

〈論 文〉

調整池에서의 水溫構造

Temperature Structure in Regulating Ponds

尹 泰 勳* 全 時 永**
Yoon, Tae Hoon Chun, Si Young

Abstract

The negative buoyant flow into and through a regulating pond is analysed by numerical scheme. The controlling parameter of density current in the pond is found to be the inflow densimetric Froude number, Fr_e . Two vortices are formed and notable at the right corner and above the sunken flow in the pond. For given inflow characteristics, the required outflow temperature, the combination of dimensions of the pond and the residence time of the inflow in the pond are determined.

要 旨

調整池로 유입되는 陰浮力흐름에 대한 거동이 數值的 方法으로 해석되었다. 調整池의 密度流를 지배하는 媒介變數는 流入密度 Froude 數, Fr_e 이고, 조정지에서 오른쪽 낮은 구석과 가라앉은 유체의 흐름 위에渦는 형성된다. 流入流體의 特性이 주어진다면 유출구에서의 溫度, 조정지의 규모 및 유입유체의 체류시간을 알 수 있다.

1. 序 調

큰 댐의 바닥 부근에 위치한 방류구로부터 방류된 물은 저수지 표면이나 부근의 물의 온도와 매우 다르다. 겨울철에 댐으로부터 방류된 물은 저수지 표면의 물보다는 따뜻하고, 여름철에는 저수지 표면의 물보다는 차다. 이러한 차가운 물은 水生生態系(aquatic ecosystem)와 水生植物(aquatic plants), 특히 벼에 나쁜 영향을 준다.

큰 댐으로부터 적절한 온도로 방류하기 위하여 보통 채택하는 방법이 選別放流(selective withdrawal)³⁾이다. 선별방류의 다른 방안은 調整池이며 이것은 댐 下流에 축조하여 댐으로부터 방류된 물의 온도를 적절한 온도까지 상승시키기 위하여 태양에너지를 이용한다.

예로 서울에서 북동쪽으로 100km 정도 떨어진 곳에 위치한 소양강 다목적댐은 높이가 123m, 저수용량이 2.9km³ 이고 댐으로부터 방류된 온도가 낮은 물을 적절한 온도까지 높이기 위하여 조정지를 이용한다. 이 조정지의 크기는 514m × 267m × 2.2m 이고 수심이 1.15m 에서 평균저수용량은 113,800m³ 이다.

저수지 또는 조정지로 유입되는 물의 밀도가 저수지 또는 조정지의 물의 밀도보다 클 때 plunge 흐름은 발생하고, 그 결과 조정지에서 密度流는 형성된다. 그러한 흐름현상의 해석은 큰 댐 하류구간에서 수생생태계를 보존하거나 관리하는데 매우 중요하다.

밀도가 $\rho_e (= \rho_0 + \Delta\rho)$ 인 물이 밀도 ρ_0 인 靜水水域으로 유입하는 경우, 유입유체는 受容流體와 힘의 평형이 이루어질 때까지 수용유체를 下

* 漢陽大學校 工科大學 土木工學科 教授

** 檀國大學校 理工大學 土木工學科 講師

流로 계속 밀려 힘의 평형이 깨어지는 지점에서 plunge 현상이 발생하면서 아래로 가라앉기 시작하여 이 지점을 plunge point 라 부른다.

조정지의 설계에 있어서 요구사항은 조정지용량의 결정이나 조정지 내에서 수운의 구조에 관한 지식이다. 본 연구의 목적은 조정지를 통한 흐름의 기본방정식에 수치해석을 이용하여 수운의 구조나 조정지 규모에 관한 유용한 정보를 제공하는데 있다.

2. 基本理論 및 數值解析

해석되는 물리계는 유입구의 수심 d_e 가 작은 하천에서 調整池 또는 貯水池로 유입되는 陰浮力 흐름으로 발생하는 密度流과 유출이 하류의 하천으로 되는 것으로 이루어져 있으며 그림 1 과 같다. (그림 1에서 L 은 조정지의 길이이다.)

