

주기적인 외부 압력변동에 의한 자연환기성능 연구

이 승 연, 엄 철 민, 한 화 택*

국민대학교 대학원, *국민대학교 기계·자동차공학부

A Study on Natural Ventilation Performance by Periodic Outdoor Pressure Fluctuations

Seung-Yeon Lee, Chol-Min Yom, H. Han*

ABSTRACT: This paper investigates the effects of outdoor pressure fluctuations on natural ventilation through openings of a building envelope. The ventilation airflow rate depends on the magnitude and the period of the pressure fluctuations, the size of the opening compared to the space volume, and the resistance characteristics of the opening. Non-dimensional parameters have been derived, which determine indoor pressure responses due to outdoor pressure fluctuations. The flow regions are categorized into synchronized region, opening resistance region, and transition region depending on the non-dimensional parameters.

Key words: Ventilation(환기), Pressure Fluctuation(압력변동), Natural Ventilation(자연 환기), Period(주기), Opening(개구부)

기 호 설 명

| | |
|------------|--------------------------------|
| A | : 개구부 면적 [m^2] |
| C_d | : 개구부의 유량계수 |
| K | : 유량 비례상수 [$m^3/s \cdot Pa$] |
| m | : 압력 점근선의 비례상수 |
| P | : 압력 [Pa] |
| P_∞ | : 대기압 [Pa] |
| Q | : 유량 [m^3/s] |
| T | : 주기 [sec] |
| t | : 시간 [sec] |
| V | : 실 체적 [m^3] |
| ρ | : 공기밀도 [kg/m^3] |
| θ | : 위상차 |
| γ | : 등엔트로피 지수 |
| τ | : 무차원 시간 |
| ϕ | : 무차원 압력 |
| ψ | : 무차원 유량 |
| ω | : 압력주기의 각속도 [rad/s] |

하첨자

| | |
|------|------------|
| e | : 실외 |
| i | : 실내 |
| max | : 최대값 |
| 1, 2 | : 개구부 1, 2 |

1. 서 론

창문이나 문 틈새를 통한 자연환기는 실내외 온도차로 인하여 건물 내 부력효과가 생기는 연돌효과와 건물 주변에 형성되는 복잡한 기류 분포에 의하여 압력차가 생기는 풍압효과에 의하는 것으로 알려져 있다. 이에 추가하여 외부의 압력변동에 의하여 틈새를 통한 공기의 유출입이 발생하면 실내외의 공기가 교환되는 환기 효과가 있다. 정상상태의 관점에서 보면 평균 환기량은 영이기 때문에 환기가 되지 않는 것으로 가정된다. 이러한 섭동성분에 의한 환기방식에 대한 연구는 그리 많지 않다. 관련된 연구 내용들을 살펴보면 실내 단일 개구부에 의한 환기 연구는 1971년 Malinowski⁽¹⁾의 실험을 토대로 이루어지

* Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4687; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: hhan@Kookmin.ac.kr

고 있다. 이 실험은 모델의 개구부의 벽체와 평행한 바람을 통해 실내의 환기 효과를 설명했다. 이 실험은 풍속 변화, 난류 강도의 변화와 함께 다양한 벽 두께에 의한 효과도 실험했지만 외부 유동의 난류 흐름에 대한 시도는 없었다. 이와 유사한 실험을 1974년 Harris-Bass⁽²⁾등도 수행하였다. 1976년 Cockcroft와 Robertson⁽³⁾등과 1977년 Warren⁽⁴⁾은 개구부와 각도를 가지고 일정한 주파수를 갖는 바람을 불어 실내의 환기효율을 측정했다. 이 실험은 난류의 강도와 개구부 면적 그리고 입구와 바람이 이루는 각도에 대하여 각각 두 가지씩에 대하여 실험했으나 진동하는 환기에 대해서는 낮은 주파수 일 때의 효과를 비교할 수 없었고 나타낼 수 있는 주파수에서의 결과는 환기량은 개구부의 면적과 실 체적에 의존함을 보였다. Warren의 실험에서 환기량은 대략적으로 Ur^3 에 비례함을 보였다. 이러한 연구와 더불어 1978년 Card⁽⁵⁾등에 의하여 압력 평균값이 0이 되는 정현파 형태로 실내에 가압하여 실내와 실외의 압차에 의해 발생하는 환기량 측정 방법을 AC 가압법으로 제안하였다. 1995년 Jean⁽⁶⁾등은 넓은 개구부 통해 실내에 공급되는 신선외기량을 계산할 수 있는 여러 가지 모델들을 제시하였다. 2000년 Etheridge⁽⁷⁾등은 다양한 실내 형태에 따라서 환기에 영향을 미치는 변수들을 분석하여 설계 시 필요한 요소들의 범위를 제시하였다.

