

온도차 자연환기 이론의 유량계수에 대한 연구

A Study of Discharge Coefficient for Thermal Buoyancy Natural Ventilation

신동신(Dongshin Shin)^{1†}, 고현준(Hyunjun Ko)¹, 김세형(Sehyung Kim)¹, 선지형(Jihyung Seon)¹, 윤상민(Sangmin Yoon)¹, 이진영(Jinyoung Lee)²

¹홍익대학교 기계공학과, ²한일엠이씨

¹Department of Mechanical System Design Engineering, Hongik University, Seoul, 04066, Korea

²Himec Co., Ltd., World Meridian Biz-center, 53, Yangsan-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul, 07271, Korea

(Received September 9, 2015; revision received October 6, 2015; Accepted: October 28, 2015)

Abstract This study reviews the discharge coefficient for thermal buoyancy natural ventilation through experimentation. We measure the air velocity at the outlet, which is needed to derive the discharge coefficient and to compare with the theoretical value. When a temperature difference exists between the inside and outside of the building, the measured discharge coefficient differs from the theoretical value with a maximum difference of 12%. The size and position of the openings have little effect on the discharge coefficient. For practical application, the theoretical discharge coefficient can be used with little modification.

Key words Natural ventilation(자연환기), Thermal buoyancy(온도차부력), Discharge coefficient(보정계수), Office building(오피스 빌딩), Eco-friendly energy(친환경 에너지)

† Corresponding author, E-mail: dsshin@hongik.ac.kr

기호설명

C_d	: 유량계수
C_c	: 축류계수
C_v	: 유속계수
A	: 개구부 넓이 [m^2]
H	: 입구와 출구사이 거리 [m]
H_1	: 입구에서 중성대까지의 수직거리 [m]
v	: 공기 속도 [m/s]
g	: 중력가속도 [m/s^2]
Q	: 체적유량 [m^3/s]
T	: 온도 [K]

그리스 문자

ψ	: 유량계수
ρ	: 밀도 [kg/m^3]

하침자

c	: 축조
i	: 실내
o	: 실외
I	: 입구
2	: 출구

1. 서 론

최근 오피스빌딩·연구시설 등에서 친환경 기술의 하나로서 자연환기를 도입하는 사례가 많다. 자연환기 자체는 과거에도 사용한 방법으로, 세계 각국의 전통 건축물들에 자연환기를 도입한 사례가 있다.⁽¹⁾ 현대 도시의 많은 건물들은 창문이 닫힌 구조로 되어있고, 이로 인한 실내 대기오염을 해결하기 위해 고성능·소형의 저렴한 환기장치로 기계 환기 시스템을 구축하고 있다.⁽²⁾

대한민국은 국가 온실가스 배출량의 약 25%를 차지하는 건축물 부문의 감축목표를 달성하기 위해 에너지 소비를 감축하는 것을 목표로 하고 있다.⁽³⁾ 이러한 배경 속에서 최근 자연환기가 주목받고 있다. 자연환기는 냉방 에너지 절감에 효과적으로 건축 계획에서 적절히 설계된 경우 일반적으로 연간 냉방 부하의 5~20%를 절감하는 효과가 있는 친환경 기술이기 때문이다.⁽²⁾

자연환기는 그 구동력에 의해 풍력환기와 온도차환기 두 종류로 나뉜다.⁽³⁾ 풍력환기는 외부 바람에 의한 압력차를 추진력으로 하고 온도차 환기는 실내외의 온도차에 따른 압력 차를 추진력으로 한다. 풍력환기는 상부에서 외기를 들여 하부에서 배출하고 외부 풍속에 의존하므로 환기량의 변동이 크다. 그러므로 건축 계획

지역의 풍향과 개구부의 배치 등을 유의할 필요가 있다. 온도차환기는 하부에서 외기를 들여 상부에서 배출한다. 환기량은 건물 안팎의 온도차에 따른 압력차 및 개구부의 높이차로 결정되며 환기량이 비교적 안정적이다. 풍력환기와 온도차환기의 효과는 동시에 작용하기 때문에 자연환기 계획을 하려면 건축설계 시 입체적으로 건물형태를 고려하는 것이 중요하다.

