

有限差分法을 이용한 温水温突
바닥構造體의 非定常 熱傳達 解析과 實驗 研究
An Experimental Study and Transient Simulations of
the Radiant Heating Floor Panel by Using Finite Difference Methods

孫章列*, 鄭光燮**, 朴炳倫***
J. Y. Sohn, K. S. Chung, B. Y. Park

ABSTRACT

“Ondol” have been used in residential buildings for several thousands years in Korea. The traditional “Ondol” heating system of Korea has changed into the radiant heating system with piping embedded in floors or slabs. This study reports the results of transient experiments performed on a radiant heating system and enclosure. The paper presents some details of the thermal response of slab-heated buildings to varying patterns of heat input. Furthermore, I'll compare the results of experimentation with the ones of the numerical simulation by using the explicit and implicit forms of the finite difference methods (FDM). The study has contributed to testify the feasibility of numerical analysis, and the understanding of the transient behavior of radiant heating panels and enclosure exposed to this type of heating system.

記號說明

| | |
|---|--|
| T : 溫度(°C) | R : 材料의 熱抵抗($m^2 \cdot h \cdot ^\circ C/kcal$) |
| x : 空間(또는 位置)座標 | R_m : m 層(혹은 m 節點)材料의 熱傳達抵抗($m^2 \cdot h \cdot ^\circ C/kcal$) |
| t : 時間座標 | α_c : 各壁體表面의 對流 熱傳達率($kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$) |
| α : 熱擴散率(m^2/h) | T_m^t : 時間($t - \Delta t$)에서의 節點 m 의 溫度(°C) |
| λ : 熱傳導率($kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$) | $T_m^{t+\Delta t}$: 時間 t 에서의 節點 m 의 溫度(°C) |
| c : 比熱($kcal/kg \cdot ^\circ C$) | Δx : 空間增分(또는 空間分割幅) |
| ρ : 密度(kg/m^3) | Δt : 時間增分 |
| L : 特性길이(m) | A_k : k 壁面의 面積(m^2) |
| m : 節點(Nodal Point) | V_{inft} : 換氣量(回/h) |
| P : 時間係數 | C_R : 室의 熱容量($kcal/m^3 \cdot ^\circ C$) |

* 漢陽大學校 建築工學科

** 서울産業大學 建築工學科

*** 漢陽大學校 大學院

T_{out} : 外氣溫度(°C)
 T_{sk} : k 壁面의 溫度(°C)
 T_a^p, T_a^{p+1} : p 와 $p+1$ 時點의 空氣溫度(°C)

$$\left. \begin{aligned} T(x, 0) &= f(x), 0 \leq x \leq L \\ T(0, t) &= g_0(t), 0 < t \\ T(L, t) &= g_1(t), 0 < t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

1. 序 論

우리나라 固有의 暖房方式인 溫突은 그 起源이 2000年 以上이나 될만큼 悠久한 歷史를 갖고 있다. 이에따라 溫突 바닥暖房에 관한 수많은 論文 및 報告書들이 오래전부터 研究發行되어 왔으며, 특히 80年代 以後부터 이分野의 體系의인 研究가 더욱 活潑히 進行되어 왔지만, 그 結果는 比較的 미흡한 實情이다. 더욱 새로운 溫突 構造의 開發이라든가 溫突空間에서의 人體의 熱環境에 대한 反應의 變化와 새로운 熱環境指標의 開發 등과 같은 本質的인 問題에 대한 接近은 매우 미미한 실정이다.

本 研究는 이런 맥락에서 溫突 暖房의 非定常 熱傳達 特性을 파악하기 위해, 溫水供給溫도의 變化에 따른 溫水溫突 바닥構造體의 溫度變化特性을 實驗的으로 分析하였다. 또한, 더 나아가 本 研究는 既存의 有限差分理論인 前進差分과 後進差分法을 이용한 數值解析 모델을 設定하고 이를 實驗値와 比較함으로서, 시뮬레이션 모델의 妥當性을 檢討하여 시스템設計를 위한 基礎資料의 提示를 目的으로 하였다.

2. 數值解析理論

2.1 一次元 非定常 熱傳達

非定常 熱傳導 方程式은 一次元인 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha = \lambda / c\rho \dots\dots\dots (2)$$

식(1)을 풀기 위해서는 初期條件과 境界條件이 필요하다. 有限領域 $0 \leq x \leq L$ 에 대한 一次元 非定常 熱傳導 方程式의 境界條件은 다음과 같이 表現된다.

여기에서, $f(x)$ 는 初期條件, $g_0(t)$ 와 $g_1(t)$ 는 境界條件이다. 空間領域의 範圍는 $0 \leq x \leq L$ 이며, 時間領域의 範圍로서 t 는 ∞ 까지 擴張될 수 있다.

