

小型太陽水構內 中間境界面에서
水力學的 安定에 關한 各種 支配變數의 比較

A Comparison of Various Governing Parameters on Hydrodynamic
Stability in Interface on Small Solar Pond

朴 伊 東*
(Ee-Dong Park)

ABSTRACT

In this paper, the interface stability not to occur mixing and entrainment between the adjacent layers has been studied in the case of the selective withdrawal of a stratum and the injection in stratified fluid formed by the density difference in a small solar pond.

There are stability parameter, Richardson number, Rayleigh number and Froude number as the parameters governing stability in order to measure the interface stability on the stratified fluid.

The model which could measure the interface stability on the stratified fluid was the small solar pond composed by 1 meters wide, 2 meters high, and 5 meters long. In order to measure the interface stability on the stratified fluid at the inlet port, the middle section and the outlet port, Richardson number, Rayleigh number, and Froude number involved in the parameters governing the stability were calculated by means of the data resulted from the test of the study on hydrodynamic stability between the convective and nonconvective layers in that solar pond.

Richardson number written by the ratio of inertia force to buoyancy force can be used in order to measure the stability on the stratified fluid related to the buoyancy force generated from the injection of fluid. Rayleigh number written by the product of Grashof number by Prandtl number can be used in order to measure the stability of the fluid related to the heat flux and diffusivity of viscosity. Froude number written by the ratio of gravity force to inertia force can be used in order to measure the stability of the nonhomogeneous fluid related to the density difference.

As the result of calculating the parameters governing stability, the interface stability on the stratified fluid couldn't be identified below the 70cm height from the bottom of the solar pond, but it could be identified above the 70cm height from it at the inlet port, the middle section and the outlet port.

When compared with such the three parameters as Richardson number, Rayleigh number, Froude number, the calculated result was in accord with them at inlet port, the middle section and the outlet port. Henceforth, it is learned that even though any of the three parameters is used for the purpose of measuring the interface stability on the stratified fluid, the result will be the same with them.

It is concluded that all the use of Richardson number, Rayleigh number, and Froude number, is desirable and infallible to measure the interface stability on the stratified fluid in the case of considering the exist of the fluid flow and the heat flux like the model of the solar pond.

* 正會員：成均館大學校

I. 序 論

Solar pond 內의 鹽度勾配非對流層이 熱의 對流를 막아서 熱損失을 減少시키는 것은 Pond 內의 上下部の 密度差에 起因되는 바, 이는 密度差로 形成되는 成層流體의 特別한 特質이라 하겠다. 鹽度勾配非對流層이 잘 維持됨은 거기의 成層流體의 安定을 意味하는 것이며 또한 成層流體의 安定은 非對流層과 下部對流層(저장층) 사이의 中間境界面의 安定을 뜻한다. 이 中間境界面의 安定은 熱 저장層(下部對流層)에서 高溫鹽水를 推出할 때와 底溫순환水를 注入할 때도 교란이 생길 可能性이 있기 때문에 이 中間境界面의 安定을 維持시키는 것은 Solar pond에서 大端히 重要한 課題이다.

最近, 이 成層流體의 中間境界面의 安定을 決定하기 爲하여 Richardson Number를 使用하여 왔으나¹⁾ 1984年 朴伊東²⁾은 Richardson Number를 使用하지 않고 Stability Parameter를 使用하여 그의 中型水槽內의 中間境界面 卽 鹽度勾配非對流層과 對流層(저장층) 사이의 安定을 評價한 바 있다.

여기에서는 참고문헌(2)에서 使用한 中型Solar pond (길이 5 m, 높이 2 m, 그리고 폭 1 m)의 中間境界面의 安定을 Richardson Number, Froude Number 그리고 Rayleigh Number의 各各의 安定支配變數를 計算하여 評價하고 이들을 相互 比較하므로써 Stability parameter를 利用한 참고문헌(2)의 結果를 再 確認하고자 했다.

II. 成層流體流動의 安定

下部對流層(저장층)의 鹽度는 上部對流層의 鹽度보다 大端히 높으며(下端對流層의 鹽度는 보통의 바닷물鹽度보다 6倍程度 높은 鹽度임) 그림 1에서 보이는 바와 같이 上下部對流層사

이에 溫度勾配와 鹽度勾配非對流層이 나타나게 되어 있다. 다만 下部對流層에서 高溫鹽水를 Line Sink로서 推出되어 熱交換器를 利用, 高溫을 회수하고 底溫鹽水는 Line source로서 下部對流層에 Line sink의 反對方向에서 注入시키는데 이 때 鹽度勾配의 非對流層과 下部의 對流層사이의 中間境界面의 安定된 狀態를 維持하여야 한다.

