

溫水放流의 歸環에 放流口 長이의 影響

尹泰勳*, 陸雲洙**, 李熔坤***

1. 序論

발전소의 냉각수, 공장과 생활하수를 하천이나 연안으로 방류하는 가장 보편적인 방법은 수용수와 동일한 수심을 갖는 개수로를 통해서 방류하는 것이다. 이러한 강제부력류는 가로흐름에 의하여 연안쪽으로 만곡되고 연안의 고체경계는 유입을 차단하여 저압의 순환영역이 형성되고 연안으로 만곡된 부력류는 연안에 귀환되는 경향을 갖는다. 본 연구에서는 가로흐름과 동일한 수심으로 방류되는 경우에 있어서 방류구의 연안으로 부터의 돌출길이가 강제부력류의 거동과 특히 귀환에 미치는 영향을 차원해석과 수리실험을 통하여 해석한다.

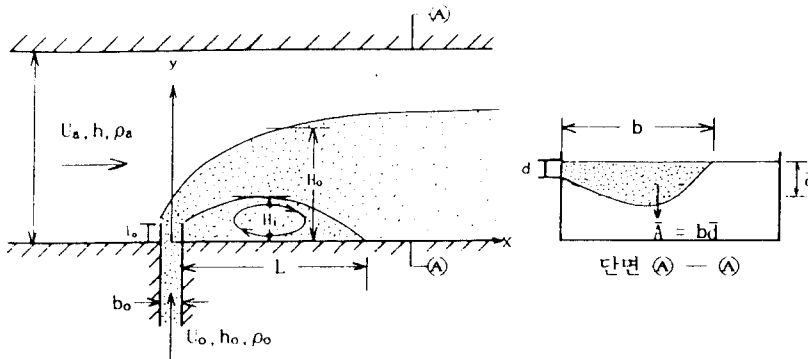


그림 1. 부력방류의 정의도

2. 次元解析

浮力放流의 특성은 많은 독립변수의 영향을 받는다. 특히 가로 흐름과 동일한 수심으로 방류되는 부력 방류에 대한 중요한 변수는 다음과 같다. 유입체적흐름을 $Q_o = U_o A_o$, 운동량 흐름을 $M_o = Q_o U_o$, 부력흐름을 $F_o = g' Q_o$, 가로흐름의 유속 U_a , 방류수로의 돌출길이 l_o , 가로흐름의 수심 h , 가로흐름의 폭 B 등이다. 여기서 U_o , A_o 는 각각 방류수로의 유속, 흐름단면적이고 첨자 o 는 측수로의 출구조건을 나타낸다. 또한 g' 는 變換重力加速度로서 $g' = (\Delta\rho/\rho_o)g = \{(\rho_a - \rho_o)/\rho_o\}g$ 로 정의되며, 여기서 ρ_a , ρ_o 는 유입 유체와 가로흐름의 밀도이다. 이들을 함수형태로 나타내면 다음과 같다.

$$H_o, L, \Delta\rho = f_1(Q_o, M_o, F_o, U_a, l_o, h, B) \quad (1)$$

초기 운동량과 온도 차이에 의한 부력을 갖는 부력절의 경우 식 (1)에 대하여 차원해석을 수행하면 식(2)와 같이 표현된다.

- * 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수
 ** 정희원, 관동대학교 토목공학과 부교수
 *** 한양대학교 토목공학과 석사과정

$$\frac{H_o}{l_m}, \frac{L}{l_m}, \Gamma = f_2\left(\frac{l_m}{l_b}, \frac{l_m}{B}, \frac{l_o}{l_m}\right) \quad (2)$$

