

## 沿岸海域 重力噴流의 混合過程

張善德 · 徐琮門 · 李宗燮

釜山水產大學

(1990년 1월 31일 접수)

### The Mixing of Forced Plume in the Coastal Waters

Sun-duck CHANG, Jong-Moon SUH and Jong-Sup LEE

National Fisheries University of Pusan

(Received January 31, 1990)

The behavior and mixing process of the forced plume are studied in the hydraulic laboratory. The dilution rate of discharged waste water from the port in various hydraulic condition was analyzed. The effect of densimetric Froude number and the discharge type on the dilution rate are discussed :

In the vertical discharge, the forced plume of small densimetric Froude number mixes more actively than that of the large one. In the horizontal discharge, forced plume of large densimetric Froude number dilutes more rapidly than that of the small one.

The mixing takes place more vigorously in the horizontal discharge than in the vertical one. The multi-port diffuser is more effective for the waste water discharge system than the single port diffuser in the tidal swinging coastal sea.

### 序 論

沿岸海域에 隣接한 工業團地 및 都市下水의 處理로서 海洋에 放流되는 廢水는 隣近海域의 海洋環境問題와 密接한 關聯이 있다. 放流水의 水質이 經濟的 · 技術的인 面에서 海域의 水質環境基準을 완전히 滿足시키기는 困難하므로, 放流水가 海洋環境에 미치는 影響을 低減시키는 放流對策이 要求된다. 重力噴流의 特性和 關聯하여 噴流領域에서의 速度分布에 대해서 Tollmien(1926)과 Görtler(1942)의 理論解가 提案되었다. 그리고 Albertson et al (1950)는 噴流領域을 흐름의 形成領域과 擴散領域으로 나누어 解釋하였으며, 重力噴流에서 速度 및 密度(溫度, 濃度)의 分布形은 거의 相似性이 維持된다. 실제로, 測定된

함수형은 Gauss分布로 整理되는 것이 대부분이다. 또 均質한 密度를 갖는 周圍水中에 水平으로 放出되는 重力噴流는 浮力效果 때문에 상승하며, 中心軸의 軌적은 상방향으로 휘게 된다. 이와같은 水平 또는 傾斜軸對稱 密度噴流의 舉動과 關聯하여 Hirst(1970)는 積分方程式에 있어서 Fox (1970)와 같은 連行係數를 使用하여, 中心軸의 軌적 · 中心軸에 따른 濃度の 變換등을 구하였다. 首藤(1970)는 흐름장에서 重力噴流의 擴散에 대하여 水中放流水의 舉動과 稀釋率에 관하여 實驗的으로 研究하였으며, 林 · 首藤(1970)는 海洋에 放出된 廢液의 浮上plume의 分枝現象에 대하여 理論的으로 考察하였다. 室田 等(1982)은 淺水海域에 水中放流된 下水處理水의 混合稀釋特性에 관하여 實驗的으로 연구하였으며 室田 等(1983,

1984)은 2次元 鉛直密度噴流의 水理特性에 관하여 實驗的·理論的 研究을 行하였다.

廢液放流水의 排出方法으로서 表層放流方式과 水中放流方式이 있다. 表層放流方式은 放流口를 海岸에 설치하여 水表面을 따라 放流水를 處理하는 方法이고, 水中放流方式은 海域의 底部에 放流口를 설치하여 放流水를 排出하는 方法이다. 水中放流方式이 表層放流方式보다 攪拌混合 및 희석에 있어서 效果的인 것으로 알려져 있다. 最近 이와같은 研究은 電算機와 計測機의 發達로 인하여 連行機構·混合稀釋特性에 미치는 亂流構造를 數値시뮬레이션 또는 計測에 의하여 糾明하고자 하는 段階에 까지 進척되어 있다(Murota and Nakatsuji, 1987).

本 研究의 目的은 廢液의 水中放流와 關聯하여 廢液의 影響範圍와 稀釋率을 把握하고, 鉛直方向放流와 水平方向放流時의 混合稀釋特性을 比較하여 보다 効率的인 放流條件을 도출하는데 있다. 이를 위하여 密度 Froude數와 放流條件을 달리 하는 水理實驗結果로부터 鉛直方向 및 水平方向 重力噴流의 稀釋特性을 把握하고, 重力噴流의 基本特性을 確認하기 위해서 擴散過程에 대한 物理的인 파라메타와 特性 scale의 影響을 알아보았다. 이들 結果를 토대로 放流水의 混合稀釋을 추진시키는 方案에 대하여 檢討하였다.

