

【論文】

小型實驗太陽연못에서 熱貯藏層의 두께에 관한
實驗的研究

Experimental Study on Thicknesss of Heat Storage
Zone in Small Solar Pond

朴 伊 東* 徐 志 源**
Pak, Ee Tong Seo, Ji Weon

ABSTRACT

This paper dealt with thickness variation of bottom heat sotrage zone due to salinity and flow rate of extration hot brine in small test solar pond (0.5m wide, 0.5m high, 1.0m long).

Testing apparatus and situation were follows: 7.1cm of height of suction diffuser and 1.8cm of height of discharge diffuser above the test pond respectively, 0.3cm of slot size of suction diffuser, 1.0cm of slot size of discharge diffuser, 47cm of length of the slot; heating of hot water (75°C) through separated hot water tank, discharge of the brine into storage zone through discharge diffuser, the extration of the brine through suction diffuser, circulation of the extracted brine through a heat exchanger (cooler).

Following results were obtained through the experiments.

1. In small test solar pond, the typical three zone which showed up in real solar pond were established.
2. Richardson Number was used more effectively to confirm hydrodynamic stability of the stratified flow.
3. The thickness of nonconvective layer had a great effect on the heat storage of the bottom convective layer, then the temperature of bottom convective layer had a relation to that of upper convective layer.
4. Optimum operating condition in the test pond was on 10%-15% of salt concentration and 0.05m³/hr of flow rate of extraction hot brine.
5. Following thickness of 3 zones were available to obtain under optimum operation condition:
 - o bottom storage zone : 30% ± 10% of total pond depth
 - o non-convective zone : 40% ± 10% of total pond depth
 - o Upper surface zone : 20% ± 10% of total pond depth

* 正會員：成均館大學校

** 正會員：三星精密(株)，第一研究所

I. 序 論

Solar Ponds 에서 可能한 限 많은 에너지를 얻기 爲해서는 下部底層 即 貯藏層의 두께가 커야한다. 그런데 貯藏層의 두께를 크게 維持하면 相對적으로 中間의 非對流層의 두께가 작아져 熱損失이 커지고, 下部貯藏層의 두께를 작게하면 貯藏되는 熱의 量이 적어져 效率이 떨어지게 된다. 따라서 여러 Parameters 에 對해 最適의 貯藏層의 두께를 찾을 必要가 있다.

이 下部貯藏層과 中間非對流層과는 中間境界面 (interface) 으로 成層을 形成하고 있는데 이 境界面이 安定되어야 한다. 萬一 不安定하다면 貯藏層에서 維持되는 hot brine 이 周圍의 brine 에 교란을 이끄는 結果이고 熱交換器에서 役割을 다하고 貯藏層으로 注入되는 cold brine 과 周圍 brine 과의 현저한 혼합이 일어나므로 流體의 浮力이 增加하여 成層할 수가 없게 된다.

Solar Ponds 에 對한 研究는 自然的으로 形成된 Salty Lakes 의 바닥에서의 水溫이 表面의 水溫보다 훨씬 높았으며 垂直적으로 鹽分이 不均一하게 分布되었다는 事實의 發見에서 始作되었다. 이처럼 自然的으로 이루어진 鹽度勾配 (Salinity gradient) 때문에 密度勾配가 생겨 열팽창의 效果를 상쇄하므로 對流를 방해하게 된다는 事實을 Kalesinsky¹⁾ 가 1902 年에 처음으로 發表하였다. Miles²⁾ 는 成層流動의 不安定을 研究하여 Richardson 數가 1/4 보다 크면 그 流動은 安定됨을 밝혔다. Weinberger³⁾ 는 勾配區域에서의 鹽度 分布에 關한 時間과 豫測을 얻었고 内部 熱生成에 關한 一次元的 model 을 發展시켰다. Turner⁴⁾ 는 下部로부터 加熱될 때 中間境界面에서의 流入量에 對하여 研究하였으며, 流體의 密度差로 因한 浮力の 效果가 成層媒質 사이의 中間境界面の 安定에 미치는 影響을 測定하기 爲한 變數들을

研究한바 있다. Nielson⁵⁾ 은 full-scale ponds 에서 實驗을 통하여 Solar Ponds 가 난방에도 使用될 수 있음을 確認하였다.

한편 下部貯藏層의 깊이에 關하여 Zangrando⁶⁾ 는 2.5 m 깊이의 full-scale solar pond 에서 1.2 m 의 貯藏層의 두께를 얻었고 Poplawsky⁷⁾ 등은 71.1 cm 의 實驗 Solar Pond 에서 41.0 cm 의 貯藏層의 두께를 얻었다. 그리고 Atkinson⁸⁾ 등은 3 m 깊이의 pond model 實驗에서 1.5 m 의 貯藏層의 깊이를 얻었고 Schell⁹⁾ 등은 58 cm 의 작은 pond 에서 13 cm 의 貯藏層의 두께를 얻은바 있다. 最近 朴伊東¹⁰⁾ 은 2 m 깊이의 中型實驗 pond 에서 95.5 cm 의 貯藏層의 두께를 얻었다.

Solar Ponds 로서의 役割을 하기 爲해서는 下部 熱貯藏層의 適當한 두께가 維持되어야 하고 또한 hot brine 의 推出時 成層 非對流層이 교란됨이 없이 安定되어야 한다. 여기서는 폭 0.5 m, 높이 0.5 m, 길이 1.0 m 의 小型 實驗 pond 를 利用하여 可能한 熱貯藏의 두께를 合理化하여 推出되는 hot brine 의 熱容量을 決定하는데 도움을 주고져 했다. 附加해서 中間 境界面이 安定될 때 下部 熱貯藏層의 最適 濃도와 最適流量을 求하였다.

II. 實驗裝置와 實驗節次

2-1 實驗裝置

實驗裝置는 Fig.1 에서 보이는 바와 같이 폭 0.5 m, 높이 0.5 m, 길이 1.0 m 의 直六面體로 構成되어 있으며 두께 8 mm 의 안정강화 유리로 製作하였다. 水槽 밑面은 SUS 304 의 Stainless 板을 使用하여 75℃ 의 高溫의 물이 순환하도록하였고 水槽壁과 下部 加熱部에 5 mm 의 스티로폴로 철저히 斷熱處理하여 熱損失을 最大限 줄였다.

溫水의 순환은 出力 1/18hp pump 을 利用

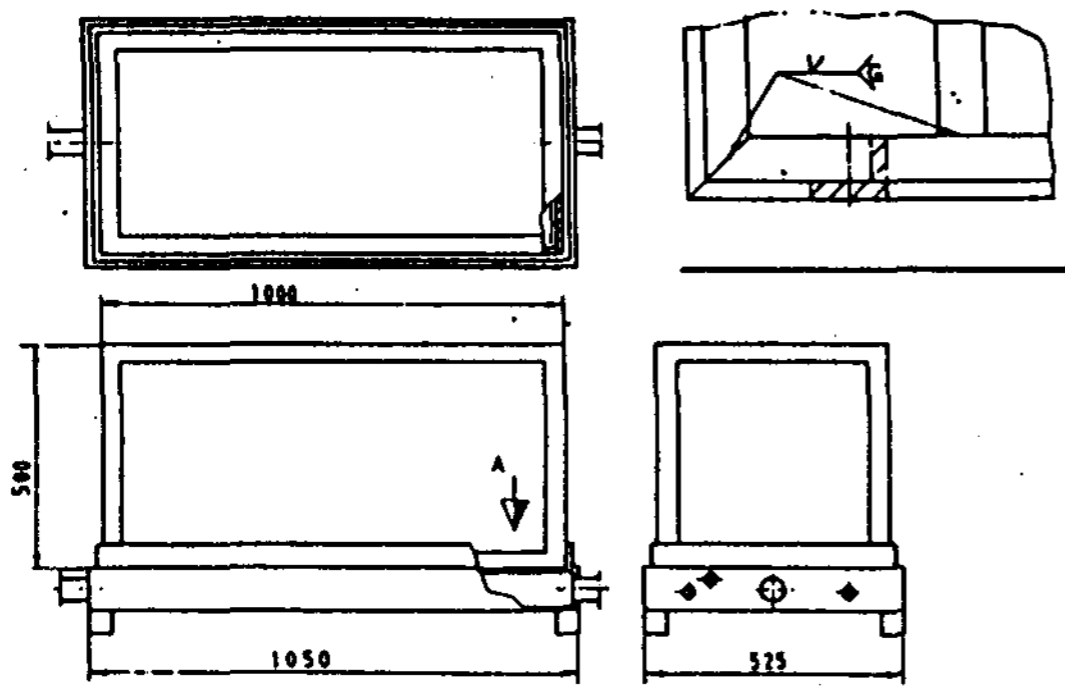


Fig. 1 Schematic diagram of test pond and heating panel

하여 75°C의 물을 순환시켜 實驗水槽를 加熱하였다.

