

ORIGINAL ARTICLE

## 빌딩 내의 공기유동량 예측을 위한 누입 및 환기모델의 개발

조 석 호\*

부산가톨릭대학교 환경행정학과

### Development of an Infiltration and Ventilation Model for Predicting Airflow Rates within Buildings

Seok-Ho Cho \*

Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea

#### Abstract

A ventilation model was developed for predicting the air change per hour(ACH) in buildings and the airflow rates between zones of a multi-room building. In this model, the important parameters used in the calculation of airflow are wind velocity, wind direction, terrain effect, shielding effect by surrounding buildings, the effect of the window type and insect screening, etc. Also, the resulting set of mass balance equations required for the process of calculation of airflow rates are solved using a Conte-De Boor method.

When this model was applied to the building which had been tested by Chandra et al.(1983), the comparison of predicted results by this study with measured results by Chandra et al. indicated that their variations were within -10%~+12%. Also, this model was applied to a building with five zones. As a result, when the wind velocity and direction did not change, terrain characteristics influenced the largest and window types influenced the least on building ventilation among terrain characteristics, local shieldings, and window types. Except for easterly and westerly winds, the ACH increased depending on wind velocity. The wind direction had influence on the airflow rates and directions through openings in building.

Thus, this model can be available for predicting the airflow rates within buildings, and the results of this study can be useful for the quantification of airflow that is essential to the research of indoor air quality(temperature, humidity, or contaminant concentration) as well as to the design of building with high energy efficiency.

**Key words** : Infiltration and ventilation model, ACH(Air changes per hour), Airflow rate

#### 1. 서론

최근 에너지 절감률을 높이기 위해 빌딩의 기밀화 및 단열 성능의 향상이 강조되고 있다. 이에 따른 실내 공기질의 저하로 빌딩증후군(sick building syndrome)을 유발하기도 한다. 빌딩의 공기 누입과 환기는 실내 공기질의 향상과 에너지 효율이 높은 빌딩의 설계라

는 관점에서 중요한 요소 중의 하나이다.

빌딩의 작은 틈새를 통한 공기 누입량은 큰 빌딩에 서는 전체 공기유동량에 대해 작은 비중을 차지하지만, 작은 빌딩에서는 그 비중이 비교적 크다. 공기 누입량은 변동하는 바람에 의해 야기되는 압력에 좌우되며, 그것을 정확하게 모델링하는 것은 쉽지가 않다. 비교적 큰 개구를 통한 환기는 크게 자연환기와 기계

Received 1 August, 2013; Revised 23 December, 2013;

Accepted 31 December, 2013

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

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

환기로 나누어지며, 오염이 심한 실내공기를 관리하는 데는 기계환기 방식이 효과적이다. 그러나 설치비 및 유지비가 적게 들며 소음 발생이 적다는 장점에, 인체에 영향을 주지 않을 정도로 오염된 실내 환경에는 자연환기 방식이 유용한 수단이 될 수 있다. 또한 자연환기는 기계환기와 병용함으로써 에너지를 절감하는 효과도 있게 된다.

자연환기는 공기 누입과 같은 기초적인 메카니즘에 의해 이루어지지만, 건물의 창, 문, 또는 환기공 등의 비교적 큰 개구부를 통해 이루어지므로 유동현상은 더 복잡하다. 즉 기본적으로는 실내외 또는 내부 구획간의 압력차에 의해 공기가 이동하며, 이 압력차는 풍력과 온도차에 의해 자연스럽게 발생한다. 풍력은 주로 풍속에 좌우되고, 온도차는 밀도차를 야기하여 스택효과(stack effect)를 발생시킨다.

빌딩은 기본적으로 다수의 구획과 유동통로의 조합으로 이루어지며, 실내 공기질 및 빌딩의 에너지를 관리하기 위해서는 인접한 구획간의 공기유동량을 아는 것이 필수적이다. 따라서 실내환경에 대한 공기유동 모델은 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다. Sherman과 Grimsrud(1980)는 공기 누입과 압력의 상관에 대한 간단한 물리적 모델을 제시하였는데, 여기서 이들은 구조물의 형상 및 누설면적, 평균 풍속, 지형 특성, 실내외 온도차 등을 모델의 파라미터로 사용하였다. Swami와 Chandra(1988)는 빌딩 표면의 압력 분포와 자연환기에 의한 공기유동과의 상관에 관한 연구결과를 발표하였다. 이들은 압력계수(pressure coefficient) 분포에 대한 광범위한 데이터베이스의 재검토를 통해 빌딩 표면에 대한 평균 압력계수를 구하는 식을 제시하고, 지형 및 차폐의 영향을 고려하여 빌딩의 환기횟수(ACH, air change per hour)를 예측하였다. 하지만 이들 연구에서는 온도차에 의해 발생하는 스택효과를 고려하지 않았으며, 빌딩의 내부 구획 사이의 공기유동량 예측은 연구에 포함되지 않았다.

Walton(1982)은 부하 예측 컴퓨터 프로그램에 의한 다구획 모델을 사용하여 공기유동의 열적 해석을 수행하였다. 이를 통해 여러 다른 환경조건 하에서 전형적인 도시형 가옥에 대해 공기유동, 실내온도, 열부하 등을 계산하였으며, 다구획 실내에 대해 내부 구획간의 공기유동량을 예측할 수 있는 단초를 제공하였

다. 이 연구에 이어서, Walton(1984, 1989)은 누입 및 내부 구획간의 공기유동을 예측하기 위한 컴퓨터 알고리즘을 제시하고 공기유동 네트워크 모델을 개발하였으나, 이 모델은 빌딩이 위치한 지형 및 차폐의 영향 등은 모델링 하지 않았으며, 오로지 빌딩의 유동통로에서의 공기유동 방정식을 세우고 이 방정식의 해를 구하는 기법을 제시하는 데만 초점을 맞추었다.

