



# 오염물질의 해양방류 기술(I)

서일원 (서울대학교 토목공학과 교수)

김대근 (서울대학교 토목공학과 박사과정)

## 제 1 편 : 부력제트 및 확산관 이론

제 2 편 : 온배수 및 하수 확산에 관한 수치모델 및 수리모형실험

제 3 편 : 온배수 확산관의 설계 및 시공

제 4 편 : 하수 확산관의 설계 및 시공

제 5 편 : 해양 방류관로의 일반 설계

제 6 편 : 확산관을 이용한 CO<sub>2</sub> 해양방류

이루어진 확산관을 통하여 오염물질을 배출시키는 방식을 의미한다. 수중다공확산관의 설계와 희석률 예측에 필요한 수치모형을 개발하기 위해서는 물리적인 혼합과정을 명확하게 이해하는 것이 필수적이다

본 고는 각종 오염물질을 해양에 방류하는데 사용하고 있는 수중다공확산관에 관한 기초이론과 설계 및 시공기술에 대한 학술강좌의 제 1편으로, 여기서는 다양한 확산관의 설계 및 시공에 기초가 되는 부력제트 및 확산관이론에 대하여 설명하고자 한다.

## 제 1 편

### 부력제트 및 확산관 이론

#### 1. 서론

인간의 생활 및 산업활동에 의해 배출되는 오염물질을 처리하는 방법으로 여러 가지 안이 제시될 수 있으나, 이의 선택기준은 자연생태계에 미치는 영향, 처리기술 및 경제성에 달려 있다. 발전소에서 발생하는 다량의 온배수, 생활 및 산업폐수를 주변의 수계에 방류하는 방식은 전통적으로 가장 경제적인 처리방안으로 간주되어져 왔다. 생활수준의 향상과 지방자치시대의 도래와 함께 수질기준이 점차 강화되어질 전망이며, 이는 한정된 영역에서 최대의 희석률을 얻어낼 수 있도록 오염물질을 방류해야함을 의미한다.

수중다공확산관(submerged multiport diffuser)을 이용하여 오염물질을 배출하는 방식은 이와 같은 목적을 달성하기 위한 좋은 수단이 될 수 있다. 이 방법은 목표희석률을 확보할 수 있는 수심까지 파이프라인을 이용하여 오염물을 이동시켜 많은 방류포트로

#### 2. 단일제트 이론

단일제트(single jet)가 수중에서 방류될 때 주변수와의 밀도차, 온도차 등에 의해 부력효과를 받는 경우는 부력제트(buoyant jet), 주변수체와 부력의 차이가 없는 경우는 단순제트(simple jet)라 한다. 원형부력제트(round buoyant jet)의 개념도는 Fig. 1과 같다. 통상적으로 초기흐름확립구간(initial zone of flow establishment) 이후에는 제트의 궤적이 자기상사성을 갖는 것으로 알려져 있다. 실험적인 자료는 속도, 밀도손실(온도), 질량의 분포가 다음 식과 같이 Gaussian분포에 잘 일치하고 있음을 보여준다.

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

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

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

여기서  $U$ 는 종방향유속;  $U_m$ 은 제트의 궤적 중앙에서

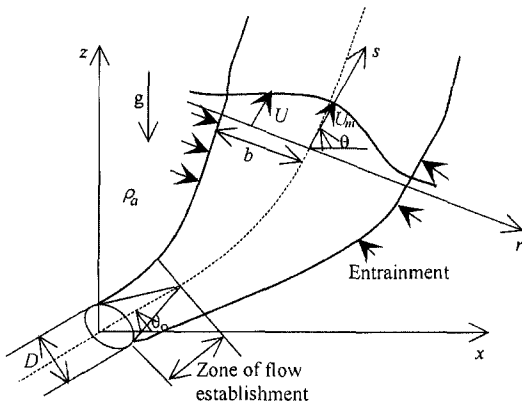


Fig 1. Schematics of a round buoyant jet

의 종방향유속;  $b$ 는 제트의 유효폭;  $\rho_a$ 는 주변수의 밀도;  $\rho, \rho_m$ 은 제트의 밀도 및 제트의 궤적 중앙에서의 밀도;  $\lambda$ 는 유속과 질량 사이의 확장비(spreading ratio);  $C, C_m$ 은 방류물질의 농도 및 제트의 궤적 중앙에서의 농도이다. 확장비,  $\lambda$ 는 실험결과 1이상의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Fischer 등, 1979). 이는 농도 및 온도의 횡분포가 유속의 횡분포보다 넓게 분포함을 의미한다.

