

## 매크로 모델에 의한 실내온열환경 검토

정재훈<sup>†</sup>

호서대학교 건축공학과

### An Analysis of Indoor Thermal Environment by Macro Model

Jae-Hoon Jung<sup>†</sup>

Department of Architectural Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

**ABSTRACT:** It is known that slab thermal storage which uses concrete slab as thermal material is effective in the load leveling and using the nighttime electric power. The temperature distribution is not constant in plenum in thermal storage time by beams, ducts such as several factor. It is considered that this fact will effect on efficiency of thermal storage and indoor thermal environment. The purpose of this paper is to examine the thermal environment inside plenum. A macro model was made for the analysis of indoor thermal environment as the first step. The flow rate distribution and temperature distribution of object room model was examined by use of basic equations such as airflow by the pressure difference between unit cells, heat flow by air and heat transfer.

**Key words:** Indoor thermal environment(실내 온열환경), Macro model(매크로 모델), Flow rate distribution(유량분포), Temperature distribution(온도분포)

#### 기 호 설 명

- $A$  : 개구부 면적 [ $m^2$ ]
- $c$  : 비열 [ $kcal/kg \cdot ^\circ C$ ]
- $C$  : 유량계수
- $E$  : 단위기호
- $g$  : 중력가속도 [ $m/s^2$ ]
- $G$  : 공기유량 [ $m^3/s$ ]
- $h$  : 기준점으로부터의 높이 [ $m$ ]
- $P$  : 압력 [ $Pa$ ]
- $q$  : 열류 [ $kcal/h$ ]
- $Q$  : 보유열량 [ $kcal$ ]
- $v$  : 평균속도 [ $m/s$ ]

$V$  : 체적 [ $m^3$ ]

#### 그리스 문자

- $\alpha$  : 열전달률 [ $kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$ ]
- $\gamma$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]
- $\Delta P$  : 압력차 [ $Pa$ ]
- $\Delta t$  : 분할시간 [ $s$ ]
- $\Delta x$  : 벽체분할폭 [ $m$ ]
- $\rho$  : 공기밀도 [ $kg/m^3$ ]
- $\theta$  : 온도 [ $^\circ C$ ]
- $\lambda$  : 열전도율 [ $kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$ ]

#### 하첨자

- $a$  : 공기
- $i$  : 단위 셀의 행 번호

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-41-540-5775; fax: +82-41-540-5778

E-mail address: jungjh@hoseo.edu

- $j$  : 단위 셀의 열 번호
- $o$  : 실외측
- $r$  : 실내측
- $w$  : 벽체

## 1. 서론

하절기의 냉방 및 동절기의 난방은 우리생활에 있어서 필요불가결의 요소이며, 오피스 건물 등 일 년 내내 공조하는 곳도 적지 않다. 공조로 인한 에너지문제, 열섬현상 등 해결해야 할 과제가 산적해 있는 상황이다.

한편, 특정시간에 전력소비량이 집중되는 문제로 에너지소비량이 비교적 적은 심야에 저렴한 전력을 사용하여 열을 생산하고 주간에 사용하는 축열 냉난방기술이 활용되고 있다. 최근에는 건물의 바닥 콘크리트 슬래브를 축열체로 하는 슬래브축열이 부하평준화 및 심야전력이용에 유효한 것으로 알려져 있다. 반면, 슬래브축열은 콘크리트 슬래브를 축열체로 사용하므로 축·방열의 제어가 어렵다는 난점을 안고 있다. 이를 위해서는 축·방열시 플레넘(천정공간)에서의 기류 및 온도분포를 파악할 필요가 있다.

