

## 개구부를 통한 외부압력 변동에 의한 난류환기 모델링

한 화택<sup>†</sup>, 엄철민<sup>\*</sup>

국민대학교 기계자동차공학부, \*국민대학교 대학원

### Modeling of Turbulent Ventilation through an Opening due to Outdoor Pressure Fluctuations

Hwataik Han<sup>†</sup>, Chol-Min Yom<sup>\*</sup>

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

(Received October 7, 2007; revision received December 5, 2007)

**ABSTRACT:** This paper investigates the effects of outdoor pressure fluctuations on natural ventilation through an opening on a building envelope. The ventilation airflow rate depends on the magnitude and the period of the pressure fluctuations, the size of the opening relative 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 (1) synchronized region, (2) opening resistance region, and (3) transition region depending on the non-dimensional parameter derived. Pressure fluctuations and flow characteristics are investigated numerically using the 4th order Runge-Kutta method.

**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  
 $C$  : RC회로의 커패시턴스 [F]  
 $H$  : 무차원변수  
 $K$  : 유량 비례상수 [ $m^3/s \cdot Pa$ ]  
 $m$  : 압력 점근선의 비례상수  
 $p$  : 계기압력,  $P - P_\infty$  [Pa]  
 $P$  : 절대압력 [Pa]  
 $P_\infty$  : 대기압 [Pa]  
 $\Delta P$  : 실내외 압력차 [Pa]

$q$  : 평균 유효환기량 [ $m^3/s$ ]  
 $Q$  : 순시 유입풍량 [ $m^3/s$ ]  
 $R$  : RC회로의 저항 [ $\Omega$ ]  
 $t$  : 시간 [s]  
 $T$  : 실외 압력변동 주기 [s]  
 $V$  : 실 체적 [ $m^3$ ]

#### 그리스 문자

$\gamma$  : 공기의 비열비,  $c_p/c_v$   
 $\theta_p$  : 위상차 [rad]  
 $\rho$  : 공기의 밀도 [ $kg/m^3$ ]  
 $\tau$  : 무차원 시간  
 $\phi$  : 무차원 압력  
 $\psi$  : 무차원 유량

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

$\omega$  : 압력변동 각속도 [rad/s]

### 하첨자

$e$  : 실외

$i$  : 실내

$max$  : 최대값

$lin$  : 선형해석

## 1. 서 론

건물의 창문이나 개구부를 통한 자연환기는 실내의 온도차로 인하여 발생하는 부력에 의한 연돌효과와 바람에 의하여 건물 주변에 형성되는 복잡한 압력 분포에 의한 풍압효과에 의하는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 정상상태의 연돌효과와 풍압효과에 추가하여 외부 압력의 시간적 변동에 따른 비정상상태의 난류섭동에 의하여 자연환기 효과가 발생한다. 정상상태의 관점에서는 섭동성분에 의한 평균 환기량은 영이기 때문에 환기가 되지 않는 것으로 가정되지만, 외부 압력 변동에 의하여 개구부를 통한 공기의 유출입이 교대로 발생하면 실내외의 공기가 교환되는 환기 효과가 발생한다. 이러한 섭동성분에 의한 환기 특성에 대한 연구는 그리 많지 않다. 관련된 연구 내용들을 살펴보면, 실내 단일 개구부에 의한 환기 연구는 1971년 Malinowski<sup>(1)</sup>의 실험을 토대로 이루어지고 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 et al.<sup>(2)</sup>도 수행한 바 있다. 1976년 Cockcroft와 Robertson et al.<sup>(3)</sup> 1977년 Warren<sup>(4)</sup>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 섭동속도 크기의 세계곱에 비해

함을 보였다. 이러한 연구와 더불어 1978년 Card et al.<sup>(5)</sup>에 의하여 압력 평균값이 0이 되는 정현파 형태로 실내에 가압하여 실내와 실외의 압차에 의해 발생하는 환기량 측정 방법을 교류(alternating current) 가압법으로 제안하였다. 1995년 Fürbringer와 Van Der Maas<sup>(6)</sup>는 넓은 개구부를 통해 실내에 공급되는 신선외기량을 계산할 수 있는 여러 가지 모델들을 제시하였으며, 2000년 Etheridge et al.<sup>(7)</sup>은 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 압력 변동에 관한 단순화된 지배방정식을 유도하고, 이러한 환기현상을 지배하는 무차원 변수에 대하여 이론적으로 고찰하고자 한다.