본 연구에서는 하나의 개구부가 존재하는 밀폐된 실내공간에서 외부 압력의 주기적인 변동에 의하여 발생하는 공기의 유출입과 실내의 압력변동에 관한 단순화된 지배방정식을 유도하고, 이러한 환기현상을 지배하는 무차원 변수에 대한 이론적 고찰을 하고자 한다. 또한 주어진 실체적에 대하여 외부 압력의 주기와 크기 그리고 입구의 면적에 변화를 주었을 때 실내 압력의 변화를 수치해석하여 틈새를 통한 섭동성분에 의한 환기의 특징에 관하여 고찰하고자 한다.

2. 이론 연구

2.1 지배방정식

실내의 압력변동은 실내외의 압력차에 의한 틈새를 통한 공기의 유출입에 의한다. 이 때 실내

의 밀도의 변화량과 압력의 변화량은 절대 평균값에 비하여 매우 작다고 가정하고 등엔트로피 과정으로 간주한다. 또한 실내의 압력 평균값은 실외의 압력 평균값과 같고 이상기체 방정식에 의하여 실내 밀도변화는 시간당 유출입 유량에 비례한다고 가정한다. 실내로 유입되는 유량과 실내 압력변화는 다음과 같은 식으로 유도된다.

$$Q(t) = \frac{1}{P_\infty} \frac{V}{\gamma} \frac{dP_i}{dt} \quad (1)$$

개구부를 통한 압력손실은 유량의 일정한 지수에 비례하는 것으로 나타나며 일반적으로 다음과 같은 비선형식으로 표현된다.

$$Q(t) = C_d A_L \sqrt{\frac{2\Delta P(t)}{\rho}} \quad (2)$$

외부 압력 P_e 는 sin형태의 주기성을 갖는다고 하고, 식(1)과 식(2)을 연립하여 정리하면 다음과 같이 무차원화된 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\rho P_{e \max}}{2} \left(\frac{V}{P_\infty \gamma C_d A_L} \right)^2 \left(\frac{d\phi}{d\tau} \right)^2 + \phi = \sin \tau \quad (3)$$

여기서 Φ 는 무차원화된 실내압력 ($\Phi = \frac{P_i}{P_{e \max}}$)

이고, τ 는 무차원 시간($\tau = \omega t = \frac{2\pi t}{T}$)이다. 이 수식에서 유일한 무차원변수는 $H = \frac{\gamma P_\infty C_d A_L}{\omega V} \sqrt{\frac{2}{\rho P_{e \max}}}$ 로서 유입되는 공기량과 실체적의 비 또는 압축 저항에 대한 틈새유동저항으로 이해될 수 있다.

개구부를 통한 유량과 실내의 압력차의 관계를 선형적으로 가정할 수 있는 경우에는, 비례상수 K 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q(t) = K \Delta P(t) \quad (4)$$

개구부를 통한 유량은 비선형적으로 가정했을 경우와 마찬가지로 정리하면 다음과 같이 무차원화된 지배방정식을 얻는다.

$$\frac{V}{\gamma} \frac{1}{P_\infty} \frac{\omega}{K} \frac{d\phi}{d\tau} + \phi = \sin \tau \quad (5)$$

이 경우에는 미분방정식이 선형적이므로 그 해를 쉽게 구할 수 있다.