## 方 法

### 1. 重力噴流舉動의 影響因子

重力噴流의 퍼짐·稀釋過程을 지배하는 要因은 質量 flux, 運動量 flux, 浮力 flux로서 다음과 같이 表現된다.

$$\begin{aligned} \rho Q^* &= \int_A \rho u dA \\ \rho M^* &= \int_A \rho u^2 dA \\ \rho B^* &= \int_A g \Delta \rho u dA \end{aligned} \quad (1)$$

한편, 重力噴流의 특성길이는 放出口에 있어서의  $Q^*$ ,  $M^*$ ,  $B^*$ 를 사용하여 다음과 같이 정의

된다.

$$l_m = M_0^{*3/4} / B_0^{*1/2} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } M_0^* = \rho_0 u_0^2 \frac{\pi D^2}{4}$$

$$B_0^* = g \Delta \rho_0 u_0 \frac{\pi D^2}{4}$$

$\rho_0$  = 放流口에서의 密度

$D$  = 放流口의 內徑

$u_0$  = 放流口에서의 放流流速

$$\Delta \rho = \rho_a - \rho_0$$

$\rho_a$  = 周圍水의 密度

重力噴流의 特性을 가장 잘 나타내는 것이  $l_m$ 이다.  $x < l_m$ 이면 運動量이 탁월하여 浮力의 影響을 거의 받지않고, 흐름은 噴流의 으로 된다.  $x > l_m$ 은 浮力效果가 탁월하여, 흐름은 plume 적으로 된다.

Chen·Rodi(1984)는 重力噴流에서 平均流速, 平均溫度, 亂流強度의 斷面內 分布의 相似性이 유지되는 가정하에 噴流軸上의 流速과 溫度에 관한 체감속(3)을 支配方程式으로부터 (3)식과 같이 誘導하였다.

$$\begin{aligned} X^* &= Fd_0^{-1} \left( \frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{-1/4} \left( \frac{X}{D} \right) \\ U^* &= Fd_0 \left( \frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{-1/4} \left( \frac{U}{U_0} \right) \\ T^* &= Fd_0 \left( \frac{\rho_a}{\rho_0} \right)^{3/4} \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_a} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } Fd_0 = U_0 / \sqrt{g \cdot D (\rho_a - \rho_0) / \rho_0}$$

$X$  = 수평거리

式(3)에서  $X^*$ 는 放流口에서의 鉛直높이를  $Fd_0$ 數의 變化에 따른 無次元길이로 나타내었다.  $U^*$ 와  $T^*$ 는 噴流中心軸상에서의 無次元화된 流速과 溫度이다.

### 2. 實驗裝置 및 方法

實驗은 길이 200cm, 폭 200cm, 높이 60cm의 유리로 만들어진 水槽를 使用하였다(Fig.1).

周圍水의 密度가 一定하게 유지되도록 鹽水供給裝置를 設置하고, 水槽底部에서 螢光染料를 착색한 淡水를 放流시켜 重力噴流를 發生시켰다. 放流管의 口徑은 鉛直方向 0.8cm, 水平方向은 single-port diffuser에서는 0.8cm, multi-port