주어진 실 체적에 대하여 외부 압력의 주기와 크기 그리고 입구의 면적에 변화를 주었을 때 실내 압력의 변화를 수치적으로 해석하여 개구부를 통한 섭동성분에 의한 환기의 특성에 관하여 고찰하고자 한다. 특히 기존의 선형적인 압력-풍량 관계를 비선형적인 관계로 확장하여 해석결과를 상호 비교하고자 한다.

## 2. 이론 연구

### 2.1 지배방정식

Fig. 1과 같이 하나의 개구부를 갖는 실내공간을 고려한다. 개구부를 통한 공기의 유출입은 준정상상태(quasi-steady state)로 가정하여 순시적인 실내외 압력차에 의하여 발생하며, 공기의 유출입에 따라서 실내의 밀도와 압력변동이 발생한다. 이 때 실내의 밀도 변화량과 압력 변화량은 각각의 절대값에 비하여 매우 작다고 가정하면 이 과정을 등엔트로피 과정으로 간주할 수 있다. 또한 연속방정식에 의하여 실내 밀도변화는 시간당 유출입 유량에 비례하므로 실내로 유입되는 유량과 실내 압력변화는 이상기체 방정식으로부터 다음의 식과 같이 유도된다.

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

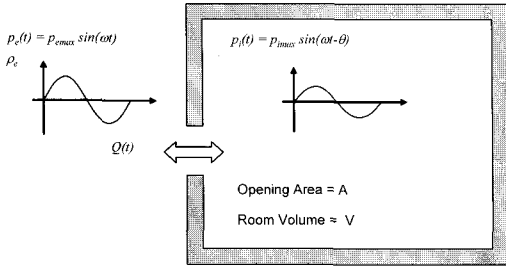


Fig. 1 The ventilation model with a single opening.

개구부를 통한 압력손실은 일반적으로 유량의 일정한 지수에 비례하며 여기서는 다음과 같은 제곱근의 식으로 가정한다.

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

여기서 실내의 압력차  $\Delta P(t) = p_e(t) - p_i(t)$ 이며, 외부 압력  $p_e(t) = p_{e,max} \sin \omega t$  형태로 가정한다.

식(1)과 식(2)를 연립하여 정리하면 식(3)과 같이 무차원화된 지배방정식을 얻을 수 있다. 여기서 유동방향 전환에 따른 틈새 공기의 관성은 무시하고 실내 압력의 평균값과 실외 압력의 평균값은 대기압과 같다고 가정한다.

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

여기서  $\phi$ 는 무차원화된 실내압력( $\phi = p_i/p_{e,max}$ )이고,  $\tau$ 는 무차원 시간( $\tau = \omega t = 2\pi t/T$ )이다. 이 수식에서 주어지는 유일한 무차원변수는  $H$ 로서 유입되는 공기량과 실제적의 비, 또는 압축저항에 대한 개구부 틈새유동저항의 비로 이해할 수 있다.

$$H = \frac{\gamma P_\infty C_d A}{\omega V} \sqrt{\frac{2}{\rho p_{e,max}}} \quad (4)$$

개구부를 통한 압력차와 유량과의 관계를 선형적으로 가정하는 경우에는,  $Q(t) = K \Delta P(t)$ , 지배방정식은 다음과 같이 유도된다.<sup>(8)</sup>

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

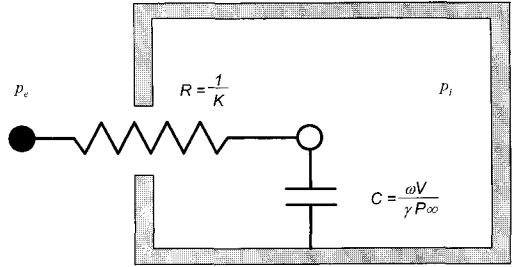


Fig. 2 Equivalent electric circuit for the linear model.