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin(\tau - \theta) \quad (6)$$

위 식은 1차 미분방정식의 sin함수로 입력이 주어지는 형태로서 RC 전기회로에 나타나는 해석결과와 동일하고 해는 $\frac{\gamma P_{\infty} K}{\omega V}$ 에 의존한다.

Fig. 1은 환기모델을 간단한 전기회로에 비교하여 그린 것으로 $\frac{\gamma P_{\infty} K}{\omega V}$ 에서 $\frac{1}{K}$ 이 틸새의 유도 저항 역할을 하는 R에 해당하고, $\frac{\gamma P_{\infty}}{\omega V}$ 는 실내로 유입되는 체적으로 회로에서 C에 해당한다.

밀폐된 공간에 두 개의 개구부가 존재하는 경우로 이를 연장하면 유사한 관계식을 얻는다. 이때 외부압력은 각 개구부에 대해 P_{e1} 과 P_{e2} 가 존재하며 P_{e1} 는 sin형태의 주기를 가지고 변화하고 P_{e2} 는 0이라고 가정하여 정리하면 아래 식과 같이 된다.

$$\frac{V}{\gamma} \frac{1}{P_{\infty}} \frac{\omega}{K_1 A_1} \frac{d\phi}{d\tau} + \left(1 + \frac{K_2 A_2}{K_1 A_1}\right) \phi = \sin\tau \quad (7)$$

이때 해는 무차원변수 $\alpha = \frac{\gamma P_{\infty} K_1 A_1}{\omega V}$ 에 추가하여 두 개의 개구부 유도저항의 비 $\beta = \frac{K_2 A_2}{K_1 A_1}$ 에 의존한다.

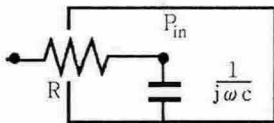


Fig. 1 The equivalent circuit for the modeling of ventilation induced by pressure fluctuations.

2.2. 해석 방법

비선형인 경우에 대한 이론해를 구하기 위하여 Runge-Kutta method를 이용하여 수치해석 하였다. 수치해석에서 시간 증분을 결정함에 있어 기준을 찾기 위해 시간 증분에 대하여 비교하여 보았다. $dt=0.01$ 로 하였을 경우와 $dt=0.001$ 로 하였을 경우의 실내압의 최대값을 비교해 보면 소수점

세 번째 자리수의 값의 오차가 0.013%로 분석을 하기에 오차의 크기가 크지 않다고 생각하여 시간증분을 0.01로 하였다.

주기가 5회 이상 계산이 반복된 후부터 실내압 최대값이 일정한 값을 보여 주기가 5회 이상 반복되어 안정화된 값을 이론 분석에 사용하였다. 설정한 모델의 크기 $4m \times 4m \times 2.4m$ 인 실에 대하여 개구부가 하나인 경우에 대하여 무차원 변수 H의 변화에 따른 영향에 대하여, 개구부가 2개인 경우에 대해서는 무차원 변수 α 와 β 의 변화에 따른 영향을 고찰하였다.