현재 온도차 자연환기에 관한 연구는 한 개의 개구부를 가지는 건물에서의 연구가 주를 이룬다. Wilson and Kiel⁽⁴⁾은 한 개의 개구부가 있는 실제 건물모델을 만들어서 환기유량을 측정하였다. 그리고 측정된 환기유량을 통하여 건물 내·외부 온도차에 따른 유량계수에 대한 회귀식을 도출하였다. Favarolo and Manz⁽⁵⁾는 한 개의 개구부를 가진 건물을 모델링한 후 전산유체역학(Computational fluid dynamics)을 이용한 분석을 하고, 여러 변수에 따른 유량계수의 변화를 구하였다. Andersen⁽⁶⁾은 이론적으로 온도차에 의한 자연환기를 분석하여 유량계수를 개구부의 형상에 종속적인 값으로 제시하고 있다. 자연환기에 대한 공식과 유량계수는 미국냉동공조학회⁽⁷⁾에서도 제시하고 있는데, 환기량은 건물의 높이, 개구부면적, 건물 내·외부 온도에 의해 정해지며 두 개의 개구부가 있는 건물에서 유량계수의 값은 개구부 형상에만 의존하는 상수로 제시하고 있다. Karava et al.⁽⁸⁾은 건물에서 환기 시 개구부의 유량계수에 관한 이전 연구결과들을 토대로 하여 다양한 변수들에 의해 공식화 된 유량계수의 값이 필요하다고 말하고 있다.

앞의 연구에서는 대부분 하나의 개구부 모델을 사용하였으나 실제 자연환기를 고려하여 설계된 건물들은 상하부 두 개의 개구부를 갖는 형태가 주를 이루고 있어 다양한 환경과 조건이 존재하는 실제 건물의 유량계수에 대한 연구가 필요하다. 실무 현장에서도 추가적인 검증 없이 상수의 유량계수를 사용하고 있으므로 본 연구에서는 상하부 두 개의 개구부를 가지는 건물에서의 유량계수를 검증하고자 한다. 이를 위해서 자연환기에 대한 여러 조건의 축소 모델들을 제작하고 다양한 온도변화에 따른 유량계수를 구하는 실험을 하여 기존 이론 유량계수와 실제 실험 유량계수의 차이를 분석하도록 한다.

2. 유량계수

유량의 이론값과 실제값 사이의 차이를 보정하기 위해서 이론값에 곱하는 계수를 유량계수라 한다. 이 유량계수는 식(1)과 같이 구한다. 여기서 C_c 는 개구부에서 관성에 대한 영향을 보정한 축류계수이고, C_v 는 유체의 점성에 대한 영향을 보정한 유속계수이다.

본 연구에서는 온도차 자연환기의 유량계수를 고찰

하기 위하여 Andersen⁽⁶⁾의 이론을 사용한다. 이 이론은 건물 내부 검사체적에서 질량평형, 에너지 보존, 운동량 방정식을 고려하여 다음과 같이 개구부에서의 기체속도, 환기량을 구하는 방정식을 유도한다.

$$C_d = C_c C_v \quad (1)$$

$$H_2 = \frac{H}{1 + (\rho_i / \rho_o)(\psi_1 / \psi_2)(A_{c2} / A_{cl})^2} \quad (2)$$

$$v_{c2} = \left(\frac{2 \Delta \rho g H_2}{\rho_i \psi_2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$Q_{c2} = C_{d2} A_2 \left(\frac{2g H_1 \Delta T}{T_i} \right)^{1/2} \quad (4)$$

여기서 H 는 개구부의 입구와 출구 사이의 높이를 의미하고 H_1 은 중성대 높이를 뜻한다. 중성대 높이는 건물의 내부와 외부의 압력이 같아지는 높이를 뜻한다. 그리고 H_2 는 H 에서 H_1 을 뺀 값이다. ψ 는 개구부의 형상에 따라 주어지는 일정한 상수값이고 직사각형 형상에서는 $\psi = 1.1^{(6)}$ 의 값으로 주어진다. 이 조건에서 $C_c = 0.7$, $C_v \approx 0.95$ 로 제시되며 이를 통하여 $C_d \approx 0.65$ 값을 얻을 수 있다.

유량계수를 실험적으로 확인하기 위해서 개구부 면적, 개구부 사이의 높이, 개구부 위치, 건물 단면 형상을 변화시키며 수행하도록 한다. 각각의 조건에서 건물 내부와 외부의 온도 차이를 변화시켜 실험을 하고 단순 건물 내 외부 온도차의 변화에 따른 실험도 실시한다.

