

<論 文>

自然形 太陽熱暖房裝置에 관한 研究

朴 喜 鎔*

(1984年 8月 21日 接受)

A Study on Natural Solar Heating System

Hi Yong Pak

Abstract

Heat transfer modeling was performed in order to study a natural solar heating system. Simulation of the system was obtained by writing instantaneous energy balance equations for the various components. A thermal-network provided the means for systematically accounting for each of the energy balances. The resulting balances were solved using time varying inputs, such as solar gain and ambient temperature, and the initial temperatures of the components. Parametric heat transfer calculations were performed. Results are discussed which illustrate several effects, including variation of thermal capacity of the storage wall, installation of night insulation, installation of a thermally controlled fan between the sunspace and room, and variation of the width of the sunspace.

記 號 說 明

A : 表面積 또는 斷面積

C : 熱容量

c_p : 比熱

F : 形態係數

H : 높이

h_c : 對流熱傳達係數

I_s : 全天日射

I_r : 地面의 反射熱

L : 溫室의 幅

m : 質量

\dot{m} : 質量流量

Nu : Nusselt 數

Pr : Prandtl 數

R : 熱抵抗

Ra : Rayleigh 數

S : 太陽熱플럭스

T : 溫度

t : 時間

V : 速度

δ : 太陽赤緯

ϵ : 全放射率

θ_h : 太陽高度

θ_i : 入射角

θ_r : 建物의 水平垂直方向과 太陽사이의 角

θ_s : 水平面과 受熱面사이의 角

θ_z : 太陽方位角

ω : 時角

* 正會員, 漢陽大學校 工科學 機械工學科

下添字

- a : 空氣
- i, j : 任意的 溫度交點
- L : 높이
- t : 溫度計
- w : 壁

1. 緒 論

石油에너지의節約을 위하여 太陽熱은 매력적인 에너지源이고 이의 여러가지 應用分野 가운데에서도 暖房으로의 利用은 國內外에서 널리 補給되고 있는 實情이다. 太陽熱暖房裝置는 크게 나누어 設備形과 自然形이 있는데 우리나라에서는 學校建物과 같은 公共建物 대하여서는 自然形 暖房을 권장하고 있다. 自然形 暖房裝置를 細分하면 太陽熱의 直接 獲得形, 間接 獲得形 및 分離 獲得形 등이 있다.

自然-間接 獲得形 暖房裝置는 集熱窓을 통하여 들어온 太陽熱이 集熱窓과 暖房空間사이의 溫室(sunspace)에 위치한 蓄熱材를 加熱하고 이 蓄熱材에 저장된 熱이 다시 暖房空間을 加熱하는 형태를 말하고 溫室의 構造나 通氣口(vent)의 有無에 따라 다시 細分할 수 있다. 이 論文에서는 서울특별시 강남구 도곡동에 소재한 道成國民學校(北緯 37°36', 東徑 127°02', 建物은 正南에서 東쪽으로 11°向하고 있음)의 教室에 設置되어 있는 自然-間接 獲得形 暖房構造를 모델로 設定하여 研究하였다. 이 모델에 대한 現在까지의 研究結果⁽¹⁾는 教室空氣에 대하여 측정한 온도와 계산한 온도의 차이가 測定期間동안의 教室空氣溫度變化值를 기준으로 하였을 때 最大 120%에 달하였는데 이는 解析過程에서 무리한 假定을 하였기 때문이라 판단된다.

이 研究에서는 선정된 난방모델에 대하여 熱回路網을 만들어 각 구성성분에 대하여 에너지平衡式을 세워 시뮬레이션 모델을 구하고 여기에 境界條件과 初期條件을 대입하여 數值解析으로 푼 결과를 實測値와 비교하였다. 또한 蓄熱壁의 熱容量變化, 通氣口の 開閉, 通氣口に 自動溫度調節 扇(fan)의 設置, 夜間斷熱의 設置 및 溫室크기의 變化 등이 暖房溫度에 미치는 영향을 규명하였다.

2. 解 析

선정된 모델 교실의 斷面圖를 Fig. 1에 나타내었다.

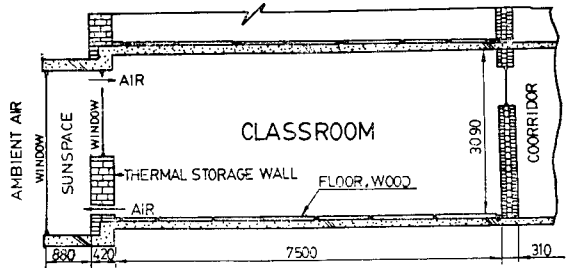


Fig. 1 Cross section of passively heated classroom

學校建物은 4層이고 自然 間接 獲得形 暖房裝置가 된 教室은 2, 3, 4層 各層의 중간교실 3개씩 모두 9個教室인데 解析時 教室과 教室사이는 斷絶되었다고 가정하기 위하여 3層의 한가운데 위치한 교실을 모델教室로 선택하였다. 紙面의 制限으로 인하여 모델교실에 관련된 크기 및 材質을 모두 여기에 열거할 수는 없지만 보다 精確한 研究結果를 얻기 위하여 건축실계도면을 참조하였고 도면상의 미비점을 보완하기 위하여 모델교실의 규격을 다시 측정하였으며 材質을 확인하였고 교실안의 모든 집기의 규격, 재질 및 무게 등을 가능한 것은 모두 測定, 確認하였다.

Fig. 1에서 보는바와 같이 교실과 大氣사이의 溫室이 있고 온실에서 大氣쪽과 교실쪽의 창문은 알루미늄샤시(두께 : 2mm)에 3mm 두께의 보통유리가 끼워져 있다. 온실과 교실사이의 壁은 창문의에 대부분의 표면적은 蓄熱壁으로 되어 있고 蓄熱壁의 上下部에 通氣口가 각각 2개씩 있어서 온실과 교실의 공기온도가 서로 다를때에는 더어머사이폰(thermosiphon) 現象으로 공기가 자연순환 하도록 되어있다. 교실안에는 학생용 책상 31개, 의자 62개, 교탁, 북재캐비닛등 대부분이 木材로 된 집기가 있고 교실바닥은 15mm 두께의 陸松으로 되어 있으며 기타 木材로 된 부분으로는 앞면의 칠판과 뒷면의 게시판등이 있다. 교사용 책상과 의자 및 캐비닛은 철재로 되어 있으나 무게가 전체 목재무게에 비하여 0.5%미만이기 때문에 熱容量計算때에는 무시하였다. 교실과 복도사이의 벽은 미닫이식 출입문 2개, 창문, 중간에 단열재가 들어있는 벽면, 단열재가 없는 벽면등으로 구성되어 있다.

