

2차원 온배수 난류모형의 비교연구

A Comparative Study of 2-Dimensional Turbulence Models for Thermal Discharge

최 흥 식*

Choi, Hung Sik

Abstract

For a comparative evaluation of three turbulence models in the analyses of thermal discharge behavior into a crossflow, a 2-dimensional near-field numerical model is developed. The selected models are $k-\epsilon$ and $k-l$ turbulence models as a 2-equation turbulence model and a 4-equation turbulence model in which the transport equations for mean of the temperature fluctuation squared and its dissipation rate for the consideration of buoyancy production and turbulent heat flux terms are added to a $k-\epsilon$ turbulence model. The developed models are applied to a steady flow in an open channel with simple geometry and the numerical results agree with the existing experimental data. Numerical results of buoyancy induced gravitational lateral spreading by 4-equation turbulence model agree with the experimental data better than those of 2-equation turbulence models. The flow patterns by 4 and 2-equation turbulence models are similar.

Keywords: thermal discharge, $k-\epsilon$ turbulence model, $k-l$ turbulence model, 4-equation turbulence model

요 지

가로흐름이 존재하는 수역으로 방출되는 온배수 해석에 3가지 난류모형의 사용성 평가를 위해서 근역 2차원 수치모형을 개발하였다. 적용한 난류모형은 2-방정식 난류모형인 $k-\epsilon$ 및 $k-l$ 난류모형과 $k-\epsilon$ 난류모형에 부력생성 항 및 난류 열 플럭스 항 결정을 위한 변동온도 평균자승항 및 이의 감쇠율에 대한 전달 방정식을 추가한 4-방정식 난류모형이다. 개발된 모형은 간단한 단면을 갖는 개수로 정류 경우에 대해 적용하였으며, 계산된 결과는 기존의 실험결과와 비교적 잘 일치하였다. 4-방정식 난류모형에 의한 결과가 2-방정식에 의한 결과보다 부력에 의한 횡방향의 중력확장을 잘 나타내었으며, 흐름 양상의 계산에는 3가지 경우 모두 유사하게 흐름을 재현함을 보였다.

핵심용어 : 온배수, $k-\epsilon$ 난류모형, $k-l$ 난류모형, 4-방정식 난류모형

* 상지대학교 토목공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Sangji Univ., Wonju, Kangwon 220-702, Korea

1. 서 론

원자력, 화력발전소 및 임해공업시설로부터 방출되는 냉각용 온수는 하천 또는 연안일대의 수환경에 전반적인 수중온도의 상승과 가동 중단시 갑작스러운 수온 저하 등의 열균형 파괴를 가져온다. 따라서 여러가지 형태의 주위수에 영향을 받는 온배수의 이동 및 확산에 대한 정성, 정량적 예측을 위한 수치모델의 개발은 환경관리 및 생태계 보전 측면에서 매우 중요하다. 온배수 이동 및 확산에 대한 모형은 배출구로부터 확산 양상에 따라 근역, 천이역, 원역 모형으로 구분되며, 근역 모형은 해석방법에 따라 물리적 실험모형, 적분모형, 수치모형으로 구분된다. 근역 수치모형은 온배수의 흐름 및 온도특성을 나타내는 연속방정식, Reynolds 방정식, 질량/열 수송방정식에 난류특성을 해석할 수 있는 난류모형을 도입하여 유한차분법 또는 유한요소법 등의 수치기법을 이용하여 해석하는 것이 일반적인 추세이다.

일반적으로 난류모형은 Reynolds 응력항의 해석시 사용하는 수송방정식의 개수에 따라 0-, 1-, 2-, 4-방정식 모형, stress/flux, 대수응력(algebraic stress) 모형 등으로 구분된다. 그중 2-방정식 난류모형은 $k-\epsilon$, $k-l$, $k-\omega$ 등이 있으며, 이들 중 $k-\epsilon$ 난류모형이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 이남주 등(1994)은 수심적분 2차원 온배수 난류모형의 비교 연구에서 $k-\epsilon$ 난류모형의 도입과 열적 난류구조를 보다 잘 표현하기 위해 온도장에서 열에너지의 전달 및 감쇠를 나타내는 변동온도 자승평균항 $\overline{T'^2}$ 및 이의 감쇠율 ϵ_T 의 전달방정식을 $k-\epsilon$ 난류모형에 추가한 4-방정식 난류모형을 도입한 온배수 수치모형을 제시하였다. 또한, 최홍식(1996)은 온배수 이동 및 확산에 $k-l$ 난류모형을 도입하여 해석하였다.

본 연구는 정류 가로흐름 수역으로 방출되는 2차원 온배수의 해석으로, 이에 대한 지배방정식의 구성과 난류 외점성 및 열확산 계수 결정에 자주 사용되는 $k-\epsilon$, $k-l$ 및 4-방정식 난류모형의 특성을 정리하고, 수치실험결과를 비교하여 난류모형의 사용성을 규명하고자 한다.

2. 수심적분 수치모형

2.1 지배방정식

수심 적분된 흐름방정식, 열 전달방정식, 물의 상태 방정식은 다음과 같다(최홍식 등, 1993).