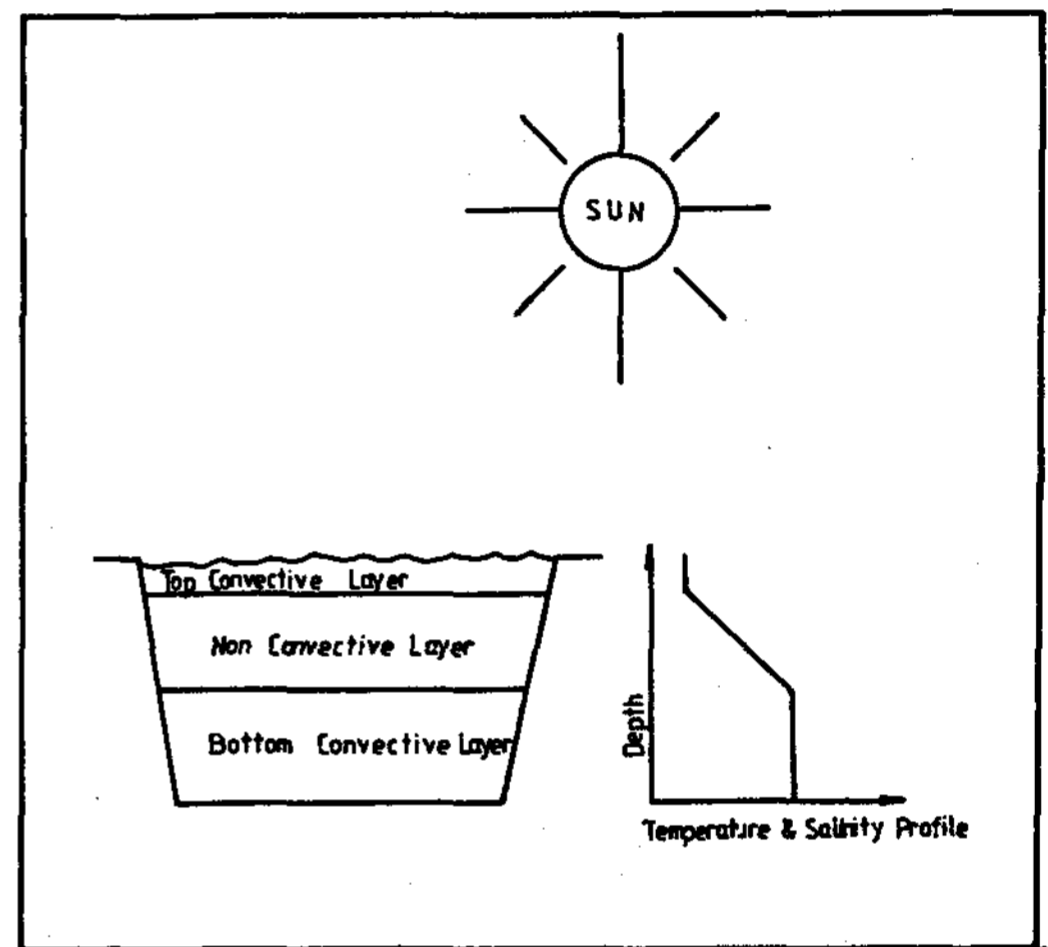


Fig.1. Schematic Diagram of Solar Pond

流體가 Line Source에 依해 pond 內로 注入될 때, 注入된 流體는 運動Energy로 因하여 주위의 成層流體와 인접한 層에서 部分的으로 혼합이 생기게 된다. 이때 注入된 流體(底溫鹽水)와 주위의 成層流體(高溫鹽水)사이의 中間境界面은 不安定하게 된다. 卽 Line Source에 依하여 주위의 교란되지 않던 成層流體에서 교란이 일어나게 되며 그것으로 因하여 그들의 中間境界面에서는 Entrainment까지 發生한다. 結果的으로는 注入된 流體의 速度가 느려지게 되므로 浮力이 增加하여 中間境界面에서는 混合이 생기게 된다. 따라서 Line Source의 홈의 깊이(Slot Size)와 注入 流體의 速度를 制限하여야 한다. 그리고 中間境界面에서 安定이 維持되면 注入된 流體는 最大距離로 投入될 수 있다.

Line Sink의 推出인 경우도 Line Source인 경우와 같아서 推出로 因하여 中間境界面에서 混合이 생기지 않고 下部의 對流層에 저장되어 있는 高溫鹽水를 推出할 수 있어야 한다.

이상과 같이 綜合해 볼 때 外部의 교란(Line source와 sink)에 依하여 成層流體의 中間境界面에서 中間境界面을 가로지르는 混合이 發生할 경우, 이 때 成層流體流動은 不安定하게 되며, 反對로 이와 같은 現象이 나타나지 않은 경우, 即 成層流體의 中間境界面을 가로지르는 混合이 發生하지 않은 경우, 이 경우를 成層流體流動은 安定하다고 한다.

Ⅲ. 成層流體의 各種 安定支配變數의 安定基準

3.1 Stability Parameter의 適用

底溫의 清水層이 高溫의 鹽水層위에 停止狀態로 있고 그들의 境界面이 뚜렷하게 區分이 될 때 鹽度로 因한 密度差 $\beta\Delta S$ 가 溫度로 因한 密度差 $\alpha\Delta T$ 보다 클지라도 全體적으로 이 System은 不安定하다. 이 境遇, 熱傳達에 依하여 두層에서는 對流運動이 일어나며 同時에 鹽分은 中間境界面을 가로질러 傳達된다. 이와 같은 現象이 나타나는 中間境界面의 安定을 測定하기 爲하여 다음과 같은 無次元變數가 使用되는데 이것을 Stability Parameter라고 한다.

$$R\rho = \frac{\beta\Delta S}{\alpha\Delta T}$$

Salt flux를 Rayleigh number (Ra)와 Stability Parameter ($R\rho$)의 函數로서 表現하기 爲하여 유사한 次元概念을 使用하면 $Nu = f(\beta\Delta S/\alpha\Delta T)R^{1/3}$ 의 形態가 되고 density flux에 影響을 미치는 項으로 表現되는 flux ratio는 다음과 같이 表現된다.

$$\beta F_s / \alpha F_T = f(\beta\Delta S / \alpha\Delta T)$$

여기에 對하여 1965年 J.S. Turner³⁾에 依해 實驗的으로 研究되었으며 成層流體流動의 安定基準을 그의 實驗結果를 引用하여 說明하면 다음과 같다. 即

$R\rho$ 가 1에 接近($R\rho \rightarrow 1$), $\beta F_s / \alpha F_T$ 가 1에 接近($\beta F_s / \alpha F_T \rightarrow 1$) 할 때 鹽分과 熱은 파열된 中間境界面에서 같은 量 만큼 亂流運動으로 傳達된다. 또한 $R\rho$ 가 2로 增加할 때 分子의 作用이 점점 더 重要하기 때문에 flux ratio는 급격하게 떨어진다. $R\rho > 2$ 일 때, flux ratio는 一定하게 存在하며 이 때 $\beta F_s / \alpha F_T = 0.15$ 이다. 따라서 中間境界面은 $R\rho = \beta\Delta S / \alpha\Delta T > 2$ 일 때 安定이 된다.

3.2 Richardson number의 適用

密度가 가벼운 流體가 密度가 무거운 流體위에 중첩되게 流動하고 密度勾配와 速度勾配를 갖는 成層流體의 中間境界面의 安定을 調査하기 爲해서 다음과 같은 無次元變數가 使用된다.

$$R_i = -g \left(\frac{\partial \rho}{\partial Z} \right) / \rho \left(\frac{\partial U}{\partial Z} \right)^2$$

이것을 Richardson number라고 하며 慣性力에 對한 浮力의 比로서 表現된다. 여기서 密度 ρ 와 速度 U 는 인접한 두 流體層의 平均 密度와 速度이다.

Richardson number (R_i)에서 密度勾配 $\partial\rho/\partial Z$ 가 크다면 成層流體의 中間境界面을 가로 지르는 垂直方向의 混合과 內部마찰이 거이 없는 境遇가 되기 때문에 이 境遇, 成層流體流動은 安定이 된다. 1961年 J.W. Miles⁴⁾의 研究結果, 成層流體流動의 安定을 爲한 充分條件으로서 一般的으로 어느 곳에서나 局所 Richardson number가 1/4보다 크다 ($R_i > 1/4$)는 것을 밝혔다. 또한 임의의 密度分布와 速度分布에 對해 有一한 “臨界Richardson Number”가 存在하는 것이 아니기 때문에 어느 一定한 領域에서 $R_i < 1/4$ 이면 成層流體流動이 반드시 不安定하게 되지는 않으나 1963年 J.W. Mi-

les⁵⁾에 의해 고려된單純한 剪斷層의 많은 境遇에서 最少值가 $Ri < 1/4$ 일때 成層流體流動이 不安定함을 알았다.

