

Liquid Based Solar Thermal Storage 를 위한
熱交換性能에 관한 研究

A Study on the Heat Exchange Performance
for the Liquid Based Solar Thermal Storage

金 炳 哲* 鄭 玟 采**
(Byung Chul Kim) (Hyun Chai Jung)

ABSTRACT

A solar hot water storage tank was designed and constructed to examine the heat exchange performances on load side for the solar thermal storage in a single loop solar water heating system.

In the tank helically coiled tube was immersed. The hot water was circulated from either top or bottom. The circulation flow rate was varied from 500 ml/min to 20,000 ml/min. The effect of flow rate was observed. The thermal performances according to the flow rate and flow direction were examined. The temperature distributions in the tank and inside of the tubes were plotted along the process of cooling.

Nomenclature

- A : Inner section area of helical coiled tube cm^2
- A_c : Area of collector
- F_r : Dimensionless heatremoval efficiency factor
- T_{in} : Fluid inlet temperature of collector $^{\circ}\text{C}$
- T_b : Temperature of water in the tank $^{\circ}\text{C}$
- T_a : Ambient temperature
- T_{out} : Temperature of fluid leaving the collector
- U_c : Heat loss coefficient of the collector $\text{w/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- V : Flow velocity ml/min
- WC_p : Capacity rate of fluid water within helical coiled tube
- \mathcal{L} : Solar absorptivity of the collector plate
- ϵ : Effectiveness of the helical coiled tube to transfer heat
- ρ : Density of the fluid

1 . 序 論

一般的으로 Domestic Hot Water Heating system에 있어서 collector에 集熱된

太陽 energy는 낮동안에는 storage tank에 蓄熱되며 同時에 必要한 곳에 使用되고 液間에는 storage tank內에 蓄熱된 것을 必要한 곳에 利用한다. 따라서 直接 storage tank內에 熱을 貯藏하고 利用하는 것이 바람직하나 우리나라와 같이 계절에 따라 溫度差가 甚한 곳에서는 凍破의 危險이 있으므로 storage tank

*正會員 : 朝鮮大學校 機械工學科

**正會員 : 慶熙大學校 化學科

內에 熱交換裝置를 使用하는 single loop solar water heating system을 使用하는 경우가 많다.^{1, 2)} 이러한 경우 熱交換裝置의 材料는 銅으로된 helical coiled tube를 使用하는 경우가 많으며³⁾ 이때 secondary flow의 發生에 依해 直管보다 더 큰 傳熱係數를 保有한다.^{4, 5)}

또한 J. E. Ferguson과 H. F. Sullivan은 集熱器測에 熱交換裝置를 使用하는 경우와 負荷側에 熱交換裝置를 使用하는 경우에 對해 研究하였고⁶⁾ W. A. Beckman, J. A. Duffie 등은 最適流量에 對해 研究하였다.⁷⁾

熱交換裝置의 性能에 影響을 미치는 要因으로는 熱交換裝置의 크기와 storage tank內의 溫도와 helical coiled tube內의 溫度 流量 管사이의 間격과 管徑을 들 수 있다.

本 論文에서는 storage tank內 負荷側에 熱交換裝置를 設置한 경우 이러한 影響을 檢討함으로써 効率的 熱交換裝置를 設計하기 위한 基礎資料가 되게 하였다.

2. 熱交換量

Solar water heating system에 있어서 熱交換裝置에 對한 檢討 分析은 Francis de winter와 John D. Horel에 依하여 이루어 졌다.

Whiller⁸⁾에 依한 平板 集熱器의 集熱量은
$$Q_c = Q_L F_R \alpha T_A - F_R U_c A_c (T_{in} - T_o) \dots \dots \dots (1)$$

로 나타낼 수 있다. 實際 system에 있어서는 集熱器를 나온 流體의 溫度가 storage tank內에서 나온 流體의 溫度보다 높을때 pump가 作動될 수 있으며 이때 얻어진 熱量은 集熱器에서 얻어진 熱量으로

$$Q_c = W C_p (T_{out} - T_b) \dots \dots \dots (2) \text{가 된다.}$$

single loop solar water heating sys-

tem에 있어서 helical coiled tube를 使用한 熱交換裝置에서 傳해진 熱量은

$$Q_{HX} = W C_p \epsilon (T_{out} - T_b) \dots \dots \dots (3)$$

storage tank內의 熱交換率 ϵ 는

$$\epsilon = \frac{T_{out} - T_{in}}{T_{out} - T_b} \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{또한 } \epsilon = 1 - \exp \left[- \frac{F_t U_t A_t}{W C_p} \right] \dots \dots \dots (5)$$

로 나타낼 수 있다.⁹⁾

式(3)과 式(4)를 式(2)에 代入하면

$$Q_c = \left[\frac{1}{1 + \frac{F_R U_c A_c}{W C_p} \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right)} \right] [Q_i F_R \alpha T A_c - F_R U_c A_c (T_b - T_a)] \dots \dots \dots (6)$$

가 된다.

여기서 熱交換裝置를 設置함에 依하여 集熱器에 미치는 熱損失을 F_R , 熱交換裝置를 設置함에 依한 形態 및 流體의 flow rate와 性質에 對한 函數를 F_R' 라고 하면

$$\frac{F_R'}{F_R} = \frac{1}{\left[1 + \frac{F_R U_c A_c}{W C_p} \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right) \right]} \dots \dots \dots (7)$$

로 나타낼 수 있다. 式(6)에서 첫째항은 熱交換裝置를 設置한 경우를 나타내며 둘째항은 熱交換裝置가 없는 경우의 集熱器에 傳해진 熱量을 나타낸다.

또한 τ_1 과 τ_2 사이에서 storage를 통한 熱交換量은

$$Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} W C_p (t_{in} - t_{out}) d\tau \dots \dots \dots (8)$$

가 되며 $W = \rho A V$ 가 되므로

$$Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \rho A V C_p (t_{in} - t_{out}) d\tau \dots \dots \dots (9)$$

即 $Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \rho A V C_p \Delta T_{io} d\tau$ 로 나타낼 수 있다.

3. 實驗裝置

本 實驗에 使用한 實驗裝置의 概略圖는 Fig.

1 과 같으며 model system은 Fig 2와 같다.

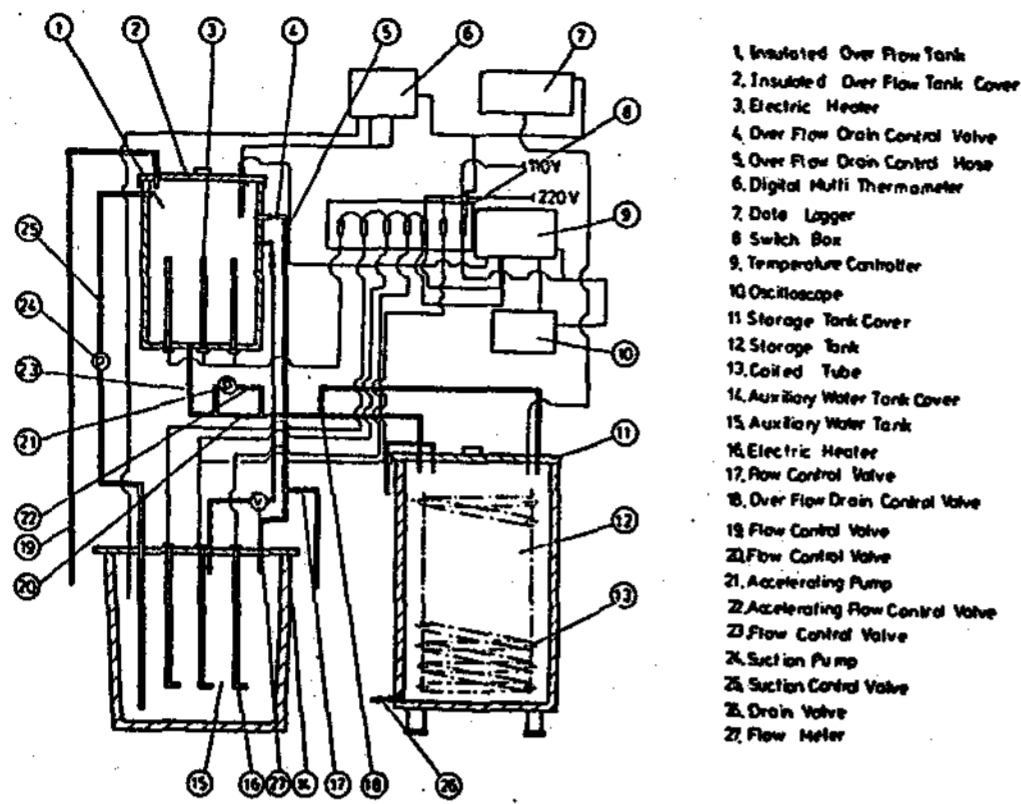


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Solar thermal storage tank 內에 helical coiled tube가 들어 있으며 Fig3 과 같은 位置에 thermocouple이 設置되어 있다. 一定한 水位와 壓力에 依하여 一定한 流量을 유지하며 熱交換이 일어나도록 Insulated over-

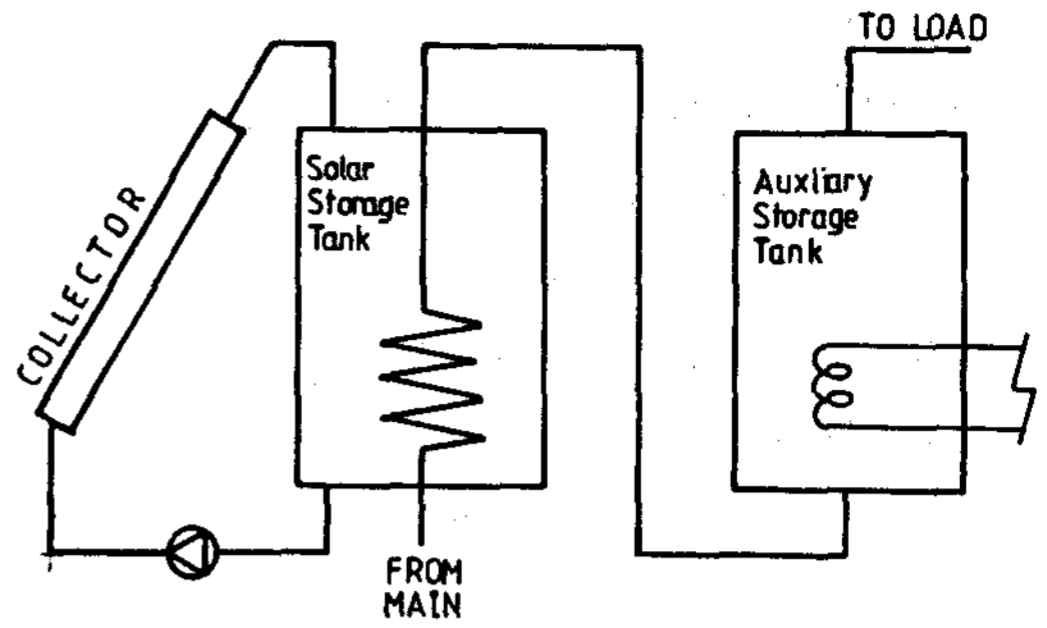


Fig. 2. Model system with the immersed coil heat exchanger on load side.

flow tank를 設置하였고 流量調節밸브를 設置하였다. storage tank 內에 裝置한 helical coiled tube 內 入口의 水溫이 一定하게 유지되며 熱交換이 일어나도록 하기위해 temperature controller에 依하여 電壓을 制御하여 溫度를 調整할 수 있는 electric heater를 insulated overflow tank 內와 auxiliary tank 內에 設置하였다.

