

# 시멘트-모래-파라핀 왁스 混合物을 利用한 蓄熱에 關한 研究

俞 皓 善\* 盧 承 卓\*\*

## A Study on the Latent Heat Storage Unit Using Cement-Sand-Paraffin Wax Mixture

Ho Seon Yoo and Sung Tack Ro

### Abstract

In order to enhance the thermal energy storage capacity of cement mortar and to improve the effective thermal conductivity of paraffin waxes, cement-sand-paraffin wax mixture was investigated.

By means of finite difference method, the transient temperature distribution in a hollow cylinder with phase change using average composite properties was obtained, and compared with experimental results.

It was shown that the heat absorbed by mixture with 25% paraffin fraction was as much as 50% more than either a concrete mortar or pure paraffin wax in the case of  $\Delta T = 18.25^\circ\text{C}$ .

### 記 號

- |  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| A 差分方程式의 係數  | $k_w$ 파라핀 왁스의 熱傳導率                |
| B 差分方程式의 係數  | L 潛 熱                             |
| $C_i$ 差分方程式의 係數  | $\ell$ 蓄熱槽의  길이                   |
| c 比 熱  | N 空間 格子點의 數                       |
| D 蓄熱槽의 外徑  | P 差分方程式의 係數                       |
| d 蓄熱槽의 內徑  | Q 差分方程式의 係數                       |
| $K_0$ 無次元化된 潛熱量  | $Q_{cm}$ 시멘트-모래 混合物의 蓄熱量          |
| $k$ 熱傳導率   | $Q_{mixture}$ 시멘트-모래-파라핀 混合物의 蓄熱量 |
| $\bar{k}$ 混合物의 有效 熱傳導率(effective thermal conductivity) | $Q_{c,p}$ 無次元化된 蓄熱能力              |
| $k_{cm}$ 시멘트-모래 混合物의 熱傳導率                              | $Q_L$ 無次元化된 潛熱에 依한 蓄熱量            |
|  | $Q_s$ 無次元化된 顯熱에 依한 蓄熱量            |
|  | $q_{c,p}$ 蓄熱能力                    |
|  | $q_L$ 潛熱에 依한 蓄熱量                  |
|  | $q_s$ 顯熱에 依한 蓄熱量                  |

\* 서울大學校 大學院

\*\* 正會員, 서울大學校 工科大學

### 1. 緒 論

熱에너지의 效率의 利用을 爲하여 蓄熱은 매우 重要한 役割을 하며 油類波動 以後 近來 몇 年間 여러 形態의 蓄熱方法[1]이 活潑히 研究되어 왔다. 이 中에서 潛熱을 利用한 蓄熱은 顯熱을 利用한 蓄熱에 比해 蓄熱槽의 容積을 줄일 수 있고 必要한 熱을 一定한 溫度에서 供給할 수 있는 利點을 갖는다. 特히 낮은 溫度에서 廢棄되는 熱이나 太陽熱을 效果的으로 冷暖房等에 利用하기 爲하여 파라핀 왁스(paraffin wax), 黃酸나트륨水化物( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), 鹽化칼슘水化物( $\text{Ca}_2\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )等과 같은 低融點 物質의 潛熱을 利用하는 것이 바람직하다. 더우기 파라핀 왁스는 工業用인 境遇 經濟性이 있고 다루기 쉬우며 化學變化나 毒性이 없고 適當한 融點과 큰 潛熱을 가지며 反復使用에도 再現性(reproducibility)이 좋다. 그러나 熱傳導率이 낮아서 熱交換效果가 나쁘며 過冷現象이 憂慮된다.

이러한 點을 補完하기 爲해서 熱傳導率이 매우

큰 金屬板[2]이나 金屬粉末로 熱의 通路를 만들어 주기도 하나 經濟性이 問題가 된다. 한편 顯熱의 蓄熱物質로 使用되는 시멘트 모르타르는 파라핀 왁스에 비해 20~30 倍의 比較的 높은 熱傳導率을 갖고 經濟性이 있으며 簡單이나 比熱이 작아서 蓄熱量이 작으므로 파라핀 왁스의 熱傳達效果를 높이고 시멘트 모르타르의 蓄熱效果를 높이기 爲해 이들을 어떤 形態로 混合하여 利用하는 것이 좋다. R. D. Godfrey 와 S. A. Mummma[3]는 시멘트 모르타르를 母體로 하여 파라핀 왁스를 含入시킨 蓄熱槽을 研究하였으며 實驗을 通하여 파라핀 왁스가 體積比로 最高 30% 까지 含入될 수 있고, 파라핀 왁스의 體積比에 따른 蓄熱量을 보여주고 있다.

