

蓄熱水槽의 性能에 關한 實驗的 研究

김 시 범 * , 김 효 경 **

Experimental Study on the Performance of Heat Storage Tank Using Water

Kim Si Peom, Kim Hyo Kyung

Abstract

An experimental study on the storage tank which uses sensible heat of water is done. The influence of inlet flow rate (Re), the difference between initial temperature and inlet water temperature (Gr) and the location of inlet and outlet on the performance of storage tank is studied.

Development of stratification is examined by measuring the transient temperatures of 36 points inside the tank. Measured values are transformed to the dimensionless parameters in order to calculate the temperature efficiency of storage tank.

In the presence of combined natural and forced convection, the development of stratification becomes clearer and thus the efficiency becomes higher, as Gr/Re^2 increases.

記 號 說 明

d : 入口 및 出口에서의 管의 直徑

Gr : Grashof 數

H : 槽의 높이

L : 槽의 幅

Q : 入口에서의 流量

Re : Reynolds 數

t : 時 間

T : 溫 度

ΔT : 溫 度 差

Te : 出口溫度

Ti : 入口溫度

te : 出口溫도와 入口溫도의 差가 ΔT_0 의 0.9에 이르는 時間 [3]

ΔT_0 : 時間 零에서 Te와 Ti의 差

η_t : 溫 度 效率

* 서울大學校

** 正會員, 서울大學校

1. 結 論

熱 需要側의 負荷變動이 熱 供給側과 時間的으로 어긋나 있는 境遇 또는 廢熱을 回收하는 方法의 하나로서 蓄熱裝置를 使用하게 된다. 特히 太陽熱을 利用하는 system에서는 太陽熱의 稀薄性, 不確實性 및 間歇性으로 因해서 蓄熱槽의 使用이 不可避하며 全體 system의 效率 및 經濟性이 蓄熱槽의 性能에 依해서 크게 左右된다.

蓄熱의 方式으로는 相 變化 物質의 顯熱 및 潛熱을 利用하는 方式, rock bed를 利用하는 固體 蓄熱 方式 및 물의 顯熱을 利用하는 蓄熱水槽(hot water storage tank) [1] 등이 있다.

그 중에서 蓄熱水槽는 毒性이 없고 값이 低廉하여 많은 量을 쉽게 얻을 수 있으며 容積 比熱이 대단히 크고($1,000 \text{ Kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$), 蓄熱 媒體 自體의 移動에 依해서 energy가 出入하므로 다른 蓄熱方式에서 있게 되는 蓄熱媒體와 出入 流體 사이의 溫度差를 除去할 수 있는 利點이 있다. [2] 그러므로 本 論文에서는 물을 使用하는

蓄熱水槽의 性能에 관한 實驗의 研究가 行하여졌다.

蓄熱 媒體로서 물을 使用하는 顯熱 蓄熱에 관한 研究로는 1975年 A·Cabelli가 水槽 内部를 二次元 流動으로 假定해서 溫度 및 速度 分布를 數值解析으로 求했으며 [3] 1976年 Lavan과 Thomson이 實驗을 통해서 圓筒形 水槽에서의 現象을 研究하였고 [4] 中島 康孝는 蓄熱水槽의 動特性을 水温의 過度應答과 關聯이어서 研究하였다. [5]

本 論文에서는 矩形 斷面을 가지는 蓄熱水槽 内の 溫度分布를 流量 및 入出口 溫度差의 變化에 따라 實驗的으로 求해서 溫度의 層化 現象이 蓄熱水槽의 性能에 미치는 影響을 研究하였으며 自然 對流과 強制 對流가 同時에 일어날 때 現象支配因子로서의 無次元數 Gr/Re^2 의 變化에 따르는 出口 溫度의 變化를 追跡하여 槽內的 流動을 分析하였으며 完全 押出流과 比較된 溫度 效率이 計算되었다.

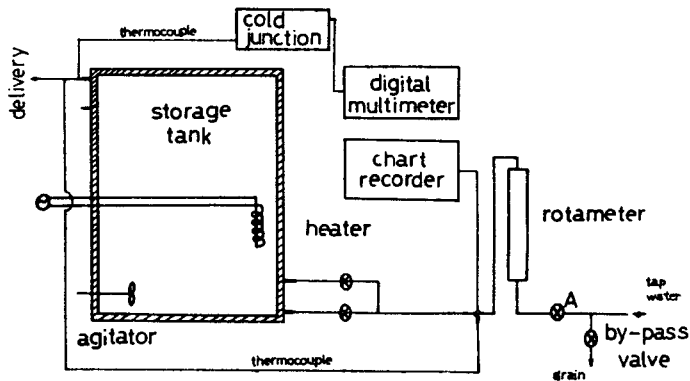


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

2. 實驗裝置 및 方法

2. 1 實驗 裝置

Fig. 1은 實驗裝置의 構成을 보여주고 있다. [6] 實驗에 使用된 蓄熱水槽의 材質은 鋼板으로서 $18''(W) \times 18''(D) \times 36''(H)$ 의 容積을 가

지며 外壁에서의 Biot 數를 작게 하기 위해서 styrofoam板으로 斷熱하였다. 水槽 内部의 流動을 二次元으로 假定하고 内部 溫度를 測定하기 위해 copper constantan 熱電對를 水槽의 中央 斷面의 36點(6×6)에 配列했다.

