

실간환기량 측정을 위한 멀티추적가스법의 검증실험

한 화 택[†], 조 석 효^{*}

국민대학교 기계자동차공학부, *국민대학교 기계공학과 대학원

An Experiment on Verification of Multi-Gas Tracer Technique for Air Exchange Rate Between Rooms

Hwataik Han[†], Seok Hyo Cho^{*}

Department of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea
 Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

ABSTRACT: Tracer gas technique is widely used to measure the ventilation rates and/or ventilation effectiveness of building spaces. However, the conventional method using a single tracer gas can measure only outdoor air change rates in a single zone. This paper deals with the multi-gas tracer technique to measure air exchange rates between rooms. Interzonal air movements are important to characterize overall ventilation performance of complicated multi-zone buildings. Experiments are conducted in a simple two-room model with known airflow rates using tracer gases of SF6 and R134a. The concentration decays of two tracer gases are measured after simultaneous injections in each room. The governing equations are derived from the continuity and the mass balance of each room. The data reduction procedure are developed to obtain the inter-room airflow rates using the governing matrix inversion, and various data manipulation methods are tested, such as data shift, interpolation, smoothing, and etc, to improve the estimate and interpretation of the results.

Key words: Air exchange rate (공기교환율), Tracer gas (추적가스), Decay method (감쇠법), Ventilation (환기), Interzonal air movement (실간 공기이동)

기 호 설 명

A_n : 노즐 단면적 [m^2]
 β : 노즐의 수축비
 C : 추적가스 농도 [ppm]
 C_n : 노즐 송출계수
 ΔP : 노즐 압력차 [Pa]

ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]
 Q : 풍량 [CMH]
 t : 시간 [s]
 V : 실 체적 [m^3]

하 첨 자

A : 실 A
 B : 실 B
 E : 외기
 1 : 추적가스 1
 2 : 추적가스 2

[†] Corresponding author

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

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

1. 서론

주거건물이나 다중이용시설 등 대부분의 건축물은 다수의 실로 이루어져 있다. 2006년 건설교통부에서 실내공기질 개선을 위해 ‘건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 일부 개정령안’이 공포되었고 이에 건축물 전체에 대한 환기량을 고려하고 있으나 오염물질이 다수의 실에 존재할 경우 실별로 각각의 필요환기량을 충족시켜야 한다. 그러나 실별로 개별적인 급배기가 이루어지지 않는 경우에는 실과 실 사이의 공기교환에 의하여 실제 실별 환기량이 영향을 받게 된다.

실간의 공기교환은 압력차에 의하여 한쪽 방향으로 지속적으로 일어나는 경우도 있지만 대부분의 경우에는 양 방향으로 서로 교환하는 형태로 나타나게 된다. 실내 오염물질의 확산 및 분포 거동을 파악하고 실내 공기유동의 적정성을 파악하기 위해서 추적가스를 이용한 다양한 환기실험 방법이 개발되어 왔다.

다수실의 실간 환기량 및 침기량을 측정하기 위한 방법에 관한 이론적 기초는 Sinden⁽¹⁾에 의하여 잘 정리되었다. Sherman⁽²⁾은 멀티추적가스를 이용한 환기량 산정시 데이터 평가를 통한 오차분석을 수행하였고, Irwin⁽³⁾은 감쇠법을 이용한 멀티추적가스 실험과 수치미분, 수치적분, 고유치, 세 가지의 이론적인 유동량의 비교 분석하였다. 또한 Nazaroff⁽⁴⁾는 비선형 최소자승법을 이용하여 멀티추적가스법과 고유치를 이용한 이론적인 해에 대한 비교를 하였다. 이외에 단일 추적가스를 이용하여 실간 환기량을 측정하기 위한 방안들도 시도된 바 있다.⁽⁵⁾ 단일 추적가스법으로도 실간 환기량 측정이 가능하나 추적가스를 각 실별로 번갈아 주입하면서 여러 차례 측정하여야 하며 분석결과에 있어서 불확실성이 크게 개입되는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 2개의 단순화된 실로 구성되고 실간의 공기교환량이 제어될 수 있는 실험장치를 이용하여 멀티추적가스 실험을 수행한다. 몇 가지의 다른 형태의 실간 공기교환 패턴에 대하여 결과 데이터의 특성을 분석하고 분석방법에 따라 오차에 미치는 영향을 파악함으로써 멀티추적가스 방법을 정교화하고 공기교환량 결과를 검증하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 실험 모델

