

[ 論 文 ]

太陽에너지의 直接吸收式 受熱板上의  
流體流動特性에 關한 研究

**A Study on Characteristics of Fluid Flow  
on Direct Absorption Receiver from Solar Energy**

朴 伊 東\*  
(Ee-Tong, Pak)

**ABSTRACT**

Direct Absorption Receiver and Thermal Storage System is a complex problem. This paper describes only characteristic of fluid flow on the receiver. The fluid thicknesses of Molten Salts (Melting Point : 397°C) flowing on the receiver of modified prototype (10m x 10m) were calculated theoretically, changing the receiver slope from 60 degree to 85 degree (5 steps). The receiver temperatures were 430°C at the top part and 950°C at the low part.

The flow thickness of the Molten Salts at the top part of the receiver are around 1.9mm in the case of maximum insolation ( $50 \times 10^6$  joule/sec; 58.898kg/sec of flow rate) and 2.0mm at the low part. In the case of 3/10 of maximum insolation (flow rate = 17.669kg/sec) the flow thickness at the top part are around 0.9mm and 0.4mm at the low part, and in the case of 1/10 of maximum insolation (flow rate = 5.889 kg/sec) the flow thickness at the top part are around 0.6mm and 0.3mm at the low part.

From experimental measurements of a normal fresh water thickness flowing on the model plate (12.7cm x 111.76cm), around 0.8mm at the top part of the plate and around 0.7mm at the low part were obtained in the case of maximum insolation (flow rate = 0.12496 kg/sec). In the case of 3/10 (flow rate = 0.03748 kg/sec) and 1/10 (flow rate = 0.012496 kg/sec) of maximum insolation, around 0.5mm and 0.4mm at the top part, and around 0.3mm and 0.2mm at the low part were obtained respectively.

The reason why the thickness of the Molten Salts increase at the low part of the receiver only in case of maximum insolation is that decreasing rate of the viscosity of the Molten Salts is larger than decreasing rate of the density of the Molten Salts during temperature increase from the top to the low receiver plate and decrease of the fluid velocity in accordance with continuity principle.

In all cases without the above maximum insolation, the thickness of the Molten Salts and the

\* 正會員 成均館大學校工大

이 論文은 韓國學術振興財團의 1983 年度 研究費支援에 의하여 研究되었음.

fresh water decreased at the low part of the plate because of gravity force effects rather than friction effects and of continuity principle. All similar flow patterns were obtained through all cases of the insolation making an exception of only maximum insolation.

記 號 說 明

- A : 流動斷面積 ( $m^2$ )
- $A_m$  : Model 水路斷面積 ( $m^2$ )
- b : 矩形斷面開水路幅 (mm)
- C : Chezy 常數 ( $\sqrt{8g/f}$  로도 表示)
- $C_p$  : 比熱 (cal/g- $^{\circ}C$ )
- $D_b$  : prototype 의 水力直徑 (m)
- $D_{bm}$  : Model " "
- $D_r$  :  $D_{bm}/D_b$
- $F_r$  : Froude Number
- f : 마찰계수
- g : 重力의 加速度 (m / sec $^2$ )
- H : 水頭 (m)
- K : 定數
- $K_r$  : Model 의 물의 實驗 두께 / 물의 理論두께
- m : Molten Salts 의 Mass Flow Rate (kg/sec)
- $\dot{m}_m$  : Model 의 물의 mass flow Rate (kg/sec)
- $\dot{n}$  : 水路表面上의 絕對組度係數 ( $m^{\frac{1}{6}}$ )
- P : 接水길이 (m)
- Q : Molten salts 의 流動率 ( $m^3/sec$ )
- $Q_m$  : Model 上의 물의 流動率
- $\dot{Q}$  : Heat Flux (joule/sec)
- q : 單位幅當의 流動率 ( $m^3 / sec - m$ )
- $R_e$  : Reynolds Number
- $R_{em}$  : Model 上의 Reynolds Number
- $R_h$  : 水力半徑 (m)
- S : 水路傾斜 (水路바닥에 平行한 물 表面의 傾斜:  $\sin \theta$  - 無次元)
- $\Delta T$  : 溫度差
- t : Fluid Thickness (mm)

- u : 速度成分 (m/sec)
- V : 平均流速 (m/sec)
- $\alpha$  : 曲線方程式에서  $x^2$  의 係數
- $\beta$  : 曲線方程式에서 x
- $\gamma$  : 曲線方程式에서 常數
- $\rho$  : Molten Salts 의 密度 (kg/m $^3$ )
- $\rho_m$  : Model 上의 물의 密度 (kg/m $^3$ )
- $\mu$  : Molten Salts 의 粘性係數
- $\mu_m$  : Model 上의 물의 粘性係數
- $\nu$  : Molten Salts 의 動粘性係數

I . 序 論

太陽Energy 의 直接吸收式 受熱板과 熱貯藏 (Direct Absorption Receiver and Thermal Storage, DARTS 라고 稱함) System 은 大端히 복잡하여 受熱板上을 흐르는 流體의 速度 分布, 流動率 그리고 그 板上의 組度나 마찰계 수와 같은 問題들이 아직 解決되지 않고 있다. 뿐만 아니라 高溫의 Molten Salts가 急傾斜熱板 上에서 流動하는 것에 關한 研究 論文이나 이와 聯關이 깊은 문헌도 거의 없는 實情이다.

1953年, W.M.Owen<sup>1)</sup>은 矩形水路와 無限 幅水路上을 層流로 流動할 때 流速과 流量을 決定하는 理論式을 發表하였는데 그 式이 現在 技術者들이 流速分布를 求하는데 利用되고 있다. 한편 亂流에 對하여는 Manning의 式이 適用되지만 Manning 式의 最初表現에 Buckley의 努力을 加하여 現在의 Manning 式이 된 것이다. Manning 式의 成功的인 適用에 關連되는 몇가지 要素中에서 P.S.Chisholm과 G.Tsang<sup>2)</sup>은 Manning 式을 現代理論에 基礎을 두고 應用하려고 試圖하였다.

1970년에 V.V.Jagaraman<sup>3)</sup>은 開水路上的의 問題를 풀기 爲하여 管内抵抗圖表를 使用하는 것은 잘못된 것이고 開水路流動은 管路流動과 따로 分離하여 處理해야 한다고 지적하였다. 1974년, J.Berloment<sup>4)</sup>는 層流와 亂流條件에 共히 適用되는 安定基準을 導出하였는데 一定流動率을 가진 急傾斜矩形水路에서는 定常적이고 점진적으로 변하는 流動理論은 여기에 適用되지 않았다.

1975년, O.N.Wakhlū<sup>5)</sup>는 開水路流動問題를 研究하기 爲하여 無次元數를 導入하였는데 이 無次元數는 流動問題의 次元解析에 基礎를 둔 것으로서 急傾斜面上을 얇게 流動하는 問題를 푸는데 大端히 重要했었다. 같은 年度에 S.S.Nabi, M. Jami와 S.S.Shah<sup>6)</sup>는 境界層이 完全히 展開되었을 때 速度分布의 安定樣狀을 얻었는데 그들의 研究結果에 따르면 얇은 膜流動에 對하여는 還移流動의 限界를 決定짓는데는 Reynolds 數는 充分한 基準이 될 수 없다는 것이었다.

1976년, Cho-Lin Chi, Hsin-Chi Lin과 K. Mizumura<sup>7)</sup>는 開水路水理學에서 發生하는 몇 가지 問題들을 取扱하였는데 그들의 解析技術은 決定論적이고 統計學的 接近方法의 結合이었다.

1977년, J.J.Sharp<sup>8)</sup>는 水路가 大端히 넓은 것을 가상할 때 포함되는 誤差를 分析하였고 Chezy나 Manning式에 對한 修正解의 正答을 얻기 爲하여 깊이의 近似的 計算에 利用될 修正係數를 提示하였다. 한편 1978년에 A.Kumar<sup>9)</sup>는 矩形과 三角斷面水路의 경우 점차적으로 變하는 標準流動方程式의 直接積分을 提案하였는데 그는 Chezy式이 마찰손실을 表現하는데 使用되고 Chezy係數의 變化가 오차의 근원이 되기는 하지만 Chezy係數가 一定하게 남아 있었다고 提示하였다. 1979년에는 C.C.S.Song과 C.T. Yang<sup>10)</sup>은 넓은 開水路의 層流와 亂流 流動을 最高의 Energy消費率理論이나 最少 流動動力理論을 利用하여 解析하였다. 이들의 結果는 層流의 경우 古典적인 포물선 速度分布와 一致하

였고 亂流의 경우는 速度分布의 函數式과 渦流 粘性을 가상하는 것이 必要하다고 하였다. 1981년, J.C.Bathurst, R.M.Li와 D.B. Simon<sup>11)</sup>은 Colorado 州立大學에서 큰粗度를 가진 放水路에 關하여 研究하였는데 그들은 큰粗度の 流動 抵抗은 抗력과 水路의 特性이나 配列에 달려 있다고 報告하였다. 1982년 W.R.C.Myers<sup>12)</sup>는 矩形水路에 關하여 넓은 範圍의 Reynolds 數와 35:1의 幅對깊이의 範圍에 對하여 마찰계수를 決定하였고 또한 그의 研究는 管流動式에서 使用되는 마찰계수와는 相當히 다르다는 것을 指適하였다. 그리고 마찰계수에 깊이對幅의 比가 어떻게 影響을 미치는가를 試驗하였다.

위와 같은 研究結果들은 急傾斜開水路上的의 流動特性에 關한 報告였는데 本 研究에 適用시켜보 고져 했다. 太陽Energy를 地上의 數百個의 Helio-stat에서 反射시켜 特殊 Ceramic材인 受熱板으로 直接吸收시켜 그 板上을 流動하는 Molten Salts의 流動特性을 理論적으로 研究하는데 一次的 目的이 있다. 逐次的으로 高溫의 Molten Salts가 受熱板上을 流動하는 大型 Prototype를 直接 取扱하는 代身 小型의 Model을 製作하고 이를 傾斜受熱板으로 하여 그 위에 常溫의 물을 流動시켜 이 물의 流動特性을 實驗적으로 測定하여 그 結果를 高溫의 Molten Salts가 Prototype 受熱板上을 流動한 理論적인 結果와 比較하였다.

## II. 關聯方程式

### 1. 層流流動

矩形斷面開水路上的의 層流流動의 一般方程式에서 깊이  $t$ , 幅  $2b$ 인 開水路上的의 速度分布와 Energy損失等の 理論流動特性은 깊이  $2t$ 와 幅  $2b$ 의 閉導管의 半의 것과 同一하다는 事實에 기인되고 다음 方程式은 모든 矩形導管과 水路에 適用된다.

이 境遇 Navier-Stokes 方程式은 다음과 같

다.

$$\nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = -g \frac{\partial H}{\partial Z} = -gS = \text{一定} \dots (1)$$

$$\text{또는 } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{gS}{\nu} = -K \dots (2)$$

境界條件:  $y = \pm t ; u = 0$

$x = \pm b ; u = 0$

$$\text{解: } u = \frac{16Kt^2}{\pi^3} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{x^3} (-1)^{(n-1)/2} \times \left( 1 - \frac{\cosh \frac{n\pi x}{2t}}{\frac{n\pi t}{2b}} \right) \cos \frac{n\pi x}{2b} \dots (3)$$

式(3)은 斷面 어느 點에서든지 速度를 나타내며 길이  $t$ , 幅  $2b$ 인 開水路에서 流動率  $Q$ 는

$$Q = \int_{-b}^b \int_0^t u \, dx \, dy \dots (4)$$

$$\text{解: } Q = \frac{2}{3} Kb^3 t \left( 1 - \frac{192b}{\pi^5 t} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{\pi^5} \times \tanh \frac{\pi n t}{2b} \dots (5)$$

한편 無限幅으로 간주하였을 경우의 速度分布는

$$U = \frac{gS}{2\nu} (t^2 - y^2) \dots (6)$$

單位幅當의 流動率은

$$q = \int_{-t}^t u \, dy = \frac{gSt^3}{3\nu} \dots (7)$$

$$\text{平均流速: } V = \frac{q}{A} = \frac{qSt^2}{3\nu} \dots (8)$$

### 2. 亂流流動

開水路에서 正常均一流動으로 간주하면 Manning 公式이 널리 使用되고 Chezy 式에  $C = \frac{0.820}{n} R_h^{\frac{1}{6}}$  을 代入하여 얻는다. 卽 Manning 公式:

$$V = \frac{0.820}{n} R_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \dots (8)$$

式(8)에 流動斷面積(A)를 곱하여 다음의 流動率을 얻고 이는 곧 Manning 式의 다른 表現이기도 하다. 卽

$$Q = \frac{0.820}{n} A R_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \dots (9)$$

## III. Prototype 와 作動流體

### 1. Prototype 受熱板

그림 1은 直接吸收式受熱板의 原型을 圖示한 것이고 그림 2는 問題를 쉽게 接近하기 爲하여 修正된 受熱板을 나타낸 것이다. 이 修正受熱板은  $10m \times 10m$  크기로서 特殊 Ceramic 으로 製造되도록 되어 있고 그 위를 Molten Salts가 흘러내리도록 되어 있다.