2.2 有限差分法에 의한 熱傳達

(1) 前進有限差分 計算모델

지금 식(1)과 식(3)의 解를 近似的으로 구하기 위해, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 構造體의 垂直方向에 x 軸을 취하고 構造體를 M 層으로 分割한다. 溫度를 구하는 節點을 上部側으로부터 $0, 1, 2, \dots, m, \dots, M$ 으로 한다. 分割幅 즉, 各層의 두께는 節點과 節點사이의 두께가 되며 이를 x_1, x_2, \dots, x_m (以下 本 研究에서는 Δx 로 表現한다)으로 나타낸다. 그러면 m 點에 있어서의 식(1)과 식(3)에 대한 差分方程式은 다음과 같이 誘導할 수 있다.

$$\frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} = \alpha \cdot \frac{T_{m-1}^p - 2T_m^p + T_{m+1}^p}{(\Delta x)^2} \dots (4)$$

윗 식을 T_m^{p+1} 에 관해 정리하면,

$$T_m^{p+1} = F_o \cdot T_{m-1}^p + (1 - 2F_o) \cdot T_m^p + F_o \cdot T_{m+1}^p \dots\dots\dots (5)$$

(m = 1, 2, ..., M-1, $p = 0, 1, 2, \dots$)

$$F_o = \alpha \cdot \Delta t / (\Delta x)^2 \dots\dots\dots (6)$$

여기에서 兩側 表面 $m=0$ 및 $m=M$ 에 대한 溫度 T_o, T_M 은 境界條件으로서 附與되어 있어야 한다. 특히, 前進差分에 있어서는 일단 α 와 Δx 의 값이 固定되면 Δt 의 값이 어떤 許容 最大값을 넘어서면 안되는데, 이를 前進有限差分法의 安定性 條件(Stability Condition)이라 한다. 따라서 Δx 와 Δt 는 다음 식으로 나타내는 制限값을 만족시키는 計算時間 間隔과 空間 分割幅의 값으로 選定되어야 한다.

$$0 < F_o \equiv \frac{\alpha \Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \dots\dots\dots (7)$$

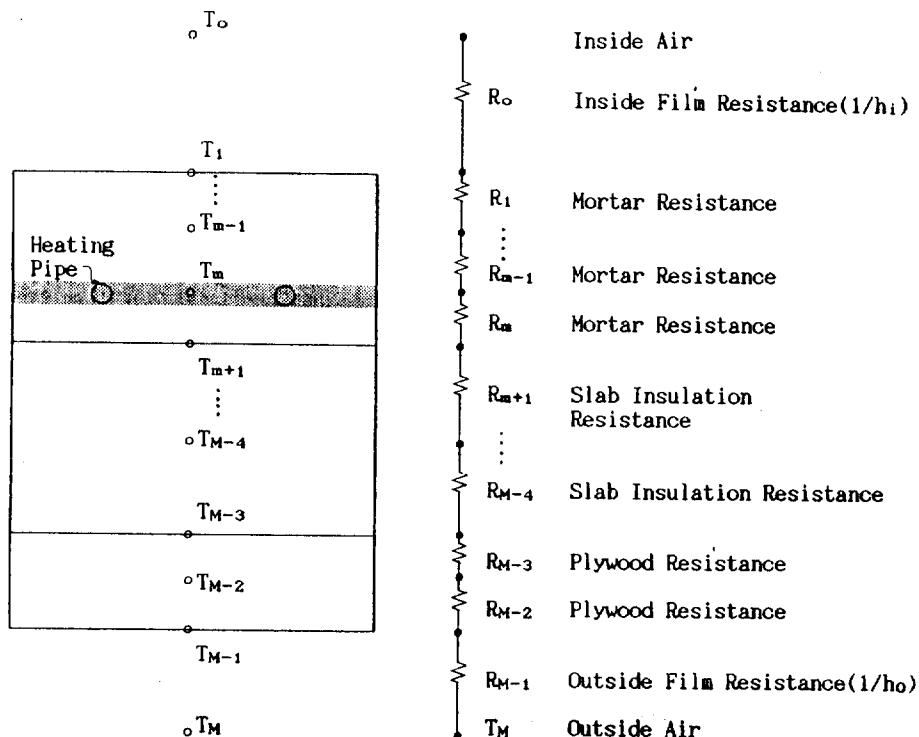


Fig.1 One-Dimensional Heat Transfer Models for the Center Region

(2) 後進差分 計算모델

非定常 熱傳導方程式인 식(1)을 後進差分方程式으로 表現하면 다음과 같다.

$$\frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} = \alpha \cdot \frac{T_{m-1}^{p+1} - 2T_m^{p+1} + T_{m+1}^{p+1}}{(\Delta x)^2} \dots (8)$$

위 식을 T_m^p 에 關係 定理하면,

$$T_m^p = -F_o \cdot T_{m-1}^{p+1} + (1 + 2F_o) \cdot T_m^{p+1} - F_o \cdot T_{m+1}^{p+1} \dots (9)$$