또한 成層媒質의 流動이나 表面浮力분출 (Surface buoyant jet)에 關한 研究의 結果로서 알 수 있듯이 流動領域으로 注入되는 流體의 entrainment 比는 主로 Richardson number에 依存하기 때문에 局所 Richardson number가 大略적으로 0.85 보다 크면 周圍의 成層流體의 entrainment가 無視되므로 流動은 安定하게 된다. 따라서 注入된 流體는 最大距離로 投入될 수 있다.

本研究에서는 注入口領域에서 實驗結果值로부터 密度勾配와 速度勾配를 求할 수가 없으므로 앞에서 提示된 Richardson number,

$$Ri = -g \left(\frac{\partial \rho}{\partial Z} \right) / e \left(\frac{\partial U}{\partial Z} \right)^2$$

을 使用할 수 없으나 注入된 流體와 周圍流體와의 密度差를 쉽게 求할 수 있으므로 다음과 같이 變형된 Richardson number, R_{io} 를 使用하였다.

$$R_{io} = g \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{d}{U^2}$$

여기서 密度 ρ 는 注入된 流體層의 密度를 取하였으며 密度差 $\Delta \rho$ 는 周圍流體와 注入된 流體와의 密度差로, 높이 d 는 Model로 使用된 Solar pond 底面으로부터 注入된 流體와 周圍 流體사이의 上部 中間境界面까지의 높이로, 그리고 速度 U 는 注入流體의 平均速度를 取하였다.

또한 中間領域과 出口領域에서는 實驗結果值로부터 쉽게 密度勾配를 求할 수는 있으나 速度勾配를 求할 수가 없으므로 다음과 같이 變형된 Richardson number를 使用하였다.

$$Ri = g \frac{\partial \rho}{\partial Z} \cdot \frac{d^2}{U^2}$$

여기서 높이 d 와 速度 U 는 注入口 領域에서 使用한 Richardson number의 높이 d 와

速度 U 와 同一하여 密度勾配 $\frac{\partial \rho}{\partial Z}$ 는 Model로 使用된 pond 底面으로부터 높이 d 에 位置한 流體層의 密度勾配를 使用하였다.

3.3 Rayleigh number의 適用

底面은 均一하게 加熱되고 그 위에는 均一하게 冷却된 두 平行平板사이 에 있는 流體層은 熱對流에 의해 運動한다. 처음에는 運動이 規則적인 定常狀態로 發生하지만 溫度差와 깊이가 커짐에 따라 運動은 亂流로 變한다. 이와 같은 두 平行平板사이 에 있는 流體의 安定을 調査하기 爲해서 다음과 같은 無次元變數가 使用된다.

$$Ra = \frac{g \alpha \Delta T d^3}{\nu \rho}$$

이것을 Rayleigh number라고 하며 Prandtl number와 Grashof number의 곱으로 表示된다. 또한 Rayleigh number는 流體의 粘性擴散의 影響과 Heat flux를 고려한 경우가 된다.

Lord Rayleigh는 이와같은 流動의 安定基準으로서 $Ra = 27/4 (\approx 657)$ 를 提示한바 있다. 이 임계값보다 낮은 값에서는 底面으로부터 加熱된 流體는 작은 교란에 對하여도 安定하다는 것이다.

그러나 F. Zangrando⁶⁾, G. Veronis⁷⁾, 그리고 J.W. Elder⁸⁾는 Solar Pond 內의 成層流體의 安定에 關하여 $Ra = 10^{10}$ 보다 크면 一般的으로 不安定한 것으로 研究報告하였다. 勿論 各己의 實驗에 對하여는 多少의 差異는 있으나 비슷하다고 共感하였다.

本 調査에서는 Model로 使用된 Solar Pond 內의 成層流體流動의 安定을 調査하기 爲하여 다음과 같은 Thermal Rayleigh number, R_{ao} 를 使用하였다.

$$R_{ao} = g \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \frac{d^3}{\nu \rho}$$

3.4 Froude number의 適用

가벼운 流體 밑에서 무거운 流體層이 流動하는 경우, 이것은 自由表面을 갖는 流動의 水力學的 特徵을 갖는다. 이와같은 流體層이 장애물 위로 流動할 때 水力學的 關係에 依해 Internal Froude number는 다음과 같이 表現된다.

$$Fr = \left(\frac{Q^2}{g^1 d_1^3} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{U}{(g^1 d_1)^{\frac{1}{2}}}$$

Froude number는 重力에 對한 慣性力의 比인데 여기서 密度差로 因한 不均質한 流體의 경우가 된다.

위에서 $g^1 = g \frac{\Delta \rho}{\rho}$ 이고 Q 는 單位幅當의 流動率이다.

流體層의 거동은 Internal Froude number의 先流動值 (upstream value)에 決定的으로 依存하게 된다. “임계” 內部 Froude number가 1과 같을 때 ($F_r = 1$)는 流動速度가 層위의 無限히 작은 진 파도의 速度와 같게 되는 狀態를 意味한다. 流動이 초임계 (Super critical)일 때, 即 $F_r > 1$ 일 때, 작은 교란은 流動에 對하여 upstream까지 전파될 수 없다. 流動이 아임계 (subcritical)일 때 即 $F_r < 1$ 일 때 짧은 파도 장애물에 對해 정지상태로 存在하며, 따라서 成層流體의 中間境界面위의 Lee波와 유사한 現象이 보다 짧은 장애물의 下流에서 觀察될 수 있다. 또한 이러한 基準은 $F_r = Ri \rho^{-\frac{1}{2}}$ 關係가 比較될 수 있다.

위의 Froude number式에서 g^1 는 Model로 使用된 pond底面으로부터 높이 變化에 따른 流體層과 바로 그 위에 인접한 流體層과의 密度差에 依해 流體粒子에 作用하는 重力加速度로 그리고 速度 U 는 流體의 平均速度를 取하였다.

IV. 水槽와 流動條件

Richardson number, Rayleigh number 그리고 Froude number와 같은 成層流體의 安定支配變數들을 計算하기 爲하여 幅 1 m, 높이 2 m, 그리고 길이 5 m인 모형 太陽연못內的 非對流層과 對流層 사이의 中間境界面 安定에 關한 研究²⁾에 依해 얻어진 實驗結果值를 使用하였다.

위와 같은 實驗裝置에서 Line source의 入口 領域에서의 速度는 0.03739 m/s이며 中間領域에서 速度는 0.1241 m/s이고 出口領域에서의 速度는 0.2108 m/s이다. 또한 注入되는 冷水의 密度는 Line sink로서 推出되는 鹽水의 溫度差를 利用한 interpolation 方法으로 求하였다.