실험으로 측정할 수 있는 값은 개구부에서 기체의 속도이고 이 값과 이론적 속도 값을 이용하여 유속계수 C_v 값을 구한다.

$$C_{v, experiment} = \frac{V_{experiment}}{V_{theory}} \quad (5)$$

실험으로 구한 C_v 값, 이론적 직사각형에서의 C_c 값을 이용하여 다음과 같이 C_d 값을 계산한다.

$$C_{d, experiment} = C_{c, rectangular} \times C_{v, experiment} \quad (6)$$

3. 실험방법

3.1 축소 모델 제작

단열성이 우수한 스티로폼과 단단하면서 가벼운 각목을 사각기둥 단면 형상 모델의 벽과 뼈대로 사용하였다. 모델의 사이즈는 스티로폼의 규격인 $0.9 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ 에 맞춰서 $0.9 \text{ m} \times 0.9 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ (길이×너비×높이)의 크

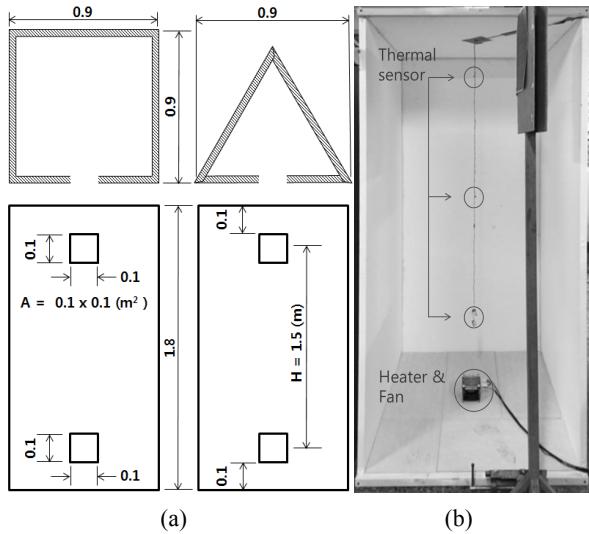


Fig. 1 Box model. (a) Shape and (b) internal thermal sensor and heater and fan.

기로 사각기둥 단면 형상 모델을 제작하였고 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 로 상부와 하부 두 곳에 열고 닫을 수 있는 개구부를 만들었다. 스티로폼의 두께는 3 cm로 충분히 두꺼운 것을 사용하였고, 바닥에는 석고보드를 대어서 실험 진행시 모델과 지면의 접촉으로 인한 열손실을 최소화하였다. 또, 동일한 재료를 이용하여 한 변이 0.9 m인 정삼각형 단면 형상 기둥 모델도 제작하였다. 형상은 Fig. 1(a)와 같다.

3.2 온도제어 방법

온도차 자연환기에 의한 환기량을 측정하여 유량계수를 구하기 위해서는 온도제어가 필요하다. 이를 위하여 밀폐된 공간으로 공기의 흐름으로 인한 외부간섭이 없고, 햇빛의 영향을 받지 않으며, 매우 넓은 공간을 실험장소로 선택하였다. 이 공간은 열용량이 크고 일교차가 매우 적으며 외기 온도가 실험 도중에 변하지 않고 일정하게 유지되어 실험에 적합하다. 내부 온도를 제어하기 위해서는 Fig. 1(b)와 같이 온도제어 장치들을 설치하였다. 히터의 용량은 손 계산을 수행한 결과 435 W의 열손실이 예상되어 이보다 큰 용량인 600 W의 히터를 사용하였고, 온도센서를 모델 내부의 상단, 중앙, 하부에 설치하여 세 곳에서 내부 온도를 측정하였다. 온도센서는 LM35DZ로 작동온도가 $-55^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 이고 오차는 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 실험의 온도범위에서 사용하기 적합하다. Fig. 2는 작동중인 아두이노의 사진이다. 박스 안의 세 개의 온도센서가 내부 온도를 측정하면 아두이노는 온도 데이터를 읽어 들여 평균값을 내며, 측정한 내부온도의 평균 값은 Current로 화면에 출력된다. 가변저

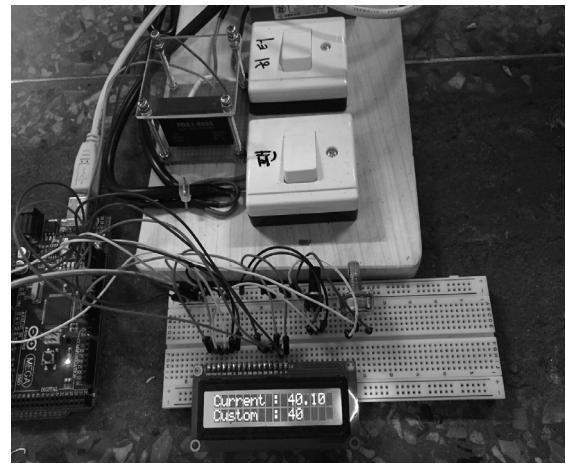


Fig. 2 Arduino controller.