本 數值實驗에서 모든 고체경계면은 斷熱性으로 하였고, 자유수면을 가로질러서 어떠한 열의 이동도 없으며 그리고 자유수면의 연직변화는 없다고 즉 조정지의 수심은 一定하다고 가정하였다. 또 다른 가정은 다음과 같다.

1. 流入흐름은 2次元, 水平이면서 層流이다.
2. 작은 密度차이는 Boussinesq 가정이 적용된다.
3. 追跡物擴散係數는 水平과 鉛直方向이 같다.
4. 調整池의 유체는 초기에 靜止되어 있으며, 密度 또는 溫度는 一定하다.

不定流, 非壓縮性 및 層流에 관한 기본방정식은 다음과 같다.²⁾

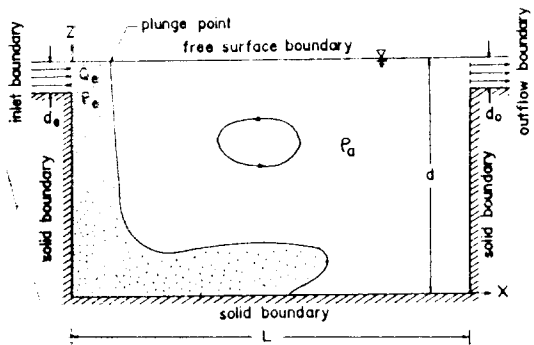


그림 1. 음부력흐름의 개념도와 경계조건

連續方程式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

運動量輸送式

x -방향

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{\partial P^0}{\partial x} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \tag{2}$$

z -방향

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = - \frac{\partial P^0}{\partial z} - g \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \tag{3}$$

여기서 u 와 w 는 x 와 z 방향의 速度이고 P 는 靜水壓, P^0 는 靜水壓으로부터 偏奇되는 平均動水壓 $P^0 = P/\rho_e - g \int_z^0 \rho/\rho_e dz$, ν 는 動粘性係數, g 는 重力加速度이다.

(2)식에서 왼쪽 첫째 항은 局部慣性(local inertia), 둘째 셋째항은 移送慣性(convective inertia), 오른쪽 첫째항은 壓力, 둘째항은 摩擦力을 의미한다. 식(3)에서도 식(2)에서의와 같은 의미를 가지나 오른쪽 둘째항은 密度차이에 의한 重力을 의미한다.

追跡物輸送式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) + u \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) + w \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) = k \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \right] \tag{4}$$

여기서 k 는 追跡物擴散係數이다.

앞에서 주어진 식(1)~(4)를 이용하여 적절하게 변형을 하면 流函數-渦度式과 渦度輸送式은 얻어진다. 無次元變數나 無次元媒介度數를 기본방정식에 도입하는 무차원화 과정과 기본방정식을 유한차분법에 의한 數值解析過程은 참고문헌에 주어졌다.^{1),4),5),6)} 여기서는 무차원화된 경계조건에 관하여 다루며, 경계는 그림 1에 나타난 바와 같고, 다음과 같은 5가지 경우의 경계조건이 적용된다.

固體面 바닥에서

$$\Psi = \text{const.}, \frac{\partial \Gamma}{\partial Z} = 0, \Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2}$$

自由水面에서

$$\Psi = \text{const.}, \frac{\partial \Gamma}{\partial X} = 0, \Omega = 0$$

流入口에서

$$\Psi = \Psi_e(Z), \Gamma = \Gamma_e, \Omega = 0$$

靜止水역 上流와 下流壁面에서

$$\Psi = \text{const.}, \frac{\partial \Gamma}{\partial X} = 0, \Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2}$$

流出口에서

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} = 0, \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial X^2} = 0, \frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} = 0$$

No-slip 경계조건은 流入口와 流出口를 제외한 고체면에 적용된다. 자유수면은 剪斷應力이 零이므로 $\Omega=0$ 이다. 또 고체면과 자유수면의 Ψ 는 일정하다.

