

가로흐름 水域으로 放出되는 2次元 表面溫排水 數值模型 比較研究 A Comparative Study of Two-Dimensional Numerical Models for Surface Discharge of Heated Water into Crossflow Field

李南周* · 崔興植** · 李吉成*

Nam Joo Lee*, Hung Sik Choi** and Kil Seong Lee*

要 旨 : 가로흐름이 존재하는 천해역으로 방출되는 표면온배수에 의한 온도장의 정확한 예측을 위한 근해역 2차원 수치모형을 개발하였다. 개발된 모형은 4-방정식 난류모델로서 열적 시간상수에 대한 정보를 얻을 수 없는 2-방정식 난류모델의 단점을 극복하기 위하여 변동온도 자승 평균항 및 그것의 감쇠율에 대한 전달방정식을 2-방정식 모델의 전달방정식에 추가한 모델이다. 또한, 부력생성항 및 난류 열플럭스항을 도입하여 연직방향 확산현상을 고려하고자 하였다. 개발된 수치모형을 간단한 단면을 갖는 개수로 정상류의 경우에 대하여 적용하였으며, 그 결과를 기존의 실험결과 및 2-방정식 난류모델을 사용한 수치계산결과와 비교하였다. 4-방정식 모형에 의한 계산결과가 2-방정식 모형보다 실험결과와 잘 일치하였으며, 제트 포획 및 안정화 영역에서 온배수의 물리적 특성을 잘 재현하였다.

Abstract □ For an accurate prediction of the temperature field induced by heated water discharged into a shallow crossflow, a two-dimensional near-field numerical model is developed. It is based on a 4-equation turbulence model in which the transport equations for mean of the temperature fluctuation squared and its dissipation rate are added to those of a 2-equation turbulence model which cannot give the information of the thermal time scale ratio. Vertical diffusion is also considered by including buoyancy production and turbulence heat flux terms. The developed model is applied to a steady flow in an open channel with simple geometry and the results are compared with existing experimental data and those of the already established 2-equation turbulence model. Numerical results of the model agree with the experimental data better than those of the 2-equation model. The present model also simulates quite adequately the physical characteristics of thermal discharge in the jet entrainment and stable regions.

1. 緒 論

입해의 원자력 및 화력발전소에서 방출되는 온배수는 그 양이 많고, 지형 및 주위수에 의해 영향을 받게 된다. 온배수의 물리적 특성분석은 냉각용수의 취수 및 온수 방출구의 설계와 연안 해역의 해수 열 균형 파괴에 따른 환경관리 및 생태계 보존 측면에서 매우 중요하다. 따라서, 온배수 확산예측을 위한 적절한 모형의 개발 및 보완이 필요하다. 중화학 공업을 지향하는 우리 나라에서도 1980년대부터 온배수가 환경에 미치는 영향에 대한 관심이 고조되기 시작함에 따라 수치모형 연구와 더불어 수리모형실험 및 생태계

조사 등이 부분적으로 시도되고 있다. 국내에서는 최이(1990), Ro *et al.*(1992), 정(1993), 최 등(1993)에 의한 수치모형 연구가 꾸준히 지속되고 있다.

온배수 확산모형은 배출구로부터 확산영역의 구분 에 따라 근해역, 천이해역, 원해역 모형으로 구분할 수 있으며, 근해역 모형은 해석방법에 따라 경험모형 (Empirical model), 적분모형(Integral model), 수치 모형(Numerical model)으로 구분할 수 있다(Demuren, 1987). Table 1은 근해역 수치모형에 대한 기존의 연구를 정리한 것이다. 근해역 수치모형은 온배수의 흐름 및 온도 특성을 나타내는 연속방정식, Reynolds 방정식, 질량/열 수송방정식에 난류특성을 해석할 수

*서울대학교 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea)

**상지대학교 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Sang Ji University, Wonju, Korea)

Table 1. Summary of previous investigations for near field models

Authors	Dim.	Turbulence terms	Numerical scheme		
			Spatial derivative	Convection term	Solution technique
Barry and Hoffman (1972)	2	Prandtl	Forward	Upstream	Explicit
Chen and Rodi (1975)	2	3-eq.			SIMPLE
Waldrop and Farmer (1975)	3	0-eq.			Explicit
McGuirk and Rodi (1978)	2	k-ε			SIMPLE
Rastogi and Rodi (1978)	2,3	k-ε	Centered	Upstream	Implicit
McGuirk and Rodi (1979)	3	k-ε	Centered	Upstream	Implicit
Raithby and Schneider (1980)	3	k-ε	Centered	Upstream	Implicit
성과 정 (1981)	2	k-ε			STAN-5
김과 정 (1982)	2	k-ε			CHAMPION
박과 정 (1983)	2	4-eq.			CHAMPION
Demuren (1983)	3	k-ε	HCU	QUW	QUICK
Demuren and Rodi (1983)	3	k-ε	Upstream	Upstream	
Sini and Dekeyser (1985)	3	2MTC			M-SIMPLE
Chen and Singh (1986)	2	k-ε	Centered	Upstream	GENMIX
Haoging <i>et al.</i> (1987)	2	k-ε			
Yoon <i>et al.</i> (1987)	2	0-eq.	Centered	Doner-cell	GS using SOR
Raithby <i>et al.</i> (1988)	3	k-ε	Upstream	Upstream	SIMPLE
최와 이 (1990)	3	4-eq.			SIMPLE
Yu and Zhang (1989)	2	k-w			SIMPLE (FVM)
최 등 (1993)	2	k-ε			SIMPLE

*HCU=hybrid central/upwind scheme
 QUW=quadratic upstream weighted method
 2MTC=2nd moment turbulence closure
 M-SIMPLE=modified SIMPLE
 FVM=finite volume method

있는 수식을 도입하여 유한차분법 또는 유한요소법 등의 수치기법을 이용하여 해석하는 방법이다. 최근 컴퓨터의 발달과 더불어 기존의 적분모형 및 수치모형의 한계를 극복할 수 있는 난류해석모형의 개발 및 활용이 두드러지고 있으며, 전해역(Complete field) 모형 개발을 위한 새로운 난류모형의 개발도 시도되고 있다.