本 論文에서는 시멘트·모래·파라핀 왁스를 混合한 物質의 中空圓筒에서의 蓄熱에 關하여 다루었다. 즉 熱供給이 가운데 圓筒속에서 融點보다 높은 一定한 溫度로 이루어지고 外壁은 斷熱된 形象이다.

一般的으로 圓筒座標系에서 相變化를 隨伴하

R 差分方程式의 係數

$R_i$  中空圓筒의 內徑

$R_o$  中空圓筒의 外徑

$R_T$  相變化端의 位置

$r$  半徑方向의 變數

T 溫度

$T_i$  初期溫度

$T_o$  供給溫度

$T_m$  融點溫度

$\Delta T$  初期溫도와 供給溫도의 差

$t$  無次元化된 時間變數

X 差分方程式의 係數

$x$  無次元化된 半徑方向의 變數

$x_T$  無次元化된 相變化端의 位置

Y 差分方程式의 係數

y 파라핀 왁스의 體積比

Z 差分方程式의 係數

그리스 文字

$\alpha$  熱擴散 係數

$\beta$  固相과 液相의 熱擴散 係數의 比

$\gamma$  固相과 液相의 熱傳導率의 比

$\Delta$  增 分

$\delta$  格子點 사이에서 相變化된 部分

$\epsilon$  外·內 徑比

$\eta$  蓄熱效率

$\theta$  無次元化된 溫度

$\theta_m$  無次元化된 融點溫度

$\rho$  密 度

$\tau$  時間變數

添 字

1 液 相

2 固 相

$i$  空間 格子點

$j$  時間格子點

M 相變化端이 있는 格子點

는 熱傳導 問題는 特別한 境界條件을 가진 境遇 [4] 이외에는 完全解가 存在하지 않으므로, 有限 差分法(Finite Difference Method)을 利用하여 數值的으로 非定常溫度分希를 얻고 여러가지 混合比率에 따른 蓄熱能力을 比較하였다. 또 數值解의 檢證을 爲하여 시멘트·모래 對 파라핀 왁스의 比率이 7:3 인 混合物에 對한 實驗을 하였다.

## 2. 解 析

圓筒座標系에서의 相變化를 隨伴한 熱傳導問題는 初期條件이 融點 溫度일때에 限해서 몇몇 理論的인 近似解[5][6]가 提示되어 있다.

本 論文에서는 初期條件이 融點보다 낮은 어떤 一定한 溫度로 維持되고 있을때 바깥 壁面이 斷熱된 채 안쪽 壁面에 融點보다 높은 溫度를 時間 0에서 取하였을 때 時間에 따른 溫度分希를 求하는 問題로서 實用的인 面에 매우 重要하다.

理論的인 解析은 다음의 假定을 따라 行하였다.

- 가. 相變化 物質은 各 相에서 等方性(isotropic)이며 均一(homogeneous)하다.
- 나. 熱力學的 物性值들은 파라핀 왁스의 熱傳導率을 除外하고는 溫度變化에 無關하며 特別히 相變化點에서의 密度變化는 없다[7].
- 다. 液相에서의 對流效果는 無視한다.
- 라. 圓筒의 길이는 軸方向으로 無限하여 端面效果(end effect)는 無視한다.
- 마. 軸對稱 形象을 이룬다.
- 바. 混合物의 物性值는 熱傳導率을 除外하고는 各 物質에 對한 算術平均을 取하였으며 特別히 有效 熱傳導率(effective thermal conductivity)  $\bar{k}$ 는 아래 式으로 計算하였다[8].

$$\bar{k} = \frac{k_{cm} [ k_{cm}/k_w + (1 - k_{cm}/k_w) y^{2/3} ]}{k_{cm}/k_w + (1 - k_{cm}/k_w) (y^{2/3} - y)} \dots (1)$$

여기서

$k_{cm}$ : 시멘트-모래 混合物의 熱傳導率

$k_w$ : 파라핀 왁스의 熱傳導率

$y$ : 파라핀 왁스의 體積比

이다.

### 2.1. 基本方程式

半徑方向만의 獨立變數를 가지는 圓筒座標系에서의 非定常熱傳導方程式은

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots (2)$$

이며 相變化를 隨伴하는 境遇 Fig.1에서 보인 相變化端이  $R_r$ 까지 進行하였을때는 聯立 偏微分方程式(3)과 (4)에 의해 支配된다.