이러한 관점에서, 본 연구에서는 매크로 모델을 사용하여 실내기, 덕트, 보 등으로 구성된 복잡한 플레넘의 온열환경을 검토하여 축방열 특성을 파악할 것을 목적으로 한다. 매크로 모델은 유체모델(마이크로 모델)에 비하여 해석상 간편하며 비교적 빠른 시간 내에 실내 공기유량 및 온도분포를 해석할 수 있다. 본 논문에서는 첫 단계로 매크로 모델을 사용하여 단순한 실에 있어서의 공조운전, 개구부의 위치, 장애물의 유무에 따른 공기유량, 온도분포 등 실내 온열환경에 대하여 검토한다.

## 2. 기초식

### 2.1 압력

공기의 흐름은 압력차에 의해 생기므로 유체의 전후에 압력차가 발생하면 유체에 흐름이 발생한다.

Fig. 1과 같이 일정 밀도의 유체 속 a, b점의 압력을  $P_a$ ,  $P_b$ 라 하면, 정지한 유체 속에서는 동

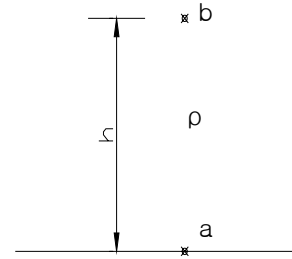


Fig. 1 The case that the density of fluid is constant.

일 수평면의 압력이 같으므로  $P_b$ 는,

$$P_b = P_a - \rho gh \quad (1)$$

$\rho$ 가 높이에 따라 변하는 경우,

$$P_b = P_a - g \int_0^h \rho_a dh \quad (2)$$

하나의 관을 생각하여 양끝을 a, b라 하면, 다음의 베르누이식이 성립한다.

$$\frac{\rho_a}{2} v_a^2 + P_a + (\rho_a - \rho_0)gh_a = \frac{\rho_b}{2} v_b^2 + P_b + (\rho_b - \rho_0)gh_b + P_r \quad (3)$$

위식의 각항은 압력과 동일 차원으로, 양변 모두 제1항은 동압(혹은 속도압), 제2항은 정압, 제3항은 위치압(혹은 부력)이며, 세 항의 합이 전압이다.  $P_r$ 은 a, b 사이의 저항에 의한 압력손실로 a, b의 전압차와 같다.

### 2.2 공기유량

실공기의 오염방지를 위한 환기 및 냉난방을 위해서는 공기를 공급할 힘이 필요하다. 이 힘으로 압력차나 팬 등의 기계력이 사용된다. 공기는 압력이 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 흐르며, 각 요소의 공기밀도가 일정할 때, 공기유량은 요소간의 압력차에 의해 결정된다.

인접하는 셀  $i$ ,  $j$ 에 대하여, 압력차  $\Delta P_{ij}$  ( $= P_j - P_i$ )에 의해 이동하는 공기유량  $G_{ij}$ 는

$$G_{ij} = E_{ij} A_{ij} C_{ij} \sqrt{\frac{2|\Delta P_{ij}|}{\rho_{ij}}} \quad (4)$$

여기서,  $G_{ij}$ 는 셀  $j$ 에서 셀  $i$ 로 유입되는 공기량을 나타낸다.  $G_{ij}$ 는 셀  $i$ 의 공기량이 증가했을 때 (+)로 하기 위하여  $E_{ij}$ 로 (+), (-)를 결정한다.  $E_{ij}$ 는  $\Delta P_{ij} = 0$ 일 때 0,  $\Delta P_{ij} > 0$ 일 때 1,  $\Delta P_{ij} < 0$ 일 때 -1로 한다.

공기밀도가 일정할 때, 셀  $i$ 에 유입되는 총유량은 셀  $i$ 에서 유출되는 총유량과 동일하므로 셀  $i$ 의 유량수지는 0이다. 즉, 다음과 같은 체적보존 법칙이 성립한다.

$$\sum_j G_{ij} = 0 \quad (5)$$

여기서,  $j$ 는 셀  $i$ 에 접하는 모든 셀을 가리킨다.

### 2.3 공기이동에 의한 열류

공기의 흐름에 따라 단위 셀 사이에 열교환이 이루어지고 온도가 변화한다.

