

<論 文>

海洋放流口에서 放流된 Jet 流의 擴散모형

(Model of Jet Flow Dispersion Discharged from Ocean Outfalls)

李 正 圭\*

Lee, Jong Kyu

Abstract

An improved mathematical model is presented which will predict the initial minimum dilution and terminal rise height of wastewater discharged from ocean outfalls into density stratified water flowing at an arbitrary direction and speed.

Solutions are derived for discharge into linearly stratified water, based on three-dimensional experimental work on line plumes in unstratified currents. The effects of current speed, direction, stratification and type of nozzle are discussed, and the model predictions are compared to laboratory experiments.

要 旨

海洋放流口에서 연직密度勾配가 있고, 임의의 水流의 方向과 速度를 가지고 흐르는 周邊水中으로 放流되는 廢水의 초기 최소 희석도와 最終上昇高를 예측하는 개선된 數學的 模型을 提示하였다. 밀도구배가 없는 均일한 水中에서 線分플룸의 放流실험을 통하여 얻은 結果를 利用하여 線形밀도구배를 가진 水中으로 放流되는 경우에 대한 解가 유도되었다.

流速, 流向, 밀도의 成層化 및 노즐의 형태에 대한 影響이 高찰되었으며 計算結果는 실험치와 比較되었다.

行되고 있다.<sup>3,8)</sup>

1. 緒 論

人口는 계속적으로 증가하고 國民所得과 生活文化水準이 向上되면서 廢水(Wastewater)의 量이 엄청나게 증가하고 있으며, 廢水의 處理문제는 심각한 社會的 都市문제로 대두되고 있다.

1970年代 이후 폐수처리의 한 方法으로 海岸에 가까운 곳에 位置한 都市에서는 1차 處理된 廢水(혹은 發電所에서 排出되어 나오는 冷却水)를 海洋放流口를 通하여 깊은 바다에 放流시켜서 바닷물과 混合稀釋시켜 處理하는 方法이 施

海洋放流口를 통한 廢水處理方法은 近海域의 海水를 오염시킬 뿐 아니라 여러 가지로 生態系의 變化를 비롯한 문제가 야기될 수 있기 때문에 이에 따른 문제를 最小化하기 위하여 模型실험<sup>1,2,5,9,12,13)</sup>을 통한 연구와 數值실험<sup>14)</sup>을 통하여 放流된 廢水의 擴散機構를 究明하고 확산관(Diffuser)의 설계기준과 설치方法 등을 연구하는 한편 美캘리포니아주의 例<sup>13)</sup>와 같이 海岸의 오염방지를 위한 基準과 法的 規制가 더욱 강화되고 있다.

放流口에서 放流된 유출폐수의 擴散과정(Dis-

\* 漢陽大學校 工大 土木工學科 教授

persion Process)을 周邊水(Ambient Water)에 의한 초기희석단계, 폐수가 最終上昇高(Terminal Rise Height)에 도달한 後 水平으로 퍼지면서 생기는 廢水場(Wastewater Field)의 붕괴단계 및 水流에 의한 亂流擴散과 移送단계의 3 단계로 구분하고 있다.<sup>3,5)</sup>

이전의 많은 研究는 多孔海洋放流擴散管(Multiport Ocean Outfall Diffuser)의 流出廢水の 擴散문제를 2 차원 문제로 取扱하였으나<sup>3,11)</sup> 깊은 바다에 設置되는 擴散관은 有限한 길이를 가지고 있기 때문에 3 차원 흐름으로 解析하는 것이 端部の 영향이 고려된 실제 現象에 가깝다고 할 수 있다.<sup>2,5)</sup>

또한 폐수의 擴散과정은 주변수의 밀도분포가 均一한 경우와 成層化(Stratified)된 경우에 큰 차이가 있을 뿐 아니라 周邊水の 流速, 流向 등이 큰 영향을 미친다는 것이 알려져 있다.

