하학적 형

태에 따라 희석률 및 플룸의 규모를 상당히 바꿀 수 있음을 의미하며 현장적용에서 이러한 결과를 이용한다.

## 4. 결론 및 제언

민감도의 분석은 주변유속별, 수심별, 유량별, 방류수 농도별, 확산관의 길이별, 방류각도별, 방류공 직경별, 방류공의 수별, 방류공의 간격별, 방류공의 높이별, 확산관 형태별로 각각 여름과 겨울, 단일 및 다공확산관에 대한 실험을 통하여 수행하였다. 또한 운영과정에서 발생할 수 있는 방류량의 가동률(50%와 100%)에 따른 거동변화를 고려하였다. 희석률, 하수장 두께, 플룸의 상승고가 그 비교대상이며 실험결과 비교적 희석률이나 플룸의 거동 및 형태에 양(+) 혹은 (-)의 효과를 미치는 설계인자를 구할 수 있었다.

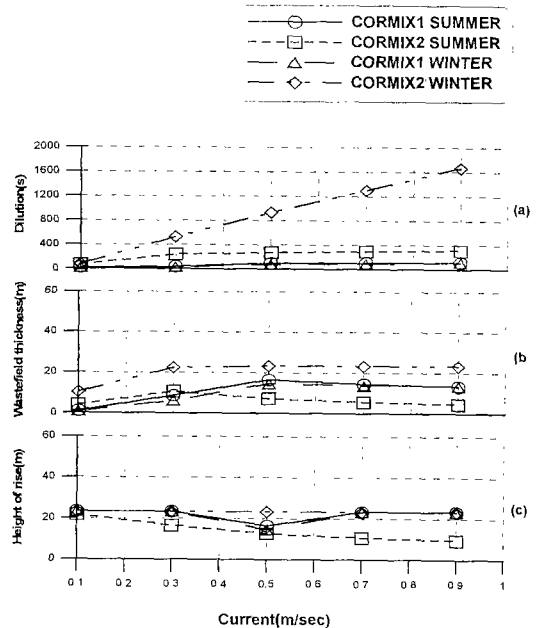


Fig. 6 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of ambient velocity



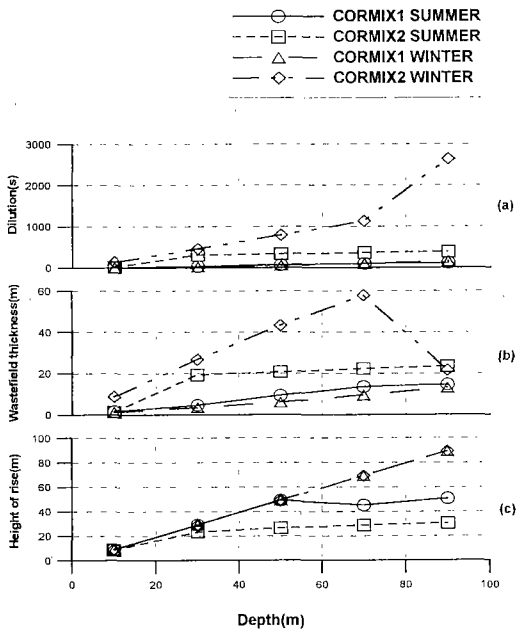


Fig. 7 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of discharge depth

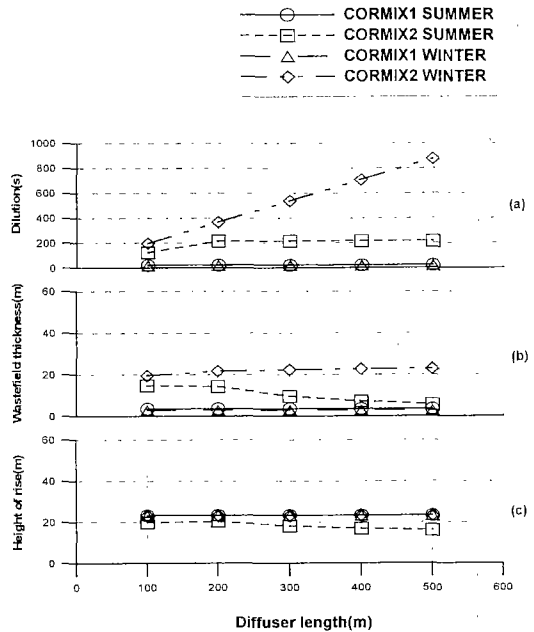


Fig. 9 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of diffuser length

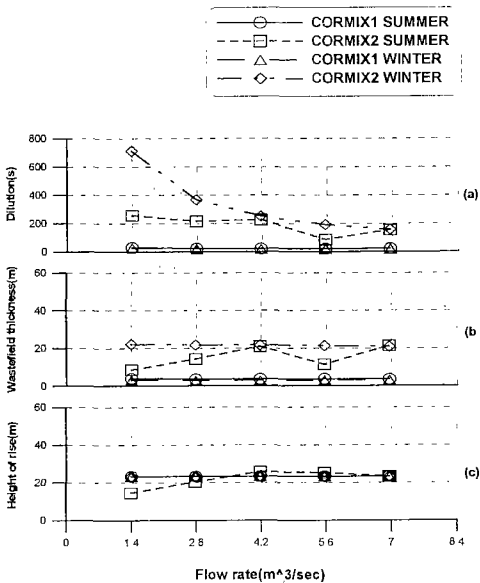


Fig. 8 Dilution, wastefield thickness, height of rise computed by CORMIX model according to the variation of flow rate

주변수 조건 중 하나인 주변유속은 조류속도 0.3 m/sec를 기점으로 하여 이전에는 희석에는 크게 기여하며 하수장 두께에도 영향을 미치지만 이후에는 희석에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

