

ORIGINAL ARTICLE

큰 개구부를 가진 단일구획 빌딩에서의 자연환기 모델의 개발

조석호*

부산가톨릭대학교 환경행정학과

Development of a Natural Ventilation Model in a Single Zone Building with Large Openings

Seok-Ho Cho*

Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

Abstract

A model has been developed to predict natural ventilation in a single zone building with large openings. This study first presents pressure-based equations on natural ventilation, that include the combined effect of wind and thermal buoyancy. Moreover, the concept of neutral pressure level(NPL) is introduced to consider the two-way flow through a large opening. The total pressure differences across the opening and the NPL are calculated, and nonlinear equations are solved to find the zonal pressure to satisfy mass conservation. For this analysis, an iterative technique of successively approximating the zonal pressure is used. The results of applying this study model to several simple cases are as follows. When there is no wind and only the stack effect is caused, a one-way flow occurs in both the top and bottom openings in the case of two openings of equal-area, and a one-way flow occurs in the top opening; however, a two-way flow occurs in the bottom opening in the case of two openings of unequal-area. When there is a wind effect, regardless of whether the outside air temperature is lower or higher than the indoor air temperature, air flows into the room through the bottom opening and out of the room through the top opening. As the wind velocity increases, the wind effect appears to be more influential than the stack effect owing to the temperature difference.

Key words : Natural ventilation, Single zone building, Neutral pressure level

1. 서론

실내 환경의 공기질을 관리하는 방법에는 대치, 격리, 환기 등에 의한 방법이 있으나, 이들 방법 중에서 가장 널리 사용되는 것은 환기에 의한 방법이다. 작업 환경과 같이 오염이 심한 곳에서는 국소환기가 사용되지만, 발생량이 적은 일반적인 실내 환경에서는 전

체환기가 더 효과적이다. 전체환기 방식은 자연환기와 기계환기로 나누어지며, 오염물질의 관리를 위해 일정한 환기량을 확보해야 하는 측면에서는 기계환기 방식이 바람직하지만, 인체에 대한 영향이 미미할 정도로 오염의 정도가 낮은 경우에는 자연환기 방식이 더 유용할 수 있다. 자연환기는 실내공기질의 관리뿐만 아니라 열적 안락 제어, 고효율의 에너지빌딩 설계

Received 3 November, 2017; Revised 18 January, 2018;

Accepted 6 March, 2018

*Corresponding author: Seok-Ho Cho, Department of Environmental Administration, Catholic University of Pusan, Busan 46252, 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.

등의 관점에서 빌딩 설계의 중요한 요소 중의 하나이며, 화재 발생과 관련된 연기 제어시스템의 설계에도 유용할 것이다(Chung, 1996).

자연환기는 실내·외 또는 내부 구획간의 압력차에 의해 빌딩의 개구부를 통하여 자연스럽게 행하여지는 환기이다. 압력차는 풍력과 온도 변화에 기인하며, 온도 변화는 밀도차를 야기하여 스택효과(stack effect)를 발생시킨다(Deru and Burns, 2003; Lin and Chuah, 2011).

빌딩은 일반적으로 다수의 구획과 크고 작은 개구들이 조합된 형태이다. 이러한 빌딩의 인접한 구획간의 공기유동량을 아는 것은 실내 공기질 및 에너지 관리의 연구에 필수적이다. 따라서 빌딩에서의 자연환기 및 공기유동량을 규명하기 위한 방법으로는 실험적인 조사 및 이론적인 모델링 기법이 주로 사용되어왔다. 현존하는 빌딩에서의 자연환기량을 직접 측정하거나 기하학적으로 상사인 축소 빌딩 챔버를 제작하여 실험실에서 공기 유동량을 측정하는 것은 낮은 기류속도로 인한 어려움이 있었다. 그래서 빌딩 내의 공기유동량 측정에는 통상적으로 추적가스를 이용한 실험적 기법이 주로 사용되었다(Ohira et al., 1993). 하지만, 이것 또한 실험방법과 측정치의 계산절차가 복잡하여 이론적인 모델링 기법이 더 많은 관심을 끌어들였다(Cho, 2008).

이론적인 연구에 사용되는 기법에는 경험 및 해석적 모델링 기법과 수치적 모델링 기법이 있다. 경험 및 해석적 모델은 주로 모양이 단순한 빌딩이거나 단일 구획 빌딩에 대해 질량보존 방정식을 적용함으로써 개발되었으며, 이들 대부분의 모델들은 실험적으로 증명되었다(Etheridge and Sandberg, 1996; Li et al., 2000; Li and Delsante, 2001). 반면에 모양이 복잡한 빌딩이거나 다구획 빌딩의 경우에는 수치적인 접근 방법이 주로 사용되었다. 수치적 접근 방법은 최근에 CFD 모델이 주목을 받고 있지만(Chen and Xu, 1998; Walker et al., 2011; Bangalee et al., 2012), 전통적으로 사용되어 온 모델은 네트워크 유동 모델이다. CFD 기법은 빌딩의 국소적인 어떤 특정한 구획에 대한 시뮬레이션에 주로 이용되고 있으며, 전체 빌딩에 대한 시뮬레이션을 수행하는 데에는 격자의 수가 너무 많을 뿐만 아니라 격자의 생성과 경계조건의 설정이 복

잡하며, 수립시간이 길고, 상용 소프트웨어의 구입이나 사용에 많은 비용이 따른다(Zhai et al., 2015). 따라서 빌딩 전체를 통한 공기유동을 보다 빠르게 예측하기 위해서는 네트워크 유동 모델이 훨씬 유리하다. 네트워크 유동 모델은 하나 이상의 유통통로에 연결된 구획을 노드(node)로 나타내고, 모든 유통통로에서의 유동량을 행렬 방정식의 형태로 표현하여 수치적으로 풀게 된다. 이러한 모델들은 유사한 유동방정식을 사용하고 있으나, 유동현상의 기술과 비선형 연결방정식을 풀기 위한 알고리즘에 대한 연구가 지속적으로 행해져왔다(Feustel and Dieris, 1992).