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

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_t \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right] - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{h} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_t \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{h} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\rho = (999.84 + 16.59 T - 7.99 \times 10^{-3} T^2 - 46.17 \times 10^{-6} T^3 + 105.56 \times 10^{-9} T^4 - 280.54 \times 10^{-12} T^5) / (1 + 16.88 \times 10^{-3} T) \quad (5)$$

여기서, u 및 v 는 x 와 y 방향의 수심평균유속, ρ 는 유체의 밀도(kg/m^3), T 는 수온($^{\circ}\text{C}$), p 는 압력, τ_{bx} , τ_{by} 는 저면 마찰응력, h 는 수심이다. μ_t 는 난류 점성계수로 난류운동에너지(k)와 이의 감쇠율(ϵ) 및 난류 특성길이(l)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon, \quad C_\mu = 0.09 \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_l k^{1/2} l \quad (7)$$

운동량 방정식에서의 압력경사는 정수압조건을 사용하였고, McGuirk과 Rodi(1978)의 rigid-lid approximation을 이용하면 연속 및 운동량 방정식의

수심변화량은 생략 가능하다. 바다마찰에 의한 전단응력은 다음과 같다.

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

$$\tau_{by} = \rho C_f v (u^2 + v^2)^{1/2} \quad (9)$$

여기서, C_f 는 마찰계수로 매끄러운 하도에 대한 값인 0.003을 사용하였다. 열확산계수는 $\Gamma_t = \mu_t / \sigma_t$ 이고, σ_t 는 Prandtl 수로 0.9~1.0 사이의 값이다.

2.2 난류모형

본 연구에는 2-방정식 난류모형으로 $k-\epsilon$, $k-l$ 모형을 사용하고, 난류 운동에너지 생성항외에 상방향 부력에 의한 전단경계층의 횡방향 중력확장의 개선을 목적으로 난류열플럭스 에너지 $\overline{u_i T}$ 의 전달방정식을 간략화한 형태를 추가한 4-방정식 난류모형(이남주 등, 1994)을 사용한다.

2.2.1 $k-\epsilon$ 난류모형

2-방정식 난류모형으로 수심적분 난류운동에너지 k 와 ϵ 의 감쇠율 ϵ 의 전달방정식으로 다음과 같다 (Rastogi와 Rodi, 1978). 여기서 부력생성항 G_b 는 제외된다.

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

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

여기서, G 는 $\mu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]$ 이다.

G 는 수평방향 유속성분의 상호작용에 의한 난류 운동에너지 생성항이고, P_{kv} 와 $P_{\epsilon v}$ 는 G 외에 수심평균시 저면의 바다조도에 의한 유속경사와 연직방향 유속성분의 불균일성에 의한 난류 운동에너지 생성에 관한 항으로 다음과 같다.

$$P_{kv} = C_k \rho \frac{u_*^3}{h} \quad (12)$$

$$P_{\epsilon v} = C_\epsilon \rho \frac{u_*^4}{h} \quad (13)$$

$$u_* = [C_f (u^2 + v^2)]^{1/2} \quad (14)$$

$$C_k = C_f^{-0.5} \quad (15)$$

$$C_\epsilon = 3.6 C_2 \frac{C_\mu^{0.5}}{C_f^{3/4}} \quad (16)$$

여기서, 난류모형 상수는 $C_1 = 1.43$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 이다.

2.2.2 4-방정식 난류모형

4-방정식 난류모형은 $k-\epsilon$ 난류 전달방정식에서 난류 운동에너지 생성항 G 외에 부력에 의한 생성항 $G_b (= \beta g \overline{u_i T})$ 를 고려할 수 있는 모형이다. $k-\epsilon$ 난류모형이 가지는 문제점을 개선한 것으로, $\overline{u_i T}$ 의 결정을 위해서는 변동온도 자승평균항 $\overline{T^2}$ 와 그 감쇠율 ϵ_T 의 전달방정식을 추가한 것으로 다음과 같다(이남주 등, 1994).

$$\frac{\partial(\rho u \overline{T^2})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \overline{T^2})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{T^2}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\partial \overline{T^2}}{\partial y} \right] - 2 \rho \left(\overline{u T} \frac{\partial T}{\partial x} + \overline{v T} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - 2 \rho \epsilon_T \quad (17)$$

$$\frac{\partial(\rho u \epsilon_T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \epsilon_T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon_T}} \frac{\partial \epsilon_T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon_T}} \frac{\partial \epsilon_T}{\partial y} \right] - 1.96 \frac{\rho \epsilon_T}{T^2} \left(\overline{u T} \frac{\partial T}{\partial x} + \overline{v T} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - 0.8 \frac{\rho \epsilon_T}{k} - 2.0 \frac{\rho \epsilon_T^2}{T^2} + C_s \frac{\epsilon_T}{k} G \quad (18)$$

여기서, σ_T 와 $\sigma_{\varepsilon T}$ 는 모두 1.0 이고, $C_s = 0.85$ 이다.