3. 數值實驗 結果

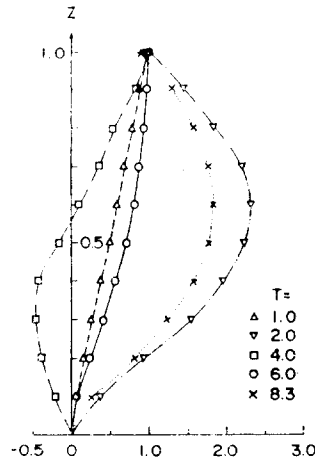
調整池에서 plunge 현상과 密度流를 지배하는 매개변수는 다음과 같이 정의된 流入密度 Froude 數 Fr_e 이다.

$$Fr_e = \frac{Q_e/B}{\left(\frac{\rho_e - \rho_0}{\rho_0} g d_e\right)^{1/2}}$$

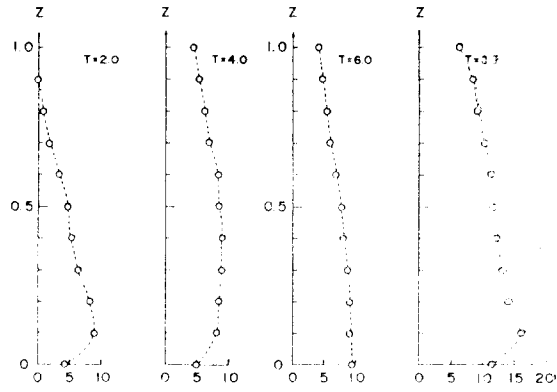
여기서 Q_e 는 유입량이고 B 는 유입하천의 폭이다.

調整池로 유입된 유체는 受容流體를 下流로 밀면서 초기운동량이 조금씩 감소되는 반면에 陰浮力의 영향은 크게 되어 바닥으로 가라앉기 시작한다. 가라앉은 유체가 바닥면에 도달하면 유체는 계속 유입되는 유체에 의하여 下流로 이동한다.

그림 2(a, b)는 Fr_e 가 2.46이고 조정지의 길이 L 이 $8d$ 인 경우, $X=5.189d$ 되는 고정된 下流지점에서 무차원시간 T 의 변화에 따른 유합수와 밀도차이분포를 무차원수심 $Z(=z/d)$ 에 대하여 나타낸 것이다. 그림 2에서 T 의 한계가 8.3인 것은 유출구에서 수온이 조정지 초기수온의 60%가 될 때까지의 시간이다. 그림 2a에서 $T=1.0$ 일 때 유합수분포는 Z 가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 것은 유입된 유체가 아



a. 유합수분포 Ψ



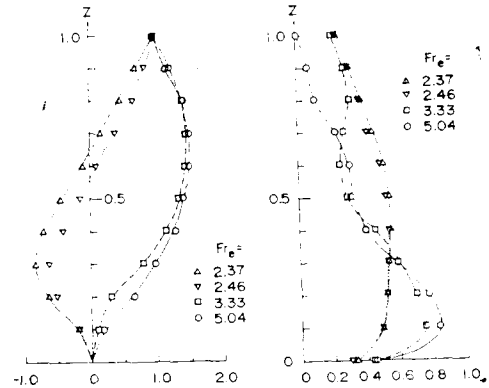
b. 밀도차이 분포 $\Gamma (\times 10^{-4})$

그림 2. 고정된 지점 ($X=5.189d$)에서 시간의 변화에 따른 유합수와 밀도차이분포 ($Fr_e=2.46$)

직 이 지점에 도달하지 못하였기 때문이다. 시간이 경과함에 따라 ($T=2.0$) 유합수분포는 계속 유입되는 유체에 의하여 $T=1.0$ 보다는 발달되었으나 모양은 상이하다. 이 때 유합수분포는 바닥에서 Z 가 0.6까지는 증가하므로 유속은 陽의 값을 갖고 0.6에서 수면까지는 감소하여 유속은 陰의 값을 가지므로 Z 가 0.6인 지점을 기준으로 渦가 형성된 것을 알 수 있으며 그 방향은 반시계방향이다. 또 바닥부근에서 Z 가 0.6까지 유합수의 기울기가 큰 것은 유속이 큰 것과 유선의 간격이 좁은 것을 의미한다. 유입흐름이 계속됨에 따라 ($T=4.0$) 유합수분포는 바닥에서 Z 가 0.3까지는 감소하다. 0.3에서 수