일반적으로 난류모형은 Reynolds 응력항의 해석시 사용하는 수송방정식의 개수에 따라 0-, 1-, 2-, 4-방정식 모델 및 Stress/Flux, 대수응력(Algebraic stress) 모델 등으로 구분된다. 기존의 2-방정식 난류모형은 난류운동에너지에 대한 미분방정식(k-방정식)과 길이 척도(l)가 상수 값에 따라 다른 물리적 의미를 갖도록 조합한 $Z=k^{m/l}$ 에 대한 미분방정식(Z-방정식)을 사용한다. 이 범주에 속하는 모델은 k-ε, k-l, k-ω 난류모형 등이 있으며, 이것들 중 k-ε 난류모형이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 여기서, ε은 난류운동에너지 감쇠율이며, ω는 상수 C_D 를 이용해서 정의하면 다음과

같다.

$$\omega = \frac{\epsilon^2}{(C_D k)^2}$$

k-ε모형을 이용하면 흐름장에 대한 에너지 전달 및 감쇠를 적절이 나타낼 수는 있으나, 변동온도 자승 평균항 $\overline{T'^2}$ 모형화 과정에서 도입되는 난류상수 C_T 의 역수로 정의되는 열적 시간상수 $R=1/C_T$ 에 대한 정보를 얻을 수 없는 단점이 있다(Lauder, 1975). 따라서, 본 연구는 속도장과는 별도로 열적 난류구조를 보다 잘 표현하기 위해 온도장에서 열에너지의 전달 및 감쇠를 나타내는 $\overline{T'^2}$ 및 그것의 감쇠율 ϵ_T 에 대한 전달방정식이 추가된 4-방정식 난류모형을 도입한 수치모형을 이용하여 에너지 전달을 실제에 가깝게 예측하고자 하였다.

원자력 발전소의 냉각용수 취·배수구의 위치는 인근해로 천해임을 감안할 때, 온배수 수치모형은 3차원 해석보다는 경제성을 고려한 수직적분 2차원 모형이

실용적일 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 2차원 온배수 확산에 대한 지배방정식을 구성하고, 2-방정식 난류모델 및 4-방정식 난류모델을 도입하여 수치모형을 개발하였다. 개발된 모형의 평가방안으로 기존의 수치모형 및 실험 결과와 비교하였다.

2. 水深積分 數值模型

2.1 支配方程式

천해의 흐름은 바닥조도에 따른 강한 연직방향 혼합특성에 의해 수심방향의 흐름분포는 거의 일정하다고 가정할 수 있으므로 종속변수를 수심적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{1}{h} \int_{z_B}^{z_B+h} u dz, & \bar{v} &= \frac{1}{h} \int_{z_B}^{z_B+h} v dz, \\ \bar{\phi} &= \frac{1}{h} \int_{z_B}^{z_B+h} \phi dz \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$ 는 x, y 방향 유속성분, $\phi(x, y, z)$ 는 스칼라량, h 는 수심이다. 그리고 z 는 연직상향의 좌표이고 z_B 는 수로바닥의 z 좌표이다(이하 평균값 표기 “-”는 생략키로 한다). 수심적분된 흐름방정식, 온도 전달방정식, 해수의 상태방정식은 다음과 같다(최 등, 1993).

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_x \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_y \frac{\partial u}{\partial y} \right] \\ &\quad - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{h} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_x \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_y \frac{\partial v}{\partial y} \right] \\ &\quad - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{h} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_y \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \quad (5)$$

$$\rho = (999.84 + 16.59T - 7.99 \times 10^{-3}T^2 - 46.17 \times 10^{-6}$$

$$\begin{aligned} T^3 + 105.56 \times 10^{-9}T^4 - 280.54 \times 10^{-12}T^5) / \\ (1 + 16.88 \times 10^{-3}T) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도(kg/m^3), T 는 수온($^{\circ}\text{C}$), p 는 압력, τ_{bx} , τ_{by} 는 해저면 마찰응력이다. μ_x 는 난류 점성계수로 난류운동에너지(k)와 그것의 소산율(ε)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\mu_x = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad C_\mu = 0.09 \quad (7)$$

정수압조건 사용시 오차 1은 0.2% 이내이므로(Waldrop and Farmer, 1975) 운동량방정식의 압력경사는 정수압조건을 사용하였다. McGuirk and Rodi(1978)의 “Rigid-lid approximation”을 이용하면 연속 및 운동량 방정식의 확산항에 나타나는 수심변화항은 생략가능하다. 바닥마찰에 의한 전단응력은 다음과 같다.

$$\tau_{bx} = \rho C_f \mu (u^2 + v^2)^{1/2}, \quad \tau_{by} = \rho C_f \nu (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (8)$$

여기서 C_f 는 마찰계수로 매끄러운 하도에 대한 값인 0.003을 사용하였다. 열확산계수(Thermal diffusivity)는 다음과 같다.

$$\Gamma_i = \mu_i / \sigma_i \quad (9)$$

여기서, σ_i 는 Prandtl수로 0.9를 사용하였다.

2.2 亂流模型

일반적인 2-방정식 난류모델은 k -방정식과 Z -방정식으로 구성된다. 2-방정식 난류모델을 사용하면 위치의 함수인 l 을 구하지 않는 장점이 있으나, 모델 구성시 경험적으로 도입된 가정으로 인해 더 경험적인 결과를 초래할 수도 있다(Nallasamy, 1987). k - ε 난류모델은 난류점성항을 등방성으로 가정하므로 비등방성 Reynolds 응력에 의해 발생하는 2차 흐름을 정확히 묘사하지 못하는 단점이 있다. 이런 문제점의 해결을 위해 Reynolds 응력에 대한 미분방정식을 푸는 방법(Launder *et al.*, 1975), 또는 난류모델을 비선형으로 구성하는 방법(Speziale, 1987) 등이 시도되었다. 또한 이 모델은 k 가 음수가 되는 비현실적 현상이 수치적으로 발생할 수 있으며, k 와 ε 의 초기값에 따라 2개의 해가 존재하기도 하므로 초기조건에 적절한 선정 또한 중요한 문제이다(Smith, 1984).

