

# 3次元 數值模型에 의한 表面溫排水 擴散의 數值解析

## Numerical Analysis of Surface Thermal Jets by Three-Dimensional Numerical Model

鄭泰成\* · 李吉成\*\*

Jung, Tae Sung · Lee, Kil Seong

### Abstract

A three-dimensional numerical model of surface buoyant jets with variable density was established. The model uses fully nonlinear, time-dependent, three-dimensional,  $\sigma$ -transformed equations of motion and equation of heat transport. A semi-implicit numerical scheme in time has been adopted for computational efficiency. The model was applied for thermal jets discharging into a stagnant water and the simulated results were compared with a hydraulic experimental data set showing good agreement. Comparative studies of exchange coefficients and stability functions indicated that spatial variation of exchange coefficients should be considered and the existing stability functions should be modified to simulate surface buoyant jets accurately.

### 요 지

密度效果를 고려한 물의 流動에 관한 3次元 數值模型을 수립하여, 靜止水域으로의 表面溫排水 擴散問題를 해석하였다. 수립된 數值模型은 수심방향에 대해 正規化한 座標( $\sigma$ -coordinate)에서 無次元화된 식들을 사용하며, 時間 積分方法으로는 半陰解法을 사용하여 계산시간의 效率성을 도모하였다. 溫排水 擴散 水理實驗結果와의 비교를 통하여 모형의 信賴성을 검토하였으며, 溫排水 擴散(密度流) 계산시 鉛直 擴散係數와 成層效果를 고려하기 위해 사용되는 安定函數의 여러 형태에 대한 계산결과를 비교하였다. 수립된 모형은 水理實驗資料와 일치하는 양호한 계산결과를 보였다. 온배수 확산 모의시 鉛直 擴散係數의 空間의 分布를 고려해야함을 확인할 수 있었으며, 표면온배수 확산을 정확히 모의하기 위해서는 기존에 널리 사용되는 安定函數가 수정될 필요가 있었다.

### 1. 序 論

自然河川과 海岸에서의 溫排水 擴散은 河川流, 吹送流, 潮流, 溫排水 젯트, 密度流 등이 복합된 3

次元적 흐름에 의하여 移送·擴散된다. 이러한 溫排水 擴散現象을 비교적 정확히 模擬할 수 있는 3次元 數值模型은 구조가 복잡하고 막대한 계산시간을 요구하나 자연현상을 보다 정확하게 모의하기 위하여 필요하다. 온배수 확산에 관한 3次元 數值模型은 溫度差에 의해 발생되는 密度 成層化의 영향을 고려해야 한다. 따라서, 密度流에 관한 수치모형의 한

\* 正會員 · 韓國海洋研究所 海洋工學部 先任研究員

\*\* 正會員 · 서울大學校 工科學 土木工學科 教授

에로 볼 수 있으며, 均質流에 대한 支配方程式에 추가로 溫度에 관한 擴散方程式과 密度를 계산하기 위한 狀態方程式을 추가로 해석하여야 하며, 密度效果를 고려할 수 있는 鉛直 擴散係數의 도입이 필요하다.

온배수 확산에 관한 3차원 수치모형의 既存研究로 McGuirk와 Rodi<sup>(1)</sup>는 靜止水域으로의 온배수 확산을 定常狀態의  $\kappa$ - $\epsilon$  亂流模型에 의하여 계산하고 Pande와 Rajaratnam<sup>(2)</sup>의 水理實驗資料와 비교하였으며, Wada와 Araki<sup>(3)</sup>는  $\kappa$ - $\epsilon$  난류모형을 사용하여 정지수역으로의 온배수 확산을 계산하고 日本 中央電力研究所에서 수행한 수리실험자료와 비교하였으며, Raithby 등<sup>(4)</sup>은 Huron호의 沿岸에 위치한 Bruce 原子力發電所의 온배수 확산을 數值解析하였다. 국내의 경우에 허<sup>(5)</sup>는 表層 密度噴流를 3次元 수치모형에 의해 해석하고 표층 밀도분류의 특성을 분석하였으며, 최와 이<sup>(6)</sup>는 표면온배수 확산을 自由水面變化를 무시한 4-方程式 亂流模型을 사용하여 해석하였다. 또한 古里 原子力發電所의 溫排水 擴散,<sup>(7)</sup> 蔚珍 原子力發電所의 온배수 확산,<sup>(8)</sup> 靈光 原子力發電所의 온배수 확산<sup>(9)</sup>의 해석에 3차원 수치모형이 사용된 바 있다. 이외에 영광 원자력발전소의 온배수 확산에 관한 水理模型實驗이 국립건설시험소<sup>(10)</sup>에 의하여 수행된 바 있으며, 한국해양연구소는 고리 원자력발전소의 온배수 확산 現場調査<sup>(11)</sup>와 온배수 확산모형에 관한 技術現況을 검토한<sup>(12)</sup> 바 있다.

본 연구에서는 自由水面을 고려한 密度流에 대한 3次元 非定常 流動模型을  $\sigma$ -座標系에서 수립하여, 靜止水域으로의 온배수 확산문제에 적용하고, Pande와 Rajaratnam<sup>(2)</sup>의 수리실험자료와 비교하여 모형의 信頼性을 조사하였다. 또한, 온배수 확산계산시 鉛直 擴散係數의 選定과 密度 成層化에 의한 鉛直 擴散의 減少를 고려하기 위하여 현재 널리 사용되는 安定函數의 選定이 流速 및 水溫分布 計算結果에 미치는 영향과 表面溫排水 擴散問題에의 適用性을 調査하였다.

## 2. 數值模型

본 연구에서 수립된 密度變化 및 自由水面을 고려한 溫排水 擴散에 관한 3차원 수치모형의 支配方程式, 初期 및 境界條件은 다음과 같다.<sup>(13)</sup>

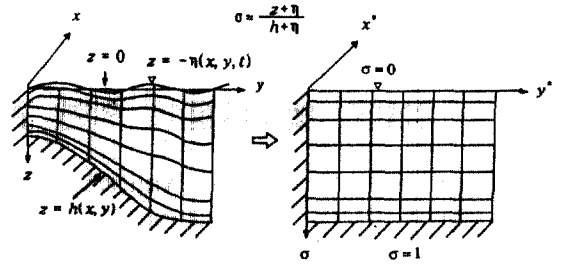


그림 1. 鉛直方向座標의 正規化

### 2.1 支配方程式

直交座標系에서 3次元 連續方程式, 運動量方程式, 水溫 擴散方程式을 鉛直變換座標(그림 1)에서의 식으로 변환하고, 無次元化하였다.