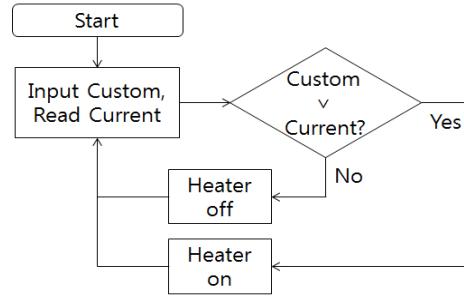


Fig. 3 Controller algorithm.

항을 손으로 돌려 원하는 온도값을 설정할 수 있으며 화면에 Custom으로 출력된다. Fig. 3은 온도 제어 알고리즘으로 Current < Custom일 때 히터의 전원을 키고, Current \geq Custom일 때 히터의 전원이 꺼지도록 하였다. 실험 시작 전에 개구부를 닫고 밀봉된 모델의 내부를 목표온도까지 가열하기 위해서 작은 팬을 가동하여 공기를 골고루 순환시켜 온도구배 없이 고른 온도가 유지되도록 하였다. 팬은 수동으로 제어하였으며, 실험 시작 전에 팬을 끄고 공기의 흐름이 안정된 후에 실험을 진행하였다. 히터와 팬은 고압을 사용하므로 안전을 위해 전원차단기를 장착하였다.

3.3 기체속도 측정방법

개구부에서 유속을 측정하는 방법은 피토튜브, Fan 형 풍속계 등이 있다. 피토튜브는 측정 가능 속도가 10 m/s 이상으로 실험 시 예상되는 유속에 비해 매우 크므로 측정 장비로 부적절하다고 판단되어 배제하였다. Fan 형 풍속계는 개구부에 설치한다면 개구부의 크기에 비해 측정기기가 너무 커서 유속에 영향을 줄 것으로 판단되어 사용하지 않았다. 따라서 본 실험에서

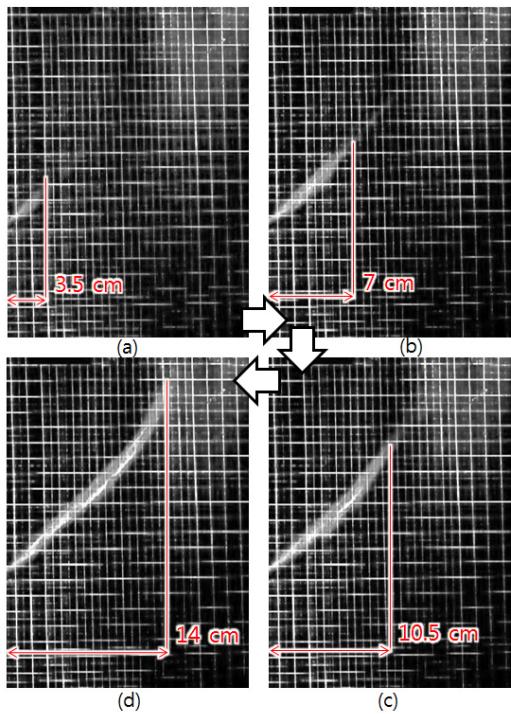


Fig. 4 Trajectory of smoke in grids with time
(a) 0.06 s (b) 0.12 s (c) 0.18 s (d) 0.24 s.

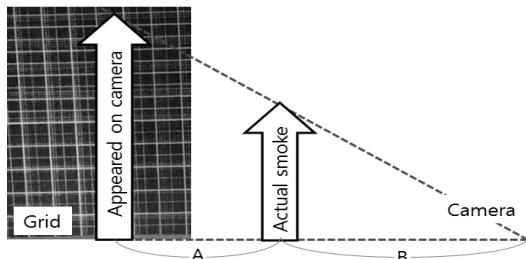


Fig. 5 Velocity error from perspective.