방류수심도 희석에 양(+)의 효과를 주는 주변수 조건이 되며 방류수심의 증가가 플룸의 상승고 증가와 같은 추이를 보였다. 특히 이러한 증가는 밀도성층화된 여름보다 겨울에 더 두드러지며 적용되는 밀도값 특히 현장의 밀도성층화가 희석에 미치는 효과가 대단히 중요함을 의미한다. 따라서 주변수 조건, 나아가 방류지점의 선정이 방류시스템을 계획하는데 가장 선행되어야 하는 결정인자이다. 같은 수심여건이라도 조류속도가 빠른 지점을 선정하는 것이 바람직하다. 방류지점의 선정 및 배치의 플룸의 희석 및 혼합영역을 충분히 확보한다는 점에서 방류시스템의 가장 중요한 재원이 되므

로 우선 목표회석을 충족하면서 이어 경제적인 지점을 선정하는 것이 필요하다.

방류수 조건인 방류량의 증가는 일정유량까지는 회석에 반비례한다. 방류량은 방류공의 직경, 방류공의 개수 등과 관련하여 방류유속, 즉 프루드 수를 결정하며 일정 방류유속의 범위 내에서만 회석을 변화시킬 수 있음을 보여준다. 즉 방류량에 따라 목표회석에 적절한 방류공의 크기를 결정할 수 있음을 뜻한다. 방류속도는 주변수 속도와 결합되어 플룸의 재생층화, 재순환 등을 유발하기도 하므로 방류구 주위의 흐름을 안정성도 고려해야 될 부분이다.

방류관 조건에서 확산관의 길이는 회석에 양(+)의 효과를 주며 플룸의 병합에 따라 하수장의 형태를 크게 변화시킨다. 따라서 방류지점이 연안 가까이 있는 경우에는 확산관의 길이를 증가시켜 오염범위를 줄일 수도 있다.

수평방류각도는 일반적으로  $15^\circ$  정도가 권유되나 실험결과 대부분의 경우에  $12^\circ$  가 회석의 효과가 좋고  $15^\circ$  가 넘어서면 회석효과가 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 각 플룸의 좌우병합이 빨라져서 플룸이 충분히 성장할 수 없는데 기인한다.