본 연구에서 사용된 모델은 Fig. 1과 같다. 각 실(A와 B)과 외부(E)는 서로 공기교환이 이루어지므로 6개의 풍량이 존재한다. 각 실에 각기 다른 추적가스를 분사하여 나타나는 농도변화를 측정하면 실간 공기교환량을 측정할 수 있다.

실내 추적가스 농도변화와 공기교환 풍량과의 관계는 질량 보존법칙과 정상상태의 풍량 밸런스로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} C_1^A(t) &= \frac{1}{V_A} [C_E \times Q_{EA} + C_1^B(t) \times Q_{BA} - C_1^A(t) \times (Q_{AB} + Q_{AE})] \\ \frac{d}{dt} C_2^A(t) &= \frac{1}{V_A} [C_E \times Q_{EA} + C_2^B(t) \times Q_{BA} - C_2^A(t) \times (Q_{AB} + Q_{AE})] \\ \frac{d}{dt} C_1^B(t) &= \frac{1}{V_B} [C_E \times Q_{EB} + C_1^A(t) \times Q_{AB} - C_1^B(t) \times (Q_{BA} + Q_{BE})] \\ \frac{d}{dt} C_2^B(t) &= \frac{1}{V_B} [C_E \times Q_{EB} + C_2^A(t) \times Q_{AB} - C_2^B(t) \times (Q_{BA} + Q_{BE})] \\ Q_{AB} + Q_{AE} &= Q_{BA} + Q_{EA} \\ Q_{AB} + Q_{EB} &= Q_{BA} + Q_{BE} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 첨자 A와 B는 실을 나타내며, 1과 2는 두 개의 추적가스를 나타낸다. 또한 풍량 Q에 붙어 있는 두개의 하첨자는 공기교환이 일어나는 시점과 종점, 즉 방향을 나타낸다. 예를 들어 Q_{AB} 는 실 A에서 B로 이동하는 풍량을, Q_{BA} 는 실 B에서 A로 이동하는 풍량을 의미한다. 윗 식의 이론해는 고유치법을 이용하여 쉽게 구할 수 있다.⁽¹⁾

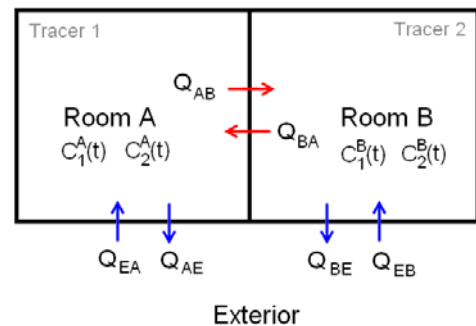


Fig. 1 A model for interzonal air exchange.

2.2 해석방법

실간 공기교환율을 계산하는 방법으로 이론적인 고유치법, 무작위수를 이용한 몬테카를로법, 그리고 수치해석적인 행렬 이용 계산방법이 사용된다. 앞의 지배방정식을 수치해석적인 방법을 써서 행렬 형태로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$[A]\{x\} = \{B\} \quad (2)$$