그 이후 실내환경의 모델에 관한 연구는 공기유동 모델을 토대로 하여 열 모델, 습도 모델, 오염농도 모델 등으로 확장되어 왔으며, Chung(1996)과 Zhang(2005)은 실내환경의 공기유동, 열, 습도, 오염농도를 모두 고려한 다구획 모델에 관한 연구결과를 발표하였다. 하지만 이들은 모두 공기유동에 관한 연구에서 기상 관측탑에서의 풍속이 아닌 빌딩 포락면(building envelope)에서의 풍속을 기준으로 하여 공기 유동량을 예측하였다. Deru와 Burns(2003)는 지형과 국소차폐의 영향을 고려하여 빌딩의 에너지 시뮬레이션을 위한 누입 및 자연환기 모델에 관한 연구결과를 발표하였다. 하지만, 이들 연구에는 내부 구획간의 공기유동량에 대한 예측은 포함되지 않았으며, 자연환기만을 대상으로 하였다. 따라서 빌딩에는 자연환기뿐만 아니라 기계환기도 동시에 이루어지는 경우도 많기 때문에 기계환기를 포함한 환기모델에 대한 연구가 필요한 실정이다.

이처럼 국외에서는 빌딩 내부로의 공기유입에 영향을 주는 요인들에 대한 많은 연구가 수행되었으나, 국내에서는 매우 미흡한 실정이다. 국내에서는 Cho(2006)가 실내외 온도, 습도, 공기유동, 오염농도를 예측하기 위한 통합 다구획 모델을 개발한 연구결과를 제시하고 있으나, 전반적으로 이에 대한 연구가 활발하지 않는 실정이다. Cho(2006)가 연구에 사용한 공기유동 모델에서는 빌딩의 외부 개구부 부근의 풍속을 기준으로 그것을 알고 있다는 가정 하에 모델링되었으나, 이의 경우는 개구 부근의 풍속을 측정할 자료가 필요하게 된다. 그러나 기상대에서 관측하여 발표하는 풍속을 기준으로 하여 지형의 특성을 고려하여 빌딩 포락면 부근의 풍속으로 환산하여 모델링할 수 있다면 더 유용한 모델이 될 수 있을 것이다. 이를 위해서는 우선적으로 풍속, 풍향, 빌딩이 위치한 지형특성, 빌딩 주변의 국소차폐 등의 파라미터를 고려해야 하고, 또

한 창문 및 방충망의 유형에 의한 환기의 영향도 고려할 필요가 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 자연환기와 기계환기가 동시에 이루어지는 경우에 풍속과 풍향, 지형특성, 빌딩 주변의 차폐효과, 창문 및 방충망의 유형 등의 파라메타를 고려하여 빌딩의 환기횟수와 유동통로에서의 공기유동량을 예측하기 위한 환기모델을 제시하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 모델의 이론적 해석

본 연구에서의 누입 및 환기모델은 빌딩의 환기횟수와 유동통로에서의 공기유동량을 예측하기 위한 모델이다. 공기유동량을 예측하기 위해서는 우선 지형의 특성을 고려하여 빌딩의 기준높이에서의 풍속과 압력계수를 계산하여 풍압을 구하고, 실내외의 온도차에 기인한 압력차를 계산한다. 이처럼 바람과 온도차에 의해 야기되는 전 압력차를 사용하여 각 유동통로에서의 질량유량을 구하게 된다. 이때 국소차폐와 창문의 유형에 의한 유동량 감소가 고려된다. 그리고 나서 기계환기에 의한 공기유동량을 고려하여 각 구획에서의 질량보존을 만족하게 되는 압력의 적절한 조합을 찾게 되며, 이를 위해서는 비선형 연립방정식을 풀어야 한다. 이때 각 구획의 압력을 연속적으로 근사화하는 반복기법이 사용된다.

#### 2.1.1. 지형 특성의 영향에 따른 풍속

빌딩을 통과하는 공기유동량을 예측하는 데 있어서 바람의 영향은 주요 인자 중의 하나이다. 실제로 바람은 매우 심한 난류이므로 순간적인 풍속과 풍향을 예측하는 것은 매우 어렵다. Haghghat 등(2000)은 확률모델을 사용하여 변동하는 풍속과 풍향은 순간적인 누입량 및 자연환기량에 매우 큰 영향을 미치며, 평균적인 변동효과는 평균 풍속 및 풍향을 사용함으로써 설명할 수 있다고 주장하였다.

풍속은 지형의 영향을 받기 때문에 빌딩이 위치한 지역의 풍속은 기상탑에서 관측한 풍속과는 차이가 있을 수밖에 없다. 따라서 빌딩을 통과하는 공기유동에 관한 연구는 그 빌딩이 위치하고 있는 지형의 영향을 우선적으로 고려해야 한다. 풍속과 풍향을 관측하

는 기상탑은 대개 평탄한 지형으로서 주위에 국소차폐(local shielding)가 없는 고지대에 위치해 있다. 빌딩의 기준높이에서의 풍속은 Table 1에 나타난 지형등급(terrain class)에 따른 지형상수를 사용하여 다음 식으로 근사화 할 수 있음이 알려져 있다(Sherman과 Grimsrud, 1980).

$$V_o = V_{rh} a \left( \frac{H}{H_{rh}} \right)^b \quad (1)$$

단,  $V_o$  : 빌딩의 기준풍속[m/s]

$V_{rh}$  : 기상관측 풍속[m/s]

$H$  : 빌딩의 기준높이[m]

$H_{rh}$  : 기상관측 높이[m]

$a, b$  : 지형상수

Table 1. Terrain parameters for standard terrain classes

Terrain class	b	a	Description
T-I	0.10	1.30	Ocean or other body of water with at least 5km of unrestricted expanse
T-II	0.15	1.0	Flat terrain with some isolated obstacles(buildings or trees well separated from each other)
T-III	0.20	0.85	Rural areas with low buildings, trees, etc
T-IV	0.25	0.67	Urban, industrial or forest areas
T-V	0.35	0.47	Center of large city

#### 2.1.2. 표면 압력계수 및 풍압

빌딩을 통한 공기유동량을 계산하는 데 가장 필수적인 인자는 바람에 의한 압력계수이다. 빌딩 표면에서의 압력계수는 표면의 위치에 따라 다르며, 통상적으로 빌딩을 구성하는 각 벽면에 대해 풍향각의 향으로 계산된다. 많은 연구자들이 표면 압력계수의 계산식을 제안하고 있지만, 본 연구에서는 Swami와 Chandra (1988)가 정규화 압력계수(normalized pressure coefficient)의 개념을 사용하여 제시한 다음의 식을 사용한다. 정규화 압력계수는 풍향각과 벽면의 측면비의 향으로 표시되며, 이때 풍향각은 각 벽면의 표면에 대해 외부 법선과 풍향 사이의 각도로 정의된다.