Sherman and Grimsrud(1980)는 공기 누입과 압력과의 상관에 관한 물리적 모델을 제시하였고, Swami and Chandra(1988)는 빌딩 표면의 압력분포와 자연환기와의 상관에 관한 연구를 통해 빌딩의 환기횟수를 예측하였다. 하지만 이들 연구에서는 온도차에 의해 야기되는 스택효과를 고려하지 않았다.

Walton(1984, 1989)은 누입과 내부 구획간의 공기유동을 예측하기 위한 컴퓨터 알고리즘을 제시하고, 공기유동 네트워크 모델을 개발하였다. 또한 Deru and Burns(2003)는 빌딩의 에너지 시뮬레이션을 위한 누입 및 자연환기 모델에 관한 연구결과를 제시하였다. 그러나 이들 연구에서 환기 개구부들은 비교적 크기가 작은 것으로 가정되었으며, 큰 개구들은 높이에 따라 다수의 작은 개구들로 나누는 방법으로 모델링되었다. 하지만 이들 방법은 큰 개구를 얼마나 많은 작은 개구로 나누는 것이 최적인지를 아는 것이 어려운 문제였다. 또한 이들 연구에서는 개구를 통한 유동은 한 방향 유동으로 가정하였는데, 작은 개구부에 대해서는 한 방향 유동으로 가정해도 별 문제가 없으나, 큰 개구부는 스택효과로 인해 유입 및 유출 흐름이 동시에 일어날 수 있다. 따라서 문과 같은 큰 개구부에서는 양 방향 유동을 고려하는 것이 필요할 것이다. Li et al.(2000)은 큰 개구를 가진 빌딩에 대해 양 방향유동을 고려하여 자연환기량을 예측하는 연구를 수행하였으며, 이때 구획의 압력방정식은 실내압력의 기준위치를 구획의 중심높이로 설정하였다. 하지만, 실내압력의 기준위치를 구획의 바닥높이로 설정하는 것이 방정식의 단순화에 도움이 될 것이다.

이처럼 국외에서는 빌딩에서의 자연환기 또는

공기유동 모델에 관한 연구가 많이 수행되어 왔지만 국내에서는 실내공기질 모델 연구를 포함하더라도 매우 미흡한 실정이다. Choi(1997)가 정화공기전달율을 이용한 실내공기질 모델을 개발하여 환기시스템을 평가하는 연구를 수행하였으며, No and Kim(2005)은 CFD를 이용하여 고층건물의 중앙부에 위치한 실내 공간에 대해 단방향 개구부의 형태와 위치에 따른 자연환기의 특성을 연구하였다. Cho(2008, 2014)가 실내의 온도, 습도, 공기유동, 오염농도 등을 예측하기 위한 통합 다구획 모델을 개발한 연구결과와 빌딩에서의 환기모델을 제시하고 있지만, 그는 큰 개구를 통한 공기유동을 한 방향 유동으로 가정하였으며, 공기가 유입 및 유출하는 개구의 중심높이가 같은 것으로 가정하였다. 그래서 수평으로 연결된 구획간의 공기유동은 잘 예측하고 있지만, 수직으로 연결된 구획간의 공기유동을 예측하지 못하는 한계가 있었다. 그러나 빌딩은 기본적으로 다수의 구획들이 크고 작은 개구들에 의해 수평 또는 수직으로 연결되어지므로, 완전한 다구획 모델이 되기 위해서는 수평 또는 수직으로 연결된 구획 사이를 흐르는 공기유동량의 예측이 가능해야 한다. 수직으로 연결된 구획간의 공기유동량을 예측하기 위해서는 개구의 중심높이에 대한 차이가 고려되어야 한다. 이러한 개념들을 다구획 빌딩에 적용하기 위해서는 먼저 단일구획 빌딩에 적용하여 이에 대한 기초적인 연구결과를 얻는 것이 필요할 것이다. 따라서 본 연구에서는 향후 다구획 빌딩 연구로의 확장을 위한 기초연구의 일환으로 큰 개구를 가진 단일구획에 대한 자연환기 예측 모델을 개발하고자 한다. 이때 압력방정식의 단순화를 위해 구획압력의 기준위치는 바닥높이로 설정하며, 큰 개구부를 통과하는 양 방향 유동을 고려하기 위해 스택효과에 의한 중성압력레벨(Neutral Pressure Level, NPL)의 개념을 도입한다. 이를 통해 스택효과만 있는 경우와 풍속효과가 있는 경우에 실내·외의 온도차에 의한 자연환기량을 예측하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 연구방법

2.1. 자연환기 모델의 이론적 해석

실내환경에서 구획 사이의 개구부를 통과하는 공

기유동은 풍력과 스택효과에 의해 야기되는 압력차에 의해 일어난다. 따라서 빌딩에서 수직 벽의 개구에 의해 서로 연결된 실외(구획 0) 및 실내(구획 1)의 압력은 각각 다음과 같다.

$$P_{t1}(z) = P_{10} - g \int_0^z \rho_1 dz \quad (1.a)$$

$$P_{t0}(z) = P_{00} - \rho_0 g h_1 - g \int_0^z \rho_0 dz + \frac{1}{2} \rho_0 C_p(z) V_0(z)^2 \quad (1.b)$$

단, $P_{t0}(z)$: 실외의 높이 z 에서의 압력[Pa]

$P_{t1}(z)$: 구획 1의 높이 z 에서의 압력[Pa]

P_{00} : 실외 기준레벨 압력[Pa]

P_{10} : 구획 1의 바닥레벨 압력[Pa]

ρ_0 : 실외의 공기밀도[kg/m³]

ρ_1 : 구획 1의 공기밀도[kg/m³]