이 식에 對한 境界條件으로서 $m=0$ 인 경우,

$$T_o^{p+1} = f_o(t^{p+1}) \dots (10)$$

여기에서, $f_o(t^{p+1})$ 은 境界溫度가 時間에 따라 어떻게 變化하는가를 記述하는 函數이다. 또한, 식(10)을 식(9)에 代入하면, $m=1$ 에 對한 差分方程式이 誘導된다.

$$(1 + 2F_o) \cdot T_1^{p+1} - F_o \cdot T_2^{p+1} = T_1^p + F_o \cdot f_o(t^{p+1}) \dots (11)$$

마찬가지로, $m=M-1$ 에 對해서는

$$-F_o \cdot T_{M-2}^{p+1} + (1 + 2F_o) \cdot T_{M-1}^{p+1} = T_{M-1}^p + F_o \cdot f_M(t^{p+1}) \dots (12)$$

여기에서, $f_M(t^{p+1})$ 은 $m=M$ 에서의 指定된 溫度 變化를 나타낸다.

2.3 室內溫度의 計算모델

室內溫度에 對해서는 空氣溫度의 熱膨脹을 고려해서, 時間間隔 Δt 사이의 바닥 表面溫度와 壁體表面溫度의 熱傳達에 의한 것과 換氣에 따른 熱損失이 p 가 $(p+1)$ 時點으로 나아가면서 空氣溫度를 變化시키는 것으로 하고, 熱平衡式을 나타내면 다음과 같게된다.

$$\Sigma \alpha_c \cdot A_k (T_{sk}^p - T_a^p) + 0.29 \cdot V_{infi} \cdot (T_{out}^p - T_a^p) = C_R \cdot \frac{T_a^{p+1} - T_a^p}{\Delta t} \dots (13)$$

윗 식을 T_a^{p+1} 에 대해 定理하면,

$$T_a^{p+1} = T_a^p + \frac{\Delta t}{C_R} \cdot \Sigma \alpha_c \cdot A_k \cdot (T_{sk}^p - T_a^p) + 0.29 \cdot V_{infi} \cdot (T_{out}^p - T_a^p) \dots (14)$$

여기에서, T_{sk}^p 는 k 內壁表面의 平均溫度를 나타내며 별도의 數值計算式으로 算定할 수도 있지만, 편의상 實測值를 代入하여 熱平衡式을 푸는 것으로 한다.

3. 實驗概要 및 結果分析

3.1 實驗概要

(1) 實測對象室

本 實驗은 서울 H大學의 既存 7層 建物內에 特別히 設計된 熱環境모델室(2W×2L×2H m)에서 遂行하였다. 溫突 모델室은 A室, B室 두개로 分離하여 實驗室 內部에 設置하였으며, 모델室의 溫突패널은 外徑 15.88mm의 銅管을 200mm 間隔으로 配列하고, A·B室 各 銅管 埋設깊이는 4cm, 2cm의 溫突 바닥으로 構成하였다. 모델室의 平面圖, 바닥斷面 詳細圖 및 바닥의 溫度測定點 位置를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타낸다.

(2) 測定方法 및 實驗條件

바닥表面, 內·外壁表面, 室內 空氣 및 構造體의 溫度는 Data Logger와 연결된 C-C 熱電對(Copper - Constantan Thermocouples)를 이용하여 30分 間隔으로 測定하였다. 바닥 構造體 內部的 溫度 測定點 位置는 Fig. 3에 나타낸 바와 같으며, Table 1과 Table 2에는