入口 및 出口 pipe 의 直徑은 各各 1" 이며, 入口의 位置 變化에 따르는 影響을 實驗하기 爲해 上端에서 4" 밑에 出口를 하나 더 두었으며 下端으로부터 各各 2", 6" 上部에 入口를 2개 설치하였다.

實驗을 爲한 溫水의 準備에는 3kw 容量의 heater 를 使用하였으며 若干의 攪拌 後에 内部의 溫度 分布는 거의 均一하였고 位置에 따르는 誤差는 0.3℃ 정도 였다.

2.2 實驗 方法

實驗을 始作하기 前에 流入水의 溫度를 定常的으로 하기 爲해서 밸브 A를 닫고 by-pass 밸브를 開어서 外部配管 內의 水를 除去하였다. 入口와 出口 溫度差의 時間에 따르는 變化의 連續인 追跡에는 X-Y chart recorder 를 使用했다.

押出流와 比較하기 爲해서 주어진 入口 流量으로 빈 水槽를 채우는 데 必要한 時間 t_0 를 基準으로 하여 實驗 始作 後에 t_0 의 時間이 經過하면 終了되는 것으로 하였다.

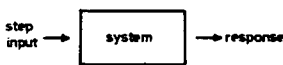


Fig 2. Input-output system for storage tank

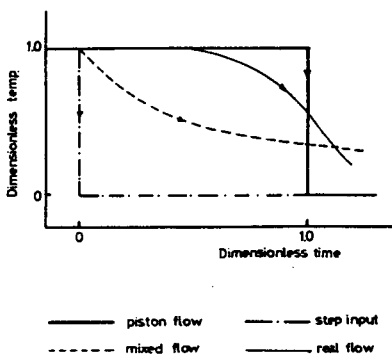


Fig 3. F-curve for step input

2.3 解析 方法

溫度的 層化 現象에 影響을 주는 因子로서 入口의 流量, ΔT , 및 入口와 出口의 相對的 位置들을 無次元化해서 Re, Gr 및 H/L 로 나타냈다. 여기서 $Re = \frac{4Q}{\nu d\pi}$ 이며 物性值는 入口溫度에서의 값이다.

水槽 內의 流動은 自然 對流와 強制 對流가 同時에 일어난는 形態이다. 이러한 流動을 支配하는 現象 因子로서 Gr/Re^2 을 取했는데 基本 支配 方程式을 無次元化 함으로써 얻어진다.[3]

蓄熱水槽의 效率를 定義하기 爲해 水槽 内部를 Fig. 2와 같은 系로 잡는다. F-曲線은 入口에서의 step input 에 對한 出口에서의 output 을 時間의 變化에 따라 表示한 것으로서 内部의 變化 狀態를 解析하는 데 利用된다. 初期에 step input 을 加했을 때 完全 押出流와 混合流에 對한 F-曲線은 Fig. 3에 나타나 있다. [5, 7] 實際의 流動은 完全 押出流와 混合流의 사이에 位置한다. 蓄熱水槽의 使用 狀態에 따르는 性能을 完全 押出流와 比較하기 爲해서 出口 水溫의 使用 可能한 限界值로 ΔT_0 의 0.9 배를 取했는데 이것은 空氣調和 裝置의 運轉 限界溫度와 聯關된다. [4]

이 限界值 이하로 溫度差가 減少하는 데 걸리는 時間을 t_L 이라 할 때 蓄熱水槽의 溫度效率 $\eta_t = \frac{t_L}{t_0}$ 로 取하면 η_t 는 完全 押出流에 對한 槽內의 實際 流動의 接近度를 나타낸다.

