

# 실내공기환경 예측을 위한 통합 다구획 모델의 개발

조 석 호

부산가톨릭대학교 환경행정학과

(2008년 15월 13일 접수; 2008년 8월 1일 수정; 2008년 8월 1일 채택)

## Development of an Integrated Multizone Model for Indoor Air Environment Prediction

Seok-Ho Cho

*Department of Environmental Administration, College of Applied Science,  
Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea*

(Manuscript received 13 May, 2008; revised 1 August, 2008; accepted 1 August, 2008)

### Abstract

Interior space in most buildings is divided into several zones. The most important factors relating to the indoor air environment are temperature, airflow, humidity, and contaminant concentration. An integrated multi-zone model to predict these environmental factors simultaneously was developed. Also, a computer program for this model was written by the language of VISUAL BASIC. The proposed model was applied to a apartment with five rooms that had been tested by Chung<sup>1)</sup>. Comparison of predicted results by this study with measured results by Chung showed that their variations were within 14% for airflow rates, 1% for temperatures, 12% for humidities, and 5% for concentrations. It was seen that the opening operation schedule of building has a significant effect on the air moisture and contaminant removal. Thus, this model may be available for predicting the indoor air environment and may be contributed to design the ventilation plan for controlling of indoor air quality.

**Key Words :** Indoor air environment, Multizone model, Thermal model, Airflow model, Humidity model, Concentration model

### 1. 서 론

실내공간은 에너지 효율을 높이기 위해 점차 밀폐되어 왔으며, 그로 인해 실내 공기질은 오염이 가속화되어 실내 거주자의 건강에 각종 위해요인으로 작용하고 있다. 최근에 와서 전반적인 생활수준의 향상과 삶의 질에 관한 관심의 고조로 실내공기 환

경의 중요성이 새롭게 인식되기 시작하였다<sup>1)</sup>. 실내 공간은 일반적으로 단일구획 혹은 다구획 구조로 이루어져 있다. 단일구획은 단층구조의 내부 구획이 없는 하나의 방으로 이루어진 경우에 국한되며, 대부분의 실내공간은 실외 또는 개구들에 의해 연결되는 다수의 방으로 이루어진 다구획 구조이다. 따라서 실내환경을 해석하기 위해서는 다구획 모델에 대한 연구가 필수적이다<sup>2,3)</sup>.

Shair와 Heitner<sup>4)</sup>가 실내농도를 실외농도와 관련 시킨 이론적 모델에 관한 연구를 발표한 후, 실내공기질 모델(IAQM)이 많은 연구자들의 관심의 대상

Corresponding Author : Seok-Ho Cho, Department of Environmental Administration, College of Applied Science, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea  
Phone: +82-51-510-0631  
E-mail: shcho@cup.ac.kr

이 되어 왔다. 실내공기질 모델은 단실 모델로부터 2구획 모델, 다구획 모델로 점차 확장되어 왔다. 다수의 구획으로 이루어진 건물 내의 환경적 요소를 규명하기 위한 방법으로는 추적가스를 이용한 실험적 기법<sup>5)</sup>과 이론적 모델링 기법<sup>6~12)</sup>이 주로 사용되었다. 실험적 기법은 실험방법과 결과치의 계산 절차가 매우 복잡하여 이론적 모델링 기법이 더 많은 관심을 끌고 있다.

Walton<sup>6)</sup>은 부하 예측 컴퓨터 프로그램에 의한 다구획 모델을 사용하여 공기유동의 열적 해석을 수행하였다. 또한 Walton<sup>7,8)</sup>은 누입 및 내부 구획간의 공기유동을 예측하기 위한 컴퓨터 알고리즘을 제시하고, 공기유동 네트워크 모델을 제시하였다. Diasty 등<sup>9)</sup>은 다구획 공간에서 실내공기의 습도 작용의 동적 모델링을 조사하였다. 또한 Waters와 Simons<sup>10)</sup>은 다구획 모델에 의해 오염농도와 공기유동을 평가하였다. 실내공기 환경에서 가장 중요한 인자는 온도, 공기유동, 습도, 오염농도 등이며, 이들 인자들은 상호간에 영향을 미치고 있다. 따라서 실내공기 환경에 관련된 연구는 이들 인자들을 모두 포함하여 동시에 해석해야 할 필요성이 있지만, 대부분의 연구들은 열 모델, 공기유동 모델, 습도 모델, 오염농도 모델 등의 개별적 연구 또는 2개의 모델을 관련시킨 연구에 머물러 있으며, 온도, 습도, 공기유동, 오염농도를 모두 고려한 연구는 Chung<sup>11)</sup>과 Zhang<sup>12)</sup>을 제외하고는 미미한 실정이다. 국내에서는 조 등<sup>13)</sup>이 실내 공기질을 평가하기 위한 2구획 모델을 개발하였으며, 조<sup>14,15)</sup>는 다구획 모델에 의해 실내 공기질을 평가하거나 공기유동량을 예측하는 연구결과를 제시하였다. 이와 같이 국내에서는 다구획 모델은 말할 것도 없고, 실내 공기질 모델에 관한 연구는 현재까지는 매우 저조한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실내공기 환경의 중요한 인자인 온도, 공기유동, 습도, 오염농도를 동시에 예측하기 위한 통합 다구획 모델을 개발하고자 한다. 이를 위해, 먼저 기상 및 건물 구조에 관한 자료와 각 구획의 초기값을 사용하여 실내온도를 계산한다. 다음에 기상 자료와 계산된 실내온도를 사용하여 공기유동량을 계산한다. 그리고 나서 알려진 공기유동량을 사용하여 각 구획의 습도와 오염농도