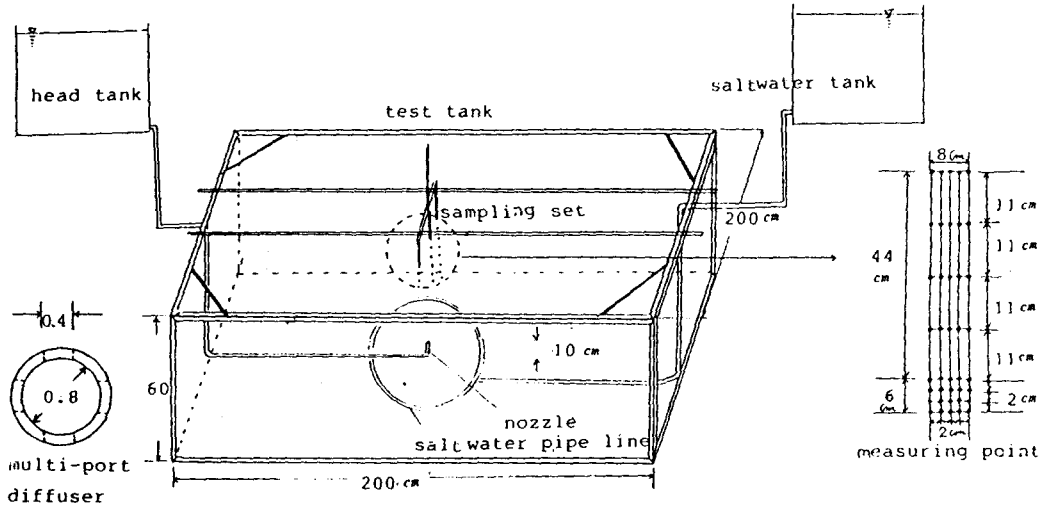


Fig.1. Experimental apparatus.

diffuser(4공관)에서는 0.4cm로 하였다. 밀도 Froude數의變化에 따른 重力噴流의 混合狀態를 測定하기 위해서, Fig.1과 같이 각 實驗條件別로 40個點에서 사이폰으로 sampling 하였고 Portable conductivity measuring set(Model 5003)를 使用해서 鹽分을 測定하였다. 水平方向은 2 cm 間隔으로, 鉛直方向은 2cm 間隔으로 4단면, 11cm 間隔으로 4斷面에서 Sampling하였다. 水平方向 放流時는 먼저 가시적으로 放流水의 噴流 中心軸을 確認한 후에 Sampling하였다. Sampling은 重力噴流가 정상상태에 도달한후에 실시하였으며, 각 實驗條件別로 5分以內에 完了하였다. 각 實驗條件은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

鉛直方向重力噴流에 있어서는  $Fd_o$ 數 4, 7, 10의 3段階에서 實施하였으며 噴流中心軸上에서의 濃度稀釋率  $C_c$ 의 정의는 式(4)과 같다.

$$C_c = C_i / C_{max} \quad (4)$$

여기서,  $C_i : (C_r - C_m) / (C_r - C_o)$

$C_r$  : 周圍水の 電氣傳導度

$C_m$  : sample의 "

$C_o$  : 放流水의 "

## 結果 및 考察

### 1. 鉛直方向 重力噴流

噴流中心軸上에서의 相對的인 濃度稀釋率  $C_c$ 의

Table 1. Physical parameters for the experiment on the buoyant jet

$Fd_o$	$U_o$ (cm/sec)	T°C	$\Delta\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_o$	$\delta_o$	$l_m$ (cm)	$M_o$	$B_o$	Q (g/sec)	D(cm)	
										single	multi
4	15.8	15	0.02	1.0	1.02	3	125.4	155.7	8	0.8	0.4
7	27.7	15	0.02	1.0	1.02	5.3	385.7	272.9	14	0.8	0.4
10	39.6	15	0.02	1.0	1.02	7.5	788.2	390.1	20	0.8	0.4

$Fd_o : U_o / gD(\rho_o - \delta_o) / \rho_o$

$g$  : gravitational acceleration

$U_o$  : discharge velocity

T : temperature(saltwater)

$l_m : M_o^{3/4} / B_o^{1/2}$

$\delta_o$  : density of saltwater

$\rho_o$  : density of discharge

$\Delta\rho : \delta_o - \rho_o$

變化를 Fig. 2에 나타내고 있다. Fig. 2(a)에서는鉛直方向放流時  $C_c$ 의 變化를  $h/D$ 에 따라 나타내었고, (b)에는  $Fd_0$ 수에 따른  $C_c$ 의 變化를 나타내었다. 여기서,  $h/D$ 는 放流口에서의 鉛直높이  $h$ 를 放流口徑  $D$ 로서 無次元化한 값이다.