$$C_p = 0.6 C_{p_N} \quad (2.a)$$

$$C_{p_N} = \ln[C_0 + C_1 \sin(\alpha/2) + C_2 \sin^2(\alpha) + C_3 \sin^3(2\alpha G) + C_4 \cos(\alpha/2) + C_5 G^2 \sin^2(\alpha/2) + C_6 \cos^2(\alpha/2)] \quad (2.b)$$

단,  $C_p$  : 표면 압력계수,  $C_{p_N}$  : 정규화 압력계수,  $\alpha$  : 풍향각[°],  $G = \ln(S)$ ,  $S$  : 측장비

$$C_0 = 1.248, C_1 = -0.703, C_2 = -1.175,$$

$$C_3 = 0.131, C_4 = 0.769, C_5 = 0.07,$$

$$C_6 = 0.717$$

바람이 빌딩의 주위를 유동함에 따라 그것은 내부 압력에 관해 빌딩 포락면을 가로질러 양압장 또는 음압장을 야기하며, 빌딩의 외부 표면에서의 풍압은 다음 식과 같이 동압과 표면 압력계수의 곱으로 표시할 수 있다.

$$PW = \frac{1}{2} C_p \rho_o V_o^2 \quad (3)$$

단,  $PW$  : 풍압[Pa]

$\rho_o$  : 바람의 밀도[kg/m<sup>3</sup>]

### 2.1.3. 스택 압력차

스택 효과는 빌딩의 내측과 외측 또는 빌딩의 내부 구획 사이의 온도변화에 기인한 밀도차에 의해 발생된다. 이러한 밀도의 차이는 부력을 일으켜 공기유동을 유발하게 된다. 빌딩의 각 구획 사이에 있는 벽면의 양 측면상의 공기는 잘 혼합되어 있다고 가정하면, 구획 j와 구획 k 사이에서의 높이 및 밀도의 차이에 기인한 스택 압력차(stack pressure difference)는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$PS = -gh(\rho_j - \rho_k) \quad (4)$$

단,  $PS$  : 스택 압력차[Pa]

$\rho_j, \rho_k$  : 각각 구획 j와 구획 k에서의 공기밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$h$  : 구획의 기준위치(바다)로부터의 높이[m]

$g$  : 중력가속도[m/s<sup>2</sup>]

### 2.1.4. 차폐 및 창문 유형에 따른 공기유동량

빌딩에서 각 구획 사이에 있는 개구 또는 유동통로를 가로지르는 누입 또는 자연환기는 바람과 스택효과에 의해 야기되는 압력차에 의해 일어난다. 만약 구획 j에서 구획 k로 공기가 유동한다면, 그 구획 사이에 있는 유동통로에서의 총 압력차(total pressure difference)는 풍압과 스택 압력차를 조합함으로써 구할 수 있다. 따라서 총 압력차  $\Delta P_{jk}$ 는 다음과 같다.

$$\Delta P_{jk} = DP + PS + PW \quad (5)$$

단,  $DP$  : 기준위치(바다)에서의 구획 j와 구획 k의 압력차[Pa] ( $= P_j - P_k$ )

$P_j, P_k$  : 각각 구획 j와 구획 k의 기준위치에서의 압력[Pa]

한편, 유동통로에서의 질량유량은 경험식과 오리피스 방정식을 토대로 구한 다음 식으로 구할 수 있다 (Walton, 1982).

$$M'_{jk} = C A_e (2\rho_j)^{1/2} \Delta P_{jk}^n \quad (6)$$

단,  $M'_{jk}$  : 구획 j와 구획 k 사이에 있는 유동통로의 질량유량[kg/s]

$C$  : 유동계수(Flow coefficient)

$n$  : 유동지수(Flow exponent)

$A_e$  : 유동통로의 면적[m<sup>2</sup>]

여기서, 유동지수의 값은 이론적으로  $0.5 \leq n \leq 1.0$ 의 범위에 있어야 하며, 큰 유동통로에서는 대략 0.5이고 매우 작은 개구에서는 0.65에 가까운 값이다 (Walton, 1989). 유동계수는 광범위한 레이놀즈수에 대해 대략  $C = 0.6$ 의 값을 가지지만, 문과 같이 수직 구획된 큰 유동통로에서는  $C = 0.78$ 을 적용하여 계산할 수 있다(Walton, 1984).

그리고 빌딩에 인접한 주변 환경에 기인하는 국소 차폐에 의해 빌딩으로 유입하는 공기유동량이 감소하게 된다. 국소차폐의 효과를 판단하는 것은 어려운 일이지만, Swami와 Chandra(1988)는 Table 2에 나타낸 바와 같이 차폐등급(shielding class)에 따른 차폐수정계수( $Sc$ )를 제시하였다. 또한 이들은 창문의 유형 및

방충망에 따른 공기유동량의 감소를 고려하였다. 즉, 방충망이 없는 완전히 개방된 일반적인 창문에서는 공기유동량의 감소가 발생하지 않지만, 창문 유형에 따른 수정계수(Wc)는 60%의 다공 방충망의 경우에는 0.85, 방충망이 없는 완전개방 회전창문의 경우에는 0.75, 60%의 다공 방충망을 가진 회전창문의 경우에는 0.65의 값을 가진다고 주장하였다. 따라서 본 연구에서는 Swami와 Chandra(1988)가 제시한 차폐수정계수와 창문 유형에 따른 수정계수를 사용하여 식 (6)을 다음 식으로 수정함으로써 최종적으로 수정된 질량유량이 계산된다.

**Table 2.** Correction factors for generalized shielding

Shielding class	Shielding correction factor (Sc)	Description
S-I	1.0	No obstruction or local shielding
S-II	0.88	Light local shielding with few obstructions
S-III	0.74	Moderate local shielding ; some obstructions within two house heights
S-IV	0.57	Heavy shielding ; obstruction around most of perimeter building or trees within five building heights in most directions
S-V	0.31	Very heavy shielding ; large obstruction surrounding perimeter within two house height

$$M_{jk} = M'_{jk} \cdot Sc \cdot Wc \quad (7)$$

단,  $M_{jk}$  : 수정된 질량유량[kg/s]

$Sc$  : 차폐수정계수

$Wc$  : 창문유형에 따른 수정계수

차폐 및 창문 유형을 고려하여 수정된 질량유량이 계산되면, 이것은 각 유동통로의 체적유량으로 환산하고, 이 중에서 1시간 동안 빌딩 포락면을 통해 외기가 실내의 각 구획으로 유입되는 체적유량의 합을 실내의 전체 체적으로 나눈으로써 환기횟수를 계산할 수 있다. 즉 체적유량과 환기횟수는 다음 식으로 구해진다.