이와같이 복잡한 構造로 되어 있는 모든 構成部分을 각각 따로 취급하는 일은 解析上 대단히 복잡하기 때문에 해석을 하기 위한 모델을 Fig. 2와 같이 만들어 주었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 太陽熱을 직접 흡수하는 부분은 바깥창문, 온실안의 바닥과 벽의 石材部分, 蓄熱壁, 온실과 교실사이의 창문, 교실안의

木材部分이고 교실안의 石材部分이란 교실의 앞뒤쪽 벽과 천정을 말한다. 앞에서 인접교실과는 단열되었다고 하였음에도 불구하고 이와 같이 교실안의 石材部分을 고려하여 준 것은 中間壁이 단열되어 있어 비록 모델 교실과 인접교실사이에 열전달은 없더라도 石材部分의 熱容量이 크기 때문에 교실공기온도에 영향을 미치는 熱源이나 熱싱크(sink)의 作用을 하기 때문이다.

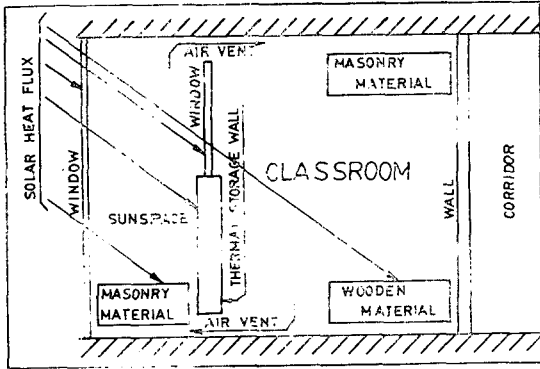


Fig. 2 Model of the system

自然形 太陽熱暖房裝置의 시뮬레이션모델은 裝置의 各 要素에 대하여 瞬間에너지平衡式을 세워서 만들 수 있다^(2,3,4). 이와같이하여 세워진 에너지方程式은 大氣溫度나 太陽熱플럭스와 같이 시간에 따라 변하는 入力와 各 要素의 初期溫度를 사용하여 시간의 函數로 풀 수 있다. 에너지平衡式을 세울 때 熱傳達과 電流사이의 類似性을 이용하여 해석하는 일이 대단히 편리하기 때문에 Fig. 2를 기초로 하여 Fig. 3과 같은 熱回路網을 만들어주었다. 이 열회로망에서 창문과 복도쪽 벽은 熱容量을 2部分으로 나누었고 蓄熱壁은 5部分으로 나누었다. 太陽熱플럭스의 大部分을 蓄열벽에서 흡수하기 때문에 蓄열벽의 等分數는 계산결과에 크게 영향을 미치는 데, 계산결과에 영향을 미치지 않는 蓄열

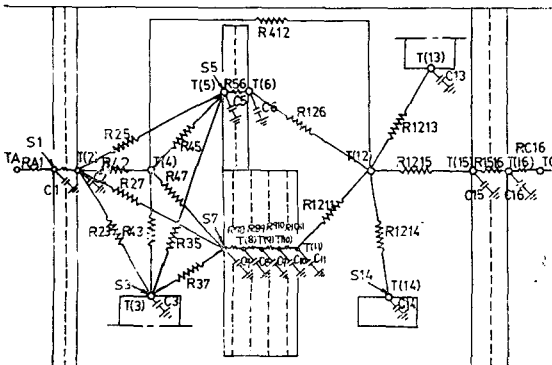


Fig. 3 Thermal-network for the system

벽의 最小等分數는 5개임을 확인하였다.

Fig. 3의 各 交點에 대한 에너지平衡式은 다음과 같다.

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{T_j - T_i}{R_{ij}} + S_i A_i \quad (1)$$

式 (1)의 各 項의 단위는 watt이다. 이 式에서 C_i 는 交點의 熱容量인 質量과 比熱의 곱이고 R_{ij} 는 各 交點사이의 熱抵抗이며, S_i 는 太陽熱플럭스이다. Fig. 3의 各 交點에 대하여 式 (1)을 써줄 때 공기의 질량은 다른 부분의 질량에 비하여 무시할 정도로 작기 때문에 온실과 교실의 공기온도 $T(4)$ 와 $T(12)$ 에 대한 에너지平衡式은 代數方程式이 되고 나머지 14개 방정식은 모두 1階線型微分方程式이 되어 모두 16개의 聯立方程式이 된다. 예를 들어 蓄열벽의 온실쪽 表面溫度 $T(7)$ 에 대하여 式 (1)을 적용하면 다음과 같이 된다.

$$C_7 \frac{dT(7)}{dt} = \frac{T(2) - T(7)}{R_{27}} + \frac{T(3) - T(7)}{R_{37}} + \frac{T(4) - T(7)}{R_{47}} + \frac{T(8) - T(7)}{R_{78}} + S_7 A_7 \quad (2)$$

Fig. 3의 各 交點에 대한 熱容量과 表面積計算은 건축설계도면과 측정결과를 이용하였다. 예를 들어 교실내의 木材部分의 熱容量(C_{14})이나 表面積(A_{14})을 위해서는 학생용 책상이나 의자등은 각기 규격이 조금씩 다르지만 중간크기의 것을 스케치하여 규격을 실측한 뒤 공기와 접촉하는 면적을 계산하고 또 무게를 달아서 책상수나 의자수를 곱하여 결정하였다. 또한 各種 材質의 密度, 比熱 등의 物性値는 참고문헌 (4, 5, 6)의 값을 모두 망라하여 가장 合理的인 값을 선택하여 사용하였다. 이와같이 하여 구한 各 交點에 대한 熱容量과 表面積의 값은 Table 1과 같다.

Table 1 Thermal capacity and surface area of each component

| Thermal capacity(KJ/°K) | Surface area(m ²) |
|-------------------------|-------------------------------|
| $C_{1,2} = 274.5$ | $A_1 = 27.22$ |
| $C_3 = 3002.4$ | $A_3 = 22.21$ |
| $C_{5,6} = 128.8$ | $A_5 = 12.26$ |
| $C_{7-11} = 7620.3$ | $A_7 = 14.24$ |
| $C_{13} = 12415.0$ | $A_{13} = 97.73$ |
| $C_{14} = 3016.4$ | $A_{14} = 184.18$ |
| $C_{15,16} = 5488.9$ | $A_{15} = 27.25$ |

Fig. 3에 나타나 있는 熱抵抗 가운데 R_{12} , R_{56} , R_{78} , R_{89} , R_{90} , R_{101} 및 R_{1516} 은 物體안의 傳導熱抵抗.

두께/(열전도계수×표면적)이다. 蓄熱壁은 전체가 동일재질이기 때문에 별 문제가 없지만 R12, R56 및 R1516과 같이 表面積이 2개 이상의 다른 部分으로 이루어진 곳의 傳導熱 抵抗은 各 部分의 熱抵抗을 따로 계산하여 並列回路를 直列回路로 바꾸어 주면서 환산하여 구한 값을 사용하였다.