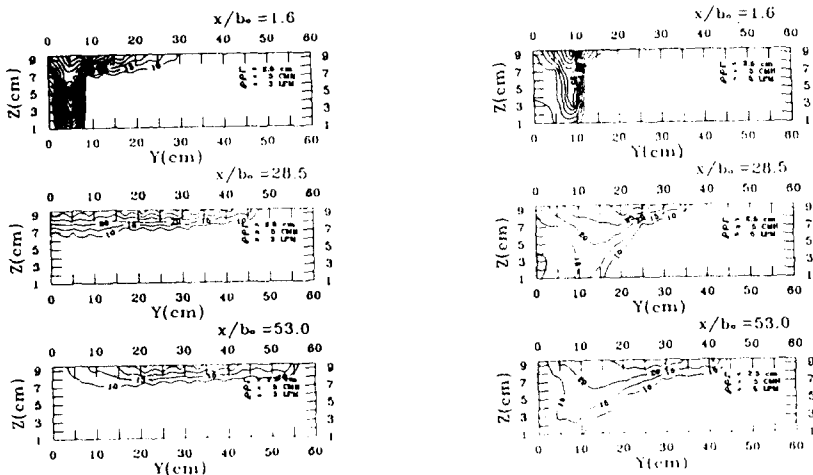
여기서 l_m 은 $l_m=M_o/hU_a^2$ 로 정의되는 운동량 특성길이이다. l_m 은 운동량 젤의 속도가 가로흐름의 속도의 크기 정도(order)로 감소하는 횡방향 거리이다(Fischer, 1979). l_b 는 $l_b=F_o/U_a^2$ 로 정의되는 浮力特性길이로서 부력젤의 횡방향 유입속도가 가로흐름의 속도 정도로 감소하는 횡방향 거리이다(Fischer, 1979). Γ 는 $\Gamma=(T-T_a)/(T_o-T_a)\times 100$ 로 정의되는 무차원 온도차이이고 T 는 부력류의 온도, T_a 는 수용수의 온도, T_o 는 방류수의 온도이다. l_m/l_b 는 방류밀도후르드수 F_{ro} ($U_o/\sqrt{g'h}$)와 F_{ra} ($U_a/\sqrt{g'h}$)의 곱이다.

3. 實 驗

실험이 수행된 가로흐름의 수로는 길이 500cm, 폭 60cm, 깊이 20cm인 아크릴로 제작된 수로이다. 이 수로에 직각으로 방류되는 측수로는 폭이 1cm, 깊이 9.5cm이다. 가로흐름은 0~30m³/h(500 LPM) 범위의 로토미터를 이용하여 유량을 측정하였고, 이로부터 유속을 계산하였다. 부력방류는 온수의 방류로 발생시켰으며 0~10LPM 범위의 로토미터를 사용하여 유량을 측정하였다. 방류수의 온도는 가로흐름보다 4~20℃ 높게 하여 부력의 효과를 크게 하였다. 온도측정에는 직경 3mm T형 온도계를 이용하였으며 한 단면에서 15개를 횡방향에서 4cm간격으로 배열시켜 9.5cm 수심에 대하여 5개 수심에서 온도를 측정하였다. 육안관찰과 사진촬영을 위하여 부력방류수에 색소를 주입하였으며 방류수로의 돌출길이는 $l_o/b_o=0\sim 10$ 의 범위이고 가로흐름에 대한 온도차이는 $\Delta T=2.4\sim 16.9^\circ\text{C}$ 이고 이에 대응하는 방류밀도 후르드수 F_{ro} 와 $l_m/l_b(=F_{ro}F_{ra})$ 의 범위는 각각 $F_{ro}=6.17\sim 1.04$, $F_{ro}F_{ra}=6.88\sim 0.47$ 이다.

4. 實 驗 結 果 解 析

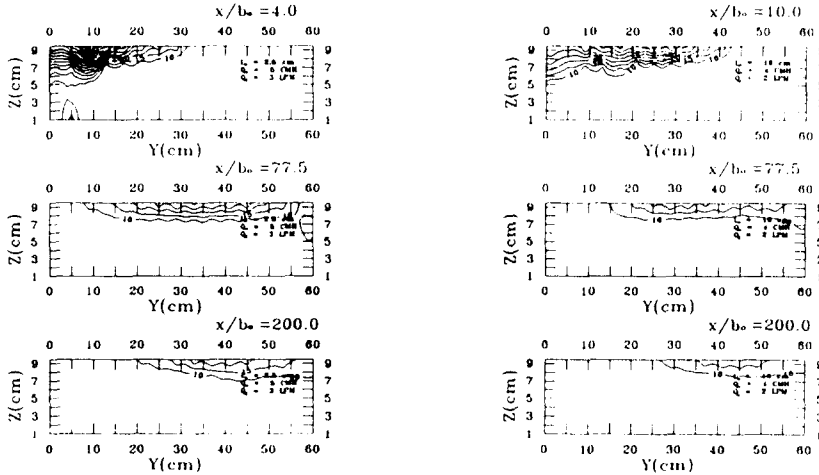
동일한 조건에서 강제부력류와 가로흐름의 온도차이가 큰 경우, 부력류는 방류구에서 비교적 짧은 거리의 하류에서 바닥으로부터 浮上하기 시작하여 수면층을 형성하고 수면층의 두께 역시 하류로 이동함에 따라 빠른 감소가 예상된다. 그림 2. (a), (b)는 돌출길이가 $l_o/b_o=2.5$ 인 경우 $\Delta T=13.8^\circ\text{C}$ ($F_{ro}F_{ra}=0.54$)와 $\Delta T=4.8^\circ\text{C}$ ($F_{ro}F_{ra}=3.39$)에 대하여 선정된 단면의 온도분포로서, 앞서 기술된 현상을 잘 설명한다. 그림 2의 등온선은 무차원온도차이, Γ 이다.