어느 시각  $t$ 에 셀  $i$ 가 보유하는 열량  $Q_i(t)$ 는

$$Q_i(t) = c\rho_i V_i \theta_i(t) \quad (6)$$

$G_{ij}$ 가 (+)일 때, 셀  $i$ 의 열량변화  $\Delta Q_{ij}$ 는 셀  $j$ 의 온도 및 공기밀도를 사용하여

$$\Delta Q_{ij} = c\rho_j G_{ij} \theta_j(t)$$

공기유량  $g_{ij}$ 가 (-)일 때, 셀  $i$ 의 열량변화  $\Delta Q_{ij}$ 는

$$\Delta Q_{ij} = c\rho_i G_{ij} \theta_i(t)$$

그러므로  $\Delta t$ 초 후에 셀  $i$ 가 보유하는 열량을  $Q_i(t + \Delta t)$ 라 할 때,

$$Q_i(t + \Delta t) = Q_i(t) + \Delta t \sum_j \Delta Q_{ij} \quad (7)$$

따라서  $\Delta t$ 초 후의 셀  $i$ 의 온도  $\theta_i(t + \Delta t)$ 는

$$\theta_i(t + \Delta t) = \frac{Q_i(t + \Delta t)}{c\rho_i V_i} \quad (8)$$

### 2.4 열전달에 의한 열류

실내의 종합적인 온열환경을 해석하기 위해서는 벽체로부터의 열전달을 무시할 수 없다. 벽체는 열을 보유하고 있으며, 인접하는 물체에 열을 전달한다. 열이 전달되는 비율은 물성에 따라 고유하며, 열이 전달되는 속도는 각각 다르다. 여기에서는 벽체로부터 실내공기로 전달되는 열에 대하여 생각한다.

열전도율  $\lambda_w$ 인 벽체에 흐르는 열류  $q_w(x)$ 는,

$$q_w(x) = \lambda_w \frac{\theta_w(x) - \theta_w(x + \Delta x)}{\Delta x} \quad (9)$$

$\Delta x$ 를 0에 한없이 근접시켰을 경우,

$$q_w(x) \rightarrow \lambda_w \frac{d\theta_w}{dx}$$

체적  $V_w$ , 비열  $c_w$ , 밀도  $\gamma_w$ 인 벽체에 열  $Q_w$ 를 가했을 때, 상승한 온도  $\Delta\theta_w$ 는

$$\Delta\theta_w = \frac{Q_w}{c_w \gamma_w V_w} \quad (10)$$

면적  $A_w$ 인 벽체를 미소한 폭  $\Delta x$ 로 절단하여 좌우로부터 열류  $q_w(x)$ ,  $q_w(x + \Delta x)$ 를 가했을 때,  $\Delta t$ 시간 동안 이 벽체가 받는 열  $Q_w$ 는

$$Q_w = \{q_w(x) - q_w(x + \Delta x)\} A_w \Delta t \quad (11)$$

식 (10), (11)로부터 온도상승분  $\Delta\theta_w$ 는

$$\Delta\theta_w = \frac{\{q_w(x) - q_w(x + \Delta x)\} \Delta t}{c_w \gamma_w \Delta x} \quad (12)$$

양변을  $\Delta t$ 로 나누면

$$\frac{\Delta\theta_w}{\Delta t} = \frac{q_w(x) - q_w(x + \Delta x)}{c_w \gamma_w \Delta x}$$

따라서 다음과 같은 열전도식을 얻게 된다.

$$\frac{d\theta_w}{dt} = \frac{1}{c_w \gamma_w} \frac{dq_w}{dx} = \frac{\lambda_w}{c_w \gamma_w} \frac{d^2\theta_w}{dx^2} \quad (13)$$

### 3. 계산예제

이상의 관계식을 사용하여 수치계산한 결과를 나타낸다.