RA1과 RC16은 각각 유리창 바깥 大氣쪽과 교실벽의 북도쪽 對流 熱抵抗이고 ASHRAE Fundamentals⁽⁷⁾에 나와 있는 熱傳達係數에 관한 式들을 이용하였다.

R126, R1211 및 R1215 등은 垂直平板周圍의 自然對流 熱抵抗이고 모든 Rayleigh 數에 적용할 수 있는 다음과 같은 Churchill과 Chu⁽⁸⁾가 제안한 式을 사용하여 구하였다.

$$Nu_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.4921 Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3)$$

R1213과 R1214는 각각 교실안의 木材 및 石材와 교실공기사이의 자연대류열저항인데 同一材質이라도 部分에 따라서 위, 아래 또는 열(수평방향)으로 향하여 있고 또 하루 24시간을 통하여 때로는 加熱面이 되기도 하고 또는 冷却面이 되기도 한다. 따라서 자연대류열전달에 관하여 나와 있는 공식을 종합하여 살펴본 결과 加熱面이 上向인 경우가 下向인 경우보다 열전달 계수가 훨씬 크고 수직평판의 경우는 上向 및 下向의 두 경우의 평균값에 해당하기 때문에 R1213과 R1214의 값들은 수직판에 관한 식 (3)을 사용하여 구하였다.

R42, R45 및 R47은 溫室안에서의 자연대류열저항인데 溫室이 폭에 대한 높이의 비가 1보다 크기 때문에 하나의 密閉空間으로 보고 다음과 같이 나타나는 Catton⁽⁹⁾이 제안한 공식을 사용하였다.

$$Nu_L = 0.22 \left(\frac{Pr}{0.2 + Pr} Ra_L \right)^{0.28} (H/L)^{-0.25} \quad (4)$$

엄밀히 따져보면 溫室안의 空氣는 通氣口를 통하여 교실로 이동하기 때문에 온실을 밀폐공간으로 보느냐 또는 수직평판으로 보느냐 하는 문제는 대단히 판단하기 곤란한 문제이다. 그러나 주어진 온실의 규격과 동일한 온도범위안에서 式 (3)과 式 (4)를 각각 사용하여 수치계산을 하여 보면 그 차이는 밀폐공간으로 취급하는 경우 열저항의 크기는 수직평판으로 취급하는 경우보다 약 8%정도가 작지만 後에 溫室의 폭의 크기

가 난방에 미치는 효과를 살펴볼 때 밀폐공간으로 취급하는 것이 더 편리하기 때문에 온실을 밀폐공간으로 취급하였다.

R23, R25, R27, R35, 및 R37 등은 輻射熱 抵抗이다. 이 研究의 初期段階에서는 溫室안의 각 部分의 온도 차이가 그다지 크지 않다는 가정아래 輻射熱傳達을 무시하였으나 計算結果가 만족스럽지 못하여 다시 검토하여 본 결과 하루중 온실안의 각 部分의 온도차이가 클 경우 복사열저항의 크기는 대류열저항 크기의 50% 정도로 크다는 사실을 확인하였다. 그러나 교실안의 각 交點사이의 복사열저항은 대류열저항에 비하여 대단히 작기 때문에 무시할 수 있었다. 輻射熱抵抗의 값을 구하기 위해서는 우선 온실안의 바깥쪽窓, 교실쪽窓, 바닥, 열벽, 천정, 측열벽사이의 형태계수를 계산하였고⁽¹⁰⁾ 바닥, 열벽, 천정등의 3부분은 Fig. 3에서와 같이 하나의 部分으로 취급하여 주기위하여 하나의 部分에 대한 형태계수로 환산하여 주었다. *i* 交點과 *j* 交點사이의 輻射熱抵抗은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{i,j} = \left(\frac{1-\epsilon_i}{\epsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{i-j}} + \frac{1-\epsilon_j}{\epsilon_j A_j} \right) / \{ (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j) \} \quad (5)$$

式 (5)에서 ϵ 은 長波長 輻射에 대한 全放射率이고 各材質에 대한 全放射率값은 참고문헌 (4~6, 10, 11)에 나와있는 값들 가운데에서 선택하여 사용하였다.

R412는 通氣口를 통한 空氣流動으로 인한 熱抵抗이고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R412 = \frac{1}{mc_p} = \frac{1}{\rho A_{vent} V C_p} \quad (6)$$

Fig. 3에서 *S*는 各 交點에서 吸收한 太陽熱플럭스(watt)이다. 이 연구에서 해석적으로 구한 결과를 實測値와 비교하기 위하여 日氣가 계속적으로 청명한 날을 골라 1984년 1월 5일과 16일등 양일에 걸쳐서 필요한 部分의 온도를 30분 간격으로 24시간동안 측정을 하였는데 이 때 水平面全日射量은 測定을 하지 않고 中央氣象臺에서 測定한 資料⁽¹²⁾를 이용하였고 1월 5일의 全日射는 Table 2와 같다.

Table 2의 값을 Fig. 3의 *S*값으로 환산하기 위해서는 당일의 太陽의 高度(altitude θ_1), 方位角(azimuth angle θ_2), 入射角(incidence angle θ_i) 및 各 部分에 비친 日射面積을 時間의 函數로 알아야 한다. 國立天

Table 2 Global solar insolation on horizontal surface in Seoul, on January 5, 1984⁽¹²⁾

| Time | 7~8AM | 8~9 | 9~10 | 10~11 | 11~12 | 12~1 | 1~2 | 2~3 | 3~4 | 4~5PM | Total |
|---------------------------------|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|
| Insolation (MJ/m ²) | 0.03 | 0.32 | 0.87 | 1.11 | 1.25 | 1.13 | 1.22 | 0.95 | 0.44 | 0.03 | 7.35 |

文臺의 資料에 따르면 오전 9시, 정오, 오후 3시의 太陽高度와 方位角만이 나와있어 다음과 같은 式들을 사용하여 太陽高度, 方位角 및 入射角을 시간의 함수로 계산하였고⁽⁴⁾ 各 部分의 日射面積을 측정하였다.

$$\theta_h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \quad (7)$$

$$\theta_z = \sin^{-1}(\cos \delta \cdot \sin \omega / \cos \theta_h) \quad (8)$$

$$\theta_i = \cos^{-1}(\cos \theta_h \cdot \cos \theta_r) \quad (9)$$

위 식에서 ϕ 는 緯度이고 ω 는 時角(hour angle)이며 δ 는 당일의 太陽赤緯(solar declination)이고 θ_r 는 建物の 水平垂直方向과 太陽이 이루는 角度인데 모델 교실은 正南에서 東으로 11° 向하고 있기 때문에 方位角에서 11°를 뺀 角이다. 위 식들을 사용하여 國立天文臺의 제한된 자료를 비교하여보니 差異가 0.1° 以內이었다. 受熱面은 水平面全日射外에도 地面의 反射로 인한 熱도 받게 되는데 이 反射熱은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁴⁾.