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \alpha_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad R_i \leq r \leq R_r \dots (3)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \alpha_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right), \quad R_r \leq r \leq R_o \dots (4)$$

初期條件 및 境界條件은

$$r = 0 \text{ 에서 } T_2 = T_i \dots (5)$$

$$r = R_i \text{ 에서 } T_1 = T_o \dots (6)$$

$$r = R_o \text{ 에서 } \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0 \dots (7)$$

$$r = R_r \text{ 에서 } T_1 = T_2 = T_m \dots (8)$$

$$r = R_r \text{ 에서 } k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} - k_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\rho L \frac{dR_r}{d\tau} \dots (9)$$

가 된다.

### 2.2. 無次元化

2.1에서 記述한 方程式을 一般的인 境遇에 適用하기 위해 空間, 時間, 溫度에 關해 各各 無次元量

$$x = r/R_o \dots (10)$$

$$t = \tau / (R_o^2/\alpha_1) \dots (11)$$

$$\theta = (T - T_i) / (T_o - T_i) \dots (12)$$

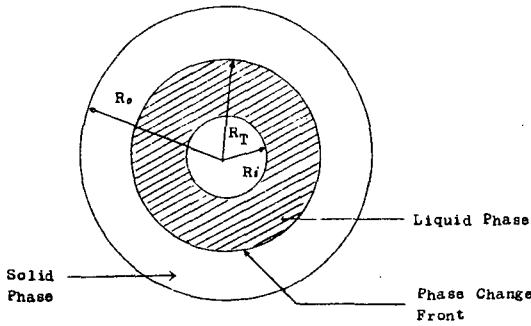


Fig. 1 Configuration of the System

를導入하여無次元化하였다.

無次元化된方程式과初期 및境界條件은式(13)~(19)에記述하였다.

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial \theta_1}{\partial x}, \quad \epsilon \leq x \leq x_T \quad (13)$$

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = \beta \left( \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial \theta_2}{\partial x} \right), \quad x_T \leq x \leq 1 \quad (14)$$

$$t = 0 \text{ 일때 } \theta_2 = 0 \quad (15)$$

$$x = \epsilon \text{ 에서 } \theta_1 = 1 \quad (16)$$

$$x = 1 \text{ 에서 } \frac{\partial \theta_2}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

$$x = x_T \text{ 에서 } \theta_1 = \theta_2 = \theta_m \quad (18)$$

$$x = x_T \text{ 에서 } \frac{\partial \theta_1}{\partial x} - r \frac{\partial \theta_2}{\partial x} = -K_o \frac{dx_T}{dt} \quad (19)$$

여기서

$$\beta = \alpha_2 / \alpha_1 \quad (20)$$

$$\epsilon = R_i / R_o \quad (21)$$

$$x_T = R_T / R_o \quad (22)$$

$$r = k_2 / k_1 \quad (23)$$

이며 특히無次元量

$$K_o = \frac{\rho L \alpha_1}{k_1 (T_o - T_i)} = \frac{L}{c_1 (T_o - T_i)} \quad (24)$$

는 Kossovitch數라 불리우며無次元化된潛熱량을 나타낸다. 이는 파라핀 왁스의體積比에 따라定해진다.

### 2.3. 有限差分法에 依한 數值解析

2.2에서 얻은無次元化된方程式을有限差分法(9)에依해解析하기 위해서 먼저 Fig. 2에서보인 x軸方向으로等間隔 Δx로 N等分하고時間에對해서도等間隔 Δt를取하면 x軸上の任意的格子點 x\_i는

$$x_i = \epsilon + (i - 1) \Delta x \quad (25)$$

로 나타나고 x에 關한 1次 및 2次 導函數는基本的인 差分理論에 의해

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_i^j = \frac{\theta_{i+1}^j - \theta_{i-1}^j}{2 \Delta x} \quad (26)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \Big|_i^j = \frac{\theta_{i+1}^j - 2\theta_i^j + \theta_{i-1}^j}{\Delta x^2} \quad (27)$$

로 주어지며 t에 關한 導函數는數值解의安定性(10)을考慮하여 implicit method를使用하여

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \Big|_i^{j+1} = \frac{\theta_i^{j+1} - \theta_i^j}{\Delta t} \quad (28)$$

로取하였다.