3차원 밀도류를 표현할 수 있는 Reynolds 평균된 3차원 連續方程式, 運動量方程式, 溫度 擴散方程式은 직교좌표계(그림 1,  $x$ 가 북쪽으로,  $y$ 가 동쪽으로,  $z$ 가 평균수면에서 바닥으로 증가하는 좌표)에서 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + fv = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial u}{\partial x}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial u}{\partial z}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} - fu = \\ - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial v}{\partial x}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial v}{\partial z}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (B_H \frac{\partial T}{\partial x}) \\ + \frac{\partial}{\partial y} (B_H \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (B_V \frac{\partial T}{\partial z}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $(u, v, w) = (x, y, z)$  방향의 流速成分,  $f = \text{Co}$

riolis 常數,  $\rho_0$ =물의 基準密度,  $p$ =壓力,  $(A_H, A_V)$  = 水平 및 鉛直 運動量 擴散係數,  $\rho$ =물의 密度,  $g$  = 重力加速度,  $T$ =水溫,  $(B_H, B_V)$ = 水平 및 鉛直 水溫 擴散係數이다.

연직방향의 運動量方程式 (4)는 鉛直加速度와 Reynolds 應力項이 重力加速度에 비하여 작다는 가정 하에 靜水壓 근사를 취하였으며, 密度差가 重力加速度에 곱해지는 경우를 제외하고 나머지항을 무시하는 Boussinesq 가정<sup>(14)</sup>이 식 (1)~(3)에 사용되었다.

수심  $z$ 에서의 壓力은 식 (4)를 水表面( $z = -\eta$ )에서 수심  $z$ 까지 積分하면 얻어지며 다음과 같다.

$$p = p_a + \int_{-\eta}^z \rho g dz \quad (6)$$

여기서,  $p_a$ 는 大氣壓이다.

식 (6)을 식 (2)~(3)에 대입하고, 식 (1)~(3), (5)를  $\sigma$ -座標(그림 1, Freeman 등<sup>(15)</sup>)에서 無次元 變數를 사용하여 변환하면,<sup>(13)</sup> 새로운 좌표( $x^*, y^*, \sigma^*, t^*$ )에서 다음과 같이 된다(아래 식에서 편의상 \*표시를 생략하였으며, 대기압은 무시하였다).

$$\frac{1}{H} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{K}{H} \left[ \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} \right] + K \frac{\partial \Omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{H} \frac{\partial(Hu)}{\partial t} + R_e \left[ \frac{1}{H} \frac{\partial(Huu)}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial(Huv)}{\partial y} \right. \\ & \left. + \frac{\partial(\Omega u)}{\partial \sigma} \right] + R_{0v} = - \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{R_e}{F_r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (H \int_0^\sigma \rho d\sigma) \right. \\ & \left. - \sigma \frac{\partial H}{\partial x} \rho \right] + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} (H \frac{\partial u}{\partial x}) \\ & + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} (H \frac{\partial u}{\partial y}) + \left( \frac{b_0}{h_0} \right)^2 \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\gamma \frac{\partial u}{\partial \sigma}) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{H} \frac{\partial(Hv)}{\partial t} + R_e \left[ \frac{1}{H} \frac{\partial(Huv)}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial(Hvv)}{\partial y} \right. \\ & \left. + \frac{\partial(\Omega v)}{\partial \sigma} \right] - R_{0u} = - \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{R_e}{F_r^2} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (H \int_0^\sigma \rho d\sigma) \right. \\ & \left. - \sigma \frac{\partial H}{\partial y} \rho \right] + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} (H \frac{\partial v}{\partial x}) \\ & + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} (H \frac{\partial v}{\partial y}) + \left( \frac{b_0}{h_0} \right)^2 \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\gamma \frac{\partial v}{\partial \sigma}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_r \left[ \frac{1}{H} \frac{\partial(HT)}{\partial t} + R_e \left\{ \frac{1}{H} \frac{\partial(HuT)}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial(HvT)}{\partial y} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\partial(\Omega T)}{\partial \sigma} \right\} \right] = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} (H \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \\ (H \frac{\partial T}{\partial y}) + \left( \frac{b_0}{h_0} \right)^2 \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\beta \frac{\partial T}{\partial \sigma}) \end{aligned} \quad (10)$$

직교좌표에서 변수와 새로운 좌표에서 변수와 관계는 基準距離(=  $b_0$ ), 基準水深(=  $h_0$ ), 基準流速(=  $u_0$ ), 基準時間  $t_0 = b_0^2/A_H$ 로 무차원화하면, 거리 ( $x^*, y^*, \sigma^*$ ) = ( $x, y, \sigma b_0$ )/ $b_0$ , 수심  $H^* = H/h_0$ , 유속( $u^*, v^*, \Omega b_0^*$ ) = ( $u, v, \Omega b_0$ )/ $u_0$ , 시간  $t^* = t/t_0$ , 수면변위  $\eta^* = \eta/(A_H u_0/gb_0)$ ,  $K = gb_0^2 h_0/A_H^2$ , 기준 Reynolds 수  $R_e = u_0 b_0/A_H$ , 기준 Ekman 수(수평마찰력의 Coriolis 힘에 대한 비)의 역수  $R_0 = fb_0/A_H$ , 기준 Froude 수의 제곱  $F_r^2 = u_0^2/gh_0$ ,  $\gamma = A_V/A_H$ , Prandtl 수(운동량 확산계수의 수온 확산계수에 대한 비)  $P_r = A_H/B_H$ ,  $\beta = B_V/B_H$ . 여기서, 연직유속  $\Omega = d\sigma/dt$ , 연직변환좌표  $\sigma = (\eta + z)/H$ , 총수심  $H = h + \eta$ ,  $h$  = 평균수심,  $\eta$  = 수면변위이다.