Fig. 2(a)에서  $h/D$ 가 대략 7.5까지는 급한 경사로 稀釋되어지지만 그 以後에는 어느정도 완만하게 變한다. 特性길이  $l_M$ 이 本 實驗에서는 3~7.5 範圍로서,  $Z \gg l_M$ 에서는 運動量보다는 浮

力의 影響이 卓越한 領域으로서 기울기가 완만하게 變하며, 特性길이  $l_M$ 이 작은 곳에서는 初期濃度가 急激히 減少되어 混合이 活潑하게 됨을 알 수 있다. 즉 鉛直方向放流時는  $Fd_0$ 수가 작은 것이  $C_c$ 값이 작게되어 混合稀釋效果가 活潑하다는 것을 알 수 있다. Fig. 2(a), (b)에서 放流口近處에서  $C_c$ 의 값은  $Fd_0$ 에 따라 그다지 큰 差異를 나타내지 않는다. 이것은 重力噴流가 發達段階에 있는 形成領域에서는 斷面內 濃度分布의 相似性

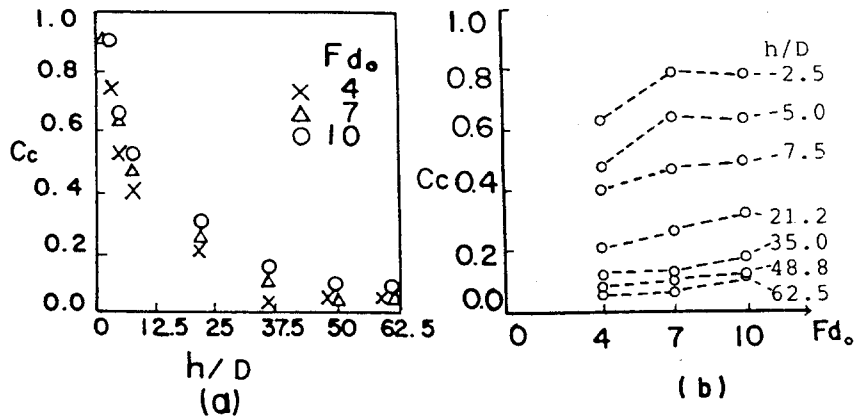


Fig. 2. Comparison of relative successive diminution ( $C_c$ ) for the vertical discharge in the case of  $Fd_0 = 4, 7$  and 10.

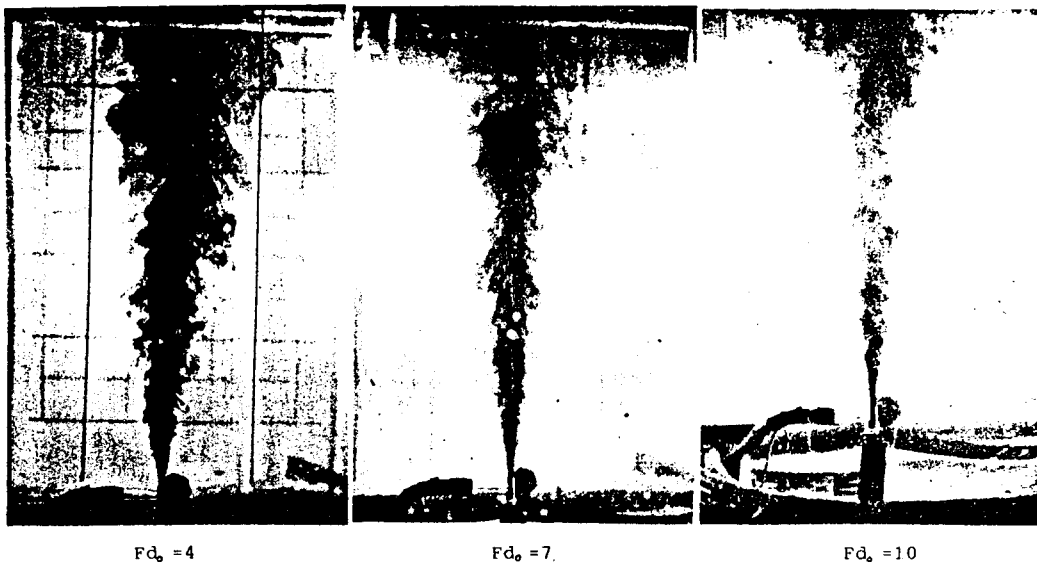


Fig. 3. The pictures of vertical discharge in the case of  $Fd_0 = 4, 7$  and 10

이 成立되지 않기 때문이다(室田 等, 1982).

實驗結果에 의하면 重力噴流의 퍼짐폭은  $Fd_0$ 가 클수록 작게되고  $Fd_0$ 가 작을수록 퍼짐폭이 크게 된다(Fig. 3). 그러므로, 鉛直方向噴流에서  $Fd_0$ 가 작은것이 퍼짐폭이 增大되어 混合稀釋이 活潑하게 된다는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2의 結果와도 一致한다.