#### 3.1 실 모델 및 계산조건

실 모델은 Fig. 2와 같이 길이  $L_x$ [m], 높이  $L_y$ [m], 폭  $L_z$ [m]이며, 2차원, 즉  $x$ - $y$ 평면의 공기의 흐름과 각 셀의 온도분포를 해석하였다. 기계환기의 경우, 공조기로 강제환기를 한 셀과 개구부를 통하여 공기가 이동하는 셀을 가정하였다. 개구부의 셀은 외기와 연결되어 있다. 셀은  $x$ ,  $y$  방향으로  $N_x$ ,  $N_y$ 개 분할하여 총  $N_x \times N_y$ 개의 셀이 존재하는데, 본 계산에서는 길이 5m, 폭 5m, 높이 4m인 실을 가정하여 수평, 수직 방향으로 5분할하여 총 25분할한 2차원 모델을 설정하였다.

외기는 정지하고 있으며, 압력이 0[Pa]로 일정한 것으로 하였다. 또한, 외기온은 변동하지 않으며, 외기의 밀도는 0°C 공기의 중량을 기준으로 하였다.

계산조건으로는, 외기측 열전달률  $\alpha_o=20$  [kcal/m<sup>2</sup>h°C], 실내측 열전달률  $\alpha_r=8$  [kcal/m<sup>2</sup>h°C], 공기비열  $c_a=0.24$  [kcal/kg°C], 벽체비열  $c_w=0.21$  [kcal/m<sup>3</sup>°C], 벽체밀도  $\gamma_w=2200$  [kg/m<sup>3</sup>], 벽체 열전도율  $\lambda_w=1.3$  [kcal/mh°C], 벽체두께  $l=0.24$ m, 벽체분할폭  $\Delta x=0.06$ m, 분할시간  $\Delta t=0.1$

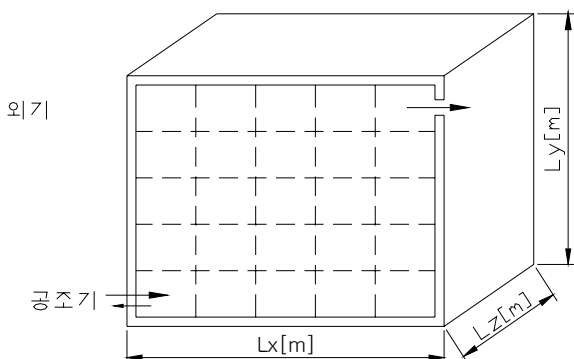


Fig. 2 The room model.

로 하여 전진차분법에 의해 수치계산하였다.

### 3.2 계산결과

#### (1) 공조운전의 경우

외기온과 실온, 벽체의 초기온도를 10°C로 한 상태에서 실용적의 5배의 26°C 온풍을 취출하고 실용적의 2배의 공기를 흡입하는 공조운전을 가정하였다. 개구부는 실 우측하단에 존재하는 것으로 하고, 유량계수는 0.7, 개구부의 면적은 0.05m<sup>2</sup>로 하였다. 각 셀의 번호를 Fig. 3에, 공조운전개시 10분 후의 유량분포와 온도분포를 Fig. 4에 나타낸다.

공조기의 취출공기 유량(0.14 m<sup>3</sup>/s)이 공조기 흡입유량(0.06 m<sup>3</sup>/s)과 개구부의 유량(0.08 m<sup>3</sup>/s)의 합과 잘 일치하고 있다.

공조운전으로 인해 1번 셀에서 6번 셀로의 유량이 0.92 m<sup>3</sup>/s로 가장 크며 6, 11, 16, 21번 셀로 상승하며 유량이 점차 감소하고 있다. 상승한 기류는 22번→23번→24번→25번 셀을 거쳐 20번→15번→10번→5번 셀 순으로 하강한 후, 일부가 5번 셀의 개구부를 통해 나가고 나머지는 4번→3번→2번→1번으로 순환하여 1번 셀의 공조기 흡입구로 흡입되고 있다.