여기서 각 행렬 $[A]$, $\{x\}$, $\{B\}$ 의 성분은 식(3)과 같다. 행렬 $[A]$ 에는 각 실, 각 추적가스의 농도값이 들어가고 $\{B\}$ 에는 농도변화율, 즉 기울기가 들어간다. 미지행렬 $\{x\}$ 는 $[A]$ 의 역행렬을 이용하여 구한다. 단 행렬 $[A]$ 를 구성할 때 대각성분에 영 또는 매우 작은 수가 나타나지 않도록 적절히 순서를 배치하는 것이 중요하다.

$$[A] = \begin{bmatrix} -C_1^A & C_E - C_1^A & C_1^B & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_1^A & -C_1^B - C_1^C & C_E \\ -C_2^A & C_E - C_2^A & C_2^B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_2^A & -C_2^B - C_2^C & C_E \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\{x\} = \begin{bmatrix} Q_{AE} \\ Q_{EA} \\ Q_{AB} \\ Q_{BA} \\ Q_{BE} \\ Q_{EB} \end{bmatrix}, \quad \{B\} = \begin{bmatrix} \frac{V_A \Delta C_1^A}{\Delta t} \\ 0 \\ \frac{V_B \Delta C_1^B}{\Delta t} \\ \frac{V_A \Delta C_2^A}{\Delta t} \\ \frac{V_B \Delta C_2^B}{\Delta t} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

위 식을 각 시간대별 농도데이터를 이용하여 해석하기 위해서 시간스텝에 따른 반복계산과 계산결과에 대한 통계적 분석과정을 수행해야 한다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

전체적인 실험장치의 구성은 Fig. 2에 보인다. 실험에 사용된 다수실은 기밀이 잘 되어있는 두 개의 2m x 2m x 0.9m의 실로 이루어져 있다. 각 실에는 공기를 완전혼합 시키기 위하여 혼합

팬(mixing fan)이 설치되어 있다. 또한 실간 또는 외기와의 공기교환량을 제어하기 위하여 6개의 풍량제어장치를 한 쌍씩 3곳의 격벽에 설치하였다. 각 풍량제어장치는 직경 100mm의 덕트에 축류식 송풍기와 댐퍼 그리고 직경 20mm의 유동노즐로 이루어져 있다. 노즐의 상류에는 정압탭이 설치되어 있고 마이크로 마노메타를 써서 노즐을 통한 풍량을 실시간으로 모니터링할 수 있도록 하였다.

$$Q = C_n A_n \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (4)$$

여기서 C_n 은 노즐의 송출계수이고 β 는 수축비로서 덕트에 대한 노즐의 직경 비이다. Fig. 3은 수축비와 레이놀즈수에 따른 송출계수의 변화와 노즐의 풍량-압력차 보정곡선을 보인다.

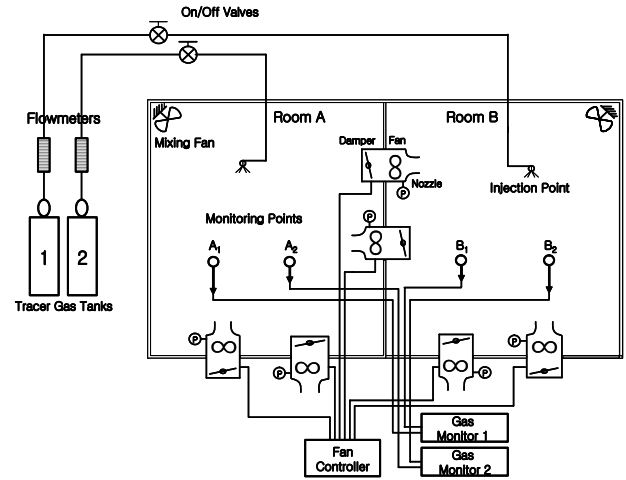


Fig. 2 Schematic of the experimental setup.