$V_0(z)$: 높이 z 에서의 풍속

$C_p(z)$: 높이 z 에서의 표면압력계수

g : 중력가속도[m/s²]

h_1 : 기준레벨로부터 구획 1의 바닥레벨까지의 높이[m]

z : 구획 1의 바닥레벨로부터의 높이[m]

여기서 표면압력계수가 높이의 함수가 아니고, 건물 주변의 풍속이 일정하며 각 구획의 공기온도가 균일하다고 가정하면, 수직벽면에 위치한 개구의 경우에 실외로의 유출 흐름, 즉 실내(구획 1)로부터 실외(구획 0)로 공기가 흐를 때 높이 z 에서의 전체 압력차 $\Delta P_t(z)$ 는 다음과 같이 단순화된다.

$$\begin{aligned} \Delta P_t(z) &= P_{t1}(z) - P_{t0}(z) \\ &= P_1 - \frac{1}{2} \rho_0 C_p V_0^2 + \rho_0 g h_1 - (\rho_1 - \rho_0) g z \end{aligned} \quad (2)$$

단, P_1 : 구획 1의 내부압력(= $P_{10} - P_{00}$) [Pa]

따라서 바닥 및 천정 레벨에서의 전체 압력차는 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_t(0) = P_1 - \frac{1}{2}\rho_0 C_P V_0^2 + \rho_0 g h_1 \quad (3.a)$$

$$\Delta P_t(R_1) = P_1 - \frac{1}{2}\rho_0 C_P V_0^2 + \rho_0 g h_1 - (\rho_1 - \rho_0) g R_1 \quad (3.b)$$

단, R_1 : 구획 1의 바닥레벨로부터의 천정레벨 높이 [m]

또한, 구획 1에서의 중성압력레벨 Z_N 은 벽의 두 측면상의 압력이 같아지는 높이로 정의되므로 식 (2)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_N = \frac{\Delta P_t(0)}{(\rho_1 - \rho_0)g} \quad (4)$$

따라서 중성압력레벨을 고려함으로써 높이 z 에서의 전체 압력차에 대한 또 다른 표현이 얻어질 수 있다.

$$\Delta P_t(z) = \Delta P_t(0) \left(1 - \frac{z}{Z_N}\right) \quad (\text{단}, 0 < z < Z_N) \quad (5.a)$$

$$\Delta P_t(z) = \Delta P_t(R_1) \left(\frac{z - Z_N}{R_1 - Z_N}\right) \quad (\text{단}, Z_N < z < R_1) \quad (5.b)$$

한편, 구획 1과 연결된 개구 i 에서의 질량유량은 경험식과 오리피스 방정식(Walton, 1989)을 토대로 구할 수 있다. 즉 미소높이 dz 에 대한 미소 질량유량 dM 은

$$dM = K b_i |\Delta P_t(z)|^n \text{Sgn} |\Delta P_t(z)| dz \quad (6)$$

단, b_i : 개구 i 의 폭[m]

n : 유동지수(Flow exponent)

K : 계수 [= $C(2\rho_i)^{1/2}$]

C : 유동계수(Flow coefficient)

ρ_i : 유동통로 i 의 공기밀도

$\text{Sgn} |\Delta P_t(z)|$: 부호표시 기호

이며, 이것을 적분함으로써 질량유량을 계산할 수 있다. 여기서 유동지수의 값은 이론적으로 $0.5 \leq n \leq 1.0$ 의 범위에 있으며, 큰 개구에서는 0.5이고, 매우 작

은 개구에서는 0.65에 가까운 값이다(Walton, 1989). 유동계수는 넓은 레이놀즈수에 대해 $C = 0.6$ 이지만 큰 개구에 대해서는 $C = 0.78$ 을 적용할 수 있다(Walton, 1984).

식 (6)을 적분할 때는 개구와 중성압력레벨의 상대적인 위치가 고려되어야 한다. 개구가 구획의 바닥으로부터 밑변 Z_L 과 윗변 Z_H 의 사이에 위치해 있을 때, $Z_N \geq Z_H$ 인 개구에 대해서는 식 5(a)를 식 (6)에 대입하여 적분한 결과는 다음 식과 같다.

$$M_{i,1} = C_0 |\Delta P_t(0)|^n \quad (7)$$

$$\text{단, } C_0 = b_i K \frac{Z_N}{n+1}$$

$$\left[\left(1 - \frac{Z_L}{Z_N}\right)^{n+1} - \left(1 - \frac{Z_H}{Z_N}\right)^{n+1} \right] \text{Sgn} |\Delta P_t(0)|$$

또한, $Z_N \leq Z_L$ 인 개구에 대해서는 식 5(b)를 식 (6)에 대입하여 적분한 결과는 다음과 같다.

$$M_{i,1} = C_R |\Delta P_t(R_1)|^n \quad (8)$$

$$\text{단, } C_R = b_i K \frac{R_1 - Z_N}{n+1}$$

$$\left[\left(\frac{Z_H - Z_N}{R_1 - Z_N}\right)^{n+1} - \left(\frac{Z_L - Z_N}{R_1 - Z_N}\right)^{n+1} \right] \text{Sgn} |\Delta P_t(R_1)|$$