2.2.3 $k-l$ 난류모형

2-방정식 난류모형으로 난류운동에너지 k 와 특성 길이 l 의 전달방정식을 가진 난류모형으로 흐름장 해석에서 난류확산과 전단흐름의 전단확산을 합성한 최종 확산계수 산정(유동훈과 김창식, 1994)과 개수로에서 수심방향의 수리특성 해석(Blumberg 등, 1992)에 사용되었다. Rotta의 $k-l$ 난류모형을 수심적분한 k 및 2점 상관(2-point correlation)함수에 의한 l 의 평형방정식은 다음과 같다(Vollmers와 Rotta, 1977 ; Stutten과 Peters, 1986).

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} &= \frac{K_q}{C_1} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_t \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_t \frac{\partial k}{\partial y} \right] \right\} \\ &+ \mu_t \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] - C\rho \frac{k^{3/2}}{l} + P_{kv} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uk l)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk l)}{\partial y} &= \frac{K_{ql}}{C_1} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_t \left(l \frac{\partial k}{\partial x} + \alpha_l k \frac{\partial l}{\partial x} \right) \right] \right. \\ &+ \left. \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_t \left(l \frac{\partial k}{\partial y} + \alpha_l k \frac{\partial l}{\partial y} \right) \right] \right\} + P - CC_1 \rho k^{3/2} \end{aligned} \quad (20)$$

식 (19)와 (20)의 우측항에서 첫째항은 확산항이고, 둘째항은 생성항, 셋째항은 감쇠항이다. 식(19)에서 마지막 항은 식(12)와 같다. 식 (20)에서 P 는 경계층 근사(boundary-layer approximation)로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= \frac{\partial v}{\partial x} \left[\mu_t \left(\zeta_1 \frac{\partial u}{\partial y} + \zeta_3 l^3 \frac{\partial^3 u}{\partial y^3} \right) \right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) \zeta_2 l^3 \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, 난류상수는 Table 1에서와 같다.

2.3 초기조건과 경계조건

본 연구의 적용대상 수로 및 경계조건은 Fig. 1에 보인바 같다. 방출구(하침자 d)에서 k , ε 및 l 은 다음과 같다(Gosman과 Ideriah, 1983).

$$k_d = 0.03 u_d^2 \quad (22)$$

$$\varepsilon_d = 2 k_d^{3/2} / (0.005 H_d) \quad (23)$$

$$l_d = C_D k_d^{3/2} / \varepsilon_d \quad (24)$$

(20) 4-방정식 난류모형에서 초기조건은 다음과 같다.

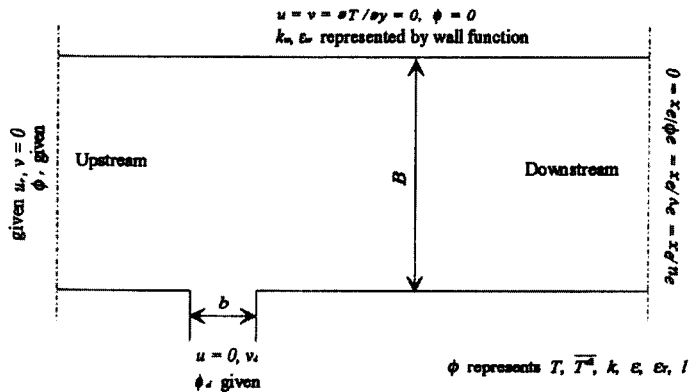


Fig. 1. Channel Layout and Associated Boundary Conditions

Table 1. Empirical Constants in Turbulence Model

$C = C_l^3$	C_l	$C_D = C_\mu / C_l$	K_q	K_{ql}	α_l	ζ	ζ_2	ζ_3
0.165	0.8	0.164	0.8	0.8	0.387	0.98	1.20	-1.50

$$k_d = 0.005 u_d^2 \quad (25)$$

$$\epsilon_d = C_\mu k_d^2 / (0.03 H_d) \quad (26)$$

$$\overline{T_d'^2} = 0.05 (T_d - T_r)^2 \quad (27)$$

$$\epsilon_{Td} = \frac{\epsilon_d}{2 k_d R} \overline{T_d'^2} \quad (28)$$

초기조건으로 상류측에는 방류구 하점자 d 대신 r 을 쓴다. 여기서, R 은 0.8을 사용하였고, T_d 및 T_r 은 각각 제트와 주위수의 초기수온이다. H_r 과 H_d 는 흐름 양상에 의한 특성길이로 본 연구에서는 수심으로 사용하였다. 측면경계에서는 무활조건과 단열 (adiabatic)조건을 사용한다. 폐경계의 벽면 근처에서는 유속의 대수분포식과 난류국소평형의 벽면함수(wall function)를 사용한다(이남주 등, 1994).