면 부근까지는 증가함이 나타난다. 이것은 유입 유체가 연속조건에 의하여 유출구로 이동하면서 受容流體에 剪斷을 가하여 발생한 渦로 설명되며 $T=2.0$ 일 때와는 달리 渦의 방향은 반대(시계) 방향이다. 유입흐름이 진행됨에 따라($T=6.0$) 下流벽면 부근에 형성되었던 渦는 계속 유입되는 유체가 하류로 이동하면서 이 渦의 좌측 유체에 剪斷을 가할 뿐만아니라 渦의 우측으로 이동한 유체도 음부력에 의하여 가라앉으면서 渦의 우측 유체에 剪斷을 가하여 더 발달된다. 이 渦는 주흐름방향의 渦의 발달을 억제하면서 上流로 어느 정도까지 이동한다. 유함수분포는 계속되는 유입유체의 흐름으로 바닥에서 수면까지 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 下流에서 발달된 渦가 上流로 이동하여 이 지점을 벗어나는 의미를 가진다. 시간이 경과됨에 따라 上流로 이동한 渦는 계속 유입되는 유체의 음부력 때문에 더 이상 上流로 이동하지 못하고 渦의 중심이 수면으로 이동을 시작하며 유입유체의 유속에 의하여 渦는 점점 약해지면서 소멸된다. 이에 따라 上流벽면 전방에 발달된 渦가 $T=2.0$ 일 때와 비슷한 모양으로 다시 발달된다. ($T=8.3$)

그림 2b에서 $T=1.0$ 일 때 밀도차이분포 Γ ($=\frac{\rho-\rho_0}{\rho_0}$)는 유입유체가 아직 이 지점까지 도달하지 못하였기 때문에 露이므로 그림에는 표시하지 않았다. $T=2.0$ 일 때 Γ 는 바닥에서 Z 가 0.1까지 증가하다가 0.1에서 0.9까지는 감소하는 것으로 나타났다. Γ 의 값이 Z 가 0.1보다 바닥에서 작은 것은 유입유체와 수용유체의 혼합에 의한 희석 및 바닥 부근에서 유속이 작기 때문이다. $T=4.0$ 일 때 Z 가 0.1에서 Γ 값이 $T=2.0$ 일 때 보다 감소한 것은 앞에서 설명한 바와같이 시계방향의 渦에 의하여 유입유체와 수용유체가 혼합되었기 때문이고 그 외에는 전반적으로 발달된 모양으로 나타난다. $T=6.0$ 일 때는 $T=2.0, 4.0$ 일 때와는 달리 Γ 가 바닥에서 제일 크게 나타나는 것은 下流벽면 부근에서 발달된 渦가 上流로 이동하므로서 고정지점에서 渦와 流入流體 또는 受容流體 사이에 경계가 형성되며 이 경계를 따라서 陰浮力을 갖는 유입유체가 가라앉기 때문이다. $T=8.3$ 일 때는 $T=2.0$ 인 경우와 유함수분포의 형태는 비슷하



a. 유함수분포 Ψ b. 상대밀도차이분포 Γ_l
 그림 3. 고정된 지점($X=5.189d$)에서 Fr_e 의 변화에 따른 유함수와 상대밀도차이분포

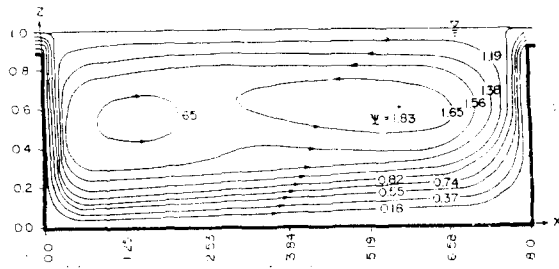
지만(그림 2a) 계속 유입되는 흐름에 의하여 Γ 는 전반적으로 발달된 모양으로 나타난다.

