

가로흐름 水域으로 放出되는 3次元 溫排水 亂流模型 A Three-Dimensional Turbulence Model for the Thermal Discharge into Cross-Flow Field

李南周* · 崔興植** · 許再寧***

Nam Joo Lee*, Hung Sik Choi** and Jae-Yeong Huh***

要 旨: 가로흐름이 존재하는 무한수역으로 방출되는 표면 온배수에 의한 온도장 예측을 위하여 $k-\epsilon$ 난류모델을 이용한 근해역 3차원 온배수 수치모델을 개발하였다. 개발된 모델에 의한 수치실험 결과는 다소 제한적이긴 하나, 실험결과 자료와 비교적 잘 일치하였다. 3차원 온배수 난류모델의 적용을 통해 가로흐름과 상호작용은 물론 수심적분 2차원 수치모델에서 해석이 곤란한 온배수 확장에 따른 성층화 현상, 부력에 기인된 횡방향의 중력확장 및 제트 저면에서의 포획연행 현상을 잘 나타내었다.

Abstract □ For an accurate prediction of the temperature field induced by surface discharge of heated water into an ambient cross-flow field, a three-dimensional near-field numerical model using $k-\epsilon$ turbulence closure is developed. Rather restricted as it is, the numerical results of the model agree well with the experimental data. The developed model simulates quite adequately the stratification, gravitational lateral spreading, and upward entrainment of thermal jet, which cannot be simulated by a depth-integrated two-dimensional numerical model, as well as the interaction with cross-flow.

1. 서 론

원자력, 화력 발전소 및 임해공업시설로부터 방출되는 냉각용 온수는 하천 또는 연안 일대 해수의 열 균형을 파괴시켜 환경관리 및 생태계의 보전에 좋지 못한 영향을 야기한다. 이러한 영향은 전반적인 수층의 온도 상승과, 가동 중단시 갑작스런 수온의 저하로 수중 생물상에 많은 영향을 초래한다. 이러한 측면에서 온배수의 이동 및 확산에 대한 정성, 정량적 예측은 환경영향평가, 환경관리 및 생태계 보전에 중요한 문제이다.

온배수 이동 및 확산에 대한 근역(near-field)연구는 물리적 실험연구와 제트 적분모델 및 일반 수치모델로 구분된다. 물리적 실험 연구는 수치모델의 개발에 필요한 자료 제공측면에서 많은 연구가 있어 왔다. 제트 적분모델은 온배수 특성의 개념화 과정을 통해서 간략화된 지배방정식을 적분 또는 제트의 유출·입

개념을 이용한 적분을 통한 상미분 방정식을 해석하는 것으로 PDS 및 MIT 모델이 대표적이다. 이 방법은 온배수 특성을 해석하는데 비교적 접근이 용이하나, 모델의 간략화 과정에서 도입된 여러가지 가정에 의해 비교적 정확도가 떨어진다(최·이, 1990). 반면에 일반 수치모델은 온배수의 흐름 및 온도특성을 나타내는 연속방정식, Reynolds 방정식 및 질량/열 전달방정식에 난류특성을 해석할 수 있는 난류 전달방정식을 도입한 지배방정식을 여러 수치기법을 이용하여 해석하는 방법이다.

근역 온배수 이동 및 확산에 적용한 난류모델은 난류운동에너지, k 및 그 감쇄율, ϵ 의 전달 방정식을 해석하는 $k-\epsilon$ 난류모델에 의한 해석(허 등, 1991; 최 등, 1993; 허, 1993)이 대부분이고, 이 2-방정식 난류 모델에 평균온도 자승유동항, T'^2 및 그 감쇄율, ϵ_T 에 대한 전달방정식을 추가한 4-방정식 난류모델에 의한 해석(Choi and Lee, 1992)을 포함하여 다양한 난류

*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)

***대전대학교 土木工學科 (Department of Civil Engineering, Dae Jeon University, Daejeon, Korea)

모델이 있다. 특히 이 등(1994)은 이 두 방법에 의한 해석을 비교분석한 바 있다.

본 연구는 온수의 이동 및 확산에 대한 방출 수역이 가지는 하천류, 연안류 및 조석 등과 온수 제트와의 복잡한 상호작용을 고려할 수 있는 모델 개발의 초기단계 노력으로 최 등(1993)에 의해 개발한 수심평균 2차원 난류모형이 고려하기 어려운 정상성 가로흐름 하에서 온배수 확산에 따른 성층화 현상, 부력에 기인된 횡방향의 중력확장 및 제트 저면에서의 포획연행(entrainment)을 고려할 수 있는 3차원 난류모델의 개발을 다룬다.