중성압력레벨이 개구 내에 존재하지 않는 경우에는 개구를 통과하는 질량유량은 식 (7)과 (8)에 의해 구해지며, 그 계산 결과는 유입 또는 유출 중 어느 하나만 일어나는 단일방향 유동으로 나타난다. 하지만 중성압력레벨이 개구 내에 존재하는 경우에는 중성압력레벨을 경계로 어느 한쪽은 유입, 다른 쪽은 유출이 일어나는 양방향 유동이 될 것이다. $Z_L < Z_N < Z_H$ 인 개구에 대해서는 중성압력레벨의 아래쪽 개구 부분의 질량유량(M_{iL1})과 위쪽 개구 부분의 질량유량(M_{iH1})으로 나누어 계산하여야 한다. 식 5(a)와 5(b)를 식 (6)에 대입하여 적분한 결과는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} M_{i,1} &= M_{iL1} + M_{iH1} \\ &= C_0 |\Delta P_t(0)|^n + C_R |\Delta P_t(R_1)|^n \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{단, } C_0 = b_i K \frac{Z_N}{n+1} \left(1 - \frac{Z_L}{Z_N}\right)^{n+1} \text{Sgn}|\Delta P_t(0)|$$

$$C_R = b_i K \frac{R_1 - Z_N}{n+1} \left(\frac{Z_H - Z_N}{R_1 - Z_N}\right)^{n+1} \text{Sgn}|\Delta P_t(R_1)|$$

한편, 실내환경의 구획에서 질량보존을 만족하기 위해서는 개구를 통과하는 질량유량의 합이 0이어야 한다. 즉 구획에서의 질량유량의 합은

$$M_1 = \sum_{i=1}^m M_{i,1} \quad (10)$$

단, m : 구획 1에서의 개구 수

이며, $M_1 = 0$ 을 만족하는 압력에 대한 적절한 조합을 찾기 위한 비선형 방정식을 풀어야 한다. 이것은 구획의 압력을 연속적으로 근사화하는 반복기법(Conte와 De Boor, 1972)을 사용함으로써 가능하다.

$$P_1^{(k+1)} = P_1^{(k)} - \frac{M_1}{\sum \frac{\partial M_{i,1}}{\partial P_1}} \quad (11)$$

단, k : 반복횟수

여기서 편도함수는 다음과 같다.

$$\frac{\partial M_{i,1}}{\partial P_1} = -n \frac{M_{i,1}}{\Delta P_t} \quad (12)$$

구획에 대한 질량보존은 수렴기준을 제공하게 되는데, 0으로 나누는 계산을 방지하고 계산시간을 절약 하면서 충분한 정확도를 얻기 위해 다음과 같은 상대적인 수렴기준을 적용한다.

$$\frac{M_1}{\sum |M_{i,1}|} \leq \epsilon \quad (13)$$

단, ϵ : 미소값($= 10^{-10}$)

수렴에 의해 얻어진 각 개구를 통과하는 질량유량은 다음과 같이 체적유량으로 환산된다.

$$Q_{i,1} = \frac{M_{i,1}}{\rho_i} \quad (14)$$

2.2. 단일구획 빌딩에 대한 해석적인 이론

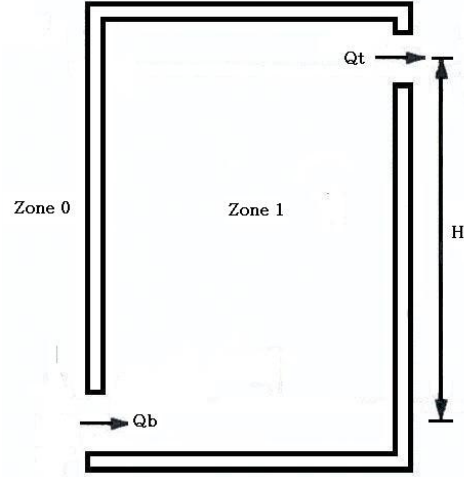


Fig. 1. Geometry of the flow system of single zone building.

Fig. 1과 같은 단일구획 빌딩에서 마주보는 수직 벽의 바닥과 천정 가까이에 두 개구가 위치하는 데, 하부개구는 풍상측 벽면에 있고, 상부개구는 풍하측 벽면에 있으며, 실내온도는 균일한 것으로 한다. 하부개구를 통과하는 유량 Q_b 는 해석적인 방법으로 식 (17)과 같이 유도되며, 단일구획 빌딩의 설계지침으로 사용되어 왔다(Etheridge and Sandberg, 1996; Li et al., 2000). 상부개구의 유량 Q_t 는 평형상태에서 하부개구의 유량 Q_b 와 같아야 한다.

공기가 실외(구획 0)에서 구획 1로 유입된다면 하부개구에서의 바람과 온도차에 기인한 압력차는

$$\Delta P = \frac{1}{4} (C_{p1} \rho_i - C_{p2} \rho_o) V_0^2 + \frac{1}{2} (\rho_o - \rho_i) g H \quad (15)$$

단, ρ_i : 개구 i 의 공기밀도[kg/m^3]

C_{p1} : 풍상측 표면압력계수

C_{p2} : 풍하측 표면압력계수

이며, 체적유량은

$$Q_b = C A^* \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho_i}} \quad (16)$$

단, A^* : 두 개구의 유효면적 $\left(A^* = \frac{\sqrt{2} A_o A_t}{\sqrt{A_o^2 + A_t^2}} \right)$

이므로 다음 식으로 유도된다.

$$Q_b = C \sqrt{\left(\frac{2A_b^2 A_t^2}{A_b^2 + A_t^2} \right) \left(\frac{\rho_0 - \rho_1}{\rho_1} gH + \frac{1}{2} C_{p1} V_0^2 - \frac{1}{2} C_{p2} V_0^2 \right)} \quad (17)$$

단, A_t : 상부개구 면적[m²]

A_b : 하부개구 면적[m²]

H : 두 수직 개구 사이의 높이[m]

본 연구에서는 표면압력계수의 값으로 각각 $C_{p1} = 0.7$ 과 $C_{p2} = -0.5$ 을 사용한다.

2.3. 연구방법

2.3.1. 모델의 전산화

본 연구 모델의 유동도는 Fig. 2와 같으며, 전산화 과정은 다음의 절차에 따라 비주얼 베이직(VISUAL BASIC) 언어를 사용하여 프로그래밍 된다.