Diffuser의 slot는 line sink의 경우 3mm, line source의 경우 1.0mm가 되도록 하여 두 平板 6.5 × 47.0 cm 사이의 두 distribution pipe로 부터 manifold를 통하여 brine을 水槽內로 注入, 水槽內에서 推出할 수 있도록 하였다. Diffuser의 位置는 suction의 경우는 水槽 底面에서 7.1 cm, discharge의 경우는 水槽 底面으로 부터 1.8cm로 固定시켰다. Fig. 2는 line diffuser의 상세도이다.

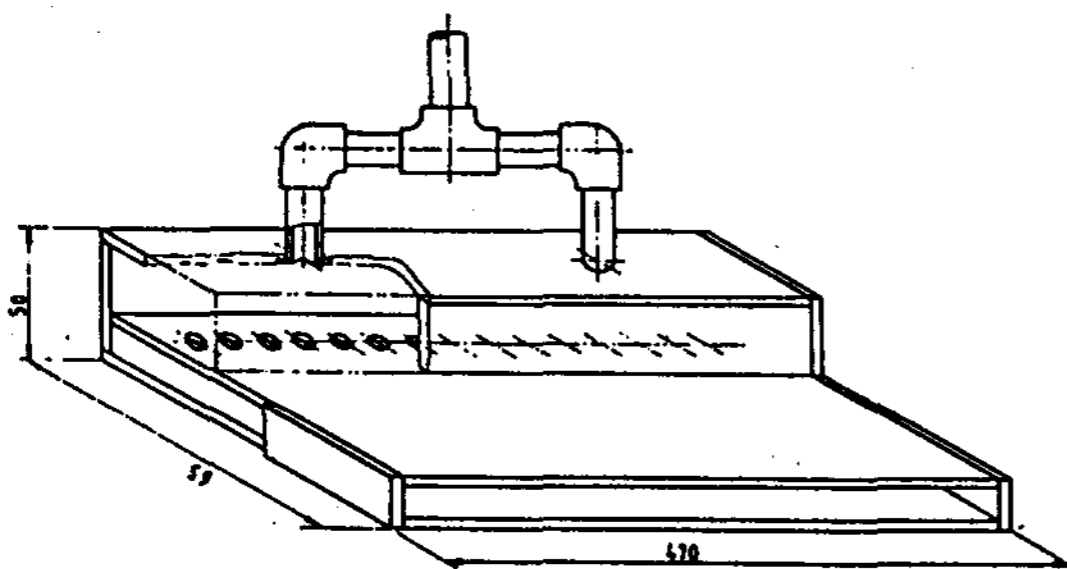


Fig. 2 Diffuser for line source & line sink

Fig. 3에서 brine의 순환계통과 測定器等の 位置가 明示되어 있다. 熱交換器는 Fig. 4에서 圖示한바와 같이 pitch 20mm, coil 지름 150mm, 유효감김수 17권, 총길이 9.7m의 銅으

로 製作하였다. 냉매는 물을 利用하였다.