Roberts<sup>2)</sup>는 擴散관의 流出孔을 통한 Jet 流는 유출 후에 쉽게 合流하기 때문에 線分源(Line Source)으로 거동하며 따라서 本 문제를 線分플룸(Line Plume)으로 취급할 수 있다고 하였다. 플룸은 初期 운동량과 체적플럭스(Volume Flux)가 없는 浮力플럭스(Buoyancy Flux)만 가진 Source로 定義된다.

合流된 부력 Jet 流에 대한 초기희석도(Initial Dilution)에 관한 研究는 周邊水가 정지상태이거나 移動하는 조건하에서 광범위하게 연구되어 왔지만 부력 Jet 流의 相互作用에 관한 연구는 거의 없는 實情이다.<sup>5)</sup>

現實的 문제로 成層化된 海流 속으로 放流되는 廢水の 초기희석도와 최종상승고를 豫測할 필요가 있다. 그러나 이러한 擴散문제는 현상이 대단히 복잡하기 때문에 現在로써는 임의의 조건하에서 海流에 의한 희석도를 예측할 수 있는 方法은 없다. 임의의 밀도분포를 가진 주변수로 放流되는 Jet 流에 대한 力學은 잘 알려져 있으며<sup>3)</sup> Wright는 成層化된 水流과 非成層化된 水流 속으로 放流된 개별 圓形 Jet 流를 연구하였다.<sup>6)</sup>

周邊水の 밀도가 均일한 경우와 成층화된 경우는 초기희석도와 최종상승고에 있어서 차이가 있을 뿐 아니라 확산형태(Dispersion Pattern)도

다른 特性을 가진다. 다시 말하면 밀도가 均一한 경우에는 廢水가 水面까지 도달하지만 成層化된 경우에는 流出廢水가 받는 浮力이 水深에 따라 변하기 때문에 대개는 폐수가 水面까지 도달하지 못하게 되며 초기 稀釋度도 작게 된다.

Roberts<sup>2,5)</sup>는 밀도가 均일한 周邊水에서 확산관의 길이가 有限한 경우에 대한 3 차원적 實驗을 실시하여 最小水面 희석도(Minimum Surface Dilution)를 구할 수 있다는 圖表를 얻었다.

本 研究는 Roberts의 실험도표를 利用하여 成層化된 海流에 放流된 廢水の 초기 희석도와 최종 상승고를 예측하는 數學的 모형을 提示하고자 한다.

## 2. 解析方法

周邊水の 密度분포가 線形(Linear Stratification)인 경우에 Roberts<sup>2)</sup>는 Boussinesq의 가정 아래 플룸의 최종 상승고,  $y_m$ 을 다음 식으로 表示하였다(Fig. 1 과 2 참조).

$$y_m = f(u, b, L, \theta, \nu, G) \dots\dots\dots(1)$$

여기서  $u$ 는 주변수의 평균유속,  $b$ 는 다음 식으로 표시되는 單位길이당의 부력플럭스(Buoyancy Flux)

$$b = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_1} gq = \frac{\Delta\rho}{\rho_1} gq \dots\dots\dots(2)$$

$\rho_1$ 은 擴散관의 位置에서 주변수의 密度,  $\rho_0$ 은 유출폐수의 密度,  $q=Q/L$ 는 확산관의 단위길이당 체적플럭스,  $Q$ 는 총체적 플럭스,  $L$ 는 확산관의 길이,  $\theta$ 는 水流과 확산관 사이의 角度,  $\nu$