3. 해석 결과

개구부가 하나인 경우에 대한 결과는 Fig. 2에서부터 Fig. 6의 그래프에 나타난다. Fig. 2는 무차원 실내압력 Φ 를 무차원 시간 τ 에 따라 나타낸 것으로 주기가 5번 이상 반복된 이후에 그래프의 형태가 안정화된 모습을 보인다. H값이 10일 때의 경우에 비해서 0.1과 1의 경우는 위상차가 발생하여 주기가 뒤로 이동한 모습을 보인다. 또한 H값이 작을수록 실내의 압력변동폭이 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 무차원 변수 H에 따른 실내압력 변동폭을 살펴보기 위한 것으로 $P_{i\max}$ 와 $P_{e\max}$ 의 비인 Φ_{\max} 를 무차원 변수 H에 대하여 선형식과 비선형식으로 비교하여 보여주고 있다. 그래프에서 H값이 0.1보다 작은 구간은 체적에 비하여 틸새의 면적이 작기 때문에 실외압의 변화가 실내의 압력에는 크게 영향을 끼치지 못하는 상태로 틸새의 저항이 크게 작용하는 영역이므로 틸새저항영역(Opening resistance region)이라 할 수 있으며, H값이 5보다 큰 구간에서는 구멍의 크기도 충분히 커져 실외압의 압력변화가 실내로 전달이 쉽게 이루어져 실외압과 실내압이 동기화 되어 실외압의 변화에 따라 실내압이 같은 형태로 변화하는 상태이므로 이 영역을 동기화영역(Synchronized region)이라고 할 수 있다. 틸새저항영역과 동기화영역의 중간부분은 천이영역(Transition region)으로 간주할 수 있다.

H값이 커질수록 무차원 압력비 Φ 가 1에 접근하고, H값이 0.1이하로 매우 작은 경우에는 $\Phi = aH$ 의 점근선을 갖는다.

Fig. 4는 무차원 변수 H가 변화함에 따른 무차

원 압력 Φ 의 위상차 θ_p 를 나타낸 것으로 H값이 작은 경우에 주기의 위상이 90° 만큼 뒤로 이동한 것을 알 수 있고 H값이 0.1에서 5사이의 천이 영역 구간에서 위상차가 급격히 감소하여 동기화 영역으로 가면 위상차가 거의 발생하지 않는다.

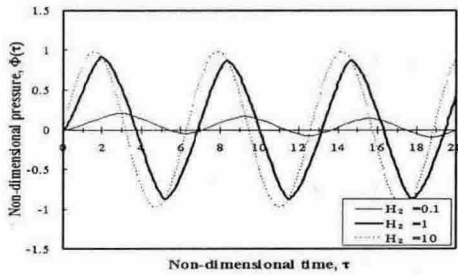


Fig. 2 $\Phi(\tau)$ as a function of τ for various H.

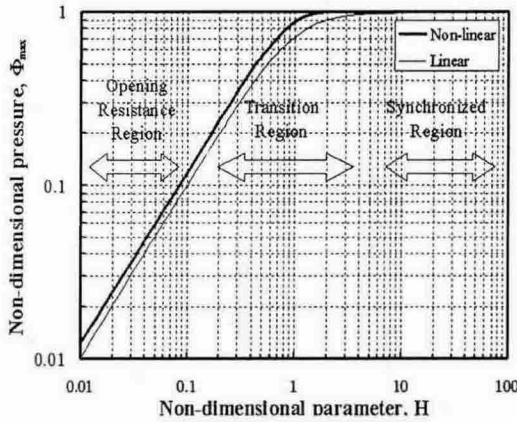


Fig. 3 Φ_{max} as a function of H for linear and non-linear cases.

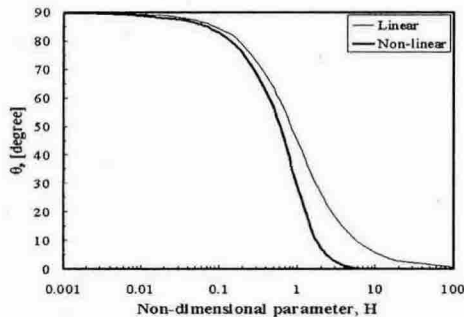


Fig. 4 Pressure phase shift θ_p as a function of H for linear and non-linear cases.