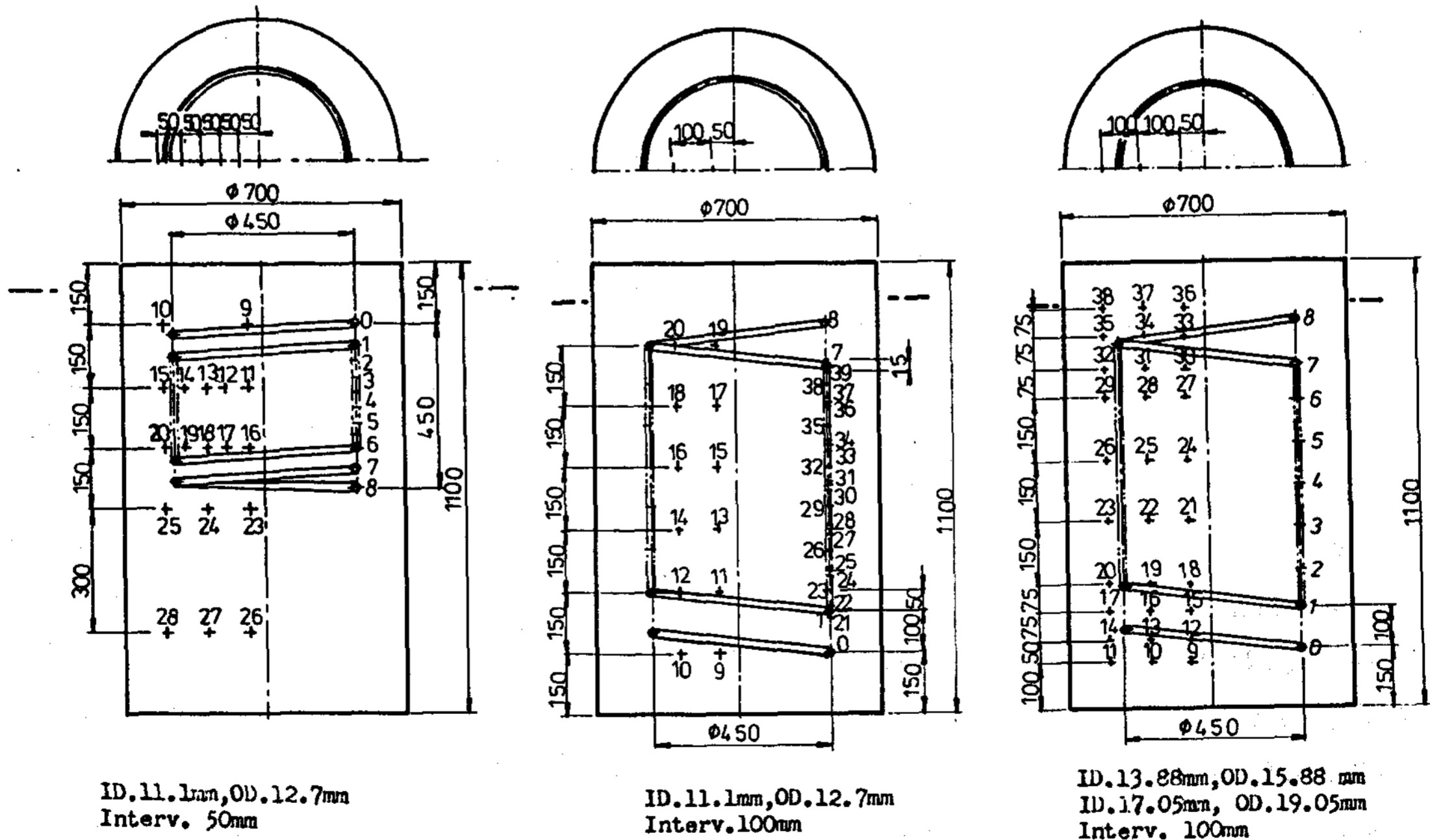


Fig. 3. Position of thermocouple

insulated overflow tank는 1.5 m 높이에 設置하였고 storage tank內의 helical coiled tube 사이에는 流量調節밸브를 부착하였고 pump를 利用하여 流量을 增加시켜서도 實驗할 수 있도록 하였으며 熱損失을 막기 위해 모든 管路 및 tank는 斷熱하였다.

實驗에 使用한 storage tank와 helical coiled tube의 形態와 크기는 table 1과 table 2에 나타나 있고 溫度測定은 digital multithermometer와 data logger를 使用하였다.

Table 1. Size of Storage Tank

Type	Material		Size (mm)		Insulation	
	Inner tank	Outer tank	Inner tank	Outer tank	Body	Cover
Vertical Cylinder	STS 304	SB 34	$\phi 600 \times 1,000 \times 1.5 t$	$\phi 700 \times 1,100 \times 2 t$	Glasswool	Styrofoam

Table 2. Size of Helical Coiled Tube

No	Inner diameter (mm)	Outer diameter (mm)	Tube center interval (mm)	Tube space (mm)	Helical diameter (mm)	Turn	Length (m)
1	11.1	12.7	50	37.3	450	8	13.57
2	11.1	12.7	100	87.3	450	8	13.57
3	13.88	15.88	100	84.12	450	8	13.57
4	17.05	19.05	100	80.95	450	8	13.57

4. 實驗方法

Storage tank內에 65°C의 물을 채운 뒤 물의 上部와 下部의 溫度差가 1°C 미만이 되도록 하였으며 上水道를 insulated overflow tank에 연결시켜 electric heater를 使用하여 20°C를 유지시켜 일정한 流量과 水位를 유지하며 熱交換이 일어나도록 하였으며 storage tank內 低面에서 25 cm 높이에서의 溫度가 25°C가 될 때까지를 1 process로 하였으며 1 process 동안 管內의 流量을 一定하게 하여 實驗하였다. 各 process 때마다 流量을 變化시켰으며 helical coiled tube 各 部分의 溫度는 1分간격으로 測定하였고 流量測定은 mass cylinder를 使用하였다.

5. 實驗結果 및 考察

5.1 流量에 따른 熱交換性能

Storage tank內 水溫과 helical coiled tube內의 水溫과의 差가 클수록 熱交換性能은 좋으며 또한 流量이 많아질수록 熱容量이 많으므로 熱交換性能은 좋으며 下向式으로 熱媒體를 循環시킨 경우 上部입구 turn에서부터 turn이 增加할수록 helical coiled tube內 溫度는 時間이 경과하여도 減少率이 같으나 上向式으로 熱媒體를 循環시킨 경우는 時間이 갈수록 下部입구로 부터 上部 turn쪽으로 차츰 熱交換性能이 增加되어감을 볼 수 있었다.

Fig. 4, 5, 6, 7은 이것을 보여주고 있는데 이는 上向式의 경우 熱交換된 水溫은 下方으

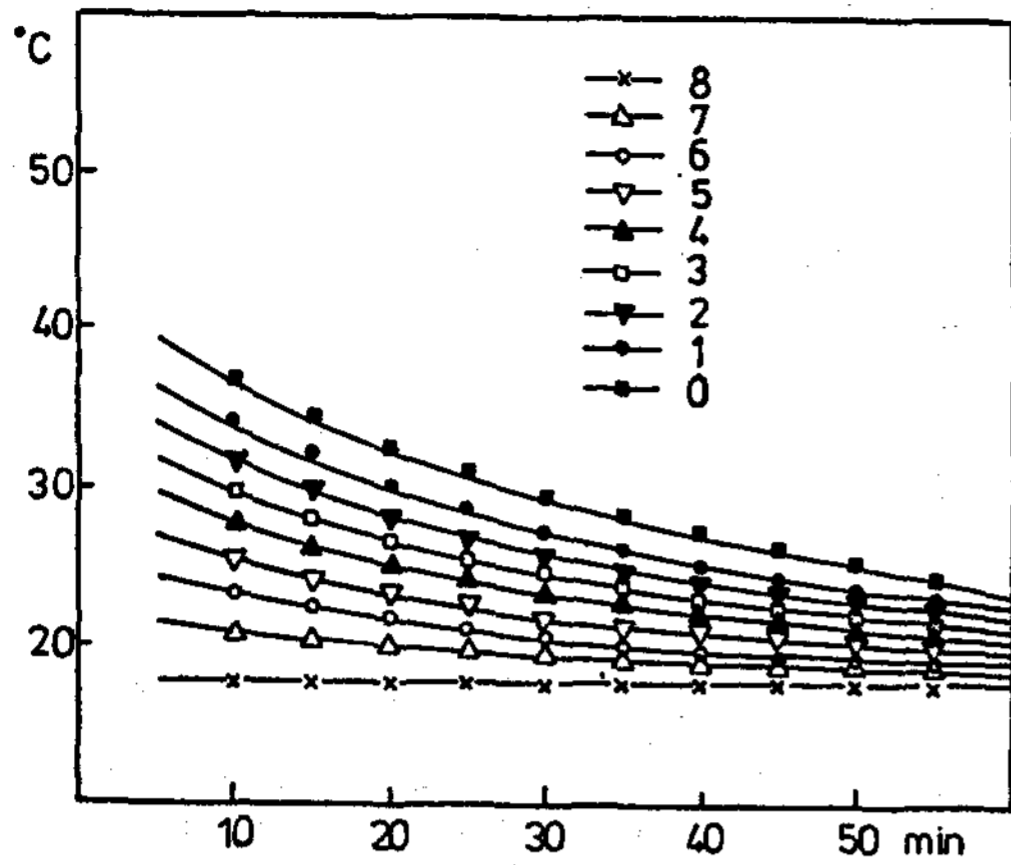


Fig. 4. Temp. on time in tube watered from top with flowrate 10500ml/min ID.17.05mm OD. 19.05mm Interv. 100mm

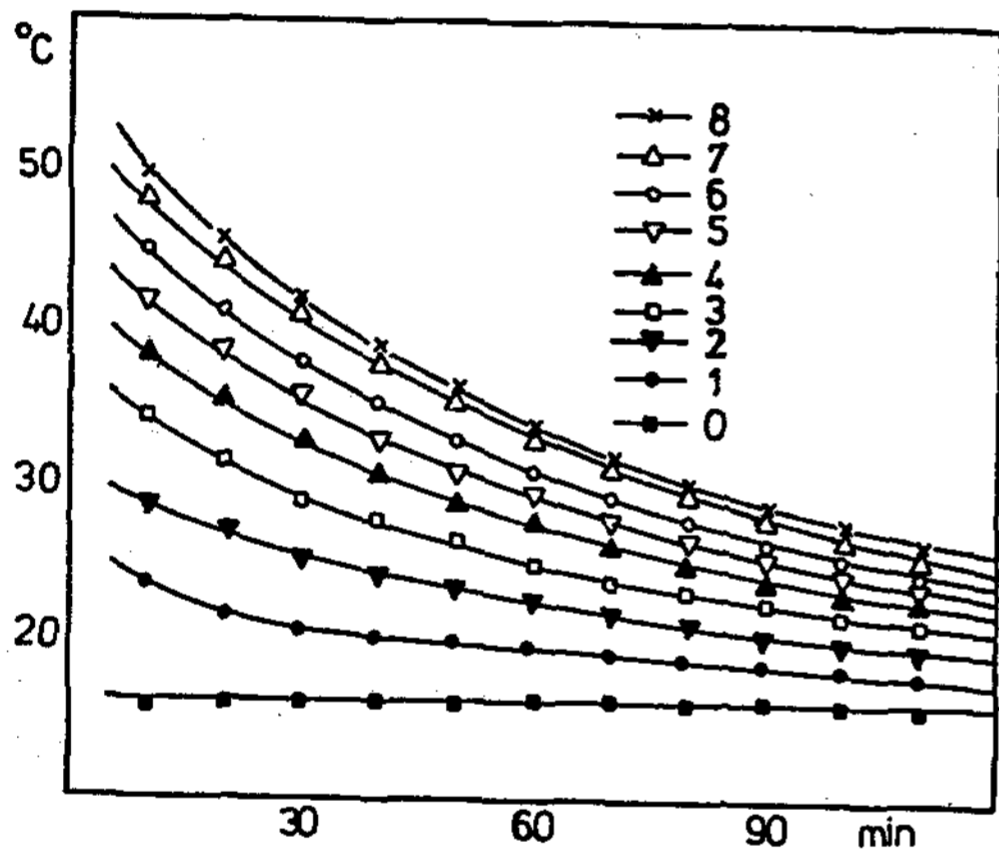


Fig. 5. Temp. on time in tube watered from bottom with flowrate 3710ml/min ID.11.1mm, OD.12.7mm, Interv.100mm

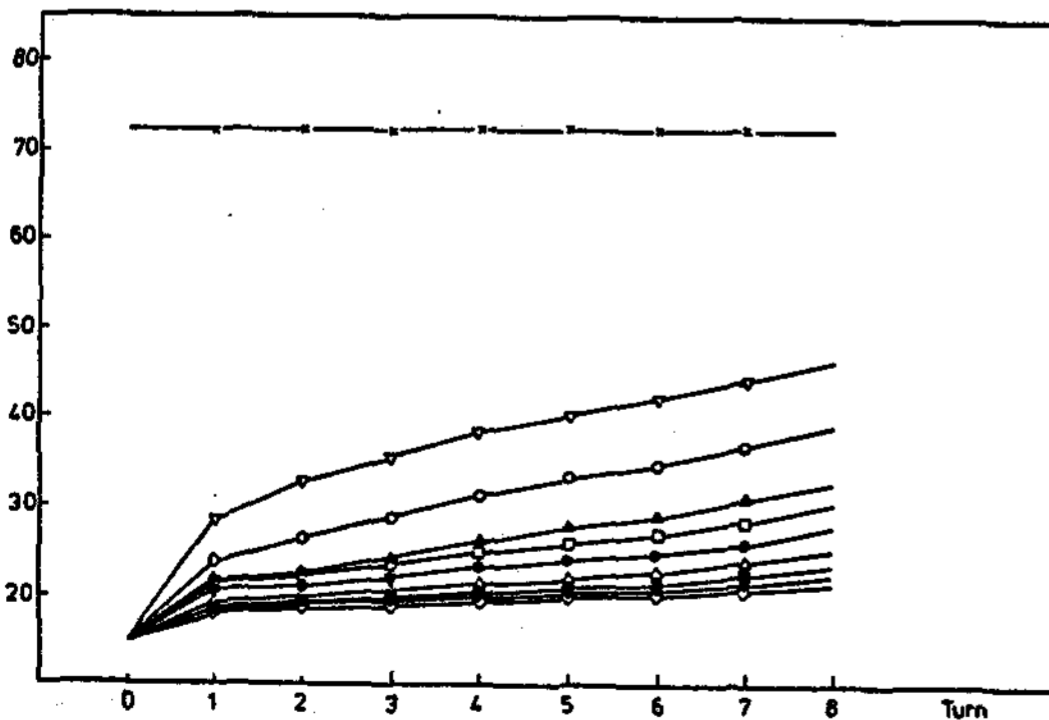


Fig. 6. Temp. on turns of tube watered from top with flowrate 6375ml/min ID.17.05mm, OD.19.05mm Interv. 100mm