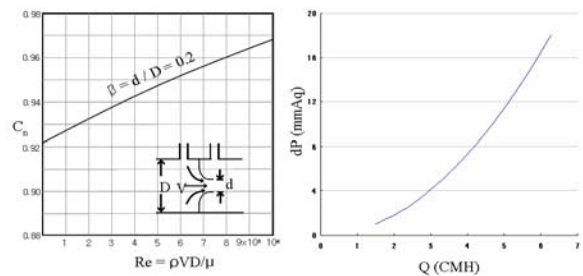


Fig. 3 Nozzle discharge coefficient and the calibration curve.

추적가스탱크로부터 SF6(Gas 1)와 R134a(Gas 2)를 각 실로 주입할 수 있도록 직경 3mm의 타이콘 튜브가 연결되어 있다. 추적가스의 총주입량은 온오프 밸브의 개폐시간으로 조절하였다. 가스의 유출구는 혼합팬 부근에 위치시킴으로써 추적가스가 실내로 주입되면서 공기와의 밀도차가 있더라도 적절히 전 공간으로 확산되도록 하였다. 추적가스농도의 측정을 위해 두 대의 I사 멀티가스모니터를 사용하였고 여러 지점의 가스 샘플링을 위해 멀티샘플러를 연결하여 순차적으로 측정하였다. 사용된 가스모니터의 최저 측정한계는 5ppm, 정확도는 약 5%로 알려져 있다. 농도 측정점의 위치는 각 실의 중앙, 높이 1m 지점으로 하였다.

3.2 실험방법

본 실험에서는 농도 감쇠법을 사용하였으며 추적가스 SF6가스를 실 A에, R134a가스를 실 B에 각각 동시에 분사하여 초기농도가 100ppm 정도가 유지되도록 하였다. 가스모니터의 샘플링 속도는 30초이고 2실의 측정점을 번갈아 측정하므로 각 지점 당 샘플링 인터벌은 1분이다. 시간이 경과하면서 농도가 지수적으로 감쇠하여 양쪽 실의 농도가 거의 유사한 상태가 된다. 실내농도가 초기농도의 1% 이하가 되면 실험을 종료하였다.

실험조건으로 Table 1에 보이는 바와 같이 기밀도 실험 (Run #0), 실간공기교환실험(Run #1), 그리고 일방향공기이동실험(Run #2)을 수행하였다. 기밀도 실험은 6개의 팬을 모두 정지한 상태에서 각 실의 기밀도를 측정하기 위하여 수행한 것이다. 실간공기교환실험은 각 실의 풍량 밸런스가 맞도록 6개의 팬을 모두 가동한 상태에서 수행한 실험이다. 일방향 공기이동실험은 한쪽 방향으로의 3개 팬은 가동하고 나머지 3개는 정지시킨 상태에서 수행한 실험이다.

Table 1. Experimental airflow settings (CMH).

Run #	Description	Q _{AE}	Q _{EA}	Q _{AB}	Q _{BA}	Q _{BE}	Q _{EB}
0	Leakage test	0	0	0	0	0	0
1	Interzone mixing	6.2	4.2	3.9	5.9	3.8	5.8
2	1-way air movement	0	4	4	0	4	0

4. 실험결과 및 분석

예비실험으로 수행한 기밀도 실험에서 각 실간의 누설량이 0.01CMH 이하로 측정되어 매우 기밀도가 우수한 것으로 나타났다.

실간공기교환실험(Run #1)에서 추적가스 주입 후 각 실의 농도변화 과정은 Fig. 4와 같다. 이때의 실간 공기교환량의 차이는 3CMH이다. 추적가스가 주입된 실에서는 초기농도로부터 지수적으로 감쇠하는 반면, 인근실에서는 고농도의 추적가스가 서서히 유입되면서 처음에는 농도 상승이 이루어지다가 일정 시간 경과 후에는 다함께 지수적으로 감소하게 된다. 두 번째 추적가스에 대해서도 동일한 설명이 가능하다.