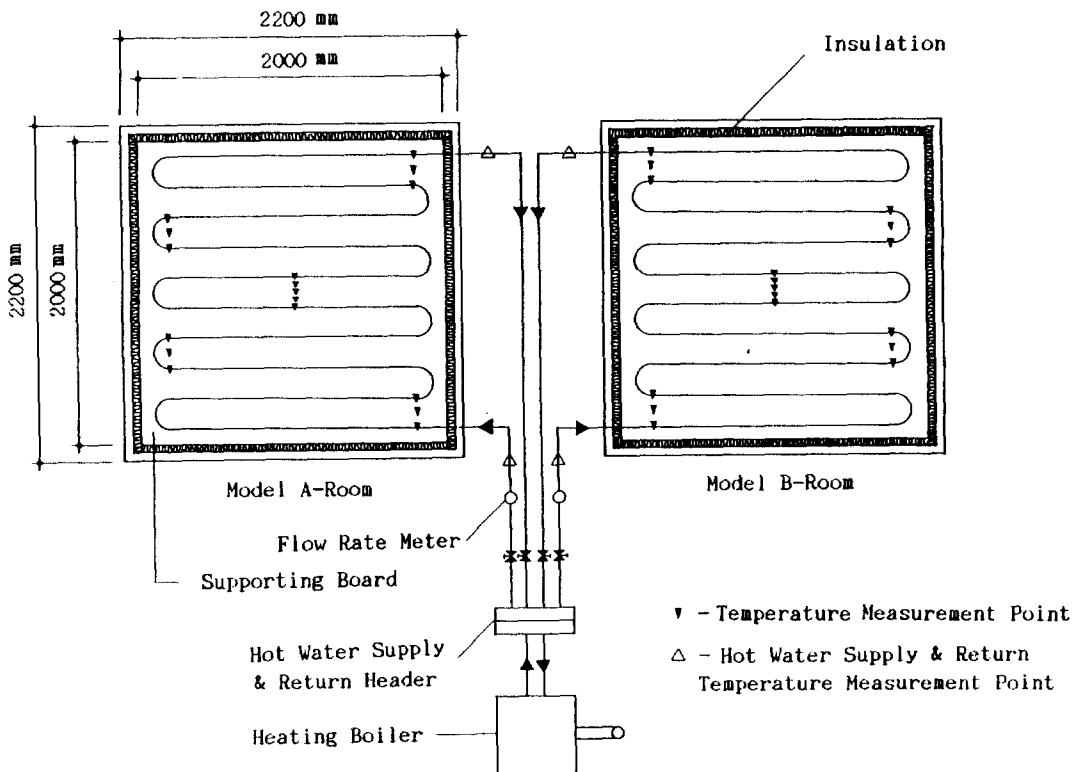


Fig.2 Schematic Diagram of Model Room

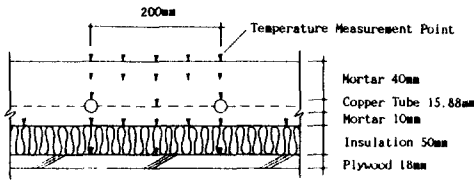


Fig. 3 Cross-sectional View of Radiant Floor Panel

Table Experimental Description

| | |
|------------------------------|---|
| Hot Water Supply Temperature | 37 °C , 48 °C |
| Heating Condition | 36 Hours Continuous Heating |
| Experimental Dates | 1990. 1. 28 ~ 1990. 2. 5 |
| Remarks | Hot Water Supply Temperature is the Automatic Control Temperature of Heating Boiler |

實驗條件 및 主要測定項目을 나타내고 있다.

바닥表面溫度 및 바닥構造體 內部溫度는 22 個所의 測定點으로부터 測定하였으며, 溫水供給 및 還水溫度는 銅管 內部에 熱電對를 附着 하고 그 管을 斷熱層으로 덮은 뒤 測定하였고, 供給熱量算出을 위한 資料의 正確度를 높이기 위해 5分 間隔으로 測定하였다. 또한, 溫水流量은 A, B室 모두 동일한 流量을 유지하도록 流量計에 의해 手動操作으로 測定하였다.

한편, 本 研究에서 以後에 記述되는 모든 溫度는 平均溫度를 가리키고 있으며, 특히 發熱面 溫度란 Fig.1에서 보여주는 바와 같이 $m=p$ 點에 對應하는 부분에 溫水暖房파이프를 埋設하여 m 點을 基準해서 水平方向의 平面(溫水파이프 사이의 平面으로서 面發熱을 한다고 가정하여, 이 發熱面溫度는 T_m (節點)을 기준으로 한 좌우 溫水暖房파이프 사이의 平均溫度를 가리키고 있음)을 假定하여 이를 의미하는 것으로 한다.

Table 2 Measurement Items and Apparatus

| Measurement Items | No. of Measurement Points | Measurement Apparatus | |
|-----------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|
| Outside Temperature | Center of East & North Side | * Temperature Sensor : Copper - Constantan ($\phi 0.3mm$) Thermocouple * Apparatus DATA LOGGER YODAC-85S * Flow Rate Meter (Manual Measurement) Hybrid Anemometer | |
| Inner & Outer Surface Temperature | Ceiling | | Ceiling Side : 3 Points |
| | Inner Wall | | Each Orientation : 3 Points |
| | Outer Wall | | Each Orientation : 3 Points |
| | Floor Surface | | Floor Surface : 25 Points |
| | Sub - Slab | Sub - Slab : 22 Points | |
| Hot Water Temperature | Supply & Return Side : 2 | | |
| Flow Rate | Return Side : 2 Points | | |
| Air Velocity | Center of Two Model Rooms | | |

3. 2 實驗結果 分析

Fig.4는 溫水 供給溫度가 48 °C일 때, 主要 測定點의 溫度分布를 30分 間隔으로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 室內 空氣溫度는 內壁表面 溫度보다 平均 1.6 °C 정도 더 높게 나타나고 있으며, 外氣溫도와 外壁表面溫度는 各各 平均 14.7 °C, 15.7 °C로서, $\pm 1.1 °C \sim \pm 1.5 °C$ 의 작은 變化幅을 갖는 거

의 일정한 값을 나타내고 있다. 또한, 이 溫度들을 제외하면 暖房開始 10時間 정도 後부터는 發熱面, 바닥表面, 內壁表面 및 室內溫度는 各各 43.5 °C, 39.8 °C, 30.3 °C, 31.8 °C가 되는 거의 일정한 값을 가지면서 定常狀態에 이르고 있음을 파악할 수 있다.