$$I_r = \rho I_s \left(\frac{1 - \cos \theta_i}{2} \right) \quad (10)$$

式 (10)에서 ρ 는 太陽輻射에 대한 地面의 反射率이고 I_s 는 全日射이며 θ_i 는 水平面에 대하여 受熱面이 이루는 角度이다. 全日射와 地面의 反射日射가 온실의 바깥窓에 入射하면 일부는 窓에서 反射하고 나머지는 吸收되거나 透過하게 된다. 溫室안으로 들어온 熱은 蓄熱壁, 溫室안의 바닥과 塹벽, 教室窓에 의하여 吸收되고 또한 일부는 教室窓을 통하여 교실안으로 들어간다. 엄밀히 따지면 蓄熱壁이나 溫室壁에 入射한 熱은 일부는 吸收하고 나머지는 反射하여 다시 溫室안의 다른 部分에 입사하는 일을 반복하지만 여기에서는 窓을 제외한 나머지 蓄熱壁, 溫室壁과 바닥 및 教室안의 木材에 입사되는 太陽熱은 모두 吸收하고 教室窓에서 반사되는 輻射는 온실바닥이나 塹벽으로 다시 입사하여 吸收된다고 가정하였다. 이와 같이 가정할 수 있는 이유는 實際로 蓄熱壁, 溫室壁과 바닥 및 木材等의 太陽輻射에 대한 吸收率이 매우 크기 때문이다.

太陽熱플럭스를 계산할 때 各 材質에 대한 輻射性質의 값은 참고문헌(4,10)을 사용하였고 輻射性質이 入射角에 따라 변하는 方向性 역시 고려해 주었다.

3. 測 定

Fig. 3과 같은 熱回路網에서 各 交點溫度에 대한 에너지平衡으로 세운 16개의 聯立方程式에 初期條件과 境界條件을 대입하여 적당한 크기의 時間增分으로 結果를 實際와 比較하기 위하여 모델教室에 관련되는

溫度를 1984년 1월 5,6일과 16,17일의 2회에 걸쳐서 측정을 하였다. 오전 8시를 始發點으로 하여 周圍大氣溫度와 溫室, 教室 및 複道等의 空氣溫度, 上·下部通氣口를 통하여 흐르는 空氣速度等을 24時間동안 30분 간격으로 測定하였고, 햇빛이 溫室에 비치는 동안에 蓄熱壁, 溫室안의 바닥과 塹벽, 교실쪽 창문등에 비친 햇빛면적 역시 30분 간격으로 측정하였으며 관련된 모든 部分에 대한 오전 8시의 初期溫度를 측정하였다. 測定데이터의 合理性과 再現性을 검토하기 위하여 2회에 걸쳐서 측정한 것을 比較해 보면 測定結果의 傾向에는 큰 차이가 없기 때문에 1월 5,6일에 측정한 결과만을 여기에 제시하고자 한다.

이 研究에 관련된 대부분의 溫度測定은 참고문헌(1)에서와 비슷한 방법으로 하였다. 24개의 유리管 溫度計를 補正을 한 뒤에 교실바닥에서 1m 높이 지점과 천정에서 아래로 1m 되는 지점에 教室全面을 통하여 균일하게 매달아서 測定하였고 溫度計의 精確한 위치는 참고문헌(1)을 참조하기 바란다. 예상할 수 있는 바와 같이 온실공기가 교실공기온보다도 높은 동안 교실온도는 온실쪽에 가까울수록 높고 또한 교실의 상면도에서 보았을 때 동일지점이라도 천정쪽의 온도가 바닥쪽의 온도보다 더 높았다. 따라서 매 순간의 교실공기온도가 균일할 수는 없었으나 이 연구에서는 24개의 온도계에서 읽은 값을 평균치를 교실공기온도로 가정하였다. 평균온도에 비하여 편차가 가장 심한 때는 교실온도가 하루중 최고가 되는 오후 2시였는데 이 때의 편차는 -0.7°C 와 $+0.5^{\circ}\text{C}$ 사이였다.

周圍大氣와 溫室 空氣의 溫度를 測定하기 위한 유리管 溫度計는 日照時의 太陽輻射熱에 의한 영향을 최소로 줄이기 위하여 나무판자에 부착된 온도계를 사용하였고 나무판자의 뒷면은 反射率이 큰 알루미늄포일로 싸서 輻射遮蔽를 시도하였다. 周圍大氣溫度의 경우 測定溫度를 당일의 中央觀象臺에서 測定한 溫度와 비교해 본 결과 햇빛이 비치지 않는 동안에는 거의 일치하였으나 溫度計에 햇빛이 비치는 동안인 오전 8시부터 오후 3시 30분까지의 測定溫度는 중앙관상대의 측정 온도보다 높았다. 이와 같은 이유는 測定時에 비록 溫度計의 한쪽에 복사차폐를 하였지만 온도계 자체와 인접한 차폐용 나무판자나 또는 주위의 창틀 사이에 복사열교환이 이루어졌기 때문으로 판단된다. 따라서 Fig. 4와 같은 溫度計의 配置로 부터 測定溫度를 補正하였다. Fig. 4에서 T_i 는 溫度計의 指示溫度이고 T_o 는 溫度計 周圍物體의 溫度이며 T_a 는 實際의 空氣溫度이다. 溫度計의 指示溶液이 들어있는 容器를 대략 球

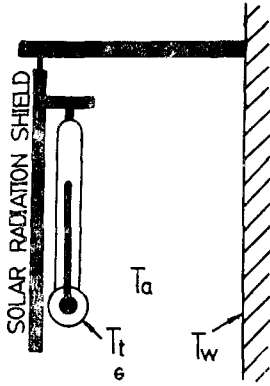


Fig. 4 Thermometer arrangement for measurement of ambient and sunspace air temperatures

形으로 보고 球形주위의 自然對流 熱傳達係數를 h_c 라 하여 熱平衡方程式을 써주면 다음과 같다.

$$h_c A (T_i - T_a) = \sigma \epsilon (T_w^4 - T_i^4) \quad (11)$$

式 (11)을 다시 정리하면 다음과 같이 된다.

$$T_a = T_i - \frac{\sigma \epsilon (T_w^4 - T_i^4)}{h_c} \quad (12)$$

式 (12)에서 T_w 은 온도계에 부착된 나무판자나 주위 창문의 표면온도가 되어야 하는데 이들에 대한 값을 측정하지 못하였기 때문에 보정해 주기전의 주위공기 온도를 사용하여 Fig. 3의 熱回路網方法으로 계산한 결과로 부터 나온 창문의 표면온도를 주위표면온도로 가정하여 補正을 한 結果 周圍 空氣溫度的 測定値는 中央觀象臺의 測定溫度和 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 범위에서 잘 일치하였