2. 지배방정식

온배수 이동 및 확산의 해석에 사용되는 3차원 연속, 운동량 및 온도 전달방정식은 다음과 같다.

연속방정식:

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

운동량방정식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2c)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, u , v 및 w 는 x , y 및 z 방향에 대한 시간 평균유속이고 난류운동에너지와 그 감쇄율에 따른 난류점성계수 μ_t 는 다음과 같다.

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

배출구 인근역 제트흐름에서 운동량 방정식에 나

타난 x -방향의 확산항은 횡방향(y) 및 수심방향(z)보다 그 경사가 작으므로 무시 가능하다(McGuirk와 Rodi, 1976). 이는 운동량 방정식에서 압력경사항을 기지값이라 가정하면 본래의 타원형 방정식은 x 방향에 대해 포물형 방정식으로 전환된다. 이같은 방정식 형태의 전환은 컴퓨터를 이용한 해석에 있어서 경제적이다. 따라서 운동량 방정식에서 x 방향 확산항은 생략 가능하고 온도 전달방정식에서도 마찬가지이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_t \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 T 는 온도이고, Γ_t 는 난류 확산계수로 $\Gamma_t = \mu / \sigma_t$ 의 관계를 가지고, σ_t 는 Prandtl수로 0.9-1.0이다. 상태방정식:

$$\begin{aligned} \rho = (999.84 + 16.95T - 7.99 \times 10^{-3} T^2 - 46.17 \times 10^{-6} \\ T^3 + 105.56 \times 10^{-9} T^4 - 280.54 \times 10^{-12} T^5) / \\ (1 + 16.88T) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 ρ 의 단위는 kg/m^3 , T 는 $^{\circ}C$ 이다.

난류전달 방정식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wk)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G - \epsilon \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \epsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \epsilon)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) \\ + C1 \frac{\epsilon}{k} G - C2 \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5b)$$

여기서 $C1 = 1.43$, $C2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$ 이고 G 는 생성항으로 다음과 같다(Rastogi와 Rodi, 1978).

$$G = \mu_t \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (6)$$

3. 수치해석

3.1 일반차분식

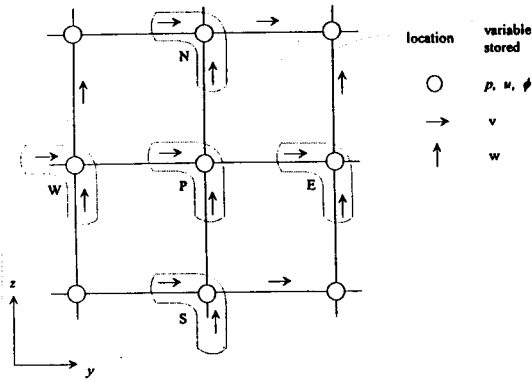


Fig. 1. Staggered finite difference grid system for 3D turbulence model.

부메랑 형태의 staggered된 격자에서 유속 u, v 및 w 와 스칼라량 p, ϕ, k 및 ϵ 의 정의는 Fig. 1에서와 같다. 앞서의 지배방정식 (2), (3) 및 (5)를 다음과 같이 일반식으로 정의하여 차분식을 구한다.

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_\phi \quad (7)$$

Hybrid scheme의 사용에 따른 식 (7)의 차분형태는 중앙차분 형태에서 유속플럭스의 방향에 따른 전방 차분식의 형태로 전환되는 식으로 다음과 같다.

$$A_P \phi_P = A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + B \quad (8)$$

여기서, $A_P = A_E + A_W + A_N + A_S + F_U - S_p \Delta y \Delta z$, $B = F_U \phi_{P,U} + S_U \Delta y \Delta z$, $S_U + S_P \phi_P = S_{\phi,P} \Delta y \Delta z$, $A_E = [-F_e, D_e - F_e/2, 0]$, $A_W = [F_w, D_w - F_w/2, 0]$, $A_N = [-F_n, D_n - F_n/2, 0]$, $A_S = [F_s, D_s - F_s/2, 0]$, $F_U = (\rho u)_{P,U} \Delta y \Delta z / \Delta x$ 이때 하첨자 U는 본 차분식이 x-방향으로 진행하면서 y-z 평면에 대해 단계적 적분(marching integration) 하는 방법이므로 현재 적분하는 전단면(upstream)에서의 기지값을 의미한다. []는 세 값중 최대값을 의미한다.

운동량 방정식에 대한 차분식은 ϕ 에 대한 일반적 차분식 (8)과는 다소 다른 형태이다.