를 계산한다. 이러한 전 과정을 VISUAL BASIC 언어를 사용하여 프로그램을 작성함으로써 통합 다구획 모델을 개발하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 통합 다구획 모델의 이론적 해석

#### 2.1.1. 열 모델

열 모델은 실내온도와 벽을 통한 총열을 계산하는 모델로서 실내온도는 실내공기에 관한 열평형을 고려함으로써 예측된다. 즉, 구획의 표면과 내부 열원으로부터의 대류에 의한 열에너지, 유입 및 유출 공기에 의한 열에너지, 공기취급 시스템에 의해 부가되는 열에너지 등을 모두 합한 것은 영이다<sup>6)</sup>. 따라서 정상상태에서 다구획 건물 내의 k번째 구획에 대한 열평형 방정식은 다음과 같다.

$$T_k \sum_{i=1}^c (A_{ki} U_{ki} + C_p M_{ki}) = T_j \sum_{i=1}^b (A_{ji} U_{ji} + C_p M_{ji}) + \sum_{i=1}^a T_{oi} (A_{oi} U_{oi} + C_p M_{oi}) + W_k \quad (1)$$

단, A : 벽면적[m<sup>2</sup>]

T : 공기온도[K]

U : 전 열전달계수[w/m<sup>2</sup> · K]

C<sub>p</sub> : 비열[J/kg · K]

M : 공기 질량유량[kg/s]

t : 시간[s]

W : 정상 열원[w]

a, b, c : 각각 구획의 외부경계의 수, 내부경계의 수, 경계의 총수

- 하첨자 -

i : i번째 경계 또는 구획

j : k번째 구획에 인접한 구획

k : k번째 구획

o : 외부

어떤 시간 단계에서 식 (1)의 마지막 두 항은 일정하므로 n개의 구획에 대한 완전한 선형방정식은 다음과 같은 행렬 형태로 나타낼 수 있다<sup>11)</sup>.

$$[X]_{n \times n} [T]_{n \times 1} = [\Phi]_{n \times 1} \quad (2)$$

여기서,  $\Phi$ 와 X는 다음 식에 의해 결정된다.

$$[X] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^c x_i & -x_2 & \cdots & -x_b \\ -x_1 & \sum_{i=1}^c x_i & \cdots & -x_b \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (3)$$

단,  $x$ 항은  $A_{ki}U_{ki} + C_p M_{ki}$ 이다.

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^a T_{oi}\phi_{1i} + W_1 \\ \sum_{i=1}^a T_{oi}\phi_{2i} + W_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

단,  $\phi_{ki} = (A_{oi}U_{oi} + C_p M_{oi})_k$

따라서 식 (2)의 해를 구함으로써 각 구획의 공기 온도를 계산할 수 있다. 이를 위해 본 연구에서는 Gauss-Seidel 반복법을 사용한다.

### 2.1.2. 공기유동 모델

실내공간에서 구획 사이의 통로를 가로지르는 공기유동은 바람 및 온도차(밀도차)와 기계환기에 의해 야기되는 압력차에 의해 일어난다. 만약 구획 j에서 구획 k로 공기가 유동한다면, 그 구획 사이에 있는 유동통로에서의 압력차  $\Delta P_{jk}$ 는 다음 식과 같으며, 이 값이 0보다 작으면 유동통로를 통해 구획 k에서 구획 j로 공기가 유동함을 의미한다.

$$\Delta P_{jk} = (P_j - P_k) + PS'_{jk} + PW_{jk} \quad (5)$$

단, P : 구획의 기준높이에서의 압력[Pa]

여기서, 높이 및 밀도의 차이에 기인한 압력차  $PS'_{jk}$ 는

$$PS'_{jk} = \rho_j g (Z_j - Z_{jk}) - \rho_k g (Z_k - Z_{kj}) \quad (6)$$

단,  $Z_k$  : 구획 k에서의 기준높이[m]

$Z_{jk}$  : 구획 j와 구획 k 사이의 통로 중심높이[m]

$\rho$  : 구획의 공기밀도[kg/m<sup>3</sup>]

g : 중력가속도[m/s<sup>2</sup>]

이며, 바람에 기인한 압력차  $PW_{jk}$ 는 다음 식과 같다.

$$PW_{jk} = 0.5 C_{p'jk} \rho_o V_o^2 \quad (7)$$

단,  $C_{p'}$  : 유동통로의 표면압력계수(실내구획 간의 개구에서는 0)

$\rho_o$  : 바람의 밀도[kg/m<sup>3</sup>]

$V_o$  : 풍속[m/s]

여기서, 공기의 밀도는

$$\rho = 0.0034838 \times \frac{P}{T} \quad (8)$$

으로 구할 수 있으며, 표면압력계수는 다음 식과 같다<sup>9)</sup>.

$$\theta \leq 90^\circ : C_{p'} = 0.75 - 1.05 \times \frac{\theta}{90} \quad (9.a)$$

$$\theta \geq 90^\circ : C_{p'} = 0.15 \times \frac{\theta}{90} - 0.45 \quad (9.b)$$

단,  $\theta$  : 풍향각( $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ )

한편, 유동통로에서의 질량유량은 경험식과 오리피스 방정식을 토대로 구한 다음 식이 잘 알려져 있다<sup>9)</sup>.

$$M_{jk} = C A'_{jk} (2\rho_j)^{1/2} \Delta P_{jk}^X \quad (10)$$

단,  $M_{jk}$  : 유동통로의 질량유량[kg/s]

C : 유동계수(Flow coefficient)

X : 유동지수(Flow exponent)

$A'_{jk}$  : 유동통로의 단면적[m<sup>2</sup>]

여기서, 유동지수의 값은 이론적으로  $0.5 \leq X \leq 1.0$ 의 범위에 있어야 하며, 큰 개구에서는 대략 0.5이고 매우 작은 개구에서는 0.65에 가까운 값이다<sup>9)</sup>. 유동계수는 광범위한 레이놀즈수에 대해 대략 C = 0.6의 값을 가지지만, 문과 같이 수직 구획된 큰 개구에서는 C = 0.78을 적용하여 계산할 수 있다<sup>5)</sup>.