본 연구에는 2-방정식 모델로서 k - ϵ 모델을 사용하였으며, 4-방정식 모델 역시 온도장을 보다 정확히 예측하기 위한 미분방정식을 k - ϵ 난류모델에 추가하여 변형한 형태이므로 위에서 지적한 단점들을 가질 것으로 예상된다. 그러나, 계산의 정확도와 효율성의 조화라는 관점에서 공학적 계산에 널리 사용되는 모델이므로, 모델수정을 통한 개선 또한 의미 있는 것으로 생각된다. 4-방정식 난류모델은 2-방정식 난류 전달방정식에서 난류 운동에너지 생성항 외에 부력에 의한 생성항을 고려할 수 있는 모델이다. 수심적분 2차원 k - ϵ 모델이 상방향 부력의 작용에 의한 얇은 전단경계층의 횡방향 중력확장을 고려하지 못하는 단점을 개선할 목적으로 난류 열플럭스 에너지, $(\overline{u_i' T'})$ 의 전달방정식을 간략화한 형태를 추가하여 4-방정식 모델을 구성하였다.

◦ 2-방정식 난류모델(최 등, 1993)

2-방정식 난류모델은 4-방정식 난류모델에서 사용한 k - 및 ϵ -방정식(식 7 및 8)에서 부력생성항 G_b 가 제외된 형태의 방정식을 사용하였다.

◦ 4-방정식 난류모델(박·정, 1983)

$$\frac{\partial(\rho u k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G + P_{kv} + G_b - \rho \epsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho u \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \epsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] \times C_1 \frac{\epsilon}{k} G + P_{\epsilon v} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho u \overline{T'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \overline{T'^2})}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{T'^2}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{T'^2}}{\partial y} \right] - 2\rho \left(\overline{u_i' T'} \frac{\partial T}{\partial x} + \overline{v_i' T'} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - 2\rho \epsilon_T \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho u \epsilon_T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \epsilon_T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu}{\sigma_{\epsilon_T}} \frac{\partial \epsilon_T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu}{\sigma_{\epsilon_T}} \frac{\partial \epsilon_T}{\partial y} \right] - 1.96 \frac{\rho \epsilon_T}{\overline{T'^2}} \left(\overline{u_i' T'} \frac{\partial T}{\partial x} + \overline{v_i' T'} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - 0.8 \frac{\rho \epsilon \epsilon_T}{k} - 2.0 \frac{\rho \epsilon_T^2}{\overline{T'^2}} + C_s \frac{\epsilon_T}{k} G \quad (13)$$

상기 난류모델에서 k 및 ϵ 은 난류 운동에너지 및 그 감쇠율로 역시 수심평균된 값이다. 난류 운동에너지 및 부력 생성항은 각각 다음과 같다.

$$G = \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (14)$$

$$G_b = \beta \rho g (\overline{u_i' T'} + \overline{v_i' T'}) \quad (15)$$

여기서, 체적팽창계수는 $\beta = 0.00018$ 이다. P_{kv} 및 $P_{\epsilon v}$ 은 수심평균시 바다조도에 의한 유속경사와 연직방향 유속성분의 불균일성에 의한 난류 운동에너지 생성항으로 다음과 같다.

$$P_{kv} = C_k \rho \frac{u_*^3}{h}, \quad P_{\epsilon v} = C_\epsilon \rho \frac{u_*^4}{h} \quad (16)$$

여기서,

$$u_* = [C_f(u^2 + v^2)]^{1/2}, \quad C_k = C_i^{-0.5}, \quad C_\epsilon = 3.6 C_2 \frac{C_\mu^{0.5}}{C_f}$$

열에너지 플럭스 $\overline{u_i' T'}$ 는 다음과 같다.

$$\overline{u_i' T'} = -\frac{k}{\epsilon C_{1T}} (P_{iT} - C_{2T} P_{iTv}) \quad (17)$$

여기서, P_{iTv} 는 $\overline{u_i' T'}$ 의 평균흐름장에 의한 생성항이고, P_{iT} 는 P_{iTv} 와 부력에 의한 생성항의 합으로 다음과 같다.

$$P_{iTv} = -\left(\overline{u_i' u_j'} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \overline{u_j' T'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (18)$$

$$P_{iT} = P_{iTv} - \beta g_i \overline{T'^2}$$

2-방정식 및 4-방정식 난류모델에 사용되는 난류상수는 Table 2와 같다.

2.3 初期條件 및 境界條件

본 연구의 적용대상 수로 및 경계조건은 Fig.1과 같다. 상류측(하첨자 r) 및 방출구(하첨자 d)에서 k 및 ϵ 은 다음과 같이 주어진다(Gosman and Ideriah, 1983).

$$k_r = 0.03 u_r^2, \quad \epsilon_r = \frac{2k_r^{3/2}}{0.005 H_r}, \quad k_d = 0.03 v_d^2, \quad \epsilon_d = \frac{2k_d^{3/2}}{0.005 H_d} \quad (19)$$

Table 2. Empirical constants in turbulence models

Turbulence constants	C_1	C_2	σ_k	σ_ϵ	C_{1T}	C_{2T}	C_s	σ_T	$\sigma_{\epsilon T}$
Numerical value adopted	1.43	1.92	1.0	1.3	3.2	0.5	0.85	1.0	1.0

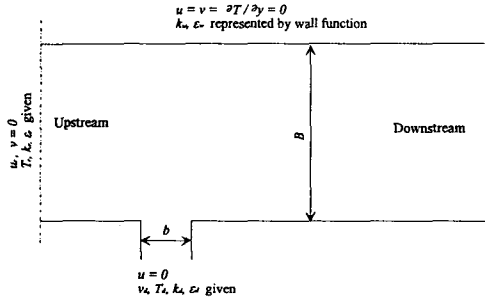


Fig. 1. Channel layout and associated boundary conditions.

여기서 H_s 과 H_d 는 흐름의 양상에 의한 특성길이로서 본 연구에서는 수심 h 를 사용하였다. 측면경계에서는 무활조건(No-slip condition)과 단열조건(Adiabatic condition)을 사용한다. 폐경계의 벽면근처에서는 유속의 대수 분포식과 난류 국소평형(Local equilibrium) 조건을 이용한 벽면함수(Wall function)를 사용하였다. 2-방정식 및 4-방정식 난류모델의 초기 난류성분은 다음과 같다.

$$k_0 = 0.005 u_d^2, \quad \epsilon_0 = \frac{C_\mu k_0^2}{0.03 h_d}, \quad \overline{T_0'^2} = 0.05 (T_d - T_r)^2, \quad \epsilon_{T0} = \frac{\epsilon_0}{2k_0 R} \overline{T_0'^2} \quad (20)$$

여기서, R 은 0.8을 사용하였고, 하첨자 0는 초기값임을 나타내며, T_d 및 T_r 는 각각 제트와 주위수의 초기수온, h_d 는 방출구의 수심이다.