다공확산관에서 방류공의 직경, 개수 등은 방류량에 따라 프루드 수가 달라지며, 이 프루드 수는 방류지점이 연안에 가까이 있을 경우에 회석뿐만 아니라 플룸의 형태, 수직혼합의 양상 등을 조절할 수 있는 인자이다. 방류공 사이의 간격이 증가할수록 회석률은 감소하고 하수장의 두께는 증가하는데 이는 방류공 간격이 클수록 확산관의 길이 방향의 병합이 상층부에서 발생하기 때문이다. 같은 방류공의 개수라면 방류공이 가까이 있을수록 회석의 효과도 좋으며 플룸이 수면에 떠오르는 것도 줄일 수 있다.

방류공의 높이는 회석에 미치는 영향은 미약하지만 방류구 주변의 하상부착에 의한 관로 세굴을 막는 수단이 될 수 있다. 확산관 형태별로는 양방향

인 것으로 나타났다. 이는 조류방향을 일정하게 두었을 때의 결과이므로 현장의 조류방향이 가변적이거나 다양하게 나타날 경우에는 또다른 형태의 확산관을 고려하여야 한다.

이상의 방류인자별 민감도에 관한 결과는 방류관의 최적설계 방안으로 사용될 수 있을 뿐만아니라 하수장의 부분적인 문제를 해결하거나 흐름의 안정성을 유도하는 데에도 사용될 수 있다. 또한 단일확산관의 결과는 다공확산관에서 단일 방류공으로부터의 플룸의 개별적인 거동을 추적하는데 응용할 수 있다.

## 참고문헌

- 1) 이재형, 서일원 (1997), 수중확산관에 의한 온배수 및 하수의 해양방류, 한국수자원학회, 제 30권 제 2호, pp. 17.
- 2) Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A. and Rouse, H. (1948), Diffusion of Submerged Jets. Trans. ASCE, Vol. 115, pp. 639~697.
- 3) Almquist, C. W. and Stolzenbach, K. D.(1976), Staged diffusers in shallow water, Massachusetts institute of technology, Newyork, report no. 213.
- 4) Cederwall, K. (1971), Buoyant slot jets into stagnant of flowing environments. W.M. Keck Lab. for water resources and hydraulics, California institute of technology, Pasadena, California, report no. KHR-25.
- 5) Fan, L.N. (1967), Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids, W. M. Keck Lab. of Hydr. and Water resources, California institute of technology, Pasadena, California, report no. KHR-15.
- 6) Fan, L.N. (1969), Numerical solutions of turbulent buoyant jet problems, W. M. Keck Lab. of Hydr. and Water resources, California institute of technology, Pasadena, California, report no. KHR-18.

- 7) Hirst, E. (1971), Buoyant jets discharged to quiescent stratified ambients., Journal of geophysical research. vol. 76, no. 30.
- 8) Koh, Robert C.Y. and Fan, Loh-Nien, Tetra Tech, Inc.. 630 n. Rosemead Blvd. Pasadena California 91107 (1970), Mathematical models for the prediction of temperature distributions resulting from the discharge of heated water into large bodies of water.
- 9) Morton. B.R., Taylor. G.I. and Turner. J. S. (1956), Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, Proc. Roy. Soc.. London. A234.
- 10) Muellenhoff, W.P., Soldate, A.M., Baumgartner, Jr. D.J., Schuldt, M.D., Davis, L.R., and Frick W.E.(1985), Initial Mixing characteristics of municipal ocean discharge vol.1 - Procedures and applications.
- 11) Brooks, N.H. and Koh, R.C.Y. (1965), Discharge of Sewage Effluent from a Line Source into a Stratified Ocean. Eleventh International Congress, International Association for Hydraulic Research, Leningrad, Soviet Union.
- 12) Wood. I.R., Bell. R.G. and Wilkinson. D.L. (1993), Ocean disposal of wastewater. World Scientific.