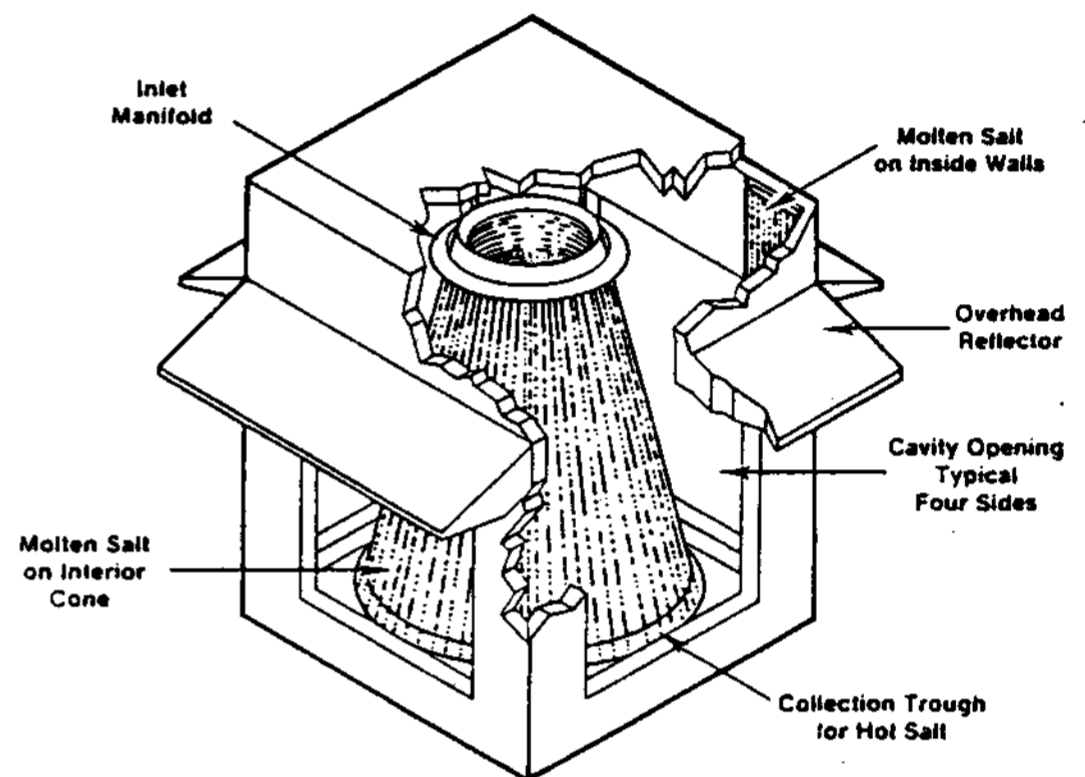


Fig 1. Darts Receiver

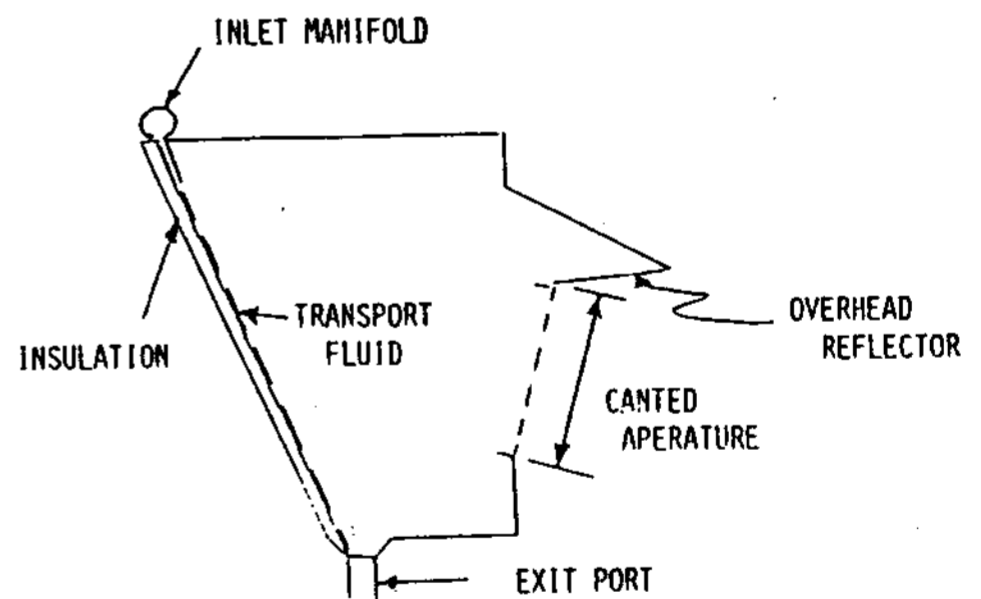


Fig 2. Schematic of Modified Direct Absorption Receiver

### 2. 作動流體<sup>13)</sup>

修正受熱板上을 흘러내리는 作動流體는 Silicates 의  $Na_2SiO_3, Na_2Si_2O_3, K_2SiO_3, K_2Si_4O_9, SiO_2$ , Carbonate 의  $(Li-Na-K)_2CO_3$ 와  $(Na-K)_2CO_3$ , Chloride 의  $(Mg-Na-K)Cl$ 와  $(Li-Na-K)Cl$  그리고 Hydroxide 의  $NaOH$ 가 있으나 여기서는 Eutectic Mixture 인  $Li_2CO_3 - Na_2CO_3$

-KCo<sub>3</sub> 를 作動流體로 선정하였다. 이 Eutectic Mixture의 Melting point는 397°C이므로 修正受熱板의 Inlet manifold의 溫度를 430°C, Exit port의 溫度를 950°C로 取하면 充分하다. 이 作動流體의 決定은 美國의 DARTS 研究事業部에서 잠정적으로 選정한 것을 利用한 것이 며 여기에 關한 研究는 따로 進行中에 있다.

#### IV. Prototype 受熱板上의 理論流體特性

##### 1. 諸條件과 資料

修正된 prototype 受熱板上을 흘러내리는 Molten Salts 流動 特性을 理論적으로 計算하는데 다음과 같은 各種條件과 資料에 기인하였다. 卽,

受熱板의 數 : 1 個 (面積 : 10m×10m = 100m<sup>2</sup>)

Heliostat 의 數 : 1000 個 (1,000suns)

1kw/m<sup>2</sup> = 1 sun ∴ 1,000kw/m<sup>2</sup>

卽 10W/cm<sup>2</sup>/Aperature

Molten Salt 의 種類 : Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-KCo<sub>3</sub> (Eutectic Mixture)

Molten Salt 의 比熱 : C<sub>p</sub> = 0.39  $\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$

受熱板의 溫度範圍 : 430°C(Inlet) ~ 950°C (Exit)

Heat Flux : Q = 50(10<sup>6</sup>) joule/sec = 50(10<sup>6</sup>)Watts

다음의 Energy Balance 式으로부터 Mass Flow rate가 計算된다.

$$\text{Heat Flux: } \dot{Q} \left( \frac{\text{joule}}{\text{sec}} \right) = \dot{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \right) \cdot C_p \left( \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \cdot \Delta T (^\circ\text{C})$$

$$50 \times 10^6 \left( \frac{\text{joule}}{\text{sec}} \right) = \dot{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \right) \cdot 0.39 \left( \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \cdot 520 (^\circ\text{C})$$

$$\dot{m} = 58.8983 \left( \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \right) \dots \text{最大日射量의 境遇}$$

連統方程式,  $\dot{m} = \rho AV = \rho \cdot 10 \cdot t \cdot V$ 로부터

$$V \cdot t = 0.00283977 \text{ (m}^3/\text{sec)}$$

$$\text{Reynolds 數는 } Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{4\rho V t}{\mu}$$

$$\left( D_h = 4 \frac{10 \cdot t}{2t+10} \approx 4t \right)$$

$$= 3,926.544 \approx 4,000 \text{ (亂流流動)}$$

亂流流動에 對하여 (9) 式의 Chezy-Manning 式을 利用하면,

$$Q = \frac{0.820}{n} A \cdot R_h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} = \frac{0.820}{n}$$

$$\cdot 10 \cdot t (t)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{한편 } Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{58.8983 \left( \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \right)}{2074 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}$$

$$= 0.028398 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{sec}} \right)$$

여기서 n ≈ 0.010 으로 取하여

$$0.028398 = \frac{0.820}{0.010} \cdot 10 (t)^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}},$$

$$t^{\frac{5}{3}} = 2.91775 \times 10^{-5} \frac{1}{S^{\frac{1}{2}}}$$

윗 式으로부터

傾斜度 (S = sin θ) 를 60°에서 85°까지 5 단계로 바꾸면서 最大日射量時의 flow thickness(t)를 計算하였다. (亂流流動)

다음 表는 日射量의 溫度에 따른 Reynolds 數와 Flow Rate 를 나타내고 있다. (이는 Reynolds 數를 알고 flow thickness(t)를 取하는 公式을 適用하기 위함)

日射量	Flow Rate	Reynolds No.
最大日射 (Max)	58.8983 (kg/sec) (0.028393 m <sup>3</sup> /sec)	≈ 4,000 (亂流)
$\frac{3}{10}$ 最大 (部分흐림)	17.6695 (kg/sec) (0.0085194 m <sup>3</sup> /sec)	≈ 1,200 (層流)
$\frac{1}{10}$ 最大 (흐림)	5.88983 (kg/sec) (0.0028398 m <sup>3</sup> /sec)	≈ 400 (層流)

박이동

다음은 層流에 對하여 (7)式의 整理한

$Q = \frac{\gamma}{3\mu} t^3 S$  를 使用하데 이는 單位幅(1 m 幅)當의 流量이다.

$\frac{3}{10}$  最大日射量에 對하여(部分的으로 흐린 날씨):

$$0.00085194 = \frac{20345.94}{3 \times 0.006} t^3 \cdot S,$$

$$t^3 = 7.5371 \times 10^{-3} \frac{1}{S}$$

$\frac{1}{10}$  最大日射量(흐린 날씨)에 對하여 :

$$t^3 = 2.51236 \times 10^{-6} \frac{1}{S}$$

위 式을  $\frac{3}{10}$  및  $\frac{1}{10}$  最大日射量時 受熱板의 傾斜( $\theta$ )를 바꾸면서 flow thickness를 計算하였다. 本計算에 使用된 Computer(Hewlett Packard 9845A, BASIC)의 printout sheets가 부록 1로 첨부되어 있다.

## 2. 結果(流動特性)

Table 1은 流動特性을 나타내는 結果이다.