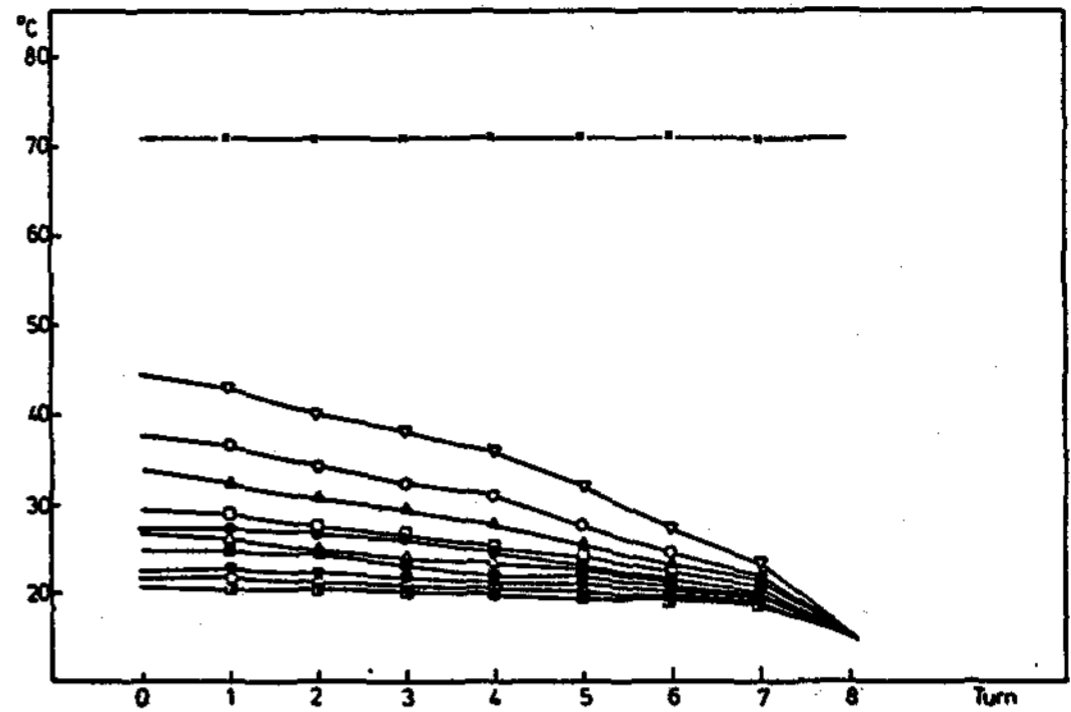


Fig. 7 Temp. on turns of tube watered from bottom with flowrate 7950ml/min ID.17.05mm, OD.19.05mm Interv. 100mm

로 傳達되는데 下方側 storage tank內의 熱容量이 적으므로 下方으로부터의 溫度降下가 빨라 시간이 감에 따라 下部입구內 근처의 水溫과 storage tank內 水溫과의 差가 적어 차츰 熱交換性能이 떨어지므로 上部 turn 쪽으로 熱交換性能이 增加되어감을 알 수 있다.

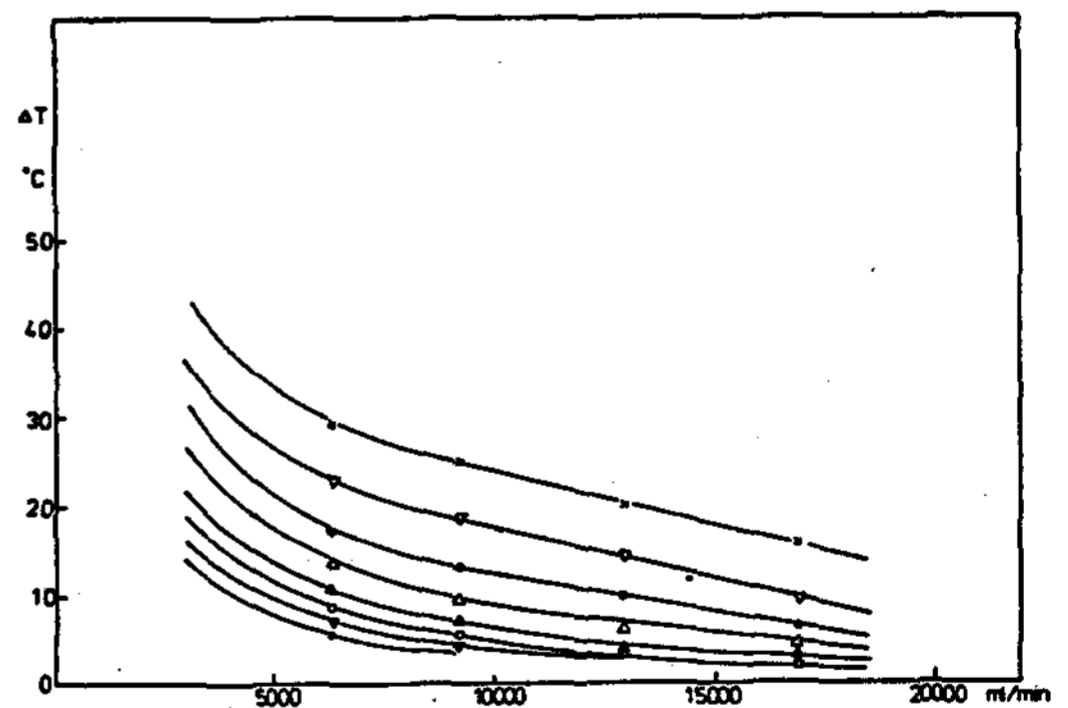


Fig. 8. Temp. difference on flowrate between inlet and outlet of tube time Interv.15 min. ID.17.05mm, OD 19.05mm Interv. 100mm

Fig. 8은 helical coiled tube內 입구와 출구의 溫度差를 나타내는데 流量이 적을수록 입구와 출구의 溫度差가 크나 시간이 경과함에 따라 작아짐을 볼 수 있는데 上向式 熱媒體循環의 경우와 下向式 熱媒體循環의 경우에 있어서 熱交換에 의한 helical coiled tube內 水溫의 입출구 溫度差는 크게 發見할 수 없었는데 本 實驗의 경우 熱容量이 같으므로

各 turn에 따른 熱交換率은 약간 다르나 總 熱交換量은 거의 같음에 起因하는 것으로 추정 된다.

Storage tank 內的 溫度는 上向式으로 熱媒 體를 循環하는 경우 시간이 감에 따라 上下 溫度差가 커졌다가 다시 減少하는 현상을 볼 수 있었는데 流量이 적을수록 溫度差가 서서히 減少하며 流量이 많으면 빨리 增加하였다가 빨리 減少하였다. 이는 流量이 적은 경우 주로 下部입구 近處에서 熱交換이 일어나기 때문이며 流量이 큰 경우 熱容量이 크므로 helical coiled tube 上부분에서도 熱交換이 일어나기 때문임을 알 수 있다. 下向式으로 熱媒 體를 循環시킨 경우에는 流量이 적은 경우 storage tank 內 上下 溫度差는 적으며 流量이 增加함에 따라 上下 溫度差는 增加하나 그 差異는 크지 않음을 볼 수 있었다. Fig.9,10 은 이것을 나타낸다.

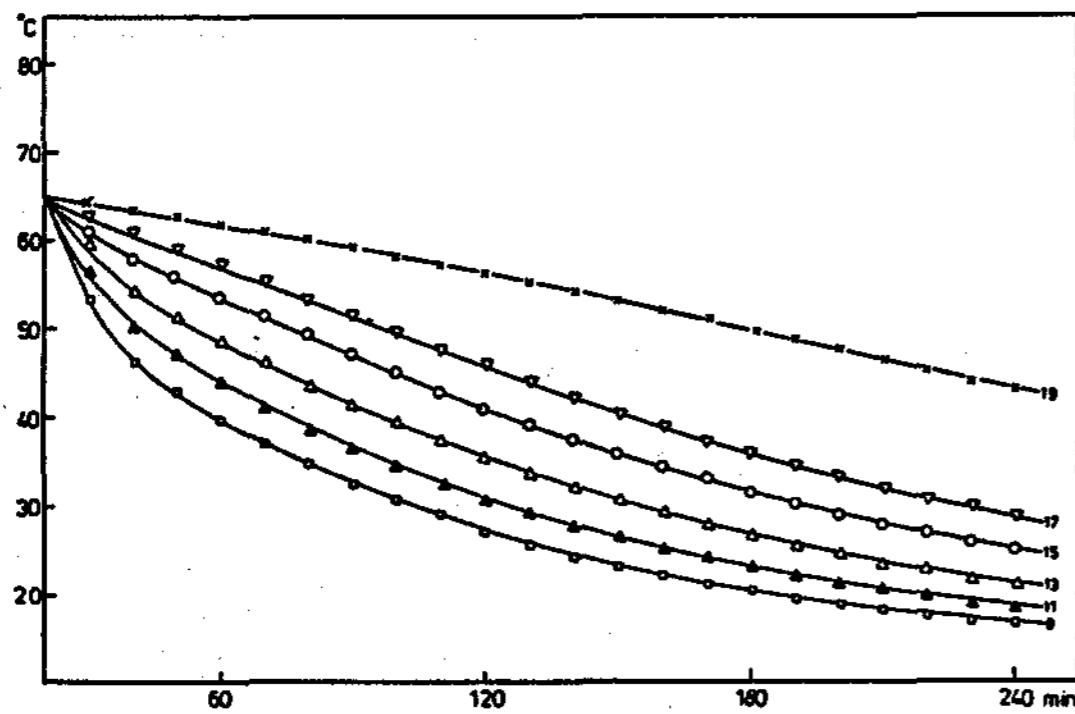


Fig. 9. Temp. on time in storage tank watered from bottom with flowrate 1308ml/min ID.17.05mm, OD.19.05mm, Interv. 100mm

Fig.11은 storage tank 內的 溫度가 65°C 에서 25°C로 내려가는데 걸린시간과 流量과의 關係를 나타내는데 5000 ml /min 以上에서는 熱交換性能이 크게 增加하지 않음을 볼 수 있었다. 上向式 熱媒 體 循環의 경우가 下向式 熱媒 體 循環의 경우에 比하여 storage tank 內 下部의 溫度降下가 빠르며 上部로 올라갈수록

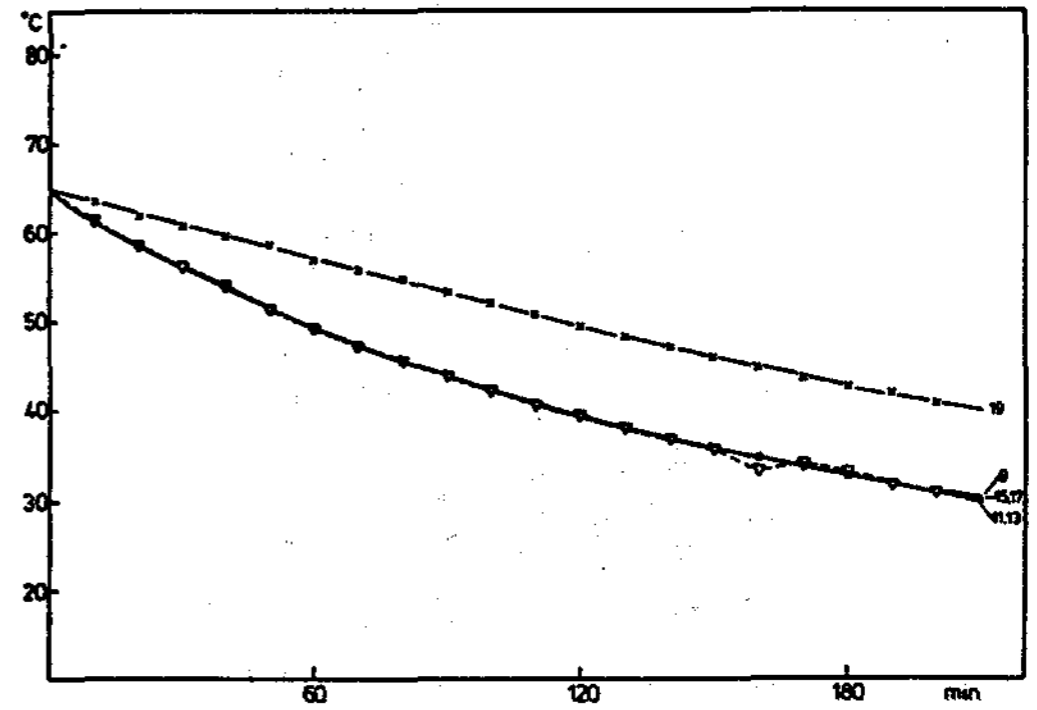


Fig.10. Temp. on time in tank watered from top with flowrate 1580ml/min ID.11.1mm, OD.12.7mm Interv.100mm