그림 3(a, b)는 조정지의 길이가 $8d$, 고정된 지점 $X=5.189d$ 에서 $T=4.0$ 일 때 Fr_e 의 변화에 따른 유함수 상대밀도차이분포 $\Gamma_l(=\Gamma/\Gamma_e)$ 를 무차원수심 Z 에 대하여 나타낸 것이다.

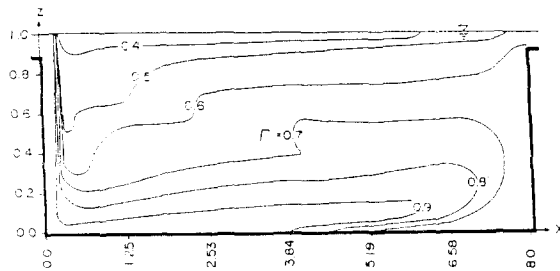
그림 3a에서 유함수분포는 Fr_e 가 2.37과 2.46인 경우와 Fr_e 가 3.33과 5.04인 경우로 구분하여 설명한다. 전자의 경우 유함수분포는 바닥에서 Z 가 0.6까지는 증가하고 0.6에서 수면까지는 감소하므로 渦가 반시계방향으로 형성된다. 후자의 경우는 바닥에서 Z 가 0.3까지는 감소하다 0.3이후는 증가하므로 渦의 방향은 전자와는 대조적으로 시계방향이다. 이러한 대조적인 유함수값을 갖는 이유는 Fr_e 가 커짐에 따라 유입유체의 운동량은 크고 상대적으로 陰浮力이 작기 때문에 유입유체는 자유수면과 평행한 방향으로 이동하다가 이동 중 일부는 가라앉으며 운동량이 소멸되면서 바닥으로 가라앉는다. 그래서 Fr_e 가 큰 유입유체는 下流벽면에 도달하는 시간이 늦어지므로 流出口로 이동하면서 下流벽면 부근의 受容流體에 剪斷을 가하므로서 발생하는 渦의 형성이 Fr_e 가 작은 것보다 늦게 되는 것을 설명해 주는 것이다.

그림 3b에서 Γ_l 는 앞에서 설명된 유함수분포와 같이 설명할 수 있다. Fr_e 가 2.33과 2.46

에서 Γ_1 는 Z 가 0.1보다 바닥에서 또 $Z=0.5$ 에서 수면까지는 감소하는 것은 유입유체가 下流로 이동하면서 수용유체와 혼합되었기 때문이다. Γ_1 이 Z 가 0.1에서 0.5까지는 거의 일정한 것은 下流벽면 부근에서 발생한 시계방향의渦 때문이다. Fr_e 가 3.33인 경우의 Γ_1 은 바닥보다 Z 가 0.1에서 증가하는 것은 바닥부근에서 유입수의 기울기(그림 3a)가 작으므로 유속이 작고, 유입유체와 수용유체의 혼합에 의한 회석 및 주흐름방향의渦의 영향때문이다. Z 가 0.6을 전후로 하여 Γ_1 이 증감하는 것은 유체가 유입됨으로서 반시계방향으로 발달된渦의 영향 때문이다. Fr_e 가 5.04인 경우의 Γ_1 는 바닥에서 Z 가 0.7까지는 Fr_e 가 3.33인 경우와 같이 설명할 수 있으나 Z 가 0.7에서 수면까지는 앞에서 설명한 바와같이 유입운동량이 크고 陰浮力이 작아서 유입된 유체가 下流로 이동하는 시간이 늦기 때문에 下流벽면에 의한 영향이 고정된 지점의 수면까지는 완전히 미치지 못하여 Z 가 0.7보다 커지면서 급격히 감소하다 수면에서는 零으로 나타난다.