정현과 입력에 대한 선형 1차 미분방정식의 해는 쉽게 구할 수 있으며, Fig. 2의 RC 회로와 상사하다. 이 때의 무차원 변수  $H_{lin} = \frac{\gamma P_\infty K}{\omega V}$ 의 역수는 개구부 틈새저항  $R = \frac{1}{K}$  과 정전용량  $C = \frac{\omega V}{\gamma P_\infty}$ 의 곱이다.

### 2.2 해석 방법

비선형인 경우에 대한 이론해를 구하기 위하여 4계 Runge-Kutta 방법을 이용하여 수치적으로 해석하였다. 해석에 사용된 무차원 시간 증분  $d\tau$ 는 0.01로 하였다. 시간증분을 감소시키면 결과값은 일정한 값에 수렴되는데  $d\tau = 0.01$ 일 때  $d\tau = 0.001$ 일 때와 비교하여 실내압의 최대값에 있어서 0.01% 이하의 차이를 보였다. 또한 해석 초기에 나타나는 정현과 변동에 따른 주기적 불완전성이 소멸되도록 하기 위하여 5회 주기 이상의 충분한 반복 계산 후에 나타나는 안정된 하나의 주기에 대한 결과를 분석에 사용하였다.

설정된 모델의 크기는  $4\text{m} \times 4\text{m} \times 2.4\text{m}$ 로서 실내체적이  $38.4\text{m}^3$ 이고 개구면적이  $0.00422\text{m}^2$ 인 개구부가 하나 존재하는 경우를 기준조건으로 하여 무차원 변수  $H$ 의 변화에 따른 영향을 고찰하였다. 여기서 개구부 유량계수는 1.0으로 가정하였다.

### 3. 결과 분석

무차원 변수  $H$ 에 대하여 시간에 따른 압력변동 결과가 Fig. 3에 보인다. 계산초기로부터 시작하여 주기적 정상상태에 도달하는 과정을 보이고 있다.  $H$ 값이 작을수록 실내의 압력변동폭은 작고, 위상차는 크게 발생하는 모습을 볼 수 있다.

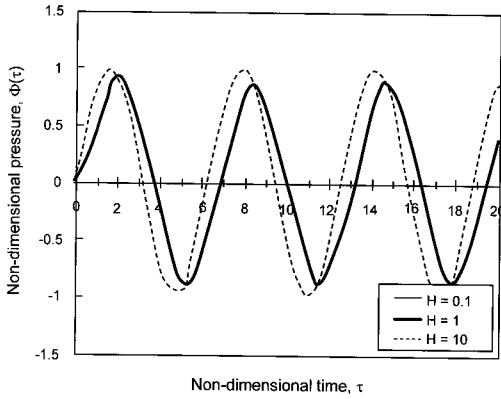


Fig. 3 Non-dimensional pressure variations with respect to time.

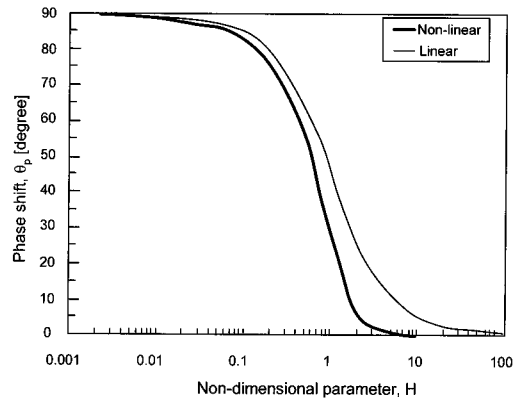


Fig. 5 Phase shift  $\theta_p$  as a function of  $H$ .

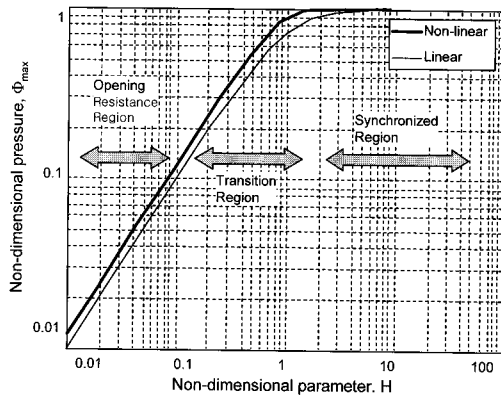


Fig. 4 Non-dimensional pressure magnitude  $\Phi_{max}$  as a function of  $H$ .