2.4 壁面函数

벽면에 무활조건을 적용하면 평균유속과 요동속도는 0이지만, ϵ 은 유한한 값이므로 이는 고려해야 한다. 경계층에서는 흐름성분의 경사가 심하므로 정확한 수치해석을 위해서는 경계층 내에 상당히 많은 격자의 구성이 필요하지만, 격자를 많이 사용하는 것은 경제성이 없으며, 더욱이 점성효과가 크게 작용하므로 Reynolds 수가 크다고 가정한 난류모델은 적합하지 않다. 따라서 실험에 의한 벽 근처의 평균유속분포는

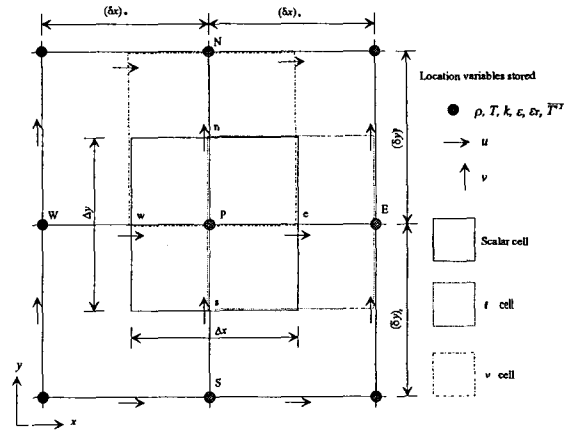


Fig. 2. Staggered finite-difference grid system.

다음과 같은 대수분포식 법칙을 사용한다.

$$u^+ = y^+, \quad y^+ \leq 11.63, \quad \frac{\mu_t}{\mu} \ll 1 \quad (21)$$

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(E y^+), \quad y^+ > 11.63, \quad \frac{\mu_t}{\mu} \gg 1 \quad (22)$$

여기서, $y^+ = u_\tau y / \nu$, $u^+ = u / u_\tau$, $u_\tau = (\tau_w / \rho)^{0.5}$, μ 는 점성계수, κ 는 von Karman 상수로 0.42를 사용하였고, τ_w 는 벽면 전단력, E 는 벽면조도에 따라 정의되는 상수로 0.9를 사용하였다.

위와 같은 벽면법칙은 경계층의 분리나 정체구역에서는 적합하지 않지만 대부분의 경우에는 대체로 정확하다. 벽 근처에는 Reynolds 응력의 대류와 확산이 무시될 수 있으므로 국소평형을 가정한다. 즉 난류 운동에너지의 생성과 소멸이 평형상태라 볼 수 있다. 따라서 벽 근처에서의 난류운동에너지(k_w)와 그 감쇠율(ϵ_w)은 다음과 같다(Rastogi and Rodi, 1978).

$$k_w = \frac{u_\tau^2}{C_\mu^{0.5}}, \quad \epsilon_w = \frac{u_\tau^3}{\kappa y} \quad (23)$$

3. 數値解析

3.1 一般 差分式

Fig. 2는 Staggered 유한차분 격자에서 u , v , p , T ,

$k, \epsilon, \epsilon_T, \overline{T'^2}$ 의 정의와 P점을 중심으로 E, W, N, S에서의 벡터량 u, v 와 스칼라량에 대한 검사체적을 나타낸 것이다. 이송확산항은 중앙차분기법과 Upwind 기법을 결합한 Hybrid 기법을 사용하였다. 지배방정식은 Gosman and Ideriah(1983)의 타원형 흐름해석과 Patankar and Spalding(1972)의 포물형 방정식 해석시 사용한 압력수정방법으로 수치해석한다. 유한차분식의 압력장 결정에는 압력장 수정방정식을 이용하여 수정된 값이 연속방정식 및 운동량방정식을 만족할 때까지(Guess-and-correct procedure) 반복하여 흐름장을 결정한다. 반복계산은 모든 격자에서 연속방정식 불만족에서 야기되는 Mass sources 합이 크기가 총 Mass flow의 0.5% 이하일 때까지 반복시한다. 이때 해의 수렴성 제고를 위해 추정된 종속변수에 대한 Under-relaxation 계수를 도입하였다. 해석은 앞서의 차분식이 삼중 대각행렬로 구성되어 TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)를 이용한 Line-by-line 반복계산 기법을 이용했다. 이와 같은 해석방법은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)로 잘 알려져 있다(Patankar, 1980; 최 등, 1993).

3.2 模型의 構成 및 解析方法

본 연구에서는 가로흐름의 존재와 측벽 및 바닥의 지형적 특성을 고려한 수심적분 2차원 온배수 난류 모델의 비교연구와 적용성 제고를 위한 목적으로 Fig. 1에서와 같은 개수로에 대해 수치실험을 실시하였다. 계산격자는 y 방향에 대해서는 격자간 거리가 0.0305 m인 22개의 등격자($B=0.61$ m)를 사용하였고, x 방향에 대해서는 4 m 길이의 수로에 35 및 47개의 가변 격자(온배수 방출구에서는 세밀한 격자를 사용하고 가로흐름의 상 하류로 갈수록 조밀한 격자 배치)를 구성하여 35(47)×22의 2차원 해석을 하였다. 방출구 및 주위수의 수심 h 는 0.051 m, 방출구의 폭 b 는

0.0064 및 0.064 m인 경우에 대하여 수치실험 하였다.