a. 유함수 모양



b. 밀도차이분포

그림 4. 유출온도가 일정한 시간에서 유함수모양과 밀도차이분포

그림 4는 조정지의 길이가 $8d$, Fr_e 가 2.46인 경우 조정지로부터 유출되는 온도가 조정지 초기온도의 60%에 도달한 경우에 대하여 유함수모양과 밀도차이분포를 나타낸 것이다. 그림 4a에서 受容流體와 陰浮力흐름 사이의 剪斷에 의하여渦가 형성되었으며 형성된 2개의渦가 주목된다. (그림 4a) 오른쪽 아래 구석부근의渦는 바닥으로 가라앉은 유체를 주흐름방향으로 밀어내어 하천으로 흐르게 한다. 크기가 좀 더 큰 다른渦는 가라앉은 유체의 흐름 위에 형성되고 방향은 반시계방향이다. 이渦는 주흐름 위의 상부유체를 下流로 이동시키면서 자유수면 부근의 유체를 上流로 이동시킨다. 그러한 미케니즘은 조정지에서 복잡한 成層密度流(stratified density current)를 형성하게 된다. (그림 4b)

그림 5는 유출되는 유체의 온도조건이 앞에서 설명한 것과 같으며 유입조건 Fr_e 의 변화에 따른 무차원경과시간과 조정지의 무차원길이 L/d 사이의 관계를 나타낸 것이다. 그림 5는 주어진 유입유체의 특성 즉 유량이나 온도의 변화에 따른 유출되는 유체의 온도, 조정지에서 유입유체의 체류시간과 조정지의 크기를 결정할 수 있다. 이러한 접근은 소양강댐의 조정지와 같은 온도조절용 조정지의 규모설계에 적용할 수 있으나 얻어진 결과는 단순한 경우에 대하여 적용할 것이므로 더 이상의 연구가 필요하다. 이러한 연구는 낮은 온도의 물을 적절한 온도까지 상승시키는 과정에서 중요한 역할을 하는 수면에서의 열전달조건이나 유체가 點流源(point source)이나 폭을 갖는 slot을 통하여 조정지로 유입된다면 3次元密度流의 解析이 요구된다.

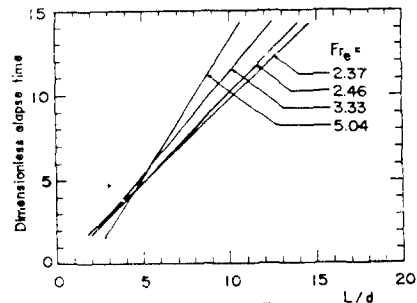


그림 5. Fr_e 의 변화에 따른 무차원 경과시간과 조정지의 무차원길이와의 관계

4. 結 論

調整池 또는 貯水池로 流入되는 陰浮力흐름을 數值的으로 解析하여 얻어진 結果는 다음과 같다.

調整池에서 흐름의 特性은 流入密度 Froude 數 Fr_e 에 크게 지배를 받으며, 陰浮力흐름에 의하여 2개의 渦가 발달되나 각각의 역할은 상이하게 나타났다. 流入流體의 特性(流量이나 溫度)이 주어진다면 調整池의 유출구에서 溫度, 調整池에서 유체의 체류시간이나 調整池의 規模를 결정할 수 있다.

자유수면에 대한 열전달조건이 고려된다면 범하류의 온도조절용 조정지와 같은, 실제설계에 적용이 가능하다고 사료된다.

參 考 文 獻

1. Anderson, D.A., Tannehill, J.C. and Pletcher, R.H., Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company, 1984.
2. Chun, S.Y., Behavior of Density Current into Stagnant Environment, Hanyang University, Ph. D. Dissertation, Seoul, 1987.
3. Pao, H.P. and Kao, T.W., Dynamics of Establishment of Selective Withdrawal a Stratified Fluid from a Line Sink, Part I, Theory, J. Fluid Mech., Vol. 65, Part 4, pp. 657~688, 1974.
4. Roache, P.J., Computational Fluid Dynamics, Hormosa Publishers, 1976.
5. Torrance, K.E., Comparison of Finite-Difference Computations of of Natural Convection, J. Re. N. B. S. B. Math. Sci. 72-B, pp. 281~301, 1968.
6. Trent, D.S. and Welty, J.B., Numerical Computation of Momentum Jets and Forced Plumes, Computer & Fluids, Vol. 1, pp. 331~357, 1973.