Table 1: FLOW THICKNESS IN PLATE VS. FLOW RATES AND ITS CHANGES

( $Li_2CO_3 - Na_2CO_3 - KCO_3$  : Eutectic Mixtures)

430°C → 950°C ( $\Delta T = 520^\circ C$ )

$$C_p = 0.39 \frac{Btu}{lb \cdot ^\circ F}$$

$$\dot{Q} = 50(10)^6 \frac{joule}{sec}$$

Flow Rate (kg/sec)	Reynolds No Re	Plat Slope ( $^\circ$ )	Flow Thickness(mm)			Flow Thickness Ratio to Temp. (mm/ $^\circ C$ )		Net Changes of Flow Thickness (mm)
			$\rho=2.1303gm/cc$ $\mu=6.0CP$ $T=430^\circ C$	$\rho=2.0395gm/cc$ $\mu=2.213CP$ $T=597^\circ C$	$\rho=1.8583gm/cc$ $\mu=0.4013CP$ $T=930^\circ C$	430°C ...	597°C ...	
58.8983 Max. Insolation	Re=3926.55 Turbulent Flow	60	1.92966	1.98076	2.09448	+3.0599 $\times 10^{-4}$	+3.4150 $\times 10^{-4}$	+0.16482
		65	1.90352	1.95392	2.06611	+3.0180 $\times 10^{-4}$	+3.3691 $\times 10^{-4}$	+0.16259
		70	1.88295	1.93283	2.04380	+2.9868 $\times 10^{-4}$	+3.3324 $\times 10^{-4}$	+0.16085
		75	1.86748	1.91693	2.02699	+2.9611 $\times 10^{-4}$	+3.3051 $\times 10^{-4}$	+0.15951
		80	1.85667	1.90583	2.01525	+2.9437 $\times 10^{-4}$	+3.2886 $\times 10^{-4}$	+0.15858
17.6695 3/10 of Max. Insolation	Re=1192.63 Laminar Flow	60	0.94174	0.69527	0.41872	-1.4759 $\times 10^{-3}$	-8.3048 $\times 10^{-4}$	-0.52302
		65	0.92757	0.68481	0.41218	-1.4537 $\times 10^{-3}$	-8.1871 $\times 10^{-4}$	-0.51539
		70	0.91646	0.67660	0.40747	-1.4363 $\times 10^{-3}$	-8.0820 $\times 10^{-4}$	-0.50899
		75	0.90808	0.67042	0.40375	-1.4231 $\times 10^{-3}$	-8.0081 $\times 10^{-4}$	-0.50433
		80	0.90224	0.66108	0.40115	-1.4441 $\times 10^{-3}$	-7.8057 $\times 10^{-4}$	-0.50109
5.8898 1/10 of Max. Insolation	Re=392.65 Laminar Flow	60	0.65028	0.48009	0.28913	-1.0191 $\times 10^{-3}$	-5.7345 $\times 10^{-4}$	-0.36115
		65	0.64049	0.47287	0.28478	-1.0037 $\times 10^{-3}$	-5.6483 $\times 10^{-4}$	-0.35571
		70	0.63282	0.46720	0.28136	-0.9917 $\times 10^{-3}$	-5.8078 $\times 10^{-4}$	-0.35146
		75	0.62704	0.46293	0.29879	-0.9827 $\times 10^{-3}$	-5.5299 $\times 10^{-4}$	-0.34825
		80	0.62300	0.45995	0.27700	-0.9764 $\times 10^{-3}$	-5.4940 $\times 10^{-4}$	-0.34600
85	0.62622	0.45819	0.27594	-1.0062 $\times 10^{-3}$	-5.4730 $\times 10^{-4}$	-0.35028		

그림 3에서 그림 8까지는 여러 상태에서의 Flow thickness를 比較하는 그림을 나타내고 있다.

Fig 3. Comparisons of Flow Thickness profiles at 60° of Plate Slope

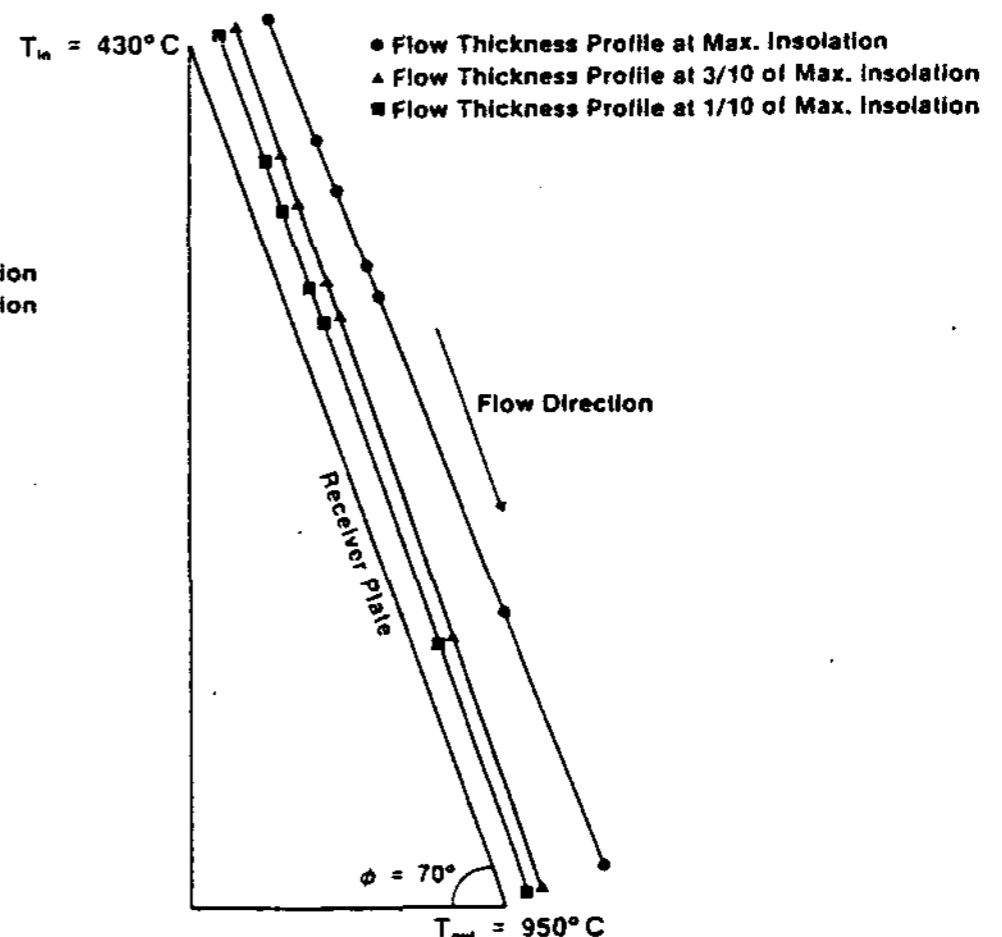
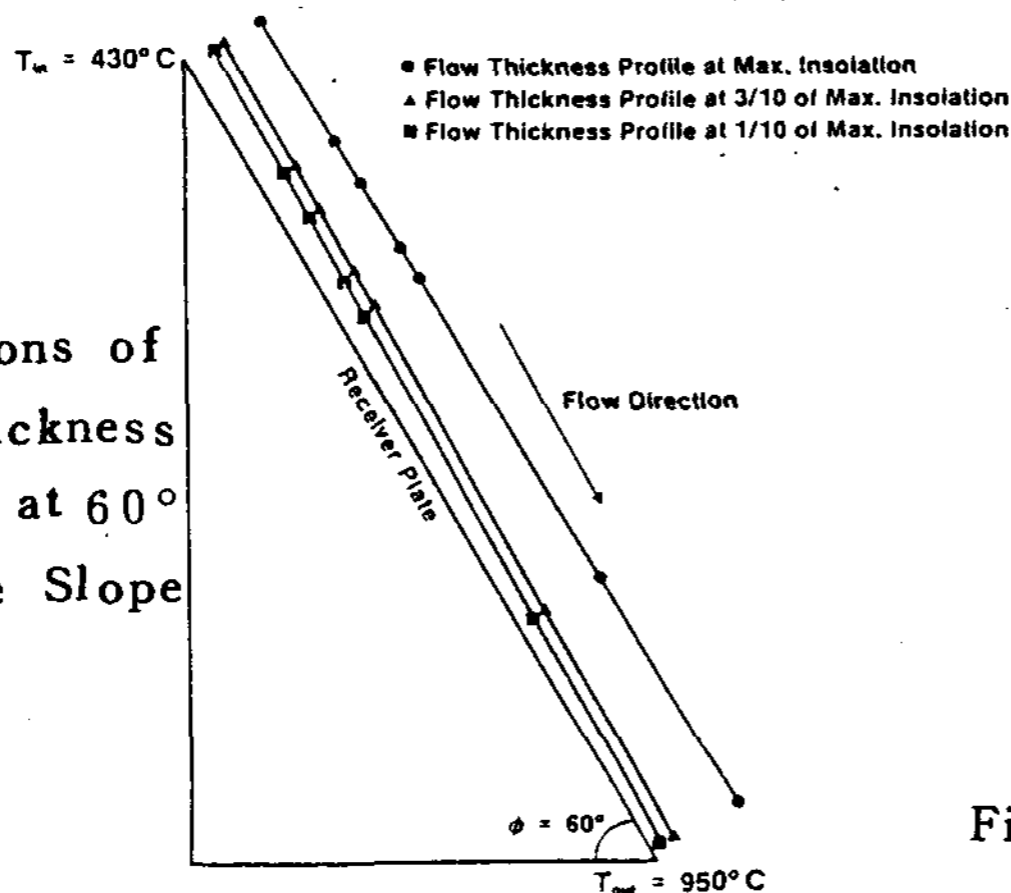