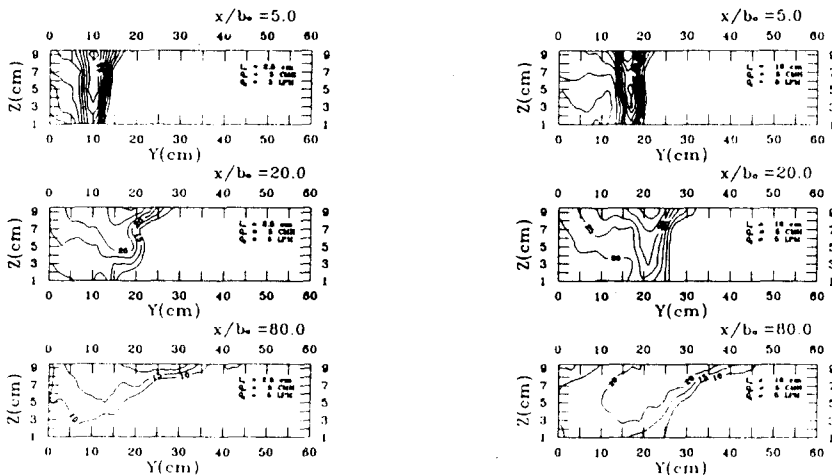
(a) $\Delta T=13.8^\circ\text{C}$, $F_{ro}=1.11$, $F_{ro}F_{ra}=0.54$ (b) $\Delta T=4.8^\circ\text{C}$, $F_{ro}=3.59$, $F_{ro}F_{ra}=3.39$

그림 2. $l_o/b_o=2.5$ 인 경우 선정된 단면의 온도 분포

그림 3. (a), (b)는 $F_{ro}F_{ra}=0.54$ ($\Delta T=13.8^{\circ}\text{C}$), $F_{ro}F_{ra}=0.51$ ($\Delta T=9.7^{\circ}\text{C}$)로서 방류와 가로흐름 조건이 거의 같은 경우 돌출길이가 각각 $l_o/b_o=2.5$ 와 10에 대하여 선정된 단면의 온도 분포이다. 방류온도가 높은 경우($F_{ro}F_{ra}$ 의 값이 작은 경우) 돌출길이에 관계없이 부력류의 거동에는 거의 차이가 없다. 그러나, $F_{ro}F_{ra}$ 값이 2.41~2.56 정도로 크고 방류유속이 또한 큰 경우에는 $l_o/b_o=2.5$ 에서보다 $l_o/b_o=10$ 에서 바닥에서 부상과 횡퍼짐이 완만하다(그림 4. a, b).



(a) $l_o/b_o=2.5$, $\Delta T=13.8^{\circ}\text{C}$, $F_{ro}=1.11$ (b) $l_o/b_o=10.0$, $\Delta T=9.7^{\circ}\text{C}$, $F_{ro}=0.99$
 그림 3. $F_{ro}F_{ra}=0.51\sim 0.54$ 범위의 단면 온도 분포



(a) $l_o/b_o=2.5$, $\Delta T=9.6^{\circ}\text{C}$, $F_{ro}=3.03$ (b) $l_o/b_o=10.0$, $\Delta T=9.9^{\circ}\text{C}$, $F_{ro}=3.10$
 그림 4. $F_{ro}F_{ra}=2.41\sim 2.56$ 범위의 단면 온도 분포

부력류의 만곡으로 인한 재순환영역의 길이인 귀환길이와 폭은 돌출길이에 따라 증가한다(그림 5, 6). 이러한 사실은 近域의 증대로 초기 혼합이 크게 되어 稀釋이 효과적이고 이는 그림 7에서 설명될 수 있다.