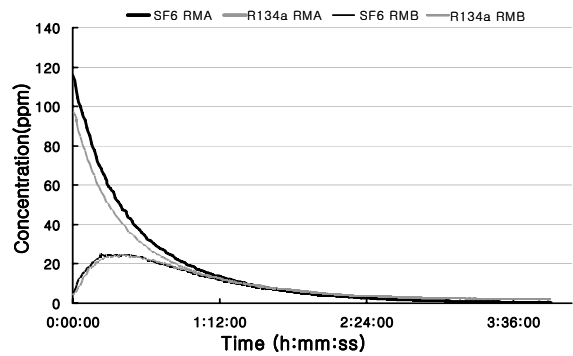


Fig. 4 Decay concentration curves for Run #1.

일방향 공기이동실험(Run #2)에 대한 농도측정 결과는 Fig. 5에 보인다. 외부에서 A실, A실에서 B실, B실에서 외부로 공기가 일방향으로 이동하기 때문에 하류에서 주입된 추적가스는 상류측으로 거의 이동하지 못하는 것을 관찰할 수 있다.

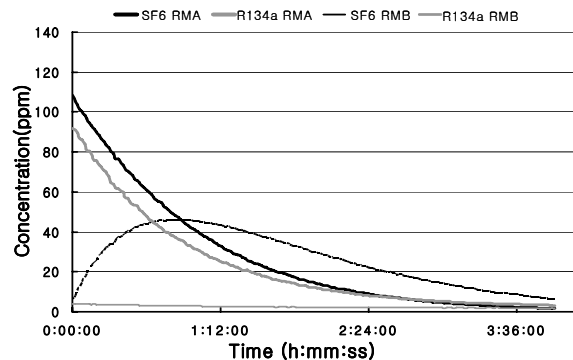


Fig. 5 Decay concentration curves for Run #2.

Fig. 6은 실험데이터를 처리하는 방법에 관해서 보이고 있다. A와 B 두개의 실에서 농도측정이 30초 간격으로 번갈아 이루어지기 때문에 한쪽의 농도측정결과를 30초만큼 이동(shift)하는 것이 필요하며 또한 시간별 가스농도가 측정시 변동이 심하기 때문에 농도기울기를 구하는 과정에서 데이터를 완만화(smoothing)하는 작업이 필요하다. 농도기울기를 구하는 방법으로 전진차분(forward differencing)과 중앙차분(central differencing)을 적용하여 비교하였다.

데이터 처리에 따라 계산된 풍량 결과값이 Fig. 7에 나타나 있다. 계산된 풍량값이 시간경과에 따라 변동하는 정도를 보인다. 왼쪽 3개의 그림은 전진차분을, 오른쪽 3개의 그림은 중앙차분을 적용하였을 때의 결과이다. 위로부터 원(raw) 데이터, 이동(shift)데이터, 완만화(smoothing)데이터로 해석한 결과이다. 데이터를 이동하고 완만화하는 과정을 거치면서 원데이터를 대입했을 경우에 비하여 결과값의 불확실성 진폭이 상당히 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다. 중앙차분과 전진차분의 경우의 결과는 서로 큰 차이를 보이지 않는다.