式(25)~(28)을式(13), (14)에代入하여整理하면差分方程式(29), (30)을 얻는다.

$$-(A - BC_i) \theta_{i-1}^{j+1} + (2A + 1) \theta_i^{j+1} - (A + BC_i) \theta_{i+1}^{j+1} = \theta_i^j \quad (1 \leq i \leq M) \quad (29)$$

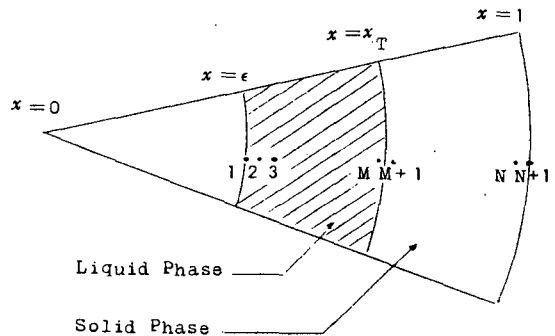


Fig. 2 Node-Point Arrangement

$$-\beta(A-BC_i)\theta_{i-1}^{j+1} + (2\beta A+1)\theta_i^{j+1}$$

$$-\beta(A+BC_i)\theta_{i+1}^{j+1} = \theta_i^j$$

$$(M+1 \leq i \leq N+1) \dots\dots\dots (30)$$

여기서

$$A = \Delta t / \Delta x^2 \dots\dots\dots (31)$$

$$B = \Delta t / (2\Delta x) \dots\dots\dots (32)$$

$$C_i = 1 / [\epsilon + (i-1)\Delta x] \dots\dots\dots (33)$$

이다. 또한 境界條件式(17)을 滿足시킨 N+1 格子點에서의 差分方程式은

$$-2\beta A\theta_N^{j+1} + (2\beta A+1)\theta_{N+1}^{j+1} = \theta_{N+1}^j \dots\dots (34)$$

로 나타나며 特別 境界條件(18), (19)는 Fig. 3에서 보인 相變化端의 양쪽 格子點을 相變化溫度에 대해 級數展開하여 式 (35), (36)으로 取하였다[11].

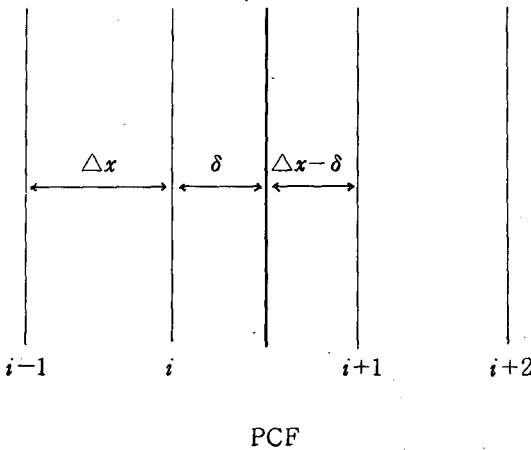
$$-P(\delta-Q)\theta_{i-1}^{j+1} + [1+P(\Delta x+\delta-Q+R)]$$

$$\theta_i^{j+1} = P(\Delta x+R)\theta_m + \theta_i^j (i=M) \dots\dots (35)$$

$$[1+\beta X(2\Delta x-\delta+Z-Y)]\theta_{i+1}^{j+1}$$

$$-\beta X(\Delta x-\delta+Z)\theta_{i+2}^{j+1} = \beta X(\Delta x-Y)$$

$$\theta_m + \theta_{i+1}^j (i=M) \dots\dots\dots (36)$$



여기서 사용된 기호는 다음과 같다.

$\theta_m$  = 無次元化된 融點溫度

$\delta$  = 格子點사이에서의 相變化된 部分

$$P = 2\Delta t / [\Delta x \cdot \delta \cdot (\Delta x + \delta)] \dots\dots\dots (37)$$

$$Q = \delta^2 / [2 \cdot (\epsilon + (i-1)\Delta x)] \dots\dots\dots (38)$$

$$R = \Delta x^2 / [2 \cdot (\epsilon + (i-1)\Delta x)] \dots\dots\dots (39)$$

$$X = 2\Delta t / [(\Delta x - \delta) \cdot \Delta x \cdot (2\Delta x - \delta)] \dots\dots (40)$$

$$Y = \Delta x^2 / [2 \cdot (\epsilon + i\Delta x)] \dots\dots\dots (41)$$

$$Z = (\Delta x - \delta)^2 / [2 \cdot (\epsilon + i\Delta x)] \dots\dots\dots (42)$$

Fig. 4, 5, 6, 7에  $T_i = 15^\circ\text{C}$ ,  $T_o = 80^\circ\text{C}$ ,  $T_m = 57^\circ\text{C}$ 일 境遇의 數值解析에 依한 溫度分布과 파라핀 왁스의 體積比別로 나타나 있다. 그림에서 曲線 1, 2, 3, 4, 5, 6은 各各 時間 1,000, 2,000, 4,000, 6,000, 8,000, 10,000 秒가 經過하였을 때를 나타낸다.