물의 密度는 水溫의 函數로 다음과 같이 나타내었다.<sup>(16)</sup>

$$\begin{aligned} \rho = (5890 + 38T - 0.375T^2) / [ (1779.5 + 11.25T \\ - 0.0745T^2) + 0.698(5890 + 38T - 0.375T^2) ] \end{aligned} \quad (11)$$

## 2.2 初期 및 境界條件

水面上에서의 熱交換을 무시하면, 水溫에 대한 水面 境界條件은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0 \quad (12)$$

바닥 境界條件으로 유속에 대해서는 無滑動(no-slip)條件을, 수온에 대해서는 바닥면을 통한 교환이 없다고 가정하면 다음과 같다.

$$u = v = \Omega = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \sigma} = 0 \quad (13)$$

模型境界內로 流量의 流入이 있는 濶排水 放流口에서는 流速과 水溫을 지정하였으며, 陸地境界에서는 유속에 대해 無滑動條件( $u = v = 0$ )을 사용하였다. 開境界에서 流速과 水溫에 대해서는 경계에서의 값

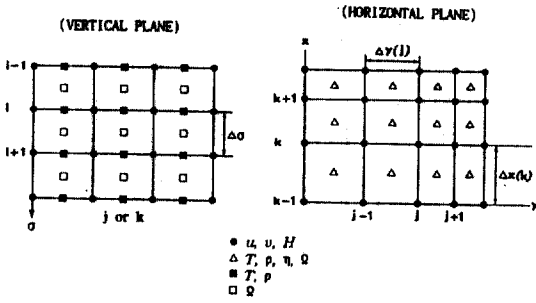


그림 2. 計算 格子體系

을 隣接 内部點의 값과 같은 값으로 지정하였다. 초기조건으로는 유속, 수면변위를 0으로 놓았으며, 初期水溫은 水理實驗<sup>(2)</sup>의 初期水溫으로 지정하였다.

### 3. 數值解析方法

數值解析方法은 有限差分法으로 운동량방정식 (8)과 (9)에서 鉛直 擴散項, Coriolis항, 水面傾斜項을 陰解法으로 해석하고, 移送項과 水平 擴散項을 FTCS(Forward Time and Centered Space)법에 의해 해석하였다. 특히, 表面重力波에 의한 계산시간 제약을 극복하기 위하여 모드분리개념<sup>(17)</sup>을 도입하여 수면변위에 관한 橢圓型 차분식을 유도하여 해석하였다. 連續方程式과 運動量方程式의 차분식, 수면변위 계산식에 대한 차분식의 誘導過程과 安定條件은 정<sup>(13)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

水溫 擴散方程式 (10)에 관한 차분식은 이송항과 수평 확산항을 FTCS법, 연직 확산항은 時間加重值  $\theta_T$ 에 의해 일반화된 음해법을 사용하면, 그림 2의 格子體系에서 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & P_r \left( \frac{H^{n+1}}{H^n} T_i^{n+1} - T_i^n \right) - \Delta t \frac{H^{n+1}}{H^n} \left( \frac{b_0}{h_0} \right)^2 \frac{\theta_T}{(\Delta \sigma)^2} \\
 & H_v \left[ \beta_{i+1/2}^{n+1} (T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}) - \beta_{i-1/2}^{n+1} (T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}) \right] = \\
 & \Delta t \left[ e_i^n + \left( \frac{b_0}{h_0} \right)^2 \frac{1 - \theta_T}{(H^n)^2 (\Delta \sigma)^2} \right. \\
 & \left. \left[ \beta_{i+1/2}^n (T_{i+1}^n - T_i^n) - \beta_{i-1/2}^n (T_i^n - T_{i-1}^n) \right] \right] \quad (14)
 \end{aligned}$$

여기서,  $n$ 은 현재 시간단계,  $n+1$ 은 새로운 시간 단계,  $\theta_T$ 는 시간단계에 대한 加重值로 1이면 음해법, 0.5이면 Crank-Nicolson법, 0이면 양해법이다.

또한,  $H_v = \frac{H^n}{(H^{n+1})^3} \approx \frac{H^n}{(2H^n - H^{n-1})^3}$ ,  $e_i^n$ 는 이송항과

$$\begin{aligned}
 \text{수평 확산항} &= -R_e P_r \left[ \frac{1}{H} \frac{\partial (HTu)}{\partial x} + \frac{1}{H} \frac{\partial (HTv)}{\partial y} + \right. \\
 & \left. \frac{\partial (\Omega T)}{\partial \sigma} \right] + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left( H \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left( H \frac{\partial T}{\partial y} \right)
 \end{aligned}$$

에 관한 차분식이다. 상기 차분식은 삼중대각행렬이 되며 Thomas 알고리즘에 의하여 계산하였다.

### 4. 擴散係數

수치모형에 있어서 擴散係數는 數值解析 결과에 큰 영향을 미치며, 특히 연직 확산계수의 선정은 3차원 수치모형에 있어서 매우 중요하다. 擴散 實驗 結果에 의하면, 수온의 水平 擴散係數는 일반적으로 擴散 특성길이(characteristic length of diffusion)의 指數函數 形態로 나타낼 수 있으며, 확산 특성길이의 1.15~1.33승에 비례하는 것으로 알려져 있다.<sup>(18)</sup> 水平 運動量 擴散係數는 계산결과를 平활화하는 작용을 하는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서 운동량과 수온의 수평 확산계수는 計算領域에서 동일하다고 가정하였다.

鉛直 擴散係數의 산정방법으로는 간편성으로 인하여 널리 사용되고 있는 函數形態(영-방정식 난류모형)를 사용하였다. 최근에는 普遍性을 이유로 난류의 수송방정식을 해석하는 多方程式 亂流模型들이 사용되기도 한다.<sup>(6,19)</sup> 챗트류하에서 鉛直 擴散係數는 자유난류에 대한 수리실험 결과로부터 混合距離는 混合領域의 폭(연직 확산계수의 경우는 水深)에 비례하는 것으로 가정한 Prandtl의 理論<sup>(20)</sup>에 의하면 다음과 같다.

$$A_{v0} = 0.0256H(u^2 + v^2)^{1/2} \quad (15)$$

$$B_{v0} = A_{v0}/\sigma_t \quad (16)$$

여기서, 0.0256은 실험결과로부터 구한 값이며,  $\sigma_t$ 는 Prandtl 수로 본 연구에서 1.0<sup>(3)</sup>을 사용하였다.