유속의 분포를 식 (1)과 같이 정의하면 종방향으로 흐르는 체적플럭스(volume flux)는 다음과 같이 유도된다.

$$Q = 2\pi \int_0^\infty U dr = \pi U_m b^2 \quad (4)$$

Morton 등(1956)은 제트의 유효폭인  $b$ 에서의 횡방향의 유입유속,  $v_e$ 가 제트 중앙에서의 평균유속,  $U_m$ 과 다음과 같은 관계가 있다는 가정을 도입하였다.

$$v_e = -\alpha U_m \quad (5)$$

식 (5)에서  $\alpha$ 는 유입계수(entrainment coefficient)라

한다. 위와 같은 가정이 성립한다면 종방향으로 흐르는 체적플럭스의 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{dQ}{ds} = 2\pi b \alpha U_m \quad (6)$$

이상은 부력제트를 해석하기 위한 적분모형(integral model)을 구성하기 위한 기본적인 접근방법으로 많이 이용되고 있다. 실험을 통한 고찰결과 유입계수는 다음과 같은 국부적인 Froude수,  $F_L$ 의 함수의 형태로 표현되는 것으로 알려져 있으며, 많은 연구자에 의해 유입계수를 구하기 위한 연구가 수행되었다(Albertson 등, 1950; Hirst, 1971).

$$F_L = \frac{U_m}{\left(\frac{\rho_a - \rho_m}{\rho} gb\right)^{1/2}} \quad (7)$$

Table 1에 단순제트의 특성치들을 정리하였다. 단순플룸, 부력제트의 특성치들이나 주변수의 밀도성층 효과, 주변유속의 있는 경우에 대한 제트의 특성에 관한 세부적인 내용은 Fischer 등(1979), Wood 등(1993)을 참고하기 바란다.

Table 1. Summary of turbulent jet (after Fischer et al, 1979)

Parameter	원형제트	평면제트
초기방류유량, $Q$	$\frac{\pi D^2}{4} U_0$	$B U_0$
방류운동량플럭스, $M$	$\frac{\pi D^2}{4} U_0^2$	$B U_0^2$
특성길이, $l_Q$	$\frac{Q}{M^{1/2}}$	$\frac{Q^2}{M}$
제트궤적중앙부의 유속, $U_m/U_0$	$\frac{U_m}{U_0} = (7.0 \pm 0.1) \frac{l_Q}{z}$	$\frac{U_m}{U_0} = (2.41 \pm 0.04) \left(\frac{l_Q}{z}\right)^{1/2}$
제트궤적중앙부의 농도, $C_m/C_0$	$\frac{C_m}{C_0} = (5.6 \pm 0.1) \left(\frac{l_Q}{z}\right)$	$\frac{C_m}{C_0} = (2.38 \pm 0.04) \left(\frac{l_Q}{z}\right)^{1/2}$
평균희석률, $\mu/Q$	$\frac{\mu}{Q} = (0.25 \pm 0.01) \frac{l_Q}{z}$	$\frac{\mu}{Q} = (0.50 \pm 0.02) \left(\frac{l_Q}{z}\right)^{1/2}$
유속의 확장률, $b/z$	$0.107 \pm 0.003$	$0.116 \pm 0.002$
농도의 확장률, $b_T/z$	$0.127 \pm 0.004$	$0.157 \pm 0.003$
$C_m/U_{av}^*$	$1.4 \pm 0.1$	$1.2 \pm 0.1$

\*) Mean time-averaged tracer concentration  
위 표에서 B는 평면제트(plane jet)의 폭이다.