Fig. 4는 무차원 변수  $H$ 에 따른 실내압력 변동폭을 살펴보기 위한 것이다.  $y$ 축에 나타난  $\Phi_{max}$ 는  $p_{i,max}$ 와  $p_{e,max}$ 의 비로서 외부 압력변동 진폭에 대한 실내 압력변동 진폭의 비율을 나타낸다. 개구부의 압력-유량특성이 선형인 경우에 대한 결과도 비교하여 보여주고 있다. 그래프에서  $H$ 값의 크기에 따라서 몇 가지 영역으로 나누어진다.  $H$ 가 0.1보다 작은 구간은 실내체적에 비하여 개구면적이 작기 때문에 실외압의 변화가 실내의 압력에 크게 영향을 미치지 못하는 것을 볼 수 있다. 이 영역에서는 실외 압력변동이 상대적으로 짧은 주기로 주어지는 반면 이 때 발생하는 개구부의 풍량이 주로 개구부 틈새의 저항에 의하여 제한을 받는다. 따라서 이 영역을 틈새저항 영역(opening resistance region)이라 할 수 있다.

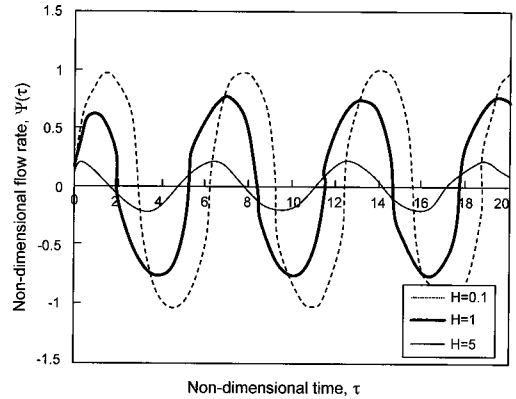


Fig. 6 Non-dimensional flow rate  $\Psi(\tau)$  with respect to time for different  $H$ 's.

반대로  $H$ 값이 큰 구간에서는 개구부의 면적이 충분히 커서 개구부의 틈새유동저항이 크지 않으며, 실외 압력변동 주기가 상대적으로 길어 실외 압력의 변화가 실내로 그대로 전달된다. 이 영역에서는 실내의 압력변동이 서로 동조되므로 동기화영역(synchronized region)이라 할 수 있다. 틈새저항영역과 동기화영역의 중간에  $H$ 값이 대략 0.1와 2.0사이의 영역을 천이영역(transition region)으로 한다.  $H$ 값이 커질수록, 즉 동기화 영역에서는 실내의 압력변동 진폭의 비  $\Phi_{max}$ 가 1에 접근하고,  $H$ 값이 0.1 이하로 작은 경우에는  $\Phi_{max} = mH$ 의 접근선을 갖는다.

Fig. 5는 무차원 변수  $H$ 의 변화에 따른 무차원 압력  $\Phi$ 의 위상차  $\theta_p$ 을 나타낸 것으로 틈새저항 영역에서는 주기의 위상이 90도 후방으로 이동하며,  $H$ 값이 0.1에서 2.0사이의 천이영역 구간에서

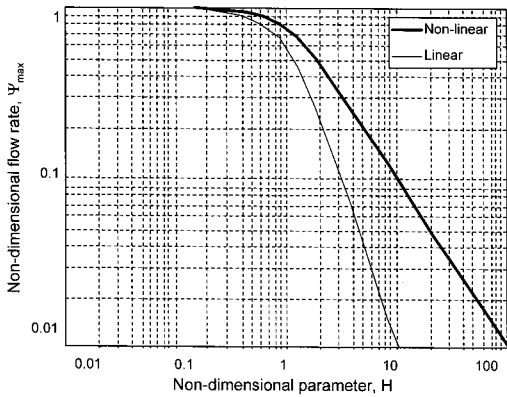


Fig. 7 Non-dimensional flow rate magnitude  $\psi_{max}$  as a function of  $H$ .

위상차가 급격히 감소하여 동기화영역에서는 위상차가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 개구부 특성이 선형적으로 주어졌을 때의 결과가 중첩되어 있다.