$$Q_{jk} = \frac{M_{jk}}{\rho_j} \quad \text{단, } Q_{jk} : \text{체적유량}[\text{m}^3/\text{s}] \quad (8)$$

$$ACH = \frac{3600 \sum_{k=1}^N Q_{0k}}{V_Z} \quad (9)$$

단,  $ACH$  : 환기횟수[h<sup>-1</sup>]

$Q_{0k}$  : 외부(구획 0)로부터 구획 k로 유입되는 체적유량[m<sup>3</sup>/s]

$V_Z$  : 실내의 전체 체적[m<sup>3</sup>]

$N$  : 내부 구획의 수

### 2.1.5. 기계환기에 대한 고려

공기를 유동시키는 송풍기 등의 기계적인 수단은 구획의 압력에 영향을 미치며, 결과적으로 질량유량의 평형에 영향을 미치게 된다. 따라서 식 (5)에 의해 총 압력차를 구하는 식에 송풍기에 의해 여기되는 압력차가 추가되어야 한다. 송풍기에 의해 야기되는 압력차를 계산하는 것은 성능곡선, 즉 송풍기의 유량-압력 곡선을 사용하여 모델링할 수 있다. 그러나 송풍기의 종류에 따라 성능곡선이 달라지기 때문에 특정한 송풍기가 아닌 다양한 송풍기를 대상으로 그것을 모두 모델링하는 것이 쉬운 일이 아니다. 따라서 본 연구에서는 식 (5)에 송풍기에 의해 야기되는 압력차를 추가하는 대신에, 각 구획에 대해 질량보존을 평가할 때 이미 알고 있는 기계환기량(송풍기의 질량유량)을 고려하여 평가하는 방법을 사용한다. 즉 구획 k에서의 질량유량의 합( $M_k$ )은 다음 식으로 계산된다.

$$M_k = \sum M_{jk} + F_k \quad (10)$$

단,  $F_k$  : 구획 k에서의 기계환기량[kg/s]

### 2.1.6. 해석 기법

각 구획에 대한 질량보존은 개구나 유동통로를 통과하는 질량유량의 합이 0일 것을 요구하며, 이 조건을 만족하는 각 구획의 압력에 대한 적절한 조합을 찾기 위해서는 비선형 연립방정식을 풀어야 한다. 이것의 해를 구하는 데는 일반적으로 Newton-Raphson법이 많이 사용된다(Walton, 1984). 하지만, 이 방법은 정확한 해의 수렴반경을 벗어나면 종종 수렴을 하지

않는 경우가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 각 구획의 압력을 연속적으로 근사화 하는 Conte-De Boor 기법(Conte와 De Boor, 1972)을 사용한다.

$$P_k^{(i+1)} = P_k^{(i)} - \frac{M_k}{\sum \frac{\partial M_k}{\partial P_k}} \quad \text{단, } i: \text{반복횟수} \quad (11)$$

여기서, 편도함수는 다음과 같다.

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

각 구획에 대한 질량보존은 수렴기준을 제공한다. 즉, 현재의 반복계산에서 평가된 압력에 대해 모든 구획에서  $M_k = 0$ 을 만족한다면 해는 수렴된다. 0으로 나누는 계산을 방지하고, 반복계산을 절약하면서 충분한 정확도를 얻기 위해, 각 구획에 대해 다음과 같은 상대적인 수렴기준을 적용한다.

$$\frac{|M_k|}{\sum |M_{jk}| + |F_k|} \leq \epsilon \quad (13)$$

단,  $\epsilon$ : 미소값(본 연구에서는  $10^{-8}$ )

## 2.2. 연구방법

### 2.2.1. 모델의 전산화

본 연구모델의 유통도는 Fig. 1과 같으며, 전산화 과정은 다음과 같이 연속된 절차에 따라 비주얼 베이직(VISUAL BASIC)언어를 사용하여 프로그래밍 된다.

- (1) 빌딩의 형상에 관련된 자료(벽의 측면비, 개구면적 및 중심높이, 구획 체적, 빌딩의 기준높이 등)와 기상 자료(기상관측 풍속 및 풍향, 기상관측 높이, 외기 온도, 외기 압력 등), 그리고 지형 등급, 차폐등급, 창문 유형, 구획 온도, 기계환기량 등의 자료를 입력한다.
- (2) 각 구획의 기준위치에 대한 초기 압력값을 설정한다.
- (3) 빌딩의 기준풍속( $V_o$ )을 계산한다[식(1)].
- (4) 빌딩 외부 벽면에 대한 압력계수( $C_p$ )를 계산한다[식(2.a) 및 (2.b)].

- (5) 빌딩 외부 벽면의 풍압( $PW$ )을 계산한다[식(3)].
- (6) 빌딩의 내외측 및 내부 구획간의 스택 압력차( $PS$ )를 계산한다[식(4)].
- (7) 구획의 기준위치에 대한 압력차( $DP$ )를 구하고 구획간의 총 압력차( $\Delta P_{jk}$ )를 계산한다[식(5)].
- (8) 유통통로에서의 질량유량( $M_{jk}$ )을 계산한다[식(6)].
- (9) 차폐 및 창문 유형에 의해 수정된 질량유량( $M_{jk}$ )을 계산한다[식(7)].
- (10) 기계환기량을 고려하여 각 구획에 대해 질량유량의 합( $M_k$ )을 구하고, 수렴기준을 적용하여 질량보존의 만족 여부를 평가한다[식(10) 및 (13)].
- (11) 수렴이 되지 않으면, 각 구획의 기준위치에 대한 압력을 다시 계산한다[식(11) 및 (12)].
- (12) 수렴이 될 때까지 (7)~(11)의 과정을 반복한다.
- (13) 수렴이 되면, 유통통로의 질량유량을 체적유량( $Q_{jk}$ )으로 환산하고[식(8)], 이것을 출력한다.
- (14) 환기횟수( $ACH$ )를 계산하고[식(9)], 이것을 출력한다.