Fig.5는 溫水供給溫度가 48 °C일 때, 垂直 方向으로의 室內空氣 溫度分布를 暖房開始後

1 時間 間隔으로 測定한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 바닥面에서부터 天障까지의 室內溫度는 거의 一定한 上下 溫度分布를 보이고 있으며, 時間의 흐름과 더불어 溫度가 上昇하면서 平行移動하고 있다. 이는 一般的으로 輻射暖房方式이 室內上下 溫度分布가 均

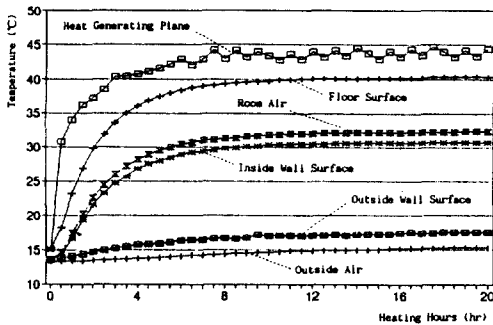


Fig. 4 Thermal Response of Radiant Floor Panel During Heat-up

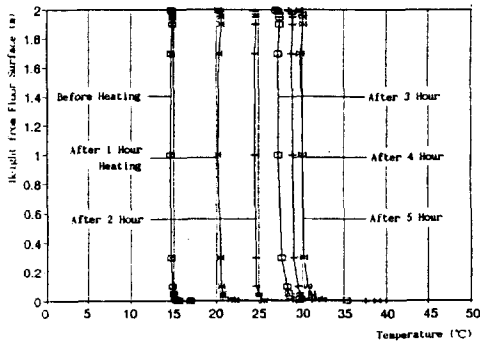


Fig. 5 Temperature Stratification of Room Air After Elapsed Heating Time

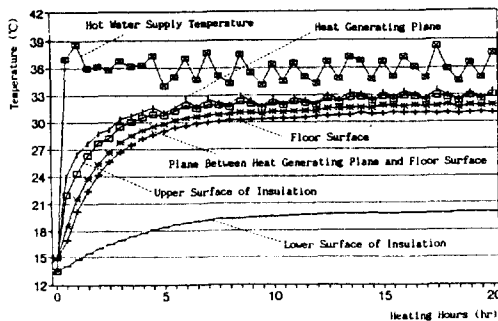


Fig. 6 Temperature Profiles Across Slab During Heat-up

一하다는 事實을 그대로 反映하고 있다. 더욱 바닥表面과 天障表面 근처의 溫度가 높게 나타나 溫熱感覺的으로 바람직한 狀況이라고 할 수 있다.

Fig. 6은 바닥 構造體 內部的 垂直方向 熱流舉動을 觀察하기 위해 溫水供給 溫度가 37 °C일때의 바닥 構造體 內部溫度變化를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 바닥 構造體 內部溫度는 暖房開始時 6 時間 정도까지는 급속히 上昇하고 있지만, 6 時間 後부터는 時間의 흐름에 따라 조금씩 上昇하는 一定한 溫度 分布 패턴을 보여주고 있다. 또한, 斷熱材 上部表面溫度는 發熱面 溫度과 거의 一致하고 있는데, 이것은 溫水파이프 아래쪽에 斷熱材가 設置되어 있기 때문에 이 部分에 熱이 停滯되어 나타난 結果로 判斷되며, 斷熱材 上部表面과 下部表面의 溫度差가 平均 12.4 °C 정도로 크게 나타나는 것으로서도 이러한 現狀을 理解할 수 있다고 생각된다.

4. 시뮬레이션 모델의 檢討

4.1 前進差分과 後進差分의 比較

Fig. 7은 溫水供給溫度가 37 °C일때, 室內溫度, 바닥表面溫度, 發熱面溫度에 대한 前進差分과 後進差分들을 서로 比較하여 나타난 것이다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 먼저 發熱面인 경우, 前進差分과 後進差分에 의한 計算值들은 暖房開始後 6 時間 동안까지는 平均溫度差 0.14 °C, 바닥表面인 경우에는 暖房開始後 7 時間 동안까지 平均溫度差 0.14 °C, 室內溫度인 경우에는 暖房開始後 6 時間 동안까지 平均溫度差 0.04 °C를 유지하면서 上昇하고 있지만, 各各 그 時間 以後부터는 두 計算值들이 完全히 一致하고 있다. 또한, 暖房時間 전체 (36 時間)에 대해서는 室內溫度, 바닥表面溫度, 發熱面溫度에 대한 前進差分과 後進差分들의 平均溫度差는 各各 0.02 °C, 0.06 °C, 0.06 °C를 가리키면서 두 값들은 아주 小한 差異를 나타내고 있다.