해석된 실내의 압력변화로부터 틈새를 통한 유량을 계산할 수 있다. Fig. 5는 유량 $Q(\tau)$ 를 $C_d A \sqrt{\frac{2P_{e,max}}{\rho}}$ 로 무차원화한 유량 $\Psi(\tau)$ 를 보인다. 틈새저항 곡선이 비선형이기 때문에 선형일 때 예상되는 정현파 형태와 다른 형태로 나타난다. H값이 증가할수록 유량의 최대값이 작게 나타나는데 이것은 실내의 압력이 동기화되어 유출입 유량이 감소하기 때문이다. 또한 H값이 커질수록 위상이 앞으로 이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 무차원 변수 H에 따른 유량의 최대값을 보이고 있다. H값이 0.1이하로 매우 작아지면 무차원 유량은 1에 가까워지는데 틈새구멍이 상대적으로 작아 실외압의 변화에 실내압이 영향을 거의 받지 않는 상태로 실내압의 변화 ΔP_i 가 0일 때와 같은 형태를 보인다. H값이 커지면 실외압과 실내압의 변화가 거의 동시에 일어나므로 실내로 유입되는 유량과 실외로 배출되는 유량의 비로 무차원화 되어진 유량은 감소하는 모습을 보이게 된다.

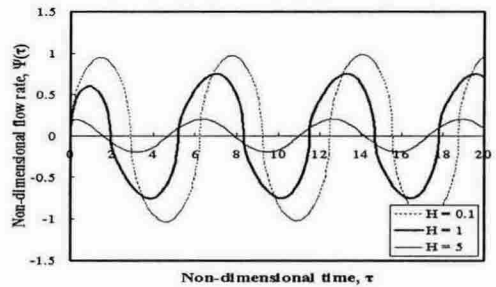


Fig. 5 $\Psi(\tau)$ as a function of τ for various H.

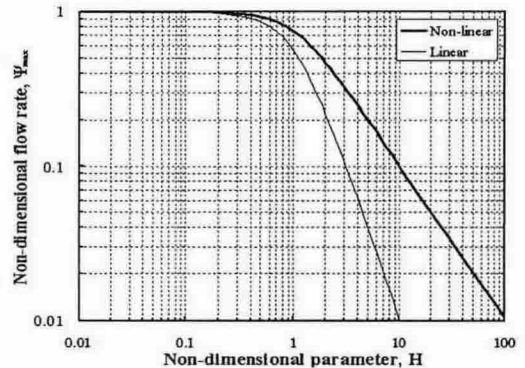


Fig. 6 Ψ_{max} as a function of H for linear and non-linear cases.

개구부가 두 개 존재하는 경우에 대한 결과는 Fig. 7부터 Fig. 11의 그래프에 나타난다. Fig. 7은 무차원 압력 변동과 무차원 변수 α 에 대한 관계를 보인다. 이때 개구부의 비를 나타내는 무차원 변수 β 를 변화시키면서 비교하였다. β 가 영일 때는 하나의 틈새구멍이 존재하는 경우이며 β 가 1일 때는 두 개의 틈새구멍이 동일한 크기를 갖는 경우이다. 앞의 Fig. 3과 같이 틈새저항 영역과 동기화영역, 천이영역으로 나눌 수 있고, 2개의 개구부의 비를 나타내는 β 가 클수록 틈새저항영역(Opening resistance region)에 대한 영향이 나타나는 구간은 짧게 나타나고 동기화영역(Synchronized region)이 길게 나타난다. 그리고 Φ_{max} 의 값은 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 α 가 증가 할수록 A_1 의 크기가 증가하고 β 가 증가 할수록 A_2 의 크기가 증가 하므로 결국 2개의 개구부의 크기가 충분히 커져 동기화가 빨리 이루어지게 된다.