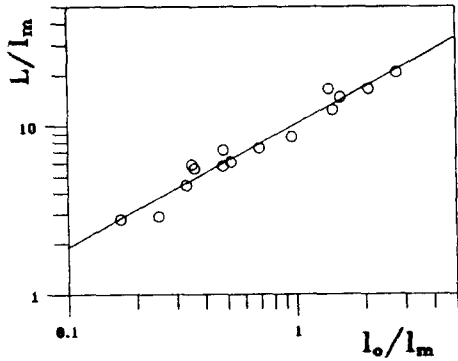


그림 5. 귀환길이

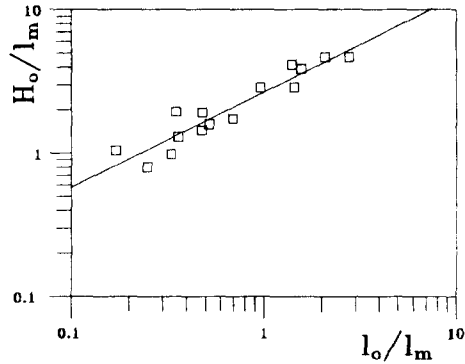
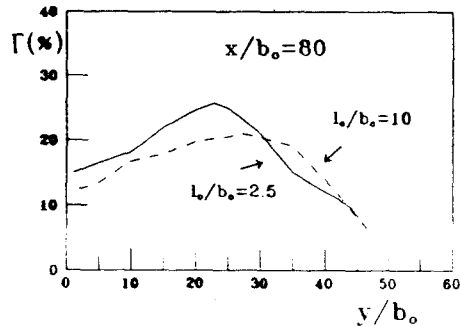
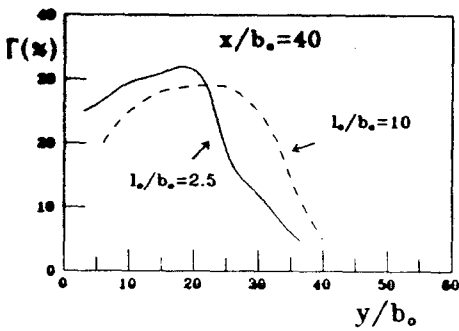


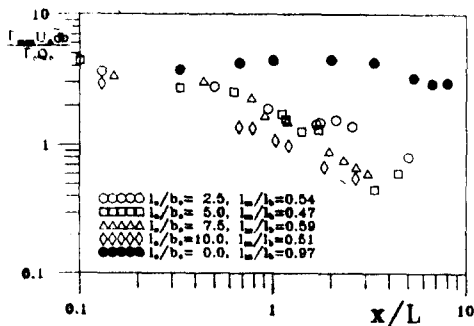
그림 6. 순환영역의 폭

그림 7은 돌출길이 $l_o/b_o=2.5$ 와 10에 대한 수면의 橫溫度曲線으로 돌출길이 큰 경우 수면온도는 고르게 되고 최대온도는 감소함을 나타낸다. 이는 희석효과가 크게 된다고 해석될 수 있다.

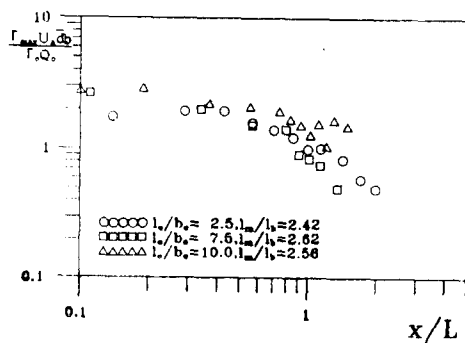


(a) $x/b_o = 40$ (b) $x/b_o = 80$
 $l_o/b_o = 2.5, \Delta T = 10^\circ C, F_{r_o} = 3.12, F_{r_m} = 2.38$

그림 7. 수면의 평온도곡선



(a) $F_{r_o} F_{r_m} \approx 0.5$



(b) $F_{r_o} F_{r_m} \approx 2.6$

그림 8. 상이한 방류필도 후르드수에 대한 부력류 단면 최대온도

부력류 단면의 최대온도는 그림 8에서와 같이 放流水路의 돌출길이 증가함에 따라서 감소함을 알 수 있다. 그림 8(a)에서 비돌출의 경우보다 돌출방류의 경우 현저한 온도감소가 일어남을 알 수 있다.