Fig. 8은 溫水供給溫度가 48 °C일때, 室內溫度, 바닥表面溫度, 發熱面溫度에 대한 前進差

분과 後進差分들을 서로 比較하여 나타낸 것이다. 이 경우에도 Fig. 7의 경우와 마찬가지로, 前進差分과 後進差分에 의한 計算値들은 發熱面인 경우 暖房開始後 7時間 동안까지는 平均溫度差 0.36℃, 바닥表面인 경우 暖房開始後 7時間 동안까지는 平均溫度差 0.36℃, 室內溫度인 경우 暖房開始後 7時間 동안까지는 平均溫度差 0.15℃를 나타내고 있지만, 各 各 그 時間 以後부터는 前進差分과 後進差分에 의한 計算値들은 完全히 一致하고 있다. 또한, 暖房時間 전체 (36時間)에 대해서는 室內溫度, 바닥表面溫度, 發熱面溫度에 대한 前進差分과 後進差分들의 平均溫度差는 各 各 0.05℃, 0.10℃, 0.09℃를 가리키면서 두 값들은 아주 근소한 差異를 나타내고 있다.

바꾸어 말하면, 暖房開始後 대략 6~7時間 동안에는 發熱面, 바닥表面 및 室內溫度에 대한 前進差分과 後進差分들이 溫水供給溫度에 관계없이 약간의 差異를 보여주면서 上昇하고 있지만, 그 以後부터는 두 값들이 完全히 一致하여 暖房時間이 增大될수록 前進差分이든 後進差分이든 어떤 方法으로 시뮬레이션 하든간에 그 數値解는 同一하다는 것을 示唆하고 있다.

그러므로 이와같은 사실들을 綜合해 보면, 本 모델 實驗室에 적용한 數値解析法에 의한 計算値들은 前進差分이든 後進差分이든 어떤 方法으로 시뮬레이션 하든간에 큰 差異가 없음을 알 수 있으며, 이 두 方法은 計算方式에서 差異가 있을 뿐 결국 그 數値解는 어느 경우에나 동일하다는 사실을 파악할 수 있다.

4.2 實測値와 計算値의 比較

Fig. 9는 溫水供給溫도의 變化에 따른 發熱面溫度에 대한 實測値와 計算値를 比較하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 溫水供給溫度에 관계없이 前進差分보다는 後進差分의 편이 實測値에 더 近接하고 있음을 알 수 있으며, 後進差分과 實測値와의 平均溫度差는 溫水供給溫度가 37℃, 48℃일때, 各 各 0.24℃, 0.20℃(暖房時間 6時間까지만 平均한 경우)로서 計算値와 實測値가 거의 일치하는 나타났다.

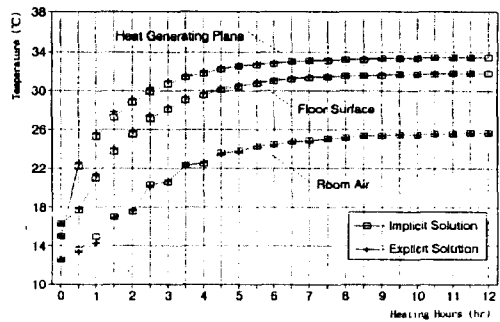


Fig. 7 Comparison of Explicit and Implicit Solutions(Hot Water Supply Temperature, 37℃)

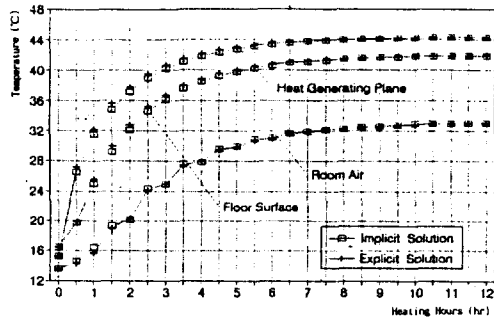


Fig. 8 Comparison of Explicit and Implicit Solutions(Hot Water Supply Temperature, 48℃)

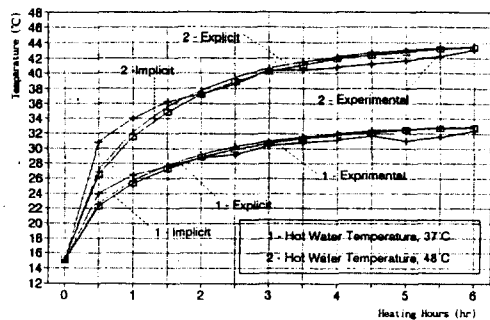


Fig. 9 Comparison of Experimental and Numerical Results(Heat Generating Plane)