위 식은 均質流에 대한 것으로 成層化된 흐름의 경우의 연직 확산계수는 中立狀態의 값보다 그 크기가 작으며, 成層效果를 나타내는 다음의 Richardson 수  $R_i$ 의 函數로 나타낼 수 있다.

$$R_i = g \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) / \left( \rho \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (17)$$

$R_i$ 는 密度傾斜  $\partial \rho / \partial z$ 와 流速傾斜  $\partial U / \partial z$ 가 鉛直混

표 1. 安定函數의 예

Researcher	$f(R_i)$	$g(R_i)$
Munk and Anderson <sup>(21)</sup>	$(1 + 10R_i)^{-0.5}$	$(1 + 3.33R_i)^{-1.5}$
Mamayev <sup>(22)*</sup>	$e^{-0.4R_i}$	$e^{-0.8R_i}$
Delft Hydraulics Lab. <sup>(23)*</sup>	$e^{-1.5R_i}$	$e^{-3.0R_i}$
Officer <sup>(24)</sup>	$(1 + R_i)^{-1}$	$(1 + R_i)^{-2}$
Vreugdenhil <sup>*</sup>	$(1 + 30R_i)^{-1}$	$1.17(1 + 6.53R_i)^{-1.5}$

\*referenced from Leendertse and Liu<sup>(25)</sup>

습에 미치는 영향의 비를 나타낸다.  $R_i$ 가 양이면 안정된 成層化로  $R_i$ 값이 작으면 中立狀態에서의 亂流가 그대로 維持되나 커지면 亂流混合이 억제되며,  $R_i$ 가 음이면 亂流混合이 증가된다.

일반적으로 成層狀態에서의 확산계수는 다음과 같이 나타낸다.

$$A_v = A_{v0}(R_i) \quad (18)$$

$$B_v = B_{v0}(R_i) \quad (19)$$

여기서,  $A_{v0}$ 와  $B_{v0}$ 는 成層化를 고려하지 않은 경우의 각각 運動量과 物質(수온)의 연직 확산계수이다. 식 (18)과 (19)에서  $f(R_i)$ 와  $g(R_i)$ 는 安定函數로 불리우며, 研究者들에 의해 사용되어온 形態들은 표 1과 같다.

그림 3은 표 1의 運動量 擴散係數에 대한 安定函數  $f$ 와  $R_i$ 의 관계를, 그림 4는 物質 擴散係數에 대한 안정함수  $g$ 와  $R_i$ 와의 관계를 도시한 것으로  $R_i$ 가 증가함(成層化)에 따라 확산계수는 급격히 감

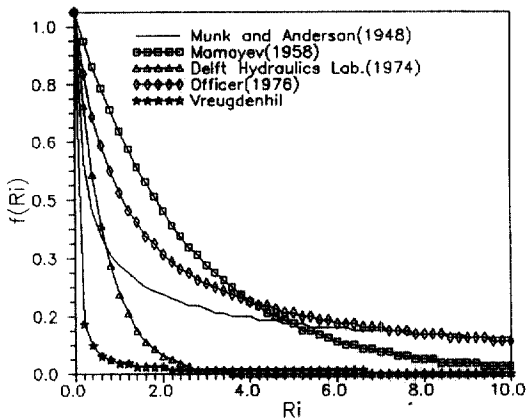


그림 3. 鉛直 運動量 擴散係數에 관한 安定函數

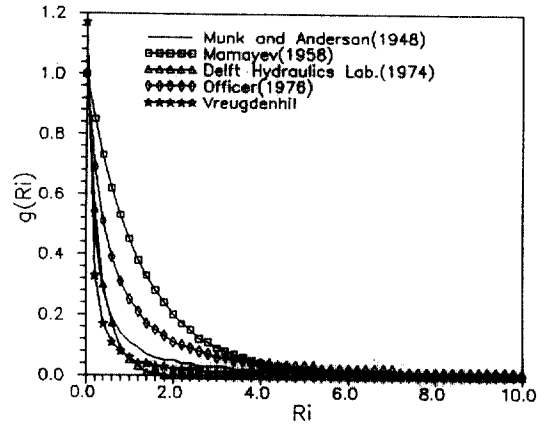


그림 4. 鉛直 水溫 擴散係數에 관한 安定函數

소하는 특성을 보여주고 있다.

### 5. 模型의 檢證 및 安定函數의 敏感度 分析

Pande와 Rajaratnam<sup>(2)</sup>은 靜止水域으로 수심( $H_0$ ) 4.62 cm, 폭( $B_0$ ) 4.91 cm의 直四角形 開水路를 통하여 周圍水 溫度( $T_c$ ) 13.5°C 보다 14°C 높은 27.5°C의 溫水가 유입되는 경우에 대하여 水理模型實驗을 하였다. 放出溫水의 密度 Froude수  $[U_0/(gH_0\Delta\rho/\rho)^{1/2}]$ 는 2.56이었다. 여기서  $U_0$ ,  $H_0$ 는 각각 溫水 放出口에서의 放流流速(=9.82 cm/sec)과 放流水深이다. 그림 5는 Pande와 Rajaratnam<sup>(2)</sup>의 實驗條件을 나타내는 그림으로 위 그림은 鉛直斷面을 아래 그림은 平面을 나타내며, 實驗結果(觀測水溫)는 점으로 표시되어 있다. 실선은 McGuirk와 Rodi<sup>(1)</sup>가  $\kappa$ - $\epsilon$  亂流模型을 사용하여 계산한 결과로 放出水의 水溫과 周圍水溫(방출 온배수의 영향을 받지 않는 지점의 수온)과의 차( $\Delta T_x$ )에 대한 수온과 주위수온과의 차( $\Delta T_y$ )의 비가 0.4와 0.6인의 等溫線이 젯트 중심축 부근(젯트축을 중심으로 수온분포가 대칭을 이루고 있음)에서 주위수에 비하여 낮은 수온을 보이고 있다. 그림 5에서 Expts는 Pande와 Rajaratnam<sup>(2)</sup>의 수리실험결과로 각 기호들은 방류유속으로 무차원화된 표층 유속이다.