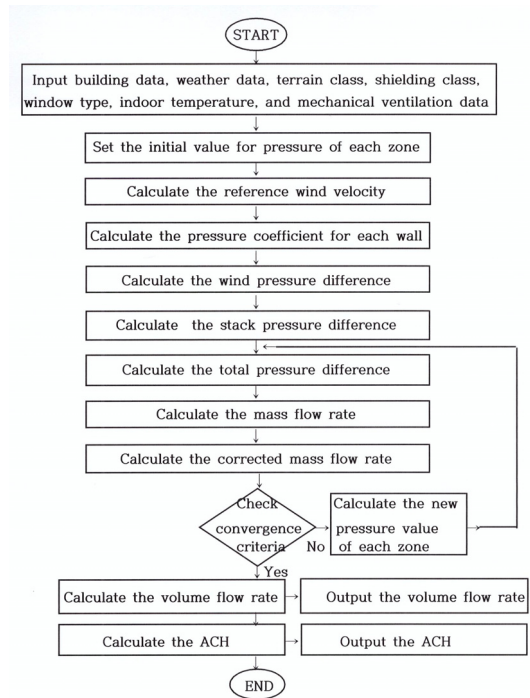


Fig. 1. Flow chart for the calculation procedure.

2.2.2. 전산 입력 자료

본 모델의 전산 프로그램은 아파트나 사무실과 같은 다구획 빌딩의 형상에 대한 자료, 예측 시간대의 기상자료, 지형 및 국소차폐 등급과 창문 유형 자료, 구획 온도, 특정 구획의 기계환기량 등을 입력하고, 각 구획의 초기압력을 설정함으로써 각 유동통로의 공기유동량과 빌딩의 환기횟수에 대한 예측 결과가 출력되도록 작성되었다. 따라서 다양한 건물 형상 및 기상 조건에 대해 본 전산 프로그램의 적용이 가능할 것이다.

본 모델의 검증을 위해 먼저 Chandra 등(1983)의 연구대상이었던 Fig. 2의 빌딩에 적용하였으며, 그 빌딩의 벽면 측정비와 창문 면적은 Table 3 및 Table 4와 같다. 여기서 W1~W8은 창문의 위치이며 D1은 문의 위치로서, 시뮬레이션은 모든 문이 닫혀있고 모든 창문은 열려있는 상태에서 수행되었다.

실내공간의 전 체적은 263.35 m<sup>3</sup>이고, 외기온도는 20℃로 고정하고 실내온도는 10℃~30℃로 하였다. 또한, 기상관측 높이는 10 m이고 빌딩의 기준높이는 2.3 m로 하였으며, 기상관측 풍속은 2.5 m/s~4.3 m/s, 풍향은 북풍을 기준으로 87°~152°로 하였다. 그리고 지형등급은 T-II, 차폐등급은 S-II, 창문 유형은 60% 다공 방충망을 가진 창문으로 가정하였다.

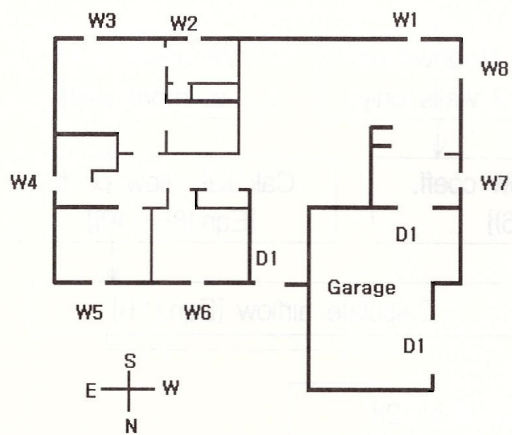


Fig. 2. Schematic of test building.

Table 3. Side ratio of wall at test building

Wall	Side ratio	Wall	Side ratio
East	0.64	West	0.64
South	1.56	North	1.56

Table 4. Window area in test building

Window	Area[m <sup>2</sup> ]	Window	Area[m <sup>2</sup> ]
W1	0.711	W5	0.711
W2	0.247	W6	0.711
W3	0.613	W7	0.281
W4	0.247	W8	0.711

또한 본 모델을 Chung(1996)이 연구대상으로 사용한 주거 아파트에 적용해 보았다. 서론에서 전술한 바와 같이 그의 연구에서는 기상 관측탑에서의 풍속이 아닌 빌딩 포락면에서의 풍속을 기준으로 하여 공기유동량을 예측하였기 때문에 본 모델에 의한 연구결과와 비교는 할 수 없지만, 빌딩의 치수가 비교적 상세하게 표시되어 있고 예측에 필요한 전산입력 자료의 확보가 가능하여 본 모델의 적용 예를 제시하기 위한 연구대상으로 삼았다. 연구대상 빌딩의 내부 평면의 개략도는 Fig. 3과 같으며, 실내 공간의 천장 높이는 2.9 m이다. D1~D4는 문의 위치이고, 구획 1과 구획 3에는 바닥으로부터 1.1 m의 높이에 남향의 유리 창문(W1 및 W2)이 설치되어 있으며, 구획 4와 구획 5에는 창문이 설치되지 않았지만 배기를 위한 송풍기가 천장에 설치되어 있다. 계산에 필요한 전산입력 자료(벽면의 측정비, 구획의 체적, 개구 크기, 개구 중심높이 등)는 이 개략도로부터 산정한 Table 5 ~ Table 7과 같다.

시뮬레이션은 모든 문과 창문이 열려있고 구획 4와 구획 5에 있는 송풍기는 가동 상태로 하여 수행되었다. 기상관측 높이는 10 m이고 빌딩의 기준높이는 3 m로 하였다. 외기온도는 27℃, 실내온도는 20℃로 고정하고, 기상관측 풍속, 풍향, 지형등급, 차폐등급, 창문 유형 등은 변경하면서 이들의 영향에 따른 결과를 예측하였다.

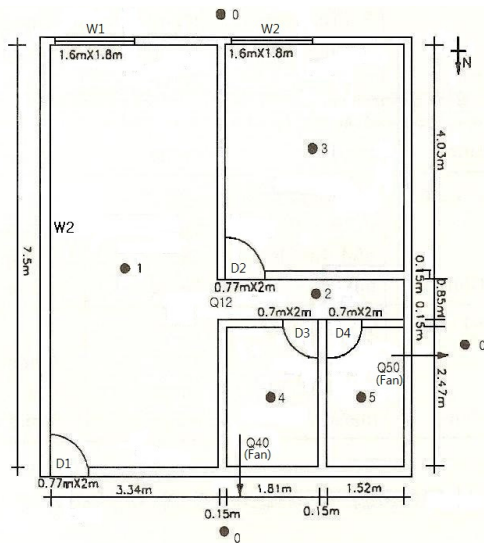


Fig. 3. The floor plan of the zonal arrangement of application building.