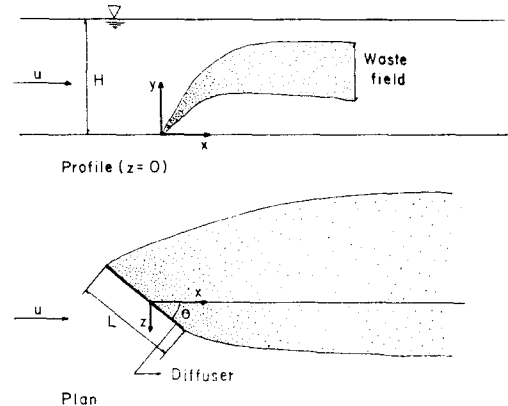


Fig. 1. Definition diagram

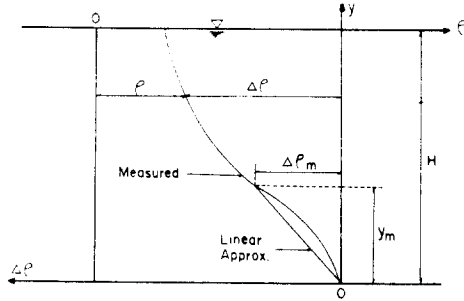


Fig. 2. Density profile sketch

는 동점성 계수,  $G$ 는 다음 식으로 표시되는 값이다.

$$G = \frac{-g}{\rho_1} \frac{d\rho}{dy} \dots\dots\dots(3)$$

$g$ 는 중력가속도,  $\rho(y)$ 는 주변수의 밀도,  $y$ 는 연직좌표이다.

실험<sup>5)</sup>에 의하면 확산관의 길이는  $3.75 < L/H < 30$ (여기서  $H$ 는水深)의 범위에서는 영향이 없으므로 成層化된 경우에도 똑같이 가정한다. 따라서 安全히 발달된 亂流에 대해서는 分子粘性의 영향이 무시될 수 있으므로, 식 (1)은 次元解析法에 의하여 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$\frac{y_m G^{1/2}}{b^{1/3}} = h(F, \theta) \dots\dots\dots(4)$$

여기서  $F = \frac{u^3}{b}$ 는 Froude數의 형태를 가진다.

식 (4)와 같은 형태로 표시된 실험자료는 없으므로 Roberts의 실험資料를 이용하여 解를 구한다.

Roberts<sup>5)</sup>에 의하면 최소수면회석도  $S_m$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{S_m q}{uH} = f(F, \theta) \dots\dots\dots(5)$$

Fig. 3은 식 (5)의 도표이다.

Fig. 3을 成層化된 경우에 적용하기 위하여 최종상승고의 회석도는 密度가 均一한 조건 밑에서 똑같은 상승고에서 얻을 수 있는 회석도에 비례한다고 假定한다.<sup>6)</sup> 즉,

$$\frac{S_m q}{uy_m} = \alpha f(F, \theta) \dots\dots\dots(6)$$

여기서  $\alpha$ 는 常數이며, Brooks<sup>1)</sup>는 線形밀도분포일 때 矩形플룸(Slot Plume)에 대하여 0.82를

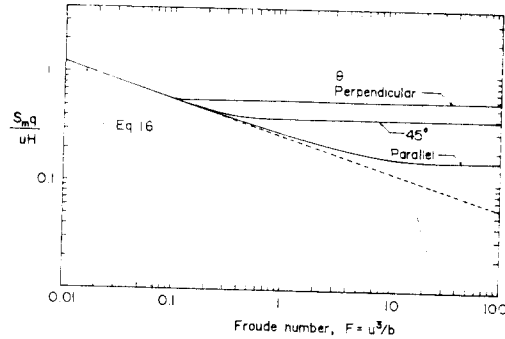


Fig. 3. Normalized minimum surface dilution from discharge of a diffuser approximating a line plume into an unstratified current (After Roberts<sup>2)</sup>)

얻었다.  $\alpha$ 에 대한 그 以上の 자료는 없으므로 Roberts<sup>6)</sup>는  $\alpha=1$ 을 취하였다.

成層化된 경우에 최종상승고  $y_m$ 을 구하기 위하여 周邊水の 밀도분포 斷面圖를 Fig. 2와 같이 密度不足量  $\Delta\rho = \rho_1 - \rho$ 로 나타낸다.  $\Delta\rho$ 는 反對方向으로 읽을 때 陽(+)<sup>의</sup> 값을 가진다.