각 구획에서의 질량보존은 개구를 통과하는 질량유량의 합이 0일 것을 요구하며, 이 조건을 만족하는 각 구획 압력의 적절한 조합을 찾기 위해서는 비선형 연립방정식을 풀어야 한다. 이것은 Newton-Raphson법을 사용함으로써 가능하지만 정확한 해의 수렴반경을 벗어나면 종종 수렴을 하지 않는 경우가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 각 구획의 압력을 연속적으로 근사화하는 간단한 반복기법(Conte and De Boor scheme)을 사용한다.

$$P_k^{(i+1)} = P_k^{(i)} - \frac{\sum M_{jk}}{\sum \frac{\partial M_{jk}}{\partial P_k}} \quad (11)$$

단, i : 반복횟수

여기서, 편도함수는 다음과 같다.

$$\frac{\partial M_{jk}}{\partial P_k} = -X \frac{M_{jk}}{\Delta P_{jk}} \quad (12)$$

각 구획에서의 질량보존은 수렴기준을 제공한다. 즉, 현재의 반복계산에서 평가된 압력에 대해 모든 구획에서  $\Sigma M_{jk} = 0$ 을 만족한다면 해는 수렴된다. 그리고 나서 각 구획 간의 질량유량은 체적유량으로 변환하며, 환기장치에 의한 기계적인 급기량과 배기량은 알고 있는 것으로 한다.

2.1.3. 습도 모델

외부 경계나 내부 유동 통로를 가로지르는 대류에 의한 습기 전달은 각 구획에서의 습도에 중대한 영향을 미칠 것이다. 특정 구획의 공기습도는 외부 환경과의 상호작용, 다른 구획과의 연결, 구획의 기능과 물리적 특성 등에 의존한다. 물리적으로 분리된 구획들이나 다른 구획들과 거의 연결되지 않은 구획들은 독립적으로 작용한다. 그러므로 표면 응축과 수분 흡수와 같은 국소적인 습기전달 과정들은 구획 내의 습도에 영향을 받을 것이다.

어떤 습기전달 과정을 통해 공간으로부터 부가되거나 제거되는 습기는 그 습기 조건에 균일하게 영향을 미칠 것이라고 가정하면, 공간 내의 공기습도 레벨은 습기의 질량평형 방정식을 고려함으로써 모델화 될 수 있다<sup>11)</sup>. 따라서 다구획 건물 내의 k번째 구획에서의 공기습도의 동적 반응은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_k \frac{dH_k}{dt} = \sum_{j=1, j \neq k}^n Q_{jk} H_j - \sum_{j=1, j \neq k}^n Q_{kj} H_k + \frac{1}{\rho_k} (Gm_k - Rm_k) \quad (13)$$

- 단, V : 구획의 체적[m<sup>3</sup>]
- H : 습도비[g(water)/kg(air)]
- ρ : 공기밀도[kg/m<sup>3</sup>]
- n : 구획의 수
- Q : 공기유동량[m<sup>3</sup>/s]
- Gm : 수분 발생량[g/s]
- Rm : 수분 제거량[g/s]

다구획 건물 내의 각 구획의 습도 작용을 결정하기 위해서는 식 (13)은 n차 미분 방정식으로 표시되고, 각 시간 간격에서 이것들은 4계 Runge-Kutta 수치적 알고리즘으로 동시에 풀려지게 된다.

2.1.4. 오염농도 모델

일반적으로 실내 공기질은 오염물질 발생량, 대

기오염 및 기상 상태, 오염물질 소실량, 환기조건 등의 요인에 좌우되며, 실내 환경내의 오염물질은 질량평형 방정식을 만족해야 한다. 오염농도 모델은 다수의 구획에 대해, 각 구획은 균일한 온도 상태에 있다고 가정된다. 이러한 경우에, 구획 k에 대해 질량평형 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$V_k \frac{dC_k}{dt} = Qs_k C_{s_k} + \sum_{j=1, j \neq k}^n K_j Q_{jk} C_j - (Qe_k + \sum_{j=1, j \neq k}^n K_j Q_{kj}) C_k + Gp_k - Rp_k \quad (14)$$

- 단, C : 실내 오염농도[mg/m<sup>3</sup>]
- Cs : 급기농도[mg/m<sup>3</sup>]
- Qs : 급기량[m<sup>3</sup>/s]
- Qe : 배기량[m<sup>3</sup>/s]
- Gp : 오염물질 발생량[mg/s]
- Rp : 오염물질 소실량[mg/s]
- K : 혼합계수

식 (14)에서 외기농도와 각 구획의 초기농도 및 급기농도는 알고 있고, 초기시간 후에 오염물질의 발생과 소실이 시작되는 것으로 한다. 많은 오염물질들의 소실량은 보통 오염농도의 1차식으로 나타나는 경향을 가지며, 이런 경우에는 소실량은 침착률과 실내체적 및 실내농도의 함수로 표시할 수 있다<sup>1)</sup>. 즉,

$$Rp_k = K' V_k C_k \quad (15)$$

여기서, K'는 침착률로서 폐포침착성 입자의 경우  $1.3889 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , NO<sub>2</sub>의 경우  $2.2778 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , O<sub>3</sub>의 경우  $9.6667 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , CO, CO<sub>2</sub>, NO 등의 경우에는 통상 0이다<sup>2)</sup>.