Table 5. Side ratio of wall at application building

Wall	Side ratio	Wall	Side ratio
East	0.64	West	0.64
South	1.56	North	1.56

Table 6. Opening area in application building

Opening	Area[m <sup>2</sup> ]	Center height[m]
D1, D2	1.540	1
D3, D4	1.400	1
W1, W2	2.800	2
Q12	2.465	1.45
Q40	-	-
Q50	-	-

Table 7. Zone volume in application building

Zone	1	2	3	4	5
Volume[m <sup>3</sup> ]	72.645	4.462	39.157	12.965	12.296

Table 8. Comparison of predicted and measured ACH[terrain class T-II, shielding class S-II, windows with 60% porosity insect screen]

Wind direction [deg.]	Wind velocity(Vrh) [m/s]	ACH[h <sup>-1</sup> ]					Diff. [%]
		Measurement (Chandra etc.)	Prediction (Swami etc.)	Prediction(This Study)			
				Indoor 20 °C Outdoor 10 °C	Indoor 20 °C Outdoor 20 °C	Indoor 20 °C Outdoor 30 °C	
87	2.5	19.0	16.9	17.13	17.14	17.15	-9.8~-9.7
140	4.3	29.8	29.9	33.28	33.34	33.38	11.7~12.0
152	3.2	23.3	22.5	24.56	24.59	24.62	5.4~5.7

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 모델의 검증

Table 8은 Fig. 2에 나타난 빌딩을 대상으로 본 연구 모델을 사용하여 예측한 환기횟수와 Chandra 등(1983)의 측정 결과 및 Swami와 Chandra(1988)의 예측 결과를 비교한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 본 예측 결과와 Chandra 등(1983)의 측정 결과와의 차이는 대략 -10% ~ +12% 이내의 범위에서 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

#### 3.2. 모델의 적용

본 모델을 Fig. 3에 나타난 빌딩에 적용하여 지형, 국소차폐, 창문의 유형, 풍속, 풍향 등의 영향을 예측하였다.

Fig. 4는 기상관측 풍속 4.5 m/s, 북풍(풍향 0°), 차폐등급 T-III, 방충망이 없는 완전개방 창문 등의 조건에서 동일한 빌딩이 각각 다른 지형에 위치한 경우에서 지형의 영향에 따른 환기횟수를 예측해 본 결과이다.

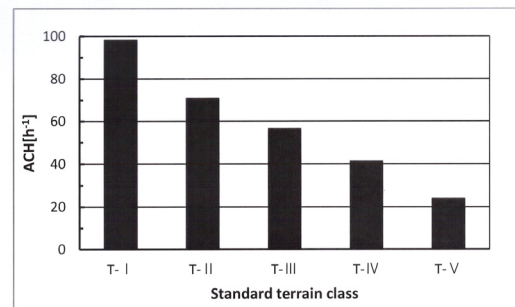


Fig. 4. Predicted ACH according to standard terrain classes [shielding class S-III, fully open windows and no screen].



예상한 대로 해변 주변지역(T-I)이 가장 환기가 잘 이루어지고 대도시의 도심지역(T-V)이 환기가 가장 저조하며, 두 경우에 환기횟수의 차이는  $74.3 \text{ h}^{-1}$ 으로 매우 크게 나타났다.

Fig. 5는 기상관측 풍속  $4.5 \text{ m/s}$ , 북풍(풍향  $0^\circ$ ), 지형등급 T-V, 방충망이 없는 완전개방 창문 등의 조건에서 국소차폐에 의한 환기횟수의 영향을 나타낸 것이며, Fig. 6은 기상관측 풍속  $4.5 \text{ m/s}$ , 북풍(풍향  $0^\circ$ ), 지형등급 T-V, 차폐등급 S-III 등의 조건에서 창문 유형에 의한 환기횟수의 영향을 나타낸 것이다. 차폐의 경우에는 건물이 인접한 주위 환경에 장애물이 없거나 국소적인 차폐만 있을 때(S-I)와 도심지역처럼 매우 중대한 차폐가 있을 때(S-V)의 환기횟수의 차이는

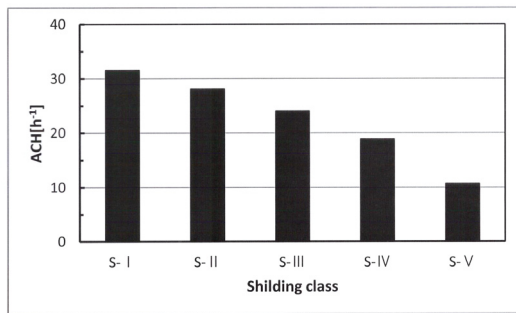


Fig. 5. Predicted ACH according to generalized shieldings [terrain class T-V, fully open windows and no screen].

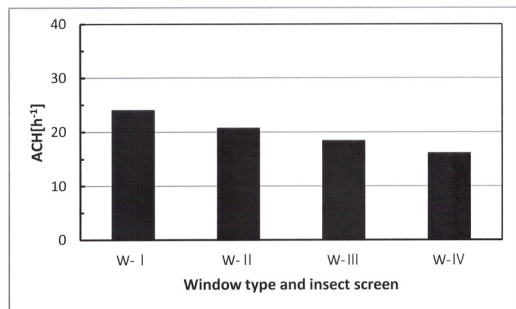


Fig. 6. Predicted ACH for window type and insect screen\* [terrain class T-V, shielding class S-III].

- \*W-I : Fully open window, no screen
- \*W-II : 60% porosity insect screen
- \*W-III : Fully open awning window, no screen
- \*W-IV : Awning window and 60% porosity insect screen

$20.8 \text{ h}^{-1}$  정도로 나타났다. 창문 유형의 경우에는 방충망이 없는 완전 개방 창문(W-I)과 60% 다공 방충망을 가진 회전 창문(W-IV)과의 환기횟수의 차이는  $7.8 \text{ h}^{-1}$  정도로 나타났다. 따라서 풍속과 풍향이 같고, 동일한 빌딩일 때 환기에 미치는 영향은 지형에 따른 영향이 가장 크고, 빌딩에 인접한 주위환경의 차폐에 의한 영향이 그 다음이며, 창문의 유형에 의한 영향이 가장 적음을 알 수 있다. 이것은 환기에 대한 바람의 영향이 지형 특성에 따라서는 거시적인데 반해, 바람이 빌딩 주변과 창문 쪽으로 다가오며 따라 미시적으로 변하는 결과에 기인한 것이다.