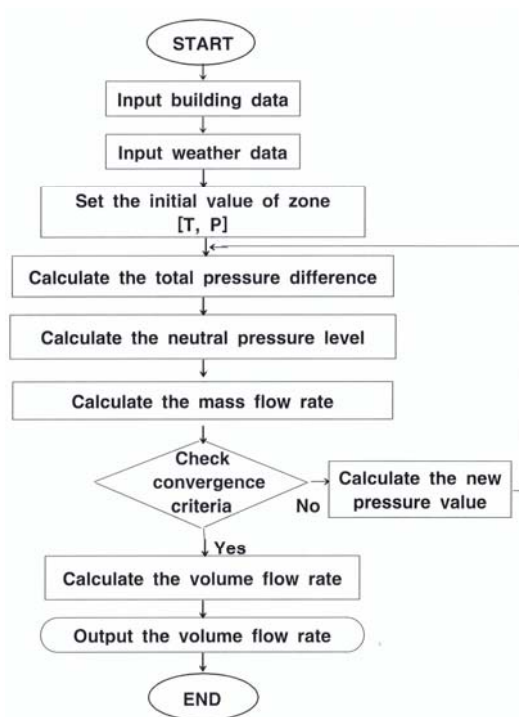


Fig. 2. Flowchart for predicting airflow rate by natural ventilation.

① 예측에 필요한 특정 건물의 자료(건물 외관, 구획, 개구 등의 형상)와 기상 자료(풍속, 외기압력, 외기 온도 등)를 입력한다.

② 실내의 구획 온도와 기준위치에서의 구획 압력에 대한 초기값을 설정한다.

③ 풍속과 실내·외 온도차에 의해 야기되는 바닥 및 천정 레벨에서의 전체 압력차를 계산한다[식 (3.a) 및 (3.b)].

④ 바닥 레벨의 전체 압력차에 의해 중성압력레벨을 계산한다[식 (4)].

⑤ 개구와 중성압력레벨의 상대적인 위치에 따라 개구를 통과하는 질량유량을 계산한다[식 (7)과 (8) 및 (9)].

⑥ 실내(구획 1)에 대해 질량유량의 합을 구하고, 수렴기준을 적용하여 질량보존의 만족여부를 평가한다[식 (10) 및 (13)].

⑦ 수렴이 되지 않으면 구획압력을 다시 계산한다[식 (11) 및 (12)].

⑧ 수렴이 될 때까지 ③~⑦의 과정을 반복한다.

⑨ 수렴이 되면, 개구를 통과하는 질량유량을 체적 유량으로 환산하고[식 (14)], 이것을 출력한다.

2.3.2. 전산 입력자료

본 연구에서 개발된 전산 프로그램은 단일구획 빌딩의 자연환기를 예측하는 모델로서 향후 다구획 모델로의 확장에 앞서, 본 모델의 타당성을 검증하는데 초점을 맞추고자 한다. 이를 위해서 해석적 이론에 사용했던 것(Fig. 1)과 동일한 빌딩에 대해 본 모델을 적용한다.

전산 입력자료는 Table 1과 같다. 여기서 Z_L 에서 Z_H 까지의 수직좌표를 가진 폭 W 인 개구는 $W \times (Z_L, Z_H)$ 로 표시하였으며, 개구의 모양에 따라 4가지 경우로 나누어 적용해 보고자 한다. Case 1 ~ Case 3은 모두 하부 및 상부에 위치한 두 개구의 면적은 동일하고, Case 4는 두 개구의 면적은 같지 않는 것으로 하였다. 하부 및 상부 개구의 상대적인 높이는 모두 6 m로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 스택효과만 있는 경우의 자연환기량

Fig. 3은 Table 1에 나타낸 두 개구의 면적이 동일한

Table 1. Data of zone and opening in single zone building

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Zone 1	Floor height [m]	0	0	0	0
	Ceiling height [m]	10	10	10	10
	Temperature [°C]	20	20	20	20
Opening	Bottom opening [m]	10 × (0, 1)	5 × (0, 2)	2.5 × (0, 4)	5 × (0, 3)
	Top opening [m]	10 × (6, 7)	5 × (6, 8)	2.5 × (6, 10)	5 × (6, 7)

Case 1 ~ Case 3에 대해 바람이 없어 스택효과만 야기하는 조건에서 실내온도를 20°C로 고정하고 외기온도를 변화시키면서 자연환기량을 예측한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 예측된 자연환기량은 Case 1 ~ Case 3에 대해 그 값이 거의 같으며, 설계지침으로 사용되고 있는 Etheridge and Sandberg(1996)의 식으로 계산한 결과와도 잘 일치하고 있다. 그리고 실내·외의 온도차의 절대치가 증가함에 따라 개구를 통한 환기량은 증가하고 있다. 또한 하부개구에서는 외기온도가 실내온도보다 낮을 때는 공기가 유입하고 높을 때는 유출하며, 이와 반대로 상부개구에서는 외기온도가 실내온도보다 낮을 때는 공기가 유출하고 높을 때는 유입함을 알 수 있다. 즉 이것은 외기온도가 실내공기보다 낮을 때는 공기가 하부개구로 유입하여

상부개구를 통해 유출되지만, 실내공기보다 높을 때는 상부개구로 유입하여 하부개구를 통해 유출되는 한 방향 유동으로 나타나고 있음을 의미한다.

Fig. 4는 두 개구의 면적이 동일한 경우에 대해 스택효과만 야기될 때 기준레벨에서의 실내압력을 예측한 것이다. 세 경우 모두 외기온도가 실내온도보다 낮을 때는 음압을 나타내고, 실내온도보다 높을 때는 양압을 나타내고 있으며, 실내·외 온도차의 절대치가 커질수록 압력의 절대치도 커지고 있음을 알 수 있다. 또한 각 외기온도에서 Case 1에서 압력의 절대치가 가장 작고, Case 2와 Case 3 순으로 근소하게 커짐을 알 수 있다. 이것은 개구의 면적이 동일하더라도 개구의 수직 위치가 실내압력에 영향을 미친 것으로 보인다.