식 (14)는 각 구획의 오염농도 예측을 위한 연립 미분방정식을 나타낸다. 각 시간 간격에서, 선형 연립방정식은 동시에 풀려야 하며, 이 때 4계 Runge-Kutta 수치적 알고리즘을 사용하게 된다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 모델의 통합 및 전산화

먼저 예측에 필요한 특정 건물의 자료와 기상 자료를 입력하며, 건물 내의 각 구획에 대해 온도, 압력, 습도, 오염농도 등의 초기값을 설정하고 각 발생

원 값을 입력한다. 그리고 나서 열 모델에 의해 각 구획의 실내온도를 계산한다. 이때 열평형에 대한 선형 연립방정식의 해를 얻기 위해 Gauss-Seidel 반복법을 사용하여 수렴조건( $|T_k^{(i+1)} - T_k^{(i)}| < 10^{-4}$ )이 만족될 때까지 반복계산이 행해진다. 예측된 실내 온도 값은 공기유동 모델에 의해 건물 개구의 유동량 계산에 사용된다. 즉 공기유동 모델에서는 바람, 온도차(밀도차), 기계환기 등에 의해 야기되는 압력차가 계산되고, 이 압력차에 의해 개구의 공기유동량이 계산된다. 각 구획에서의 질량보존을 만족하게 되는 압력의 적절한 조합을 찾기 위해서는 비선형 연립방정식을 풀어야 한다. 이때 Conte and De Boor 기법이 사용되며, 수렴조건( $|\sum M_{jk}| / \sum |M_{jk}| < 10^{-6}$ )이 만족될 때까지 열 및 공기유동 모델의 계산 과정이 반복된다. 그런 다음 예측된 공기유동량을 이용하여 습도 모델과 오염농도 모델에 의해 주어진 시간 간격에서 각각 구획의 습도와 오염농도를 계산한다. 이때 습기와 오염물질에 대한 질량평형방정식은 둘 다 연립 미분방정식의 형태로서 4계 Runge-Kutta 수치적 알고리즘을 사용하면 쉽게 풀려지게 된다.

이러한 연속된 과정을 통해 열 모델, 공기유동 모델, 습도 모델, 오염농도 모델은 실내공기 환경을 예측하기 위한 다구획 모델로 통합된다. 이러한 전 과정은 VISUAL BASIC 언어를 사용하여 전산 프로그램이 작성되며, 유동도는 Fig. 1과 같다.

2.2.2. 전산 입력 자료

본 모델의 전산 프로그램은 아파트나 사무실과 같은 다구획 건물에 대한 자료와 예측 시간대의 기상 자료, 그리고 각 구획의 각종 발생원의 자료를 입력하고, 각 구획에 대해 온도, 압력, 습도, 오염농도 등의 초기값을 설정함으로써 구획 사이의 공기 유동량, 각 구획의 온도, 습도, 오염농도 등의 예측 결과가 출력되도록 작성되었다. 따라서 다양한 건물 형상 및 기상 조건에 대해 본 전산 프로그램의 적용이 가능하리라 생각된다. 그러나 본 모델의 다양한 적용에 앞서, 모델의 검증을 위한 비교 자료로 활용하기 위해 Chung<sup>11)</sup>이 연구 대상으로 사용한 건물 및 기상 자료를 입력 자료로 사용하였다.

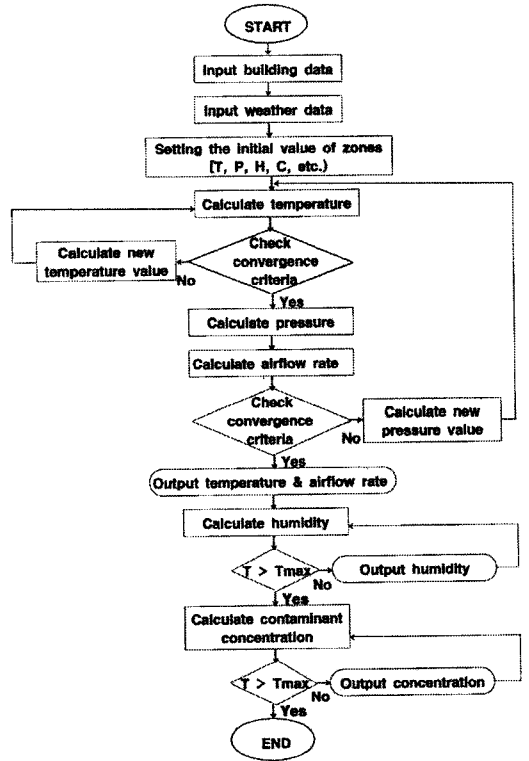


Fig. 1. Flowchart for predicting indoor air environment.

Fig. 2는 주거환경인 아파트의 개략도이다. 실내 공간의 천장 높이는 2.9 m이고, 외부의 벽은 규칙적인 블록으로 만들어져 있다. 구획 1과 구획 3에는 바닥으로부터 1.1 m의 높이에 남향의 유리 창문이 설치되어 있으며, 구획 4와 구획 5에는 창문이 설치되지 않았지만 배기를 위한 송풍기가 천장에 설치되어 있다. 계산에 필요한 전산입력 자료(구획의 수, 벽 면적, 개구크기, 개구 중심높이, 구획 체적 등)는 이 개략도로부터 산정한 결과치(Table 1)를 사용하였다.