4. 模型의 適用 및 檢證

본 연구에서 개발된 수치모형의 검증 및 온배수의 물리적 특성고찰을 위한 수치실험은 Mikhail *et al.* (1975)의 실험장치 제원에서 수행된 시험결과와 McGuirk and Rodi(1978)가 수치실험 검증자료로 사용한 1969년 Carter의 실험조건 및 Yu and Zhang(1989)의 수치실험 자료들을 종합하여 구성한 Table 3의 자료를 이용하였다. 표에서 F_d 는 밀도 Froude 수(Densimetric Froude number)로 다음과 같이 정의된다.

$$F_d = \frac{v_d}{\left[\frac{gh(\rho_r - \rho_d)}{\rho_r} \right]^{1/2}} \quad (24)$$

여기서 ρ_r 은 주위수의 밀도, ρ_d 는 방출온수의 밀도이고 g 는 중력가속도이다.

4.1 제트의 進行

Fig. 3은 Test Run #4 및 #5에 대한 결과로서 개수로 횡단면상 최고온도에 의한 제트 중심선의 궤적을 제트와 가로흐름의 유속비 R 과 방출구 폭 b 에 대한 무차원 거리($x/b, y/b$)로 나타낸 것이다. 일반적

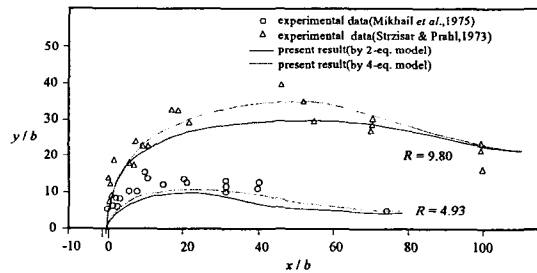


Fig. 3. Center-line trajectory.

Table 3. Test run conditions for model verification

Run #	u (m/s)	v (m/s)	$R(v_d/u_r)$	T_d (°C)	T_a (°C)	F_d	b (m)	Remark
1	0.100	0.201	2.01	30.0	20.0	5.64	0.064~0.0064	Yu and Zhang
2	0.100	0.493	4.93	30.0	20.0	13.84	0.064~0.0064	Yu and Zhang
3	0.100	0.980	9.80	30.0	20.0	27.51	0.064~0.0064	Yu and Zhang
4	0.050	0.490	9.80	29.6	20.0	14.18	0.0064	Carter's experiment
5	0.050	0.2465	4.93	29.6	20.0	7.10	0.0064	Carter's experiment

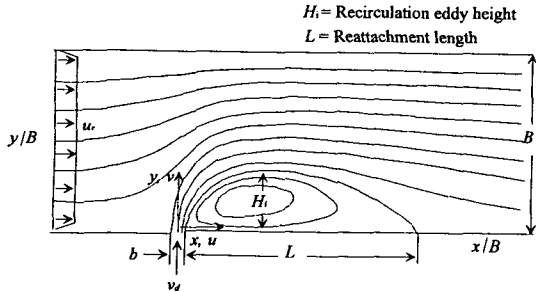


Fig. 4. Flow configuration and streamline pattern.

으로 무한 정지수역으로의 온수방출에서 온도 및 유속에 따른 제트 중심선은 일치하나, 가로흐름이 존재하는 경우의 본 연구에서는 수치실험 결과의 분석 과정에서 최대유속에 따른 제트궤적이 최대온도에 의한 것보다 상방향으로 크게 나타남을 발견할 수 있었다. 이는 제트에 대한 벽면의 차단효과에 의해 방출구 하류에서 온수 재순환의 발생에 따른 현상으로 판단되며, 유속비 R 이 클수록 그 효과는 더욱 크다. 그림에서 보는 바와 같이 2-방정식 및 4-방정식 모델에 의한 해석결과는 방출구에서 가까운 부분($x/b < 10$), 즉 제트 운동량에 의해 지배되는 Core region에서 실험결과와 잘 일치하고 그 이후는 제트 포획연행 및 부력에 의한 안정화 영역으로 실험 결과와 다소 상이하나 비교적 그 경향은 잘 일치함을 볼 수 있다. 특히 이 영역에서 4-방정식 모델에 도입된 온수의 부력효과에 의한 중력확장이 나타남을 알 수 있다. 실험결과와 다소 상이함은 Carter의 실험자료가 시간적분된 온도를 제공하지 못함에 기인된 것으로 사료된다. 또한 2차원적 수치실험으로는 수심방향의 성층화 현상을 재현하기는 어려우며, 수치실험 결과는 수심평균된 온도분포이므로 실측된 온도와는 다를 것으로 기대된다. 특히 유속비가 작은 실험결과는 밀도 Froude수가 작음에 따라 부력에 따른 압력경사에 의해 그 차이가 더욱 큰 것이 이를 잘 설명해 주고 있다. 따라서 이와 같은 견지에 의해 2-방정식 및 4-방정식 온배수 난류모델의 결과는 실험결과와 비교적 잘 일치한다고 판단된다. 또한 수심방향의 부력효과를 고려는 못하지만, x, y 방향의 부력생성항을 추가한 4-방정식 난류모델을 이용한 접근이 온수의 물리적 특성을 보다 잘 규명해 줌을 알 수 있다.

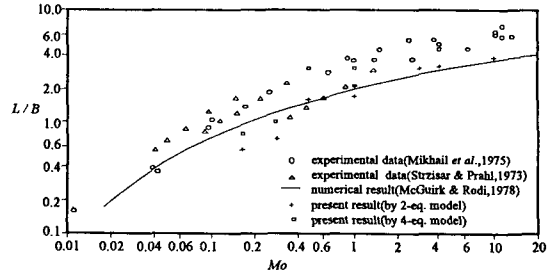


Fig. 5. Reattachment length.

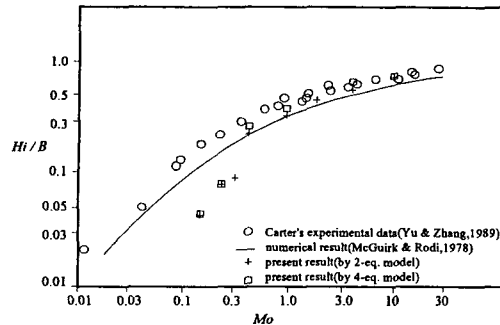


Fig. 6. Recirculation eddy height.

4.2 溫水의 再循環

온수 재순환에 대한 물리적 특성은 운동량 플럭스비 (Mikhail *et al.*, 1975)를 사용했다.

$$M_0 = (v_d/u_r)^2 b/B$$

온수 재부착거리(Reattachment length, L) 및 재순환 높이(Recirculation eddy height, H_i)의 정의는 Fig. 4와 같다.