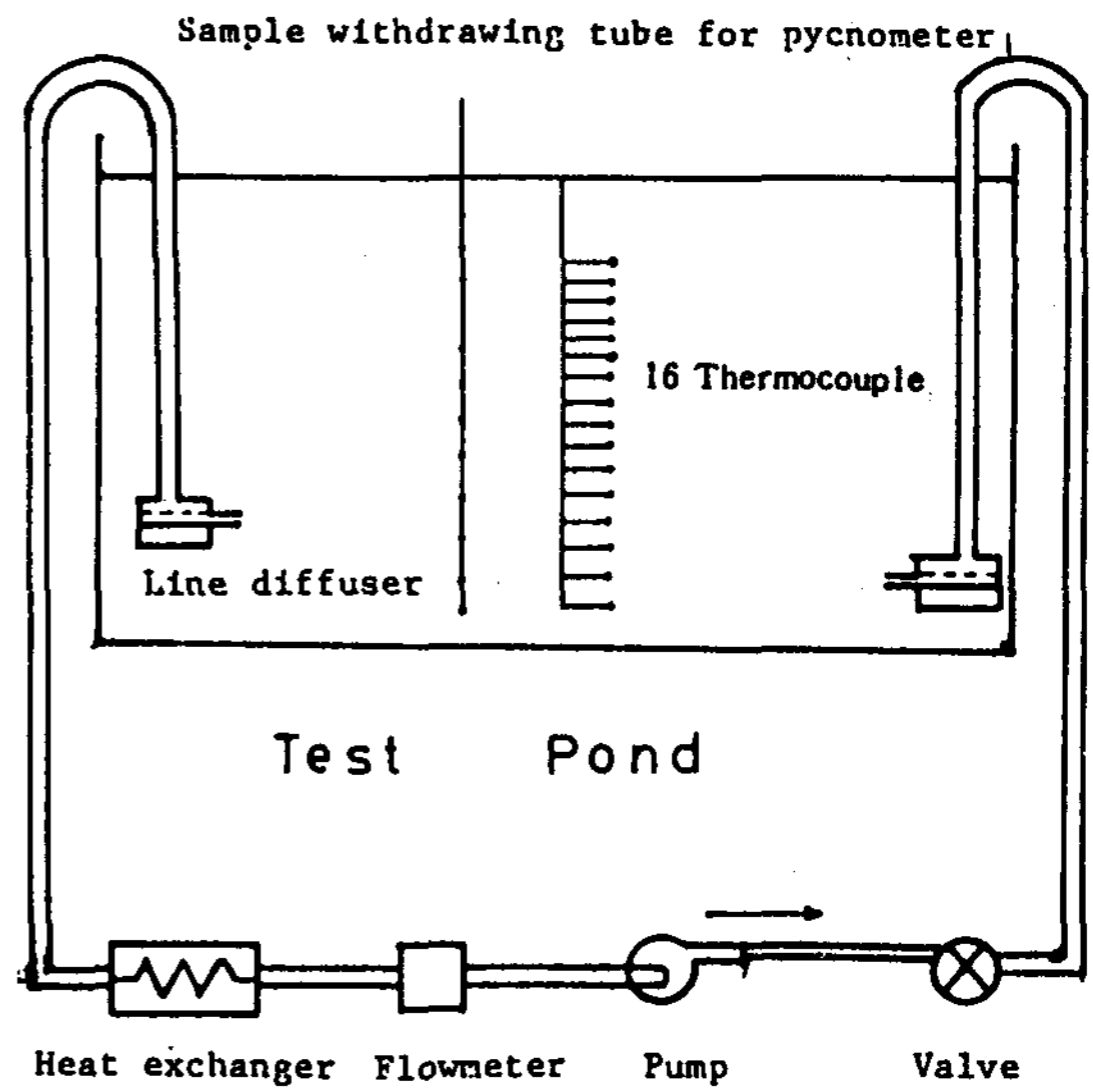


Fig. 3 Instrumentation and recirculating loop

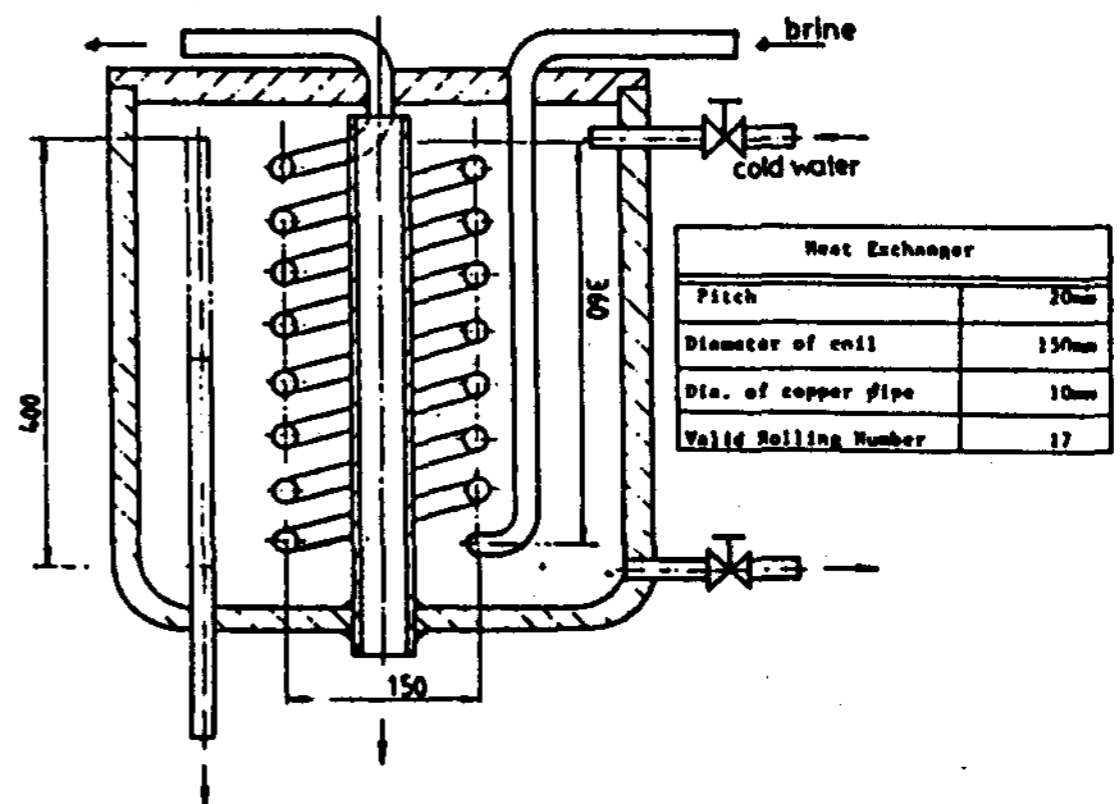


Fig. 4 Heat Exchanger

2-2. 溫度와 密度測定

溫度測定 範圍가 -200 ~ 400°C인 T型 thermocouple을 Fig. 3에서 圖示된 바와 같이 水槽 底面으로 부터 2.2 cm에서 3.0 cm 등간격으로 位置케 하여 이를 hybrid recorder (Model 3088, Yokogawa Hokushin Electronic 製)에 연결 正確한 溫度를 測定하였다.

密度測定은 Pycnometer¹¹⁾를 利用하였으며 그 正確度는 $10^{-3} g/cm^3$ 이다. Sampling은 지름 8 mm인 유리관을 L字 모양으로 製作하여 밑에서 6.0 cm부터 3.4 cm 등간격으로 12個 點에서 시행하였고 Sample은 Pycnometer에 담아 Electronic Balance (Chyo balance co. 製, 1/1000 scale)을 利用하여 質量을 測定하였다.¹⁰⁾

2-3. 實驗節次

1) 水槽內的 물의 重量에 對한 소금의 重量으로 濃度(鹽度)를 定하여 一定濃度 5%의 소금물로 가득 채웠다.

2) 高溫水槽의 水溫 調節器를 75°C로 낮추고 加熱始作하였다. 水槽 下部의 加熱 tank 前後의 gate valve와 高溫水槽의 valve, 그리고 pump速度를 調節하여 알맞는 流量을 순환시켰다.

3) 별도의 特殊 pump를 利用하여 brine을 순환시켰으며 line diffuser와 manifold를 通하여 推出 및 注入시켰다. 推出된 hot brine은 熱交換器의 冷却裝置를 通過하여 cold brine이 되어 水槽內로 다시 注入된다.

4) 순환되는 brine의 流量은 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 m/h의 4 단계로 變化시키면서 溫度와 密度를 測定하여 그들의 變化되는 樣相(勾配等)을 調査하였다.

5) 水槽內的 濃度는 5, 10, 15, 20%의 4 단계로 變化시키면서 위의 節次를 반복하였다.

III. 實驗結果

3-1. 三個層의 形成

上部(表面)對流層, 中間非對流層, 下部熱貯藏(對流)層의 三個層은 뚜렷하게 形成되었으며 Fig.5와 Fig.6은 形成된 三個層을 代表的으로 確認하는 圖示이다.