는 모델 내부에 연기를 발생시켜 개구부에서 유출되는 공기의 흐름을 가시화한 후 연기를 동영상으로 촬영하여 분석하였다. 개구부에 수직이 되도록 격자를 설치하여 연기가 이동한 거리를 알 수 있도록 하였고, 실험 공간의 조명을 끈 후 어두운 곳에서 플래시를 이용하여 연기가 카메라에 더 잘 잡히도록 하였다. 연기의 이동을 촬영한 영상은 동영상 편집 프로그램을 통해 30 프레임(0.03초) 단위로 쪼개어 장면 당 연기가 격자를 이동한 거리를 계산하여 속도를 구하였다. Fig. 4는 실제 실험에서 연기의 흐름을 찍은 것이다. 다만, 카메라로 촬영하는 경우 격자와 연기, 카메라가 서로 떨어져 있어서 생기는 원근감으로 인해 연기의 속도에 오차가 발생하여 이를 보정하여야 한다. Fig. 5는 이와 같이 발생하는 오차를 가시적으로 나타낸 것이다. 속도오차

보정방법으로 격자와 연기사이의 거리 A , 연기와 카메라 사이의 거리 B 를 측정하여 속도에 $B/(A+B)$ 를 곱하여 속도를 보정하였다.

4. 실험 결과

4.1 건물 내외부 온도차에 대한 유속

사각기둥 단면 형상 모델 내·외부의 온도차를 올려가면서 실험한 결과 건물 내·외부의 온도차가 클수록 개구부에서의 공기의 속도가 커지는 경향을 보였다. Fig. 6은 실험으로 구한 온도차에 대한 속도와 식(3)에 의한 이론적 속도를 나타낸 그래프이다.

실험을 통해 구해진 유체속도의 정확성을 확인하기 위해 이론의 유체속도와 비교해 보았다. 그 결과 이론적인 속도와 실험으로 얻은 속도의 오차가 10% 내외로 나타나면서 같은 경향을 확인한 후 실험의 값들이 타당하다고 판단하였고 실험으로 구한 속도를 이용하여 유량계수를 도출하여 여러 조건에서 유량계수를 비교하였다.

4.2 건물 내외부 온도차에 대한 유량계수

실험에서 구한 공기속도에 대한 데이터를 이용하여 식(5)과 식(6)을 사용하여 온도차에 따른 유량계수의 값을 구하였다. Fig. 7은 실험으로 얻은 온도차에 대한 유량계수와 이론에 따른 유량계수를 나타낸 그래프이다. 온도차 10 K 이상에서는 유량계수가 Andersen⁽⁶⁾의 이론적인 유량계수인 0.65와 비슷한 결과를 보였지만 5 K와 같은 낮은 온도차에서는 12.6%의 오차로 약간의 차이를 보였다. 유체의 점성과 관련된 유속계수를 구하는 실험을 하였으므로 실험결과의 근거를 확인하기 위해 레이놀즈수를 확인해 보았다. 10 K 이상의 온도차에서는 유체의 내부유동이 $4,000 < Re$ 인 난류구간에 있는 반면 5 K에서 레이놀즈수는 3,192로 층류와

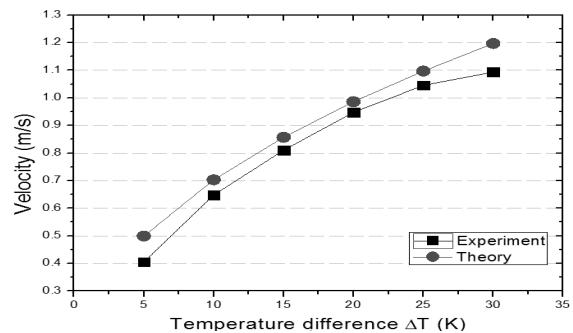


Fig. 6 Velocity with inside and outside temperature difference.

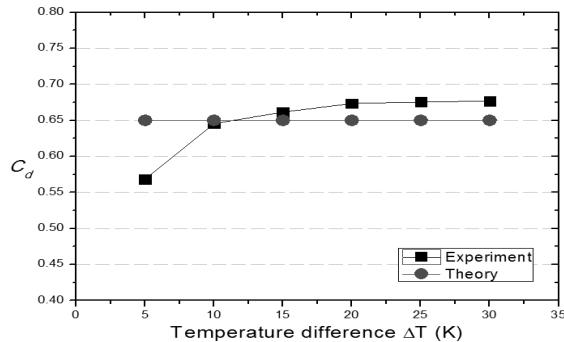


Fig. 7 Discharge coefficient with inside and outside temperature difference.