Fig. 5는 M_0 에 대한 L/B 의 관계로 M_0 가 일정하면 방출구의 형상 등 다른 실험조건에 무관함을 알 수 있다. 2-방정식 모델의 결과는 McGuirk and Rodi (1978)의 수치실험과 거의 일치하고 실험결과와는 다소 상이하나 비교적 잘 맞는다. 아울러 실험 결과와 상이함은 앞서 언급한 내용과 같다. 4-방정식 난류모델에 의한 수치결과는 부력에 의한 중력확장을 고려함에 따라 실험값과 잘 일치하였으며, 온수 재부착거리가 하류방향으로 확장됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 M_0 에 대한 H_i/B 의 관계로 Fig. 5의 양상과 같음을 볼 수 있다. 또한 실험 및 McGuirk and Rodi (1978)의 결과와 거의 일치하고 있다. 재순환높이는

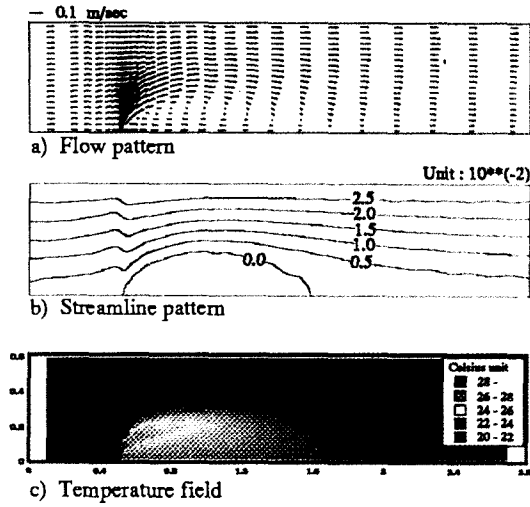


Fig. 7. Result of 2-equation turbulence model. (Run #5)

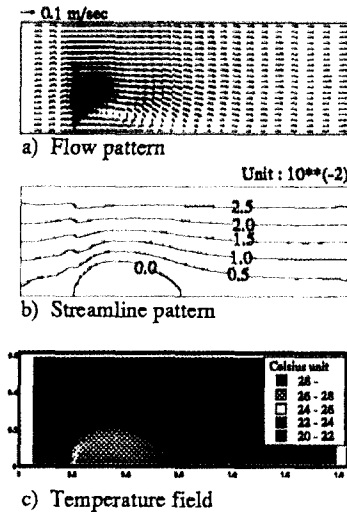


Fig. 9. Result of 2-equation turbulence model. (Run #4)

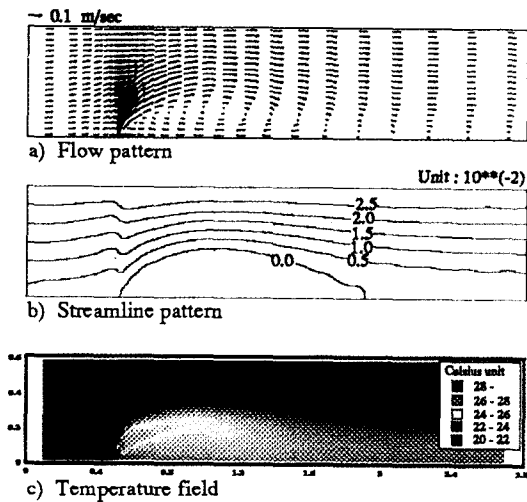


Fig. 8. Result of 4-equation turbulence model. (Run #5)

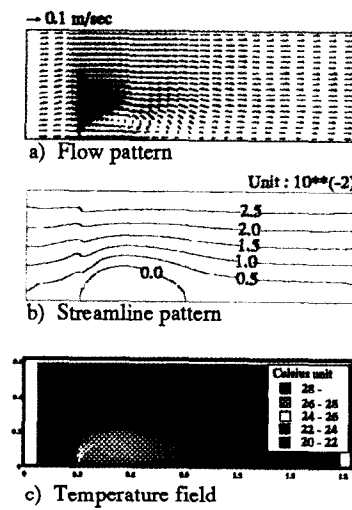


Fig. 10. Result of 4-equation turbulence model. (Run #4)

재부착거리와는 달리 2-방정식 및 4-방정식 모델의 결과가 거의 같은 결과(4-방정식 모델의 결과가 크지만 그림에서는 구별이 어려움)로 나타났다. 이는 부력에 기인된 중력확장이 개수로의 횡단면상 벽면의 차단에 의해 확장되지 못하기 때문에 생기는 현상으로 생각된다.

M_0 가 작은 경우 계산결과는 실험값과 상이하지만, 상대적 크기는 크지 않고, 계측의 정밀도 및 분석각도에 따라 민감하게 변하는 부분일 것으로 추측된다.

또한, 실험결과(Mikhail *et al.*, 1975)에 대해 McGuiirk and Rodi(1978)는 작은 M_0 에서 L 및 H 의 측정이 정확치 못한 점을 언급한 바가 있고, 본 분석에서 유함수 계산시 각 격자점에서 서로 다른 밀도의 미고려와 그 계산간격을 다소 크게 하여 분석함에 기인한 것으로 생각된다. 또한 난류모델의 적용이 Reynolds/Peclet 수가 큰 흐름에 적용되는 모델의 한계로도 생각할 수 있으나 이는 추후연구에 의해 규명될 것이다.

4.3 흐름 樣相

수치실험을 통해 재순환 양상의 규모는 M_0 에 의해 지배되며, 2-방정식 모델보다는 4-방정식 모델의 결과가 L 이 하류방향으로 더 확장됨을 알 수 있었다. 이것은 부력에 기인한 중력확장의 영향으로 간주되며, H_i 는 개수로 측벽의 차단으로 크기가 현저하게 차이나지는 않으나 4-방정식 모델의 결과가 역시 크게 나타났다. Fig. 7, 8, 9, 10은 Carter의 실험결과에 부합시키기 위한 Test Run #4 및 #5의 결과로서 수치모형의 검증차원에서 실시하였다. 두 수치시험조건은 M_0 를 같게 하고, R 을 달리하기 위하여 Test Run #4에서는 b 를 작게 하였다. M_0 가 큰 값을 가짐에 따라서 방출구 벽면하류부에서 큰 규모의 온수 재순환 현상을 볼 수가 있고, 4-방정식 모델에 의한 재부착 거리가 하류로 더 확장되며, H_i 는 벽면차단에 의해 2- 및 4-방정식의 난류모델 결과가 거의 유사함을 확인할 수 있었다. 두 실험에서 M_0 가 같아서 실험조건 (R, F_d)이 다르더라도 L 및 H_i 의 값은 거의 유사함을 알 수 있다.