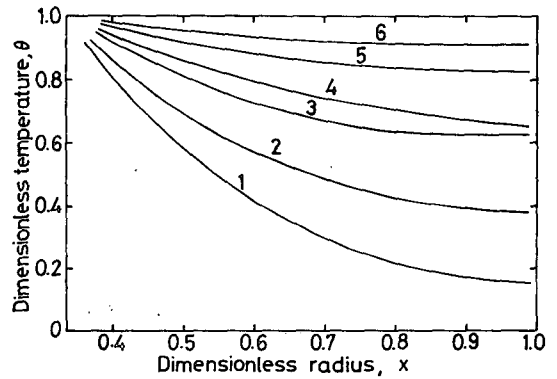


Fig. 4 Temperature Distribution for the case of Paraffin Fraction 0.2.

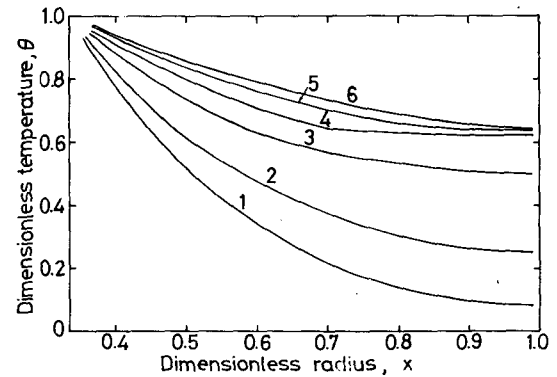


Fig. 5 Temperature Distribution for the case of Paraffin Fraction 0.4.

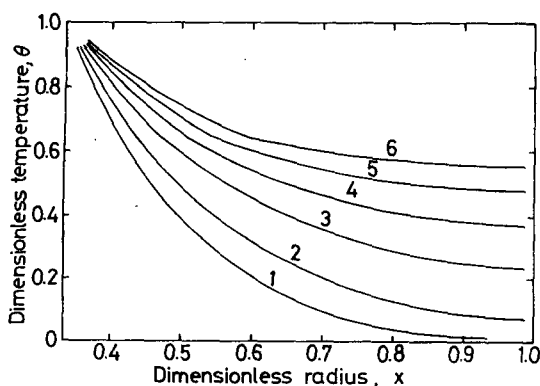


Fig. 6 Temperature Distribution for the case of Paraffin Fraction 0.7.

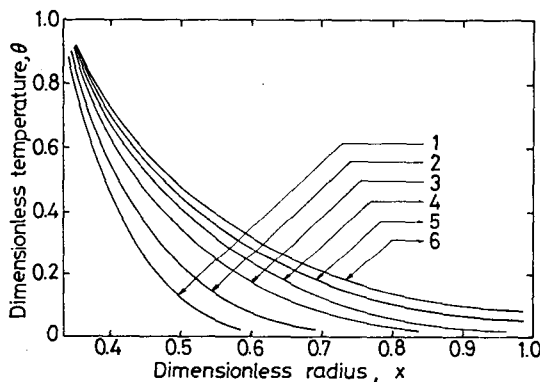


Fig. 7 Temperature Distribution for the case of Paraffin Wax only.

2.4. 蓄熱 効率

蓄熱始作後 時間  $\tau$  동안에 圓筒의 單位길이當 顯熱과 潛熱에 依한 蓄熱量  $q_s, q_L$  은 各各式 (43), (44)로 주어진다.

$$q_s = \int_{R_i}^{R_o} 2\pi r \cdot \rho_C (T - T_i) dr \dots\dots\dots (43)$$

$$q_L = \int_0^\tau 2\pi \cdot \rho_L \cdot R_T \frac{dR_T}{d\tau} d\tau \dots\dots\dots (44)$$