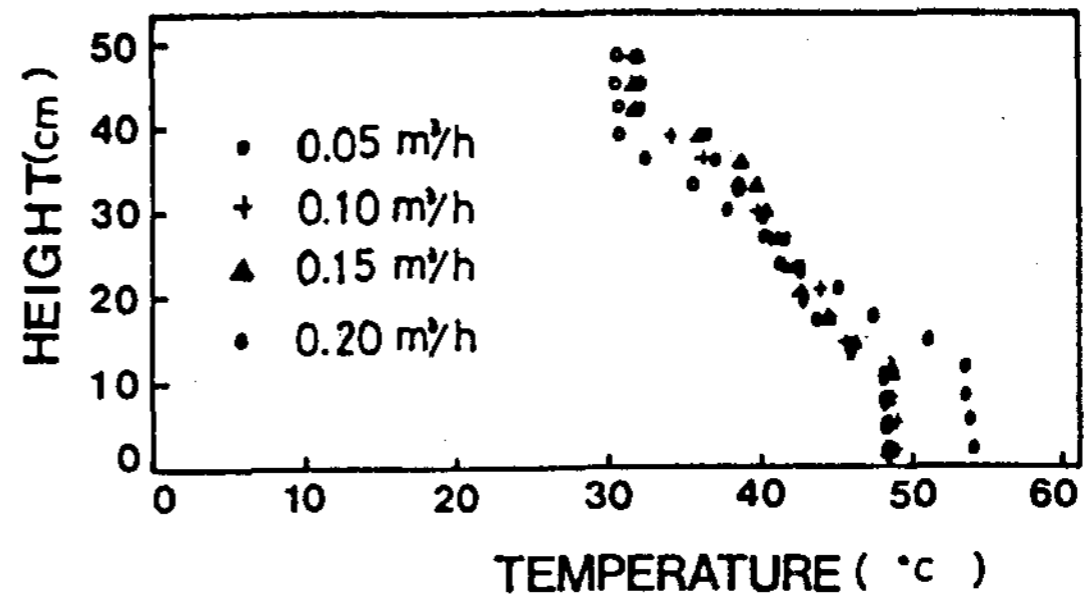


Fig.5 Temperature profile with 15% of salt concentration

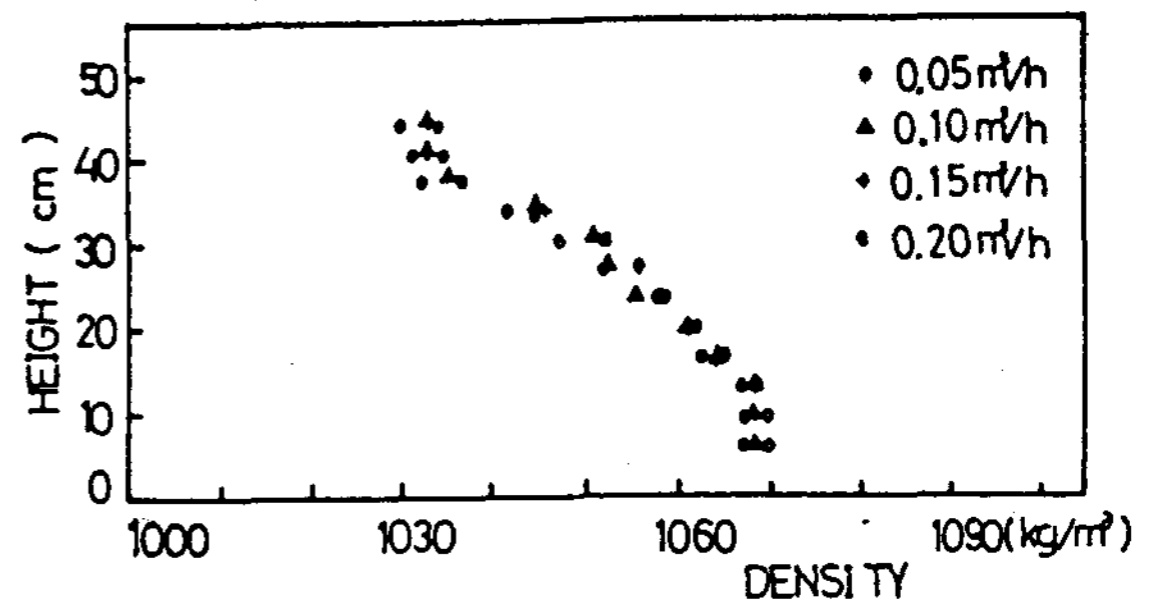


Fig.6 Density profile with 15% of salt concentration

3-2. 水力學的 安定

Solar ponds內에서 成層流動의 水力學的 安定을 決定하는 支配變數는 Richardson數와 Froude數가 있는데 Richardson數가 0.85보다 크면 安定된 成層流動이고 Froude數는 1.08보다 작으면 安定되어 있다. Fig.7에서 Fig.10까지는 Richardson數를 基準值로 調査한 結果인데 圖示된 바와 같이 5%, 10%, 15%, 20%의 Salt Concentration에 對하여 共히 上部와 下部層에서는 Richardson數가 0.85보다 작아서 對流現象이 일어났고 中間非對流層은 Richardson數가 0.85보다 커서 安定됨을 나타냈다. 그리고 Richardson數上으로 보아서도 上部對流層, 中間非對流層, 下部熱貯藏層의 三個層이 形成됨을 確認할 수 있다.

한편, Fig.11에서 Fig.14까지는 Froude數를 基準值로 한 結果인데 역시 三個의 層이

뚜렷하게 形成됐고 上部와 下部對流層에서는 Fr-
oude 數가 1.08 보다 크고 中間非對流層에서는

Froude 數는 1.08 보다 작게 나타났다.