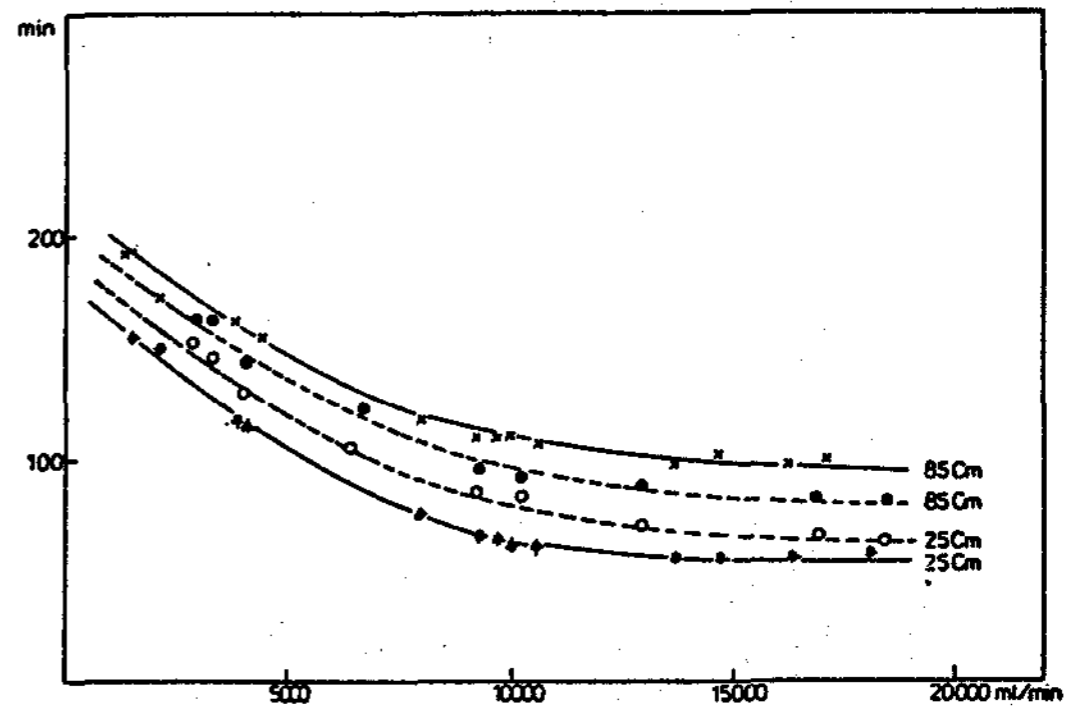


Fig.11. Time on flowrate. Temp. of storage tank was decreased from 65°C to 25°C ——— watered from top ——— watered from bottom

느림을 볼 수 있었다.

5.2 Tube Space에 따른 熱交換性

Tube space에 依한 影響은 주로 storage tank 內的 上下 溫度差에 影響을 미치며 tube space가 작을수록 上下 溫度差가 작음을 알 수 있었는데 이는 下部 helical coiled tube를 設置하지 않은 곳에서는 上下 溫度差가 나지않고 helical coiled tube를 設置한 곳에서만 溫度差가 생기며 熱傳導率이 빠름에 起因된다. Fig. 12, 13은 이것을 보여준다.

熱交換은 helical coiled tube 下部쪽으로 일어나며 上向式인 경우 管아래에서 甚한 溫度의 fluctuation을 볼 수 있었고 下向式의 경우에는 그러한 현상이 적었는데 下向式의 경

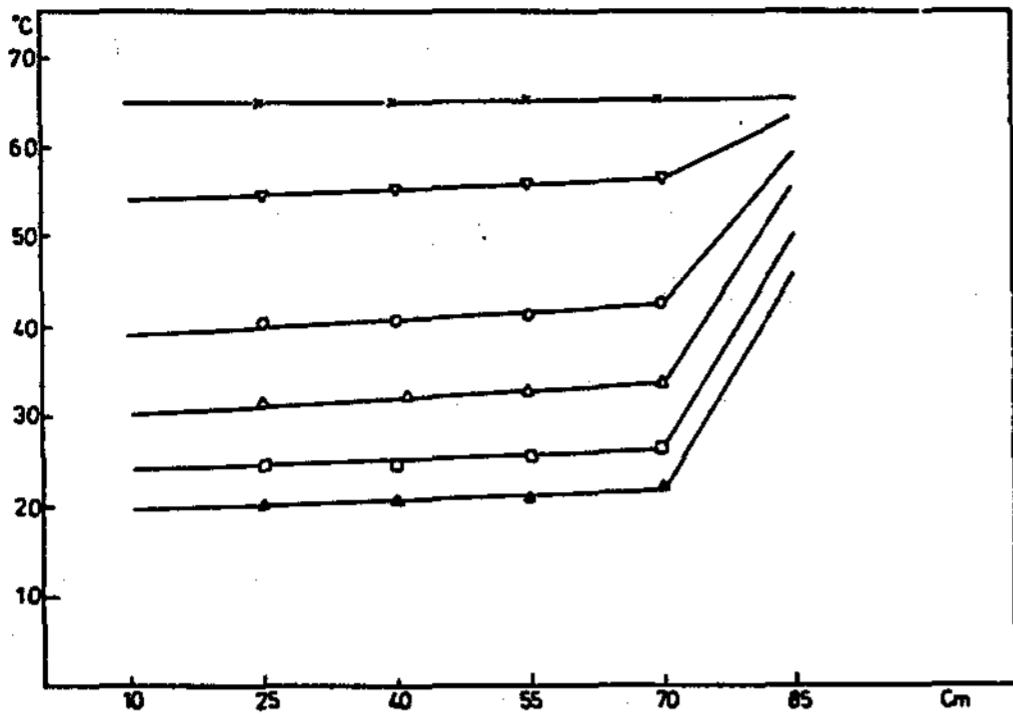


Fig.12. Temp. on a height of storage tank for time interv 15min watered from top with flowrate 9150ml/min ID.11.1mm, OD12.7mm Interv. 100mm

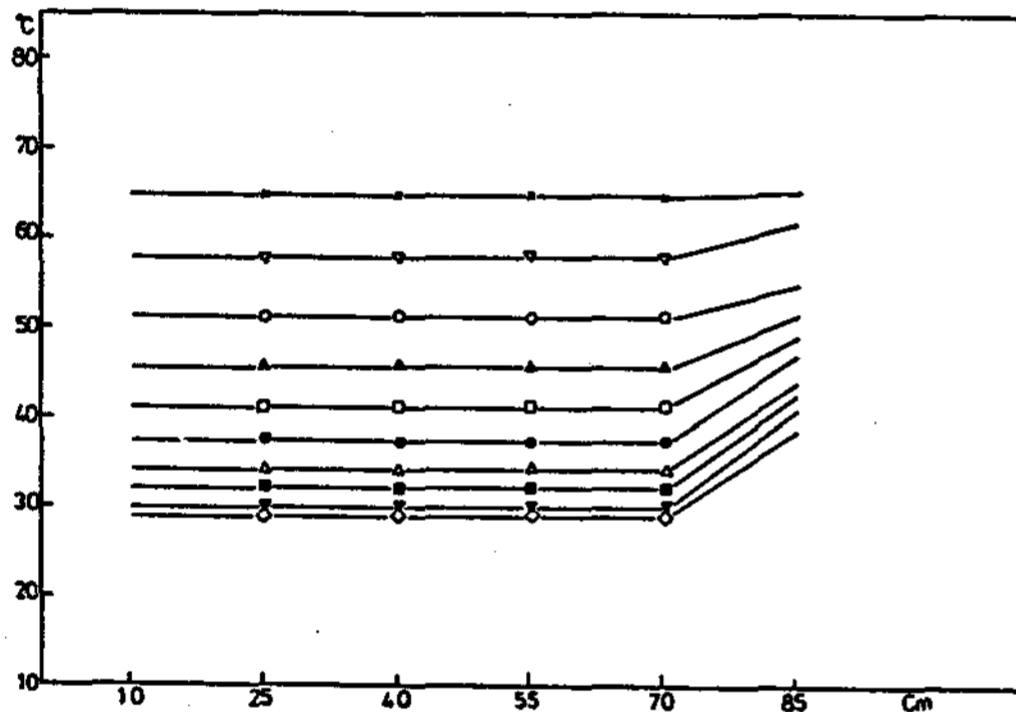


Fig.13. Temp. on a height of storage tank or time interval 15min watered from top with flowrate 3930ml/min ID.11.1mm, OD.12.7mm Interv. 50mm

우 上部 turn 보다 下部 turn에서의 溫度가 낮기 때문임을 알 수 있다. Fig.14, 15, 16 17은 이러한 현상을 보여주고 있다.

5.3 管徑에 따른 熱交換性能

流量이 적은 경우에는 helical coiled tube 入口近處에서 熱交換이 일어나는 比率이 크며 管徑이 큰 경우가 管徑이 작은 경우보다 helical coiled tube 入口近處에서 熱媒體의 接觸 傳熱시간이 길어지는데 5000ml/min 以下에서는 管徑이 큰 경우가 管徑이 작은 경우보다 약간 높음을 나타냈지만 시간이 경과함에 따라 그 差異가 작아졌고 그 以上の 流量에서는 거의 差異가 나지 않음이 觀察되

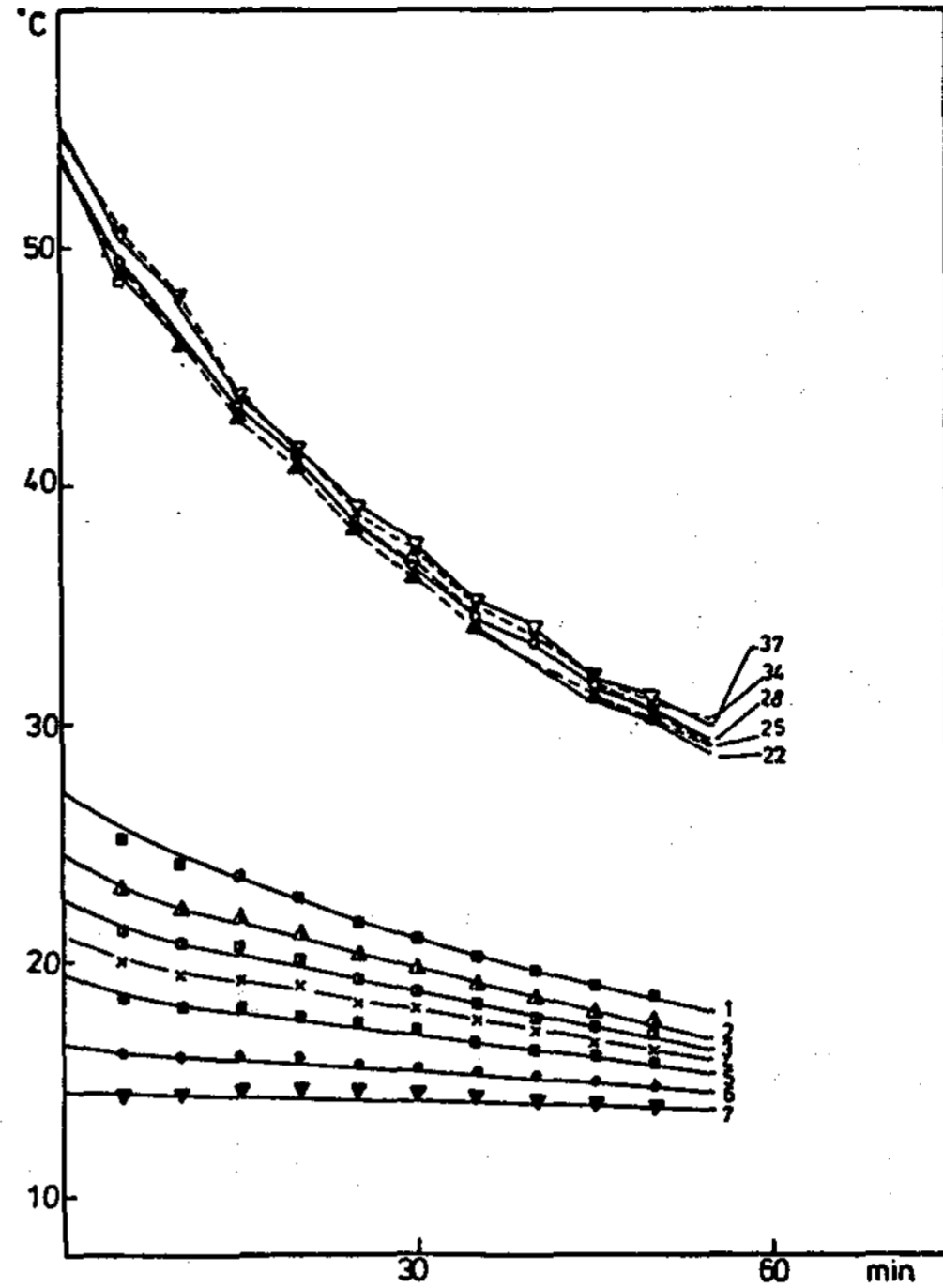


Fig.14. Temp. on a height of 1mm of tube watered from bottom with flowrate 11270ml/min. ID.11.1mm, OD.12.7mm Interv. 100mm