Fig. 7은 지형등급 T-V, 차폐등급 S-III, 방충망이 없는 완전개방 창문 등의 조건에서 풍향이 북풍( $0^\circ$ )일 때와 남풍( $180^\circ$ )일 때의 기상대 관측 풍속( $V_{rh}$ )에 따른 환기횟수를 예측한 것인데, 풍속이 증가함에 따라 환기횟수는 증가하고 있으며, 풍향이 북풍일 때보다 남풍일 때 환기가 더 잘 이루어짐을 알 수 있다. 이것은 북풍일 때의 북향인 문(D1)으로 유입되는 공기유동량보다 남풍일 때의 남향인 창문(W1과 W2)으로 유입되는 공기유동량이 많은데 기인되는 것이다.

Fig. 8은 기상관측 풍속  $4.0\sim 5.0 \text{ m/s}$ , 지형등급 T-V, 차폐등급 S-III, 방충망이 없는 완전개방 창문 등의 조건에서 풍향에 따른 환기횟수를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 전술한 바와 같이 북풍( $0^\circ$ ) 및 남풍( $180^\circ$ )일 때 풍속이 증가함에 따라 환기횟수가 증가하였다. 마찬가지로 동풍( $90^\circ$ )과 서풍( $270^\circ$ )을 제외한 다른 풍향에서도 같은 결과를 보이고 있으며, 남풍을 기준으로 환기횟수의 분포가 좌우로 대칭분포를 나타내고 있다. 이것은 빌딩이 사각형 형상을 가지며 동쪽 벽면과 서쪽 벽면에는 문이나 창문이 없기 때문이다. 이로 인해 동풍 및 서풍일 때는 환기가 가장 잘 이루어지지 않고 있다. 또한 남풍이나 이에 가까울수록 환기가 가장 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Table 9는 풍향에 따른 각 유동통로를 가로지르는 공기유동량을 나타낸 것이며, 표에서 - 기호는 유동방향이 반대로 됨을 의미하는 것이다. 북풍( $0^\circ$ ), 북동풍( $45^\circ$ ) 및 북서풍( $315^\circ$ )일 때는 구획 1의 북향으로 나 있는 문으로 공기가 유입하여 일부는 구획 1의 창문(W1)으로 유출하고 나머지는 구획 1에서 구획 2로 유

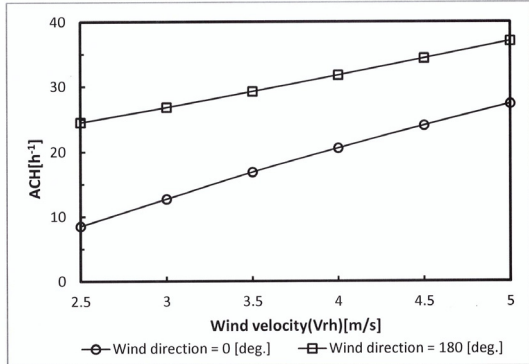


Fig. 7. Predicted ACH according to wind velocity[terrain class T-V, shielding class S-III, fully open windows and no screen].

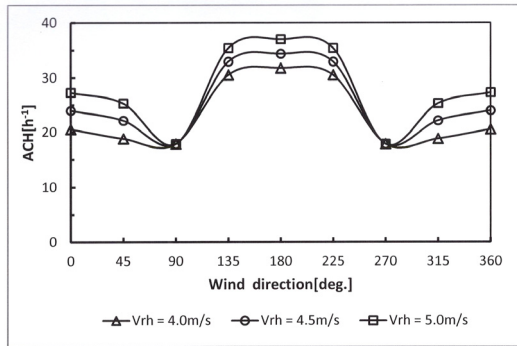


Fig. 8. Predicted ACH according to wind direction[terrain class T-V, shielding class S-III, fully open windows and no screen].

동하며, 구획 2에서는 내부에 있는 문(D2, D3, D4)을 통해 각각 구획 3과 구획 4 및 구획 5로 유동하게 된다. 이들은 각각 구획 3의 창문(W2)과 구획 4 및 구획 5에 있는 송풍기에 의해 외부로 유출하게 된다. 반면에 남풍(180°), 남동풍(135°), 남서풍(225°), 동풍(90°), 서풍(270°) 등일 때는 송풍기의 영향을 직접 받게 되는 문 D3과 D4를 통과하는 공기유동을 제외하고는 그 유동방향이 바뀌게 됨을 알 수 있다. 즉, 구획 1의 창문(W1)과 구획 3의 창문(W2)으로 공기가 유입하며, 구획 1의 문을 통해 공기가 외부로 유출하게 된다. 또한 내부 통로의 경우도 문 D2를 통해 구획 3에서 구획 2로, 그리고 구획 2에서 구획 1로 공기가 유동하게 된다. 문이나 창문을 통해 유입되는 공기유동량은 남풍일 때 가장 많고 그 다음이 남동 및 남서풍일 때이며, 동풍 및 서풍일 때 가장 적다. 이는 전술한 결과와 일치함을 알 수 있다. 또한 풍향에 따라 내부 구획 사이의 유동통로를 흐르는 공기유동량의 변화뿐 아니라 유동방향도 바뀌게 됨을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 빌딩에서의 환기는 풍속, 풍향, 빌딩이 위치한 지형특성, 빌딩 주변의 차폐효과, 창문 및 방충망의 유형에 의해 영향을 받는다. 이외에도 빌딩의 기하학적 형상도 또한 환기에 영향을 미칠 것이다. 향후 이에 대한 연구도 필요하리라 생각된다. 또한 우리나라 실정에 맞는 지형등급과 차폐 등급의 분류와 이에 관련된 각 지수 및 계수 값들에 관한 연구와 다양한 창문 유형 및 방충망에 대한 공기유동량 감소

Table 9. Predicted airflow rate through openings in test building[terrain class T-V, shielding class S-III, fully open windows and no screen]

Opening	Flow direction	Wind direction	Airflow rate[m³/s]				
			0°	45° or 315°	90° or 270°	135° or 225°	180°
D1	Zone 1 → Outdoor		-0.964	-0.889	0.434	1.025	1.081
W1	Zone 1 → Outdoor		0.404	0.364	-0.393	-0.730	-0.762
W2	Zone 3 → Outdoor		0.272	0.239	-0.324	-0.592	-0.617
Q40(Fan)	Zone 4 → Outdoor		0.154	0.154	0.154	0.154	0.154
Q50(Fan)	Zone 5 → Outdoor		0.112	0.112	0.112	0.112	0.112
Q12	Zone 1 → Zone 2		0.538	0.505	-0.050	-0.312	-0.337
D2	Zone 2 → Zone 3		0.272	0.239	-0.316	-0.578	-0.603
D3	Zone 2 → Zone 4		0.154	0.154	0.154	0.154	0.154
D4	Zone 2 → Zone 5		0.112	0.112	0.112	0.112	0.112

등에 관한 기초연구에도 많은 연구자들의 관심이 필요할 것이다.