이를 數值模型에 의하여 模擬하기 위하여, 320 cm × 157.12 cm의 計算領域(그림 6)을 설정하고, 計算 空間格子間隔을 x방향에 대해 20 cm, y방향에 대해 4.91 cm로 분할하고, 總水深 9.24 cm를 수심방향에 대해 10개층( $\Delta\sigma=0.1$ )으로 분할하여 총수심의

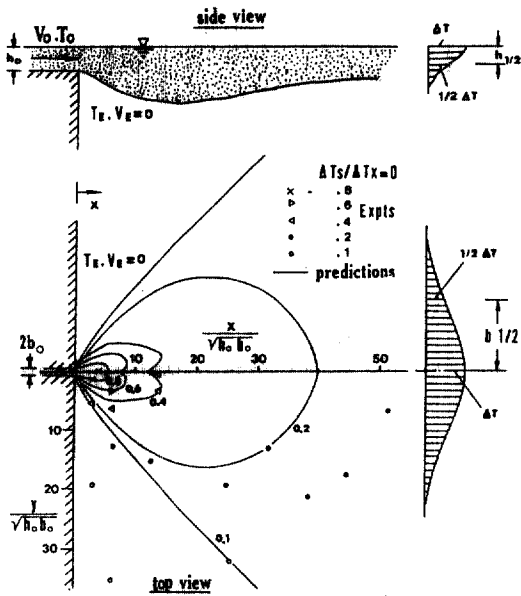


그림 5. 表面溫排水 擴散의 概念圖 및 水理實驗結果(19)

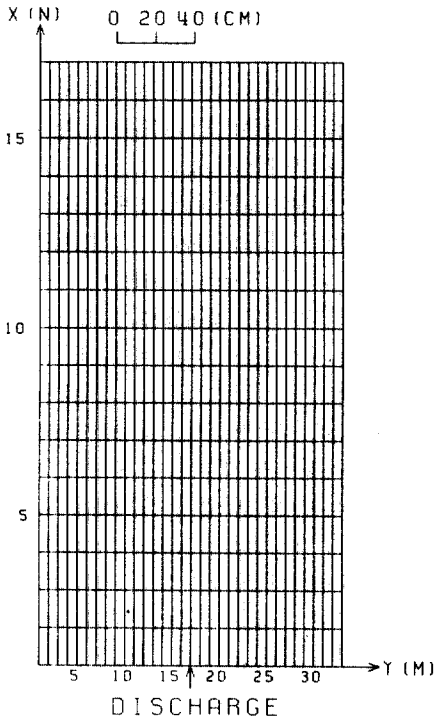


그림 6. 溫排水 擴散 解析을 爲해 구성된 計算格子網

반(\$z=0-4.62\$ cm)으로 온수가 유입토록 하였다. 水溫分布의 初期條件은 수리실험과 동일하고 기타 조

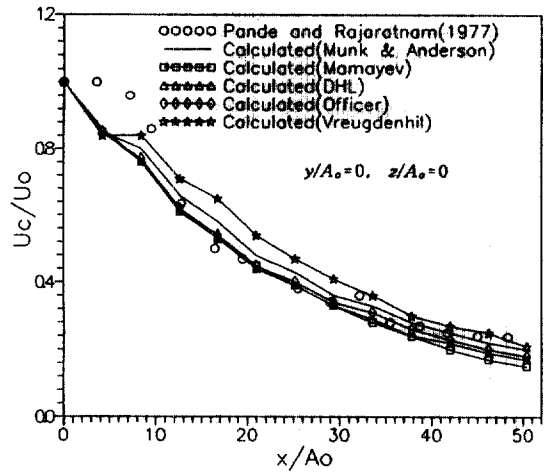


그림 7. 젯트방향 表層 流速의 減少

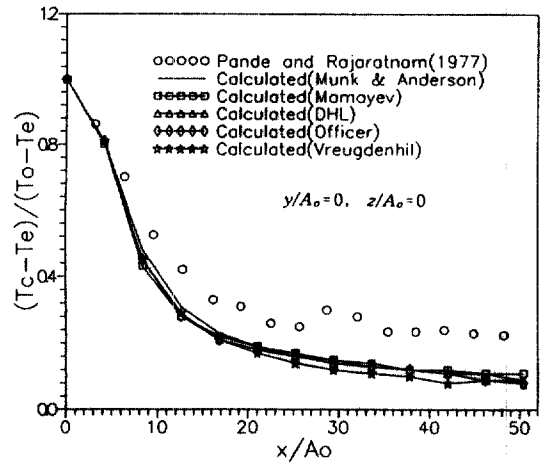


그림 8. 젯트방향 表層 超過水溫의 減少

기조건으로  $\eta, u, v, \Omega=0$ 을 사용하였으며, 개경계에서는 流速과 水溫에 대해 인접 内部格子點의 값과 같은 값을 부여하였다. 計算 時間間隔은 0.1초이며, 계산시작후 200초 이상에서는 계산결과가 거의 변화하지 않고 준정상상태에 도달함에 따라 200초에서의 계산결과를 연구결과로 제시하였다. 水平 擴散係數는 Prandtl의 混合距離 理論에 기초한 放流口에서의 값  $0.0256B_0 U_0$ 의 반으로 가정[식 (15)에서 수심  $H$  대신 폭  $B_0$ 의 반을 사용]하여 구한  $A_H = B_H = 0.617 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ,<sup>(3)</sup> 中立狀態의 鉛直 擴散係數는 식 (15)와 (16)을 사용하였다.