Fig 4. Comparisons of Flow Thickness profiles at 70° of Plate Slope

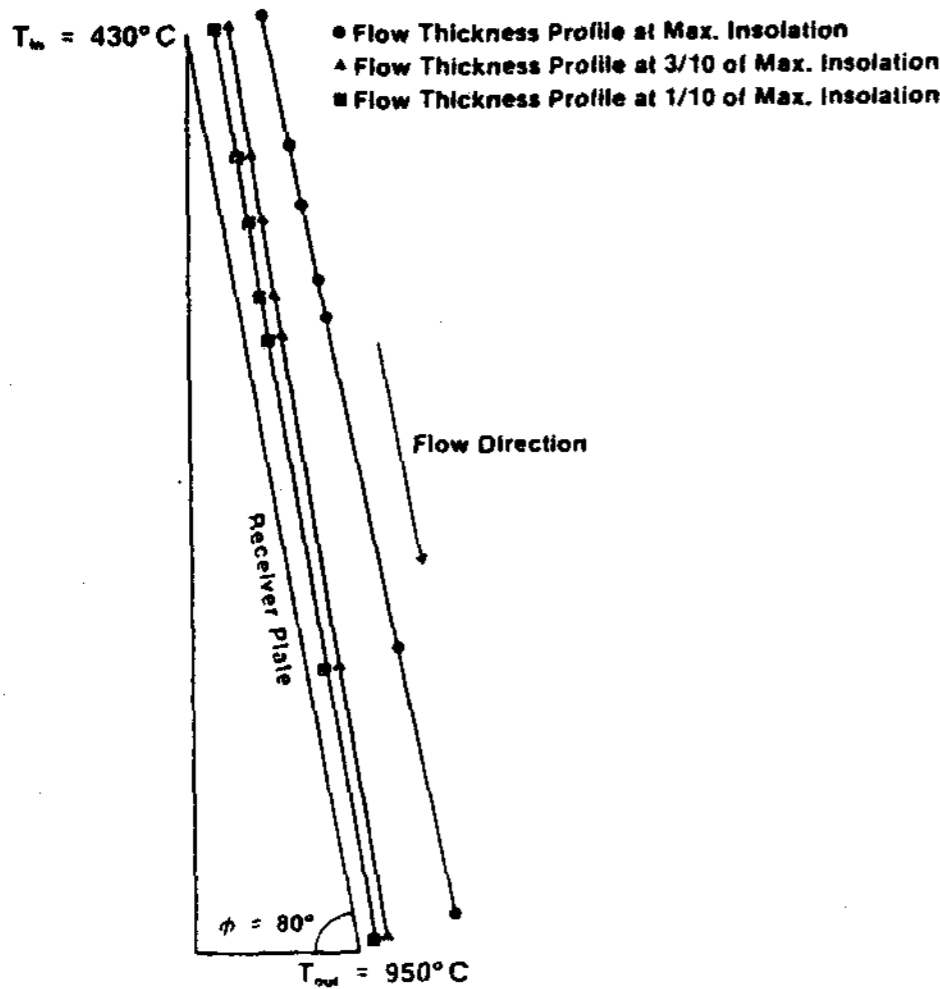


Fig 5. Comparisons of Flow Thickness Profiles at 80° of Plate Slope

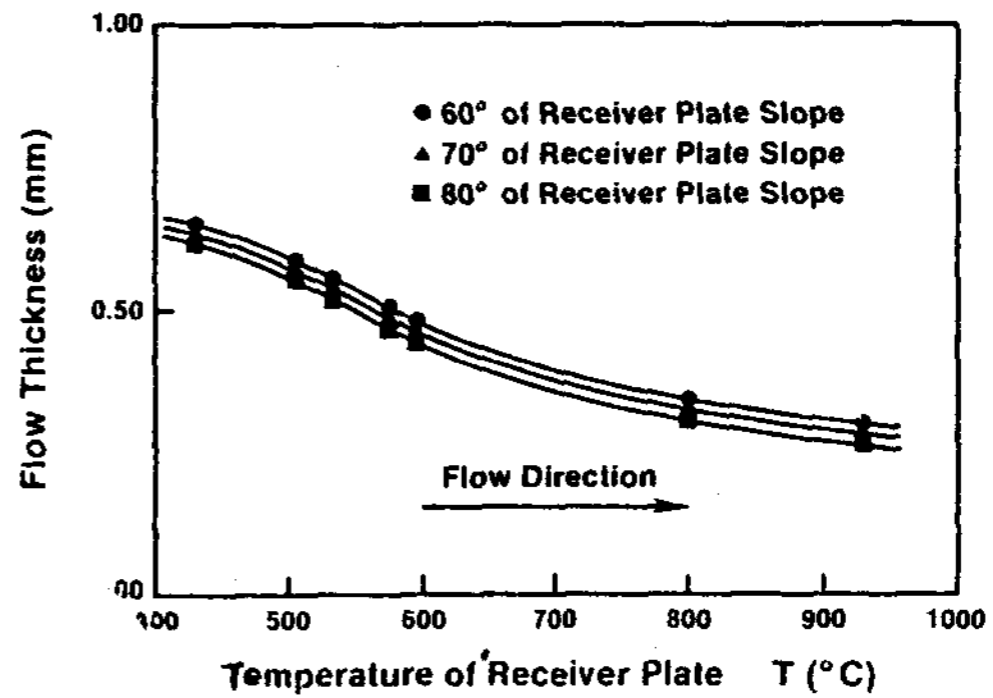


Fig 8. Fluid Thickness Flowing on Receiver Plate at 1/10 of Maximum Insolation

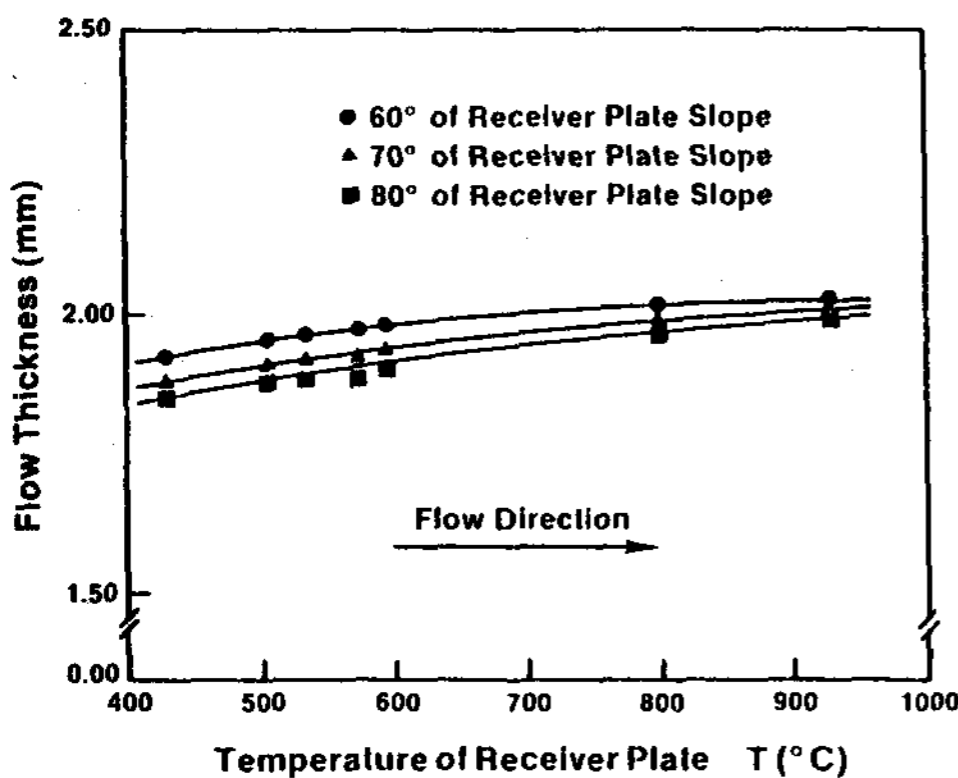


Fig 6. Fluid Thickness Flowing on Receiver Plate at Maximum Insolation

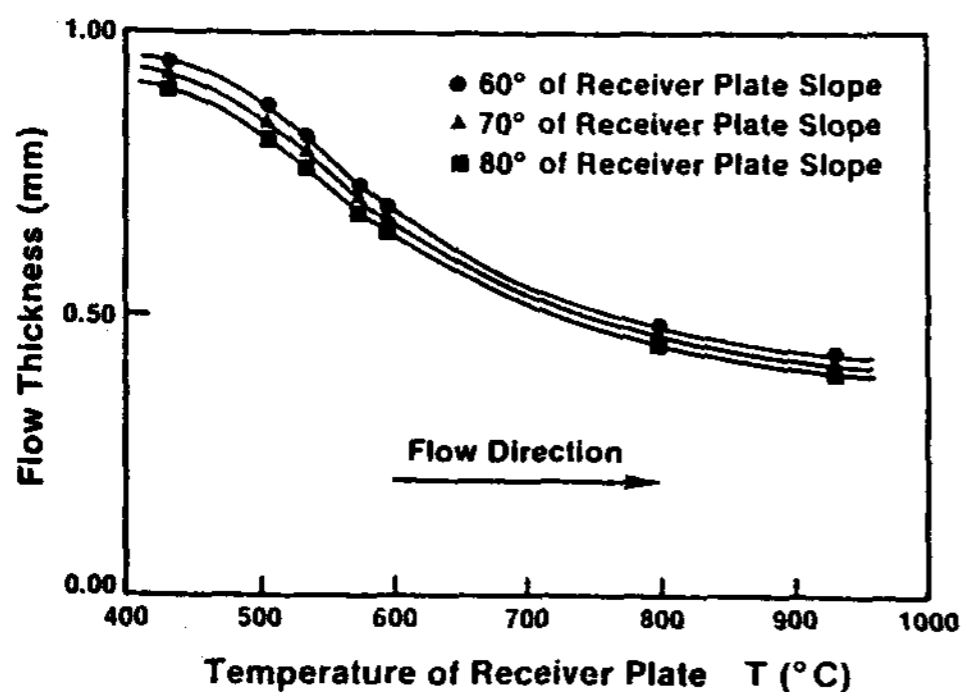


Fig 7. Fluid Thickness Flowing on Receiver Plate at 3/10 of Maximum Insolation

### 3. 檢 討

最大日射量을 받을 때는 Fluid thickness가 흘러내려갈수록 두꺼워지는 現象은 3/10 및 1/10 最大日射量때와는 反對現象이라는 點, 卽 3/10 및 1/10 最大日射量때는 作動流體가 흘러내려 갈수록 thickness가 얇아지나 最大日射量때는 흘러내려 갈수록 thickness가 두꺼워지는 理由는 다음에 起因된다.

最大日射量인 境遇는 亂流가 되며 受熱板上을 흘러내려감에 따라 溫度가 上昇하며 溫度가 上昇하면 本 Molten Salt의 粘度는 減少하게 되고 이 粘度의 減少率은 密度의 減少率보다 크다. 따라서 流速은 減少하여야 되며 流速이 減少하면 連續의 原理에 따라서 Fluid thickness는 增加하게 된다. ( $Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{4\rho V t}{\mu}$ ,  $Q = 10$

$$\times V \cdot t, Vt = \frac{Q}{10} = \frac{\dot{m}}{10 \cdot 9}, \text{ 그리고 } Re = \frac{4\rho Q}{10\mu}$$

한편 層流인 3/10 및 1/10의 日射量인 境遇도 溫度上昇에 따라서 粘度가 密度보다 더 減少率이 크지만 流動率이 亂流때 보다 낮아서 粘度나 密度의 減少率을 고려하기보다 溫度가 上昇하면 重力에 依하여 加速됨이 더 重要하다. 重力에 依하여 加速되니까 역시 連續의 原理에 따라 Fluid thickness가 減少하게 된다.

Table 2는 Fluid Thickness의 曲線을 나타내는 方程式인데 이는 Data에 의거한 Curve

fitting에 의하여 求한 係數들이다.

Table 2 : Constants of Equation,  $t = \alpha_1 x^2 + \beta_1 x + \gamma_1$

Insolation	Flow Rate (kg/sec)	Reynolds No. (Re)	Slope (°)	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\gamma_1$	Remark
Max.	58.8983	3926	60	0.001252	0.003958	1.9297	
			70	0.001222	0.003867	1.8830	
			80	0.001205	0.003806	1.8567	
3/10	17.6695	1192	60	-0.0006016	-0.04629	0.9417	
			70	-0.0005854	-0.04505	0.9165	
			80	-0.0003754	-0.04636	0.9022	
1/10	5.8898	393	60	-0.0004154	-0.03196	0.6503	
			70	-0.0004044	-0.031102	0.6328	
			80	-0.000398	-0.03062	0.6230	

V. 中型 Model 受熱板上의 理論流動特性

理하면 :

1 m × 1 m 넓이의 受熱板 Model 上을 常溫(20 °C)의 물이 흐를 때를 고려하여 fluid thickness를 Computer를 利用하여 計算하였다.

우선 相似性問題에 있어서, 여기서는 重力의 힘의 영향보다 粘性力의 영향이 더 意味가 깊기 때문에 prototype와 Model 사이에 Reynolds 數가 같음을 取하였다. 卽 Model의 Reynolds 數 = Prototype의 Reynolds 數

$$Re_{model} = Re_{prototype}, \text{ 즉 } \left( \frac{\rho V D_h}{\mu} \right)_{model} = \left( \frac{\rho V D_h}{\mu} \right)_{prototype} \text{ 또는 } \frac{V_m}{V} = \frac{D_h}{D_{hm}} \frac{\mu_m}{\mu} \frac{\rho}{\rho_m}$$

여기서 關係되는 것은 全流動率이며  $Q_m$ 를 얻기 爲해서 兩項에  $\frac{A_m}{A}$ 를 곱하고 整理하면 다음과 같다.

$$\frac{A_m}{A} \frac{V_m}{V} = \frac{A_m}{A} \frac{D_h}{D_{hm}} \frac{\mu_m}{\mu} \frac{\rho}{\rho_m}, \quad \frac{Q_m}{Q} = \frac{A_m}{A} \frac{D_h}{D_{hm}} \frac{\mu_m}{\mu} \frac{\rho}{\rho_m} \dots \dots \dots (10)$$

여기서  $\frac{Q_m}{Q}$ 는 願했던 排出流量率이며

$$\frac{A_m}{A} = Dr^2 = \left( \frac{D_{hm}}{D_h} \right)^2 \text{ 이니까 (10)式을 整}$$

$$Q_m = Q \frac{D_{hm}}{D_h} \frac{\mu_m}{\mu} \frac{\rho}{\rho_m} \dots \dots \dots (11)$$

$$\text{이 條件에서는 } Q_m = 0.035 Q \dots \dots \dots (12)$$

따라서 計算結果는 다음과 같다.

$$\text{最大日射量때 : } Q_m = 0.994 \times 10^{-3} \left( \frac{m^3}{sec} \right),$$

$$\dot{m}_m = 0.994 \text{ (kg/sec)}$$

$$3/10 \text{ 日射量때 : } Q_m = 0.2983 \times 10^{-3} \left( \frac{m^3}{sec} \right),$$

$$\dot{m}_m = 0.2983 \text{ (kg/sec)}$$

$$1/10 \text{ 日射量때 : } Q_m = 0.0994 \times 10^{-3} \left( \frac{m^3}{sec} \right),$$

$$\dot{m}_m = 0.0994 \text{ (kg/sec)}$$

위의 Flowrate로 前章과 같은 方法으로 t를 計算하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 一定 Slope에서는 t는 一定함을 알 수 있는데 이는 常溫의 물로서 密度와 粘度가 一定하게 유지되는데 그 理由가 있다 (부록 2 참조)



**Table.3. Change of Flow Thickness for Medium Model Plate**

$H_2O: 20^\circ C, \rho_m = 998.5599(kg/m^3)$   
 $\mu_m = 0.001(\frac{kg}{m \cdot sec}) = 1 \text{ C.P.}$

Insolation	Flow Rate (kg/sec)	Slope (°)	Flow Thickness(mm)	Change from Top to Low
Max.	0.994	60	0.26260	No(same thickness)
		65	0.25904	"
		70	0.25624	"
		75	0.25413	"
		80	0.25266	"
3/10	0.2983	85	0.25180	"
		60	0.21942	"
		65	0.21612	"
		70	0.21353	"
		75	0.21158	"
1/10	0.0994	80	0.21022	"
		85	0.20941	"
		60	0.15212	"
		65	0.14983	"
		70	0.14804	"
		75	0.14668	"
		80	0.14574	"
		85	0.14518	"