그리고 水槽內的 入口領域에서의 流體는 Line source로서 注入되는 冷水로 分布되었다고 가정하였다.⁶⁾ 또한 使用된 水槽 밑면으로부터 높이 約 70 cm까지 溫度는 37.89 °C 密度는 1040.9 kg/m³로 一定한 것으로 取하였다.

종횡비 (aspect ratio, $A = D/L$)는 流體가 出口領域에 이르기 前에 完全히 發展되도록 L 이 充分이 길고 또한 入口領域에서의 效果的인 混合때문에 流動에 거의 影響을 미치지 않도록 하였다.

V. 結果 및 考察

5.1 結果

Richardson number를 利用한 경우의 結果:

$$\text{Richardson number, } Ri = g \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{d}{U^2},$$

$Ri = g \frac{\partial \rho}{\partial z} \cdot \frac{d^2}{U^2}$ 을 利用한 計算結果를 圖示하였는데

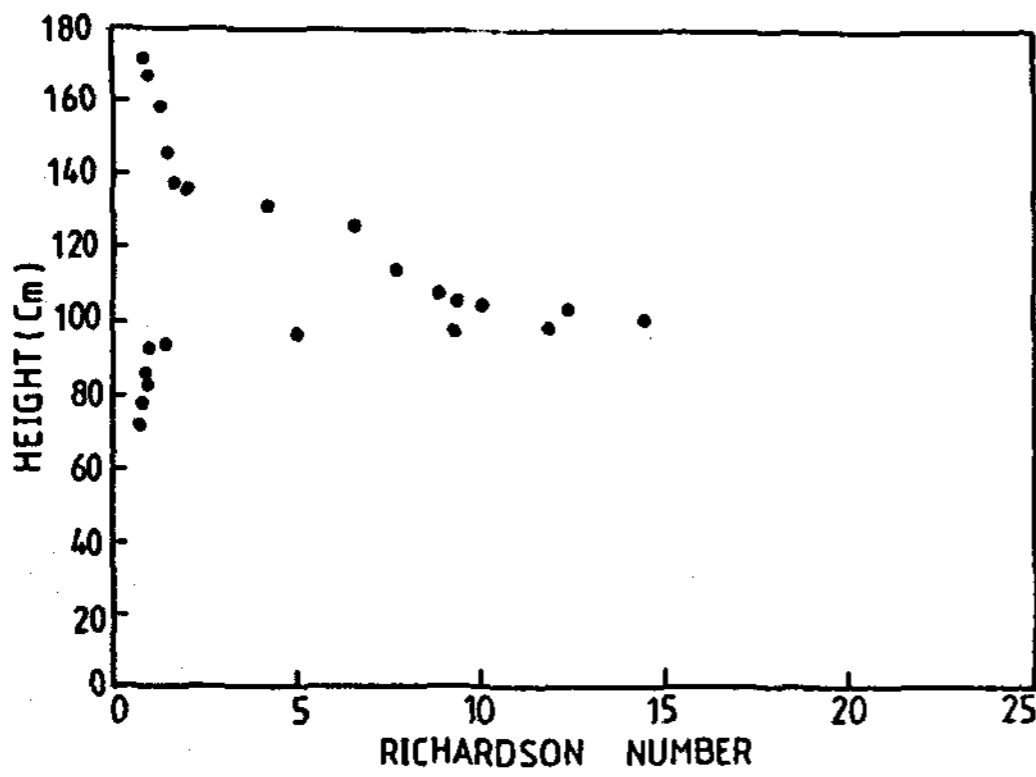


Fig. 2. Variations of Richardson Number due to height changes at the inlet port

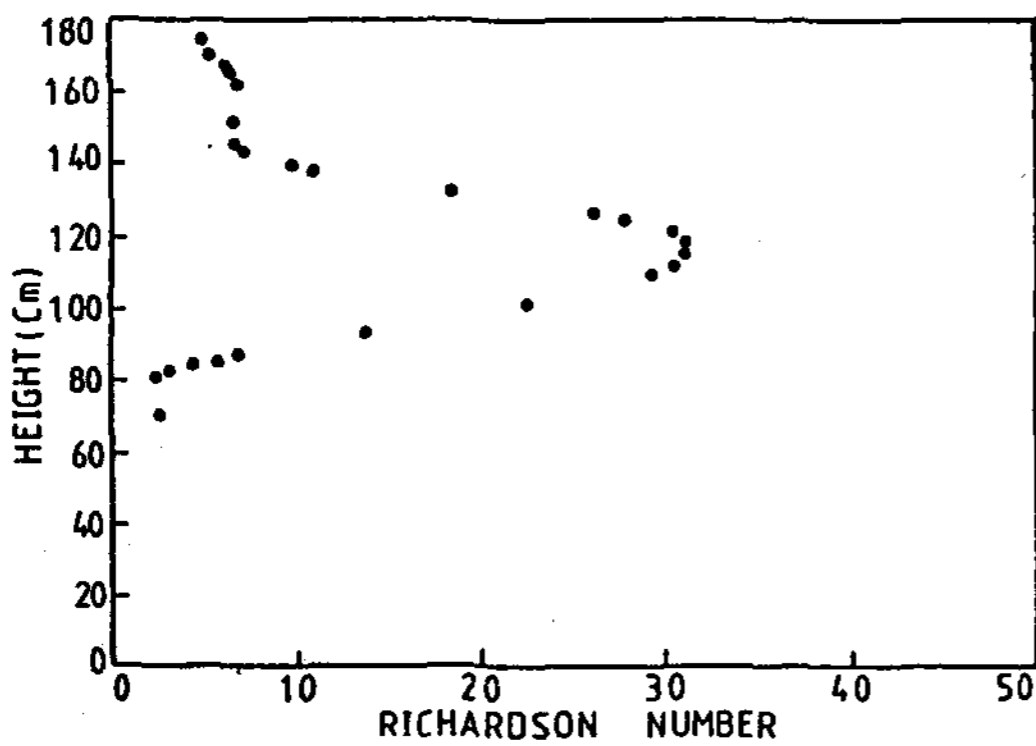


Fig. 3. Variations of Richardson number due to height changes in the middle section