3. 수치해석

3.1 일반 차분식

Fig. 2는 유한차분 교호격자에서 u, v, p, ϕ

($T, k, \epsilon, l, \overline{T'^2}, \epsilon_T$)의 정의와 P점을 중심으로 E, W, N, S에서의 벡터량 u, v 와 스칼라량에 대한 검사체적이다. 이송 확산항은 중앙차분기법과 풍상기법을 결합한 하이브리드기법을 사용하였다. 지배방정식은 Gosman과 Ideriah(1983)의 타원형 흐름해석과 Patankar와 Spalding(1972)의 포물형 방정식 해석시 사용한 압력-속도 수정방법을 이용하여 압력장의 수정된 값이 연속 및 운동량 방정식의 불만족에 기인된 질량생성항의 합이 총 질량흐름의 0.5% 이하일 때까지 반복 실시(guess-and-correct)한다. 이 때 해의 수렴성 제고를 위해 추정된 종속변수에 대한 하향이완 (under-relaxation) 계수를 도입하였다. 해석은 앞서의 차분식이 삼중 대각행렬로 구성되기 때문에 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)를 이용하여 전순법(line-by-line)에 의해 반복계산을 한다. 이와 같은 해석방법은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)로 잘 알려져 있다(Patankar, 1980; 최홍식 등, 1993).

3.2 모형의 구성 및 해석방법

본 연구에서는 가로흐름의 존재와 측벽 및 바닥의 지형성을 고려한 수직적분 2차원 온배수 이동 및 확산에 대한 3가지 난류모델의 사용성 규명에 관한 연구로 Fig. 1에서와 같은 개수로에 대해 수치실험하였다. 계산격자는 y 방향에 대해서는 격자간 거리가 0.0305

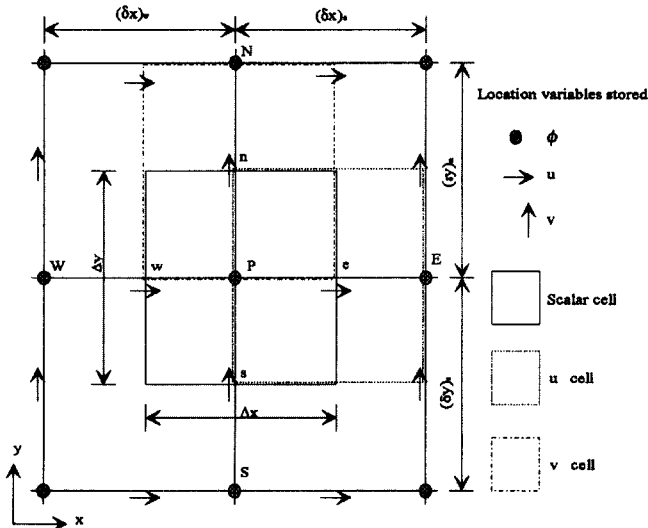


Fig. 2. Staggered Finite Difference Grid System

Table 2. Test Run Conditions for Model Verification and Simulation

Run #	u_r (m/s)	v_d (m/s)	R (v_d/u_r)	T_d (°C)	T_r (°C)	F_d	b (m)	Remarks
1	0.10	0.201	2.01	30.0	20.0	5.64	0.0064-0.064	Yu & Zhang
2	0.10	0.493	4.93	30.0	20.0	13.84	0.0064-0.064	Yu & Zhang
3	0.10	0.980	9.80	30.0	20.0	27.51	0.0064-0.064	Yu & Zhang
4	0.05	0.490	9.80	29.6	20.0	14.18	0.0064	Carter's
5	0.05	0.2465	4.93	29.6	20.0	7.10	0.0254	Carter's

m인 22개의 등격자($B=0.61m$)를 사용하였고, x 방향에 대해서는 4m 길이의 수로에 35개 및 47개의 가변격자(온수 방류구에서 세밀하고, 하류로 갈수록 조밀한 격자 배치)를 구성하여 2차원 해석을 하였다. 방류구 및 수로의 수심은 0.051m, 방류구 폭 b 는 0.0064m에서 0.064m인 경우에 대해 수치실험하였다.

4. 모형의 검증 및 적용

본 연구는 Mikhail 등(1975)의 실험장치 제원에서 수행한 실험결과와 McGuirk과 Rodi(1978)가 수치실험 검증자료로 수행한 1969년 Carter의 실험조건 및 Yu와 Zhang(1989)의 수치실험자료를 종합하여 구성한 Table 2의 자료를 이용하였다. Table 2에서 F_d 는 밀도후루드(densimetric Froude)수로 다음과 같다.