鉛直方向放流時 噴流의 퍼짐상태를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 4는  $Fd_0$ 數에 따라 放流口로부터의 鉛直높이에서의 濃度分布를 室田 (1982)의 實驗結果에 plot한 것으로서 두 結果는 잘 一致하고 있다. 여기서, 橫축은 噴流中心軸上  $C_c$ 값의 半值半幅에 無次元 表示한  $y/y_{0.5}$ 를 나타낸다.

Fig. 5는 中心軸上에서의 濃度遞減狀態를 室田 (1982)의 實驗結果에 plotting하여 비교한 그림이다. Fig. 4 및 Fig. 5에서 本 實驗의 結果值들은  $Fd_0=4, 7, 10$ 에서 plotting된 것들이다.

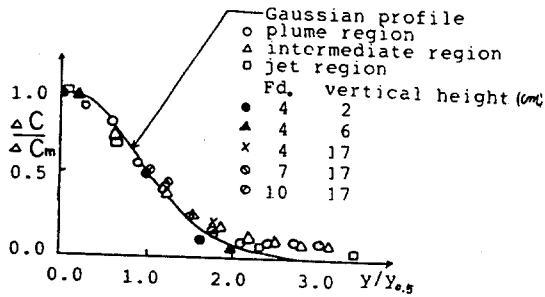


Fig. 4. Horizontal distribution of concentration in each condition.

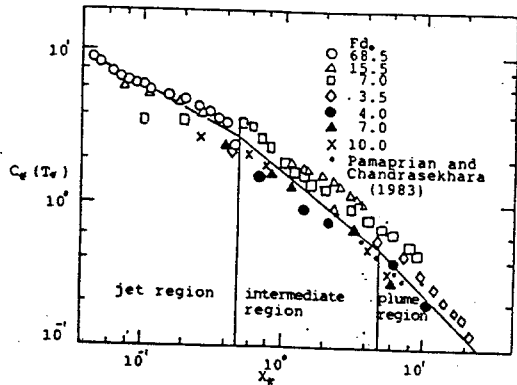


Fig. 5. Diminution of  $C^*$  along the center of path line for the vertical discharge.

## 2. 水平方向 重力噴流

水平方向重力噴流는 放流口徑이 single-port diffuser는  $0.8\text{cm}$ , multiport diffuser는  $0.4\text{cm}$ 를 使用하였다.

本 實驗에서는 먼저 視覺으로 噴流中心軸을 確認한 후에 測定하여 data를 얻었다. Fig. 6은 single-port diffuser를 使用하였고, 水平方向放流에서  $C_c$ 의 變化를  $h/l_M$ 에 따라 나타내었다. 여기서,  $l_M$ 은 특성길이로서  $Fd_0$ 에 따라 變化하는 특성량이다.  $C_c$ 의 變動特性은 全領域에서 大體적으로  $Fd_0$ 가 클수록 낮은 값을 나타낸다. 그러므로, 水平方向放流에서는  $Fd_0$ 가 큰 것이 混合稀釋이 活潑하게 된다. 그러나  $h/l_M=2$  前·後에서는  $C_c$  값의 變化가 不規則의이다. 이것은 實驗上의 오차에 의한 것으로 생각된다. 橫축을  $l_M$ 으로서 無次元化 한것은,  $Fd_0$ 가 變함에 따라 變하게 되는 放流流量의 效果를 고려하기 위해서이다.

그림에서  $h/l_M=1$ 까지는  $C_c$ 값이 아주 급하게 變한다. 이것은 水平放流가 초기단계에서 混合稀釋이 活潑하게 일어난다는 것을 나타낸다. 그리고 室田 等(1982)에 의한 研究結果와도 一致한다.