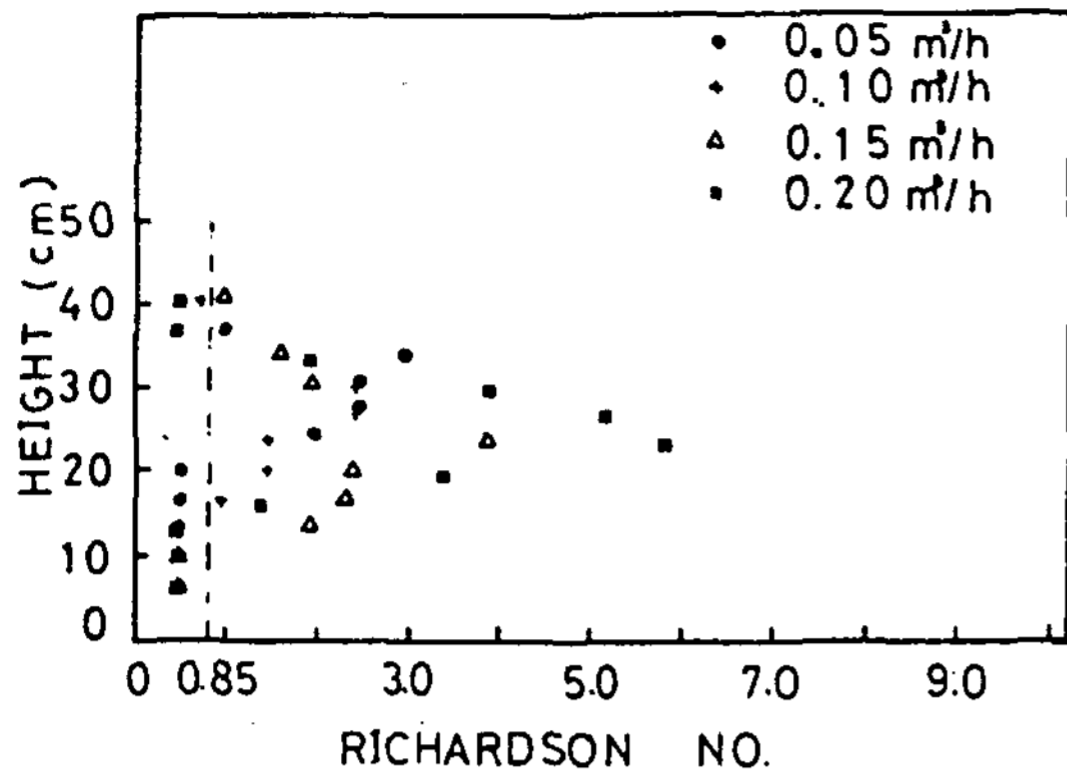


Fig.7 Richardson number with 5% of salt concentration

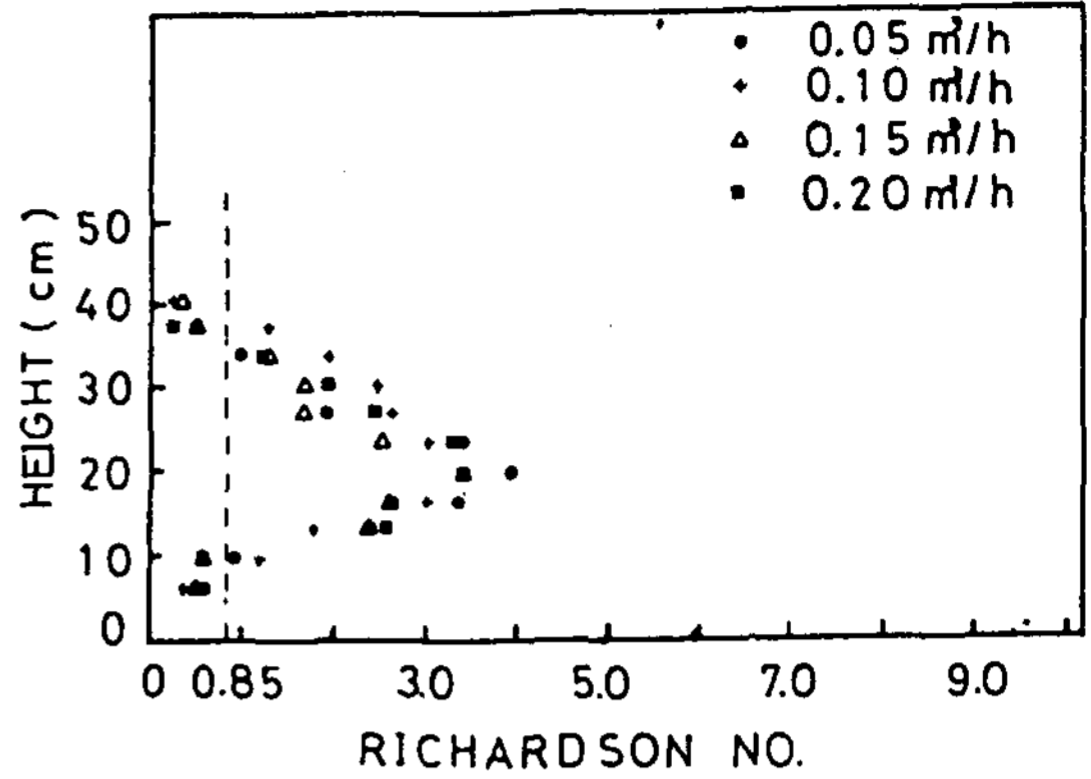


Fig.8 Richardson number with 10% of salt concentration

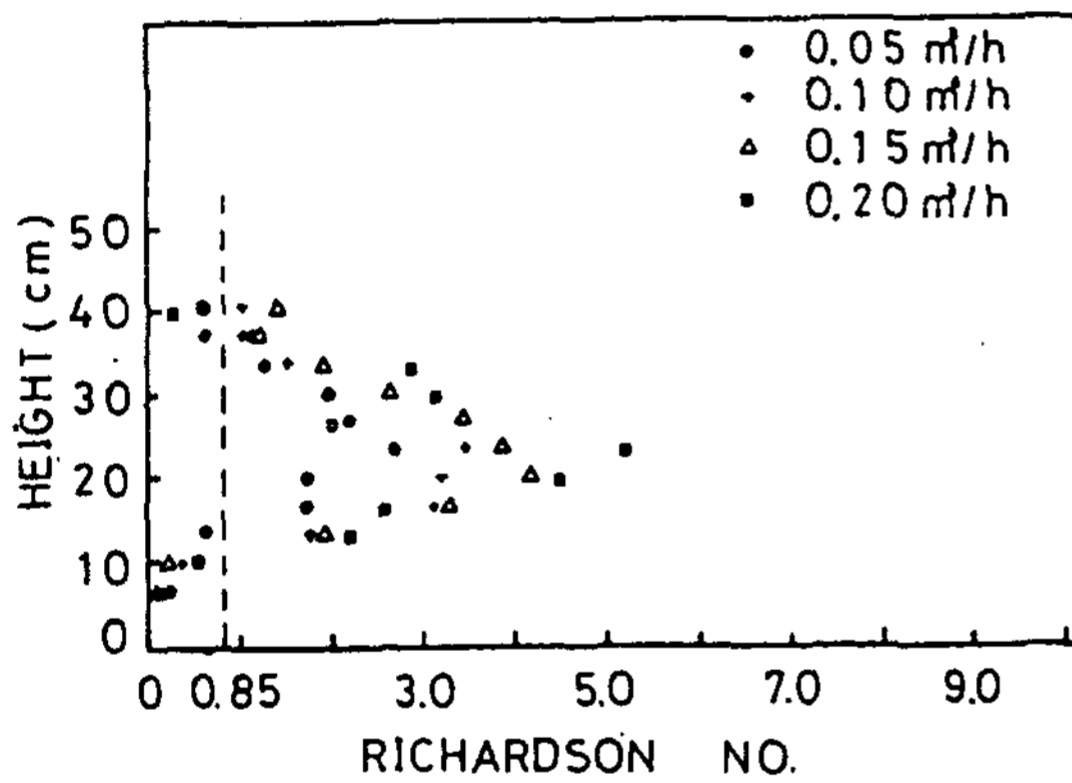


Fig.9 Richardson number with 15% of salt concentration

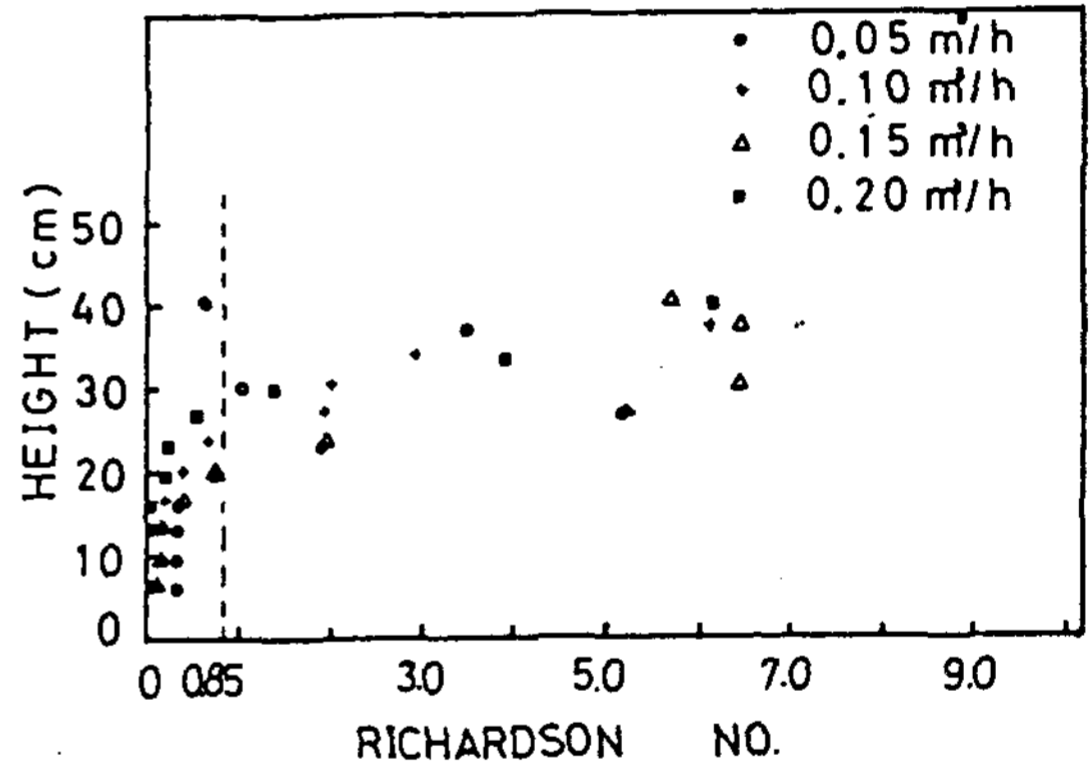


Fig.10 Richardson number with 20% of salt concentration

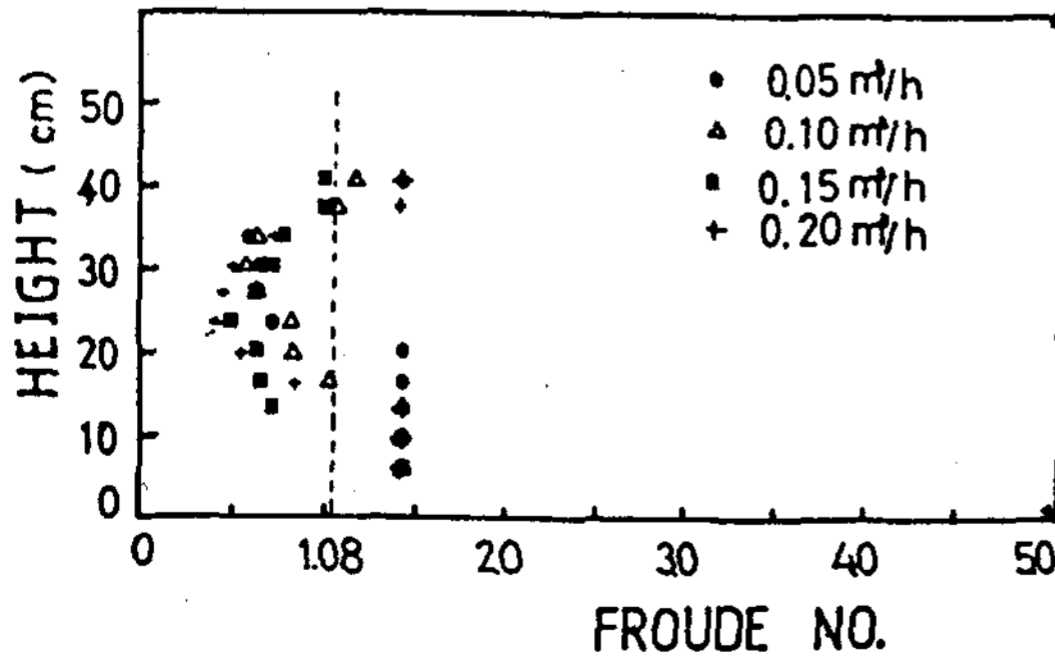


Fig.11 Froude number with 5% of salt concentration