3.2 압력-속도수정

운동량 방정식의 해석에서 압력항이 기지값이 아

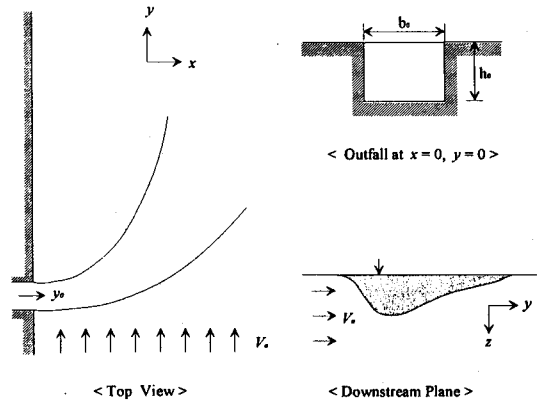


Fig. 2. Jet flow and outfall configuration.

니므로 해석된 u, v 및 w 의 값은 연속방정식을 만족하지 못한다. 따라서 "guess-and-correct"에 의해 압력항의 수정과 그에 따른 유속의 수정이 요구된다. 운동량방정식에서 추측된 압력장 p^* 를 이용하여 v^* 및 w^* 를 구한다. 이때의 v^* 및 w^* 는 연속방정식을 만족하지 못하므로 압력을 $p = p^* + p'$ 로 수정하여 수정된 압력에 의한 운동량 방정식을 풀어서 속도 수정식 $v = v^* + v'$ 및 $w = w^* + w'$ 를 구한다. 압력의 수정 p' 는 연속방정식을 이용하여 구한다.

$$A_P p'_P = A_E p'_E + A_W p'_W + A_N p'_N + A_S p'_S + B^p \quad (9)$$

4. 모형의 구성, 초기 및 경계조건

4.1 모형의 구성

본 연구는 정상성 가로흐름이 존재하는 수역으로 방출되는 온배수에 대한 해석으로 Fig. 2에서와 같은 방출구조에 대해 적용한다. y-z 평면에 대한 격자는 70×20 의 배열을 가지고, x-방향은 본 계산이 marching integration하게 되므로 방출구 근처에서는 세밀한 간격으로 진행하고 제트가 진행하면서 조밀한 간격으로 원하는 지점까지 계산을 수행한다. 아울러 횡방향의 격자는 중력확장 범위를 고려하여 x-방향 중분이 발생되는 지점에서 2배씩 확장하였다. 계산결과는 x-방향으로 출력을 원하는 지점을 선정하여 x-, y-, z-방향의 유속과 온도를 출력한다. 주요 입력자료인 방출구의 제원은 $b_o = 5.0$ m, $h_o = 5.0$ m의 정사각형 구조이다.

4.2 초기 및 경계조건

초기조건으로서는 방출구에서의 온배수 특성으로 제트의 유속 u_0 , 온도 T_0 와 주위수의 가로흐름 유속 V_a 및 온도 T_a 가 주어진다. 그에 따른 초기 난류운동에너지 k_0 및 그 감쇠율 ϵ_0 는 다음과 같다.

$$k_0 = 0.03u_0^2, \quad \epsilon_0 = k_0^{3/2} / (0.005H)$$

경계조건은 Fig. 3에서와 같다.

4.3 해석방법

앞서의 유한차분식은 운동량 방정식에서 압력경사 항을 무시한 후라면 부분 포물형 방정식의 형태이므로 Patankar, Rafiinejad와 Spalding(1975)의 해석 방법의 수정을 통해 가능하다. 해석은 x-방향으로 진행하면서 온수방출 횡단면(y-z)의 모든 독립변수에 대한 기지값으로부터 시작한다. 앞서의 차분식은 삼중 대각행렬로 Thomas algorithm을 이용한 line-by-line 방법에 의해 구하고 추정된 압력에 의한 연속방정식의 불만족은 그 오차가 전 흐름 영역내 총질량의 0.5% 이하일 때까지 반복하여 수행한다.

5. 모델의 검증 및 적용결과 고찰

본 연구는 검증자료의 제한성으로 인하여 간단한 검증을 실시 하였다. 모형검증 및 적용결과 고찰에

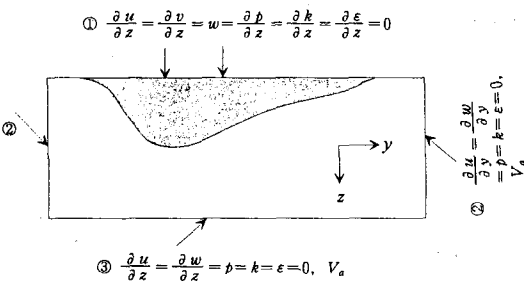


Fig. 3. Boundary conditions on y-z plane.