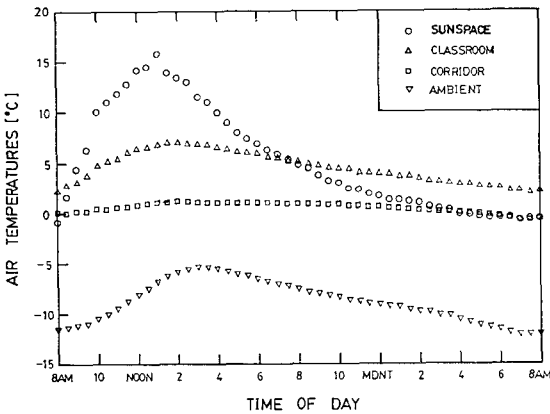


Fig. 5 Measured temperatures on January 5~6, 1984

다. 따라서 溫室 空氣溫度에 대한 測定值 역시 T_w 을 계산으로 나온 蓄熱壁의 表面溫度로 가정하여 補正을 하여 주었다. 이와 같이하여 구한 1984년 1월 5, 6일의 주위공기온도, 온실, 교실 및 복도의 공기 온도는 Fig. 5와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 복도의 온도는 하루중 큰 변화가 없었으며 온실온도와 교실온도가 교차하는 시간은 오전 8시 30분경과 오후 8시경으로 나타났다.

溫室과 教室사이의 上, 下部 通氣口를 통한 공기의 속도는 Anemomaster(Nihon Kagaku Kogyo Co., Model AM-A11/11-111)를 사용하여 측정하였는데 通氣口의 斷面에서 대칭되는 7곳의 속도를 측정하였다. 대부분의 측정기간동안의 속도분포는 포물선형태보다 더욱 둔화된 형태이면서 다소 불규칙하게 나타났기 때문에 亂流流動으로 판단된다. 上, 下部 各 通氣口에서의 공기 속도는 7곳에서의 측정치의 평균치로 잡았고 다시 上部通氣와 下部通氣口 空氣速度的 平均치를 최종 공기속도로 잡았다.

熱回路網을 기초로하여 세운 에너지平衡式을 聯立하여 풀기위해서는 各 要素에 대한 初期(오전 8시) 溫度를 알아야 하기 때문에 측정당일의 모델교실안의 거의 모든 부분의 초기온도를 surface temperature probe (Omega社, Model 68202-K)와 multipoint digital thermometer(Omega社 Model 2176A)를 사용하여 측정하였다. 蓄熱壁의 表面溫度和 같이 面全體가 단일 재질로 되어 있는 것은 測定值를 바로 사용할 수 있으나 교실과 복도사이의 벽면과 같이 表面積이 여러부분으로 구성되어 있는 것은 面을 구성하고 있는 각 부분의 熱容量을 加重值로 하여 다음과 같은 式으로 換算을 하여 주었다.

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n (mc_p T)_i}{\sum_{i=1}^n (mc_p)_i} \quad (13)$$

實測이 곤란한 蓄熱壁 內部の 溫度에 대하여서는 벽의 中央面의 溫度가 가장 높다는 가정하에 이미 알고 있는 兩 表面溫度, 傳導 熱抵抗의 크기, 周圍 空氣溫度, 表面의 對流 熱抵抗의 크기등을 사용하여 계산해준 값으로 가정하였다. 이와같이 구한 初期溫度는 Table 3과 같다.

Table 3 Initial temperature of each component

| Component | T (1) | T (2) | T (3) | T (4) | T (5) | T (6) | T (7) | T (8) | T (9) | T (10) | T (11) | T (12) | T (13) | T (14) | T (15) | T (16) |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Temperature(°C) | -7.9 | -7.3 | 0.5 | -0.9 | -0.7 | 0.2 | 0.9 | 5.0 | 7.0 | 6.2 | 5.0 | 2.1 | 3.8 | 2.9 | 0.9 | 0.3 |

4. 結果 및 討議

式 (1)을 이용하여 Fig. 3의 各 交點에 대하여 세운 에너지平衡式인 2個의 代數方程式과 14個의 1階線型 微分方程式을 풀기 위하여 앞에서 설명한 各 熱抵抗 값과 Table 1의 熱容量값 및 Table 2를 바탕으로 하여 各 要素가 흡수한 太陽熱플럭스값을 사용하였다. 境界條件으로는 Fig. 5의 周圍大氣溫度 및 複道空氣溫度의 값을 이용하고 初期條件으로는 Table 3의 값을 사용하였다.

이들 에너지平衡式의 數值解法으로는 Euler 방법과 修正된 Euler 방법 등 2가지 방법을 시험하여 본 결과 計算結果에 差異를 찾아볼 수 없었기 때문에 프로그램이 더 간단한 Euler 방법을 사용하였다. 時間增分을 30, 15, 및 10分 등으로 줄여가면서 計算을 수행하여 본 결과 時間增분이 30分에서 15分으로 줄더라도 Fig. 3의 各 交點의 溫度變化는 計算과정 전체를 통하여 0.1°C 이하였기 때문에 時間增분은 30分으로 하여 24時間을 48增분으로 나누어 計算하였다.

計算의 結果를 溫室과 教室空氣溫度에 대한 測定値와 더불어 Fig. 6에 나타내었다. 計算値는 傾向面에서 測定値와 매우 잘 일치하였으나 計算치는 측정치에 비하여 온실공기온도와 교실공기온도가 교차하는 오후 8시전에는 대체로 낮았고, 오후 8시후에는 높게 나타났다. 이들 差異를 온실 및 교실공기온도 측정치의 하루중에 變化值(온실의 경우 $\Delta T=16.5^{\circ}\text{C}$, 교실의 경우 $\Delta T=5.1^{\circ}\text{C}$)를 基準으로 하여 計算하여 보면 온실공기온도의 차이는 -18.2% 내지 $+6.0\%$ 였고 교실공기온도의 차이는 -15.7% 내지 $+7.8\%$ 였다. 그러나 差의 最大値인 -18.2% 와 -15.7% 는 모두 오전 10시에 일어났고 Fig. 6에서 보듯이 오전 10시때의 값들을 제외하고 다른 대부분의 시각에서는 모두 10%내

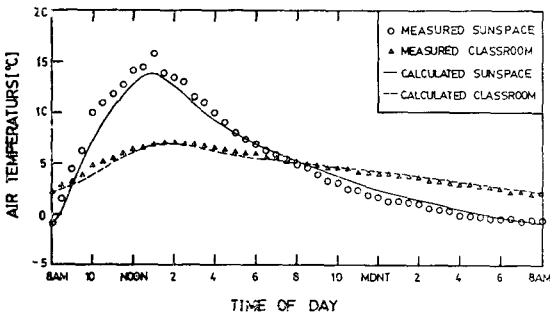


Fig. 6 Comparison of measured and calculated air temperatures for sunspace and classroom

의 차이를 나타내기 때문에 計算치는 측정치와 대체로 잘 일치한다고 할 수 있다.