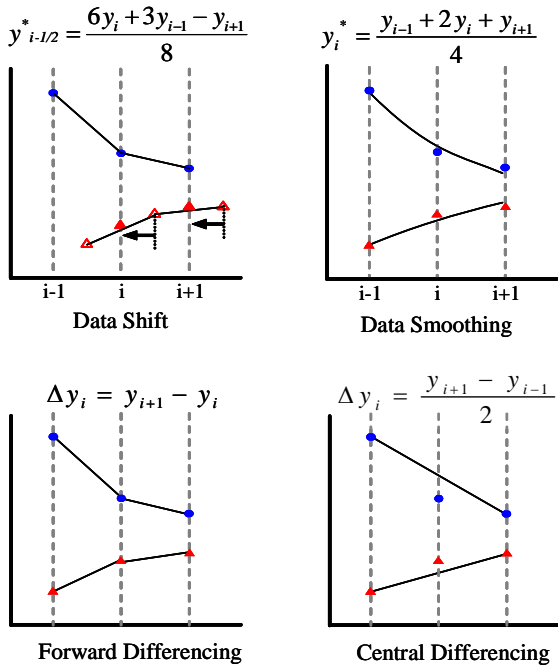
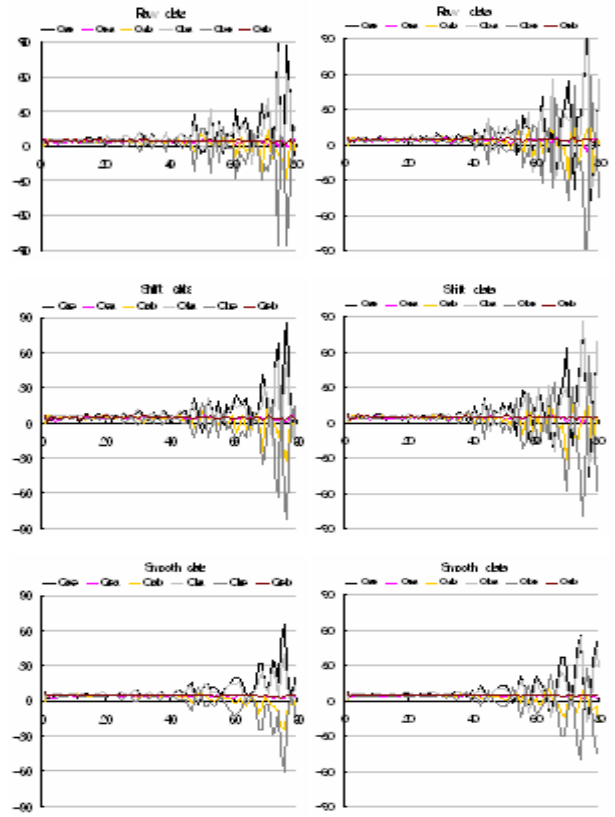


Fig. 6 Data manipulation methods before applying to matrix inversion process.



(a) Forward differencing (b) Central differencing

Fig. 7 Fluctuations of the results depending on the data manipulation methods.

그림에도 불구하고 일정시간 경과 후에는 계산된 풍량값의 진폭이 상당히 크게 증가한다. 풍량의 불확실성이 갑자기 커지는 이유는 추적가스의 농도곡선에서 시간경과에 따라 각 실의 농도차가 줄고 농도변화율이 줄어들어 따라서 이로부터 6개의 연립방정식을 풀어서 구해야 하는 풍량값의 모호성이 증가하기 때문이다. 따라서 불필요한 데이터를 차단하고 유용한 데이터만을 선정하는 일정한 기준이 필요하다. 여기서는 식(5)와 같이 각 추적가스 별로 실 A의 농도기울기와 실 B의 농도기울기, 그리고 두 농도기울기의 차이를 이용하였다.

$$\sqrt{\frac{(s_1^A)^2 + (s_1^B)^2 + (s_1^{A-B})^2}{3}} < \epsilon \quad (5)$$

여기서 기울기 s_1^A , s_1^B 는 실 A의 초기농도기울기로 무차원화된 추적가스 1의 각실 농도 변화율이고, s_1^{A-B} 는 두 농도기울기의 차이이다.

$$s_1^A = \frac{dC_1^A}{dt} / \left(\frac{dC_1^A}{dt} \right)_{t=0}, \quad s_1^B = \frac{dC_1^B}{dt} / \left(\frac{dC_1^B}{dt} \right)_{t=0},$$

$$s_1^{A-B} = \left(\frac{dC_1^A}{dt} - \frac{dC_1^B}{dt} \right) / \left(\frac{dC_1^A}{dt} \right)_{t=0}$$

추적가스는 서로 독립적이므로 추적가스 2에 대해서도 동일한 기준을 적용한다. 여기서는 ε 을 0.1로 설정하였고 선정된 데이터에 대하여 평균값과 표준편차값을 구하였다. Table 2에 결과값을 보이며 실제로 풍량제어장치에서 주어진 설정값과 비교하여 상대적인 오차를 보이고 있다. 측정값의 표준편차는 0.25~1.5CMH의 범위를 보이고 있으며 설정값과의 절대 오차는 0.88CMH (상대오차 15%) 미만으로 나타남을 알 수 있다.