### 3. 다공제트 이론

#### 3.1 제트의 병합과정 해석

포트의 직경  $D$ , 초기방류유속  $U_0$ , 포트간의 간격이  $l$  인 다공확산관의 경우에 초기방류지점에서 일정거리 까지 각각의 포트에서 방류되는 제트는 독립적인 원형제트의 거동을 보이나 그 이후에서는 제트들이 병합하면서 제트간의 상호간섭이 발생하게 되는데 이 구간을 천이구간(transition zone)이라 명한다. 천이구간의 외곽부터는 슬롯제트(slot jet)와 같은 거동을 보이게 된다. 무한수체에 방류되는 원형제트의 경우에 유속분포는 축방향대칭을 이루는 Gaussian분포를 가지게 됨은 앞의 2장에서 살펴 보았다.

천이구간에서의 유속분포는 각각의 원형제트의 유속을 선형적으로 중첩하여 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다(Wood 등, 1993). Fig. 2는 연직방향으로 방류하는 경우에 대하여 각각의 포트에서 방류되는 원형제트가 천이구간에서 유속이 중첩되는 과정을 도시한 것이다. 경계의 영향을 받지 않는 확산관 내측의 유속분포는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$u(x, y, z) = U(z)$$

$$\frac{\exp(-y_b^2) \sum_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\left(\frac{b_l + n}{b_l}\right)^2\right\}}{\sum_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\left(\frac{n}{b_l}\right)^2\right\}} \quad (8)$$

여기서  $y_b = y/b$ ,  $x_l = x/l$ ,  $b_l = x/l$ 이며  $n$ 은 포트의 개수이다. 농도장의 유속분포는 식 (8)에  $b$ 대신  $b_T (= \lambda b)$ 를 대입하는 것으로 표현된다. 확장비의 값은 원형제트에서는 1.07의 값을 가지며 2차원 슬롯제트에서는 1.35의 값을 가진다(Wood 등, 1993). 이는 제트가 천이구간에서 병합되면서 점차 확장비가 증가하게 됨을 의미한다. Wood 등(1993)은 제트의 병합이 진행되면서 확장비의 증가는 다음의 Table 2와 같다고 제안하였다.

Fig. 3은 Fig. 2의 유속분포를 세부적으로 도시한 것으로 다음과 같은 특성을 가지고 있음을 알 수 있

Table 2. Spreading ratio with processing merging (after Wood et al, 1993)

$b/l$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\lambda$	1.07	1.08	1.09	1.11	1.15	1.21	1.27	1.31	1.34	1.35	1.35

다.

①  $b/l \ll 1$  : 원형제트로 축방향 대칭의 유속분포를 가진다.

②  $b/l \gg 1$  : 슬롯제트와 같은 2차원 유속분포를 가진다.

일반적으로 포트에서 떨어진 거리와  $b$ 는 선형관계를 가지는데 그 비례상수를 확장상수(spread constant)라 하며, 이는 원형제트와 슬롯제트에서 다른 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 이를 정리한 것이 아래의 Table 3과 4이다.

식 (8)의 유속분포형태를 살펴 보기 위하여 도시한 것이 Fig. 4이다. 여기서 포트의 수는 11개이며 확장

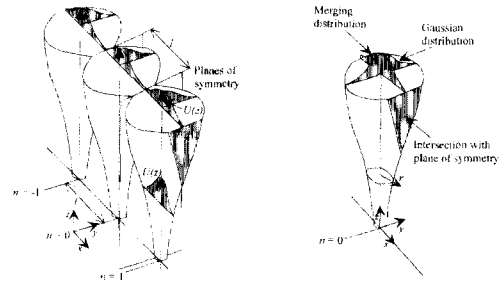


Fig 2. The merging of axisymmetric buoyant plumes and the single buoyant jet(after Wood et al., 1993)