Table 1. Test run conditions for model simulation

Run	uo(m/s)	va(m/s)	R	To(°C)	Ta(°C)	Fd
1	9.80	1.0	9.80	27.5	13.5	25.98
2	9.80	2.0	4.90	27.5	13.5	25.98
3	9.80	4.0	2.45	27.5	13.5	25.98

$R = u_0/v_a$ 이고, Fd 는 방출수수의 특성을 나타내는 계수로 Densimetric Froude 수이다.

사용한 온배수 조건은 Table 1에서와 같다.

5.1 모델의 검증

Fig. 4 및 5는 각각 test run #2 및 #3에 대한 모델 검증으로 수면하 2.5 m 지점의 제트 궤적을 나

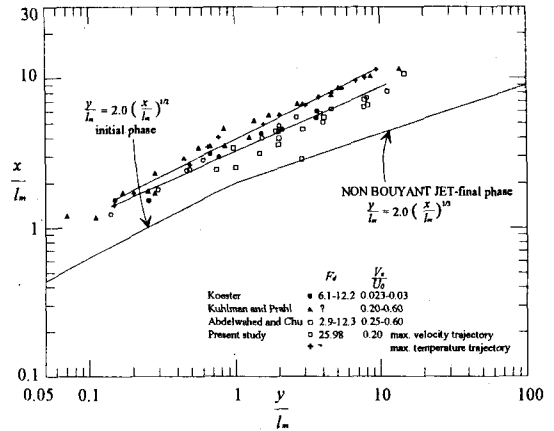


Fig. 4. Trajectories of free deflected buoyant jet in a cross-flow in comparison to trajectory laws for non-buoyant jets.

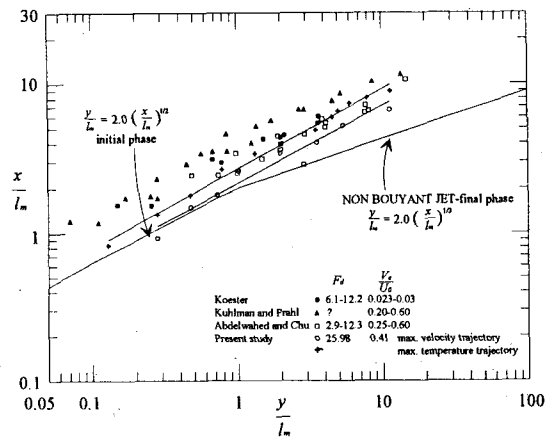


Fig. 5. Trajectories of free deflected buoyant jet in a cross-flow in comparison to trajectory laws for non-buoyant jets.

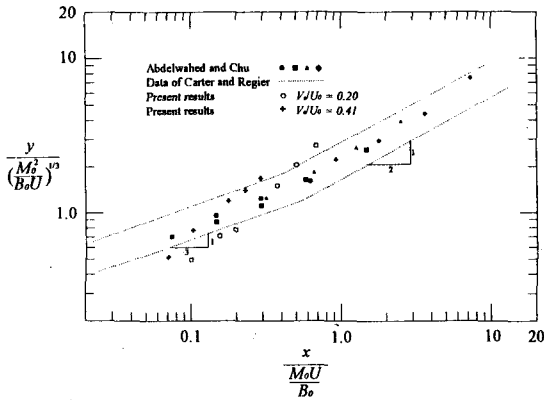


Fig. 6. Alternating scaling of free deflected jet trajectories.

타낸 것이다. 1 m 은 $u_0(\text{hobo})^{1/2}/v_a$ 값이고, $x/1\text{ m}$ 및 $y/1\text{ m}$ 은 가로흐름 유속비 및 방출구 크기를 고려한 무차원 값이다. Test run #2 및 #3은 $F_d=25.98$, $R=4.9$ 및 2.45로 Kuhlman 및 Prahl과 Abdelwahed 및 Chu의 실험값과 F_d 값은 차이가 크나, R 의 값은 다소 일치한다. 그림에서 모델의 적용결과를 연속적으로 처리치 못한은 제트 진행방향의 시뮬레이션 결과를 10 m 내지 40 m 간격으로 출력함에 있고, 실선은 회귀분석에 의한 결과이다. 검증결과는 자료의 제한성에 의해 만족치는 못하나, 실험결과와 큰 상이함이 없음을 보여준다. 그림에서 부력이 존재하지 않는 제트에 관한 식(Chu와 Jirka, 1986)에서 방출 초기 및 후기양상에서 직선의 기울기가 다소 다른 것을 보여주는데 본 수치실험 결과 역시 같은 추세를 보여준다. 경계점 이전에는 급경사이고 이후는 다소 완만한 경사를 이룬다. 이는 가로흐름이 제트에 영향을 주는 양상은 부력적 특성에 의해 크게 지배되지 않음을 보여 준다 하겠다. 최대유속과 최대 초과 온도상승을 따른 제트의 궤적이 일치하지 않고 다르게 나타났고, 최대 초과온도 상승을 따른 궤적이 포획 연행 영역을 지나며 가로흐름 하류부로 많이 휘어짐을 볼 수 있다. 이는 온도의 확산이 가로흐름의 영향으로 빨리 진행됨이라 생각된다. Fig. 6은 Abdelwahed와 Chu의 line impulse 모델에 의한 x 및 y 축에 도입된 무차원 변수를 이용하여 제트의 특성을 분석한 결과로 실험값과 불일치하나, 경향은 다소 일치함을 보여 주고 있다. 추후의 연구과제이다.