Fig. 8은 무차원 변수 α 와 β 가 변화될 때에 따른 무차원 압력 Φ 의 위상차 θ_p 을 나타낸 것으로 Fig. 4와 같이 α 에 증가함에 따라 위상변화가 작아지고 동기화 영역에 가면 위상차가 발생하지 않게 되는 경향이 나타나고 β 가 증가 할수록 위상차가 발생하는 구간이 짧고 동기화가 되어 위상차가 발생하지 않는 구간이 길게 되는 것을 알 수 있다.

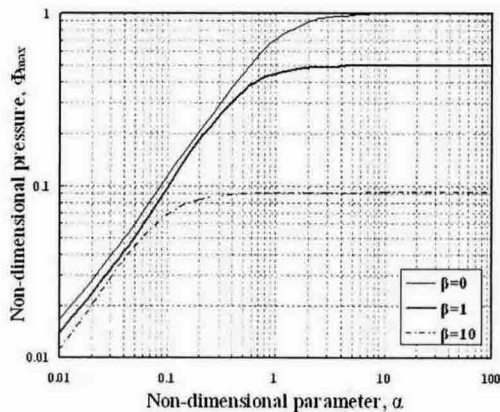


Fig. 7 Φ_{max} as a function of α for two-opening linear cases.

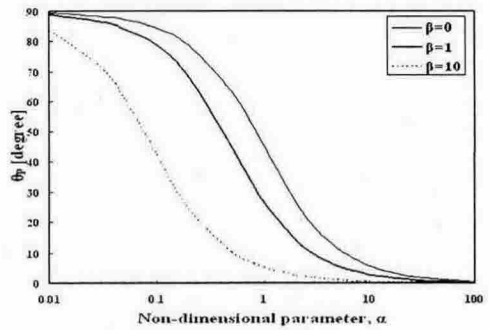


Fig. 8 Pressure phase shift θ_p as a function of α for two-opening linear cases.

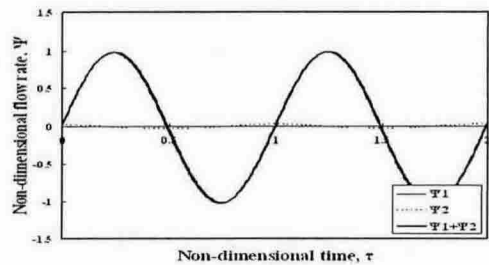


Fig. 9 $\Psi(\tau)$ as a function of τ for $\alpha=0.03$.

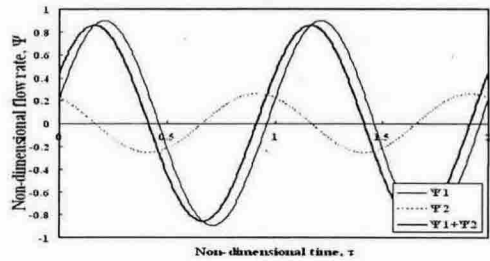


Fig. 10 $\Psi(\tau)$ as a function of τ for $\alpha=0.3$.

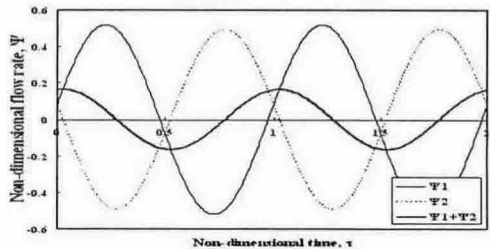


Fig. 11 $\Psi(\tau)$ as a function of τ for $\alpha=3$.