$$F_d = v_d / [gh(\rho_r - \rho_d) / \rho_r]^{1/2} \quad (29)$$

4.1 젤의 진행

Fig. 3은 Test run #4(Δ) 및 #5(\circ)에 대한 개수로 횡단면상의 최대 초과온도에 의한 젤 중심선의 궤

적을 방출구 폭 b 에 대한 무차원 거리로 나타낸 것이다. 일반적으로 무한 정지수역으로 온수 방출시는 최대 초과온도 및 유속을 따르는 궤적은 일치하나, 가로흐름이 존재할 경우는 최대 유속에 따른 궤적이 최대 초과온도를 따른 궤적보다 방출구의 상방향으로 크게 나타난다. 그림에서 보듯이 해석결과는 방출구 근처($x/b < 10$), 즉 Core 영역에서는 실험결과와 비교적 잘 일치한다. 그 이후 젤 포획연행 및 안정화 영역에서는 실험결과와 다소 상이하나, 그 경향은 잘 일치함을 보여 준다. 실험결과와 다소 상이함은 Carter의 실험자료가 시간적분된 온도를 제공하지 못함과, 2차원적 수치실험의 제한성인 젤 저면의 포획연행 및 성층화 현상의 재현에 어려움이 있기 때문이다. 아울러 수치실험 결과는 수심평균한 온도분포이므로 실측한 온도와는 다를 것으로 생각된다. 특히 유속비가 작은 실험에서는 F_d 가 작은 값을 갖음에 따라 부력에 의한 작은 압력 경사에 의해 그 차이가 큰 것으로 미루어 볼 때 이를 잘 설명해 주고 있다. $k-\epsilon$ 및 4-방정식 난류모형에 의한 해석결과는 실험값과 비교적 잘 일치하고, $k-l$ 난류모형에 의한 결과는 잘 일치하지 않으나 앞서 언급한 측면을 고려할 때 비교적 잘 일치한다고 볼 수

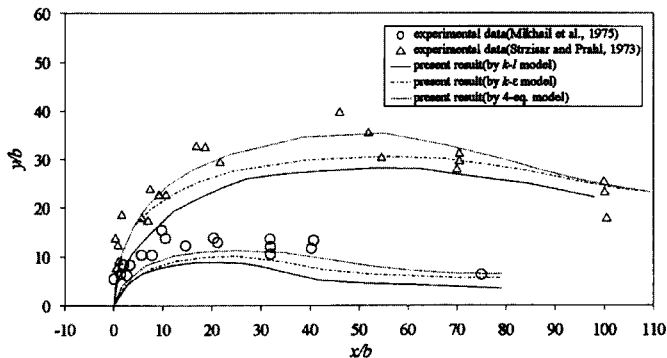


Fig. 3. Center Line Trajectory

있다. 부력생성형의 해석을 위한 변동온도 제곱항 $\overline{T^2}$ 모형화 과정에서 열적 난류구조를 보다 잘 표현해 줄 수 있는 4-방정식 난류모형이 횡방향의 확장양상을 잘 나타내고 있다. 일반적으로 많이 사용되는 난류모형이 해수유동에 자주 사용되어진 $k-l$ 난류모형보다는 중력확장상을 잘 표현해 준다.

4.2 온수의 재순환 길이 및 높이

온수의 재순환에 대한 물리적 특성으로 운동량 플럭스비는 다음과 같다(Mikhail 등, 1975).

$$M_0 = (v_d / u_r)^2 (b/B) \quad (30)$$

온수 재부착거리(reattachment length, L) 및 재순환 높이(recirculating eddy height, H_i)의 정의는 Fig. 4에서와 같다. Fig. 5는 M_0 에 대한 L/B 의 관계로 M_0 가 클 때는 실험결과와 잘 일치하고, 작을

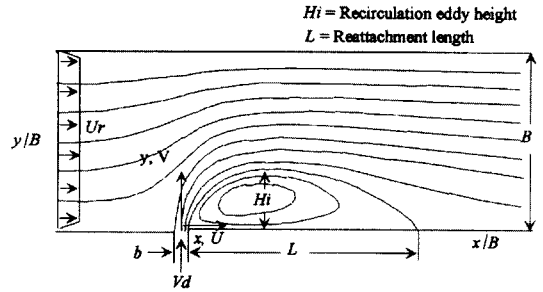


Fig. 4. Flow Configuration and Streamline Pattern

시는 다소 상이하나, 그 상대적 크기는 크지 않고 예측의 각도 및 분석각도에 따라서 민감하게 변화할 것으로 추측된다. 또한 Mikhail 등(1975)의 실험 및 McGuirk과 Rodi(1978)의 수치실험에서 작은 M_0 에서 이 값의 예측이 정확하지 못한 점을 언급한 바 있고, 본 분석에서 유함수(stream function, ψ) 계산시