또한, 單位 길이당 蓄熱能力  $q_{cp}$  는

$$q_{cp} = \pi (R_o^2 - R_i^2) \rho [c (T_o - T_i) + L] \dots\dots (45)$$

이며 式 (43), (44), (45)를  $\pi \rho_C (R_o^2 - R_i^2) (T_o - T_i)$ 에 關해서 無次元化하면 式 (46), (47), (48)을 얻는다.

$$Q_s = \frac{2 \int_0^1 \theta \cdot x dx}{1 - \epsilon^2} \dots\dots\dots (46)$$

$$Q_L = \frac{2K_o \int_0^t x_T \frac{dx_T}{dt} dt}{1 - \epsilon^2} = \frac{K_o (x_T^2 - \epsilon^2)}{1 - \epsilon^2} \dots\dots\dots (47)$$

$$Q_{cp} = 1 + K_o \dots\dots\dots (48)$$

여기서

- $Q_s$  : 無次元化된 顯熱에 依한 蓄熱量
- $Q_L$  : 無次元化된 潛熱에 依한 蓄熱量
- $Q_{cp}$  : 無次元化된 蓄熱能力

이며 Fig. 8 에 파라핀 왁스의 體積比別  $Q_L$ 의 값이 나타나 있다. 蓄熱의 效率  $\eta$  는

$$\eta = \frac{Q_s + Q_L}{Q_{cp}} \dots\dots\dots (49)$$

로 定義하며 時間에 따른 蓄熱效率을 여러가지 파라핀 왁스의 體積比에 대해 Fig. 9 에서 보여 주고 있다.

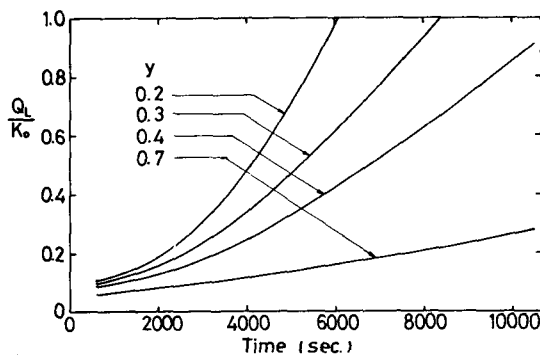


Fig. 8 Dimensionless Stored Latent Heat vs. Time for various Paraffin Fractions.

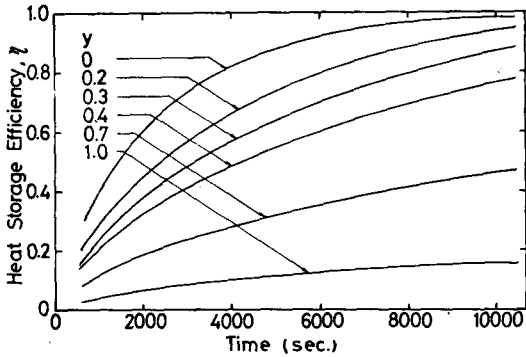


Fig. 9 Heat Storage Efficiency vs. Time for various Paraffin Fractions.

3. 實驗

앞에서 解析한 溫度分布를 比較하기 爲하여 蓄熱時의 溫度分布를 測定하였다.

溫度分布測定을 爲한 實驗裝置는 Fig.10에 나타나 있으며 實驗過程은 다음과 같다.

가. 蓄熱物質은 시멘트와 모래를 體積比 1:2로 混合한 후 파라핀 왁스의 融點보다 높은 약 120°C 정도에서 녹인 파라핀 왁스와 混合하였다. 여기에 使用된 모래는 均一性을 考慮하여 標準망채 20番으로 거른 것이고 모래가 含有한 水分으로 因하여 시멘트가 굳어지는 것을 防止하기 爲해서 加熱하여 脫濕하였다.

나. 圓筒의 內·外壁은 熱傳導率이 매우 크고 比熱이 작아서 蓄熱能力에 影響을 미치지 않고, 蓄熱物質이 液相일때 蓄熱槽의 形象을 維持할수 있는 두께인 0.3mm 합석板으로 하였다.

다. 熱電對는 Fig. 10에서와 같이, 이로 因한 誤差와 兩端에서의 影響을 줄이기 爲하여 蓄熱槽의 中間部分에 半徑方向 1cm 間隔으로 螺旋型으로 設置하였다. 種類는 코팅된 C-C(Copper-Constantan)를 使用하였다.

라. 外壁은 유리섬유(Glass wool) 4cm 두께로 斷熱하였다.