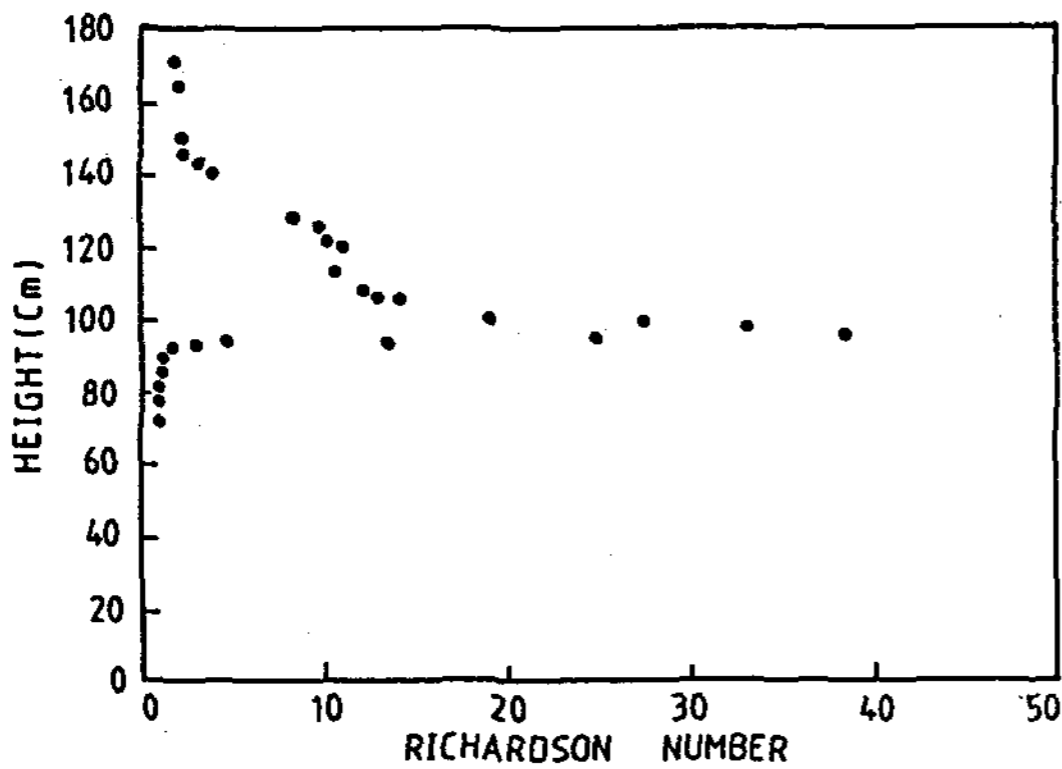


Fig. 4. Variations of Richardson number due to height changes at the outlet port.

Fig. 2는水槽內의入口領域
 Fig. 3은水槽內의中間領域, 그리고 Fig. 4는出口領域에서의計算結果들을圖示한것이다.

Rayleigh number를利用한경우의結果:

$$\text{Rayleigh number, } Ra = g \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{d^3}{\text{Kr}}$$