강제 부력류 희석의 척도로서 단면평균온도를 사용할 수 있다. 부력류의 경계는 방류온도의 10%로 정의되고, 이와 같이 정의되는 부력류의 면적은 \bar{A} 로 표시된다. 단면평균온도 \bar{T} 는 15x5개의 점온도를 이용하여 면적 \bar{A} 상에 5%간격으로 작성된 등온선도를 이용하여 계산된다.

$$\bar{T} = \frac{\sum \Gamma_i A_i}{\bar{A}} \quad (3)$$

여기서 Γ_i 와 A_i 는 등온선 사이의 평균온도와 면적이다. \bar{A} 는 10%로 정의되는 부력류의 면적이므로 $\sum A_i > \bar{A}$ 이고 15x5개 중 일부는 면적 \bar{A} 밖에 위치하므로 \bar{T} 는 흐름단면적이 아니라 부력류의 면적 \bar{A} 의 평균온도이다. 평균온도 \bar{T} 에 대한 열흐름율은 $\bar{T}U_s\bar{A}$ 로 정의되고 이를 방류열흐름율 $\Gamma_o Q_o$ 를 이용하여 무차원화하여 돌출길이별로 나타낸 것이 그림 9이다. 그림 9는 $F_{ro}F_{ra}=0.51 \sim 0.59$ 범위에서 상이한 돌출길이에 대한 결과로서, 돌출길이가 큰 경우 열흐름이 작게 나타났다. 이는 단면 평균온도가 낮아서 희석이 효과적임을 의미한다. 그림 10은 $F_{ro}F_{ra}=2.5$ 인 경우로 즉 방류수와 가로흐름의 온도차이가 작으면 열흐름율 또는 희석은 돌출길이의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

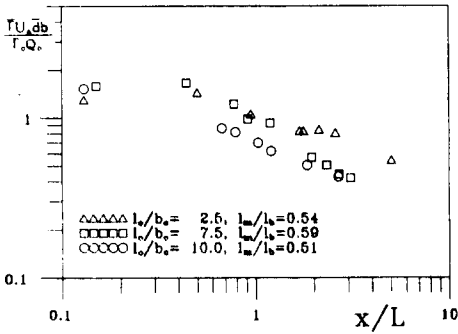


그림 9. 부력류 열흐름율 (부력류 면적에 대한) $F_{ro}F_{ra}=0.59$

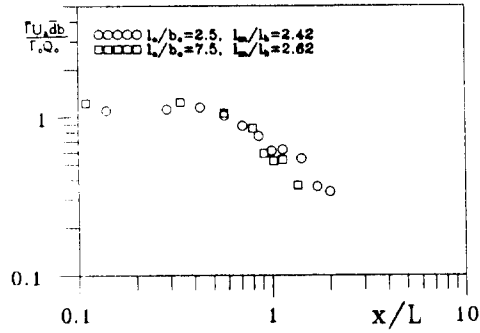


그림 10. 부력류 열흐름율 (부력류 면적에 대한) $F_{ro}F_{ra}=2.5$

돌출길이 $l_o/b_o = 0$ 인 부력류의 실험에서 \bar{T} 은 열흐름율을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{\bar{T}U_s h_o}{Q_o \Gamma_o} = 0.7 \left(\frac{x}{L} \right)^{-0.23} \quad (4)$$

그림 11은 식 (4)와 비교하기 위하여 浮力流面積이 아닌 면적 h_o 에 대한 열흐름율 도시한 것으로 기울기가 (-0.3)으로 $l_o/b_o=0.5$ 정도로 부력이 큰 경우에는 돌출길이의 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

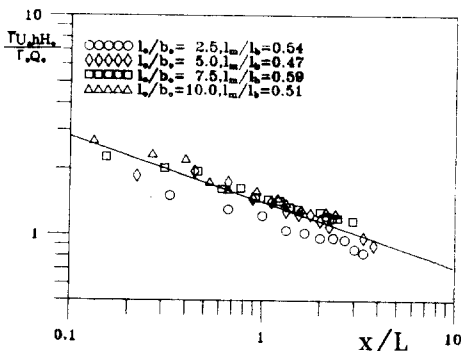


그림 11. 부력류의 열흐름율

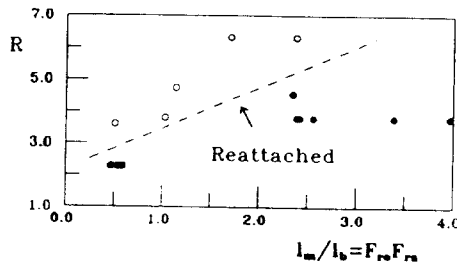


그림 12. R과 l_o/b_o 에 대한 귀환영역

돌출수로 하류에서는 유속이 감소하고 국부적으로 역류가 일어나므로 열흐름을 $\bar{\Gamma}U_a\bar{A}$ 에서 \bar{A} 에 대한 실제 유속은 U_a 보다 작다. 돌출길이가 $l_0/b_0=0$ 인 경우 큰 부력류의 수심평균 폭을 다음과 같이 제시하였다.