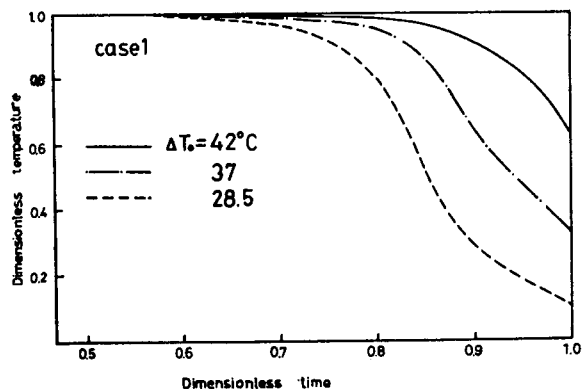


Fig. 4. Inlet-exit temperature difference, ΔT for $Re = 3,400$

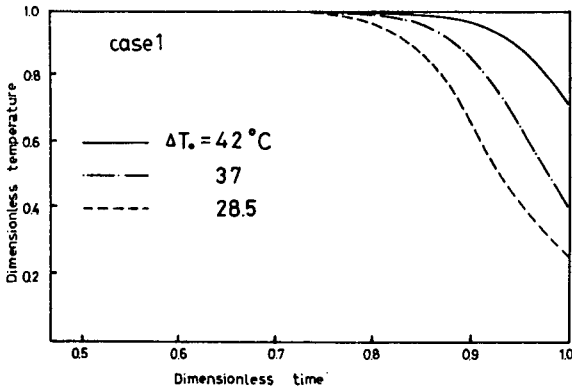


Fig. 5. Inlet-exit temperature difference, ΔT for $Re = 2,760$

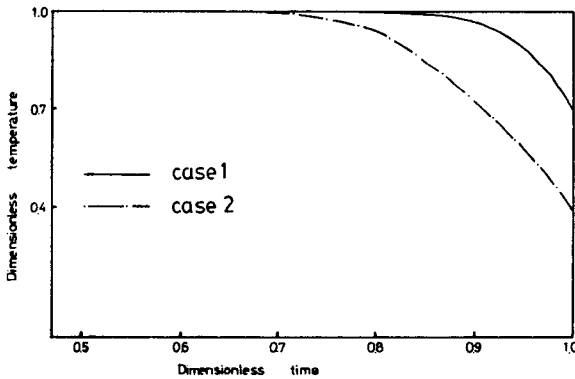


Fig. 6. Inlet-exit temperature difference, ΔT for $Gr/Re^2 = 0.44$

3. 結果 및 檢討

3. 1. ΔT 의 變化

Fig. 4에서 보듯이 同一한 入口 流量에서는 ΔT_0 의 增加에 따라서 曲線이 右側으로 移動하면서 無次元 溫度化 1의 값에 接近하는 데 이것은 Gr 의 增加에 따라 槽內에서의 流動이 押出流型으로 接近하기 때문이다. Fig. 5에서 右向도가 더욱 甚해지는 것은 Fig. 4보다 流量

이 작은 경우이므로 内部의 流動이 押出流로 接近해 감에 따라서 溫度의 層化 現象이 잘 發達하기 때문이다.

Fig. 6에서는 $Gr/Re^2 = 0.44$ 일때 實驗 1 ($H/L = 1.5$)과 實驗 2 ($H/L = 1.3$)에서의 ΔT 의 變化의 比較이다. 實驗 2에서 流入하는 물은 瞬間적으로 水槽 內의 各部分 中에서 自身이 가지는 溫度와 密度에 가장 가까운 값을 가지는 位置로 移動하려 하기 때문에 強한 混合이 일어나서 押出流보다는 좀 더 混合流에 가까워 지려는 傾向을 띠게 된다. 따라서 入口와 出口의 거리가 멀수록 좋은 層化 現象이 발달하였다.

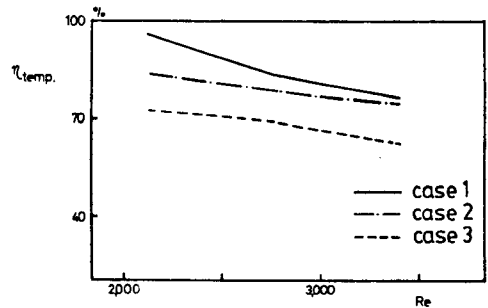


Fig. 7. Temperature efficiency vs. Re for $\Delta T_0 = 28.5^\circ C$

3. 2. 溫度效率

Fig. 7에서는 流量의 增加에 따르는 溫度效率의 變化를 나타내고 있다. 여기서 實驗 3은 $H/L = 1.15$ 이고 出口는 實驗 2와 같은데 入口는 4' 위에 위치한 경우이다. 流量의 增加에 比例적으로 效率은 減少하며 同一한 流量, 同一한 ΔT_0 일때는 實驗 1의 效率이 제일 좋았다.