한편, 온도분포의 경우, 기류에 의한 열전달의 모습을 잘 재현하고 있으며, 좌측 및 좌측상단부분의 셀의 온도는 부력에 의해 12°C 이상이나, 우측 및 하단의 셀의 온도는 12°C에 못 미치고 있다.

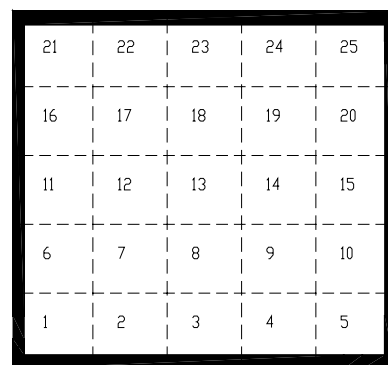
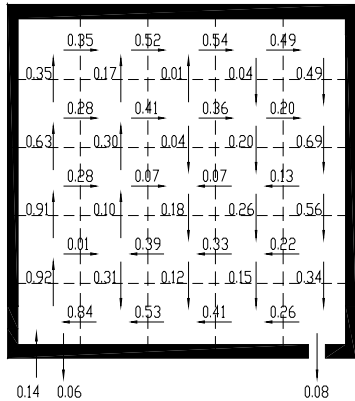
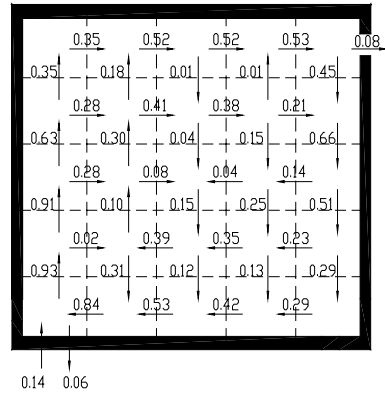


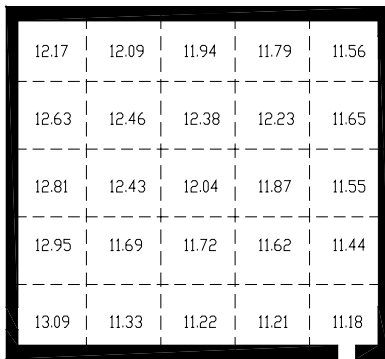
Fig. 3 The number of cells.



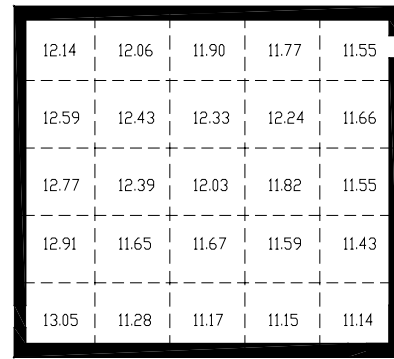
(a) Flow rate distribution[m<sup>3</sup>/s]



(a) Flow rate distribution[m<sup>3</sup>/s]



(b) Temperature distribution[°C]



(b) Temperature distribution[°C]

Fig. 4 10 minutes later after air-conditioning operation began.

Fig. 5 A case of opening alteration.

(2) 개구부를 변경했을 경우

공조운전은 동일한 조건이나, 개구부의 위치를 25번 셀로 변경하였을 경우에 대하여 검토하였다. (1)번과 동일한 조건에서 공조운전을 개시한 후 10분 후의 유량과 온도분포를 Fig. 5에 나타낸다.

(1)번의 유량분포와 비교하여 그 값은 큰 차이가 없으나, 개구부가 있는 25번 셀로의 유입유량이 0.49 m<sup>3</sup>/s에서 0.53 m<sup>3</sup>/s로 증가한 것을 알 수 있다. 반대로 (1)번에서 개구부가 있었던 5번 셀로의 유입유량은 0.34 m<sup>3</sup>/s에서 0.29 m<sup>3</sup>/s로 감소한 것을 알 수 있다. 온도분포에 있어서는 큰 변화는 없었다.