Fig. 7은 噴流中心軸上에서 濃度遞減率을 나타내는 그림으로서 室田 等(1982)에 의한 實驗結果에 plotting하여 나타내었다. (●, ○, ×). 橫축은 式(3)의  $X^*=Fd_0^{-1}(\frac{\rho}{\rho_a})^{-1/4}(\frac{X}{D})$ 에서  $X$ 대신에 噴流經路를 대신 使用하였다. 實驗값은  $Fd_0=10$ 에서 약간의 分散을 나타내지만, 大部分은 Chen·

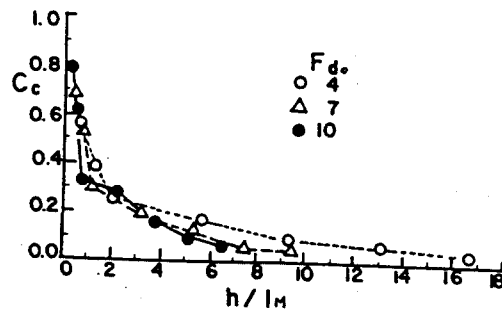


Fig. 6. Comparison of relative successive diminution ( $C_c$ ) for the horizontal discharge in the case of  $Fd_0=4, 7$  and  $10$ .

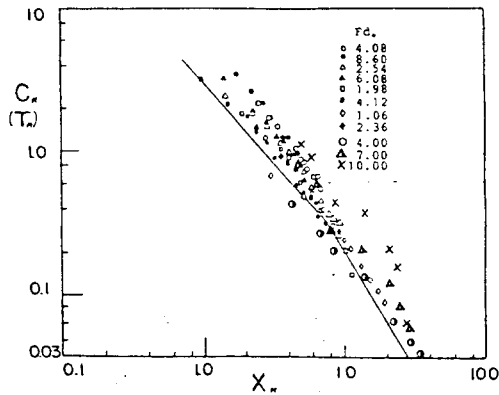


Fig.7. Variation of diminution  $C^*$  along the center of path line for horizontal discharge in the case of  $Fd_0=4, 7$  and  $10$ .

Rodi(1980)의 半經驗式(실선)에 잘 一致하고 있다.

水平放流에서 multi-port diffuser를 使用했을 시  $C_c$ 의 變化를 Fig.8에 나타내었다. 全體적으로  $Fd_0$ 가 큰것이  $C_c$ 의 값이 낮게 나타남으로서 混合稀釋이 더 活潑함을 알 수 있다.

Fig. 9는 水平方向放流時  $Fd_0$  14, 21, 27일때의 放流數의 퍼짐상태를 나타내고 있는 寫眞이다. Fig. 10은 水平方向 重力噴流의 經路를 Abraham (1965)의 無次元表示를 利用하여 나타내었다. 그림중의 실선은 片野(1977)의 實驗式을 나타낸 것으로서 本 實驗의 結果와 잘 一致함을 알 수 있다.

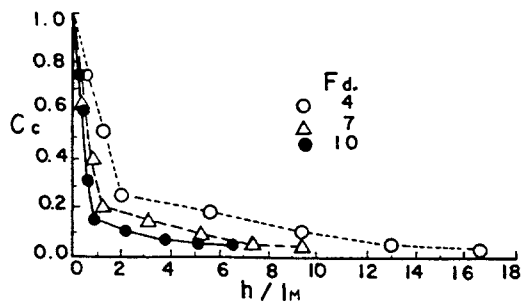


Fig.8. Comparison of relative successive diminution  $C_c$  for multi-port diffuser discharge in the case of  $Fd_0=4, 7$  and  $10$ .

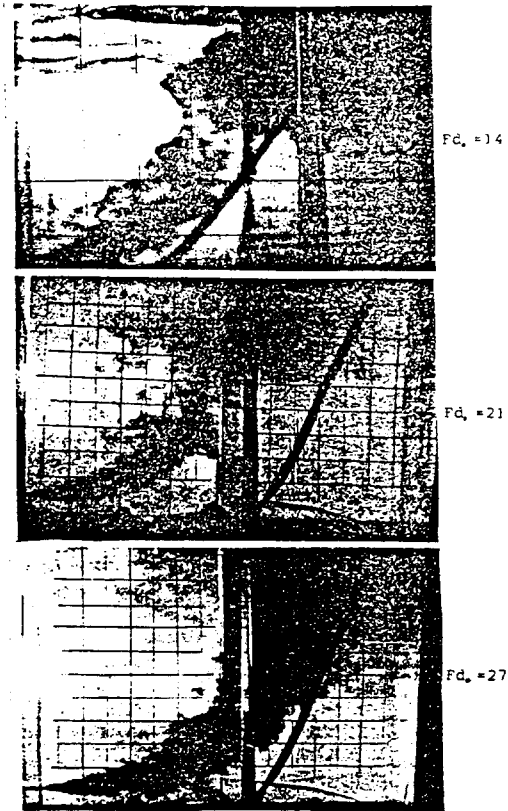


Fig.9. The pictures of horizontal discharge in case of  $Fd_0=14, 21$  and  $27$ .