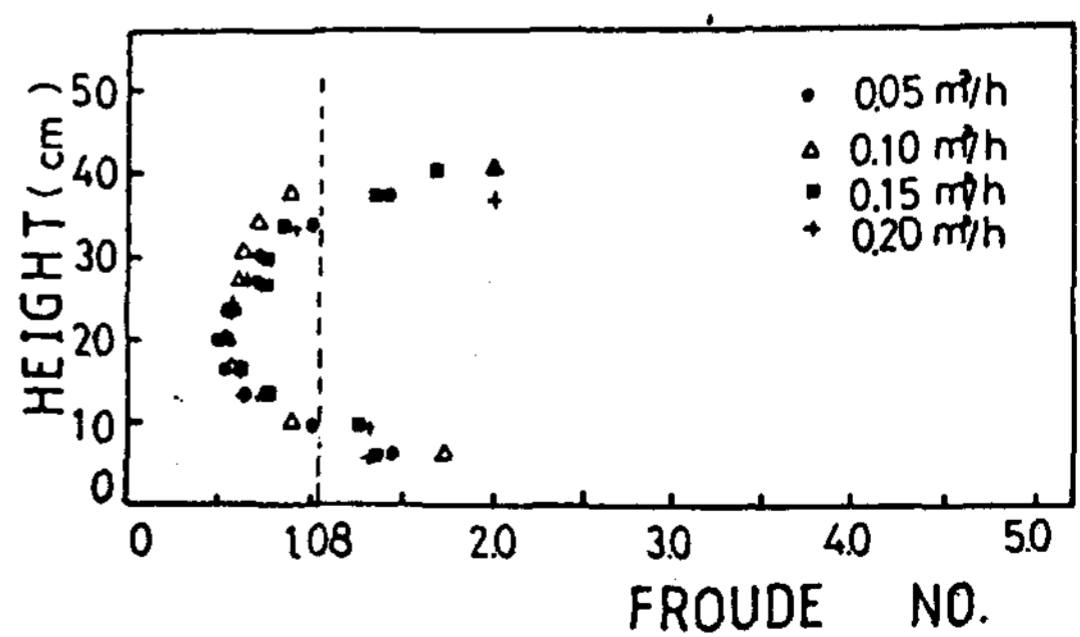


Fig.12 Froude number with 10% of salt concentration

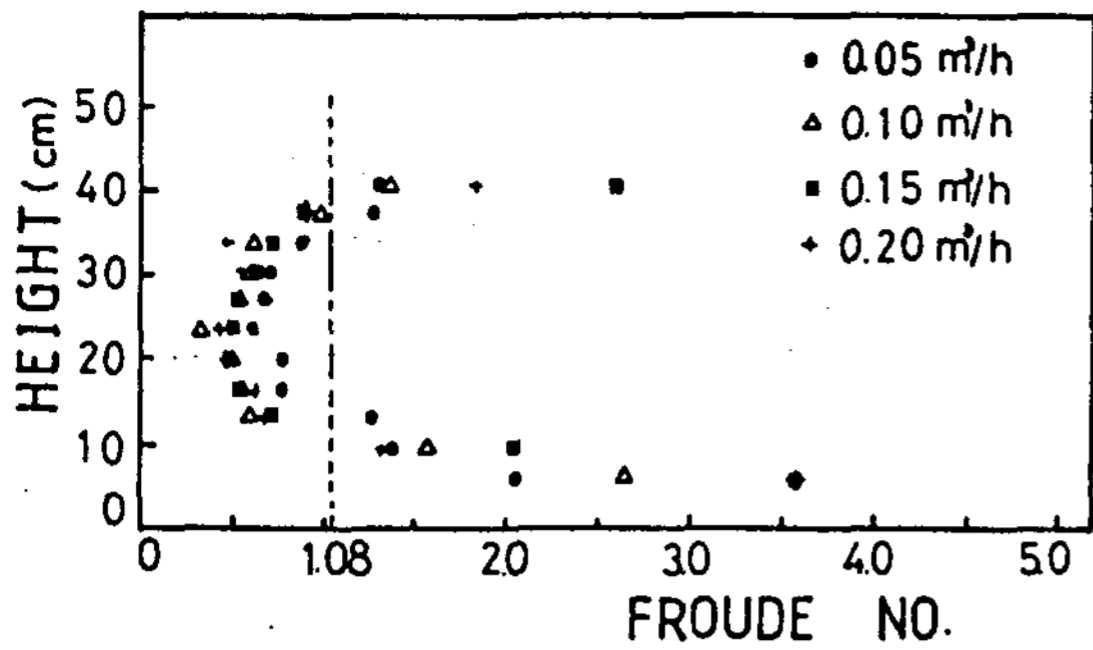


Fig.13 Froude number with 15% of salt concentration

3-3. 熱推出

Solar Ponds의 基本役割은 下部熱貯藏層으로부터 될수 있는 限 많은 熱을 推出하여 利用하는 것이다. Fig.15는 本實驗 Pond에서 Fig. 4를 通하여 熱交換되는 結果인데 Pond로부터 推出되는 brine rate를 0.05,0.10,0.15,0.20 m³/h로 하고 Salt Concentration을 5%,10%,15%,20%로 했을 境遇에 Heat flow rate ($Q=mCp\Delta T$)의 變化를 圖示한 것이다.