해석된 실내압 결과로부터 개구부를 통한 순시 유출입 환기량을 계산할 수 있다. Fig. 6은 시간에 따른 유량  $Q(t)$ 를  $C_d A \sqrt{\frac{2P_{e,max}}{\rho}}$  로 무차원화한 무차원 유량  $\mathcal{U}(\tau)$ 를 보인다. 개구부의 저항곡선이 비선형이기 때문에 선형일 때 나타나는 정현파와 달리 끝이 뾰족한 형태의 그래프로 나타난다.  $H$ 값이 증가할수록 무차원 유량의 변동폭이 작아지는데 이것은 실내외 압력이 상호 동기화되어 유출입 유량이 감소하기 때문이다. 또한  $H$ 값이 증가할수록 위상이 전방으로 이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 무차원 변수  $H$ 에 따른 무차원 유량의 진동폭을 보이고 있다. 틈새저항영역에서  $H$ 값이 0으로 접근할수록 무차원 유량이 1에 접근하는데 개구면적이 상대적으로 작아 실외압의 변화에 실내압이 영향을 거의 받지 않는, 실내압의 변화  $p_{i,max}$ 가 0일 때와 같은 형태를 보인다.  $H$ 값이 2 이상의 동기화영역에서는 실외압과 실내압의 변화가 거의 동시에 일어나므로 실내로 유입되는 유량과 실외로 배출되는 유량의 비로 무차원화된 유량은 감소하는 모습을 보이게 된다.

무차원 압력과 무차원 유량을 통해 고찰한 특성을 보다 현실적으로 이해하기 위하여 실제 변수의 크기들을 사용한 예를 살펴본다. 해석예로 선정한 외부압력조건으로 변동폭은  $p_{emax} = 10 \text{ Pa}$

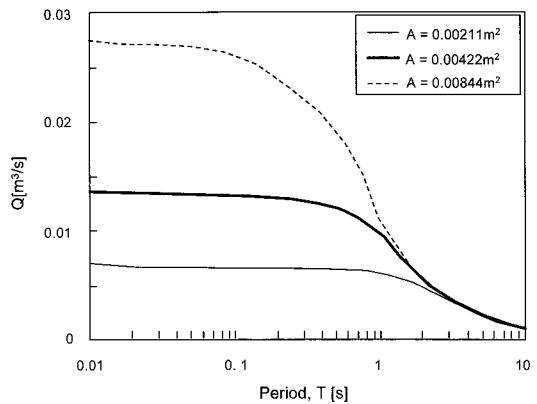


Fig. 8 Average effective ventilation rate  $q$  as a function of period  $T$  for different opening areas ( $V = 38.4\text{m}^3$ ).

이고 대기압  $P_\infty = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 이다. Fig. 8은 세 가지의 개구면적에 대하여 압력 변동주기에 따른 평균 유효환기량의 변화를 보인다. 여기서 평균 유효환기량이란 시간에 따른 순시유량  $Q(t)$ 의 절대값의 시간 평균값을 절반으로 나눈 것으로 식 (6)과 같이 계산된다. 실제 시간당 유출 또는 유입되는 환기량을 의미한다.

$$q = \frac{1}{2T} \int_0^T |Q(t)| dt \quad (6)$$

주기가 증가할수록 평균 유효환기량은 감소하고 있다. 주기가 작은 구간에서는 유효환기량이 거의 일정하다가 서서히 감소하여 주기가 큰 구간에서는 개구면적에 무관하게 하나의 곡선으로 통합되는 것을 볼 수 있다. 이것은 주기가 길면 실내외의 압력변동이 개구면적이나 저항에 관계없이 동일하게 일어나는 동기화영역의 특성 때문이다. 참고로 개구면적이  $0.00422 \text{ m}^2$ 일 때  $H$ 값이 대략 1을 갖는다.

Fig. 9는 세 가지의 실내체적에 대하여 주기에 따른 평균 유효환기량을 보인다. 주기가 길수록 환기량은 급속히 감소한다. 실내체적에 따라 다소 차이는 있으나 유사한 변화 패턴을 보인다.