이와 같이 측정치와 잘 일치하는 計算치의 컴퓨터프로그램을 바탕으로 하여 自然-間接形 太陽熱暖房裝置에서 熱效率을 증가시키기 위하여 교실공기온도에 영향을 미치는 各 要素에 대하여 살펴보는 일은 대단히 중요한 일이다. 各 要素가 交실공기온도에 미치는 영향을 조사할 때 가장 문제가 되는 것은 온실과 交실사이의 通氣口를 통하여 흐르는 공기의 速度이다. 즉 앞에서 는 측정치 한 空氣流動速度를 사용하였는데 만약 蓄熱壁의 熱容量을 변화시킨다든가 또는 온실의 幅을 변화시켜 가면서 計算을 다시 수행할 때 空氣流動速度를 알 수가 없다. 그러나 Duffie와 Beckman⁽²⁾은 通氣口를 통하여 흐르는 공기의 속도는 온실과 交실공기온도차의 平方根에 비례한다는 事實을 Bernoulli方程式을 기초로 하여 誘導하였다. 따라서 공기속도를 $V=C(\Delta T)^{1/2}$ 과 같은 공식으로 나타내기 위하여 1월 5일에 측정된 데이터를 공기속도 대 온실과 교실공기온도차의 그래프로 나타내고 이 데이터와 잘 일치하는 C 값을 구하여 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V=0.26(\Delta T)^{1/2} \tag{16}$$

式 (16)과 더불어 測定데이터를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 식 (16)은 ΔT 가 1°C 以下에서는 測定値보다 약간 낮고 4°C 以下에서는 약간 높게 나타났기 때문에 ΔT 의 區間을 세분하여 式으로 나타내는 방법도 構想을 하여 보았으나 이렇게 하는 경우 區間의 境界點에서는 ΔT 가 더 높은데도 속도가 낮게 표현되는 短點이 있고 또한 ΔT 가 4°C 이상인 區間에서는 속도가 ΔT 에 비례하도록 나타내면 測定値와 더 잘 일치하는 式을 세울 수 있으나 ΔT 에 비례한다는 이론적 근거가 없기 때문에 式 (16)으로 決定하였다. 앞으로 交실공기온도에 영향을 미치는 各 要

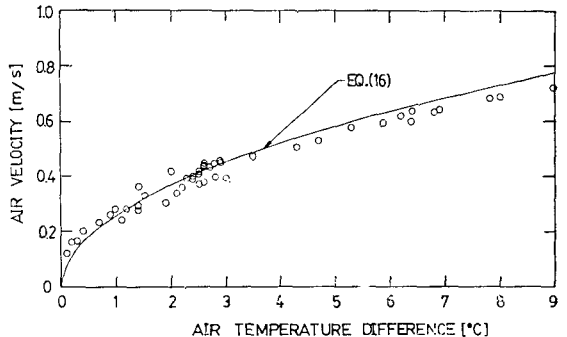


Fig. 7 Relationship between air velocity and temperature difference based on measurements made on January 5~6, 1984

素에 대하여 살펴볼 때 通氣日를 단지 않는 한 공기속도는 이 식에 따랐다.

4.1. 蓄熱壁의 熱容量의 영향

모델교실의 축열벽은 두께 42cm의 벽들을 쌓아서 만들어졌는데 熱容量의 크기는 質量과 比熱의 곱이므로 벽의 두께에 비례한다. 모델교실의 온도계산에서 사용한 境界條件, 初期條件 및 다른 모든 條件을 그대로 두고 蓄熱壁의 熱容量만을 1/2, 1/4 및 1/8 등으로 줄여서 계산하여 본 교실공기온도를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 蓄熱壁의 熱容量이 감소할수록 교실공기온도는 증가하게 된다. 그러나 熱容量이 너무 작아지면 그 다음날 새벽부터는 교실공기가 더욱 낮아짐을 알 수 있다.

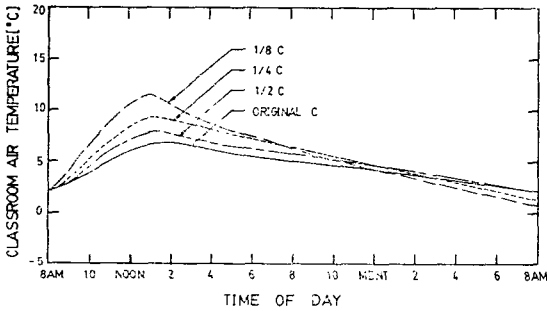


Fig. 8 Effect of thermal capacity of storage wall on classroom air temperature

4.2. 通氣口 開閉의 영향

모델교실의 온실과 교실사이의 通氣口는 원래 여단을 수 있게 製作되어 있는데 通常 열어 둔 채로 사용하고 있기 때문에 이 研究에서의 溫度測定도 하루종일 열어 둔 데로 수행하였다. 그러나 만약 通氣口를 退勤時인 오후 5시에 닫고, 온실공기온도가 교실공기온도보다 더 높아지는 오전 9시에 연다면 교실공기온도가 어떻게 변하는가를 살펴 보았다. Fig. 9에서 짧은 點線으로 나타낸 것은 通氣口를 여닫기 시작하는 첫날의 교실공기이다. 그림에서 보는 바와 같이 그 다음날 8시의 교실공기온도는 약 1°C가 증가하게 된다. 만약 通氣口의 開閉를 4일간 반복하게 되면 初期溫度와 그 다음날 오전 8시의 온도가 같아지고 이 경우의 교실공기온도는 Fig. 9에서 긴 點線으로 나타내었는데 이 경우 교실공기온도를 하루 전체를 통하여 0.5 내지 1°C 정도 높일 수 있다.

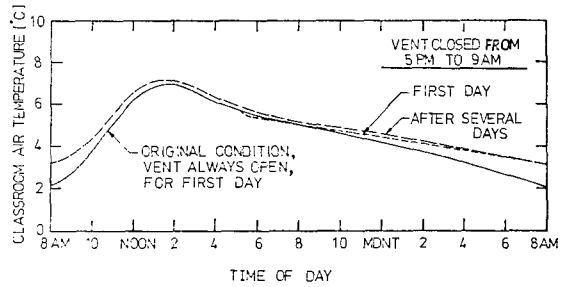


Fig. 9 Effect of closing the vent between 5PM and 9AM

4.3. 自動溫度調節환 設置의 영향

通氣口를 사람의 손으로 개폐하는 것보다 좀 더 積極的인 方法으로 만약 溫室空氣溫度가 教室空氣溫度보다 더 높을 때에만 作動하도록 設計된 소위 自動溫度調節(thermally controlled)환을 設置한다면 教室空氣溫度를 얼마나 높일 수 있는가를 살펴보았다. 환 作動時 공기속도를 각각 1, 2 및 3m/s로 하였을 때의 교실공기온도는 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 自動溫度調節환을 부착하면 교실공기온도를 상당히 높일 수 있으며 또한 그 다음날 오전 8시의 교실공기온도는 환의 속도가 1m/s인 경우에도 1°C 이상 높여 줄 수 있다.