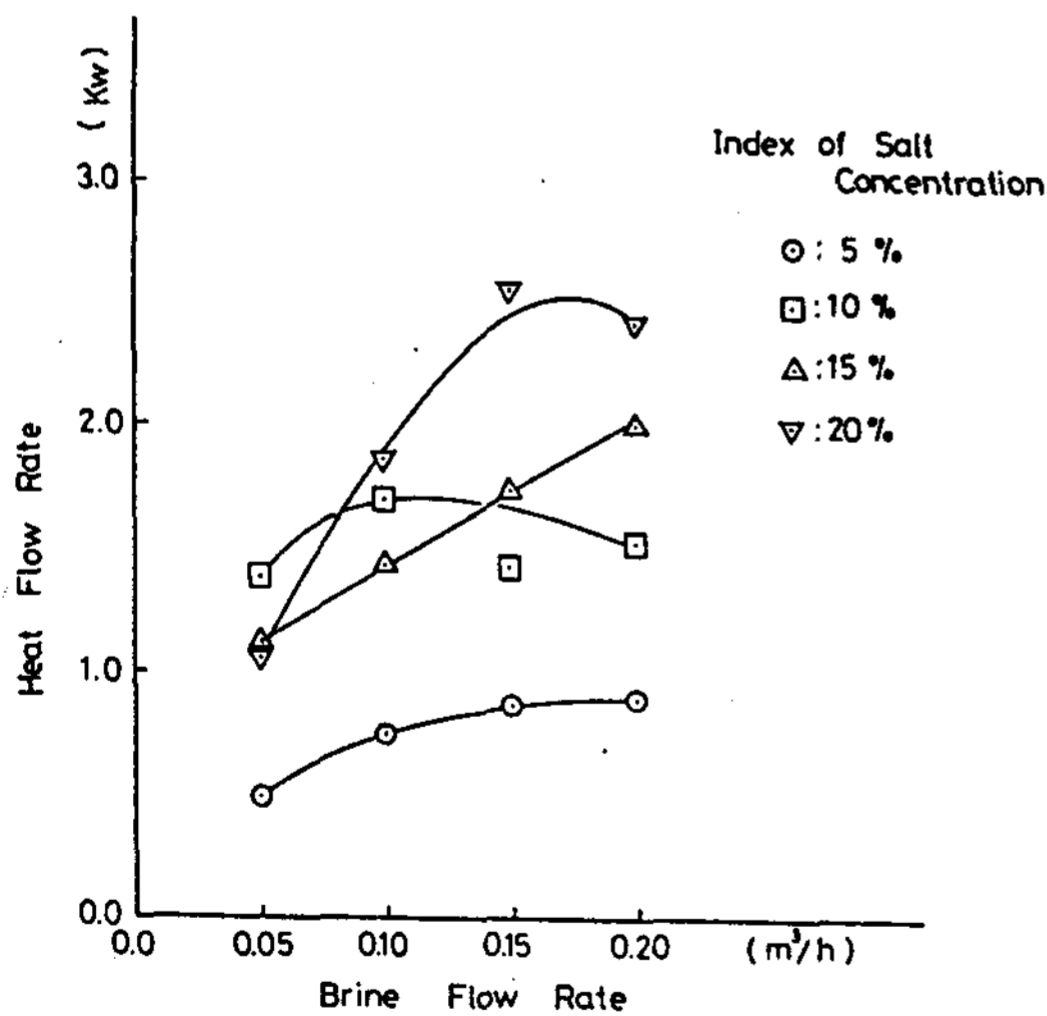


Fig.15 Heat Flow Rate with variation of Brine Flow

圖示된 바와 같이 Heat flow rate는 Salt concentration이 많으면 많을 수록 增加하나 brine flow rate에 따라 線型的으로 增加하

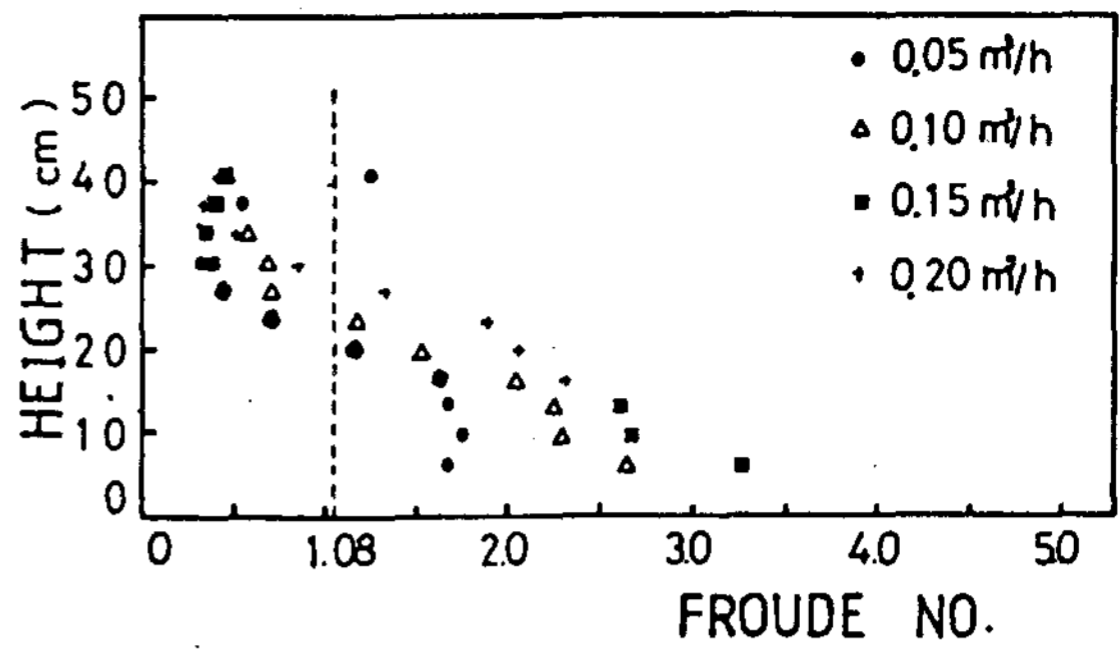


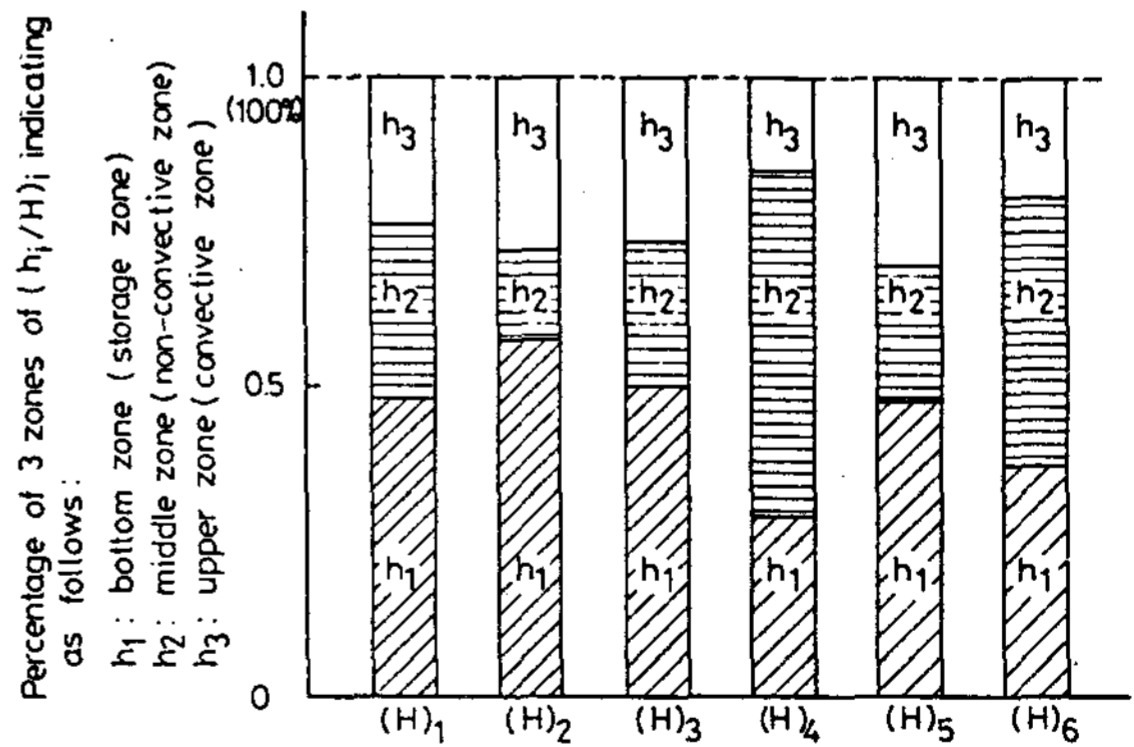
Fig.14 Froude number with 20% of salt concentration

는 境遇는 15%인 境遇뿐이다. 15%의 Salt concentration의 境遇를 除外하고는 brine flow rate 0.15 m³/h 근처에서 變曲點이 發生하고 있다.