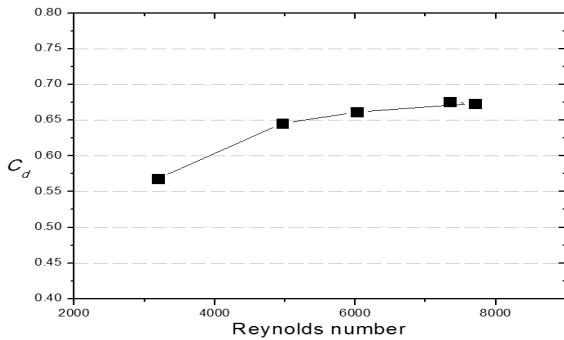


Fig. 8 Discharge coefficient with reynolds number.

난류 사이의 비교적 불안정한 천이영역에 있다. 천이영역에 있는 유체는 점성이 더 크므로 유체의 속도가 이론보다 작게 나타나는 것으로 추론된다. Fig. 8은 앞에서 구한 유량계수를 레이놀즈수에 대해 나타낸 그래프이다.

Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 이론적으로 제시되는 유량계수 0.65와 실험 유량계수와의 차이가 크지 않으므로 실무 현장에서 온도차 자연환기량을 구할 때 이론적 유량계수 0.65를 이용하여도 무리가 없을 것으로 생각된다. 그러나 건물설계 시 고려해야 할 온도차가 10 K 이하일 경우에는 이론적 유량계수보다 약간 작은 0.60을 사용하는 것을 추천한다.

4.3 개구부 면적에 따른 유량계수

사각기둥 단면 형상 모델에서 위·아래 개구부의 면적을 변화시켜가면서 실험을 진행하여 온도차에 따른 유량계수의 차이를 보았다. Fig. 9는 실험으로 얻은 개구부 면적에 대한 유량계수의 그래프이다. 개구부 면적에 대한 유량계수의 차이는 2.2% 이하로 개구부 면적은 유량계수에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 확인되었다.

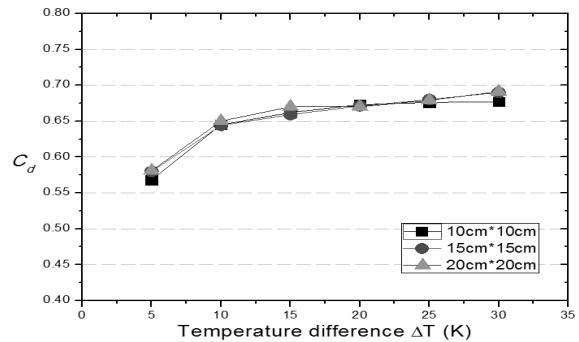


Fig. 9 Discharge coefficient with area of the openings.

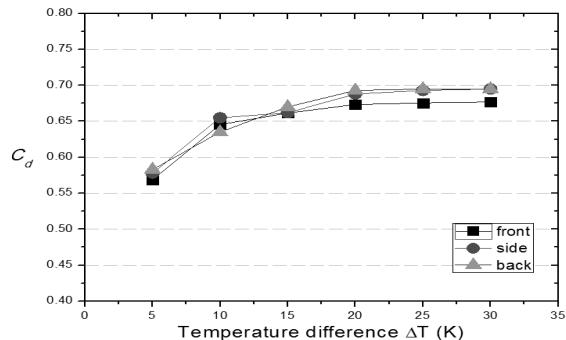


Fig. 10 Discharge coefficient with position of the opening.

4.4 개구부의 위치에 대한 유량계수

사각기둥 단면 형상 모델에서 위·아래 개구부의 위치를 변화시켜가면서 실험을 진행하여 온도차에 따른 유량계수의 차이를 살펴보았다. Fig. 10은 실험으로 얻은 개구부 위치에 대한 유량계수의 그래프이다. 개구부 위치에 대한 유량계수의 차이는 3.1% 이하로 개구부 면적은 유량계수에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 확인되었다.