그림 7과 8은 5가지 형태의 安定函數(표 1)를 사용하여 계산한 젯트 중심축 방향의 거리에 따른 각각

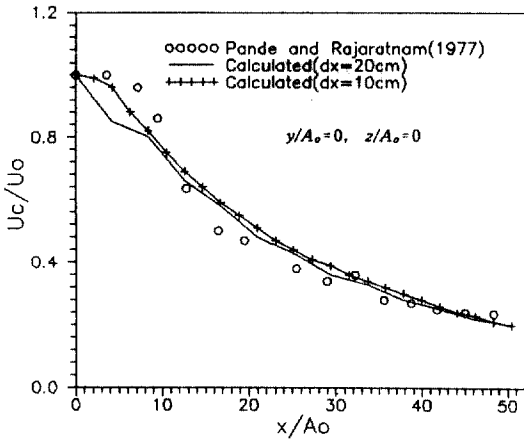


그림 9. 수평 격자크기의 敏感度 分析

表層流速과 表層水溫의 變化이다(여기서  $A_0 \equiv \sqrt{BH_0} = 4.763 \text{ cm}$ 이다). 流速變化는 Vreugdenhil의 安定函數를 사용한 경우를 제외하고는 計算流速이 實驗値와 대체로 일치하였다. 그러나, 수평 및 연직변화가 큰 온배수 젯트부근에서 Demuren<sup>(26)</sup>에 의해 지적된 바와 같이 수치모형의 제한된 格子數(計算 所要時間을 줄이기 위함)로 인하여 數值分散이 많이 일어나 수치모형이 放流口附近에서 流速變化를 정확히 模擬하지 못하였다. 이러한 원인은 數值分散과 더불어 방류구쪽에 대하여 제한된 格子數를 사용하여 방류구에서 流速分布를 정확히 입력하지 못하여 발생한 것으로 Wada와 Araki<sup>(3)</sup>는 格子數의 增加와 分布函數를 이용하여 수정가능함을 지적한 바 있다. 그림 9는 젯트방향의 격자크기에 대한 敏感度 分析을 수행한 결과로 젯트부근의 수치분산이 격자크기(20 cm)를 半(10 cm)으로 줄일 경우에 적게 일어나 젯트부근에서 計算流速이 實驗値에 더욱 近接하였다. 또한, 본 논문에는 제시되지 않았지만 연직격자크기를 반으로 줄여 계산하였을 때, 격자크기를 줄이기 전과 연직분포에서 거의 차이를 보이지 않았다. 水溫變化는 계산결과가 모두 거의 비슷하였으나 수온 값은 溫排水 放流口에서 먼거리에서 실험치에 비하여 작게 계산되었다. 이러한 이유는 McGuirk와 Rodi<sup>(1)</sup>에 의하여 지적된 바와 같이 수리실험이 제한된 영역에서 수행된 것으로 實驗水槽의 側壁에 의한 방해에 의하여 수리실험 조건이 영향을 받아 수리실험시 수온이 상승했을 가능성이 있음에 의하

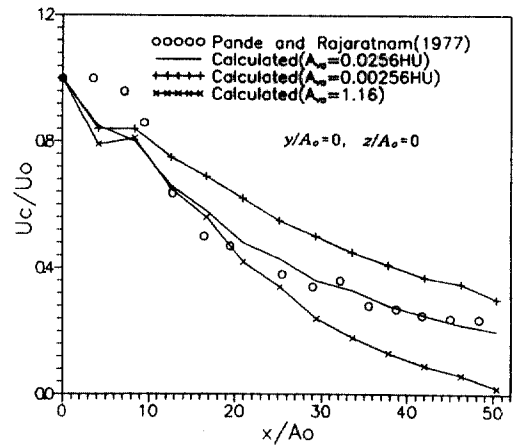


그림 10. 中立狀態 鉛直擴散係數의 敏感度 分析(젯트 방향 表層 流速)

여 설명될 수 있다. 이와 같이 水溫을 낮게 계산한 결과는 亂流模型을 사용한 계산결과에서도 나타났다.<sup>(1,6)</sup>

中立狀態에서의 鉛直 擴散係數  $A_{v0}$ 에 따른 계산 결과의 敏感度 分析을 3가지 경우 (a) 식 (15), (b)  $A_{v0} = 0.00256H(u^2 + v^2)^{1/2}$ (潮流計算時에 널리 사용<sup>(27)</sup>), (c) (a)에 의하여 산정한 젯트중심에서의 값  $A_{v0} = 1.16 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 에 대하여 表層流速과 水溫의 젯트축방향 변화를 조사하였다. 이때 안정함수로는 계산결과가 검토된 안정함수중에서 중간값을 보인 Munk와 Anderson<sup>(21)</sup>을 사용하였다. 유속(그림 10)은 (b)와 (c)를 사용한 경우 실험치와 많은 차이를 보이며, 젯트방향 유속감소가 실험치에 비하여 (b)를 사용한 경우는 완만하게, (c)를 사용한 경우는 급하게 감소하였다. 수온(그림 11)의 경우, (c)의 경우는 전반적으로 실험치에 비하여 크게 계산되었고, (b)의 경우는 (a)와 비슷하였다. 그림 12는 無次元화된 表面水溫의 수평 분포도로 (a)의 경우에 비하여 (b)와 (c)의 경우가 종방향으로 멀리, 횡방향으로 좁게 확산하였으며, (c)의 경우는 젯트부근에서 不安定한 수온 분포를 보여, 3차원 온배수확산 수치모형에서 鉛直 擴散係數의 空間變化가 고려되어야함을 알 수 있었다. 조류계산시 널리 사용하는 식을 사용한 (b)의 경우는 온배수 확산을 정확히 계산하지 못하였으므로(그림 10과 11), 鉛直擴散의 특성이 다른 흐름이 공존하는 복합흐름(예, 潮流와 젯트류가 함께 존재

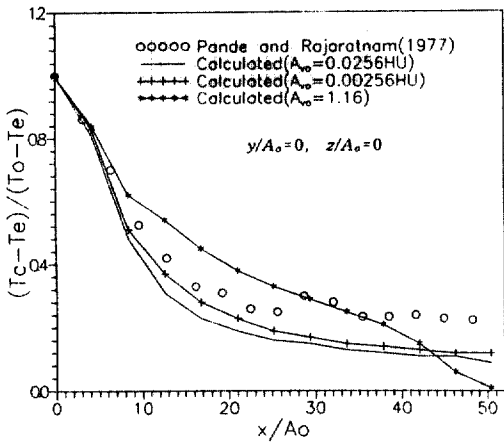


그림 11. 中立狀態 鉛直攪雜係數의 變換度 分析(젯트 방향 表層 超過水溫)

하는 경우)에서 연직 확산계수를 보편성을 갖고 산정할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

그림 13과 14는 표 1의 안정함수중에서 성층화에 따라 그 값이 가장 급격히 감소하는 Vreugdenhil, 중간크기로 감소하는 Munk와 Anderson<sup>(21)</sup>의 안정함수를 사용하여 계산된 젯트 中心軸方向의 一定地點( $x/A_0 = 6.4, 12.8, 25.6, 44.8$ )에서의 表面流速의 橫方向 分布 및 鉛直分布, 水溫의 橫方向 分布(좌측)와 鉛直分布(우측)의 실험치<sup>(2)</sup>와 비교도이다. 유속의

경우, 본 모형에 의한 모든 계산된 橫方向 分布形態는 젯트 중심축과 放流口 부근에서 실험치에 비교적 근접하게 산정되었다. 流速 鉛直分布는 모두 실험치에 비하여 수심방향으로 완만하게 변화 즉 연직방향으로 깊은 수심까지 확산하였으며, 分布形態는 Vreugdenhil의 경우가 실험치에 가장 근접하였다. 수온의 경우, 세 경우가 젯트로부터 멀리 떨어진 지점을 제외하고는 橫方向, 鉛直方向 分布가 모두 실험치에 비교적 일치하였다. 유속분포가 실험치에 비하여 완만하게 계산하는 현상은 본 연구와 같은 水理實驗資料와 비교한 다른 研究者(McGuirk와 Rodi<sup>(1)</sup>; 최와 이<sup>(6)</sup>)의 計算結果에서도 나타났다. 따라서, 본 모형에 의한 온배수 젯트에 대한 流速 및 水溫 計算値가 다른 연구자와 마찬가지로 유속의 연직분포를 완만하게 추정한 것을 제외하고는 대체로 실험치에 근접하는 계산결과를 보여, 온배수 젯트류에 대하여 模型이 正常的으로 수립되었음을 확인할 수 있었다. 鉛直分布를 실험치에 비하여 緩慢하게 추정하는 현상은 鉛直 格子間隔의 影響을 조사하기 위하여  $\Delta\sigma = 0.05$ 로 작게 하여 計算한 경우에도 개선되지 않았으며, 바닥경계의 영향여부를 조사하기 위하여 연직방향의 수심을 2배(방류구 수심의 4배)로 증가시켜 계산한 경우에도 개선되지 않았다. 그러나, 비교된 안정함수들중에 가장 실험