$$\frac{\bar{\Gamma}}{H_0} = 1.6 \left(\frac{x}{L} \right)^{0.23} \quad (5)$$

식 (4), (5)의 곱은 $\bar{\Gamma}U_a\bar{A}/Q_0\Gamma_0=1.12$ 이다. 後流의 유속은 U_a-u 이므로 가로흐름의 유속보다 작고 u 는 流速不足이다. 따라서 실제 열흐름율은 $\bar{\Gamma}(U_a-u)\bar{A}$ 와 같게 되므로 열흐름율을 $\bar{\Gamma}U_a\bar{A}$ 로 나타낸 점을 고려하면 유속부족 u 는 가로흐름유속 U_a 의 약 12 %에 해당된다.

비돌출방류의 경우 연안귀환의 조건은 速度比 R (=방류유속/가로흐름유속)와 밀도후르드수의 향으로 제시된 바 있으며(Yoon, 1992) 돌출방류의 경우에는 속도비 R , 밀도후르드수 $F_{ro}F_{ra}$ 의 향으로 제시될 수 있으나 그 양상이 다르게 됨을 알 수 있다(그림 12). 비돌출방류의 경우에는 歸環조건에 속도비가 지배적이었으나 돌출방류의 경우 방류수로의 돌출길이는 귀환에 별 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나 R 과 $F_{ro}F_{ra}$ 가 다같이 지배적인 인자가 됨을 알 수 있다. 주어진 방류와 가로흐름에서 歸環의 영역을 제시할 수 있는 해석적인 작업이 요구된다.

5. 結論

가로흐름과 동일한 수심의 돌출수로에 의한 부력방류의 거동과 연안에 귀환조건이 실험적으로 조사되었다. 높은 방류부력흐름율에서는 돌출길이가 긴 경우 부상이 빨리 일어나고 얕은 수면층이 형성되나, 낮은 부력흐름율의 경우 반대의 현상이 일어난다. 단면최대온도는 돌출길이가 큰 경우 감소하고 돌출방류에서 횡퍼짐은 보다 균일하게 나타나고 열흐름율은 감소하여 희석은 효과적인 것으로 나타났다. 沿岸歸環의 조건에서 비돌출의 경우에는 속도비가 중요한 因子이었으나 突出放流의 경우에는 속도비와 밀도후르드수가 중요한 매개변수가 된다.

6. 참고문헌

- (1) 윤태훈, 옥운수, 한운우, 흐름수역에서 켈흐름의 연안귀환, 대한토목학회집 12-4-1, 1992. 12. 09, pp.43-5
- (2) Carter, H.H., "A preliminary report on characteristics of a heated jet discharged horizontally into a traverse current-part I, constant depth", Report No.61, Chesapeake Bay Inst., Johns Hopkins Univ., Baltimore, Md., 1969.
- (3) Chu, V.H., Abdelwashed, M.S.T., "Shore attachment of buoyant effluent in strong crossflow", J.of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No.2, 1990, pp.157-175
- (4) Fischer, H.B.et.al., Mixing in inland and coastal waters, Academic Press, 1979.
- (5) Kuhlman, J.M., and Prah, J.M., "Laboratory modeling of surface thermal plumes", Report No. TR-74-102, school of Engrg., Case Western Reserve Univ., Cleveland, Ohio, 1974.
- (6) McGuirk, J.S., and Rodi, W., "A depth-averaged mathematical model for the near field of side discharge into open-channel flow", J.of Fluid Mech., Vol. 68, Part 4, pp.716-781, 1978.
- (7) Rajaratnam, N., and Chiu, V.M.H., "Surface discharge of thermal effluent into Lakes with ambient currents", Proc. of conf. on Envir. Aspects of Industrial Cooling in Northern Climates, Environment Canada, 1978.