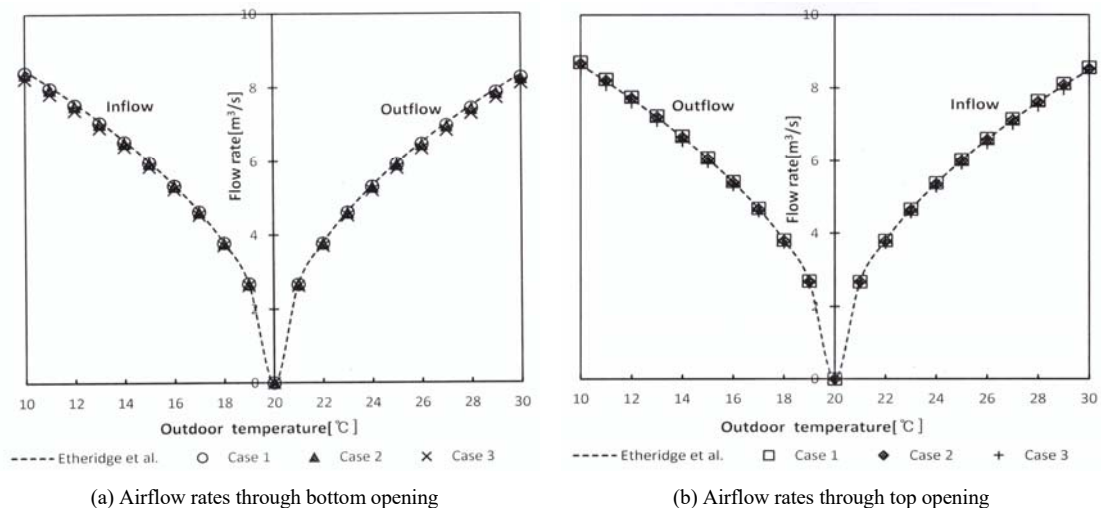
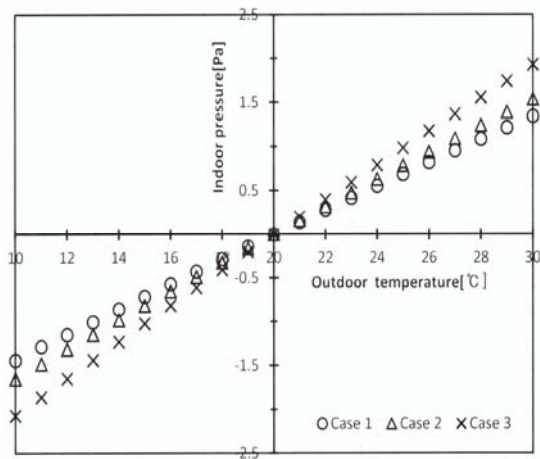


Fig. 3. Predicted airflow rates for a single zone building with two equal-area openings (indoor temperature = 20°C, $V_o = 0$ m/s).

Table 2. Predicted NPL for a single zone building (indoor temperature = 20°C, $V_o = 0$ m/s)

$T_{outdoor}$ [°C]	NPL [m]			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
10	3.4481	3.9489	4.9523	2.3277
11	3.4534	3.9541	4.9572	2.3293
12	3.4587	3.9593	4.9620	2.3309
13	3.4639	3.9644	4.9668	2.3325
14	3.4691	3.9695	4.9716	2.3341
15	3.4743	3.9747	4.9764	2.3357
16	3.4795	3.9798	4.9811	2.3373
17	3.4846	3.9849	4.9859	2.3389
18	3.4898	3.9899	4.9906	2.3405
19	3.4949	3.9950	4.9953	2.3421
20	-	-	-	-
21	3.4949	3.9950	4.9953	2.3421
22	3.4898	3.9900	4.9907	2.3405
23	3.4848	3.9850	4.9860	2.3390
24	3.4797	3.9800	4.9814	2.3374
25	3.4747	3.9751	4.9768	2.3359
26	3.4697	3.9702	4.9722	2.3343
27	3.4647	3.9652	4.9676	2.3328
28	3.4598	3.9603	4.9630	2.3312
29	3.4548	3.9555	4.9585	2.3297
30	3.4499	3.9506	4.9539	2.3282

**Fig. 4.** Predicted indoor pressure for a single zone building with two equal-area openings(indoor temperature = 20°C, $V_o = 0$ m/s).

따라서 외기온도가 실내공기보다 낮을 때는 바닥 압력이 음압이 되어 공기가 하부개구로 유입하여 상부개구를 통해 유출되지만, 실내공기보다 높을 때는 바닥압력이 양압이 되어 공기가 하부개구에서 유출되고 상부개구로 유입되는 한 방향 유동으로 나타나고 있음을 의미한다.

Table 2는 Case 1~Case 4에 대해 스택효과만 야기 되는 경우의 중성압력레벨을 예측한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 중성압력레벨은 네 경우 모두 실내·외 온도차의 절대치가 작을수록 근소하게 높아지며, 상부와 하부의 개구면적이 같은 Case 1~Case 3에서는 상부개구와 하부개구의 사이에 위치하며, 개구면적이 서로 다른 Case 4에서는 하부개구 내에 위치함을 알 수 있다. 이러한 중성압력레벨의 위치는 Case 1~Case 3에서는 상·하 개구 모두 한 방향 유동,