본 연구는 우리나라의 실제적인 빌딩을 대상으로 한 연구가 아니라, 개발된 모델의 적용 예를 제시하는데 주안점을 두었다. 우리나라의 빌딩, 특히 아파트는 각 건설회사에 따라 동일한 형상의 빌딩이 여러 다른 지형에 건설되어 있는 경우가 많으며, 어떤 특정 지형(지역)에도 방향을 달리하여 밀집해 있는 경우가 다수이다. 향후에는 이러한 실제적인 환경에 본 연구모델을 적용해 보고자 한다.

#### 4. 결론

실내공기 환경에 대한 이론적인 모델링 연구는 그 중요성에도 불구하고 국내에서는 아직 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 자연환기와 기계환기가 동시에 이루어지는 경우에 풍속과 풍향, 지형특성, 빌딩 주변의 차폐효과, 창문 및 방충망의 유형 등의 파라메타를 고려하여 빌딩의 환기횟수와 유동통로에서의 공기유동량을 예측하기 위한 환기모델을 제시하였다.

본 모델의 검증을 위해 Chandra 등(1983)의 연구대상 빌딩에 적용한 결과, 본 예측 결과와 Chandra 등(1983)의 측정 결과와의 차이는 대략 -10% ~ +12% 이내의 범위에서 비교적 잘 일치하였다.

또한 하나의 적용 예로서 본 모델을 Chung(1996)이 연구 대상으로 사용한 주거 아파트에 적용한 결과, 풍속과 풍향이 같고, 동일한 빌딩일 때 환기에 미치는 영향은 지형의 특성에 따른 영향이 가장 크고, 빌딩에 인접한 주위환경의 차폐에 의한 영향이 그 다음이며, 창문의 유형에 의한 영향이 가장 적음을 알 수 있었다. 동풍과 서풍을 제외한 풍향에서는 풍속의 증가에 따라 환기횟수가 증가하였다. 동풍과 서풍은 동쪽 벽면과 서쪽 벽면에는 문이나 창문이 없기 때문에 풍속의 영향을 많이 받지 않음을 알 수 있었다. 또한 풍향에 따른 환기횟수는 남풍일 때 가장 많고, 그 다음이 남동 및 남서풍일 때이며, 동풍 및 서풍일 때 가장 적었다. 그리고 풍향에 따라 내부 구획 사이의 유동통로를 흐르는 공기유동량의 변화뿐 아니라 유동방향도 바뀌게 됨을 알 수 있었다. 이와 같이 본 모델에 의해 풍속, 풍향, 빌딩이 위치한 지형특성, 빌딩 주변의 차폐효과,

창문 및 방충망의 유형 등에 의한 환기의 영향을 성공적으로 예측하였다.

따라서 본 연구를 통해 개발된 환기모델의 전산프로그램을 적절히 활용함으로써 직접 측정하지 않고도 기존의 빌딩에 대한 환기횟수와 각 유동통로 및 개구에서의 공기유동량을 예측하고 평가할 수 있을 것이다. 그리고 신축 예정인 빌딩의 경우에도 설계 초기단계에서 실내의 공기유동량을 미리 예측해 봄으로써 이의 결과를 설계에 반영할 수 있을 것이다. 또한 본 연구 결과는 실내환경에서의 오염농도, 열, 습도 등의 공기질 연구와 에너지 효율이 높은 빌딩의 설계에 필수적인 공기유동량을 정량화하는 데 기여할 것이다.

향후 실험적 연구와 다양한 빌딩에 적용하여 얻은 검증자료의 축적을 통해 본 연구모델의 정확도를 더욱 향상시키려는 노력이 필요할 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2012학년도 부산가톨릭대학교의 교내연구비에 의하여 연구되었습니다.

#### 참고 문헌

- Chandra, S., Houston, M., Fairey, P., Kerestecioglu, A., 1983, Wing Walls to improve natural ventilation : Full scale results and design strategies, Proceedings of ASES Eighth National Passive Conference, Glorieta, NM., 1-10.
- Cho, S. H., 2006, Development of an integrated multizone model for indoor air environment prediction, Journal of the Environmental Sciences, 17(9), 993-1003.
- Chung, K. C., 1996, Development and validation of a multizone model for overall indoor air environment prediction, HVAC & R Research, 2(4), 376-385.
- Conte, S. D., De Boor, C., 1972, Elementary numerical analysis, an algorithmic approach, McGraw-Hill, 88.
- Deru, M., Burns, P., 2003, Infiltration and natural ventilation model for whole-building energy simulation of residential buildings., NREL, CP-550-33698, 1-17.
- Haghighat, F., Brohus, H., Rao, J., 2000, Modelling air infiltration due to wind fluctuations - a review, Building and Environment, 35, 377-385.
- Swami, M. V., Chandra, S., 1988, Correlations for pressure

- distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow, ASHRAE Transaction 94, 243-266.
- Sherman, M. H., Grimsrud, D. T., 1980, Infiltration-pressurization correlation : Simplified physical modeling, ASHRAE Transaction 86, 778-806.
- Walton, G. N., 1982, Airflow and multiroom thermal analysis, ASHRAE Transactions, 88(2), 78-91.
- Walton, G. N., 1984, A computer algorithm for prediction infiltration and interroom airflows, ASHRAE Transactions, 90(1B), 601-610.
- Walton, G. N., 1989, Airflow network models for element-based building airflow modeling, ASHRAE Transactions, 95(2), 611-620.
- Zhang, J. S., 2005, Combined heat, air, moisture, and pollutants transport in building environmental systems, JSME International Journal, Series B, 48(2), 182-190.