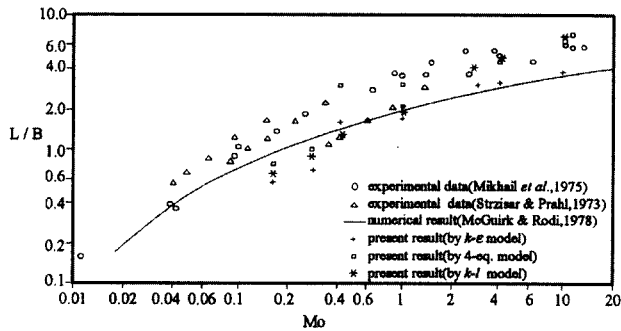


Fig. 5. Reattachment Length

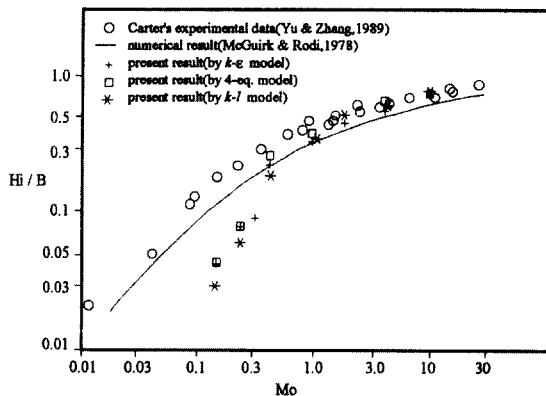


Fig. 6. Recirculation Eddy Height

각 격자점에서의 서로 다른 밀도를 고려하지 않고, 그 계산간격을 다소 크게하여 분석함에 그 원인이 있을 것이다. Fig. 6은 M_0 에 대한 Hi/B 의 관계로 재순환 높이는 작은 M_0 에 대한 계산결과와는 실험값과 상이하다. 실험결과와의 다소 상이함은 앞서 언급한 내용과 같다. 따라서, 재순환 거리는 M_0 값이 클때는 McGuirk과 Rodi(1978)의 실험결과보다 크게 나타나고 있어 운동량 플럭스가 클수록 4-방정식 및 $k-l$ 난류모형의 사용이 보다 효과적임을 알 수 있다. 재순환 높이의 산정에서는 3가지 난류모형에 의한 경우가 유사하다. 따라서 3가지 난류모형의 사용에 의한 흐름 특성의 재현은 거의 유사하나, 온도장의 재현에서는 다소 상이함을 알 수 있다.

4.3 흐름양상 및 초과온도 확산

Fig. 7~Fig. 12는 Carter의 실험결과에 부합시키기 위한 Test run #4 및 #5의 결과로서 수치모형의 검증차원에서 3가지 난류모형을 사용하여 수치실험하였다. 두 수치실험조건은 운동량 플럭스비, M_0 를 같게 하고, R 을 달리하게 하기 위해서 Test run #4에서의 방출구 폭 b 를 작게 하였다. Test run #1에서 #3까지의 결과에서 운동량 플럭스비의 크기에 따라서 방출구 벽면 하류부의 온수 재순환 양상이 크게 달라짐을 볼 수 있다. 온배수의 재순환 양상은 유속분포

및 초과온도 분포 양상과 더불어 분석하여야 하며, 유함수에 의한 유선의 분포를 통해 예측이 가능하다.

$$\partial\psi/\partial y = \rho u \quad (31)$$

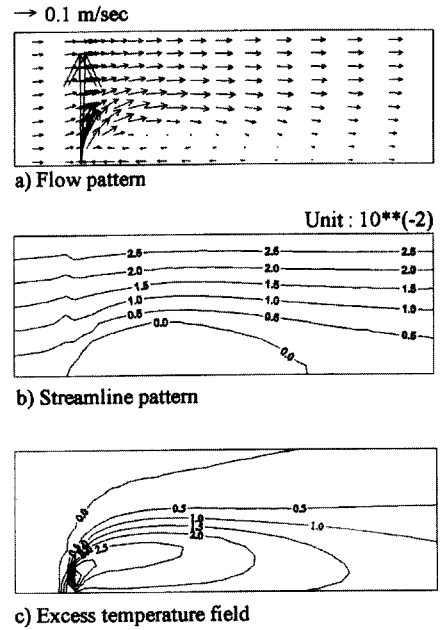


Fig. 8. Result of $k-\epsilon$ Turbulence Model (Run # 4)

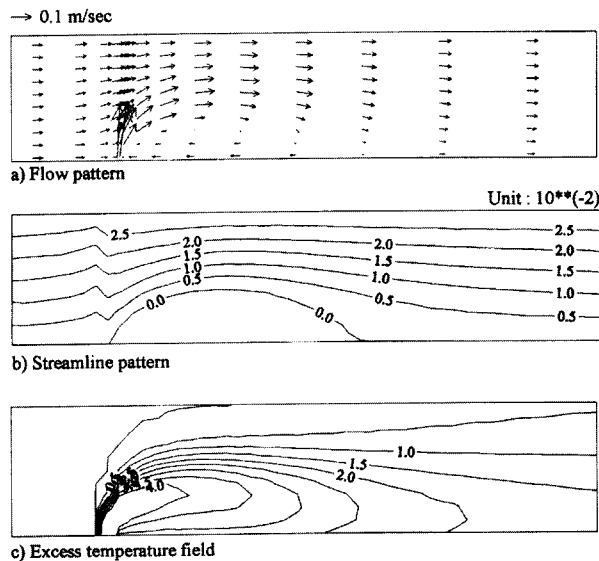


Fig. 7. Result of $k-\epsilon$ Turbulence Model (Run # 5)

$$\partial\psi/\partial x = -\rho v \quad (32)$$

Fig. 7~Fig. 12의 b)에서 등유함수 분포는 방출구 하류부의 유함수 값을 기준으로한 상대적인 값으로 방출구 벽면 하류부에 뚜렷한 온수의 재순환 양상을 보여주며 M_0 가 같기에 그 양상이 유사하나, 다소 상이함은 방출유속이 Test run #4가 약 2배 정도 큰 값이기에 방출구 하류에서 생기는 강한 재순환으로 압력이 저하되면서 부력에 의한 하류부 확장을 저지하게 되어 상류측으로 회계 됨을 유함수 값이 재순환 영역에서 달리함으로 미루어 짐작이 된다. 이는 R 의 값이 부착거리 L 에 또 다른 변수로 작용함을 시사해 준다.