기상 자료는 Table 2와 같으며, 건물 개구의 환기 스케줄은 Table 3과 같다. 모든 문은 열려진 상태로 있고, 구획 1의 창문은 오전 11시에서 정오까지, 구획 3의 창문은 오전 10시에서 오전 11시까지 닫혀지며, 구획 4와 구획 5의 송풍기는 3시간 동안 연속적으로 작동되는 것으로 하였다. 또한, 오전 9시부터 정오까지 예측이 수행되는 시간동안 구획 1의 중앙에 위치해 있는 오염원으로부터 1.944 mg/s의 분진

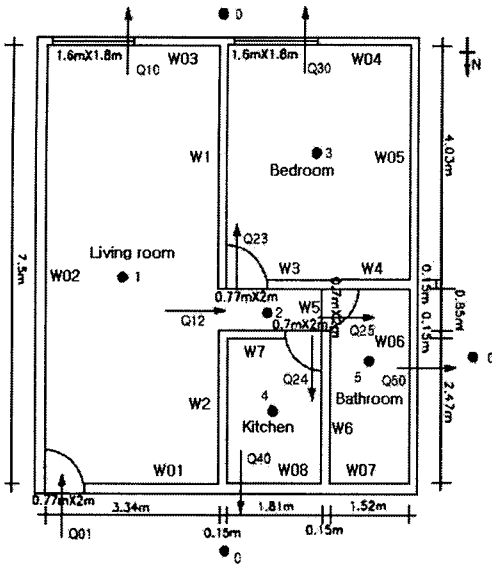


Fig. 2. Schematic of the zonal arrangement of test building.

이 발생하였으며, 구획 4에서는 0.056 g/s의 수분 증발과 100 w의 열이 발생하는 것으로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 모델의 검증

본 연구모델의 객관적인 검증 방법은 전산예측 자료를 직접 측정된 자료와 비교하는 것이 최선일 것이다. 하지만, 실내환경의 주요 인자들 중에 온도, 습도, 농도 등은 쉽게 측정이 가능하나, 공기유동량을 측정하는 것은 단순하지 않다. 왜냐하면 창문이나 문 등의 개구를 통과하는 유속이 매우 낮아서 풍속계에 의한 측정에는 측정 범위의 오차 등의 한계가 있기 때문이다. 그래서 다구획 건물의 공기유동량을 측정하기 위해서는 통상적으로 추적가스를 이용한 실험적 기법<sup>5)</sup>이 주로 사용되어 왔다. 그러나 단일가스 또는 멀티가스 추적에 의한 실험방법과 그 결과치의 공기유동량으로의 환산절차는 매우 복

Table 1. Walls, openings, and zones data of test building

Walls	Area [m <sup>2</sup> ]	Openings	Area [m <sup>2</sup> ]	Center height [m]	Zones	Volume [m <sup>3</sup> ]
W01	8.146	Q01	1.540	1	1	72.645
W02	21.750	Q10	2.880	2	2	4.462
W03	6.806	Q12	2.465	1.45	3	39.157
W04	7.212	Q30	2.880	2	4	12.965
W05	11.252	Q23	1.540	1	5	12.296
W06	10.063	Q40	-	-		
W07	4.408	Q24	1.400	1		
W08	5.249	Q50	-	-		
W1	11.252	Q25	1.400	1		
W2	7.163					
W3	3.709					
W4	4.408					
W5	1.065					
W6	7.163					
W7	3.849					

Table 2. Weather data

Weather data	Time		
	9:00-10:00A.M.	10:00-11:00A.M.	11:00A.M.-12:00
Temperature[°C]	27	28	29
Humidity[g/kg]	13.5	14.4	15
Wind speed[m/s]	0.4	0.5	0.5
Wind direction	North	North	North
Particle concentration[mg/m <sup>3</sup> ]	0	0	0

**Table 3.** Schedule of the openings operation

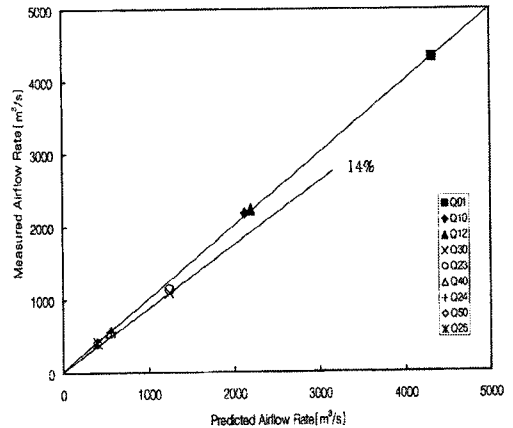
Openings	Time		
	09:00-10:00 A.M.	10:00-11:00 A.M.	11:00 A.M.-12:00
Q01(Door)	Open	Open	Open
Q10(Window)	Open	Open	Close
Q12	Open	Open	Open
Q30(Window)	Open	Close	Open
Q23(Door)	Open	Open	Open
Q40(Fan)	On	On	On
Q24(Door)	Open	Open	Open
Q50(Fan)	On	On	On
Q25(Door)	Open	Open	Open

잡하다. 따라서 본 연구에서는 별도의 실험을 통해 검증하는 대신, Chung<sup>11)</sup>의 실험조건과 동일한 조건의 입력 자료를 사용하여 예측한 결과를 Chung의 측정 결과와 비교하였다.

Fig. 3은 오전 9시에서 오전 10시 사이의 공기유동량의 결과를 비교한 것으로 예측 결과와 측정 결과와의 최대 차이는 14% 정도였다. Table 4는 오전 10시에서의 각 구획의 온도와 습도 및 오염농도를 나타낸 것이다. 측정치와 예측치의 차이가 온도의 경우 1% 이내이고, 습도는 12% 이내이며, 오염농도는 5% 이내로 나타났다. 습도의 경우, 구획 5에서 23% 정도로 큰 차이를 보이나, Chung<sup>11)</sup>은 구획 5(욕실)에서는 벽면의 수분 흡수로 인해 17~23%의 측정 편차가 있음을 관찰하였다. 따라서 구획 5에서의 습도 결과치의 비교는 별 의미가 없는 것으로 판단된다.