를利
 用한計算結果를圖示하였는데

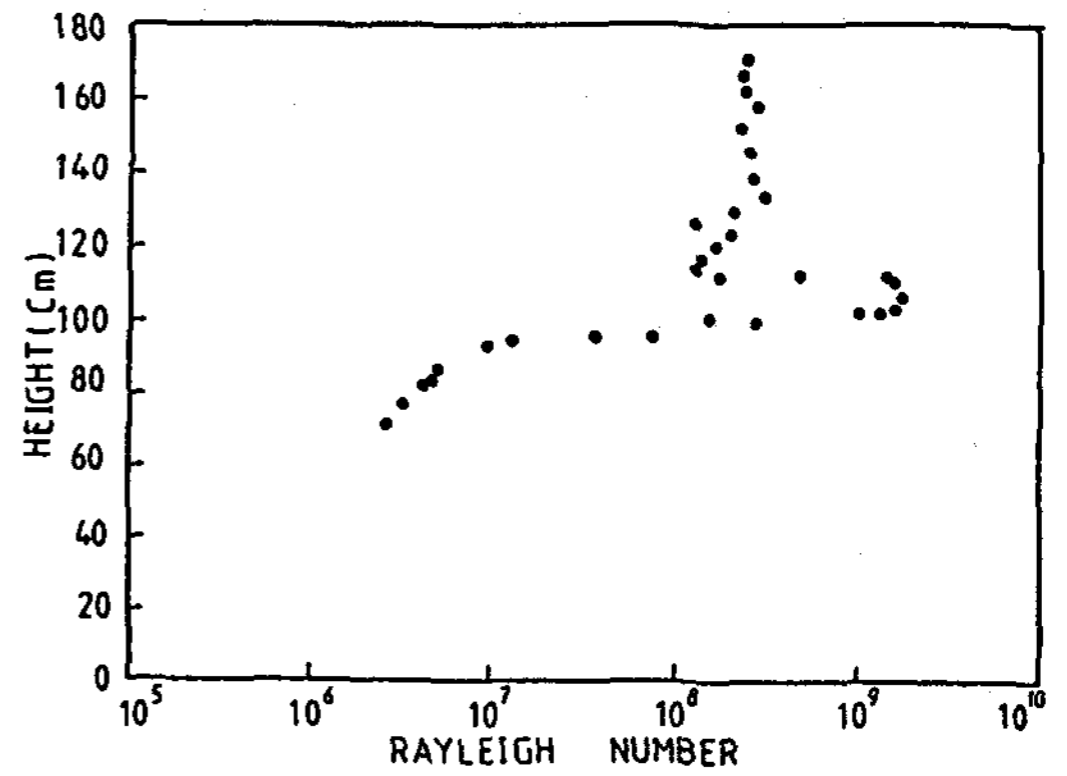


Fig. 5. Variations of rayleigh number due to height changes at the inlet port

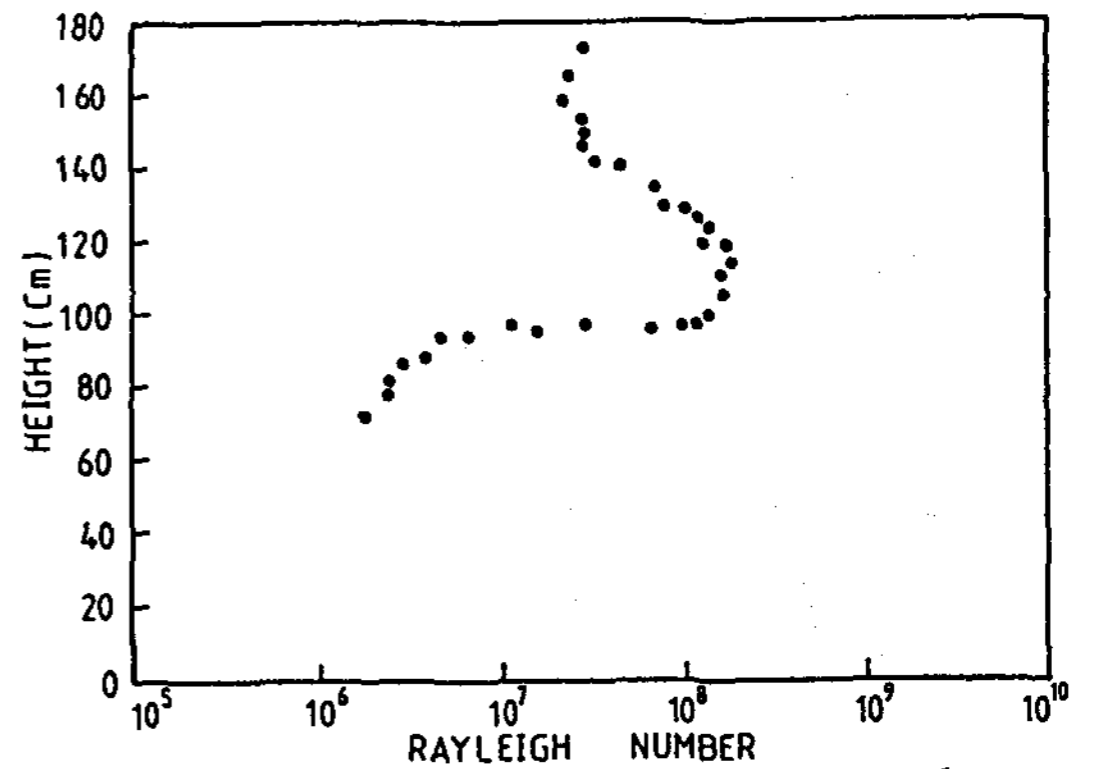


Fig. 6. Variations of rayleigh number due to height changes in the middle section

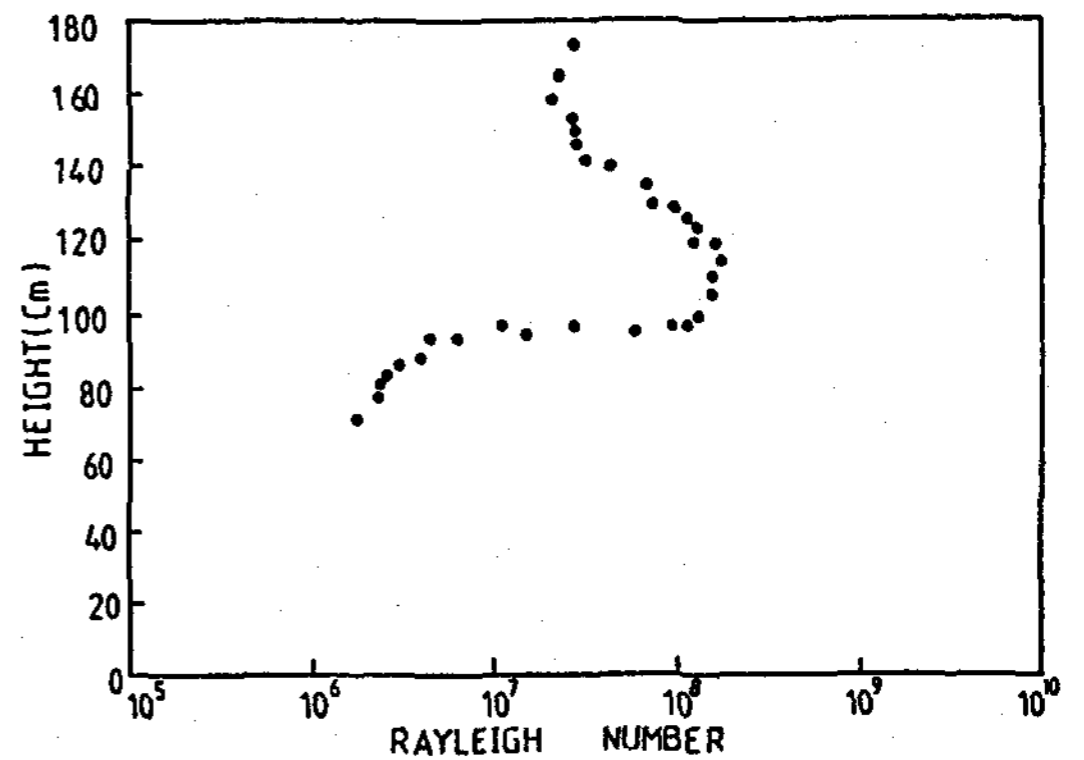


Fig. 7. Variations of rayleigh number due to height changes at the outlet port

Fig. 5는水槽內의入口領域에서, Fig. 6은中間領域에서, 그리고 Fig. 7은出口領域

에서의 計算 結果들이다.

여기서 入口領域에서 熱擴散係數, $K = 1.5182 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$, 動粘性係數, $r = 1.0420 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다. 中間領域과 出口領域에서의 熱擴散係數는 共히 $K = 1.5672 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$, $K = 1.5627 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$, 動粘性係數는 共히 $\nu = 9.4567 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$, $r = 9.4567 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ 이다.

Froude number 를 利用한 경우의 結果 :