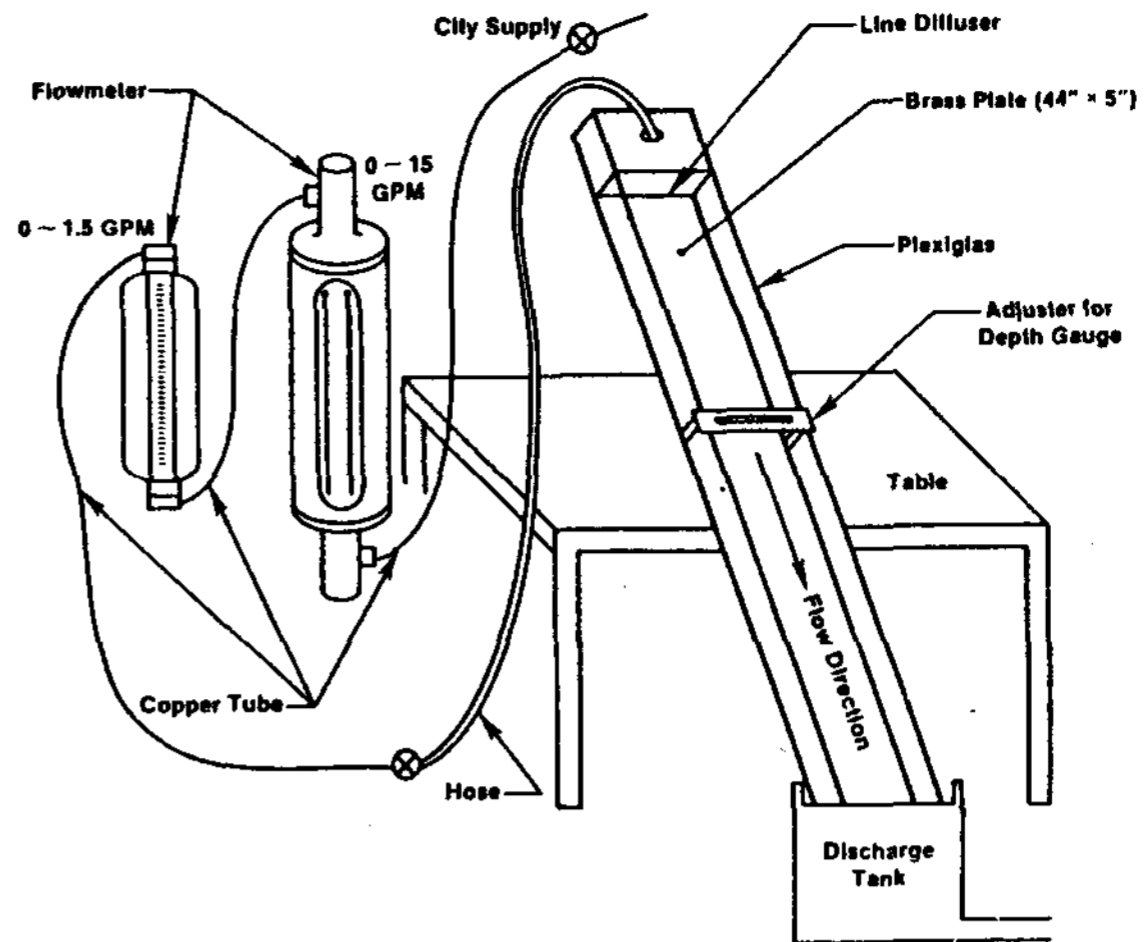


Fig 9. Skeleton of Experimental Apparatus

本 小型 Model 實驗에서 前章의 中型 Model 에 서와 같이 重力은 無視하고 粘性力만을 고려한 相似性에 依하여 Reynolds 數를 같도록 取하여 整理한 結果, 다음과 같은 關係가 있다.

小型 Model 에서의 流量 ( $m^3/sec$ ) = 0.0044  
 Prototype 流量 ( $m^3/sec$ ), 따라서 各 日射量에 對한 質量流量은 다음과 같고 Flowmeter를 利用, 流量調節해가면서 t를 測定했다.

最大日射量時 : 質量流量 = 0.12496(kg/sec)

3/10 日射量時 : 質量流量 = 0.037488(kg/sec)

1/10 日射量時 : 質量流量 = 0.012496(kg/sec)

**VI. 小型 Model 受熱板上의 流動特性實驗**

**1. 實驗裝置와 節次**

本實驗에 使用된 小型 Model 受熱板은 5" x 44" ( $\approx 12.7 \text{ cm} \times 111.76 \text{ cm}$ )이고 그림 9에 보인 바와 같이 설치하여 實驗하였다. Flow thickness를 測定하는데 使用된 Depth gauge 는 Mitutoyo製의 4" Digit Depth Micrometer (2 1/2" Base)이였고 作動流體는 常溫 ( $\approx 20^\circ C$ )의 市供給清水를 利用하였다. 그리고 Flowmeter(0~1.5GPM, 0~15GPM)는 F&P社製로서 Calibration하여 使用하였다.

**2. 實驗結果**

Table 4는 本 實驗의 結果이다. 여기서 最大 日射量 (流量 = 0.12496 kg/sec), 3/10 日射量 (流量 = 0.037488kg/sec)와 1/10 日射量(流量 = 0.012496kg/sec)에 關한 값들을 超過하여 流量 = 0.50, 0.40 및 0.25(kg/sec) 등에 關한 값들도 表示되어 있는데 이는 Flow meter 의 限界까지 流量을 供給한 結果의 資料로 全般的인 傾向을 調査하기 爲함이었다.

그림 10에서 그림 15까지는 Table 4를 圖示한 것이다. 이 그림에서도 그림 10에서 그림 12까지는 위에서 言及한바와 같이 超過流量(0.50

Table 4. FLOW THICKNESS VS. FLOW RATES AND IT'S CHANGES

H<sub>2</sub>O : City Supply Fresh Water(20°C) for Model Test

Flow Rate (kg/sec)	Reynolds No Re	Plate Slope (°)	Flow Thickness (mm)			Net Changes of Flow Thickness (mm) Top → Low	Remarks
			Top	Mid	Low		
0.50	15669.42	60	1.95510	1.15668	1.28478	- 0.67032	Over Test Range
		70	2.66022	1.65439	1.43866	- 1.22156	
		80	1.26153	1.25044	1.09050	- 0.17103	
0.40	12535.52	60	1.77972	0.87220	1.17150	- 0.60822	Over Test Range
		70	1.84593	1.58572	1.04377	- 0.80216	
		80	1.29455	1.17120	1.09957	- 0.19498	
0.25	7834.71	60	1.13680	1.19217	0.81232	- 0.32448	Over Test Range
		70	1.00584	1.04174	0.84870	- 0.15714	
		80	1.12607	0.92634	0.81788	- 0.30819	
0.12496 Max. insolation	3916.11	60	0.86719	0.50612	0.65327	- 0.21392	Test Range Compared with Prototype Test
		70	0.93617	0.67336	0.84522	- 0.09095	
		80	0.73510	0.54348	0.49276	- 0.24234	
0.037488 3/10 of Max. insolation	1186.09	60	0.54681	0.36872	0.28641	- 0.26040	Test Range Compared with Prototype Test
		70	0.49987	0.26518	0.32893	- 0.17094	
		80	0.50715	0.59402	0.32555	- 0.18160	
0.012496 1/10 of Max. insolation	406.15	60	0.66030	0.24631	0.20017	- 0.46013	Test Range Compared with Prototype Test
		70	0.39204	0.27432	0.23665	- 0.15539	
		80	0.36544	0.40065	0.37033	+ 0.00489	

kg/sec, 0.40kg/sec 및 0.25kg/sec)에 대한 자료들은 全般的인 傾向을 調査할 目的으로 圖示하였다. 따라서 그림 13에서 그림 15까지가 그

림 6에서 그림 8까지 各各 對應 比較되는 그림이다.