### 3.2. 예측 결과에 대한 고찰

Table 5는 각 구획의 예측된 온도를 나타낸 것이



**Fig. 3.** Comparison of measured and predicted airflow rates from 9 A.M. to 10 A.M..

**Table 4.** Comparison of measured and predicted values at 10 A.M.

Zone	Temperature[°C]		Diff. [%]	Humidity[g/kg]		Diff. [%]	Concentration[mg/m <sup>3</sup> ]		Diff. [%]
	Measured value <sup>11)</sup>	Predicted value		Measured value <sup>11)</sup>	Predicted value		Measured value <sup>11)</sup>	Predicted value	
1	26.80	27.01	0.8	14.2	13.5	4.9	0.240	0.231	3.8
2	26.80	27.03	0.9	14.2	13.5	4.9	0.120	0.125	4.2
3	26.80	27.01	0.8	14.2	13.5	4.9	0.120	0.125	4.2
4	27.10	27.10	0	15.7	13.8	12.1	0.120	0.125	4.2
5	26.90	27.03	0.5	17.5	13.5	22.9	0.120	0.125	4.2

$$* \text{Diff.}[\%] = \frac{|\text{measured value} - \text{predicted value}|}{\text{measured value}} \times 100$$

**Table 5.** Predicted temperatures of each zone in test building

Zone	Temperate[°C]		
	09:00-10:00 A.M.	10:00-11:00 A.M.	11:00 A.M.-12:00
1	27.01	28.01	29.01
2	27.03	28.05	29.02
3	27.01	28.01	29.01
4	27.10	28.11	29.10
5	27.03	28.03	29.03

**Table 6.** Predicted airflow rates through openings in test building

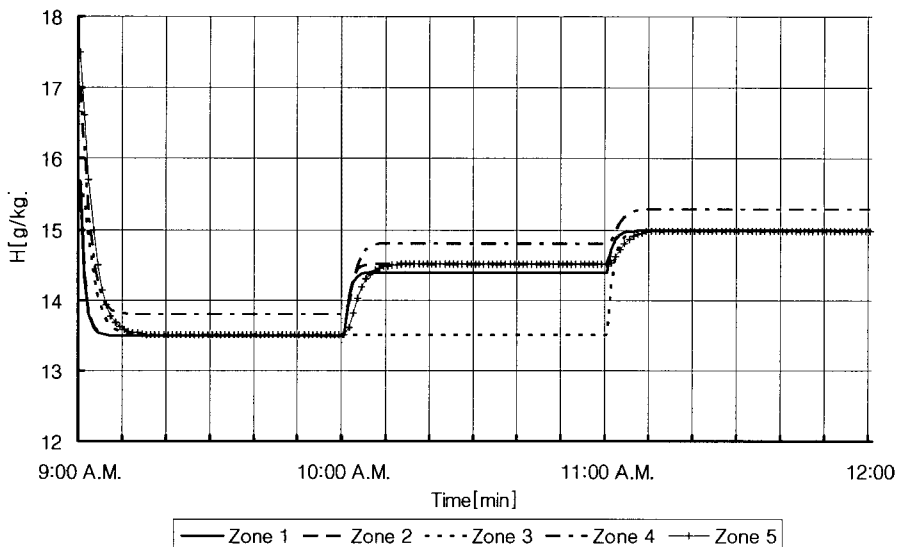
Opening	Airflow rate[m <sup>3</sup> /s]		
	09:00-10:00 A.M.	10:00-11:00 A.M.	11:00 A.M.-12:00
Q01	1.200	1.126	0.923
Q10	0.591	0.858	0
Q12	0.610	0.268	0.923
Q30	0.344	0	0.657
Q23	0.344	0.002	0.657
Q40	0.154	0.154	0.154
Q24	0.154	0.154	0.154
Q50	0.112	0.112	0.112
Q25	0.112	0.112	0.112

다. 시간이 지남에 따라 각 구획의 온도는 근소하게 증가되고 있음을 알 수 있다. 또한 구획 4는 다른 구획에 비해 온도가 근소하게 높게 나타는데, 이것은 이 구획에 열원이 위치해 있어서 열원의 영향을 가장 많이 받기 때문이라고 생각된다.

Table 6은 각 유동통로를 가로지르는 공기유동량을 나타낸 것이다. 특히 오전 10시에서 11시까지는 구획 3의 창문(Q30)이 닫히기 때문에 구획 2와 구획 3 사이의 문을 통과하는 유동량(Q23)은 매우 적으며, 대신 구획 1의 창문을 통해 유출되는 유동량(Q01)이 증가하게 된다. 그리고 오전 11시부터 정오까지는 구획 1의 창문(Q10)이 닫히기 때문에 구획

1의 문을 통해 유입되는 유동량(Q01)은 구획 2로 유출되는 유동량(Q12)과 같으며, 이 시간대에 구획 1에서 구획 2로의 유동량이 가장 많게 됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 오전 9시부터 정오까지의 각 구획의 습도를 나타낸 것이다. 모든 문과 창문이 열려진 상태인 오전 9시부터 10시의 경우, 각 구획에서의 초기 습도 상태로부터 습도는 감소하기 시작하여 구획 1과 구획 2는 7분 후, 구획 4는 11분 후, 구획 3은 13