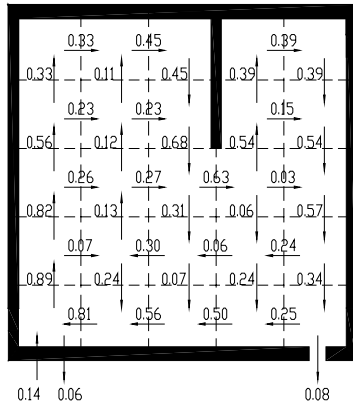
(3) 장애물이 있는 경우

천정공간의 존재하는 보 등의 장애물이 기류를 바꾸어 슬래브축열 효율에 영향을 미칠 것으로 사료되어 모델실의 천장부분에 장애물이 존재하는 경우에 대하여 검토하였다. 장애물 외 다른

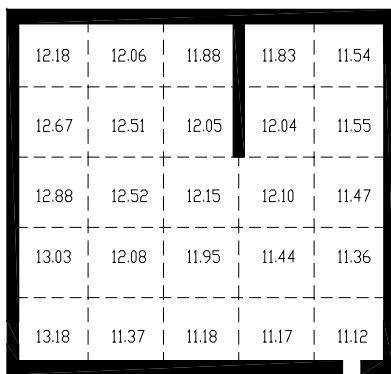
조건은 (1)번과 동일한 상태에서 공조운전개시 10분 후의 유량과 온도분포를 Fig. 6에 나타낸다. 공조기에 의한 덩혀진 공기는 1번→6번→11번→16번→21번으로 상승한 후 23번 셀에서 장애물에 부딪쳐 하강하게 된다. 장애물에 의해 가로막혀진 24번, 25번 셀의 경우, 19번 셀에서 24번 셀로의 상승기류가 (1), (2)의 경우에 비해 강한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 매크로 모델을 사용하여 단순한 실모델에 있어서의 온열환경에 대하여 검토하였다. 매크로 모델은 유체모델에 비하여 해석상 간편하며 비교적 빠른 시간 내에 실내 공기유량 및 온도분포를 해석할 수 있다는 이점이 있다. 매크로 모델을 사용하여 모델실에 있어서 공조운전을 했을 경우, 개구부의 위치를 바꾸었을 경우, 장애물이 존재할 경우의 실내 공기유량 및 실내온도 분포에 대하여 검토하였다. 향후, 본 모델을 발전



(a) Flow rate distribution[m<sup>3</sup>/s]



(b) Temperature distribution[°C]

Fig. 6 A case which has an obstacle.

시커 실내기, 덕트, 보 등으로 구성된 복잡한 플레넘의 온열환경을 검토하여 슬래브로의 축방열 특성을 파악하고자 한다.

### 참고문헌

1. Tanaka, J. R. et al., 1985, Architectural Environmental Engineering, Inoueshoin.
2. Isoda, K. O. and Ono, Y., 1971, Handbook of numeric calculation by fortran, Ohmsha.
3. Patankar, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, Mcgraw-hill book company.
4. Kondo, Y. S. et al., 2000, Modeling of mass diffusion in porous solids and prediction of indoor vocs concentration based on macroscopic model, Physical model and numerical analysis of vocs emission from building materials part 1, Journal of architecture, Planning and environmental engineering (Transactions of AIJ), No. 535, pp. 15-22.
5. Fujimura, J. I. et al., 2001, Modeling of mass diffusion in porous solids and prediction of indoor vocs concentration based on macroscopic model, Physical model and numerical analysis of vocs emission from building materials part 2, Journal of architecture, Planning and environmental engineering (Transactions of AIJ), No. 542, pp. 57-62.
6. Nishizawa, S. K. et al., 2004, Volume index to evaluate the space with unevenness in consideration of time scale and development in macro model for cross ventilation, Journal of environmental engineering (Transactions of AIJ), No. 576, pp. 29-36.