4.5 모델의 단면 형상에 따른 유량계수

사각기둥 단면 형상 모델 외에 삼각기둥 단면 형상의 모델에 대해서 앞에서와 같은 실험을 진행하여 비교를 해보았다. Fig. 11은 건물의 단면 형상에 대한 실험으로 얻은 온도차에 대한 유량계수의 그래프이다. 건물 단면 형상에 따른 유량계수의 최대의 차는 11.0%까지 나타났다. Andersen⁽⁶⁾에서의 이론적인 유량계수는 건물의 단면 형상에 영향을 받지 않지만, 실험 결과 삼각기둥 형태의 유량계수가 Andersen⁽⁶⁾에서의 이론적인 유량계수보다 약간 작게 나왔다. 즉 삼각형 단

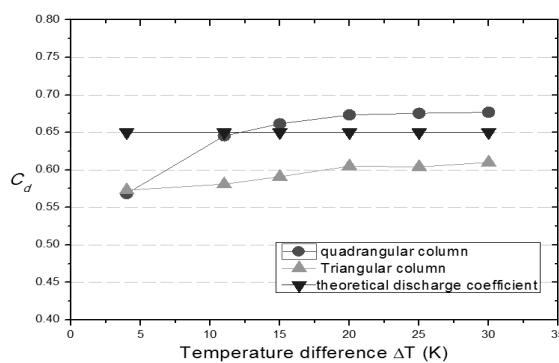


Fig. 11 Discharge coefficient with shape of a model.

면인 경우에는 전체적으로 유량계수가 작으므로 앞에서 제시한 바와 같이 이론적 유량계수 0.65를 사용하거나 약간 작은 0.60을 사용하면 무리가 없을 것 같다.

5. 결 론

본 연구에서는 기동형 축소 모델에 대한 실험을 통하여 온도 차이, 개구부 면적, 개구부 위치, 모델 단면의 변화가 유량계수에 미치는 영향을 살펴보았다. 모델 내외부 온도차에 따른 개구부에서의 기체속도를 측정하고 이를 통하여 유량계수를 구하여 이론값과 비교하였다. 일정한 상수인 이론 유량계수와 달리 실험 유량계수는 온도차에 따라 일정하지 않았으며 가장 큰 차이가 내외부 온도차 5 K에서 12.6%이었다. 낮은 온도차에서 유량계수의 이론값과 차이가 큰 것은 개구부에서 유동형태가 변화하기 때문이라고 생각된다.

개구부 면적과 개구부 위치의 변화에 따른 유량계수의 차이는 3.1% 미만으로 유량계수는 개구부 면적과 위치의 변화에 영향을 받지 않았다.

모델 단면 형상 변화 실험에서 삼각기둥 단면 형상일 때 유량계수는 사각형 단면 형상인 경우와 약간의 차이를 보였다. 이러한 결과는 모델의 단면 형상 및 부피의 변화가 요인으로 보인다.

마지막으로 이론적으로 제시되는 유량계수와 실험 유량계수의 차이가 크지 않으므로, 실무 현장에서 온도차 자연환기량을 구할 때 이론적 유량계수 값을 이용하여도 무리가 없을 것으로 생각된다. 그러나 10 K 이하이거나 단면형상이 삼각형인 경우에는 이론적 유량계수보다 약 10% 작은 0.60을 사용하는 것을 추천한다.

References

- Chen, Q., 2009, Ventilation Performance Prediction for Buildings : A method Overview and Recent Applications, Building and Environment, Vol. 1, No. 44, pp. 848-858.
- Kim, Y. A., 2013, Now, green construction period., <https://jnhkbs.co.kr/?m=bbs&bid=envnews8&uid=252917>, Environment daily.
- Architectural Institute of Japan, 2011, To see, use and learn Environmental Architecture, Vol. 9, pp. 102-109.
- Wilson, D. J. and Kiel, D. E., 1990, Gravity driven counterflow through an open door in a sealed room. Building and Environment, Vol. 25, No. 4, pp. 379-388.
- Favarolo, P. A. and Manz, H., 2005, Temperature driven single sided ventilation through a large rectangular opening, Building and Environment, Vol. 40, pp. 689-699.
- Andersen, K. T., 2003, Theory for natural ventilation by thermal buoyancy in one zone with uniform temperature. Building and Environment, Vol. 38, pp. 281-289.
- American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers, 2011, ASHRAE Fundamentals Handbook, Atlanta, GA.
- Karava, P., Stahopoulos, T., and Athienitis, A. K., 2004, Wind Driven Flow through Openings-A Review of Discharge Coefficients, Int Journal of Ventilation, Vol. 3, No. 3, pp. 255-266.