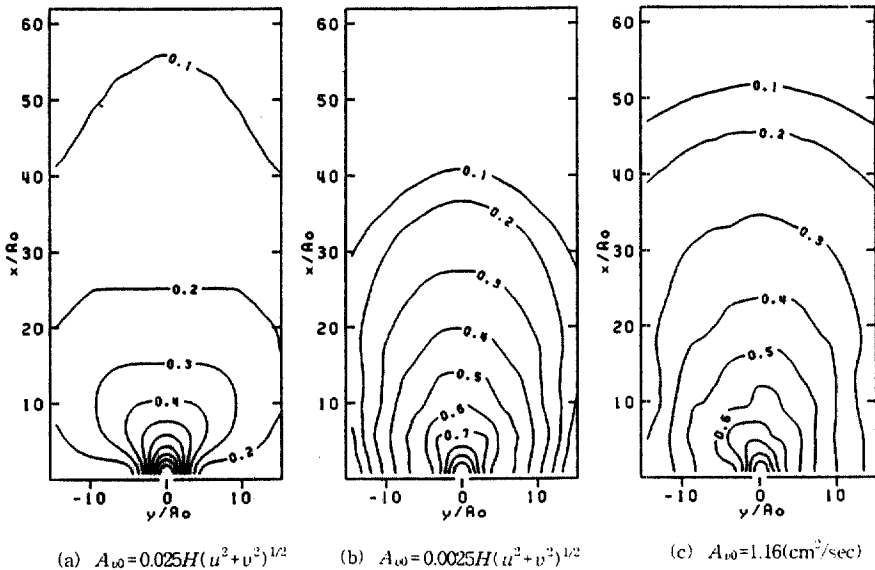


그림 12. 表層 超過水溫의 水平分布



- Pande & Rajaratnam (1977)
- Calculated (Munk & Anderson)
- + Calculated (Vreugdenhil)
- × Calculated (modified Vreugdenhil)

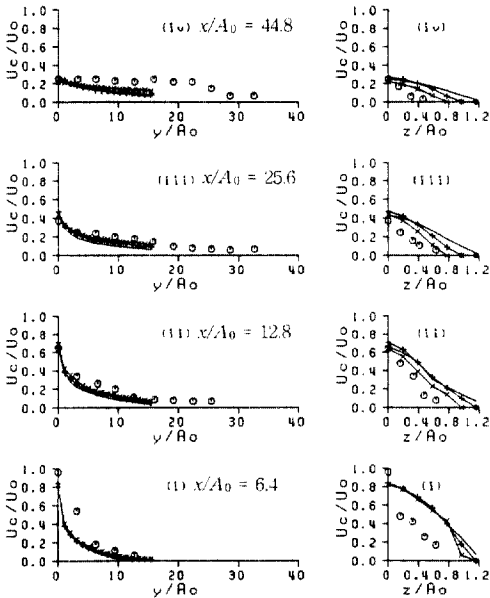


그림 13. 流速 分布

- Pande & Rajaratnam (1977)
- Calculated (Munk & Anderson)
- + Calculated (Vreugdenhil)
- × Calculated (modified Vreugdenhil)

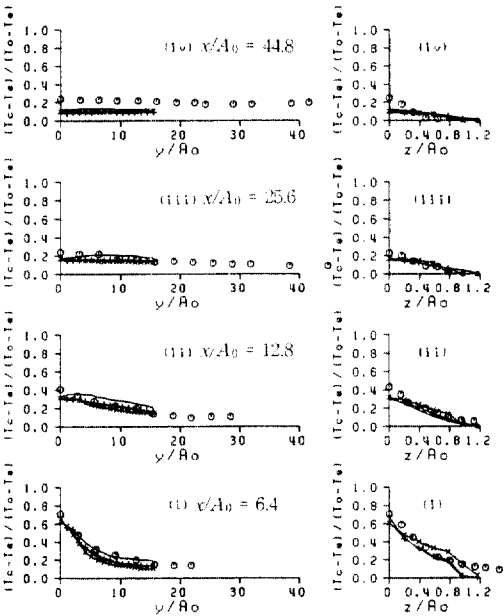


그림 14. 超過水溫 分布

치와 일치하는鉛直方向 확산깊이 및 分布樣相을 보인 Vreugdenhil의 경우에서 運動量 擴散係數에 대한 安定函數(표 1)의 指數  $-1$ 을  $-1.5$ 로 수정(연직방향 운동량 확산을 억제하기 위한, 난류모형의 경우 운동량과 수온에 대해 같은 연직 확산계수값을 사용하고 있음<sup>(1,3,6)</sup>)하여 계산한 경우(그림 13과 14의 modified Vreugdenhil)에는 流速의 鉛直分布가 보다 실험치에 근접하는 결과를 보였으며, 水溫의 경우는鉛直方向 擴散水深이 실험치와 더욱 일치하는 결과(연직 확산수심이 감소하여 실험치에 접근함)를 보였다. 이는 기존의 운동량 확산계수에 대한 안정함수식(표 1)이 밀도 성층화(R 수의 증가)에 따른鉛直擴散의 감소를 완전히 반영하지 못하고 있음을 의미한다. 따라서, 정확히 온배수 켓트현상을 모의할 수 있는 성층함수의 형태에 관한 연구가 요구된다.