온배수가 재순환 되어 냉각용수로 다시 사용되면 기계가동률에 영향을 미치게 되므로, 재순환형상은 냉각용수의 취 배수지점 설계와 밀접한 관련이 있다. 재순환양상은 유속분포 또는 초과온도 분포의 양상과 더불어 분석되어야 하며, 유함수(Stream function, ψ)에 의한 유선(Streamline)의 분포로 예측이 가능하다.

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = \rho u, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = -\rho v \quad (25)$$

등유함수 분포는 방출구 하류단의 유함수 값을 기준으로 한 상대적인 값이다. Fig. 7, 8, 9, 10에서 방출구 벽면 하류부에 뚜렷한 온수의 재순환 과정이 생김을 볼 수 있고, 그 크기는 모두 유사함을 Fig. 5 및 6에서도 볼 수 있다. 아울러 4-방정식 모델의 결과가 실험값에 더욱 근접하고 부착거리 역시 유선의 분포에서 보듯이 2-방정식 난류모델보다 Test Run #4의 경우가 약 1.1배, Test Run #5가 1.5배 크게 나타났다. Test Run #4의 경우가 Test Run #5의 경우와 다소 상이함은 방출구에서의 유속이 Test Run #4가 약 2배 정도 큰 값이기에 방출구 하류에 생기는 강한 재순환으로 압력이 저하되면서 부력에 의한 하류부의 확장을 저지하게 되어 상류측으로 회계 됨을 유함수 값이 재순환영역에서 다름으로 미루어 짐작이

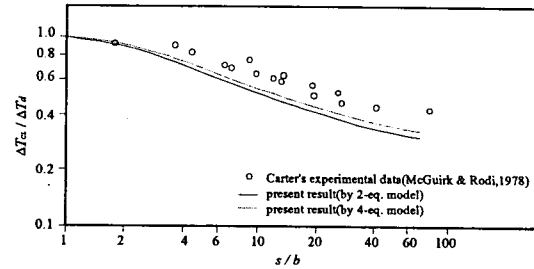


Fig. 11. Dilution along center-line trajectory.

된다. 즉, R 이 L 에 또 다른 변수로서 작용함을 시사해준다.

4.4 超過溫度 擴散

초과온도 확산은 취 배수구 설계, 주변 생태계 및 환경관리 측면에서 매우 중요하다. 이것은 주로 운동량에 의한 이송 및 확산, 포획연행(Entrainment), 중력확장 등에 의해 지배된다. 수심적분모형은 성층화, 횡방향 확장 및 포획연행 효과를 고려하기 어렵다. 부력 효과를 고려하지 않은 2-방정식 모델의 적용을 통한 온배수의 해석은 Fig. 5 및 6에서 보는 바와 같이 실험 값과 다소 차이를 보이고 있다. 따라서 수심적분 2차원 모형에 4-방정식 모델을 사용하면 3차원 해석보다 정확도가 결여되나 실험 값과 잘 일치함을 볼 수 있어서 4-방정식 난류모델에 의한 온배수 확산의 예측성 및 수심평균 2차원 온배수 난류모형의 실용성을 제고시켰다.

Fig. 11은 Test Run #5에 대한 제트중심축을 따른 초과온도의 저하율을 나타낸 것이다. 여기서 제트 중심축은 최대 초과온도를 연결한 선이고 s/b 는 이 선을 따른 무차원 거리이다. Carter의 실험에 비해 수치모형의 결과가 초과온도가 빨리 저하되는 현상을 나타낸다. 실험은 수표면 온도인 반면 수치결과는 수심평균 값을 감안할 때, 약간의 차이는 당연하며, 2-방정식 모델보다 4-방정식 모델이 실험치에 보다 잘 근사함을 볼 수 있다. 이는 4-방정식 모델이 부력에 의한 중력확장을 고려하고 있는데 이의 효과를 무시할 수 없음을 의미한다. 그에 따른 초과온도 확산 분포는 Fig. 7 및 8과 같으며, M_0 및 R 이 커서 운동량에 의한 이송 및 확산과 부력에 의한 확산 양상이 잘 나타나고 있다. 4-방정식 모델의 수치실험 결과에서 확산이 하류부 및 방출구 전면으로 현저히 확장됨을 볼 수 있다.

Fig. 9 및 10은 R 은 크지만 b 가 작아서 M_0 가 크지 않다. 따라서 온수의 확산 범위가 개수로 전단면에 걸쳐 분포하지 않고 가로흐름의 영향을 받는다. 아울러 R 이 크에 따라 제트 방출구 하류부에 현저한 온수 재순환 양상을 보여주며, 난류모델에 따라 확산양상이 다름을 보여준다. 또한 초과온도의 상승폭이 작은 것은 M_0 가 작고 밀도 Froude 수가 비교적 큰 값임에 기인된다.

5. 結 論

수심적분 2차원 표면온배수 수치모형의 개발을 통해 가로흐름과 지형이 간단히 재현된 개수로 모형에 적용하였다. 개발된 모형의 수치 실험결과는 수리모형 실험결과와 잘 일치하였다. 2차원적인 접근에 의해서 제트 저면에서의 포획연행, 부력에 기인된 성층화에 따른 중력확장을 고려하기는 다소 어려우나, 부력 생성형을 고려하는 4-방정식 모델에 의한 해석결과는 2-방정식 모델의 결과보다 제트 포획 및 안정화 영역에서 온배수의 물리적 특성을 보다 잘 재현해 줌으로써 2-방정식 모델 적용시 나타나는 온배수 확산에 대한 제약성을 개선하였다. 또한, 4-방정식 모델의 결과가 비교적 실험결과에 더욱 근접함을 보여주어 수심적분 4-방정식 난류모델의 적용성 및 예측의 정확성을 제고시켰다. 추후 연구로서 비정상류를 해석할 수 있도록 모형을 수정하고, 실제 지형 및 흐름조건에 적용하여 개발된 수치모형의 적용성 검증이 수행되어야 한다.