Froude number, $Fr = \frac{U}{\sqrt{g\alpha\Delta Td}}$ 를 利

用한 計算 結果를 圖示하였는데

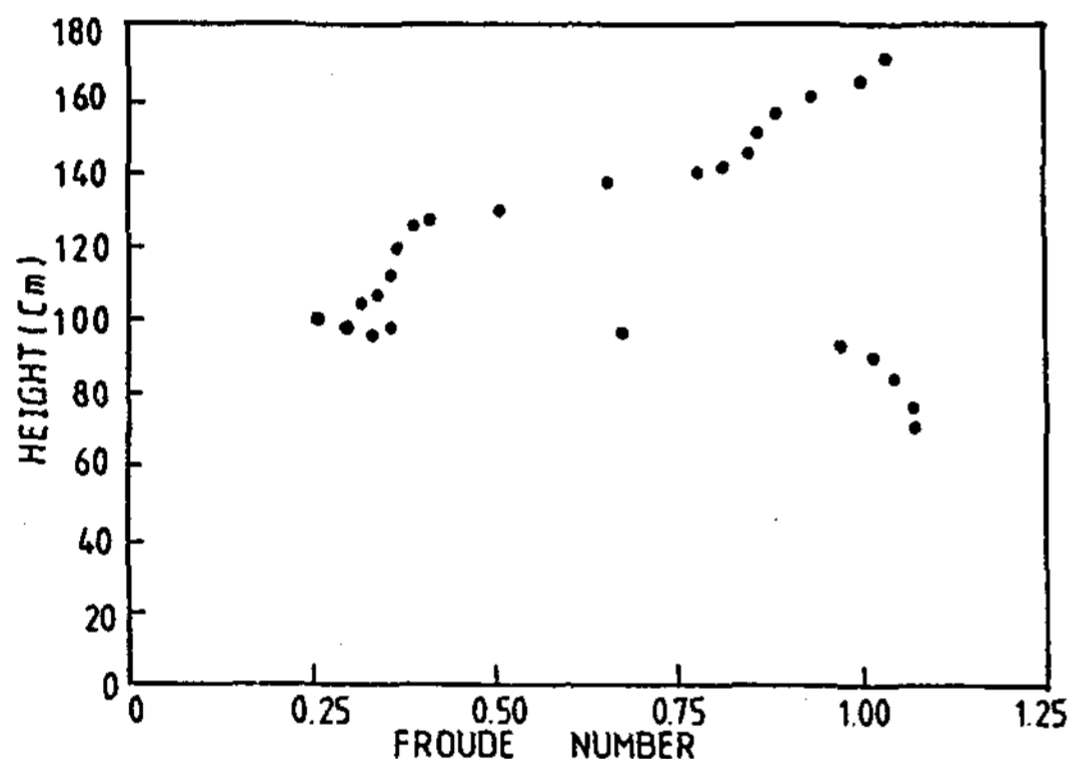


Fig. 8. Variations of froude number due to height changes at the inlet port

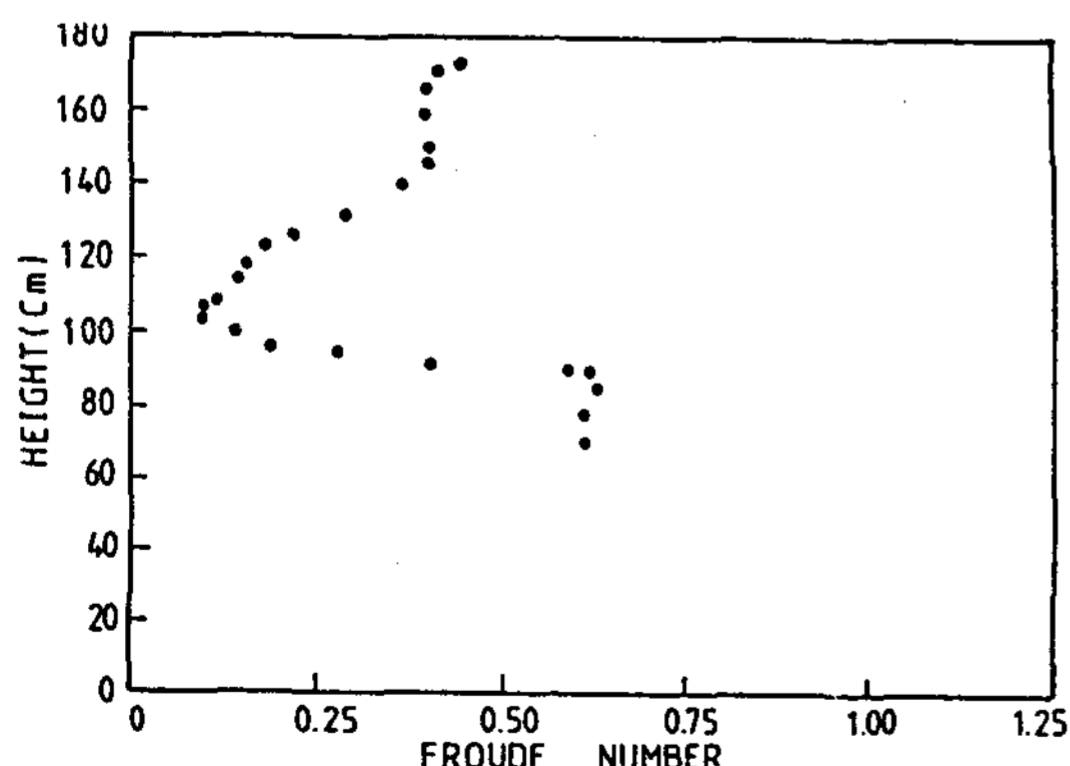


Fig. 9. Variations of froude number due to height changes in the middle section

Fig.8 은 水槽內의 入口領域, Fig.9는 中間領域, 그리고 Fig.10 은 出口領域에서의 計算結果들이다.

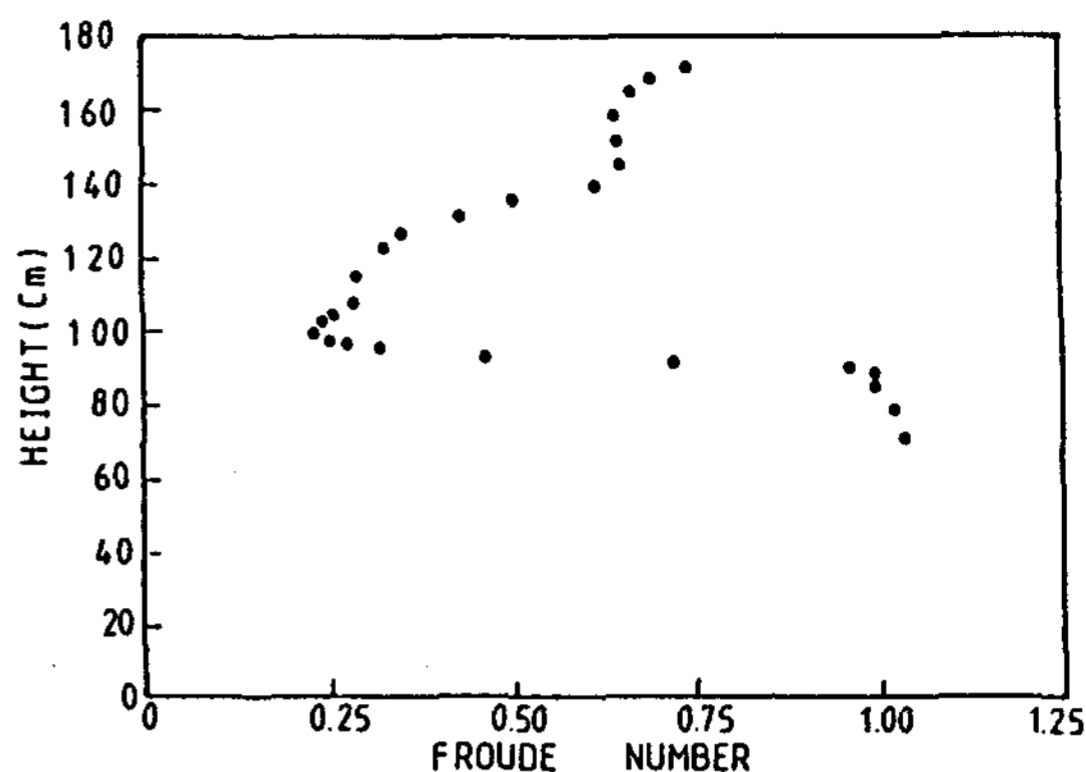


Fig.10. Variations of froude number due to height changes at the outlet port.