5.2 흐름양상 및 온배수 제트특성

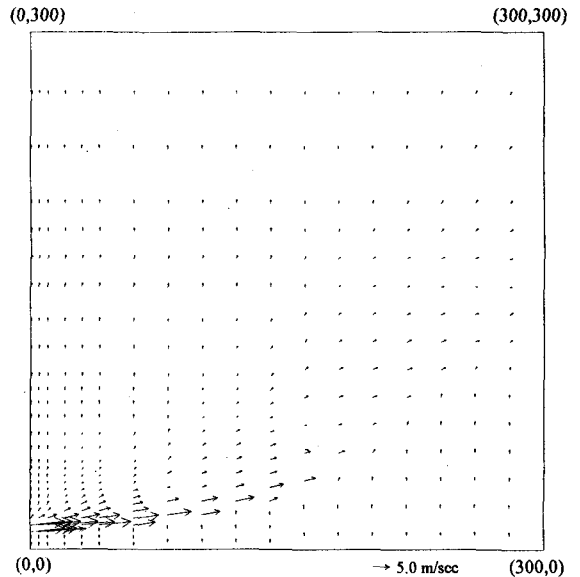


Fig. 7. Plan view of velocity field. (Crossflow: 1.0 m/sec 2.5 m below the free surface)

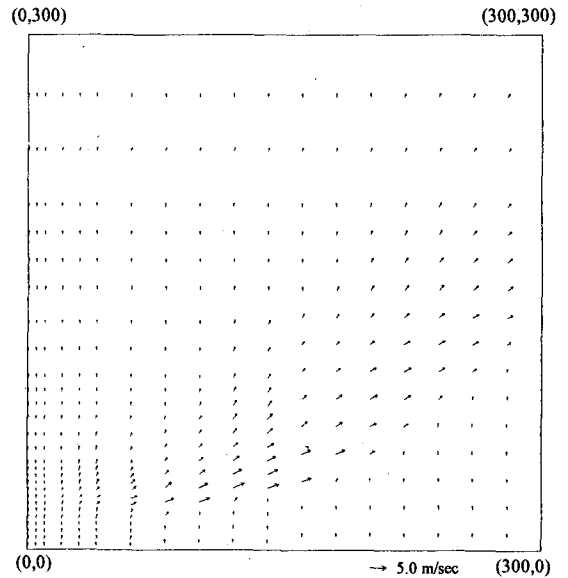


Fig. 8. Plan view of velocity field. (Crossflow: 1.0 m/sec 5.5 m below the free surface)

방출구 근처에서 제트는 강한 운동량으로 인해 제트 궤적이 거의 휘지 않고(코어영역; core region) 운동량이 작아진 하류에서 궤적이 가로흐름 방향으로 휘어진다. 물론 휘어지는 정도는 가로흐름 유속이 2.0 m/s 인 경우가 1.0 m/s인 경우보다 크다(Fig. 7 및 9). x -방향 약 100 m 지점에서 제트 중심선의 가로흐름

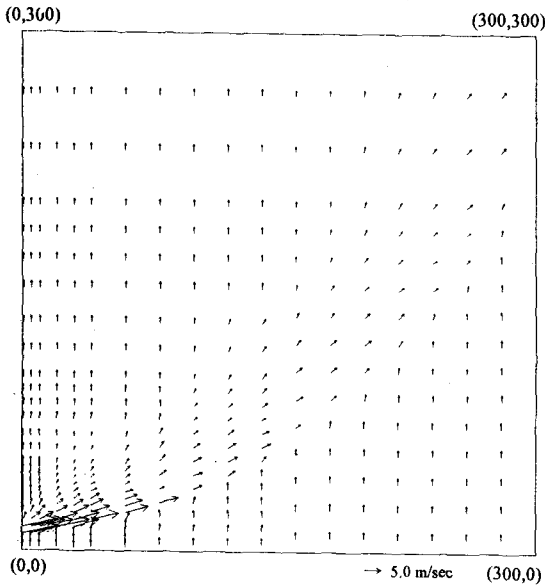


Fig. 9. Plan view of velocity field. (Crossflow: 2.0 m/sec 2.5 m below the free surface)