Fig. 10은 溫水供給溫도의 變化에 따른 바닥表面溫度에 대한 實測値와 計算値들을 比較하여 나타낸 것으로서, 이 경우에도 溫水供給溫度에 관계없이 前進差分보다는 後進差分의 편이 實測値에 더 近接하고 있음을 알 수

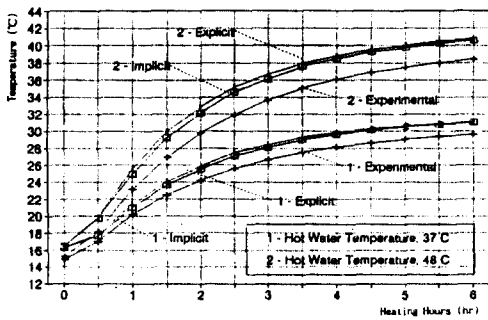


Fig. 10 Comparison of Experimental and Numerical Results (Floor Surface)

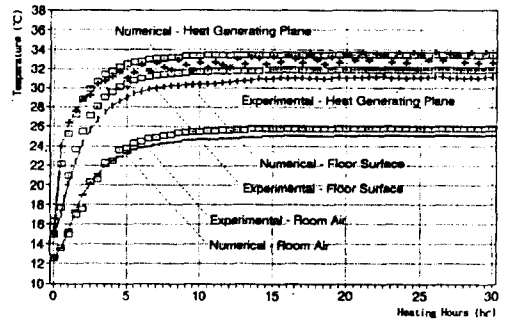


Fig. 12 Comparison of Experimental and Numerical Results (Hot Water Supply Temperature, 37°C)

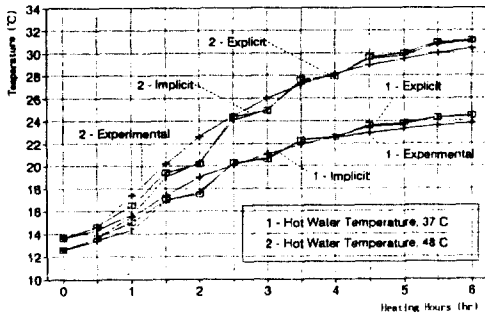


Fig. 11 Comparison of Experimental and Numerical Results (Room Air)

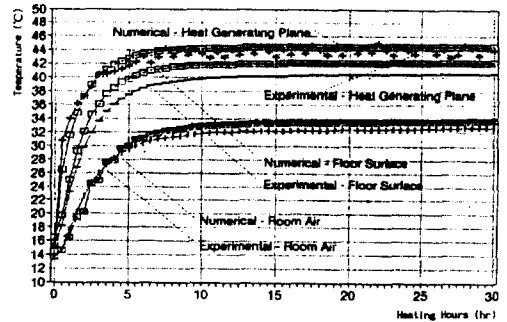


Fig. 13 Comparison of Experimental and Numerical Results (Hot Water Supply Temperature, 48°C)

있으며, 後進差分解와 實測值와의 平均溫度差는 溫水供給溫度가 37°C, 48°C일때, 各各 1.38°C, 2.18°C를 가리키고 있다.

Fig. 11은 溫水供給溫도의 變化에 따른室內溫度에 대한 前進差分解와 後進差分解들을 實測值와 比較하여 나타낸 것이다. 이 경우에도 發熱面 및 바닥表面溫度인 경우와 마찬가지로 溫水供給溫度에 관계없이 前進差分보다는 後進差分解의 편이 實測值에 더 近接하고 있음을 알 수 있으며, 後進差分解와 實測值와의 平均溫度差는 溫水供給溫度가 37°C, 48°C일때, 各各 0.07°C, 0.18°C로서 計算值가 實測值에 近似하고 있다.

Fig. 12는 溫水供給溫度가 37°C일때, 室內溫度, 바닥表面溫度, 發熱面溫度에 대한 實測值와 計算值(後進差分解)들의 溫度分布를 보여주고 있다. 여기에서 計算值를 後進差分解들로만 나타낸 理由는 上述한 바와같이 計算

值들은 前進差分이든 後進差分이든 두 값들이 큰 差異가 없으며, 計算值가 實測值에보다 가까운 것이 前進差分이라기 보다는 後進差分인 것으로 確認되었기 때문이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 室內溫度, 바닥表面溫度, 發熱面溫度는 計算值와 實測值와의 平均溫度差가 暖房時間 전체(36時間)에 대해 各各 0.87°C, 1.03°C, 0.42°C로 나타나고 있어, 바닥表面溫度인 경우가 다소 높은 것으로 나타나고 있지만, 計算值들은 實測值에 거의 近似하고 있음을 파악할 수 있다.