사 사

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음.

參考文獻

김상백, 정명균, 1982. 부력이 작용하는 2차원 온수 표면방류의 해석, 대한 기계학회 논문집, 제6권, 제1호.
 박상우, 정명균, 1983. 온수의 표면 방출에 의한 2차원 비정상 난류 열확산의 예측, 대한 기계학회 논문집, 제7권, 제4호.
 성형진, 정명균, 1981. 난류계산 모델의 비교 연구, 대한 기계학회 논문집, 제5권, 제1호.
 정태성, 1993. 연직변화좌표에서 3차원 수치모형에 의한

표면온배수 확산의 수치해석, 한국해양연구소, BSPE 00334-541-2.
 최홍식, 소재귀, 정경태, 이길성, 1993. 가로흐름 수역으로 방출되는 2차원 온배수 난류모형, 한국해양 해양공학회지, 제5권, 제2호.
 최홍식, 이길성, 1990. 표면온배수 난류모형, 한국수문학회지, 제23권, 제4호.
 Barry, R.E. and Hoffman, D.P., 1972. Computer model for thermal plume, *J. of the Power Div., ASCE*, Vol. 98, No. PO7.
 Cebeci, T. and Smith, A.M., 1974. *Analysis of turbulent boundary layers*, Academic Press.
 Chen, C.J. and Singh, K., 1986. *Development of a two-scale turbulence model and its applications*, IIHR Report No. 299, Univ. of Iowa.
 Chen, C.J. and Rodi, W., 1975. A mathematical model for stratified turbulent flows and its application to buoyant jets, *Proc. of 16th Cong. of the IAHR*, Vol. 3.
 Demuren, A.O., 1983. Numerical calculations of steady three dimensional turbulent jets in cross flow, *Computer Methods in Applied Mech. and Eng.*, Vol. 37.
 Demuren, A.O., 1987. Modelling turbulent jets in cross flow, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 2, Dynamics of Single-Fluid Flows and Mixing, Ed. by N.P. Chermisinoff.
 Demuren, A.O. and Rodi, W., 1983. Side discharge into open channels: mathematical model, *J. of Hyd. Eng., ASCE*, Vol. 109, No. 12.
 Gosman, A.D. and Ideriah, F.J.K., 1983. TEACH-2E: A general computer program for 2-dimensional, turbulent, recirculating flows, Dept. of Mech. Eng., Imperial College, London, 1976. Revised by M.P. Arnal, Dept. of Mech. Eng., Univ. of California, Berkeley.
 Haoging, N.W., Nengjia, W. and Lixing, Z., 1987. Application of turbulence models in thermo hydraulics, *Topics in Hydraulic Modelling, Proc. of IAHR*, Ed. by J.A. Cunge and P. Ackers.
 Launder, B.E., 1975. *Studies in convection: theory, measurements, and application*, Vol. 1, Academic Press.
 Launder, B.E., Reece, G.J. and Rodi, W., 1975. Progress in the development of Reynolds-stress turbulence closure, *J. Fluid Mech.*, Vol., 68, Part 3.
 Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974. The numerical computation of turbulent flow, *Computer Methods in Applied Mechanics and Eng.*, Vol. 3.
 McGuiirk, J.J. and Rodi, W., 1978. A depth-averaged mathematical model for the near field of the side discharge into open-channel flow, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 86, Part 4.
 McGuiirk, J.J. and Rodi, W., 1979. Mathematical modelling of three-dimensional heated surface jets, *J. of Fluid Mech.*, Vol. 95, Part 4.
 Mikhail, R., Chu, V.H. and Savage, S.B., 1975. The reattachment of a two dimensional turbulent jet in a confined crossflow, *Proc. 16th IAHR Cong.*, São Paulo, Brazil, Vol. 3.
 Nallasamy, M., 1987. Turbulence models and their applications to the prediction of internal flows: a review, *Computers & Fluids*, Vol. 15, No. 2.

- Patankar, S.V., 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*, McGraw-Hill.
- Patankar, S.V. and Spalding, D.B., 1972. A Calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15.
- Raithby, G.D., Elliot, E.E. and Hutchinson, B., 1988. Prediction of three-dimensional thermal discharge flows, *J. of Hyd. Eng.*, ASCE, Vol. 114, No. 7.
- Raithby, G.D. and Schneider, G.E., 1980. The Prediction of surface discharge jets by a three-dimensional finite-difference model, *J. of Heat Transfer*, ASME, Vol. 102.
- Rastogi, A.K. and Rodi, W., 1978. Predictions of heat and mass transfer in open channels, *J. of the Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 104, No. HY3.
- Ro, Y.J., Kim, T.I., Sung, H.K. and Lee, S.W., 1992. 3-D modelling of heat discharge from Ul-Jin power plant into coastal waters of Korea East Sea, *Proc. of the 2nd International Conference, Estuarine and Coastal Modeling*, ASCE.
- Sini, J.F. and Dekeyser, J., 1985. Numerical prediction of heated turbulent shear flows with a second moment turbulence closure, *Int. Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements*, Iowa Univ.
- Smith, R.M., 1984. On the finite-element calculation of turbulent flow using the k- ϵ model, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 4.
- Speziale, C.G., 1987. On nonlinear $K-l$ and $K-\epsilon$ models of turbulence, *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 178.
- Waldrop, W.R. and Farmer, R.C., 1975. Thermal effluent-river interactions, *Proc. of 16th IAHR Cong.*, Vol. 3.
- Yoon, T.H., Cha, Y.K. and Kim, C.W., 1987. Vertical plane buoyant jets in cross flow, *Topics in Lake and Reservoir Hydraulics, Proc. of Technical Session C1, XXII Cong. of IAHR*, Ed. by W. H. Graf and L. Lemmin.
- Yu, L.R. and Zhang, S.N., 1989. A New depth-averaged two-equation($\bar{k}-\bar{\omega}$) turbulent closure model, *Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements*, Universal Academy Press, Inc..