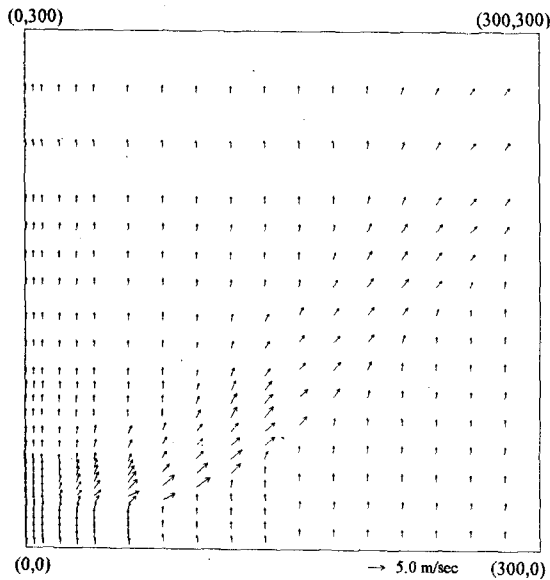


Fig. 10. Plan view of velocity field. (Crossflow: 2.0 m/sec 5.5 m below the free surface)

하류부 가장자리에서의 유속분포는 제트 주변에서의 포획연행 현상에 의해 유속이 제트 궤적 중심쪽으로 향하고 수심방향으로는 그 양상이 점차 약해지는 경향(제트 포획연행 영역; entrainment region)이 있다(Fig. 8 및 10). 이는 제트 저면 및 가장자리에서의 주위수와 포획연행현상이라 생각된다. 가로흐름이 큰

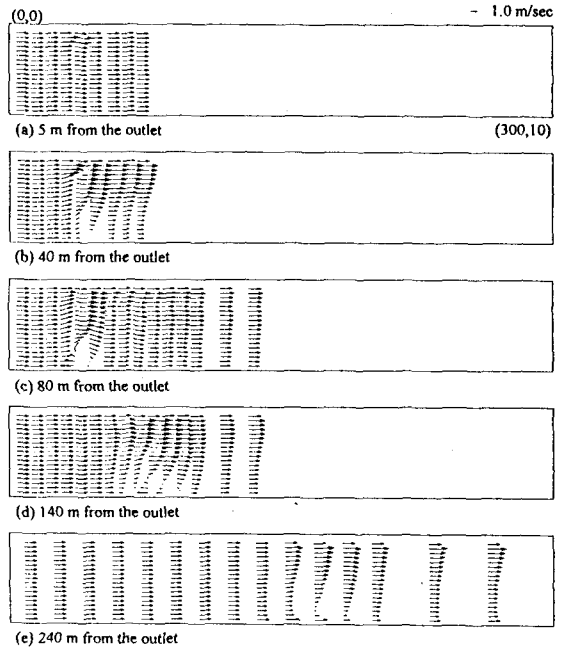


Fig. 11. Sectional view of velocity field (crossflow: 2.0 m /sec).

값을 가짐에 따라 제트와의 상호작용이 크게 되어 코아영역 및 포획연행영역은 작은값의 가로흐름을 갖는 경우의 제트 특성과는 달리 방출구쪽으로 다가오는 현상이 있다.

코아영역에서 제트 중심선의 유속비(u/u_0)와 초과온도 상승비($(T-Ta)/(T_0-Ta)$)는 서서히 감소되고, 포획연행영역에서의 이 값은 현저하게 저하된다. 여기에서 난류 포획연행에 의한 연직방향의 확장이 크게 되고 제트의 최대 깊이가 발생되고, 부력에 의한 횡방향 확장이 서서히 진행된다. 이 영역을 지난 안정영역(stable region)에서는 포획연행 현상은 일어나지 않고 주위수의 영향을 많이 받는다. 제트의 연직 깊이는 부력에 기인된 중력에 의한 횡방향의 확장으로 점차 얇아지며 회색을 및 초과온도 상승비는 거의 일정하다. 그 이후의 영역은 열손실 영역(heat loss region)으로 제트의 성질은 없고 수표면의 열교환에 의해 초과온도가 급격히 떨어진다.

Fig. 11은 test run #2에 대한 y-z 평면에서의 유속분포로 방출구에서부터 5단계의 거리를 나타낸 것으로 저면에서의 제트 포획연행 현상을 잘 나타내고 있다.