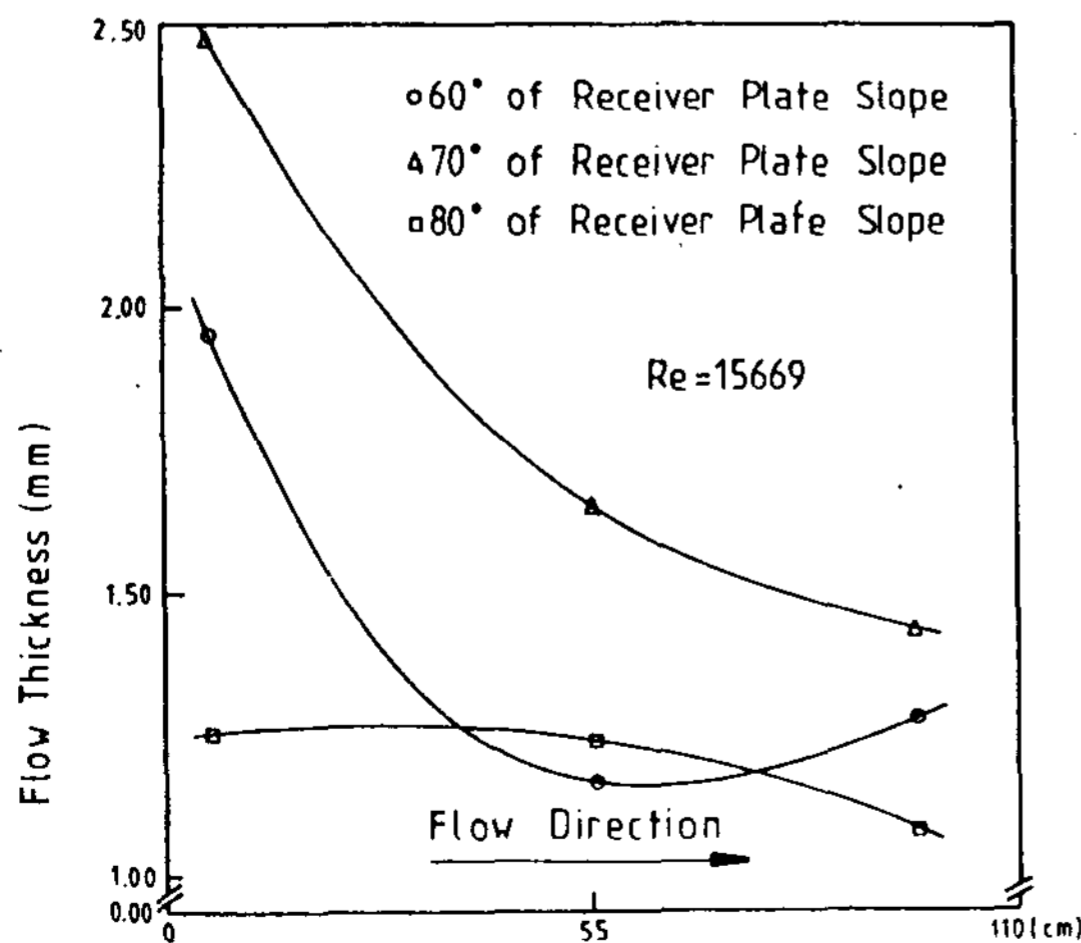


Fig10. Fluid Thickness on Model Receiver with 0.50kg/sec of Flow Rate

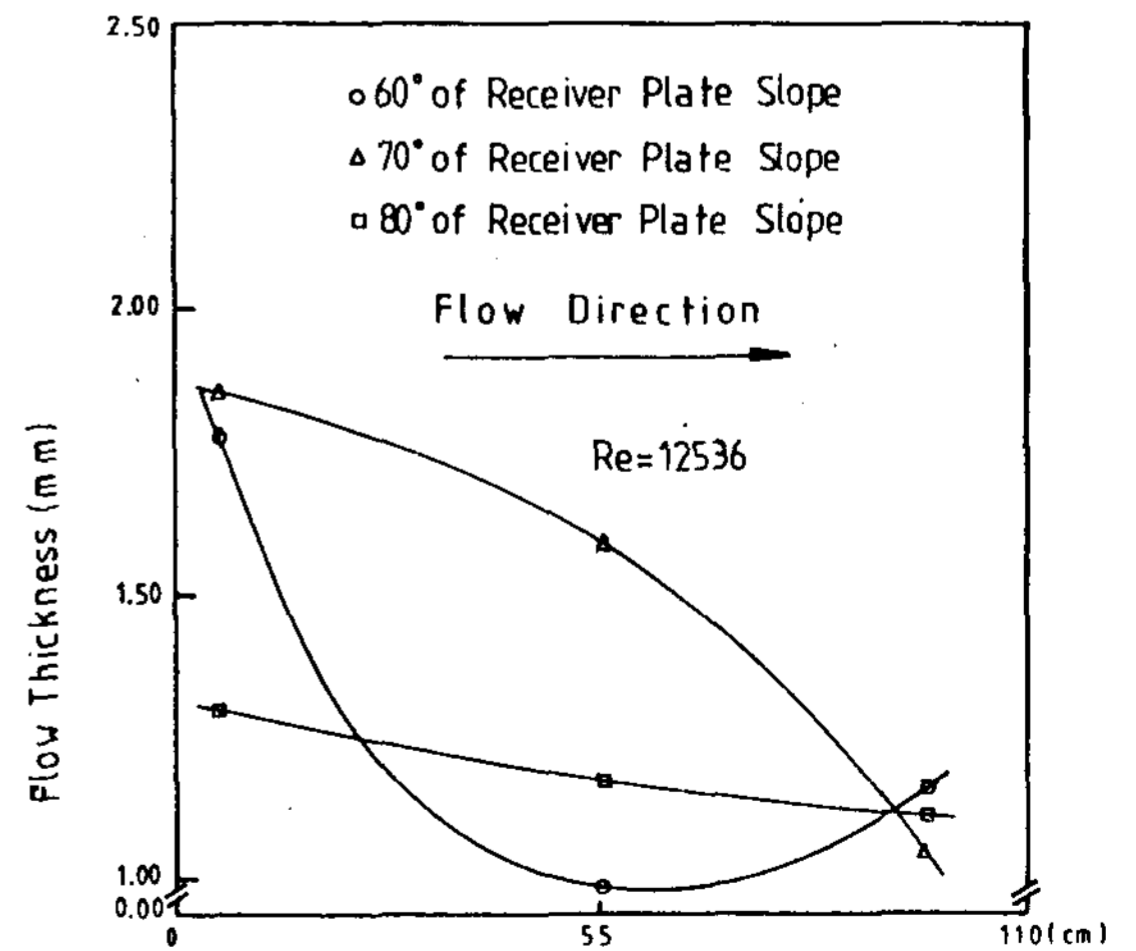


Fig11. Fluid Thickness on Model Receiver with 0.40kg/sec of Flow Rate

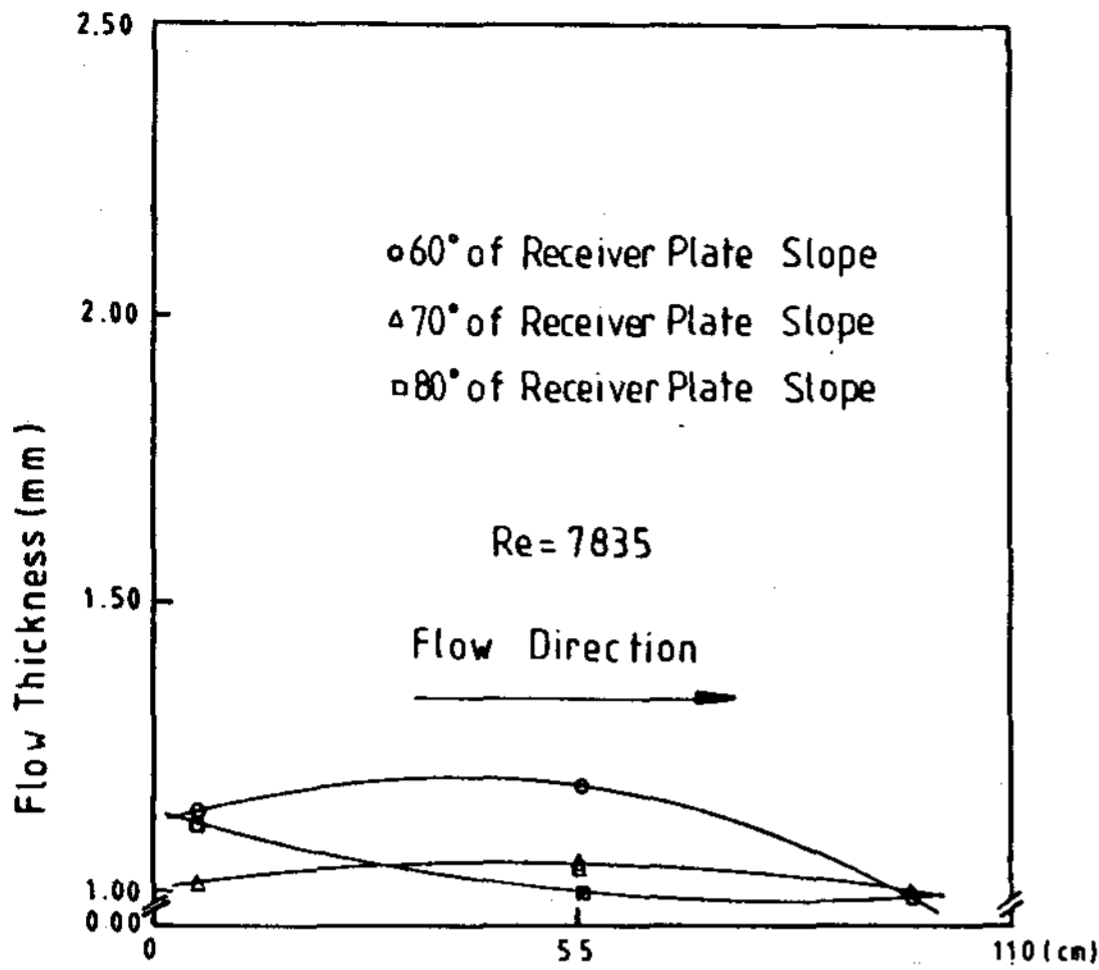


Fig12. Fluid Thickness on Model Receiver with 0.25kg/sec of Flow Rate

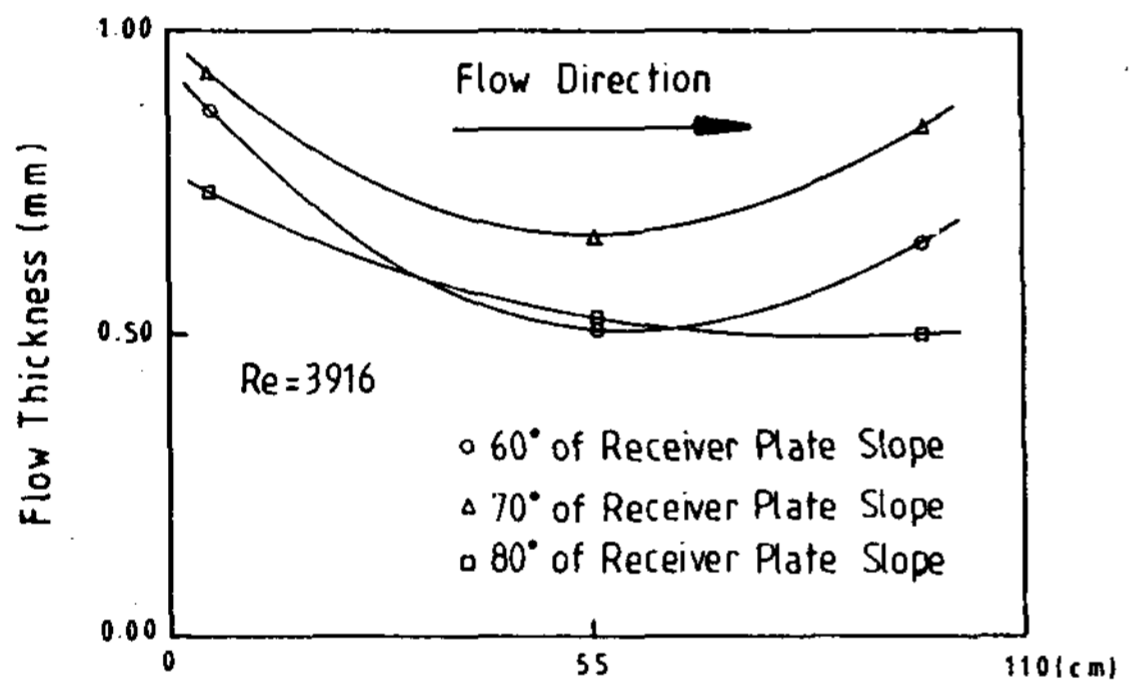


Fig13. Fluid Thickness on Model Receiver at Max. Insolation with 0.12496kg/sec of Flow Rate

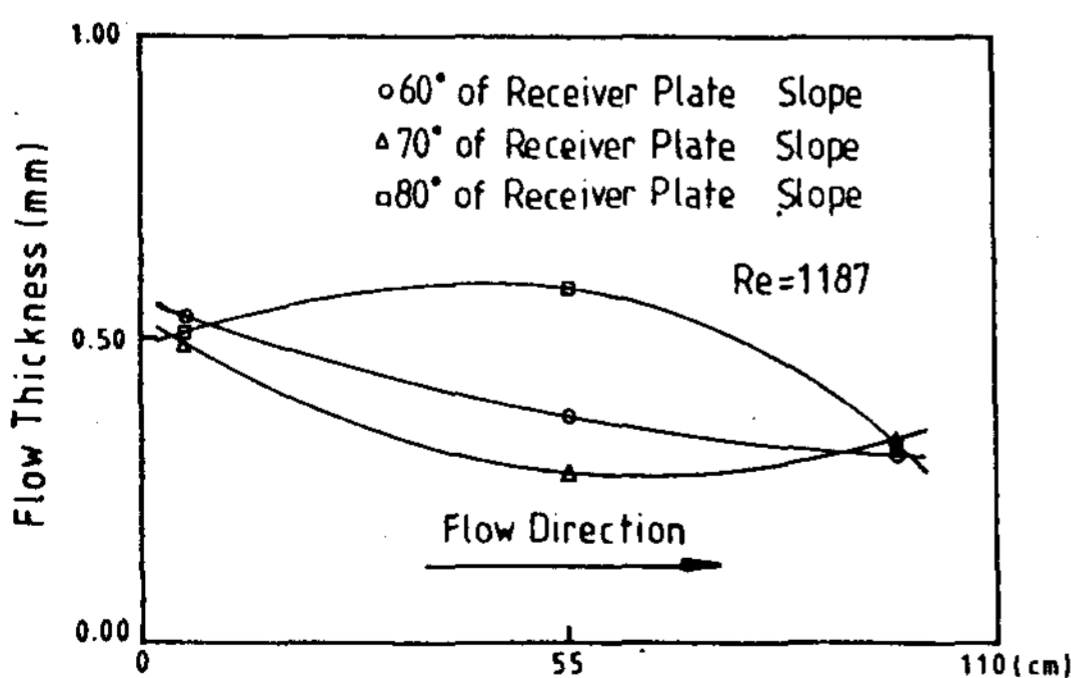


Fig14. Fluid Thickness on Model Receiver at 3/10 of Max. Insolation with 0.03748kg/sec of Flow Rate

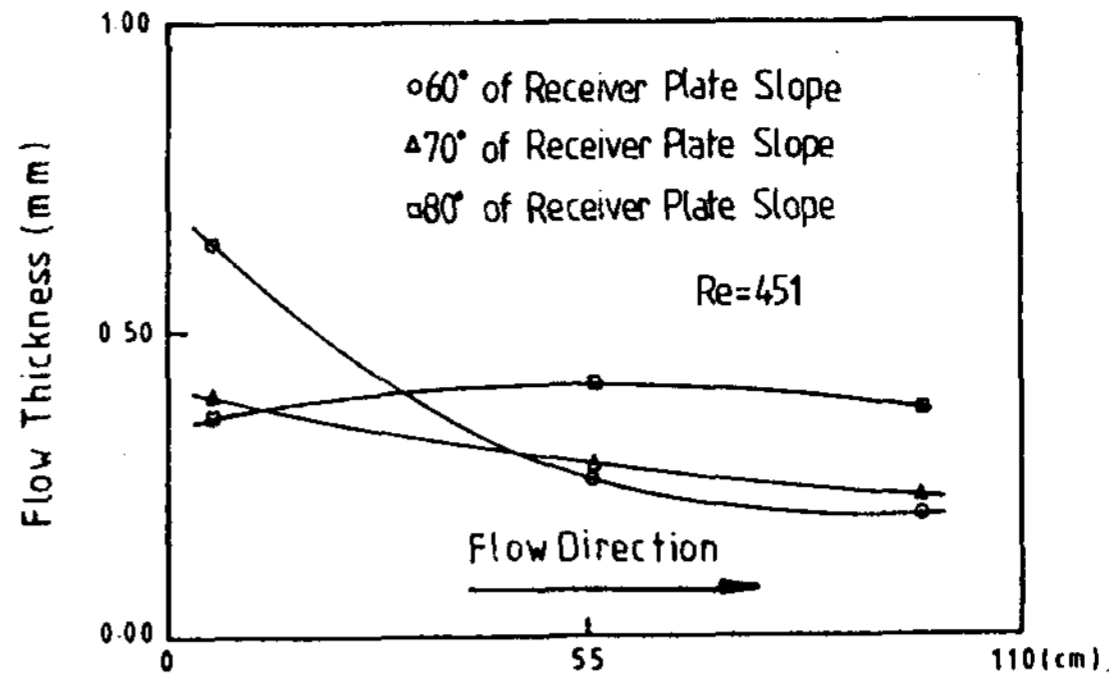


Fig15. Fluid Thickness on Model Receiver at 1/10 of Max. Insolation with 0.012496kg/sec of Flow Rate

### 3. 檢 討

그림 10에서 그림 15까지를 觀察하면 大概의 그림들이 凹型의 Flow pattern을 나타내고 있으나 몇 個의 凸型의 Flow pattern은 測定上의 착오라고 보아야 겠다. 따라서 凹型의 Flow pattern에 關하여만 檢討해 본다. 凹型의 Flow pattern에 對하여도 10%의 오차는 認定하여야 될 것이다.