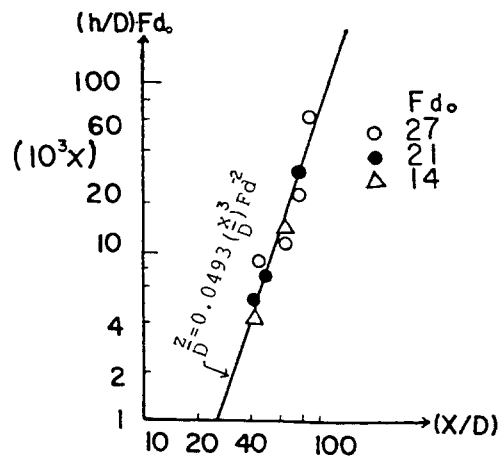


Fig.10. Variation of trajectory along the center of path line for horizontal discharge.

### 3. 鉛直方向과 水平方向 重力噴流의 比較

鉛直方向과 水平方向放流時의  $C_c$  값의 變化를 比較하여 Fig. 11에 나타내었다. 水平方向분류는 single-port diffuser와 multi-port diffuser이다. 鉛直方向, 水平方向 모두 同一한 流量을 放流했을 때의 그림으로서, multi-port diffuser, single-port diffuser, 鉛直方向放流의 順으로 混合희석이 잘 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11에서 각 放流條件에 따라 最小自乘法에 의한  $C_c$  값의 變化式을 구하면 式(5)와 같다.

鉛直放流(.....) :

$$C_c = 0.8087 - 0.439h + 0.0006h^2$$

multi-port diffuser (—) :

$$C_c = 0.4966 - 0.0237h + 0.0003h^2 \quad (5)$$

Single-port diffuser (- - -) :

$$C_c = 0.766 - 0.043h + 0.0006h^2$$

이상의 결과로부터, 混合稀釋效果를 증대시키기 위해서는 鉛直方向重力噴流에서는  $Fd_0$ 가 작아야 하고, 水平方向重力噴流의 多孔管放流에서는 放流口徑이 작아져야 混合稀釋效果가 增大된다.

Fig. 12는 水平方向 single-port diffuser와 鉛直方向重力噴流와의 濃度比( $\frac{C_{c-h}}{C_{c-v}}$ )를  $h/D$ 에 따라 나타낸 것이다. 放流口近處에서는, 水平放流가 鉛直放

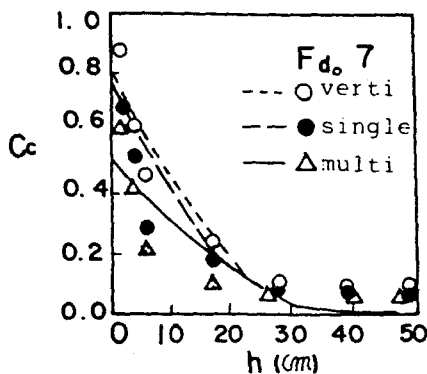


Fig. 11. Comparison of relative successive diminution  $C_c$  along the center of path line for the vertical and horizontal discharge in the case of  $Fd_0=7$ .

流에 비해서 점차 매우 活潑하게 混合稀釋되는 것으로  $\frac{C_{c-h}}{C_{c-v}}$  나타났는데, 이것은 水平放流에 있어서 放流初期에는 浮力과 慣性力의 作用方向이 다르기 때문이다.  $h/D=7.5$  근처에서는 水平方向放流時 慣性力과 浮力의 作用方向이 비슷해지는 遷移領域이기 때문에 混合稀釋效果가 減少하는 것으로 나타났다.