초과온도의 확산은 취·배수구 설계, 주변 생태계 및 환경관리 측면에서 매우 중요하다. 이는 주로 운동량에 의한 이송 및 확산, 포획연행, 중력확장 등에 의해서 지배된다. 수심적분 2차원 모형은 성층화, 질 저면 포획연행, 부력에 의한 횡방향 확장을 고려하기 어렵다. 본 연구에서의 3가지 난류모형인 $k-\epsilon$, $k-l$ 및 4-방정식 난류모형을 사용한 온배수 해석은 Fig. 3의 검증결과에서 보듯이 다소 차이는 있으나, 앞서 언급한 검증자료 및 모형의 제한성을 감안하면 실용성이 있다고 사료된다. Fig. 7~Fig. 12의 c)는 초과온도 확산분포로 2차원적인 접근에 의한 부력에 의한 중력확장의 고려가 다소 어려우나, 4-방정식 난류모형의

도입을 통해서 개선할 수 있으며, 3가지 난류모형의 사용은 모두 운동량에 의한 이송 및 확산을 잘 나타내고 있다.

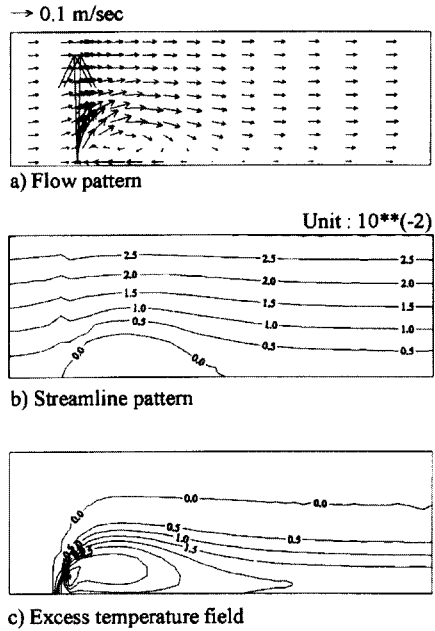


Fig. 10. Result of 4-equation Turbulence Model (Run # 4)

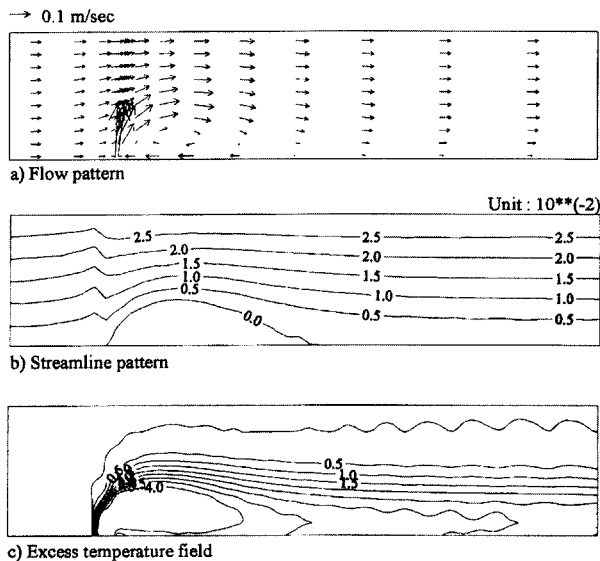


Fig. 9. Result of 4-equation Turbulence Model (Run # 5)

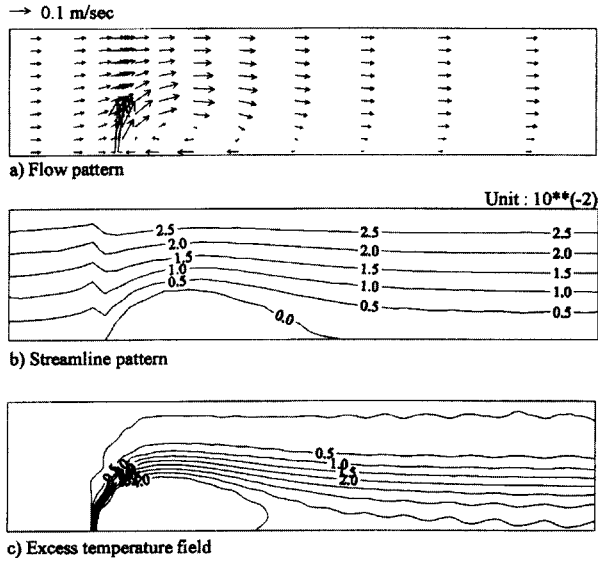


Fig. 11. Result of $k-l$ Turbulence Model (Run # 5)