Fig. 2에서와 같이 區間  $y_m$ 에서 密度分布는 近似的으로 線形이라고 생각하고, 주변수의 密度는 상승고에 대하여 平均密度와 같다고 가정하면 稀釋度  $S_m$ 은 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$S_m = \frac{\bar{\rho} - \rho_0}{\bar{\rho} - \rho_m} \dots\dots\dots(7)$$

다음에

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_1 + \rho_m}{2} \dots\dots\dots(8)$$

여기서  $\rho_m$ 는  $y_m$ 지점에서의 밀도이다.

식 (6)으로부터

$$S_m = \frac{\alpha u y_m f}{q} \dots\dots\dots(9)$$

$\alpha=1$ 일 때 식 (7), (8)과 (9)로부터 다음 식을 얻는다.

$$\frac{u y_m f}{g} = \frac{\Delta\rho_1 + \Delta\rho_2}{\Delta\rho_m} \dots\dots\dots(10)$$

여기서,  $\Delta\rho_1 = \rho_1 - \rho_0$

$\Delta\rho_2 = \rho_m - \rho_0$

$\Delta\rho_m = \rho_1 - \rho_m$ 이다.

이제 최종상승고에서 動的 平衡(Dynamic Equilibrium)이 이루어졌다면 廢水의 密度는 周邊密度와 같아야 한다.

즉,  $y=y_m$ 일 때  $\Delta\rho = \Delta\rho_m$ 이다.

식 (3)으로부터  $\Delta\rho_m = \frac{\rho_1 G y_m}{g}$  이므로 식 (10)을 재정리하면  $y_m$ 을 구하는 식을 얻는다.

$$y_m = \sqrt{\frac{\Delta\rho_1 + \Delta\rho_2}{\frac{u\rho_1 f}{q} \frac{G}{g}}} = \sqrt{\frac{2\Delta\rho_1 g q}{\rho_1 u G f} \cdot \frac{\Delta\rho_1 + \Delta\rho_2}{2\Delta\rho_1}} = \sqrt{\frac{2\Delta\rho_1 g q}{\rho_1 u G f}} \cdot k \dots\dots\dots(11)$$

식 (10)에서 유속  $u$ 를 알면  $y_m$ 을 계산할 수 있다.  $y_m$ 을 計算하는 순서는 다음과 같다.

$$F = \frac{u^3}{b}$$

이므로 식 (2)를  $b$ 에 代入하여 재정리한다.

$$F = \frac{u^2}{\frac{\Delta\rho_0 \cdot g}{\rho_1}} \frac{u}{q} \dots\dots\dots(12)$$

식 (11)은 다음과 같이 고쳐 쓴다.

$$\frac{u}{q} = \frac{F \Delta\rho_1 g}{u^2 \rho_1} \dots\dots\dots(13)$$

식 (13)에서 右邊의 값은 Fig. 3과 관측치로부터 모두 구할 수 있는 값이므로 계산이 가능하다. 따라서 식 (11)에서  $u$ 를 알면  $y_m$ 을 구할 수 있다.

### 3. 計算結果 및 比較考察

流速이 零에 접근하는 경우의 特殊解를 구한다. 이 경우에 상승고는  $F$ 와  $\theta$ 에 무관하므로 식 (4)는 다음과 같이 된다.

$$y_m = C b^{\frac{1}{3}} G^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(14)$$

여기서  $C$ 는 常數이다.

Fig. 4에서 Froude 數가 작은 경우에  $C=2.69$ 이다. 즉,

$$y_m = 2.69 b^{\frac{1}{3}} G^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(15)$$

$C$  값에 대하여 Brooks<sup>11)</sup>는  $C=2.84$ 를 얻었고, Roberts<sup>5)</sup>는  $S_m \gg 1$ 인 경우에 필자의 재계산으로  $C=2.72$ 를 얻었다. Brooks는  $C$  값을 계산할 때 연행계수(Entrainment Coefficient)와 퍼짐비(Spreading Ratio)를 이용하였다.  $C$  값의 차이가 생기는 이유는 아직 分明히 밝혀져 있지 않은나 실험방법과 접근方法의 차에서 비롯된다고