마. 蓄熱物質은 처음에는 外氣溫度와 같은 溫度(15°C)로 均一하게 分布되어 있다가 갑자기 80°C로 加熱된 물을 가운데 圓筒에 채우고 溫

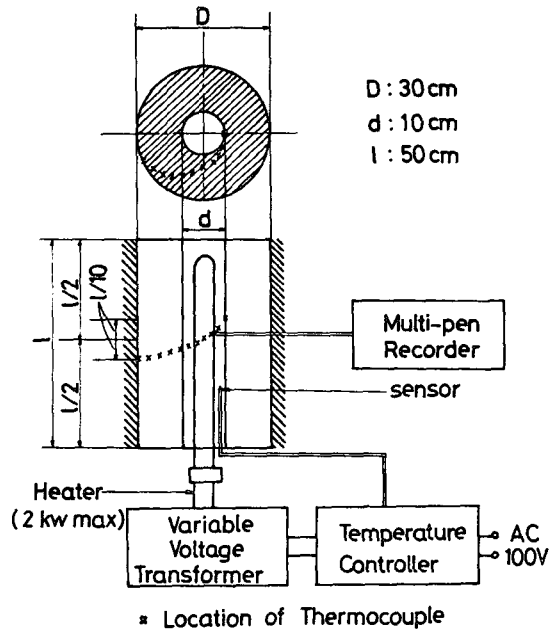


Fig. 10 Schematic Diagram of Experimental Set Up.

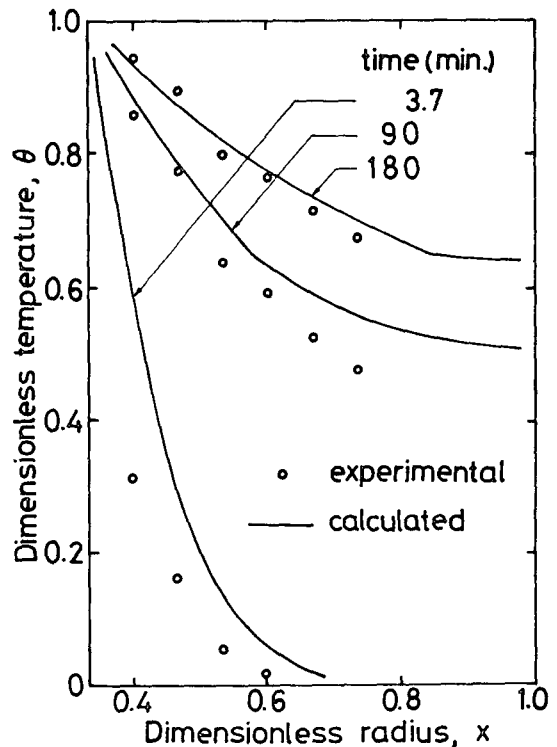


Fig. 11 Comparison of Calculated Values with Experimental Results.

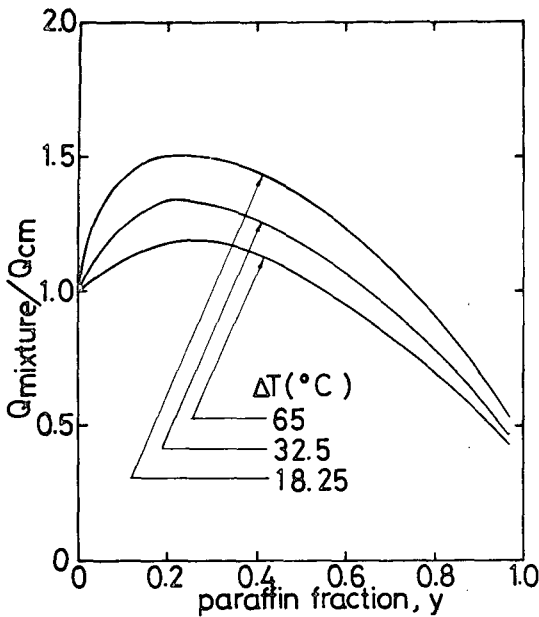


Fig. 12 Stored Heat Ratio vs. Paraffin Fraction for various  $\Delta T$ .

度調節器와 電圧調節器가 連結된 加熱棒을 넣어 80 °C를 維持시켜 주면서 時間에 따른 蓄熱槽內의 溫度를 測定하였다.

바. 熱電對의 起電力은 10 개의 펜을 가진 記錄計에 依해 記錄되었으며 記錄計의 測定誤差는 1 °C 以內이다.