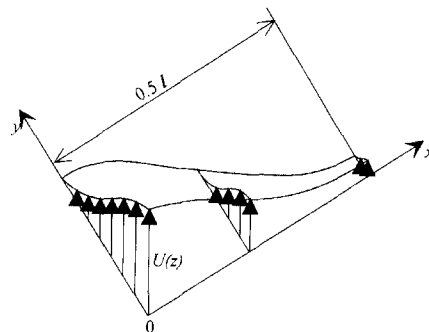


Fig 3. The assumed velocity profile for the merging buoyant plumes(after Wood et al., 1993)

Table 3. The spread constants for an axisymmetric flow (after Wood et al, 1993)

제 트	플 롬	Reference
0.107 ± 0.003	0.105	Fischer et al., 1979
0.109	0.109	Papanicolaou, 1984

Table 4. The spread constants for a two dimensional flow (after Wood et al, 1993)

제 트	플 롬	Reference
0.116	0.116	Fischer et al., 1979
0.125	0.109	Patel, 1971
	0.120	Kotsovinos, 1975
0.108 - 0.132		Evertt & Robins, 1978
0.120	0.120	Chu & Baines, 1989

상수는 0.108을 사용하였다. 또한 농도의 분포를 유속의 분포와 비교해보기 위하여 도시한 것이 Fig. 5이다. 사용한 확장비는 Table 2의 결과를 이용하였다. 여기서 알 수 있는 것은 확산관에서 약 7-8 l 정도 떨어진 거리에서는 개개의 원형제트의 특성은 사라지고 슬롯제트의 형태를 가지게 된다는 것이다. 그리고 농도가 유속에 비해 빨리 확산되는 형태를 보이고 있음을 알 수 있다.

다중확산관에서의 유속분포를 나타내는 식 (8)을 이용하여 임의단면에서의 하나의 포트가 차지하는 체적플럭스,  $q$ 를 표현하면 다음과 같다.

$$q = \int_A u(x, y, z) dA = I_q U(z) bl \quad (9)$$

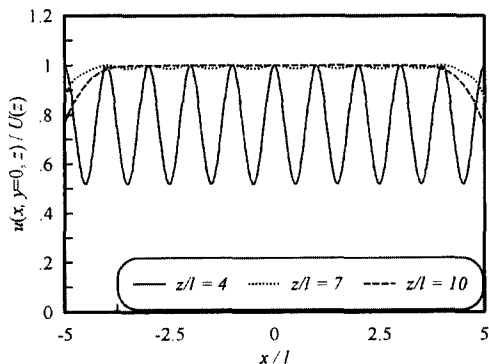


Fig 4. Velocity profile for the merging buoyant jets

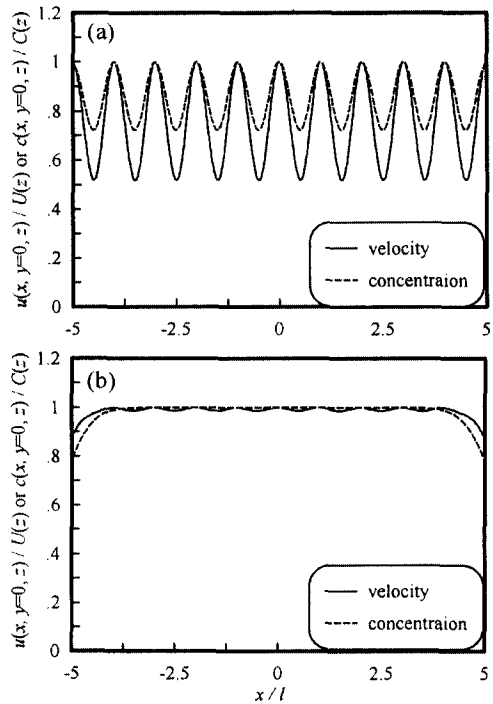


Fig 5. Velocity and concentration profile for the merging buoyant jets

위에서  $A$ 는 Fig. 2에서 대칭면 사이의 제트의 단면적이고  $A_q$ 는 체적플럭스의 형상상수(shape constants)이다. 위와 같은 방법으로 임의단면에서의 운동량플럭스(momentum flux), 부력(buoyant force), 부력플럭스(buoyancy flux)을 계산할 수 있으며, 이는 제트의 제적 중앙에서의 유속 및 농도를 알면 적절한 형상상수의 값을 이용하여 임의 단면에서의 제트 체적, 운동량, 부력에 관한 정보를 쉽게 얻을 수 있게 해준다.