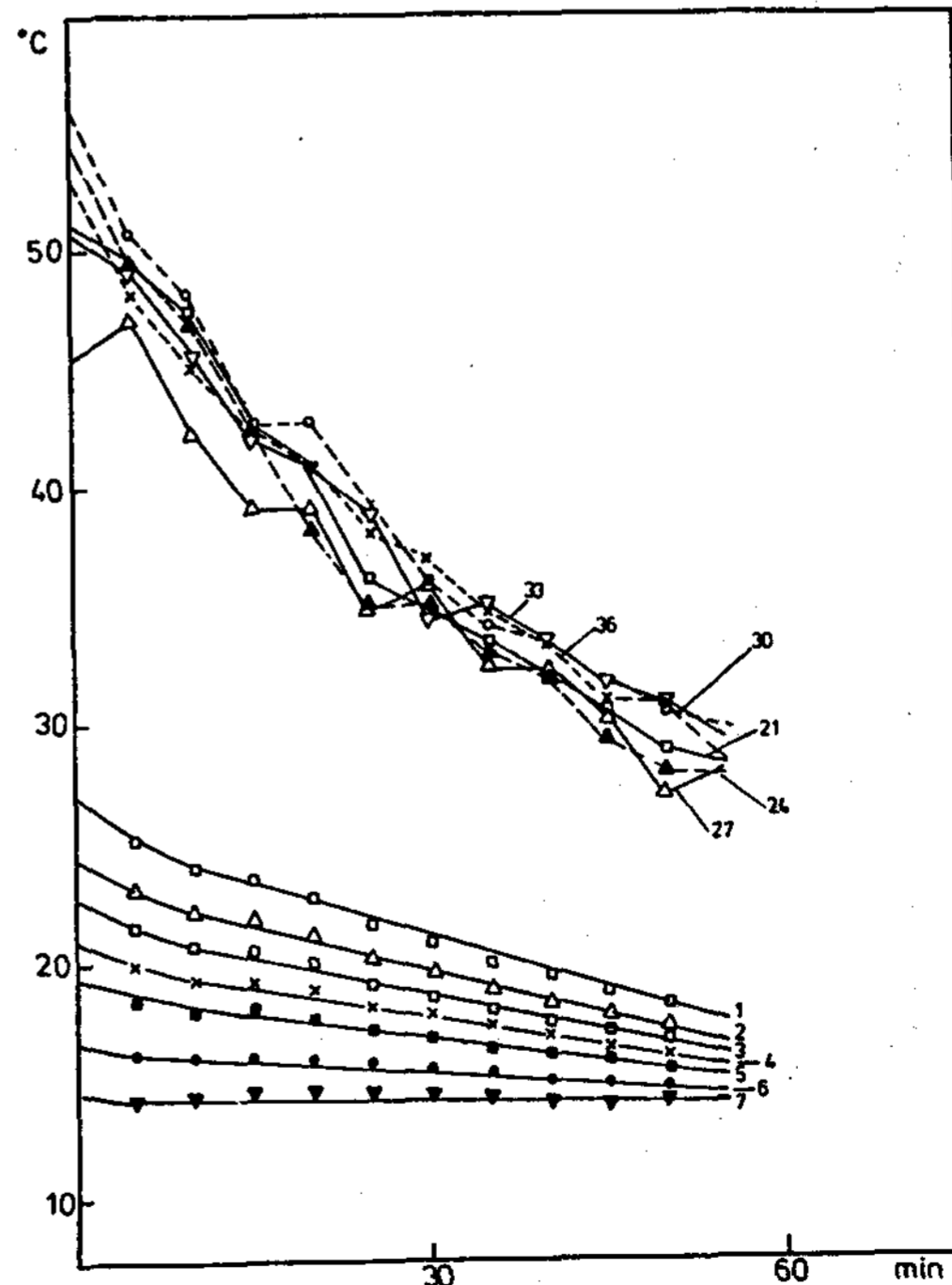


Fig.15 Temp. on a below of 1mm of tube watered from bottom with flowrate 11270ml/min ID.11.1mm, OD.12.7mm Interv. 100mm

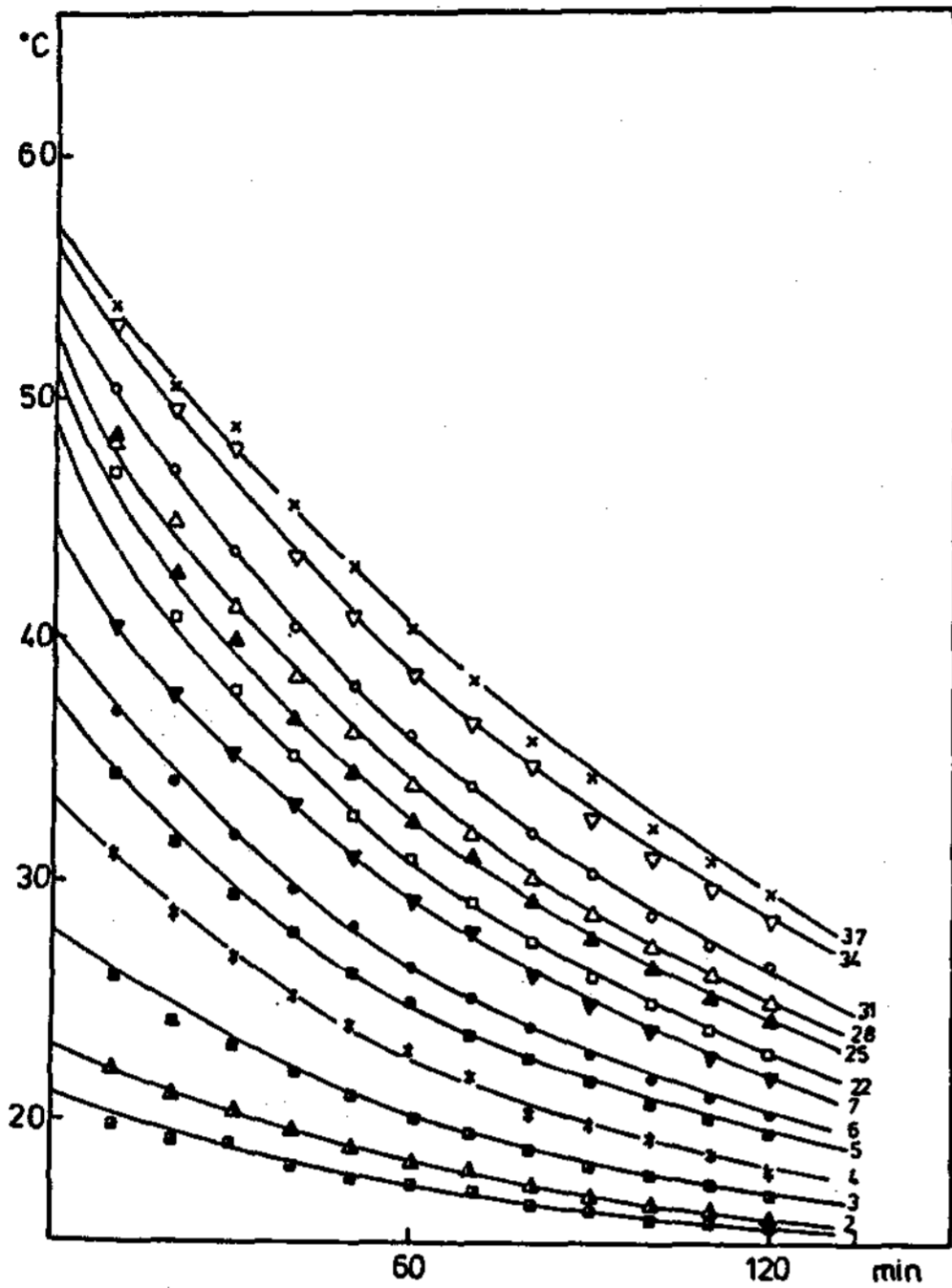


Fig.16. Temp. on height of 1mm of tube watered from top with flowrate 3250ml/min ID.11.1mm, OD.12.7mm Interv.100mm

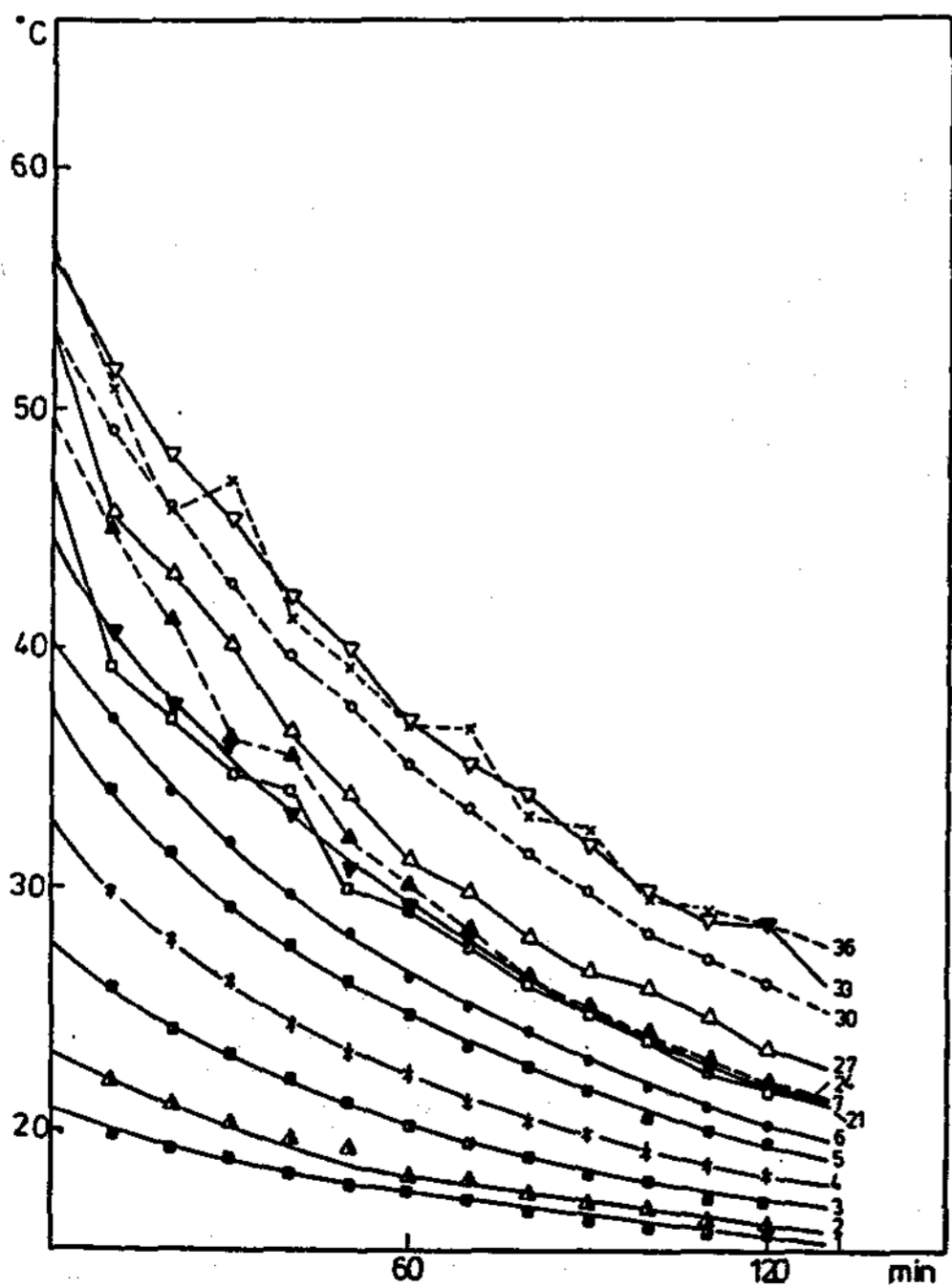


Fig.17. Temp. on a below of 1mm of tube watered from top with flowrate 3250ml/min ID.11.1mm, OD.12.7mm Interv. 100mm

었는데 이는 helical coiled tube內 溫度와 storage tank內 溫度와의 差에 依한 補償때문이며 流量이 많아질수록 熱交換量이 거의 같아 管徑에 依한 差異가 나지않는 것으로 추정된다. Fig. 18 ~ 23까지는 이것을 나타낸다.