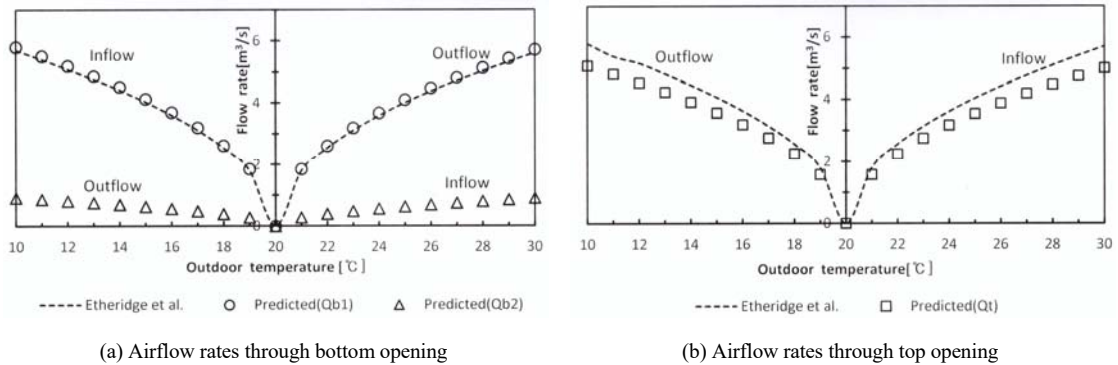


Fig. 5. Predicted airflow rates for a single building with two unequal-area openings (indoor temperature = 20 °C, $V_o = 0$ m/s).

Case 4에서는 하부개구에서는 양 방향 유동, 상부개구에서는 한 방향 유동을 일으키는 결과를 야기함을 알 수 있다.

Fig. 5는 면적이 같지 않는 두 개구에 대해 자연환기량을 예측한 결과를 나타낸 것이다. 두 개구는 Case 4에 해당하는 $5 \times (0, 3)$ m와 $5 \times (6, 7)$ m로 하였다. 그림에서 하부개구의 경우에는 양 방향 유동이 일어나고 있음을 알 수 있다. 즉, 하부개구의 경우에 외기온도가 실내온도보다 낮을 때는 Etheridge and Sandberg(1996)의 식으로 계산한 결과와 비교적 잘 일치하는 공기 유입량(Qb1) 외에 공기 유출량(Qb2)이 동시에 존재하며, 외기온도가 실내온도보다 높을 때는 Etheridge and Sandberg(1996)의 식으로 계산한 결과와 비교적 잘 일치하는 공기 유출량(Qb1) 외에 공기 유입량(Qb2)이 동시에 존재함을 알 수 있다. 이것은 Table 2의 Case 4에 나타낸 바와 같이 중성압력 레벨의 위치가 하부개구 내에 존재하는 데 기인한 것이다.

상부개구의 경우에는 하부개구와 달리 한 방향 유동이 일어나고 있는데, 외기온도가 실내온도보다 낮을 때는 유출 흐름, 실내온도보다 높을 때는 유입 흐름을 나타내며, 그 유동량은 Etheridge and Sandberg(1996)의 식으로 계산한 결과치보다 적은 양을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 하부개구의 양방향 흐름의 영향에 기인한 것으로 보인다. 즉 외기온도가 실내온도보다 낮을 때는 하부개구를 통해 유입한 공기는 일부는 하부개구 그리고 대부분은 상부개구를 통해 유출

되지만, 외기온도가 실내온도보다 높을 때는 상부개구를 통해 유입한 대부분의 공기와 하부개구를 통해 유입한 일부의 공기는 모두 하부개구를 통해 유출되고 있음을 알 수 있다.

3.2. 풍속효과가 있는 경우의 자연환기량

Fig. 6은 Case 1에 대해 바람의 효과를 고려한 경우에 외기온도에 따른 자연환기량을 예측한 것이다. 이때 풍속은 2 m/s 및 4 m/s로 하였고, 하부개구는 풍상측 벽면에 있고, 상부개구는 풍하측 벽면에 위치하는 것으로 하였다. 또한 실내온도는 균일하며 20 °C로 고정하였다.

그림에서 보는 바와 같이, 외기온도가 실내공기보다 낮거나 높은 것에 상관없이, 공기는 하부개구를 통해 실내로 유입하여 상부개구를 통해 유출하고 있음을 알 수 있다. 바람이 없는 경우에는 Fig. 3과 Fig. 5에서 살펴본 바와 같이 외기온도와 실내온도의 차이가 절대적으로 영향을 미치지지만, 바람이 있는 경우에는 온도차보다는 풍속과 풍향이 환기량에 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 Etheridge and Sandberg(1996)의 식으로 계산한 결과는 풍속 2 m/s와 4 m/s의 경우에 실내·외의 온도차가 커짐에 따라 근소하게 유동량이 증가되지만, 본 연구 결과는 풍속 2 m/s에서는 Etheridge and Sandberg(1996)의 식으로 계산한 결과와 유사한 경향을 보이거나, 4 m/s에서는 실내·외의 온도차에 따른 유동량의 변화가 미미한 것으로 나타났다. 이것은 풍속이 증가함에 따라 바람효

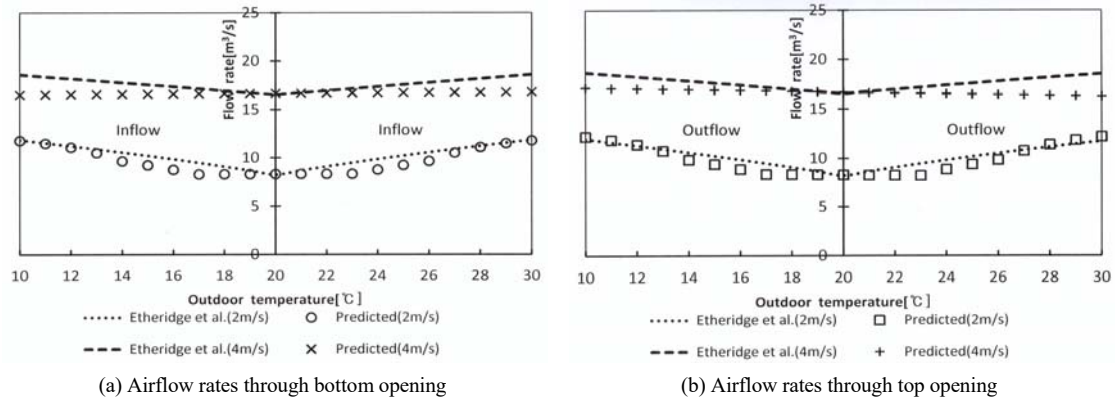


Fig. 6. Predicted airflow rates for a single zone building with two equal-area openings (indoor temperature = 20°C, $V_o = 2$ m/s and 4 m/s).