**Fig. 4.** Predicted humidities of each zone in test building.



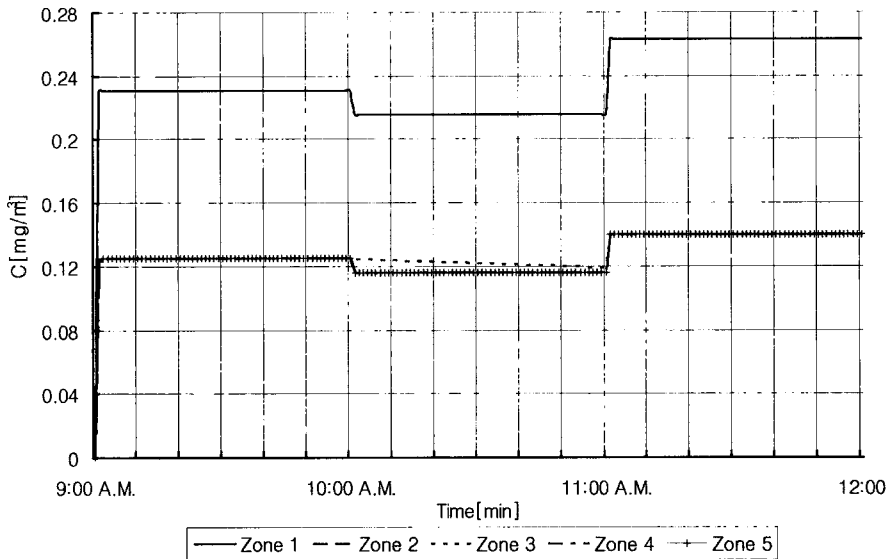


Fig. 5. Predicted contaminant concentrations of each zone in test building.

분 후, 구획 5는 16분 후에 각각 정상상태에 도달하여 오전 10시까지 일정한 습도를 유지함을 알 수 있다. 이 때 각 구획의 정상상태 습도는 구획 4에서 13.8 g/kg이고, 나머지 구획에서는 외기습도(13.5 g/kg)와 별 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 오전 10시에 구획 3의 창문이 닫히고, 외기습도가 14.4 g/kg으로 높아짐에 따라 각 구획의 습도는 다시 증가하기 시작하여 구획 1과 구획 2는 6분 후, 구획 4는 10분 후, 구획 5는 13분 후에 정상상태에 도달하게 된다. 정상상태에서의 습도는 구획 1은 14.4 g/kg, 구획 2와 구획 5는 14.5 g/kg, 구획 4는 14.8 g/kg이다. 구획 3은 창문이 닫혀있는 상태에서 구획 2에서 구획 3으로의 매우 적은 공기유동이 있으나 습도의 변화에는 별 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 오전 11시에 구획 3의 창문을 다시 열고 구획 1의 창문이 닫히며, 외기 습도는 15 g/kg으로 근소하게 높아지게 된다. 이에 따라 다시 각 구획의 습도가 변하게 되는데, 구획 1과 구획 2는 7분 후, 구획 3은 8분 후, 구획 4는 9분 후, 구획 5는 12분 후에 정상상태에 도달하게 된다. 정상상태에서의 습도는 구획 4에서 15.3 g/kg이며 나머지 구획에서는 외기습도와 별 차이를 보이지 않는다.

예측이 이루어진 3시간 동안 구획 4에서의 습도

가 다른 구획들보다 높은 것으로 나타났는데, 이것은 구획 4에서 수분이 증발하고 있으며 충분한 환기가 이루어지지 않은 결과에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 5는 오전 9시부터 정오까지의 각 구획의 오염농도를 나타낸 것이다. 모든 문과 창문이 열린 상태인 오전 9시부터 10시까지의 경우, 각 구획에서의 분진 농도는 초기농도(0 mg/m<sup>3</sup>)로부터 증가하여 2분 내에 정상상태에 도달한다. 이 시간 동안의 정상상태 농도는 구획 1에서 0.231 mg/m<sup>3</sup>이며, 나머지 구획에서는 0.125 mg/m<sup>3</sup>이다. 오전 10시부터 11시 사이의 경우에는 구획 3을 제외한 모든 구획에서 각 농도는 2분 내에 정상상태에 도달한다. 이 시간 동안의 정상상태 농도는 구획 1에서 0.216 mg/m<sup>3</sup>이고, 구획 2와 구획 4 및 구획 5에서는 0.116 mg/m<sup>3</sup>이다. 구획 3에서의 분진 농도는 시간에 따라 점차 감소하여 오전 11시에는 0.119 mg/m<sup>3</sup>에 이르게 된다. 이것은 구획 3의 창문이 닫혀있는 상태에서 구획 2에서 구획 3으로의 공기유동량이 매우 적기 때문에, 유입되는 분진보다 소실되는 분진이 근소하게 많은 결과에 기인한 것이라 생각된다. 오전 11시부터 정오까지는 모든 구획에서 농도가 역시 2분 내에 정상상태에 도달하게 된다. 이 시간 동안의 정상상태 농도는 구획 1에서 0.263 mg/m<sup>3</sup>이고, 나머지 구획에서는 0.140 mg/m<sup>3</sup>이다.

예측이 이루어진 3시간 동안, 모든 시간대에 걸쳐 오염원이 위치한 구획 1의 농도가 다른 구획들에 비해 월등히 높음을 알 수 있다. 구획 3의 창문이 닫히는 오전 10시부터 11시까지는 구획 1의 창문을 통해 대기 중으로 유출되는 유동량(Q10)의 증가로 인해 모든 구획의 농도가 낮아지며, 구획 1의 창문이 닫히는 오전 11시부터 정오까지는 구획 1에서 구획 2로의 유동량(Q12)의 증가로 인해 모든 구획에서 농도가 높아짐을 알 수 있다.

따라서 본 연구에 사용한 건물 및 기상 상태에서는 실내 오염농도를 낮은 상태로 유지하기 위해서는 오염원이 존재하는 구획의 창문을 열어 두는 것이 바람직하다고 생각된다. 만약 같은 건물이라 하더라도 기상상태가 현저히 달라지면, 문이나 창문을 통한 공기의 유출입 방향이 달라지는 상황이 발생할 수 있으며, 이때는 실내 오염농도를 낮은 상태를 유지하기 위한 창문의 개폐여부를 그 상황에 맞추어 평가해야 할 것으로 생각된다.