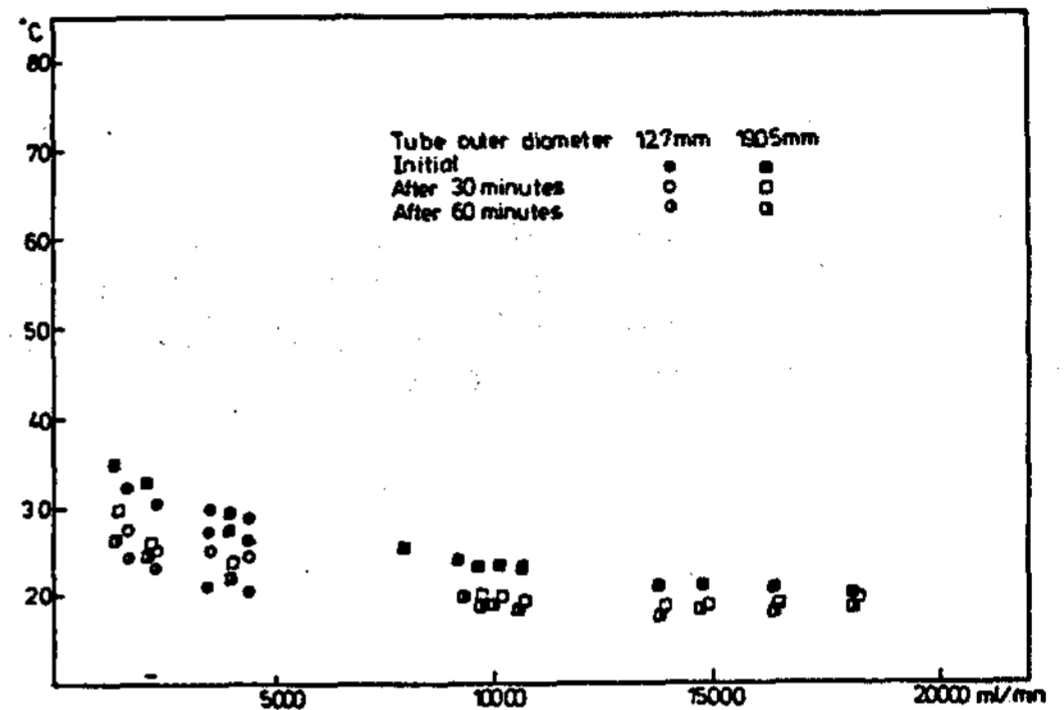


Fig.18. Temp. on flowrate in 1st turn of tube watered from bottom

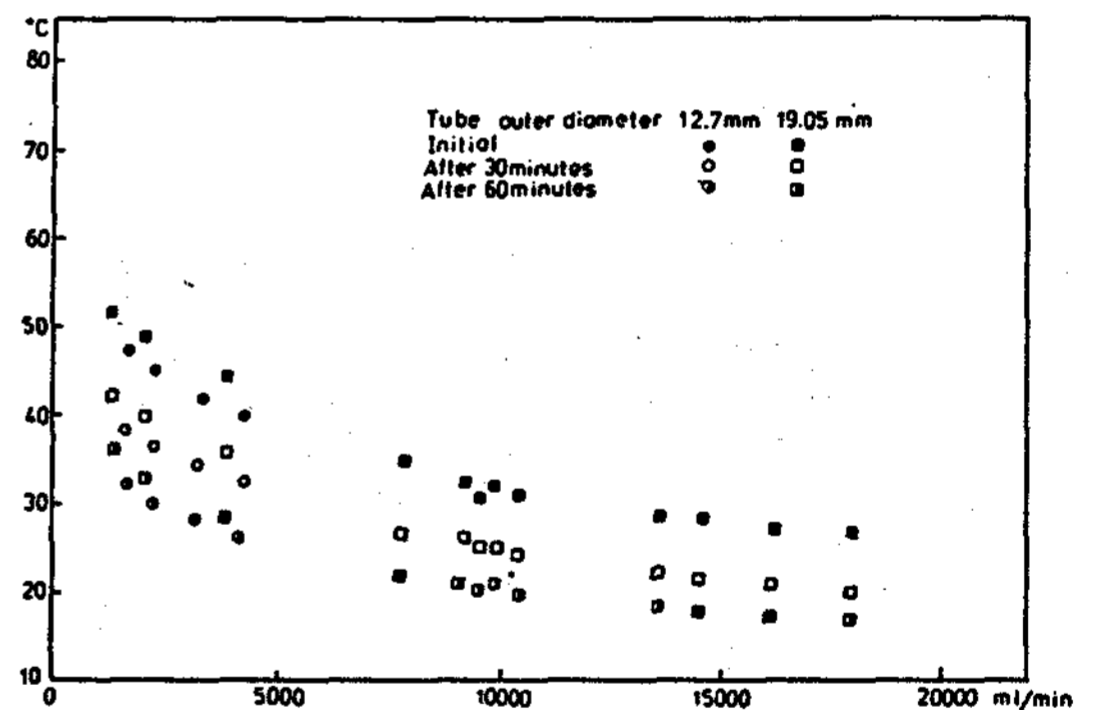


Fig.19. Temp. on flowrate in 4th turn of tube watered from bottom

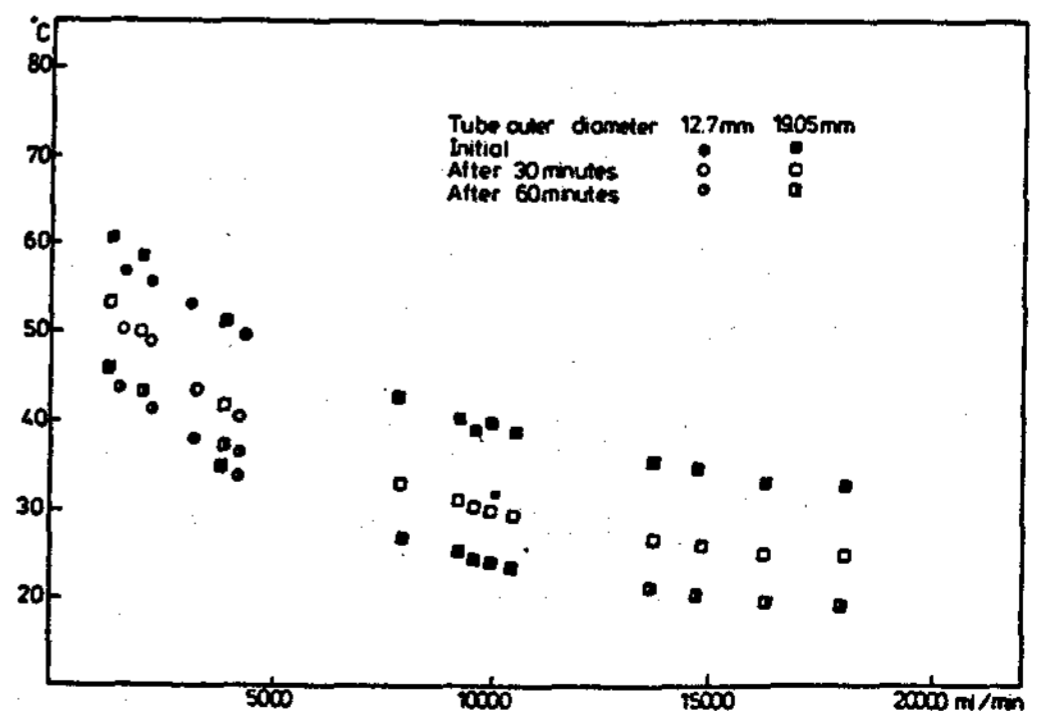


Fig.20. Temp. on flowrate in 7th turn of tube watered from bottom

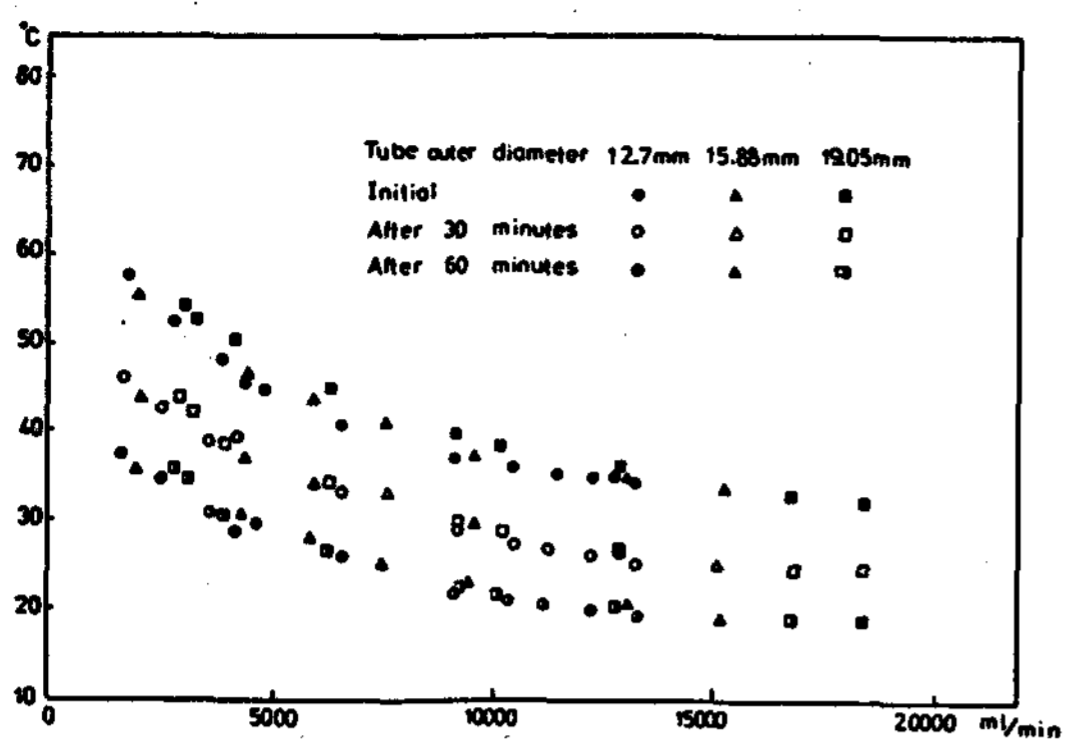


Fig. 21. Temp. on flowrate in 1st turn of tube watered from top

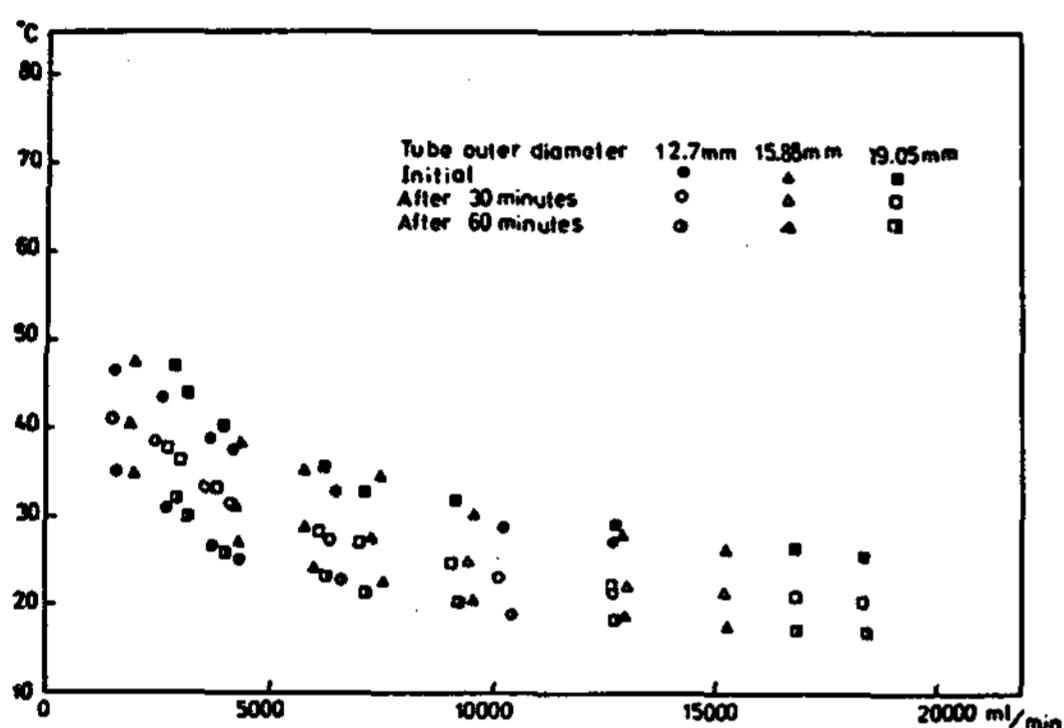


Fig. 22. Temp. on flowrate in 4th turn of tube watered from top

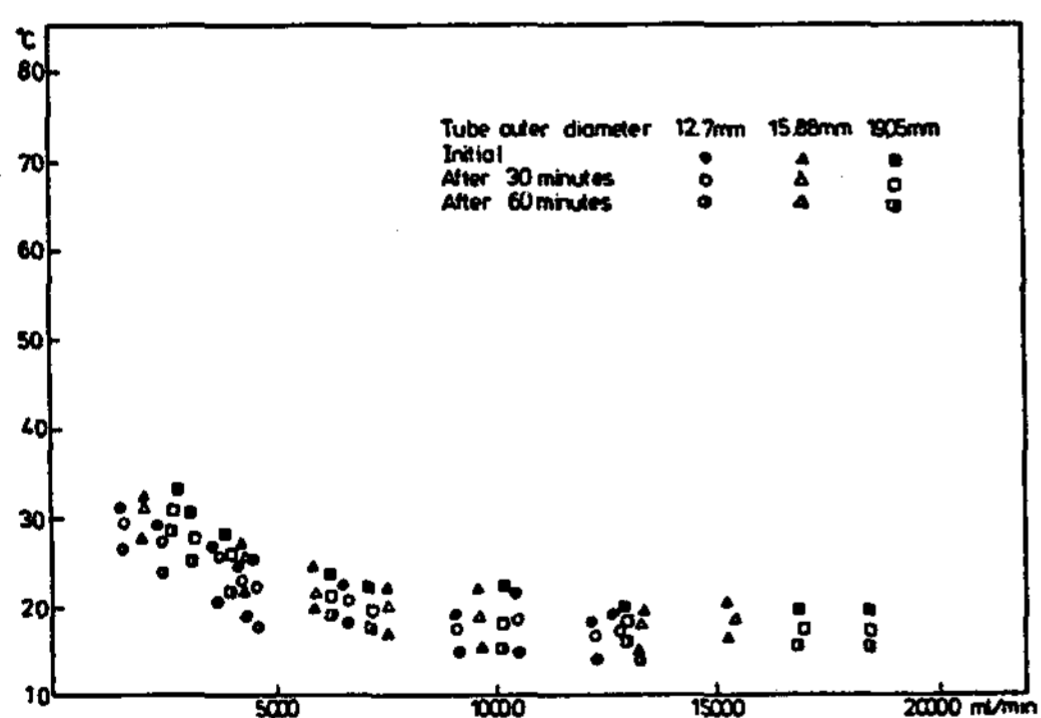


Fig. 23. Temp. on flowrate in 7th turn of helical coiled tube watered from top

5. 4 Turn에 따른 熱交換性能

입구에서 부터 turn이 增加할수록 總熱交換量은 增加하나 增加率은 減少하며 流量이 적을수록 입구쪽 turn에서의 熱交換率이 크며 流量이 增加할수록 turn사이의 熱交換率이 점차로 같아져 감을 볼 수 있었는데 이는 heli-

cal coiled tube 입구近處가 helical coiled tube 內 水溫과 storage tank 內 水溫과의 差가 제일커서 熱交換性能이 가장 좋기 때문이며 流量이 많아질수록 熱容量이 많아져 turn이 增加되어도 熱交換이 일어나는 率이 增加되기 때문임을 알 수 있다. 各 turn에서의 熱交換性能은 처음에는 上向式 熱媒體 循環의 경우가 下向式의 경우보다 입구쪽 turn