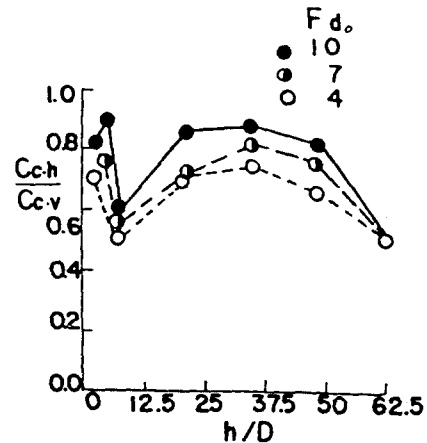


Fig. 12. The ratio of horizontal discharge to vertical discharge  $C_c$ .

그러나, 水表面近處에 도달하면  $Fd_0$ 에 상관없이 모두 一定한 값에 도달하게 된다. 그리고,  $h/D=7.5$ 에서의 濃度比는 水表面에서의 값과 거의 비슷한 分布를 나타내고,  $Fd_0$ 에 상관없이 水平方向과 鉛直方向의 濃度比의 分布는 비슷한 形狀을 보였다.

### 要約 및 結論

沿岸海域에 低密度 Froude數의 液體를 放流할 때 隣近海域에 미치는 影響을 低減하기 위해서, 重力噴流의 混合·稀釋特性을 알아 보았다.

鉛直方向放流時 密度 Froude數가 작은 것이 噴流의 퍼짐폭이 增大하여 放流水의 混合·稀釋이 活潑해진다. 水平方向放流時 密度 Froude數가 클수록 混合·稀釋效果가 增大된다. 水平方向放流가 鉛直方向放流보다 混合稀釋效果가 뛰어난다. 水平方向放流時 多孔管으로 放流하는 것이 單孔管의 경우보다 效果적이다. 이는 放流水를 分散시켜 放流함

으로서 周圍水와 접하는 表面積이 增大되기 때문이다.

文 獻

- 片野尙明 等 (1972) : 單一水平放流管による溫排水の水溫低減化に関する研究. 電力中央研究所報告 376012, 95.
- 林泰造 等 (1975) : 海面上に放流された溫排水の擴がりについての數値解析—第二報. 土木學會 第19回 水理講演會論文集, 173~182.
- 室田明 等 (1979) : 表層密度流の界面における亂れ構造について. 土木學會 第23回 水理講演會論文集, 399~404.
- 林泰造 等 (1979) : 水表面放出溫噴流の基礎的實驗. 土木學會 第23回 水理講演會論文集, 405~414.
- 室田 明外等 1人(1981) : 表層密度噴流における渦動の合體過程に関する實驗的研究. 土木學會 第25回 水理講演會論文集, 561~568.
- 室田明 等 (1982) : 新垂水下處理場處理水放流の最適方式の選定およびその擴散効果の確認.
- 室田明 等 (1982) : 淺水海域に放流される下水處理水の混合稀釋特性について. 第29回 海岸工學講演回論文集, 604~608.
- 室田明 等 (1984) : 2次元つお-ストブリー-ムの水理特性. 第31回海岸工學講演會論文集, 640~644
- 中辻啓二 (1984) : 表層密度噴流の混合機構と擴がりに関する基礎的研究. 65~77.
- 玉井信行 (1980) : 密度流の水理. 土木學會, 70~125.
- Waldrop, W.R. and R.C. Farmer(1974) : Three-dimensional computation of buoyant plumes. J. Geophys. Res. 1269~1276.
- Nihoul, J.C.J. and Y. Adam(1974) : Dispersion and settling around a waste disposal point in a shallow Sea. J. Hydraulic Rese 171~186.
- Kotsovinos, N.E. and E.J.List(1977) : Plane turbulent buoyant jets. Part 2. Turbulent structure. J.Fluid Mech., 8(1), 45~62.
- Chen, C.J. and W.Rodi(1980) : Vertical turbulent buoyant jets, A Reveiw of experimental data. Pergamon Press, 83.
- Ramaprian, B.R. and M.S. Chandrasekhara(1983) : Study of vertical plane turbulent jet and plumes. IAHR, Report, No. 257.
- Antonia, R.A. and L.W.Browne(1983) : On the organized motion of a turbulent plane jets. J Fluid Mech. 134, 49~66.
- Subramanya, K. and P.D.Porzy(1985) : Trajectory of a turbulent cross Jet. J. Hydr Res. 343~354.
- Akira Murota and Keiji Nakatsuji(1987) : On large scale coherent structure in trubulent plane plume. 2nd Int. Symp. on transport phenomena in "turbulent Flows," Tokyo, 121~134.