### 3.2 등슬롯확산관

전 절에서 살펴본 바와 같이, 천이구역 이후부터는 해석의 용이함을 위해서 다중확산관을 등슬롯확산관(equivalent slot diffuser)의 형태로 해석하는 경우가 많은데, 이때 단위길이당 동일한 방류량과 운동량플럭스를 가지는 등슬롯확산관의 폭  $B$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$B = \frac{\pi D^2}{4l} \quad (10)$$

Cederwall(1971)은 다공확산관과 이의 등슬롯확산관의 평균회석률을 비교하였는데 단순제트의 경우에는 다음과 같은 관계를 가진다고 하였다.

$$R = \frac{\text{dilution of the multiport diffuser}}{\text{dilution of the equivalent slot diffuser}} = 0.95 \quad (11)$$

또한 단순플룸(plume)의 경우는  $R$ 이 0.78임을 밝혔다. 이상의 결과는 실험의 불확실성을 고려한다면 다공확산관을 등슬롯확산관의 개념을 이용하여 해석해도 크게 무리가 없음을 시사해 준다. 수중다공확산관을 이용한 방류시 회석률을 구하기 위하여 사용하는 주된 변수중의 하나로 방류유량의 관성력과 부력의 비로 정의되는 밀도푸르드수(densimetric Froude number)가 있는데 이는 다음 식과 같다.

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

등슬롯확산관의 개념을 사용할 경우의 밀도푸르드수는 다음과 같다.

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

위에서  $\rho_o$ 는 방류물질의 초기농도이다.

### 3.3 근역에서의 혼합특성

다공확산관을 통하여 방류된 오염물질의 속도 및 농도분포는 많은 인자의 영향을 받게 되는데, 일반적으로 근역(near field)과 원역(far field)에서의 혼합과정으로 분류하여 설명한다. 근역에서의 혼합과정은 다공확산관의 기하학적인 형태, 방류모멘텀 및 부력 특성 등 확산관 그 자체의 특성에 의해 영향을 받는다. 즉, 방류포트를 통하여 방류된 개개의 제트는 주변수와의 유속차에 의한 전단류 난류확산으로 인해

주변수의 유입을 야기하면서 제트의 폭은 증가하면서 제트의 유속 및 농도는 감소하게 된다. 이러한 제트는 방류되는 부력 및 방류각 등에 따라 일반적으로 수표면을 향하게 되며 방류포트간의 간격에 따라 제트간의 상호간섭을 유발하기도 한다. 수표면에 도달한 제트는 방류모멘텀과 부력, 주변수의 수심 등에 따라 제트의 궤적이 안정한 흐름을 유발할 수도 있고, 또는 불안정한 흐름을 유발하여 방류된 오염물질이 제트의 궤적에 재유입(reentrainment)되는 수도 있다. 다공확산관의 특성외에도 주변수의 유속 및 수심, 밀도성층화정도가 근역에서의 혼합효과에 크게 영향을 주게 된다.

원역에서의 혼합과정은 오염물질의 플룸이 밀도류를 이루며 중력확장을 계속하면서 이루어지는데, 이 경우에는 주변수와의 난류혼합 및 대기와의 열교환 등에 의한 혼합이 지배적인 과정으로 작용한다.