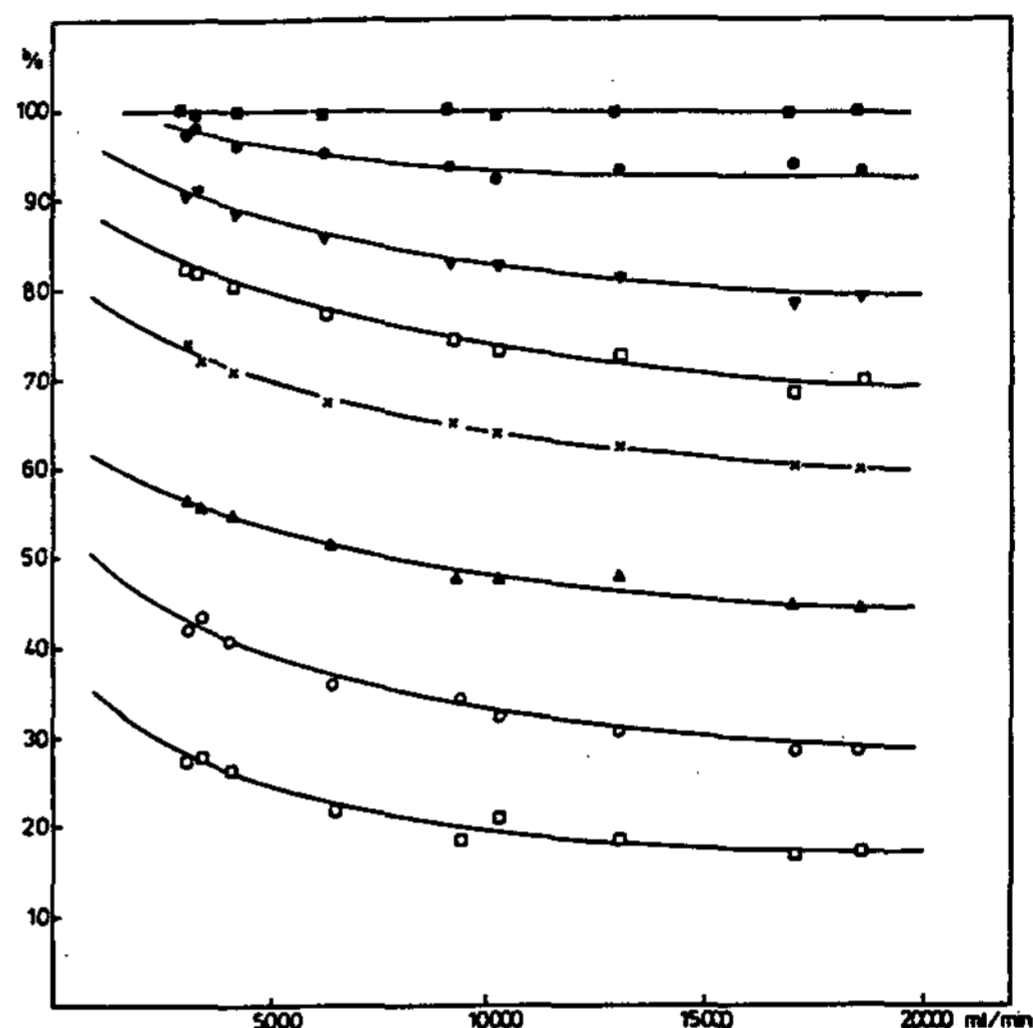


Fig. 24. Heat exchange rate on flowrate with temp. difference watered from top ID 17.05mm, OD 19.05mm Interv. 100mm Initial

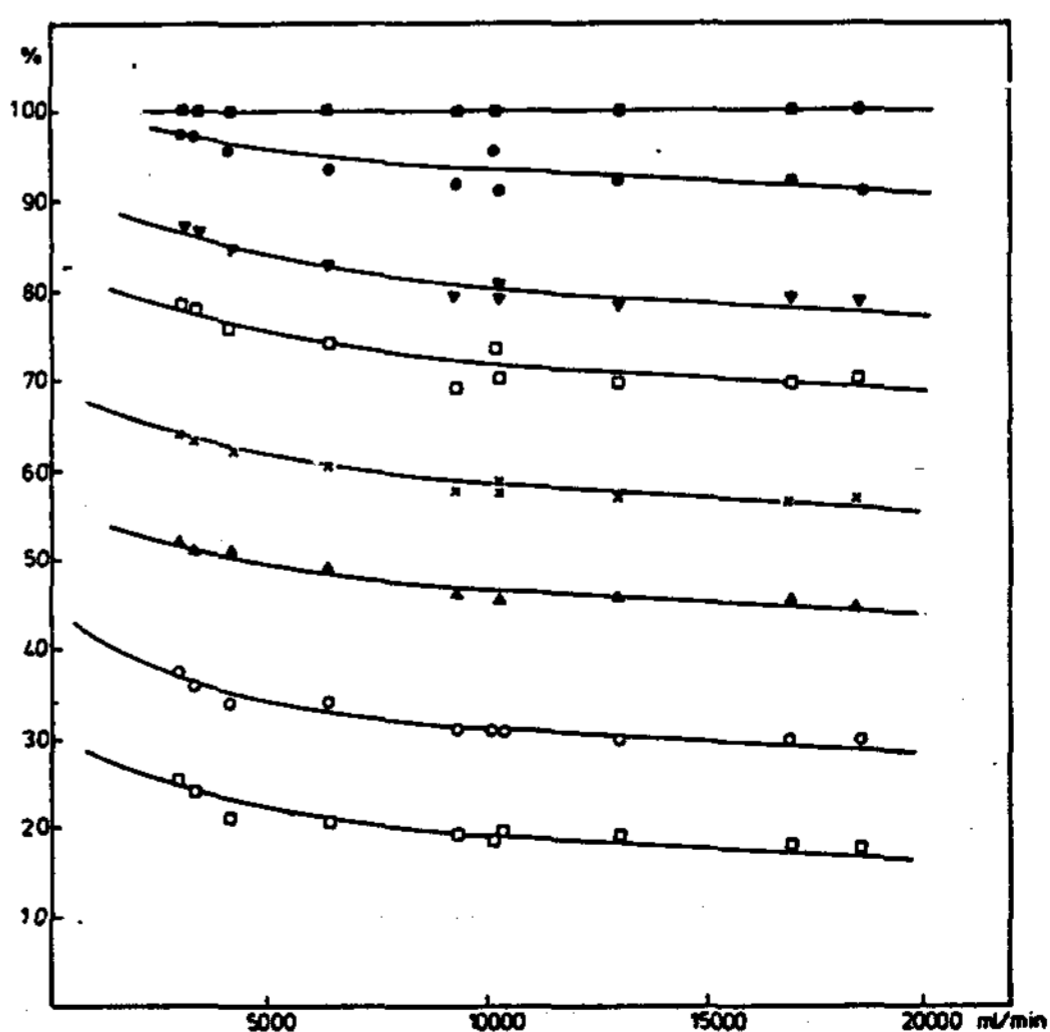


Fig. 25. Heat exchange rate on flowrate with temp. difference watered from top ID 17.05mm, OD 19.05mm, Interv. 100mm after 30min

에서의 熱交換性能은 크나 시간이 감에 따라 上部 turn 쪽으로 熱交換性能이 增加되어 감을 볼 수 있었다. Fig. 24 ~ 29까지는 이것을 나타낸다.

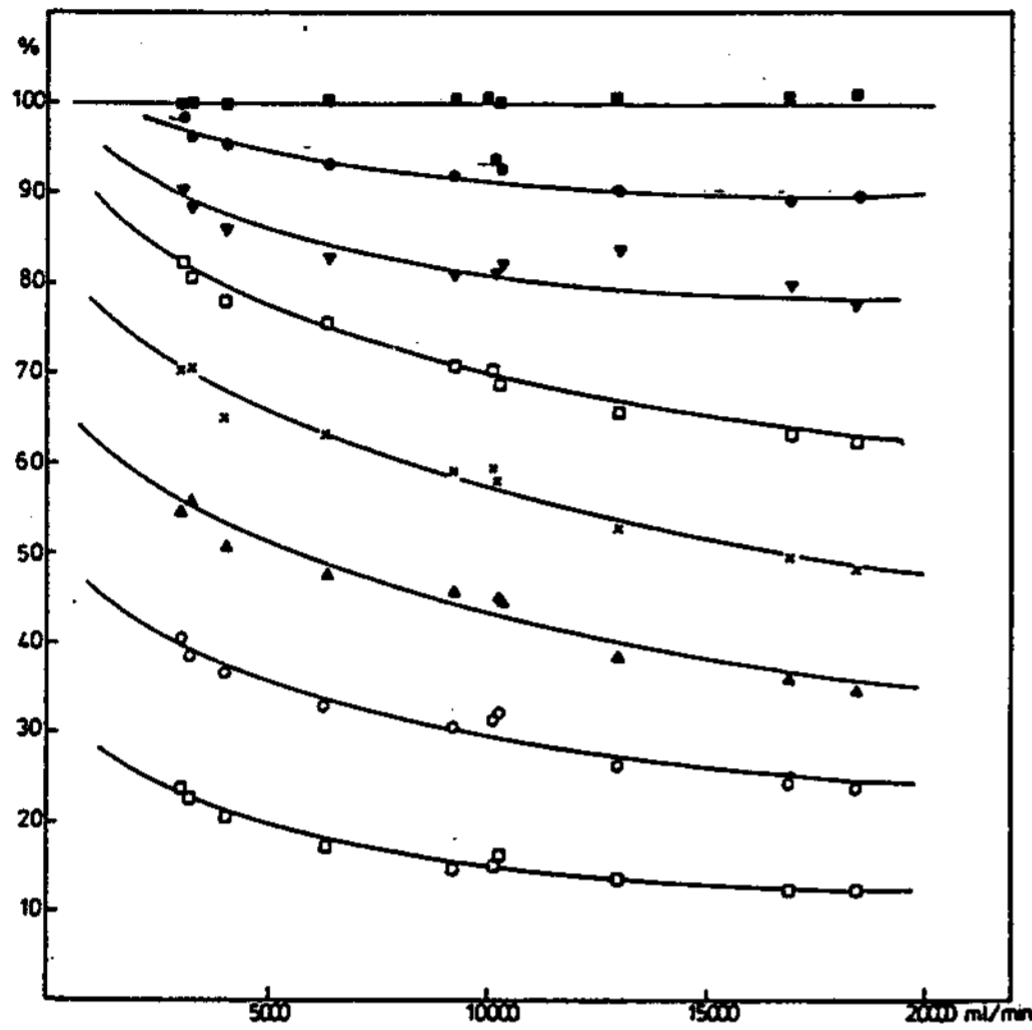


Fig. 26. Heat exchange rate on flowrate with temp. difference watered from top ID.17.05mm, OD.19.05mm Interv. 100mm after 60 min.