Fig. 13은 溫水供給溫度가 48°C일때, 室內溫度, 바닥表面溫度, 發熱面溫度에 대한 實測值와 計算值(後進差分解)들의 溫度分布를 나타내고 있다. 이 그림에서도 室內溫度, 바닥表面溫度, 發熱面溫度는 計算值와 實測值와의 平均溫度差가 各各 0.93°C, 1.88°C, 0.43°C로 나타나고 있어, Fig. 12와 마찬가지로 計算值

들이 바닥表面溫度인 경우가 다소 높은 것으로 나타나고 있지만, 計算值들이 實測值에 거의 近似하고 있음을 알 수 있다.

그러므로, 前進差分과 後進差분을 이용한 本一次元 計算모델에 의한 數值解는 바닥表面溫度인 경우 약간 높게 나타나고 있기는 하지만, 發熱面과 室內溫度는 모두 計算值가 實測值에 近似하는 것으로 나타나고 있다.

5. 結 論

以上에서와 같이 溫水供給溫도의 變化에 따른 溫水溫突마닥 構造體의 溫度變化 特性을 分析·評價하고, 또한 각 溫度 測定點位置에 대한 實測值들을 前進有限差分과 後進有限差分法을 이용한 數值解들과 比較하였으며, 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

① 本 모델 實驗室은 實測結果, 外氣溫度는 平均 14.7℃로서 ±1.1℃의 작은 變化幅을 갖는 거의 일정한 값을 가지며, 暖房開始 10時間 정도 後부터는 內벽表面, 發熱面, 바닥表面 및 室內溫度가 各各 43.5℃, 39.8℃, 30.3℃, 31.8℃의 거의 일정한 값을 나타내면서 定常狀態에 이르고 있다.

② 室內垂直溫度는 上下分布가 均等하고 時間이 흐르면서 溫度가 上昇하면서 平行移動하고 있다. 더욱 바닥表面과 바닥近處의 溫度가 높게 나타나 溫熱感覺의으로 바람직한 熱環境을 提供하고 있다.

③ 數值解析法에 의한 計算值들은 前進差分이든 後進差分이든 어떤 方法으로 시뮬레이션 하든간에 큰 差異가 없으며, 이 두 方法은 計算方法에 差異가 있을 뿐 결국 그 數值解들은 어느 경우이든 거의 一致한다는 사실을 파악할 수 있었다.

④ 本 모델室에 대한 시뮬레이션에서 前進差分과 後進差分法을 이용한 一次元 計算모델에 의한 數值解는 바닥表面溫度인 경우 약간 높게 나타나고 있기는 하지만, 發熱面과 室內溫度는 모두 計算值가 實測值에 近似하는 것으로 나타나 理論式이 妥當한 것임이 判明되었다.

以上은 溫水溫突暖房시스템의 熱特性을 實驗的으로 檢討하고, 또한 시뮬레이션에 의한 數值解와 實測值들을 比較·分析한 結果이다. 向後에는 바닥 構造體의 두께變化에 따른 傳熱特性과 그에 따른 放熱量과 에너지 消費量 및 環境의 良否 등에 관한 시뮬레이션 研究를 遂行할 豫定이다.

參 考 文 獻

1. 孫章烈, 鄭光燮, 安炳旭, 蓄熱層 두께에 따른 溫水溫突暖房의 바닥溫度 變化特性에 관한 實驗研究, 大韓建築學會 論文集, 1990年6月
2. 鄭光燮, 孫章烈, 溫水溫突 바닥構造體의 熱傳達 解析과 實驗研究, 空氣調和·冷凍工學會 冬季學術大會, 1990年11月
3. 孫章烈, 鄭光燮, 安炳旭, 前進有限差分法을 이용한 溫水溫突 바닥構造體의 非定常溫度解析에 관한 研究, 大韓建築學會 論文集, 1990年12月
4. 宇田川光弘, パソコンによる空氣調和計算法, オーム社, 1986.
5. 日本機械學會, 傳熱工學資料; 改訂 第3版, 1975.
6. M.N. Ozisik, Heat Conduction, John Wiley and Sons, 1980.
7. S. Kakac & Y. Yener, Heat Conduction, 2nd Edition, Hemisphere Publishing Co., 1985.
8. H.S. Carslaw & J.C. Jaeger, Conduction of Heat in Solids, 2nd Edition, Oxford University Press, 1980.
9. V.S. Arpaci, Conduction Heat Transfer, Addison-Wesley Publishing, 1966.
10. G.E. Myers, Analytical Methods in Conduction Heat Transfer, McGraw-Hill Book Co., 1971.
11. B. Carnahan et al., Applied Numerical Methods, John Wiley & Sons, Inc., 1969.
12. J.P. Holman, Heat Transfer; 6th Edition, McGraw-Hill Book Co., 1987.