근역흐름의 안정성은 근역에서의 회석률에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 근역에서의 흐름이 불안정하게 되면 이미 혼합이 이루어진 물이 다시 제트의 궤적에 재유입하게 되어 초기회석률을 감소시키게 된다. Fig. 6은 흐름이 안정한 경우와 불안정한 경우의 흐름형태를 도시한 것이다. (a)와 (c)는 주로 심해에 위치하면서 부력이 큰 하수확산관(sewage diffuser)의 형태에서 주로 볼 수 있는 안정된 흐름의 구조이고, (b)와 (d)는 천해에 위치하면서 부력이 상대적으로 작은 온수확산관(thermal diffuser)의 전형적인 흐름특성이다.

근역에서의 흐름의 안정여부에 관한 연구는 Jirka(1982)에 의해 이루어졌다. 수심이  $H$ , 등슬롯확산관의 폭이  $B$ , 포트의 수평면에 대한 상향각이  $\theta_o$ 인 경우에 흐름의 안정요소로 작용하는 단위길이당 초기부력플럭스  $\beta_o$ 는 다음과 같다.

$$\beta_o = g_o' U_o B \quad (14)$$

위에서  $g_o'$ 은 초기유효가속도(initial effective acceleration)이다. 흐름의 불안정요소로 작용하는 단위길이당 초기운동량플럭스  $m_o$ 는 다음과 같다.

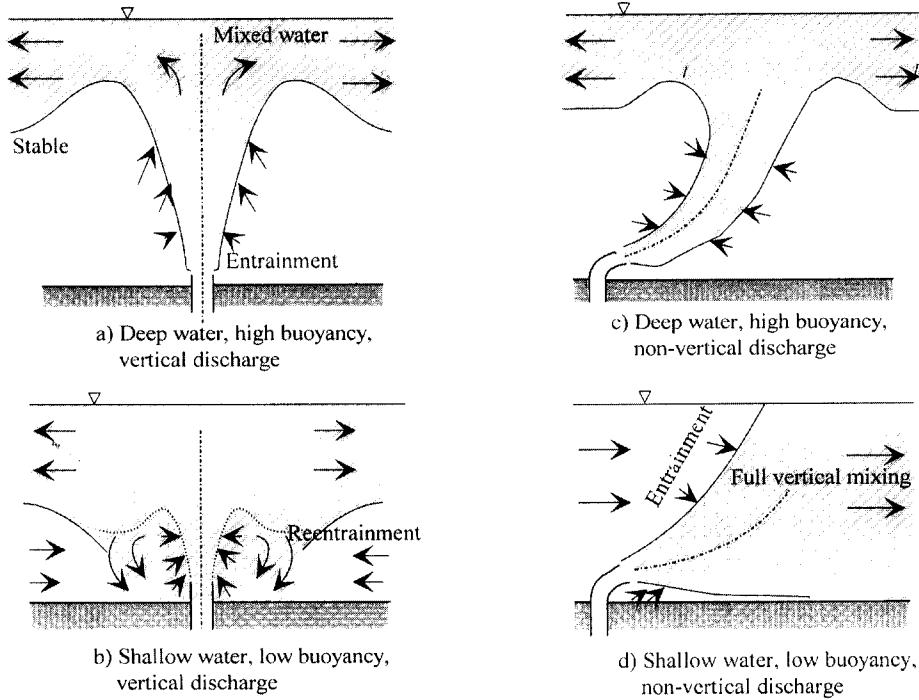


Fig 6. Qualitative illustrations of resulting distributions of mixed water (no ambient currents)

$$m_o = U_o^2 B \quad (15)$$

주변유속에 의한 운동량은 흐름을 불안정하게 하는 요소가 되는데 이의 단위길이당 운동량플럭스,  $m_a$  는 다음과 같다.

$$m_a = u_a^2 H \quad (16)$$

주변류가 없는 경우에 기존의 실험연구를 통하여 도출한 흐름의 안정조건의 경계를 결정하는 공식은 다음과 같다.

$$\frac{H}{B} = 1.84 F_s^{4/3} (1 + \cos^2 \theta_o)^2 \quad (17)$$

식 (17)은  $H/B$ 가 200이상에서는 근역의 안정여부를 파악하는데 합리적인 기준을 제공해 주는 것으로 알려져 있다. 식 (17)을 도시한 것이 Fig. 7이다.