과가 온도차에 의한 스택효과보다 더 큰 영향을 미치게 된 결과로 보인다.

4. 결론

빌딩은 일반적으로 다구획으로 구성되어 있지만, 본 연구에서는 다구획 빌딩 연구로의 확장을 위한 기초연구의 일환으로 큰 개구부를 가진 단일구획 빌딩에 대한 자연환기 모델을 제시하였으며, 그 모델을 몇몇 단순한 경우에 적용하여 보았다.

바람이 없어 스택효과만 야기되는 경우에 본 연구 결과는 단일구획의 설계지침으로 사용되고 있는 Etheridge and Sandberg(1996)의 식으로 계산한 결과와 잘 일치하였으며, 외기온도가 실내공기보다 낮을 때는 공기가 하부개구로 유입하여 상부개구를 통해 유출되지만, 실내공기보다 높을 때는 상부개구로 유입하여 하부개구를 통해 유출되는 한 방향 유동으로 나타났다. 그리고 중성압력레벨은 상부개구와 하부개구의 사이에 위치하였으며, 이것이 상부개구 또는 하부개구에서의 흐름을 한 방향으로 유도하도록 하는 결과를 야기한 것으로 보인다.

또한, 면적이 같지 않는 두 개구의 경우에는 하부개구에서는 양 방향 유동이 일어났다. 이것은 중성압력레벨이 하부개구 내에 있는 데 기인한 것이다. 하지만 상부개구에서는 하부개구와 달리 한 방향 유동이 일어났다. 외기온도가 실내온도보다 낮을 때는 하부개

구를 통해 유입한 공기는 일부는 하부개구 그리고 대부분은 상부개구를 통해 유출되지만, 외기온도가 실내온도보다 높을 때는 상부개구를 통해 유입한 대부분의 공기와 하부개구를 통해 유입한 일부의 공기는 모두 하부개구를 통해 유출되고 있음을 알 수 있었다.

바람의 효과를 고려한 경우에는 외기온도가 실내공기보다 낮거나 높은 것에 상관없이 공기는 하부개구를 통해 실내로 유입하여 상부개구를 통해 유출하였다. 바람이 있는 경우에는 온도차보다는 풍속과 풍향이 환기량에 더 큰 영향을 미쳤다. 풍속 2 m/s에서는 Etheridge and Sandberg(1996)의 식으로 계산한 결과와 유사한 경향을 보이나, 4 m/s에서는 실내·외의 온도차에 따른 유동량의 변화가 미미한 것으로 나타났다. 이것은 풍속이 증가함에 따라 바람효과가 온도차에 의한 스택효과보다 더 큰 영향을 미치게 된 결과로 보인다.

본 연구 모델을 향후 다구획 모델로 확장함으로써 직접 측정하지 않고도 빌딩 내의 공기유동량을 예측하거나 평가하고, 빌딩 설계과정에 창이나 문의 위치 및 크기 등을 효과적으로 결정하는 데도 활용이 가능할 것이다.

REFERENCES

- Bangalee, M. Z. I., Lin, S. Y., Miao, J. J., 2012, Wind driven natural ventilation through multiple windows of a building: a computational approach, Energy and

- Building, 45, 317-325.
- Chen, Q., Xu, W., 1998, A Zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation, *Energy and Building*, 28, 137-144.
- Cho, S. H., 2008, Development of an integrated multizone model for indoor air environment prediction, *JES*, 17(9), 993-1003.
- Cho, S. H., 2014, Development of an infiltration and ventilation model for predicting airflow rates within buildings, *JESI*, 23(2), 207-218.
- Choi, S. W., Evaluation of ventilation system performance using indoor air quality model, 1997, *Kor. J. Env. Hlth. Soc.*, 23(4), 57-66.
- 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.
- Etheridge, D., Sandberg, M., 1996, *Building ventilation: theory and measurement*, Chichester: John Wiley and Sons. 5-40.
- Feustel, H. E., Dieris, J., 1992, A Survey of airflow models for multizone structures, *Energy and Building*, 18, 79-100.
- Li, Y., Delsante, A., 2001, Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces, *Building and Environment*, 36, 59-71.
- Li, Y., Delsante, A., Symons, J., 2000, Prediction of natural ventilation in buildings with large openings, *Building and Environment*, 35, 191-206.
- Lin, J. T., Chuah, Y. K., 2011, A Study on the potential of natural ventilation and cooling for large spaces in subtropical climatic regions, *Building and Environment*, 46, 89-97.
- No, S. T., Kim, K. S., 2005, A Study on the characteristics of natural airflow through single-sided openings with variable position and geometry, *JAIK_PD*, 21(8), 227-234.
- Ohira, N., Yagawa, N., Gotoh, N., 1993, Development of a measurement system for multizone infiltration, *ASHRAE Transactions*, 99, 692-698.
- Sherman, M. H., Grimsrud, D. T., 1980, Infiltration -pressurization correlation : Simplified physical modeling, *ASHRAE Transaction*, 86, 778-806.
- Swami, M. V., Chandra, S., 1988, Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow, *ASHRAE Transation*, 94, 243-266.
- Walker, C., Tan, G., Glicksman, L., 2011, Reduced-scale building model and numerical investigations to buoyancy-driven natural ventilation, *Energy and Buildings*, 43, 2404-2413.
- 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.
- Zhai, Z., Mankibi, M. E., Zoubir, A., 2015, Review of natural ventilation models, *Energy Procedia*, 78, 2700-2705.