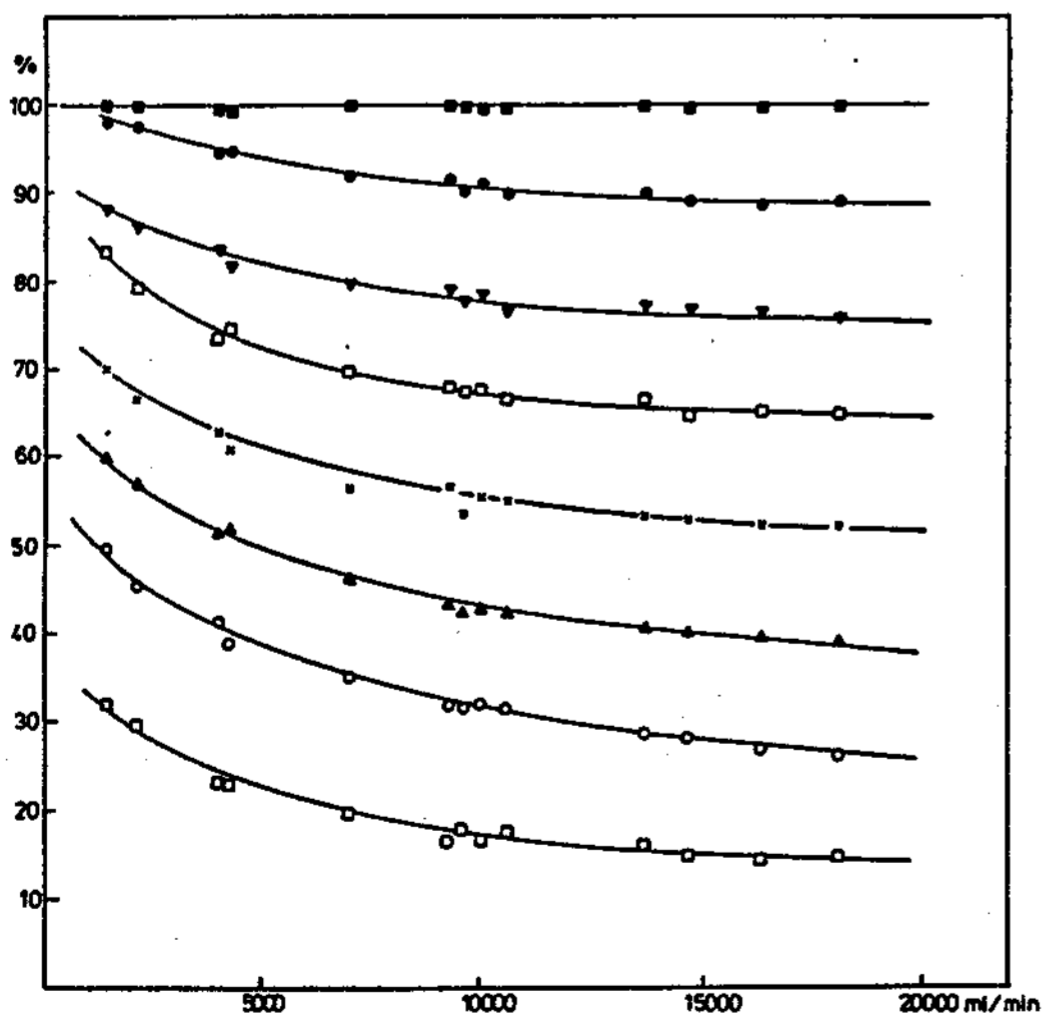


Fig. 27. Heat exchange rate on flowrate with temp. difference watered from bottom ID.17.05mm, OD.19.05mm, Interv. 100mm Initial

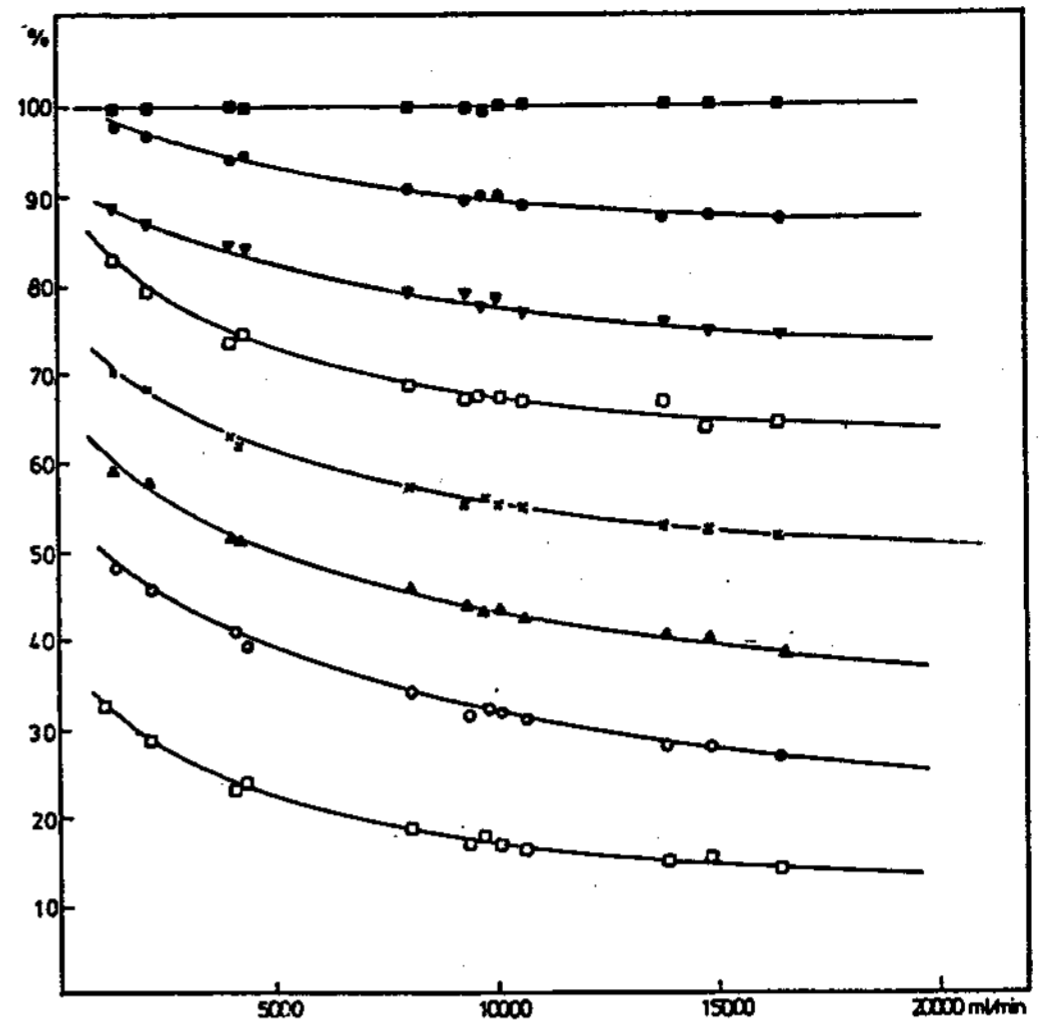


Fig. 28. Heat exchange rate on flowrate with temp. difference watered from bottom ID.17.05mm, OD.19.05mm, Interv. 100mm after 30 min.

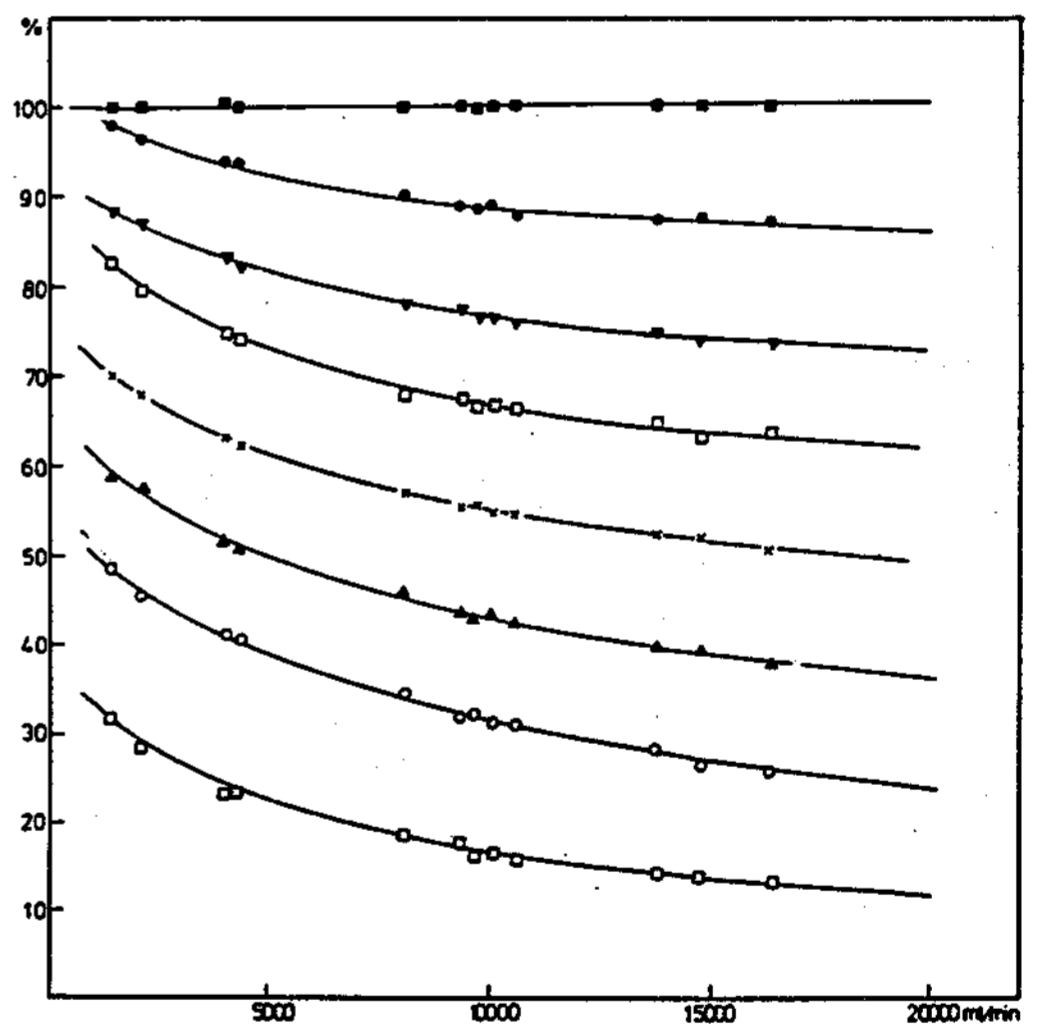


Fig. 29. Heat exchange rate on flowrate with temp. difference watered from bottom ID.17.05mm, OD.19.05mm, Interv. 100mm after 60min.

6. 結 論

Single loop solar water heating system을 이용한 storage tank에서 負荷側에 熱交換裝置를 設置한 경우 storage tank를

제작하고 copper 로 된 helical coiled tube 의 熱交換裝置를 設置하여 流量과 各部의 溫度를 測定하고 熱交換性能에 對하여 研究檢討하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 流量과 storage tank 內 流體의 溫度가 熱交換性能에 미치는 影響은 컷으나 管徑에 對한 影響은 적었다.

2. 熱媒體의 流量이 5,000 ml/min에서 最適임을 나타냈으며 그 以上에서는 熱交換性能의 增加率이 크지 않았다.

3. 入口近處에서 熱交換性能이 제일크고 上向式의 경우 時間이 경과함에 따라 차츰 上部 turn 쪽으로 熱交換性能이 增加되어 갔다.

4. 熱交換은 주로 管下部쪽으로 일어나며 下向式의 경우 下部 turn에서의 熱交換은 上部熱交換에 依한 tank 內 水溫의 影響을 받았다.

5. turn이 增加함에 따라 熱交換率은 增加했으나 그 增加幅은 減少했으며 流量이 작으면 熱交換裝置의 크기 및 turn數를 줄여도 熱交換量에는 별로 影響을 주지 않음을 알 수 있었다.

6. 5,000 ml/min 以下에서 管徑이 적은 경우 入口에서 먼쪽에서 熱交換이 일어났으며 流量이 크면 별 影響을 미치지 않았다.

References

- 1) Francis de Winter and John D. Horel, "Heat Exchanger Penalties in Single Loop Solar Water Heating Systems", Proc. Annual Meeting, AS/ISES pp. 715-718, Oct. 1978
- 2) Francis de Winter, "Heat Exchanger Penalties in Double Loop Solar Water Heating System", Solar Energy Vol. 17, pp. 335-337, 1975.
- 3) R. Chem, "Laboratory Tests of Six Solar Water Heating Systems", SESCOI-REGINA 82 p. 548, 1982
- 4) Ralph R. et al, "Heating of Fluid in Coils", Transactions pp. 13-17, 1950
- 5) R.K. Prabhudesai and S.M. Shah, "Heat Transfer through Helical Coils", Transactions IICHE Vol. XII pp.10-17, 1959-1960
- 6) J.E. Ferguson and H.F. Sullivan, "Optimization of Several Solar Domestic Hot Water System Parameters", SESCOI-REGINA 82 pp. 536-541, 1982
- 7) S.A. Klein, W.A. Beckman et al, "A Design Procedure for Solar Heating Systems", Solar Energy Vol. 18 p.15, 1976
- 8) A Whiller, "Solar Energy Collection and its Utilization for House Heating", SCD Thesis in Mechanical Engineering MIT Cambridge, Mass., 1953
- 9) W.M. Kays and A.L. London, "Compact Heat Exchangers", 2nd. Ed. McGraw Hill NY 1964