주변류가 있는 경우에 대해서는 주변유속이 야기하

는 흐름의 불안정성분의 크기를 판단하는 변수로서  $m_a/(\beta_o^{2/3} H)$ 를 도입하여 다음과 같은 흐름의 안정성 여부를 판단하는 식을 유도할 수 있다(Jirka, 1982).

$$\frac{m_o}{\beta_o^{2/3} H} + \frac{m_o + m_o \cos \theta_o}{\beta_o^{2/3} H} = 0.54 \quad (18)$$

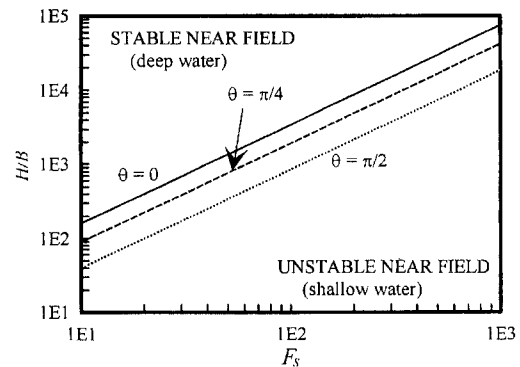


Fig 7. Stability diagram for line buoyant discharges into stagnant ambient

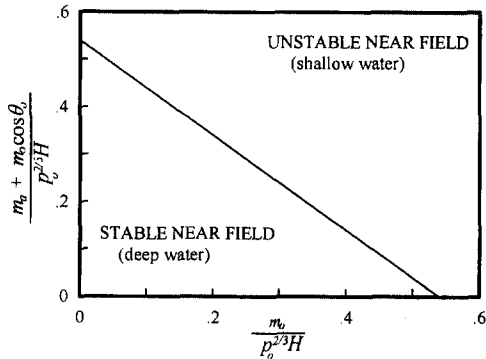


Fig 8. General stability diagram for line buoyant discharges into confined depth comprising stagnant and flowing ambient

식(18)를 도식한 것이 Fig. 8이다.

#### 〈참고문헌〉

- Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jenson, R.A. and Rouse, H., (1950), "Diffusion of submerged jets," Trans., ASCE, Vol. 115.
- Cederwall, K. (1971), Buoyant slot jets into stagnant of flowing environments, W.M. Keck Lab. for water resources and hydraulics, Report No. KH-R-25, California Institute of Technology.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J. and Brooks, N.H. (1979), Mixing in inland and coastal waters, ACADEMIC PRESS.
- Hirst, E. (1971), "Buoyant jets discharged to quiescent stratified ambients," J. of Geophysical Research, Vol. 76, No. 30.
- Jirka, J.H. (1982), "Multiport diffusers for heated disposal : A summary," J. of Hydraulics div., ASCE, Vol. 108, No. 12.
- Morton, B.R., Taylor, G.I. and Turner, J.S. (1956), "Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources," Proc. Roy. Soc., London, A234.
- Wood, I.R., Bell, R.G. and Wilkinson, D.L. (1993), Ocean disposal of wastewater, World Scientific.

#### 4. 결론

본 고는 각종 오염물질을 해양에 방류하는데 사용하고 있는 수중다공확산관에 관한 기초이론인 부력제트 및 확산관이론에 대한 고전적인 이론 및 물리적현상을 설명하였다. 특히 이상의 내용은 체트적분모델이나 CORMIX와 같은 길이규모모델(length scale model)의 연구·개발을 위한 기초이론으로 사용되고 있다. 또한 수치모형을 이용하여 다공확산관에서 방류된 제트의 혼합거동을 해석하고자 하는 연구가 관심의 대상이 되어가고 있는 상황에서 이의 물리적인 거동양상 및 기초이론을 이해하려는 노력은 매우 중요하다 하겠다. ●