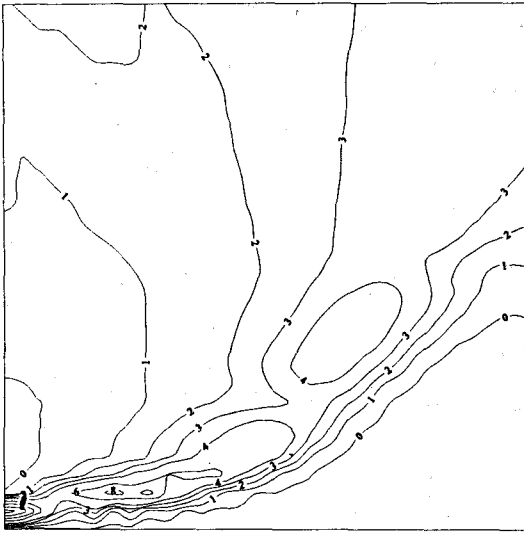


Fig. 12. Plan view of excess temperature field. (Crossflow: 1 m/sec 2.5 m below the free surface)



Fig. 14. Plan view of excess temperature field. (Crossflow: 2 m/sec 2.5 m below the free surface)

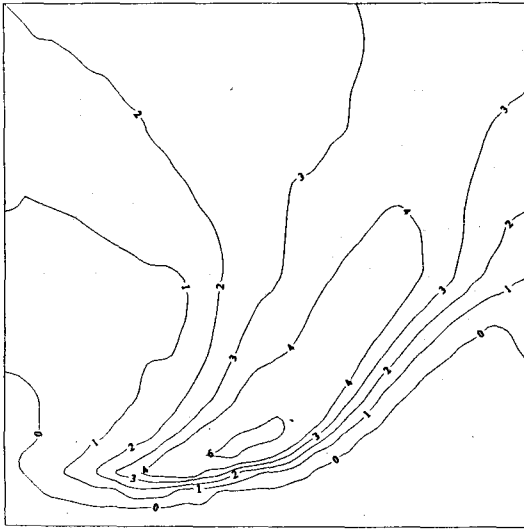


Fig. 13. Plan view of excess temperature field. (Crossflow: 1 m/sec 5.5 m below the free surface)

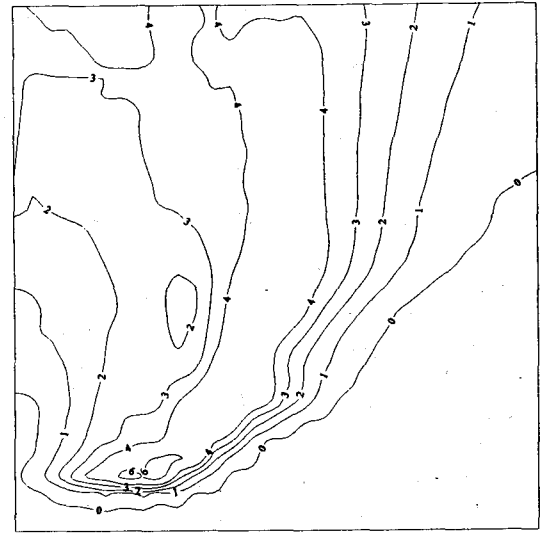


Fig. 15. Plan view of excess temperature field. (Crossflow: 2 m/sec 5.5 m below the free surface)

5.3 초과온도 확산

Fig. 12 및 13은 Test run #1에 대한 x-y 평면상 초과온도 확산 분포로 수표면하 2.5 m, 5.5 m일 때이다. 초과온도확산의 가로흐름에 의한 휘어짐과 방출구 깊이 이하인 수면하 5.5 m에서의 온도분포가 강한 부력 및 운동량에 의해 방출구 근처에서 확산되지 않음으로 보아 흐름장에서 언급한 코어영역으로 간

주되고, 그 이후 포획연행 및 안정영역의 양상을 보여준다. Fig. 14 및 15는 Test run #2의 경우로 가로흐름이 2.0 m/s로 다소 큰 값을 가짐에 따라 크게 휘어지는 양상이 뚜렷하다. 수면하 5.5 m 지점에서의 초과온도 분포로부터 앞서 언급한 영역의 구분이 가능하고, 방출구 가까이에서 제트 포획연행이 일어남을 알 수 있다.