특히 주기가 매우 짧거나 매우 긴 경우에는 환기량이 실내체적에 거의 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다. 시간당 공기교환율은 환기량을 실내체적으로 나눈 값이므로 결과적으로 실내체적이 큰 경우에는 난류환기에 의한 시간당 공기교환율

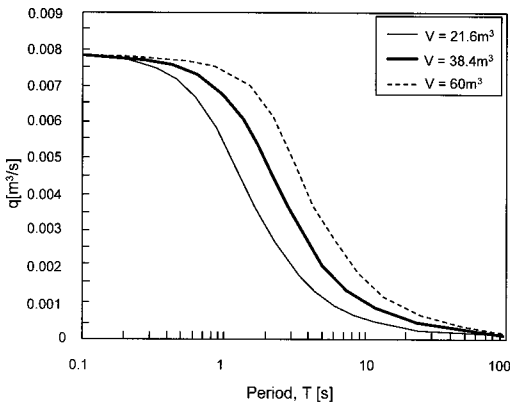


Fig. 9 Average effective ventilation rate  $q$  as a function of period  $T$  for different room volumes ( $A = 0.00422 \text{ m}^2$ ).

에 미치는 영향은 작아진다.

#### 4. 결 론

실외압의 주기적인 변동으로 인하여 개구부를 통하여 발생하는 환기 효과를 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 개구부의 틈새유동저항이 비선형으로 주어졌을 때의 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 3개 영역으로 구분된다.

(2) 무차원 변수  $H$ 가 2이상의 값을 갖는 경우는 실외의 압력변동이 실내에 직접적으로 영향을 미치는 동기화 영역으로 실내외 압력변동이 같은 위상과 같은 진폭으로 일어난다.  $H$ 가 0.1이하의 작은 경우에는 개구부 저항이 실내 압력변동을 지배하는 틈새저항영역으로 실내외 압력변동의 진폭비  $\phi_{max} = 1.198H$ 의 점근선을 갖는다.

(3) 개구부를 통한 무차원 유량의 크기는 틈새저항영역에서 실내압이 실외압의 변화에 영향을 거의 받지 않는 상태로  $\psi_{max}$ 가 1이며 무차원 변수  $H$ 의 증가에 따라서 감소한다.

(4) 순시풍량을 적분하여 구한 평균 유효환기량은 주기가 증가할수록 감소하며 동기화영역에서는 실내체적이나 개구면적에 무관하다. 반면

틈새저항영역에서의 평균 유효환기량은 개구면적에 비례하나 실내체적에는 무관하다.

향후 유출입 풍량에 의한 환기효율에 관한 연구와 실제 바람의 주파수 분석을 통한 난류 환기 효과에 관한 현실적인 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 또한 여러 가지 변수들을 고려할 수 있는 다양한 난류환기 모델에 관한 이론적 연구도 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 2006년도 국민대학교 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

#### 참고문헌

1. Malinowski, H. K., 1971, Wind effect on the air movement inside buildings, Proc. 3rd Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, Japan, pp.125-134.
2. Harris-Bass, J., Kavarana, B. and Lawrence, P., 1974, Adventions ventilation of houses. Proc. Symp. on Ventilation of Housing, Research by British Gas, Paper 2.
3. Cockcroft, J.P. and Robertson, P., 1976, Ventilation of an enclosure through a single opening, Building Environment, Vol. 11, No. 1, pp.29-35.
4. Warren, P. P., 1977, Ventilation through openings on one wall only, int. Congress on heat and mass transfer in buildings, dubrovnik, yugoslavia. In: energy conservation in heating, Cooling and Ventilating Buildings, Vol.1, eds. C. J. Hoogendoorn and N.H. Afgan, Hemisphere, Washington D. C., pp. 189-209.
5. Card, W.H., Sallman, A., Graham, R.W. and Drucker, E. E., 1978, Air leakage measurement of buildings by an infrasonic method, Syracuse University, Technical Report TR-78-1.
6. Fürbringer, J.M. and Van Der Maas, J., 1995, Suitable algorithms for calculation air

- renewal rate by pulsation air flow through a single large opening, *Building and Environment*, Vol. 30, pp. 493-503.
7. Etheridge, D., 2000, Unsteady flow effects due to fluctuation wind pressures in natural ventilation design-instantaneous flow rates, *Building and Environment*, Vol. 35, pp. 321-337.
  8. Etheridge, D. and Sandberg, M., 1996, *Building ventilation: theory and Measurement*, John Wiley & Sons, Chichester.