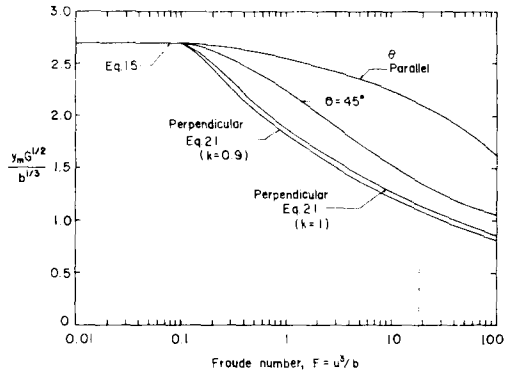


Fig. 4. Normalized terminal rise height in density stratified ambient water.

볼 수도 있다고 생각된다.

$F \rightarrow 0$ 일 때 Roberts<sup>5)</sup>는 식 (5)를 다음 식으로 표시하였다.

$$\frac{S_m q}{uH} = 0.27 F^{-\frac{1}{3}} \dots\dots\dots(16)$$

최종 상승고에서 動的 평형이 이루어졌다고 하면  $H=y_m$ 이라고 놓고, 식 (15)와 식 (16)을 결합한다.

$$S_m = 0.73 b^{\frac{2}{3}} q^{-1} G^{-\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(17)$$

식 (17)에서 常數값으로 Roberts<sup>6)</sup>는 0.73, Brooks<sup>11)</sup>는 0.87을 얻었다. 이 理由에 대하여 Roberts는 Brooks가 분석할 때 Jet 流의 Blocking의 효과를 무시한 때문일 것이라고 지적했다. 식 (15)와 식 (17)은  $F < 0.1$ 인 경우에 적용할 수 있다.

다음에 水流가 擴散管에 직각이고 주변수의 밀도분포가 線型일 때  $F > 0.1$ 인 경우에  $f=0.58$ 이므로 식 (11)로부터

$$y_m = 1.86 \left( \frac{b}{uG} \right)^{\frac{1}{2}} k \dots\dots\dots(18)$$

식 (6)으로부터

$$S_m = 1.08 \left( \frac{\Delta\rho_1 g u}{\rho_1 q G} \right)^{\frac{1}{2}} k \dots\dots\dots(19)$$

을 얻는다.

윗 식들로부터  $y_m$ 은  $u^{\frac{1}{2}}$ 에 반비례 하고  $S_m$ 은  $u^{\frac{1}{2}}$ 에 比例한다는 것은 Roberts의 결과<sup>6)</sup>와 같으나 Roberts가 구한 식은  $k=1$  경우 즉,  $\Delta\rho_1 \cong \Delta\rho_2$ 인 경우에 대한 近似解라는 것을 알 수 있다.

식 (18)은 다음 식 (20)과 같이 변형되며

$$\frac{y_m G^{\frac{1}{2}}}{b^{\frac{2}{3}}} = 1.86 F^{-\frac{1}{6}} k \dots\dots\dots(20)$$

Fig. 4에 圖示되어 있다.

식 (19)는 다음과 같이 변형시킬 수 있다.

$$\frac{S_m g G^{\frac{1}{2}}}{b^{\frac{2}{3}}} = 1.08 F^{\frac{1}{6}} k \dots\dots\dots(21)$$

확산관이 水流에 45°인 경우와 평행인 경우에 대해서도 유사한 식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$\theta=45^\circ$ 일 때

$$\frac{S_m g G^{\frac{1}{2}}}{b^{\frac{2}{3}}} = 0.90 F^{\frac{1}{6}} k \dots\dots\dots(22)$$

$\theta=0^\circ$ 일 때(수류와 평행인 경우)

$$\frac{S_m g G^{\frac{1}{2}}}{b^{\frac{2}{3}}} = 0.57 F^{\frac{1}{6}} k \dots\dots\dots(23)$$

식 (21), (22) 및 (23)은 Fig. 5에  $k=1$ 인 경우가 圖示되어 있다.