우선 上端部의 fluid thickness가 下端部의 Fluid thickness보다도 두꺼운 事實은  $n = 0.010$ 로 取할 程度로 plate表面의 마찰저항이 거의 없는 狀態이니까 下流方向으로 흘러 내려 갈수록 重力의 영향으로 점점 加速되며 連續의 原理에 依하여 下部端에 내려 갈수록 加速되면 斷面積이 減少되게되니 Fluid thickness가 적어지는 非等流現象이 생기게 된 것이다.

그리고 Flow pattern이 凹型으로된 理由는 實際流體流動에서 流體粘性和 水路粘度에 依한 抵抗力이 있게 되며 運動이 느린 plate의 上端部에서는 抵抗力들이 작으나 重力의 運動方向의 分力들의 영향때문에 加速되기 때문이다.

即 運動方向의 結果的인 不平衡力이 加速과 非等流를 形成하기 때문이라 하겠다. 그리고 速度의 增加에 依하여 抵抗力들은 그들이 重力에 依한 힘들과 平衡을 이룰 때까지 增加한다. 이 힘의 平衡의 發生에 依하여 等速流動이 이루어지

며 이것은 流動斷面積의 不變 卽 一定한 Fluid thickness를 갖게 된다. 그러나 이러한 等流의 區域은 그렇게 긴 區域이 될 수 없고 어느 程度가 지나게되면(中央部) 이러한 平衡條件이 깨지게 되며 흐름은 다시 變流의 狀態로 전환된다.

卽 plate의 下端部를 向하여 壓力과 重力은 다시 抵抗力들 보다 더 크게 되고 非等流가 다시 생긴다(加速되어 Fluid thickness가 작은 結果)

Table 5: THEORETICAL FLOW THICKNESS ON SMALL SIZE MODEL PLATE

\* Normal City Supply Fresh Water 20 °C

Insolation	Flow Rate (kg/sec)	Reynolds No (Re)	Plate Slope (°)	Fluid Thickness (mm)	Remarks
Max.	0.12496	3920	60	1.1662	Constant thickness
			70	1.1379	
			80	1.1220	
3/10	0.037488	1180	60	0.5191	Constant thickness
			70	0.5059	
			80	0.4984	
1/10	0.012496	400	60	0.3271	Constant thickness
			70	0.3183	
			80	0.3133	

Table 5는 本 小型實驗裝置의 境遇에서 理論 計算結果를 나타낸 것이다. 表에서 보인 바와 같이 slope가 一定한 境遇에는 Fluid thickness가 一定하게 됨을 알 수 있으며 이는 中型

Model 受熱板上의 理論流動特性和 同一한 結果이다. 그리고 日射量이 적을수록 Fluid thickness가 적은 結果도 確認할 수 있다.

Table 6: Constants of Equation,  $t_1 = \alpha_2 x^2 + \beta_2 x + \gamma_2$  and  $K_r$  Values

Insolation	Flow Rate (kg/sec)	Reynolds No.	Slope (°)	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\gamma_2$	$K_r$
Max.	0.12496	3920	60	0.8103	-1.0985	0.8672	0.50
			70	0.6930	-0.8574	0.9362	
			80	0.2246	-0.4580	0.7351	
3/10	0.037488	1180	60	0.1527	-0.4035	0.5468	0.62
			70	0.4758	-0.6856	0.4999	
			80	-0.5665	0.4724	0.5072	
1/10	0.012496	400	60	0.5865	-1.0677	0.6603	0.92
			70	0.1276	-0.2817	0.3920	
			80	-0.1045	0.1214	0.3654	

Table 6은 두가지를 나타내고 있는데 첫째는 Table 4 혹은 그림 13에서 그림 15까지의 FI-

uid thickness의 曲線을 나타내는 方程式이다. 卽 實驗 data에 의거한 Curve fitting에 依

하여 係數들을 求한 結果이다.

그리고  $K_r$  (Experimental thickness/Theoretical thickness)은 流體흐름의 edge effect 또는 starting condition의 영향을 벗어난 區間 即 uniform depth 領域에서의 實驗的 Fluid thickness를 基準으로 하여 理論 Fluid thickness와 比較한 것이다. 表의  $K_r$  값은 보는 바와 같이 日射量이 많을수록 實驗 Thickness가 理論 Thickness에 比하여 적음을 알 수 있다. 即 여기서 最大日射量의 境遇는 實驗 Thickness는 理論 Thickness의 1/2이 되고 1/10 日射量의 境遇는 實驗值나 理論值가 비슷함을 알 수 있다.

## VII. 比較分析

Molten Salts를 利用한 Prototype 受熱板上의 理論流動特性和 小型 Model 板上의 實驗流動 特性을 比較한다.

우선 그림 6에서 그림 8까지에서 나타난 것과 같이 Molten Salts의 高溫에서 流動은 理論的이기는 하지만 比較的 合理性있는 特性을 나타낸다고 하겠다. 한편 그림 10에서 그림 15까지의 流動特性은 凸型和 凹型으로 나타나 있는데 이미 言及한 바와 같이 凸型の 流動樣狀은 測定上的 착오라고 보고 凹型的 流動特性만 取하였다. 그러나 凸型的 流動樣狀을 測定착오라고 관주하는 以外에도 그와 같은 可能性을 全히 排除할 수는 없다. 即 Flow Thickness가 매우 얇으므로 Froude Number의 영향은 決定的인 要素라고 볼수 없으나 實驗 Data가 分散(凸型和 凹型으로)되어 있을 때 上限値와 下限値값들을 決定할 수 있다. 여기서는 凹型特性은 初期條件에서 實際流動 깊이가 理論的인 Uniform depth보다 훨씬 큰 경우( $F \gg 1$ )이고 凸型特性은 初期條件에서 實際流動 깊이가 理論的 Uniform depth보다 적은 경우에 해당된다고 볼 수 있다. 이는 實驗水의 不安定한 供給

때문에 發生되었다고 볼 수 있다.

한편 Table 2의 常數값들과 Table 6의 常數값들을 對應하여 比較해 가면서 그림들을 比較해 본다. 첫째 最大日射量인 그림 6과 그림 13을 比較하면 절편( $\gamma_1$ 과  $\gamma_2$ )은 Molten Salts의 경우가 물을 利用한 實驗의 경우 보다 約 2倍程度가 되고 그外는 凸凹조차 서로 다르다. 그러나 Plate의 傾斜가  $80^\circ$ 인 경우가 Flow Thickness가 第一 적은 것은 同一하다. 두번째의 3/10 日射量의 경우인 그림 7과 그림 14에서 凹型的 流動狀態는 비슷하고 그림 14의 凸型은 착오라고 본다. 여기서도 절편은 Molten Salt의 경우가 實驗물流動의 경우보다 約 2倍가 된다. 그리고 1/10 日射量인 그림 8과 그림 15를 比較하면 여기에서도 역시 절편은 Molten Salts의 경우가 물을 利用한 model 實驗때 보다 2倍가 크다. 여기서도 凹型流動은 비슷하다고 하겠다.

## VIII. 結 論

太陽Energy의 直接吸收式受熱에 使用될 10 m×10 m의 Prototype 板上(板傾斜:  $60^\circ \sim 85^\circ$ , 5 단계; 板上端部溫度:  $430^\circ\text{C}$ , 下端部溫度:  $950^\circ\text{C}$ )上을 高溫으로 흘러내리는 Molten Salts(Eutectic Mixture:  $\text{Li}_2\text{CO}_3 - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{KCO}_3$ ; Melting Point:  $397^\circ\text{C}$ )의 理論流動特性은 最大日射量(Flow Rate =  $58.898 \text{ kg/sec}$ )의 경우 Flow Thickness가 約  $1.9 \text{ mm}$ 前後에서 흘러 내려 갈수록 增加하여 板下端部에서는 約  $2.0 \text{ mm}$ 前後까지 되는 Flow thickness 增加現象을 보이며 微微하지만 凸型流動現象을 나타내는 反面 3/10 日射量(Flow rate:  $17.669 \text{ kg/sec}$ )의 경우 Flow Thickness는 上端部에서 約  $0.9 \text{ mm}$ 前後에서 흘러내려 갈수록 減少하여 下端部에서는 約  $0.4 \text{ mm}$ 前後로 되는 凹型流動現象을 나타내고 있다. 그리고 1/10 日射量(Flow rate:  $5.8898 \text{ kg/sec}$ )의 경우는 上端

部에서 Flow Thickness가 約 0.6 mm 前後에서 흘러 내려 갈수록 減少하여 下端部에서는 約 0.3 mm 前後의 Flow Thickness로 되며 前과 같이 凹型的 流動特性을 나타냈다.

한편 12.7 cm × 111.76 cm의 小型 Model 板上 (板傾斜 60° ~ 85°, 5 단계)에 常溫의 물을 흘러 내렸을 때를 實測한 結果, 最大日射量 (Flow Rate : 0.12496 kg/sec)인 경우 물의 두께는 約 0.8 mm 前後에서 흘러내려 下端部에서는 約 0.7 mm 前後가 되었다. 3/10 日射量 (Flow rate : 0.037488 kg/sec)의 경우는 上端部の 約 0.5 mm 前後의 물의 두께에서 下端部에서는 約 0.3

mm 前後의 두께로 되었다. 마지막으로 1/10 日射量 (Flow rate : 0.012496 kg/sec)의 경우는 上端部の 물의 두께는 約 0.4 mm가 흘러내려가서 下端部에서는 約 0.2 mm 前後의 두께로 減少했다. 그리고 물을 使用한 이 Model의 경우는 모두 凹型流動特性을 나타내고 있고 Curve fitting을 통한 流動 曲線方程式의 側面에서 보면 Molten Salts의 流動 曲線方程式의 절편은 小型 Model의 물의 流動方程式의 절편보다 約 2倍 程度 큰 값을 나타내고 있는 것은 全日射量을 通하여 비슷한 現象이다.