實驗의 結果는 內壁에서 부터 1cm 간격으로 7 개의 熱電對에 依한 溫度分布를 無次元化하여 數值計算의 結果와 Fig. 11 에서 比較하였다.

#### 4. 結果 및 考察

앞에서 얻은 數值解와 實驗을 통하여 다음과 같은 事實을 考察할 수 있다.

가. 非正常溫度分布는 獨立變數  $x, t$  와 파라핀 왁스의 體積比  $y$  에 의해 支配된다.

나. 相變化端에서 溫度分布는 不連續이며 平面部分이 없어서 熱傳達의 障害가 없다.

다. 計算値와 實驗値는 蓄熱始作後 어느 정도의 時間이 經過할때 부터 좋은 一致를 보인다. 이는 數值計算에서 時間 0에서의 境界條件 適用

에 問題가 있고 實驗에서도 한 瞬間에 一定한 溫度를 만들어 줄 수 없기 때문이다.

라. 蓄熱效率는 파라핀 왁스의 體積比  $y$  가 낮을수록 좋은 것으로 나타났다.

마. 파라핀의 성분비와 溫度差에 따른 蓄熱量을 나타낸 것이 Fig. 12 이다. 파라핀 왁스의 體積比가 작을때는 潛熱에 依한 蓄熱效果가 蓄熱量이 最大값에 이를때까지 增加하는 推移이고 最大값을 넘어서 體積比가 커지면 파라핀 왁스의 낮은 熱傳導效果에 依해서 蓄熱量이 減少함을 알 수 있다. 그러므로 같은 時間동안에 實際 蓄熱된 量은 初期溫度  $T_i$  와 供給溫度  $T_s$  의 差  $\Delta T$  의 값에 따라 最大값이 되는 파라핀 왁스의 體積比가 存在한다.

바. 混合物의 再現性은 5 회까지의 加熱·冷却 反復實驗에서는 매우 좋은 것으로 나타났다.

#### 5. 結論

시멘트-모래-파라핀 왁스 混合物은 시멘트-모래의 높은 熱傳導效果와 낮은 溫度에서 파라핀 왁스의 큰 潛熱을 동시에 利用함으로써 시멘트 모르타르나 파라핀 왁스만을 蓄熱物質로 使用하는 境遇보다 適當한 파라핀 왁스의 體積比에서 單位부피당 蓄熱量이 훨씬 커서 蓄熱槽의 體積을 줄일 수 있고 比較的 다루기 쉬우며 反復使用이 可能하므로, 太陽熱이나 低溫으로 廢棄되는 熱의 效率的 利用에 매우 適合하다.

특히 經濟性的의 側面에서 볼때 앞으로의 利用이 기대되며 덧붙여 가운데 圓筒속의 流體流動을 考慮한 解析이 行하여져야 하겠다.

#### 參考文獻

1. Kovach, E. G. ed., Thermal energy storage, Pergamon Press, 1976.
2. Griggs, E. I., Pitts, D. R. and Humphries, W. R., "Transient analysis of a thermal storage unit involving a phase change material", ASME publication, 74-WA/HT-21, 1974.



3. Godfrey, R. D. and Mumma, S. A., "Thermal performance of paraffin phase change materials dispersed in a concrete mortar filler matrix", ASME publication, 76 - WA/HT - 33, 1976.
4. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., Conduction of heat in solids 2/e, Oxford Univ. Press, 1959.
5. Shih, Yen-Ping and Tsay, Sun-Yuan, "Analytical solutions of freezing a saturated liquid inside or outside cylinders". Chem. Eng. Sci., 26, 809-816, 1971.
6. Lederman, J. M. and Boley, B. A., "Axisymmetric melting or solidification of circular cylinders", Int. J. Heat Mass Transfer, 13, 413-427.
7. Eckert, E. R. G. and Drake, Jr., R. M., Analysis of heat and mass transfer, 224-228, McGraw-Hill, 1972.
8. Duga, J. J., "Electrical and thermal transport models for analysis of reinforced composites", Battelle Memorial Institute, NR 031-710, 1966.
9. Myers, G. E., Analytical methods in conduction heat transfer, Ch. 8, McGraw-Hill, 1971.
10. 磯田和男, 大野 豊, FORTRANによる數値計算ハンドブック, 352-382, オーム社, 1971
11. Carnahan, B., Luther, H. A. and Wilkes, J. O., Applied numerical methods, 462-463, John Wiley and Sons, 1969.