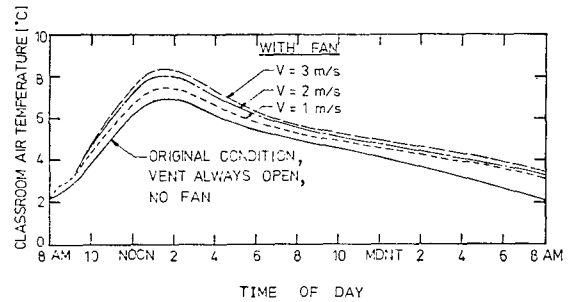


Fig. 10 Effect of thermally controlled fan on classroom air temperature for the first day

4.4. 溫室幅의 크기의 영향

溫室幅의 크기가 달라지면 Fig. 3에서 對流 熱抵抗 R42, R45 및 R47 과 輻射 熱抵抗 R23, R25, R27, R35 및 R37 등이 달라진다. 溫室幅을 각각 2/3 및 1/3로 축소하여 식 (6)에 따라 對流 熱抵抗을 다시 계산하여 幅을 2/3로 축소하면 약 4% 증가하고 1/3로 축소하면 약 11% 증가한다. 輻射 熱抵抗의 경우 各部分 사이의 형태계수를 모두 다시 계산하여 구한 결과에 따르면

R23, R35 및 R37은 幅을 2/3로 축소하면 약 30% 증가하고 1/3로 축소하면 약 130%가 증가하며 R25와 R27은 2/3로 축소하면 약 7% 감소하고 1/3로 축소하는 경우 약 17%가 감소한다. 그러나 이와 같이 各熱抵抗의 증가 및 감소에도 불구하고 最終적으로 教室 공기온도에 미치는 영향은 대단히 작다. 數值的으로 말하면 하루 全體를 통하여 거의 변화가 없다가 새벽부터 약간 증가하긴하나 그 다음날 오전 8시가 되면 溫室幅을 2/3로 축소하는 경우 약 0.1°C, 1/3로 축소하는 경우 약 0.2°C가 증가하기 때문에 溫室幅의 크기는 教室 공기온도에 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

4.5. 夜間斷熱의 영향

커튼 등을 이용하여 夜間에 斷熱을 하였을 때의 영향을 살펴 보고자 할 때 斷熱로 인한 熱抵抗을 얼마로 하느냐 하는 문제와 斷熱을 어디에 하느냐 하는 문제를 우선 정하여야 한다.

Balcomb 等⁽¹³⁾은 自然形 太陽熱暖房에 관한 研究에서 夜間斷熱로 인한 熱抵抗의 R值(R-factor)를 R-9로 하였고 斷熱期間은 오후 5시부터 오전 8시까지로 하였다. 여기서 R-9란 單位面積當 熱抵抗이 9ft²·hr·°F/Btu란 뜻이다. 그러나 現實적으로 可用할 수 있는 커튼의 材質이나 커튼과 창문사이의 空氣層의 두께등을 계산하여 보니 R-9는 너무 크고 R-6이 적합한 것으로 判明이 되어 여기에서는 R值를 6으로 하였다.

모델教室에 대하여 夜間斷熱을 할 수 있는 곳은 온실안의 바깥창쪽과 蓄熱壁쪽, 教室안의 蓄熱壁쪽과 複道쪽 등 4 곳이다. 측열벽쪽을 단열하는 경우, 순수한 斷熱만의 효과를 살펴보기 위하여 空氣는 通氣口를 통하여 自然循環한다고 假定하였다. 오후 5시부터 다음날 오전 8시까지 斷熱하는 것으로 하고 위에 설명한 4 곳에 대하여 教室온도를 계산하여 본 바에 따르면 온실이나 教室에서 蓄熱壁쪽을 단열하는 경우에는 蓄熱壁全體의 온도를 저장하는 때에는 효과가 있으나 斷熱期間에 온실과 教室 공기온도는 너무 낮아져서 오히려 逆效果가 나타난다. 오후 5시와 오전 8시 사이에 夜間斷熱을 온실안에서 바깥창쪽과 蓄熱壁쪽에 하는 경우 첫날의 온실과 教室 공기온도를 Fig. 11에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 蓄熱壁쪽을 斷熱하는 경우 온실과 教室 공기온도는 모두 斷熱을 하지 않았을 때 보다 떨어진다.

斷熱의 효과가 가장 좋은 位置는 온실안의 바깥창쪽이고 그 다음은 教室안의 複道쪽이다. 이 두 곳에 夜

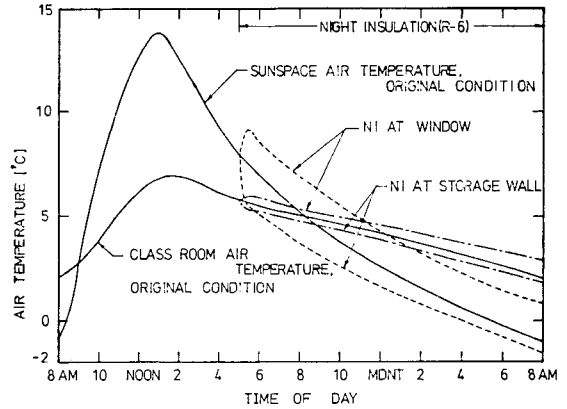


Fig. 11 Effect of installing night insulation on air temperature for the first day

間斷熱을 반복하여 주변 대개 7내지 8일 후에는 平衡狀態가 되어 오전 8시의 공기온도는 일정하여진다. 이와같이 平衡狀態가 되었을 때 온실안에서 창쪽을 단열하는 경우와 온실안의 창쪽 및 教室안의 複道쪽의 두 곳을 모두 야간단열하여 주는 경우의 教室 공기온도를 Fig. 12에 나타내 보았다. 특히 위의 두 곳을 모두 야간단열하는 경우 教室 공기온도의 증가는 현저하다. 이 그림에서 보듯이 두 곳을 모두 야간단열하는 경우 오전 8시 이후 教室 공기온도가 1시간동안은 내려가는데 이는 단열이 갑자기 除去되기 때문에 教室 공기온도가 복도 공기온도의 영향을 바로 받기 때문이다.