## 6. 結 論

수립된 密度流에 관한 3次元 數值模型을 사용하여 溫排水 擴散을 해석하고, Pande와 Rajaratnam<sup>(2)</sup>의 水理實驗資料와 比較·檢證을 수행하였으며, 연직 확산계수에 대하여 敏感度 分析을 수행한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

수립된 모형에 의한 計算結果(유속 및 수온분포)는 수리실험자료와 대체로 일치하는 양호한 계산결과를 보여 模型의 密度流에 대한 적용성이 입증되었다. 密度 成層效果를 고려하기 위하여 본 연구에서 검토한 5가지 安定函數의 도입에 따른 계산결과들의 차이는 Vreugdenhil의 안정함수를 사용한 경우를 제외하고는 거의 나타나지 않았다. 그러나, 中立狀態에서 연직 확산계수의 변화에 따른 計算結果의 차이는 크게 나타났으며, 특히 연직 확산계수로 常數를 사용한 경우는 不安定한 모습을 보여 온배수 확산모의시 연직 확산계수의 空間變化를 고려해야 함을 알 수 있었다. 따라서, 다른 형태의 연직 확산계수를 갖는 서로 相異한 흐름이 共存(예, 潮流와 켓트류)하는 경우에 있어서 적용가능한 방법에 관한 연구가 있어야 할 것으로 사료되며, 이에 대한 연구가 진행중에 있다. 또한, 表面溫排水 擴散現狀을 정확히 모의하기 위해서는 기존에 사용되는 安定函數(특히 운동량에 대한 안정함수)가 密度 成層化에 의한 효과를 제대로 고려하지 못하여 鉛直方向으로 확산을 크게 하는 경향이 있으므로 安定函數를 수

정할 필요가 있음을 알 수 있었다. 따라서, 온배수 확산을 정확히 모의할 수 있는 안정함수에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 一定水深을 갖는 단순한 지형에 적용하여 模型의 정확성을 조사하였으나 水深이 변화하고 흐름장이 복잡한 실제 문제에서의 적용에 관한 연구가 필요하다고 하겠다.

### 감사의 글

본 연구는 한국해양연구소의 1992년도 기본연구 과제로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

### 参考文献

1. McGuirk, J.J., and Rodi, W., "Mathematical Modeling of Three-Dimensional Heated Surface Jets", *J. Fluid Mech.*, Vol. 95, No. 4, 1979, pp. 609-633.
2. Pande, B.B.L., and Rajaratnam, N., "An Experimental Study of Bluff Buoyant Turbulent Surface Jets", *J. Hyd. Res.*, Vol. 15, 1977, pp. 261-275.
3. Wada, W., and Araki, H., *Development of Predictive Method for Thermal Diffusion in the Sea Near the Cooling Water Outlet*, Civil Eng. Lab., Central Res. Ins. of Electric Power Industry, Japan, 1986.
4. Raithby, G.D., Elliot, R.V., and Hutchinson, B.R., "Prediction of Three-Dimensional Thermal Discharge Flows", *J. of Hyd. Eng.*, ASCE, Vol. 114, No. 7, 1987, pp. 720-737.
5. 허재영, "표층밀도분류의 3차원 수치해석", **한국해양안·해양공학학회지**, 제 3권 제 3호, 1991, pp. 152-162.
6. 최홍식, 이길성, "표면온배수 난류모형", **한국수문학회지**, 제 23권 제 3호, 1990, pp. 445-457.
7. Kim, K.H., *Assessment of the Thermal Impact of Kori Nuclear Power Plant Operations*, Prepared for Korea Power Engineering Company, Inc., The Univ. of Tennessee, Dept. of Eng. Sci. and Mech., Knoxville, Tennessee, 1983.
8. 한국해양개발주식회사, 울진원자력 2호기 건설사업 환경영향평가서, 한국전력공사, 1991.
9. 한국해양연구소, 영광원자력 인근해양 환경영향평가, 한국전력공사, 1992.
10. 국립건설시험소, 영광 원자력발전소 냉각수 방수로 수리모형실험 보고서, No. 451, 건설부, 1984.
11. KORDI, *Oceanographic studies for Kori nuclear power plants*, 1979.
12. 한국해양연구소, 온배수 확산모델 개발 및 적용연구, 1985.
13. 정태성, 연안 해수유동 및 온배수 확산에 관한 3

- 차원 수치모형, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문, 1994. 2.
14. Phillips, O.M., *The Dynamics of the Upper Ocean*, Cambridge University Press, 1977, 336p.
15. Freeman, N.G., Hale, A.M., and Donard, M.B., "A Modified Sigma Equations' Approach to the Numerical Modeling of Great Lake Hydrodynamics", *J. of Geophys. Res.*, Vol. 77, No. 6, 1972, pp. 1050-1060.
16. Eckart, C., "Properties of water, Part II. The Equation of State of Water and Sea Water at Low Temperatures and Pressures", *American J. of Science*, Vol. 256, 1958, pp. 225-240.
17. Backhaus, J.O., "A Three-Dimensional Model for the Simulation of Shelf Sea Dynamics", *Dt. hydrogr. Z.*, Vol. 38, 1985, pp. 165-187.
18. Ro, Y.J., *Studies on the Diffusion Characteristics of Coastal Waters*, M.S. Thesis, Dept. of Oceanography, Seoul National University, 1980.
19. Rodi, W., *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics-a State of the Art Review*, Institut für Hydromechanik, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Federal Republic of Germany, 1984.
20. Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, McGraw-Hill Book Company, 1979.
21. Munk, W.H., and Anderson, E.R., "Notes on the Theory of the Thermocline", *J. of Mar. Res.*, Vol. 1, 1948, pp. 276-295.
22. Mamayev, O.I., "The influence of Stratification on Vertical Turbulent Mixing in the Sea", *Izv. Geophys. Ser.*, 1958, pp. 870-875.
23. Delft Hydraulics Laboratory, *Momentum and Mass Transfer in Stratified Flow*, Report R880, Delft Hydraulics Lab., 1974.
24. Officer, C.B., *Physical Oceanography of Estuaries and Associated Coastal Waters*, Wiley-Interscience, New York, 1976.
25. Leendertse, J.J., and Liu, S.-K., *A Three-Dimensional Model for Estuaries and Coastal Seas, Vol. II: Aspects of computation*, R-1764-OWRT, Rand Corp., Santa Monica, 1975.
26. Demuren, A.O., "Modeling Turbulent Jets in Crossflow", *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 2-1, Dynamics of Single-fluid Flows and Mixing, edited by N.P. Chermisinoff, 1986, pp. 430-465.
27. Bowden, K.F., Fairbairn, L.A., and Hughes, P., "The Distribution of Shearing Stresses in a Tidal Current", *Geophys. J. R. Astro. Soc.*, Vol. 2, 1959, pp. 288-305.

(接受: 1994. 8. 12)