3. 3. 内部의 溫度 分布

Fig. 8 ~ Fig. 10은 水槽 內의 溫度 分布를 나타내고 있다. 여기에서 보이는 것은 槽內의 물이 Gr/Re^2 의 增加에 따라서 좋은 層化 溫度를 維持한다는 點이다. 流動이 일어나는 槽內를 下部의 isothermal cold region, 上部의

isothermal hot region 및 急溫度勾配를 가지는 中間 混合 region의 三個로 區分할 수 있었다. 混合 region은 처음에 入口 位置에서 始作하여 점차적으로 上乘한다.

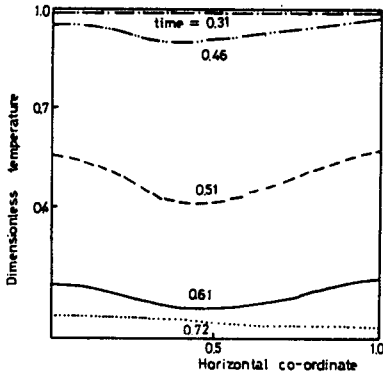


Fig. 8. Temperature distribution of midheight for case 1 - $Gr/Re^2 = 0.25$

Fig. 8은 實驗 1에서 $Gr/Re^2 = 0.25$ 인 경우 槽의 中間 높이에서의 時間에 따른 溫度 分布이다. 初期에는 isothermal hot region이었는데 時間의 經過에 따라 混合 region이 通過하기 때문에 急 勾配를 가지게 되며 後에는 isothermal cold region으로 되었다.

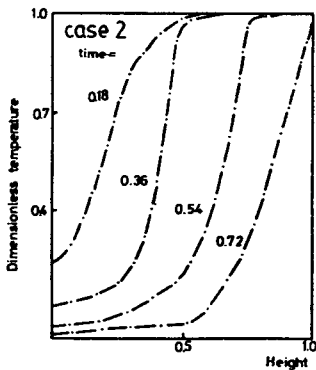


Fig. 9. Temperature distribution along vertical center line for case 2 - $Gr/Re^2 = 0.25$

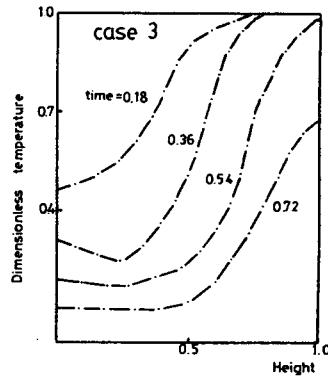


Fig. 10. Temperature distribution along vertical center line for case 3 - $Gr/Re^2 = 0.25$

Fig. 9 ~ Fig. 10에서는 中心線에 沿한 溫度 分布가 時間에 따라 나타나 있다. Fig. 9에서 높이에 沿해서 急한 溫度勾配를 보이고 있는데 이것은 層化溫度의 結果이다. Fig. 10은 實驗 3의 경우로서 冷水의 流入口가 實驗 2에서 보다 上部에 있기 때문에 밑 部分에서 生じた 溫度의 逆轉現象이 持續되어서 溫度效率의 현저한 減少를 가져온다. 上部에서는 如前히 急한 勾配가 中心線을 沿하여 發達하고 있다.

4. 結 論

矩形 斷面을 가지는 蓄熱水槽에 채워진 溫水를 長期間 初期 高溫 狀態를 維持하면서 押出하기 위한 研究를 했다. 強制對流 및 自然對流 現象이 일어나는 水槽 內的 流動을 實驗的으로 研究하여 溫度의 層化現象이 水槽의 溫度效率을 向上시키는 結果를 얻었다.

Gr/Re^2 의 增加에 따라서 流動은 押出流의 形態로 接近하였고 效率도 增加했다.

入口, 出口의 位置가 各各 最下端, 最上端일 때 效率이 最大가 되며 入口의 位置가 上乘할 수록 效率이 急激하게 減少한다.

層化된 溫度分布로 因해 垂直 中心線에 沿해서 急한 溫度變化가 있다.

參 考 文 獻

- 1) H. Buchberg and J. R. Roulet, Simulation and Optimization of Solar Collection and Storage for House Heating, Solar Energy 12, 31 - 50 (1968).
- 2) J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Energy Thermal Process, Wiley (1974).
- 3) Cabelli, Storage Tank - Numerical Experiment, Solar Energy 19, 45 - 54 (1977).
- 4) Z. Lavan and J. Thompson, Experimental Study of Thermally Stratified Hot Water Storage Tanks, Solar Energy 19, 519 - 524 (1977).
- 5) 日本太陽エネルギー學會編, 太陽エネルギーの基礎と應用, 113 - 140 (1978).
- 6) R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot, Transport Phenomena, 473 - 477 (1960).
- 7) O. Levenspiel, Chemical Reaction Engineering, Wiley (1972).