Fig. 4와 5를 考察해 보면 Roberts의 지적<sup>5)</sup>과 같이 水流에 대한 擴散管의 方向은 밀도구배가 있는 주변수에서 폐수의 희석도와 상승고에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

$F < 0.1$ 일 때는 擴散管의 方向은 큰 문제가 되지 않는다. 그러나  $F$ 가 0.1보다 커지면서 그 영향이 점점 크게 나타난다. 좀더 자세히 설명하면 확산관이 水流에 직각일 때 최대희석도와 최저상승고를 나타내며 평행일 때 최저희석도와 최대상승고를 보여준다. 확산관의 方向의 영향은  $F$ 가 커짐에 따라서 증가하며  $F=100$ 일 때 직각인 경우가 평행인 경우에 비하여 희석도는 약

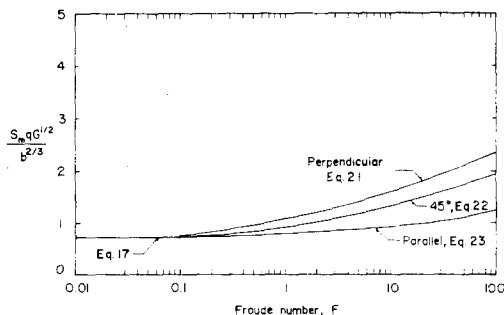


Fig 5. Asymtotic minimum dilution in density stratified ambient water computed by mathematical model ( $k=1$ )

2배로 증가한 반면 상승고는 약  $\frac{1}{2}$ 로 감소하였다. 여기에 비하여 밀도가 均一한 경우는 폐수장은 항상 水面까지 도달하였고 상승고는 일정하였다.

그러므로  $F=100$ 일 때 희석도에 관해서 고찰해 보면 밀도구배가 없는 경우(균일한)가 있는 경우에 비하여 2배 정도 크게 나타나며  $F$ 가 작아짐에 따라 이 영향은 감소한다.

밀도분포의 영향을 살펴보면 그 영향은 크지는 않으나 수심에 따른 밀도차가 커지면 희석도와 상승고가 감소하는 것을 알 수 있으며 Roberts의 근사값과 비교해 보면  $\Delta\rho_2/\Delta\rho_1=0.9$ 일 때 2.5%가 작게 나타난다.

本 研究에서 얻은 결과를 최근의 실험결과<sup>9)</sup>와 比較해 보면  $\frac{S_m q G^{\frac{1}{2}}}{b^{\frac{2}{3}}} \sim F$ 의 관계를 볼 때 전반적으로  $F$ 가 증가함에 따라 증가하는 면에서는 같은 傾向을 보이고 있으나  $F < 0.1$ 에서

$$\frac{S_m q G^{\frac{1}{2}}}{b^{\frac{2}{3}}} = 0.97 \text{ 이고}$$

$F=100$ 일 때 Fig. 5의 값의 약 2배 되는 것을 알 수 있다. 또한 Fischer, et al<sup>4)</sup>은 0.88 Wright et al<sup>12)</sup>은 0.96을 얻었다.

이와 같은 차이가 발생하는 데 대한 정확한 理由는 아직 알 수 없지만 前者는 線分플룸으로 실험하였으나 後者(비교된 값들)는 폐수가 양쪽으로 유출되는 Jet 流로 실험하였으며 확산관의 노즐의 구조가 다르기 때문에 폐수에 초기혼합기구(Initial Mixing Mechanism)이 다르기 때문이 아닌가 생각된다. 좀더 정확한 것을 이해하기 위해서는 더 많은 실험 등을 통하여 研究究明되어야 할 것으로 생각된다.