Fig. 9, 10, 11는 2개의 개구부가 같은 크기를 가지고 있다고 가정하여 $\beta=1$ 이라고 놓고 무차원 유량 $\Psi(\tau)$ 를 무차원 시간 τ 에 대하여 표현한 것으로 완전한 sine파 형태를 보인다. 여기서 $\Psi(\tau)$ 는 유량 $Q(\tau)$ 를 $KP_{c,max}$ 로 무차원화 한 것이다. Fig. 9는 틈새저항영역으로 A_1 을 통하여 들어오는 $\Psi_1(\tau)$ 의 영향만 있고 $\Psi_2(\tau)$ 는 거의 유동이 없다. Fig. 10은 천이영역으로 $\Psi_1(\tau)$ 과 $\Psi_2(\tau)$ 의 위상차가 90° 정도 발생하고 $\Psi_1(\tau)$ 의 1/4만큼 $\Psi_2(\tau)$ 로 빠져나가는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 동기화 영역으로 $\Psi_1(\tau)$ 로 들어온 만큼 $\Psi_2(\tau)$ 로 나가는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 한쪽은 압력이 주기적으로 변화하고 다른 쪽은 압력변화가 없는 두개의 틈새구멍을 통하여 절반씩의 동일한 영향을 받으며 양쪽으로의 유량의 크기는 동일하고 방향은 반대이다.

4. 결론

실외압의 주기적인 변동으로 인하여 개구부를 통하여 발생하는 환기 효과를 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 개구부의 유동저항을 선형 또는 비선형으로 가정하여 지배방정식을 유도하고 무차원 변수를 도출하였다. Runge-Kutta 4계 공식을 이용하여 시간에 따른 압력변동과 환기풍량을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 섭동에 의한 자연환기 현상은 도출된 무차원 지배 변수의 범위에 따라서 동기화영역, 틈새저항영역, 천이영역의 3가지 영역으로 구분할 수 있다.

(2) 무차원 변수 H (비선형의 경우) 또는 α (선형의 경우)가 5이상으로 매우 큰 경우는 실외의 압력변동이 실내에 그대로 영향을 미치는 동기화영역으로 실내의 압력비가 $\phi=1$ 에 접근한다. H 또는 α 가 0.1이하의 매우 작은 경우에는 틈새의 저항이 실내 압력변동을 지배하는 틈새저항영역으로 $\phi=mH$ 의 점근선을 갖는다. 틈새의 압력-풍량 관계가 선형인 경우에는 $m=1$ 이고, 비선형의 경우에는 $m=1.198$ 의 값을 갖는다.

(3) 무차원 변수 H 또는 α 값이 작은 틈새저항영역에서는 실외압이 변화에 실내압이 영향을 거의 받지 않는 상태로 유량 Ψ 가 1에 접근한다.

(4) 개구부가 2개인 경우에는 개구부 유동저항의 비 β 가 커질수록 틈새저항영역과 동기화영역을 구분하는 천이영역이 낮은 α 에서 나타난다.

참고문헌

1. H. K. Malinowski, Wind effect on the air movement inside buildings. Proc. 3rd Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, pp. 125-134. (1971)
2. J. Harris-Bass, B. Kavarana & P. Lawrence, Advertisements ventilation of houses. Proc. Symp. on Ventilation of Housing, Reserch by British Gas, Paper 2. (1974)
3. J. P. Cockcroft, P. Robertson Ventilation of an enclosure through a single opening. Building Environment, 11(1), pp. 29-35. (1976)
4. P. P. Warren, Ventilation through openings on one wall only. Int. Cong. on Heat and Mass Transfer in Buildings, Dubrovnik, Yugoslavia. In : Energy Conservation in Heating, Cooling and Ventilating Buildings, Vol 1, des. C. J. Hoogendoorn and N. H. Afgar, pp. 189-209. Hemisphere, Washington, DC. (1977)
5. W. H. Card, A. Sallman, R. W. Graham, and E. E. Drucker, Air leakage measurement of buildings by an infrasonic method. Syracuse University, Technical Report TR-78-1. (1978)
6. Jean-Marie Fürbringer, Jacobus Van Der Maas, Suitable algorithms for calculation air renewal rate by pulsation air flow through a single large opening. Building and Environment, 30, pp.493-503. (1995)
7. David Etheridge, Unsteady flow effects due to fluctuation wind pressures in natural ventilation design-instantaneous flow rates. Building and Environment, 35, pp. 321-337. (2000)