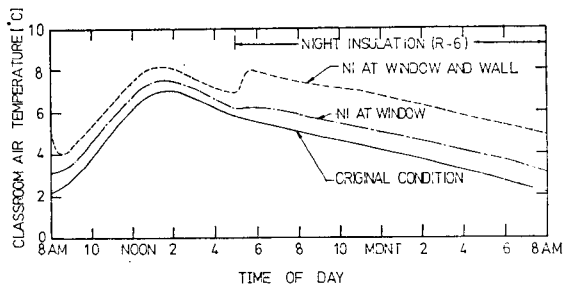


Fig. 12 Effect of installing night insulation on classroom air temperature after several days

4.6. 綜合效果의 例

위에서 教室 공기온도에 영향을 미치는 여러가지 要素를 살펴 보았는데 이들 要素를 綜合하여 教室 공기온도를 效果의으로 올려주는 例를 들어 보기로 한다. 예컨대 현재의 모델教室에서 측열벽의 두께를(따라서 熱容量) 1/4로 축소하고 온실과 教室사이의 通氣口에는

3m/s의 速度로 작동하는 自動溫度調節팬을 부착하며, 오후 5시와 아침 8시 사이에 온실안의 창쪽과 교실안의 북도쪽을 R值가 6인 야간단열을 해주어 平衡狀態가 되었을 때 교실공기온도를 原來(1984년 1월 5일)의 교실공기온도와 비교한 것을 Fig. 13에 윗부분 두 曲線으로 나타내었는데 그림에서 보느냐와 같이 綜合效果로 인하여 교실공기온도를 最高 5°C까지 증가시켜 줄 수 있다.

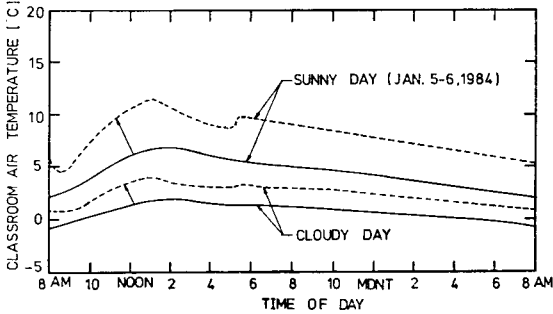


Fig. 13 Combined effects of thermal capacity of storage wall, night insulation, and thermally controlled fan for both sunny and cloudy days

호린날씨에는 위와 같은 綜合效果가 어떻게 나타나는가를 살펴보기 위하여 Fig. 13에서 아래부분의 두 曲線은 計算의 모든 條件을 같게 놓고 오직 太陽熱 플럭스만을 1월 5일의 半으로 줄여서 平衡狀態가 된 뒤에 교실공기온도를 나타낸 것이다. 호린날의 太陽熱 플럭스를 1월 5일의 半으로 잡은 것은 1月初旬의 中央氣象臺의 太陽熱資料를 살펴본 결과 대부분의 호린날의 태양열플럭스는 1월 5일 것의 半程度였기 때문이다. 그림에서 보는 바와 같이 위에 綜合效果는 호린날에도 교실공기온도를 약 2°C 정도 상승시켜줄 수 있다.

5. 結 論

本 論文에서 自然形 太陽熱暖房裝置에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 結論을 내릴 수 있다.

(1) 熱回路網을 만들어 各 溫度交點에 대하여 순간 열평형방정식을 세워 聯立으로 數值解析한 結果는 實測溫度値와 매우 잘 일치한다.

(2) 蓄熱壁의 熱容量을 감소시켜 주면 暖房의 效果를 증가시켜 줄 수 있다. 단, 열용량을 지나치게 감소시켜 주면 그 다음날 아침에는 공기온도가 더 떨어지는데 이를 방지하기 위하여서는 自動溫度調節팬의 附

着이나 夜間斷熱等 다른 방법을 병행하여 사용하여야 한다.

(3) 蓄熱壁의 表面을 夜間斷熱하는 일은 별로 효과가 없고 溫室의 集熱窓쪽이나 暖房空間에서 蓄熱壁의 반대쪽(이 研究의 모델교실에서는 複道쪽)을 夜間斷熱하는 일은 매우 效果的이다.

(4) 자연순환용 通氣口에 自動溫度調節팬을 設置하면 暖房效果를 크게 증가시킬 수 있다.

(5) 溫室幅의 크기는 暖房效果에 별로 영향을 미치지 않는다.

(6) 通氣口를 통하는 空氣速度는 $V=0.26(\Delta T)^{1/2}$ 로 나타낼 수 있다.

後 記

이 연구는 저자가 문교부 국비해외과전 연구교수로서 Purdue 大學校를 방문한 1983年 8月에서 1984年 8月사이에 완성 되었습니다. 이에 대하여 관계당국에 깊은 감사를 표합니다.

參 考 文 獻

- (1) 朴喜鎔, 丁海冠, "受動形 太陽熱教室 暖房裝置에 관한 研究", 空氣調和·冷凍工學會誌, 第12卷, 第2號, pp.71~80, 1983
- (2) J.A. Duffie and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Chap. 15, pp.512~555, John Wiley and Sons, New York, 1980
- (3) J.D. Balcomb, "Passive Solar Heating Research", Advances in Solar Energy, Vol. 1, American Solar Energy Society, Inc., pp.265~304, 1982
- (4) E.E. Anderson, Fundamentals of Solar Energy Conversion, Chap. 12 (pp.398~456) and Appendices (pp.539~551), Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass., 1983
- (5) F.P. Incropera and D.P. DeWitt, Fundamentals of Heat Transfer, Appendices, pp.761~790, John Wiley and Sons, New York, 1981
- (6) J.P. Holman, Heat Transfer, 4th ed., Appendix A, pp.495~511, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976
- (7) ASHRAE Handbook and Product Directory, Fundamentals Volume, ASHRAE, New York, 1977

- (8) S.W. Churchill and H.H.S. Chu, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp.1323~1329, 1975
- (9) I. Catton, "Natural Convection in Enclosures", Proc. 6th International Heat Transfer Conference, Vol. 6, KS-3, pp.13~31, Toronto, Canada, 1978
- (10) R. Siegel and J.R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, 2nd ed., Chap. 7, (pp.172~232) and Appendix D, (pp.832~837), McGraw-Hill Book Company, New York, 1981
- (11) J.F. Kreider and F. Kreith, Solar Energy Handbook, Chap. 5, pp.5.1~5.27, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981
- (12) 中央氣象臺 資料室 提供
- (13) J.D. Balcomb and F.D. McFarland, A Simple Empirical Method for Estimating the Performance of a Passive Solar Heated Building of Thermal Storage Wall Type, Proc. 2nd National Solar Conference, ISES, 1978