앞에서 살펴본 바와 같이 실내공기 환경에는 온도, 공기유동, 습도, 오염농도 등의 인자들이 상호간에 영향을 주고받는다. 또한 기상상태와 건물 개구(문, 창문, 송풍기 등)의 환기 스케줄 등은 건물의 구획을 통한 공기유동 뿐 아니라 각 구획의 온도와 습도 및 오염농도 분포에 결정적인 영향을 미친다. 특히 건물 개구의 환기 스케줄은 공기유동량을 변화시켜 습기 및 오염물질 제거에 중대한 영향을 주며, 잘못된 환기는 실내의 공기유동을 나쁘게 함으로써 오염물질의 고농도 노출의 원인이 될 수 있다.

#### 4. 결 론

실내공기 환경에 대한 이론적인 모델링 연구는 그 중요성에도 불구하고 국내에서는 아직 미미한 실정이다. 그래서 실내공기 환경의 중요한 인자인 온도, 공기유동, 습도, 오염농도를 동시에 예측하기 위한 통합 다구획 모델을 제시하고 전산 프로그램을 개발하였으며, 본 연구 모델을 Chung<sup>11)</sup>이 연구 대상으로 사용한 건물에 적용하여 동일한 기상조건에서 예측을 수행하였다. 본 연구의 예측치를 Chung의 측정치와 비교해 본 결과, 공기유동량은 14% 이내, 실내온도는 1% 이내, 실내습도는 12% 이내, 실내 오염농도는 5% 이내의 차이를 보였다. 실

내온도 및 오염농도의 결과는 실험치와 잘 일치하였고, 공기유동량 및 습도의 결과는 비교적 잘 일치하였다. 또한 기상상태와 건물의 환기 스케줄 등은 예상한 바와 같이 건물의 구획을 통한 공기유동 뿐 아니라 각 구획의 온도, 습도, 오염농도에 중대한 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 개발된 통합 다구획 모델을 적절히 활용한다면, 직접 측정하지 않고도 현존하는 건물의 실내환경 인자들을 예측하고 평가할 수 있을 것이며, 신설 예정인 건물의 설계 초기단계에서 환경적인 평가도 가능할 것이다. 그리고 본 연구 결과는 실내환경 제어를 위한 환기계획을 수립하는데도 활용이 가능할 것이다. 또한, 다구획 모델의 이론적 바탕은 주거환경 뿐만 아니라 대형 마트, 백화점, 아트리에 빌딩, 공항 터미널, 실내 경기장 등의 실내 공기질 예측에도 기여할 것으로 생각된다.

향후 추적가스를 이용한 다구획 건물의 실험적 연구와 다양한 건물에 적용해서 얻은 검증 자료의 축적을 통해 본 연구모델의 예측 결과에 대한 정확도를 더욱 향상시키고, 개발된 전산 프로그램의 입력 파라메타를 줄이는 등 사용자의 편리성을 증가시키려는 노력이 필요할 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2007학년도 부산가톨릭대학교의 교내 연구비에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- 1) Wadden R. A., Scheff P. A., 1983, Indoor air pollution, John Wiley & Sons, Inc., 105-132.
- 2) Axley J. W., 1989, Multi-zone dispersal analysis by element assembly, Building and Environment, 24(2), 113-130.
- 3) Bauman F. S., Faulkner D., Arens E. A., Fisk W. J., Johnston L. P., McNeel P. J., Pih D., Zhang H., 1992, Air movement, ventilation, and comfort in a partitioned office space, ASHRAE Transactions, 98(1), 756-780.
- 4) Shair F. H., Heitner K. L., 1974, Theoretical model for relating indoor pollutant concentrations to those outside, Environ. Sci. Tech., 8, 441-451.
- 5) Ohira N., Yagawa N., Gotoh N., 1993, Development of a measurement system for multizone infiltration,

- ASHRAE Transactions, 99, 692-698.
- 6) Walton G. N., 1982, Airflow and multiroom thermal analysis, ASHRAE Transactions, 88(2), 78-91.
  - 7) Walton G. N., 1984, A computer algorithm for prediction infiltration and interroom airflows, ASHRAE Transactions, 90(1B), 601-610.
  - 8) Walton G. N., 1989, Airflow network models for element-based building airflow modeling, ASHRAE Transactions, 95(2), 611-620.
  - 9) Diasty R., Fazio P., Budaiwi I., 1992, Modelling of indoor air humidity : the dynamic behavior within an enclosure, Energy and Building, 61-73.
  - 10) Waters J. R., Simons M. W., 1987, The evaluation of contaminant concentrations and airflows in a multi-zone model of a building, Building and Environment, 22(4), 305-315.
  - 11) Chung K. C., 1996, Development and validation of a multizone model for overall indoor air environment prediction, HVAC & R Research, 2(4), 376-385.
  - 12) Zhang J. S., 2005, Combined heat, air, moisture, and pollutants transport in building environmental systems, JSME International Journal, Series B, 48(2), 182-190.
  - 13) 조석호, 양성환, 이봉현, 정성욱, 이병호, 1998, 실내공기질 평가를 위한 2구획 모델의 개발, 한국환경과학회지, 7(6), 745-751.
  - 14) 조석호, 2000, 다구획 모델에 의한 실내공기질의 평가, 지산대학 논문집, 18, 181-192.
  - 15) 조석호, 2001, 다구획 실내환경에서의 공기유동량의 예측, 부산가톨릭대학교 논문집, 1, 175-183.