#### 4. 結 論

海洋放流口에서 放流된 廢水의 혼합확산 현상에 대하여 周邊水의 密度가 均一한 조건하에서 3차원적 실험을 수행한 Roberts의 實驗도표를 利用하여 線形으로 成層化된 周邊水에 放流할 때 생기는 廢水의 最小稀釋도와 最終上昇高를 예측할 수 있는 數學的 모형을 提示하였다.

本 모형은 Roberts 의 모형에 비하여 수학적으로 正確解를 구할 수 있으며 密度差( $\Delta\rho_1$  과  $\Delta\rho_2$ )의 영향이 포함되어 있다. 모형의 계산결과를 실험치와 비교할 때 상당한 차이를 보여주는 데 이것은 확산관의 노즐의 형태가 다르고 따라서 放流된 Jet 流의 合流에 따른 擴散機構가 다르기 때문일 것으로 생각되어 앞으로 더욱 깊은 연구가 있어야 될 것으로 생각된다.

### 謝 辭

本 연구는 한국과학재단의 1985년도 海外研修 지원금을 받고, 미국 Georgia Institute of Technology 에 체재 중 수행되었기에 同 財團에 감사사를 드리며, 논문의 그림을 그려준 토목공학과 4년 이종인 군에게 사의를 표한다.

### 參 考 支 獻

- 1) Brooks, N.A., "Dispersion in Hydrologic and Coastal Environments," W.M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Report No. KH-R-29, Dec., 1972.
- 2) Roberts, P.J.W., "Dispersion of Buoyant Wastewater Discharged from Outfall Diffusers of Finite Length," W.M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology Report No. KH-R-35, Mar., 1977.
- 3) Koh, R.C.Y. and Brooks, N.H., "Fluid Mechanics of Wastewater Disposal in the Ocean, Annual Review of Fluid Mechanics," Vol.7, 1975, pp.187~211.
- 4) Fischer, H.B., et al., "Mixing in Inland and Coastal Waters," Academic Press, 1979, pp. 390~410.
- 5) Roberts, P.J.W., "Line Plume and Ocean Outfall Dispersion," J. of the Hydraulics Div., Proc. of ASCE, Vol.105, HY4, Apr., 1979, pp.313~331.
- 6) Roberts, P.J.W., "A Mathematical Model of Initial Dilution for Deepwater Ocean Outfalls." Proc. of the Specialty Conference on Conservation and Utilization of Water and Energy Resources, ASCE, Aug., 1979, pp.218~225.
- 7) Roberts, P.J.W., "Ocean Outfall Dilution: Effects of Currents," J. of the Hydraulics Div., Proc. of ASCE, Vol.106, HY5, May, 1979, pp. 769~782.
- 8) Roberts, P.J.W., "Engineering of Ocean Outfalls," Personal Note, 1985.
- 9) Roberts, P.J.W. and Snyder, W.H., "Merging Buoyant Jets in a Stratified Crossflow," Proc. of Third International Symposium on Stratified Flows, California Institute of Technology, Pasadena, Calif. Feb., 1987.
- 10) Isaacson, M.S. et al., "Plume Dilution for Diffusers with Multiport Risers," J. of Hydraulics Eng., ASCE, Vol.109, No.2, Feb., 1983, pp.199~220.
- 11) Wright, S.J. and Wallace, R.B., "Two-Dimensional Buoyant Jets in Stratified Fluid," J. of the Hydraulics Div., Proc. of ASCE, Vol.105, HY11, Nov., 1979, pp.1393~1406.
- 12) Wright, S.J. et al., "Outfall Diffuser Behavior in Stratified Ambient Fluid," J. of the Hydraulics Div., Proc. of ASCE, Vol.108, HY4, Apr., 1982, pp.483~501.
- 13) Koh, R.C.Y. et al., "Hydraulic Modeling of Thermal Outfall Diffusers for the San Onofre Nuclear Power Plant," W.M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology Report No. KH-R-30, Jan., 1974.
- 14) Chin, D.A. and Roberts, P.J.W., "Model of Dispersion in Coastal Waters," J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.111, No.1, Jan., 1985, pp. 12~28.