5.2 考 察

Richardson Number 의 경우 :

水槽 밑면으로 부터 約 70 cm 높이 까지의 領域에 있는 流體는 均質(homogeneous) 한 流體이므로 Richardson Number 가 zero(零) 가 되며 따라서 이 領域內에 있는 流體는 不安定하다. 水槽 밑면으로 부터 약 70 cm 부터 約 110 cm 높이 사이에 있는 成層流體는 인접한 두 流體層사이의 密度差가 크므로 Richardson Number 는 安定 基準值 0.85보다 큰 값으로 나타나며, 이 境界面에서 中間境界面을 가로지르는 混合이 發生하지 않으므로 成層流體의 流動은 安定이 됨을 알 수 있다. 또한 水槽 밑면으로 부터 約 110 cm 부터 約 140 cm 높이 까지 Richardson Number 는 높 이 增加 方向으로 점차적으로 減少한다. 높이 約 140 cm以上에서 부터 Richardson Number 는 成層流動의 安定基準值 0.85 보다 큰 0.88로 거의 一定하게 維持된다. 이러한 Richardson Number 는 入口, 中間 및 出口 領域에서 若干 差異는 있으나 다 같이 水槽 밑면으로 부터 約 70 cm以上の 높이에서는 安定流動임을 알 수 있다.

Rayleigh Number 의 경우 :

높이 約 70 cm 까지의 領域에 있는 流體는 均質(homogeneous) 한 流體이므로 Rayleigh

Number가 zero(零)이 된다. 따라서 이 영역에서는 불안정하다. 그리고 70 cm에서 90 cm 사이에서는 Rayleigh Number는 前述한 安定基準值 10^{10} 보다 작은 값으로 나타나며 水槽높이 增加 方向으로 Rayleigh Number는 거의 一定한데 이는 이 영역에서 密度差가 작기 때문이다. 90 cm부터 約 120 cm까지의 영역에서는 密度差가 크게 나타나므로 Rayleigh Number는 크게 나타나지만 安定基準值 10^{10} 보다 작으므로 이 영역에서도 安定이 維持된다. 높이 約 120 cm부터 140 cm 사이에 있는 成層流體는 密度差가 작으므로 水槽 밑면으로 부터 높이 增加 方向으로 減少한다는 것을 알 수 있다. 이러한 Rayleigh Number 들은 入口, 中間 및 出口에서 비슷한 값들이다.

Froude Number의 경우:

높이 約 70 cm까지의 영역에 있는 流體는 同一하게 均質(homogeneous)한 流體이므로 Froude Number는 無限大($Fr \rightarrow +\infty$)가 되며 따라서 이 영역에서는 역시 불안정하다. 높이 約 70 cm부터 110 cm 사이에서는 인접한 두 流體層 사이의 密度差가 크므로 Froude Number는 安定基準值 1.08 보다 작은 값으로 나타나기 때문에 이 사이에 있는 成層流體의 中間 境界面에서 中間 境界面을 가로 지르는 混合이 發生하지 않는다. 따라서 이 流動은 安定이 된다. 또한 높이 約 110 cm부터 140 cm까지는 Froude Number가 높이 增加 方向으로 점차적으로 增加한다. 그리고 높이 約 140 cm 이상에서 부터는 Froude Number는 安定基準值 1.08 보다 작은 값을 얻었다. 이러한 Froude Number 들은 入口, 中間 및 出口에서 비슷한 結果를 나타내며 높이 約 70 cm 이상에서 成層流體의 流動은 安定함을 알 수 있다.

VI. 結 論

成層 流體 流動의 安定을 測定하는 各種 安

定支配變數, 即 Richardson Number, Rayleigh Number 그리고 Froude Number 를 사용하여 Model로 使用된 水槽內의 入口, 中間 그리고 出口의 各 領域에서 流動의 安定을 各各 測定하였으며 그 結果는 다음과 같이 要略된다.

1) 水槽內의 成層流體는 Line sink와 Line source에 의해 流體가 推出 및 注入되는 流動의 경우, 이로 因하여 發生되는 浮力과 關係되는 成層流體流動의 安定은 Richardson Number를 사용하여 測定할 수 있으며, 한편 水槽內의 流體는 不均質(heterogeneous)한 流體이므로 이 때 成層流體流動의 安定을 測定하기 爲해서는 Froude Number가 使用된다. 이 두 無次元數들은 計算한 結果, 水槽 밑면으로 부터 높이 約 70 cm 이상에서의 成層 流體는 入口, 中間 및 出口의 各 領域에서 그들의 값들은 多少의 差異는 있으나 安定基準의 條件을 滿足하므로 이 領域에서 流動은 安定이 된다.

2) 水槽 밑면으로 부터의 加熱에 의해 熱束(heat flux)이 發生하므로 이 경우는 Thermal stability와 연관되는 安定問題이므로 Rayleigh Number가 利用된다. Rayleigh Number를 計算한 結果, 水槽 밑면으로 부터 높이 約 70 cm 이상에서의 成層 流動은 入口, 中間 및 出口의 各 領域에서 計算 結果는 多少 差異는 있으나 역시 安定基準條件을 滿足하므로 이 領域에서 流動은 安定이 된다.

以上の 結果를 綜合해 볼 때 Model로 使用된 水槽內의 流體는 流動을 하게 되며 또한 流體는 熱束이 存在한다. 따라서 이와 같이 복합적인 현상이 同時에 일어나는 成層流體流動의 安定을 測定하기 爲해서는 各기 다른 特性을 갖는 安定支配變數, 即 Richardson Number, Froude Number, 그리고

Rayleigh Number를 함께 利用하는 것이 流 한다.
動의 安定을 보다 더 確實히 分別할 수 있게

References

1. K. Lofquist, "Flow and Stress Near an Interface Between Stratified Liquids." *Phys. Liquids* 3; PP.158-175, 1960.
2. 박이동, "태양수조 내의 대류층과 비대류층 사이의 수력학적 안정에 관한 연구." *태양에너지* 제4권 1호 1984.5. pp 1-7.
3. J.S. Turner, "The coupled Turbulent transport of salt and Heat Across a Sharp Density Interface." *Int. J. Heat Mass Transfer* 8; PP.759-767, 1965.
4. J. W. Miles, "on the stability of heterogeneous shear flows." *J. Fluid. Mech.* 10? PP.496-508, 1961.
5. J. W. Miles, "on the stability of heterogeneous shear flows." Part 2 *J. Fluid. Mech.* 32; PP.549-568, 1963.
6. F. Zangrando, "Observation and Analysis of a Full-Scale Experimental Salt Gradient Solar Pond." Ph.D. thesis, Department of Physics, University of New Mexico, May 1979.
7. G. Veronis, "Effect of a Stabilizing Gradient of Solute in Thermal Convection." *J. Fluid. Mech.* 34; PP.315-336, 1968.
8. J. W. Elder, "Numerical Experiments with Terhmohaline Convection." *Phys. Fluids.* 12, No.11; PP.194-1979, 1969.