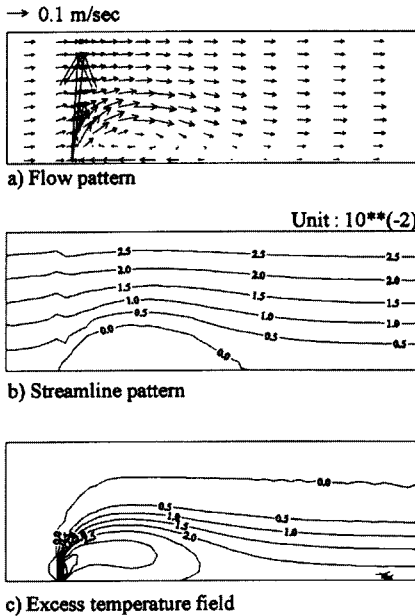


Fig. 12. Result of $k-l$ Turbulence Model (Run # 4)

5. 결 론

$k-\epsilon$, $k-l$ 및 4-방정식 난류모형을 이용한 수심적분 2차원 표면온배수 수치모형을 개발하여 정류

가로흐름과 지형이 간단히 재현된 개수로 모형에 적용하였다. 개발된 수치모형의 수치실험결과와 수리모형 실험결과와 비교적 잘 일치하였다. 특히, 켈포획영역에서의 온배수의 물리적 특성을 잘 나타내고, 안정영역에서는 4-방정식, $k-\epsilon$, $k-l$ 난류모형 순서로 실험결과와 잘 일치함을 볼 수 있었다. 2차원적인 접근에 의해서 켈 저면에서의 포획연행, 성층화, 부력에 기인된 횡방향 중력확장 등을 고려하기는 다소 어려우나, 부력생성 및 난류 열플럭스항의 결정을 위한 변동온도 제곱평균항 및 이의 감쇠율 전달방정식을 추가한 4-방정식 난류모형의 도입을 통해서 이를 개선할 수 있음을 확인하였다. 일반적으로 자주 사용되는 $k-\epsilon$ 및 $k-l$ 난류모형에 의한 난류점성 및 확산계수의 산정은 온수의 재순환 및 초과 온도상승 분포를 적절하게 모의 할 수 있어 본 연구에 의해 개발된 모형의 적용성을 재고시켰다. 3가지 난류모형의 적용에 따른 흐름 특성의 재현에는 모두 유사함을 보여주었다. 특히, 부력생성항의 해석을 위한 변동온도 제곱항 $\overline{T^2}$ 모형화 과정에서 열적 난류구조를 보다 잘 표현해 줄 수 있는 4-방정식 난류모형의 도입을 통한 온배수 해석이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 상지대학교 교내 연구비 지원

에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 유동훈, 김창식 (1994). “ $k-l$ 난류모형을 이용한 연안류 수치해석.” 한국해양·해양공학회지, 한국해양·해양공학회, 제6권, 제3호, pp. 234-244.
- 이남주, 최홍식, 이길성 (1994). “가로흐름 수역으로 방출되는 2차원 표면온배수 수치모형 비교 연구.” 한국해양·해양공학회지, 한국해양·해양공학회, 제6권, 제1호, pp. 40-50.
- 최홍식 (1996). “ $k-l$ 난류모델을 이용한 온배수 수치해석.” 한국수문학회지, 한국수문학회, 제29권, 제2호, pp. 199-207.
- 최홍식, 정경태, 소재귀, 이길성 (1993). “가로흐름 수역으로 방출되는 2차원 표면 온배수 난류모형.” 한국해양·해양공학회지, 한국해양·해양공학회, 제5권, 제2호, pp. 91-98.
- Blumberg, A. F., Galperin, B., and O'Connor, D. J. (1992). “Modeling vertical structure of open channel flow.” *J. of Hyd. Eng.*, ASCE, Vol. 118, No. 8, pp. 1119-1134.
- McGuirk, J. J. and Rodi, W. (1978). “A depth-averaged mathematical model for the near field of side discharge into open-channel flow.” *J. of Fluid Mech.*, Vol. 86, Part 4, pp. 761-781.
- 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.
- Rastogi, A. K. and Rodi, W. (1978). “Prediction of heat and mass transfer in open channels.” *J. of Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 104, No. HY3, pp. 397-420.
- 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 Arnal, M.P., Dept. of Mech. Eng., Univ. of California, Berkeley.
- 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. of Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 1787-1806.
- Stuttgen, W. and Peters, N. (1986). “Stability of similarity solutions by two-equation models of turbulence.” *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 6, pp. 824-830.
- Vollmers, H. and Rotta, J. C. (1977). “Similar solutions of the mean velocity, turbulent energy and length scale equation.” *AIAA Journal*, Vol. 15, No. 5, pp. 714-720.
- Yu, L. R. and Zhang, S. N. (1989). “A new depth-averaged two-equation ($k-w$) turbulent closure model.” *Refined flow modelling and turbulence measurements*, Universal Academy, Inc.

(논문번호:98-069/접수:1998.11.05/심사완료:1999.03.22)