Table 2. Comparing the experimental results with the setting airflow rates (CMH).

Run #		Q _{AE}	Q _{EA}	Q _{AB}	Q _{BA}	Q _{BE}	Q _{EB}
1	Avg	5.37	3.95	4.44	5.86	3.46	4.89
	Stdev	1.51	0.60	1.06	1.28	1.33	0.42
	Error	0.81 (13%)	0.23 (5%)	0.53 (13%)	0.05 (1%)	0.31 (8%)	0.88 (15%)
2	Avg	0.20	3.59	4.03	0.24	3.92	0.13
	Stdev	1.45	0.46	1.02	0.25	0.85	0.93
	Error	0.20 (-)	0.41 (10%)	0.03 (1%)	0.24 (-)	0.08 (2%)	0.13 (-)

5. 결론

본 연구는 실간 공기교환을 측정을 위한 멀티추적가스 실험의 데이터 처리방법에 따른 영향을 파악하고 멀티추적가스 실험방법을 정교화하기 위한 방법론을 제시하였다.

농도감쇠법을 적용하여 실험한 농도 변화는 풍량조건에 따라서 다양한 형태로 나타나는데 이에 관계없이 멀티추적가스 실험방법을 적용할 수 있어야 한다. 농도데이터를 처리하는 과정에서 도출된 결론은 다음과 같다.

우선 여러 측정지점을 갖는 경우, 농도측정데이터는 같은 시점에서 측정된 것으로 환산해주는 것이 바람직하다. 특히 농도의 기울기가 중요하기 때문에 각 시점에서 농도곡선을 완만화하는 작업이 필요하다. 중앙차분과 전진차분 방법에

의한 차이는 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

농도감쇠법에 의한 실험에서 초기에 주어진 추적가스 농도는 시간경과에 따라서 필연적으로 소멸되므로 그로부터 유용한 정보를 얻을 수 있는 분별력이 점차 감소하게 된다. 특히 멀티추적가스법의 경우에는 각 실에서의 농도감쇠율로부터 지배방정식을 연립해서 구해야 하기 때문에 불확실성이 더욱 급격히 증가한다. 본 연구에서는 각 실의 농도구배의 RMS값이 초기의 최대 농도구배의 10% 이하가 되는 시점까지의 데이터를 선정할 것을 제시하였다. 향후 다양한 실험조건에 대한 보다 일반화된 결론을 도출하기 위하여 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B02)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Sinden, F. W., 1978, "Multi-chamber theory of air infiltration," Building and Environment, Vol. 13, pp. 21-28.
2. Sherman, M. H., 1989, "On the estimation of multizone ventilation rates from tracer gas measurements," Building and Environments, Vol. 24, pp. 355-362.
3. Irwin, C. and Edwards, R. E., 1990, "A comparison of different methods of calculating interzonal airflows by multiple tracer gas decay tests," Progress and Trends in Air Infiltration and Ventilation Research, Proc. of 10th AIVC Conf., IEA, Finland, Vol. 1, pp. 57-70.
4. Nazaroff, W. W., 1997, "Nonlinear least-squares minimization applied to tracer gas decay for determining airflow rates in a two-zone building," Indoor Air, Vol. 7, pp. 64-75.
5. Afonso, C. F. A. and Maldonado, E. A. B., 1986, "A single tracer-gas method to characterize multi-room air exchanges," Energy and Buildings, Vol. 9, pp. 273-280.