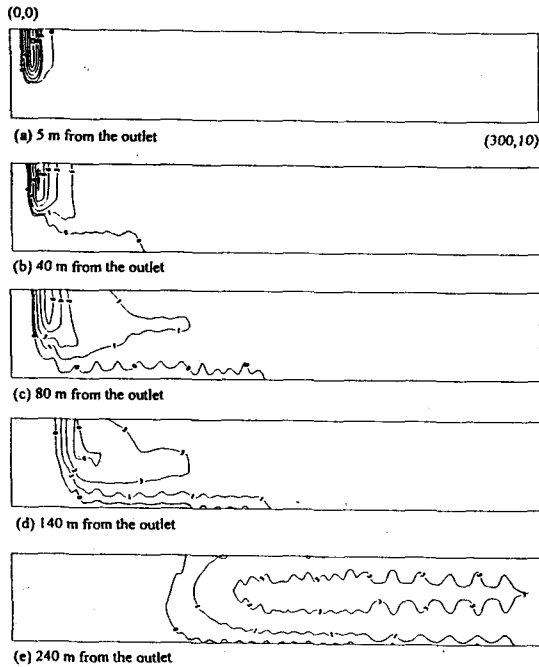


Fig. 16. Sectinal view of excess temperature rise (crossflow: 1.0 m/sec).

Fig. 16은 Test run #1의 제트 진행단계별 y-z 평면에 대한 초과온도 확산 분포이다. 방출구 근처에서는 방출구 형상과 유사한 온도분포를 가지게 되며 제트의 운동량 및 부력에 의한 성층화 현상에 의해 가로흐름 하류부로 점차 이송, 확산된다. x-방향 약 40 m 지점에서 가로흐름 하류부에서 강한 포획연행 현상이 야기됨을 알 수 있으며, 60~100 m 지점에서 이 현상이 뚜렷해지며 최대 연직깊이에 도달함을 보여준다. 140~160 m 지점을 지나면서 안정화된 성층화 현상을 보여주고, 가로흐름의 영향을 받아 하류부로 서서히 이동하는 양상을 보인다.

6. 결 론

근해역 온배수 특성의 해석을 위한 수심적분 2차원 온배수 난류모형의 한계점을 극복하고자 가로흐름 존재하의 k-ε 난류모델을 이용한 3차원 온배수 수치모델의 개발하였다. 자료의 제한성에 의해 충분한

검증을 실시치 못했으나, 실험결과 자료와 비교적 잘 일치하였다. 개발된 모델의 적용 및 고찰을 통해 가로흐름과의 상호작용을 고려한 온배수의 특성을 분석하였다. 2차원 수심적분 온배수 수치모델에서 해석이 용이치 않은 온배수 확장에 따른 성층화 현상, 부력에 기인된 횡방향의 중력확장 및 제트 저면에서의 포획연행 현상을 본 연구에 의해서 개발된 3차원 온배수 난류모델은 잘 재현해 주었다.

사 사

본 연구는 1994년도 한국과학재단 특정연구(과제번호: 94-0600-06-02-3)비 지원에 의한 연구의 일부 결과이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

이남주, 최홍식, 이길성, 1994. 가로흐름 수역으로 방출되는 2차원 표면온배수 수치모형 비교연구, 한국해양·해양공학회지, 6(1), pp. 40-50.
 최홍식, 이길성, 1990. 표면온배수 수치모형: 제트적분모델의 비교평가, 한국 수문학회지, 23(4), pp. 487-497.
 최홍식, 정경태, 소재귀, 이길성, 1993. 가로흐름 수역으로 방출되는 2차원 표면 온배수 난류모형, 한국해양·해양공학회지, 5(2), pp. 91-98.
 허재영, 1993. 2차원 밀도장에서 유동을 해석하기 위한 수치모델의 개발, 한국 수문학회지, 26(4), pp. 61-71.
 허재영, 최한기, 강주복, 1991. 2차원 표층방류 밀도분류의 k-ε 모델에 의한 수치해석, 한국해양·해양공학회지, 3(2), pp. 81-91.
 Choi, H.S. and Lee, K.S., 1992. Turbulence models for the surface discharge of heated water, *Korean J. Hydros-cience, KAHS*, 3, pp. 61-79.
 Chu, V.H. and Jirka, G.H., 1986. Surface buoyant jets and plumes, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, 6, pp. 1053-1084.
 McGuiirk, J.J. and Rodi, W., 1978. A depth-averaged mathematical model for the near field of side discharge into open-channel flow, *J. Fluid Mech.*, 86, Part 4, pp. 761-781.
 Patankar, S.V., Rafiinejad, D. and Spalding, D.V., 1975. Calculation of the three-dimensional boundary layer with solution of all three momentum equations, *Com. Met. in Appl. Mech. and Eng.*, 6, pp.283-292.
 Rastogi, A.K. and Rodi, W., 1978. Prediction of heat and mass transfer in open channels, *J. Hydraulics Div., ASCE*, 104(HY3), pp. 397-420.