3-4. 熱貯藏層의 두께

本實驗 Pond에서 形成된 三個層中, 10%~15% Salt concentration의 境遇를 代表的으로 적어보면 다음과 같다. (實驗 Pond의 깊이: 50 cm, Fig.5,6 참조)

下部熱貯藏層의 두께: 약 18.7cm, 37.4%



- Some ponds having various depth indicating as follows:
- (H)₁: Zangrando's Full-Scale Experiment Pond (Ref. 6)
 - (H)₂: Poplawsky's Solar Pond of Thermohaline System (Ref. 7)
 - (H)₃: Atkinson's Model for Solar Ponds (Ref. 8)
 - (H)₄: Schells' Solar Pond Candidate Salts (Ref. 9)
 - (H)₅: 박이동 외 Insitu Test Solar Pond (Ref. 10)
 - (H)₆: 本 실험

Fig.16 Formation of 3 Zones of various ponds

中間非對流層의 두께 : 약 21.5cm, 43.0%

上部(表面)對流層의 두께 : 약 9.8cm, 19.6%

以上과 같은 三個層의 두께들은 本實驗 Pond에서 얻을 수 있는 가장 效率的인 두께이며 三個層의 比率에 있어서도 아주 理想的으로 配分되었다. Fig.16의 (H)₆部分(column)이 本實驗의 結果이다.

IV. 考 察

濃度 10%~15%에서 三個의 層이 뚜렷하게 形成되었으며 이때 貯藏層의 두께는 約 18.5cm이었는데 5% 濃度時에는 推出brine의 流量이 단계적으로 增加함에 따라 下部對流層의 溫度가 降下하는 現象이 생겼는데 이것은 推出brine의 流量의 增加에 따라 熱交換器에서의 熱交換이 增加되었기 때문이다. 密度勾配 역시 濃度 10%일 境遇가 가장 뚜렷하였으며 推出brine의 流量이 작을수록 下部對流層에서의 密度는 相對적으로 커지며 上部對流層에서는 相對적으로 密度가 작아진다. 濃度 20%의 境遇에는 上部對流層과 下部對流層 사이의 密度差가 컸으며 貯藏層이 지나치게 發達하여 安定된 密度勾配와 溫度勾配를 形成치

못하였다.

成層流動의 安定的인 側面에서는 濃度 10%에서 推出brine의 流量이 增加함에 따라서 下部對流層의 溫度가 0.05 m/h일때 57.4°C로서 가장 周圍 流體와 entrainment 없이 安定을 維持하고 있었다. 한편 非對流層의 安定의 支配變數인 Richardson數가 그層에서 0.85보다 컸고 또한 Froude數는 1.085보다 작아서 그層에서는 對流가 發生하지 않고 있음이 確認되었는데 이는 Richardson數와 Froude數에 의해 取한 값이 꼭 一致하지는 않지만 서로 비슷하고 密度勾配와 溫度勾配의 輪廓과도 잘 一致하는 傾向을 보였다. 이는 Richardson數와 Froude數로서도 三個層의 形成을 確認하고 中間境界面에서의 成層流動의 安定을 파악할 수 있었다. 그리고 高濃度에 갈수록 Richardson數와 Froude數가 비슷하게 一致하는 傾向을 나타냈다.

熱貯藏層의 두께에 關하여는 Fig.16에서 表示된바와 같이 貯藏層이 뚜렷히 形成됨은 事實이고 Table1과 같이 定量的인 比較가 可能하다. Table 1에서 보는 바와 같이 三個層의 두께의 決定的인 값을 얻을 수 있게 되었다.

Table 1 Approximate figures of thickness of 3 zones

References	bottom zone h ₁ (storage)		middle zone h ₂ (non-convective)		upper zone h ₃ (convective)		Pond depth H	
	cm	%	cm	%	cm	%	cm	%
Zangrando's pond (Ref. 6)	120.0	48.0	70.0	28.0	06.0	24.0	250.0	100
Poplawsky's pond (Ref. 7)	41.0	57.7	10.5	14.8	19.6	27.6	71.1	100
Atkinson's pond (Ref. 8)	150.0	50.0	70.0	23.3	80.0	26.7	300.0	100
Schell's pond (Ref. 9)	13.0	28.9	32.2	55.6	10.0	15.5	58.0	100
박이동 pond (Ref. 10)	93.0	47.8	40.0	21.5	67.0	30.8	200.0	100
본 실험	18.7	37.4	21.5	43.0	9.8	19.6	50.0	100

Fig.16 과 Table 1 에서 나타나 있는 바와 같이 下部熱貯藏層의 두께는 Ponds 깊이의 30%~40%이고 中間非對流層의 두께는 40%~50%, 그리고 上部對流層의 두께는 10%~20%이다. 앞으로 三個層의 形成이나 熱貯藏層의 두께等を 確認하기 爲한 實驗이나 研究는 더 以上 하지 않아도 될 것으로 分析된다.

V. 結 論

Solar Ponds 에서 三個層은 뚜렷하였고 中間非對流層의 두께는 熱貯藏層의 熱量維持에 큰 영향을 미치는 이는 上部對流層의 溫度와 密接한 關係가 있다.

中間境界面의 成層流動의 安定을 確認하는데는 Richardson數가 더 效果的이며 本實驗에서 Pond로서의 最適運轉條件은 濃도가 10%~15%이다.

下部熱貯藏層에서 熱을 推出할 수 있으며 推出熱量은 下部熱貯藏層의 두께와 關係가 있으며 이들 두께들의 比는 다음과 같다.

- 下部熱貯藏層의 두께 : Pond全깊이의
30% ± 10%
- 中間非對流層의 두께 : Pond全깊이의
40% ± 10%
- 上部對流層의 두께 : Pond全깊이의
20% ± 10%

위 資料는 Solar Ponds 로 부터 有用한 熱容量을 豫測하고 熱利用을 設計하는데 利用될 수 있다.

REFERENCES

1. A. Kalecsinsky, "Ungarische Warm und Heisse Kochsalzeen", Annals der Physik, Vol. 4, pp. 408-416, 1902.
2. J.W. Miles, "On the Stability of Heterogeneous Shear Flow", J. of Fluid Mech., Vol. 10, pp. 496-508, 1961.
3. H. Weinberger, "The physics of the Solar Pond", Solar Energy, Vol. 8, pp. 45-55, 1964.
4. J.S. Turner, "The Coupled Turbulent of Salt and Heat Across a Sharp Density Interface", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 8, pp. 759-769, 1965.
5. C.E. Nielsen, "Experience with a Prototype Solar Pond for Space Heating", I.S.E.S. Meeting, Winnipeg, Canada, 1976.
6. F. Zangrando, "Observations and Analysis of a Full-Scale Experimental Salt Gradient Solar Pond", Ph.D. Thesis, Albuquerque, Dept. of Physics and Astronomy, university of New Mexico, 1979.
7. C.J. Poplawsky, F.P. Incropera & R. Viscanta "Mixed Layer Development in a Double-Diffusive, Thermohaline System" J. of Solar Energy Engineering, Transaction of the ASME. Vol. 103, pp. 351-359, No. 1981.
8. J.F. Atkinson & D.R.F. Harleman "A wind-Mixed Layer Model for Solar Ponds" Solar Energy Vol. 31, No. 3, pp. 243-259, 1983.
9. D. Schell & C.M. Leboeuf "The Behavior of Nine Solar-Pond Candidate Salts" SERI/TR-253-1512, UC Categories: 59c, 62e, Jan. 1983.
10. 朴伊東 "Study on Practical Density Measurement in Stratified Fluid on Solar Pond", 태양에너지학회 Vol. 3, No. 2, pp. 15-27, 1983.
11. N. bauer, S.A. Lewin, "Determination of Density", Vol. 1, pp. 131-190, Weissberger A. ed. International Pub. New York.