부록 I

```

10 DIM M(3), Rho(7), Mu(7)
20 M(1)=58.8983
30 M(2)=1.78895
40 M(3)=.588983
50 Rho(1)=2130.3
60 Rho(2)=2088.4
70 Rho(3)=2072.1
80 Rho(4)=2050.4
90 Rho(5)=2039.5
100 Rho(6)=1929
110 Rho(7)=1858.3
120 Mu(1)=.006
130 Mu(2)=.004507
140 Mu(3)=.003494
150 Mu(4)=.002558
160 Mu(5)=.002213
170 Mu(6)=.0006889
180 Mu(7)=.0004013
190 DEG
200 FOR I=1 TO 3 STEP 1
210 Mdot=M(I)
220 FOR J=1 TO 7 STEP 1
230 Q=Mdot/Rho(J)
240 Tt=Q/10
250 Re=4*Rho(J)*Tt/Mu(J)
260 PRINT "Mdot", Mdot, "Q", Q, "Re", Re
270 FOR Phi=60 TO 85 STEP 5
280 IF I>1.5 THEN M2m3
290 Thick=(Q*.015/(14.9*SQR(SIN(Phi))))^.6
300 GOTO 320
310 M2m3: Thick=(Q*3*Mu(J)/Rho(J)/9.81/SIN(Phi))^(1/3)
320 PRINT "Phi", Phi, "Thick", Thick
330 NEXT Phi
340 NEXT J
350 NEXT I
360 END
Mdot 58.8983 Q 2.76478899685E-02
Re 3926.55333333
Phi 60 Thich 1.92966091488E-03
Phi 65 Thich 1.90352014090E-03
Phi 70 Thich 1.88297452713E-03
Phi 75 Thich 1.86748471724E-03
Phi 80 Thich 1.85667013677E-03
Phi 85 Thich 1.85027773147E-03
Mdot 58.8983 Q 2.82025952883E-02
Re 5227.27313069
Phi 60 Thich 1.95279767809E-03
Phi 65 Thich 1.92634347464E-03
Phi 70 Thich 1.90555151737E-03
Phi 75 Thich 1.88987598381E-03
Phi 80 Thich 1.87893173569E-03
Phi 85 Thich 1.87246268517E-03
Mdot 58.8983 Q .028424448627
Re 6742.79336005
Phi 60 Thich 1.96200014130E-03
Phi 65 Thich 1.93542127364E-03
Phi 70 Thich 1.91453133545E-03
Phi 75 Thich 1.89878193147E-03
Phi 80 Thich 1.88778610919E-03
Phi 85 Thich 1.88128657350E-03
Mdot 58.8983 Q 2.87252731174E-02
Re 9210.05473026

```

```

Phi 60 Thich 1.97443256249E-03
Phi 65 Thich 1.94768527498E-03
Phi 70 Thich 1.92666296562E-03
Phi 75 Thich 1.91081376386E-03
Phi 80 Thich 1.89974826545E-03
Phi 85 Thich 1.89320754472E-03
Mdot 58.8983 Q .028878793822
Re 10645.8743787
Phi 60 Thich 1.98075716218E-03
Phi 65 Thich 1.95392419647E-03
Phi 70 Thich 1.93203454726E-03
Phi 75 Thich 1.91693457673E-03
Phi 80 Thich 1.90583363267E-03
Phi 85 Thich 1.89927196047E-03
Mdot 58.8983 Q 3.05330741317E-02
Re 34198.4613151
Phi 60 Thich 2.04807626297E-03
Phi 65 Thich 2.02033133742E-03
Phi 70 Thich 1.99852492372E-03
Phi 75 Thich 1.98208456807E-03
Phi 80 Thich 1.97060634130E-03
Phi 85 Thich 1.96302166045E-03
Mdot 58.8983 Q 3.16947209815E-02
Re 58707.580623
Phi 60 Thich 2.09447877964E-03
Phi 65 Thich 2.06610524730E-03
Phi 70 Thich 2.04380477370E-03
Phi 75 Thich 2.02699193477E-03
Phi 80 Thich 2.01525365010E-03
Phi 85 Thich 2.00831525118E-03
Mdot 1.78895 Q 8.39764352439E-04
Re 119.263333333
Phi 60 Thich 9.41737457103E-04
Phi 65 Thich 9.27573112621E-04
Phi 70 Thich 9.16455642991E-04
Phi 75 Thich 9.08082826516E-04
Phi 80 Thich 9.02241713793E-04
Phi 85 Thich 8.98790858259E-04
Mdot 1.78895 Q 8.56612717870E-04
Re 158.770800976
Phi 60 Thich 8.67481061810E-04
Phi 65 Thich 8.54433581859E-04
Phi 70 Thich 8.44192729380E-04
Phi 75 Thich 8.36480113028E-04
Phi 80 Thich 8.31099574471E-04
Phi 85 Thich 8.27920820385E-04
Mdot 1.78895 Q 8.63351189614E-04
Re 204.802518603
Phi 60 Thich 8.01076083337E-04
Phi 65 Thich 7.89027377482E-04
Phi 70 Thich 7.79570454076E-04
Phi 75 Thich 7.72448232309E-04
Phi 80 Thich 7.67479569659E-04
Phi 85 Thich 7.64544146628E-04
Mdot 1.78895 Q 8.72488294967E-04
Re 323.352914596
Phi 60 Thich 6.95266446565E-04
Phi 65 Thich 6.84809186547E-04
Phi 70 Thich 6.76601374951E-04
Phi 75 Thich 6.70419887440E-04
Phi 80 Thich 6.66107507529E-04
Phi 85 Thich 6.63559807994E-04

```

Mdot	1.78895	Q	9.27397615345E-04
Re	1038.72840761		
Phi	60	Thich	4.89031892168E-04
Phi	65	Thich	4.81676534145E-04
Phi	70	Thich	4.75903378191E-04
Phi	75	Thich	4.71535484560E-04
Phi	80	Thich	4.68522271438E-04
Phi	85	Thich	4.66730287491E-04
Mdot	1.78895	Q	9.62680944950E-04
Re	1783.15474707		
Phi	60	Thich	4.18715567627E-04
Phi	65	Thich	4.12417812877E-04
Phi	70	Thich	4.07474768459E-04
Phi	75	Thich	4.03752036483E-04
Phi	80	Thich	4.01154959348E-04
Phi	85	Thich	3.99620638996E-04
Mdot	.588983	Q	2.76478899685E-04
Re	39.2655333333		
Phi	60	Thich	6.50276456306E-04
Phi	65	Thich	6.40495875010E-04
Phi	70	Thich	6.32819182620E-04
Phi	75	Thich	6.27037692911E-04
Phi	80	Thich	6.23004362762E-04
Phi	85	Thich	6.20621522313E-04
Mdot	.588983	Q	2.82025952803E-04
Re	52.2727313069		
Phi	60	Thich	5.99001883709E-04
Phi	65	Thich	5.89992505407E-04
Phi	70	Thich	5.82921123432E-04
Phi	75	Thich	5.77595506653E-04
Phi	80	Thich	5.73880206263E-04
Phi	85	Thich	5.71685253779E-04
Mdot	.588983	Q	2.84244486270E-04
Re	67.4279336005		
Phi	60	Thich	5.53148770658E-04
Phi	65	Thich	5.44829053006E-04
Phi	70	Thich	5.38298979696E-04
Phi	75	Thich	5.33381034581E-04
Phi	80	Thich	5.29950137442E-04
Phi	85	Thich	5.27923206814E-04
Mdot	.588983	Q	2.87252731174E-04
Re	92.1005473026		
Phi	60	Thich	5.02052626073E-04
Phi	65	Thich	4.94501427711E-04
Phi	70	Thich	4.88574558403E-04
Phi	75	Thich	4.84110899824E-04
Phi	80	Thich	4.80996925774E-04
Phi	85	Thich	4.79157229318E-04
Mdot	.588983	Q	2.88787938220E-04
Re	106.458743787		
Phi	60	Thich	4.80086458962E-04
Phi	65	Thich	4.72865646043E-04
Phi	70	Thich	4.67198093382E-04
Phi	75	Thich	4.62929732002E-04
Phi	80	Thich	4.59952002778E-04
Phi	85	Thich	4.58192798037E-04
Mdot	.588983	Q	3.05330741317E-04
Re	341.984613151		
Phi	60	Thich	3.37880022666E-04
Phi	65	Thich	3.32601095279E-04
Phi	70	Thich	3.28614689756E-04
Phi	75	Thich	3.25612438073E-04
Phi	80	Thich	3.23517982708E-04
Phi	85	Thich	3.22280604964E-04
Mdot	.588983	Q	3.16947209815E-04
Re	587.07500623		
Phi	60	Thich	2.89126097157E-04
Phi	65	Thich	2.84777452393E-04
Phi	70	Thich	2.81364239329E-04
Phi	75	Thich	2.78793671774E-04
Phi	80	Thich	2.77000371402E-04
Phi	85	Thich	2.75940912220E-04

## 부록 II

```

JPOKE 1657,132
JPRINT CHR$(15)

LIST

10 HOME : VTAB 10: PRINT TAB( 5)"CALCULATION OF THICKNESS": PRINT : PRINT
20 PR# 1
30 POKE 1657,132
40 PR# 0
100 DIM M(3),PH(6),RP(6)
110 FOR I = 1 TO 3
120 READ M(I): NEXT I
130 INPUT "RHO=?":RH
140 PRINT : INPUT "MU=?":MU
150 PRINT : INPUT "COEF. OF Q=?":TC
155 GOSUB 1000
160 FOR I = 1 TO 6
170 PH(I) = 60 + 5 * (I - 1)
180 RP(I) = PH(I) * 3.1416 / 180
190 NEXT I
200 FOR J = 1 TO 3
210 MD = M(I)
220 FOR K = 1 TO 7
230 Q = MD / RH
240 TT = TC * Q
250 RE = 4 * RH * TT / MU
260 GOSUB 1100
270 GOSUB 1200
280 FOR L = 1 TO 6
290 IF I > 1.5 THEN 320
300 TH(K) = (Q * .015 / (14.9 * SQR ( SIN (RP(K)))) ) ^ .6
310 GOTO 330
320 TH(K) = (Q * 3 * MU / (RH * 9.81 * SIN (RP(K)))) ^ (1 / 3)
330 NEXT K
340 GOSUB 1300
350 NEXT J
360 NEXT I
370 END
1000 PR# 1: PRINT TAB( 8)"CALCULATION OF THICKNESS": PRINT : PRINT
1010 PRINT TAB( 15)"DATA": PRINT
1020 PRINT TAB( 5)"M(1)=";M(1); TAB( 3)"M(2)=";M(2); TAB( 3)"M(3)=";M(3); PRINT
1030 PRINT TAB( 5)"RHO=";RH; TAB( 3)"MU=";MU; TAB( 3)"TC=";TC; PRINT
1040 PRINT : PRINT : PRINT
1050 PR# 0: RETURN
1100 PR# 1
1110 PRINT TAB( 5)"MDOT=";MD; TAB( 5)"Q=";Q; TAB( 5)"RE=";RE; PRINT : PRINT
1120 PR# 0: RETURN
1200 PR# 1
1210 PRINT TAB( 5)"PHI="; TAB( 10)"THICKNESS": PRINT
1220 PR# 0: RETURN
1300 PR# 1
1310 FOR I = 1 TO 6
1320 PRINT TAB( 6)PH(I); TAB( 10)TH(I)
1330 NEXT I: PRINT : PRINT : PRINT
1340 PR# 0: RETURN
2000 DATA .594,.02983,.00994
    
```

## REFERENCES

1. Owen, W.M., "Laminar to Turbulent Flow in a Wide Open Channel," American Society of Civil Engineers, Vol, 79, No. 188, 1953, pp. 1-8.
2. Chisholm, P.S. and Tsang, G., "The Manning Equation and Boundary Resistance," Journal WPCF, Vol. 42, No. 5, Part 1, 1970, pp. 753-757.
3. Jayaraman, V.V., "Resistance Studies on Smooth Open Channel," Journal of the Hydraulic Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Hy5, 1970, pp. 1129-1141.

4. Berlamont, J., "Stability of Flow in an Open Channel with Right-Angle Corners," *Review C. Tijdschr, Civ Tech Genie Civ* Vol. 6, No. 9-10, 1974, pp. 263-272.
5. Wakhlu, O.N. "A Dimensionless Number for the Study of Open Channel Flow," *Proc. Instn. Civ. Engineers, Part 2*, 59, 1975, pp. 515-522.
6. Nabi, S.S., Jamil, M. and Shah, S.S., "Laminar Open Channel Flow," *Irrigation Power*, Vol. 32, No. 1, 1975, pp. 87-94.
7. Chiu, Chao-Lin, Lin, Hsin-Chi and Mizumura, K., "Simulation of Hydraulic Processes in Open Channels," *Journal of the Hydraulics Division*, 1970, Hy 2, pp. 185-205.
8. Sharp, J.J., "Approximation Errors in Open Channel Flow Computations," *Water Power Dam Construction*, 1977, pp. 34-38.
9. Kumar, A., "Integral Solutions of the Gradually Varied Equation for Rectangular and Triangular Channels," *Proc. Instn Civ. Engrs. Part 2*, 1978, 105, pp. 509-525.
10. Song, Charles C. and Yang, Chih T., "Velocity Profiles and Minimum Stream Power," *Journal of the Hydraulics Division*, Hy 8, 1979, pp. 981-998.
11. Bathurst, J.C., Li, Ruh-Ming and Simon, D.B., "Resistance Equation for Large-Scale Roughness," *Journal of the Hydraulics Division*, Hy 12, 1981, pp. 1593-1613.
12. Myers, W.R., "Flow Resistance in Wide Rectangular channels," *Journal of the Hydraulics Division*, Hy 4, 1982, pp. 471-482.
13. U.S. Dept. of Commerce/National Bureau of Standards "Physical Properties Data Compilations Relevant to Energy Storage," II. Molten Salts: Data on Single and Multi-Component Salts Systems. NSRDS-NBS 61, Part II.