

추적가스를 이용한 실간환기량 산정방법에 따른 불확실성 해석

한 화 택[†], 조 석 효^{*}

국민대학교 기계자동차공학부, *국민대학교 기계공학과 대학원

Uncertainty Analysis of Interzonal Airflow Rates by Tracer Gas Methods

Hwataik Han[†], Seok Hyo Cho^{*}

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

ABSTRACT: Interzonal air movements are important to characterize overall ventilation performance of complicated multi-zone buildings. Tracer gas techniques are widely used to measure ventilation rates, ventilation effectiveness, and interzonal air movements. Depending on the number of gases used, they are divided into single and multi tracer gas methods. This paper deals with the comparison of the tracer gas methods in measuring air exchange rate between rooms. Experiments have been conducted in a simple two-room model with known airflow rates. In multi-gas procedure, the concentration decays of two tracer gases, i.e. SF6 and R134a are measured after simultaneous injections in each room. The single tracer gas method is also applied by injecting SF6 gas with a time lag between two rooms. The data reduction procedures are developed to obtain the interzonal airflow rate using the matrix inversion, and various data manipulation methods are tested, such as data shift, interpolation, and smoothing. Uncertainty for each airflow rate is investigated depending on the parameters based on the setting values.

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]
 C : 추적가스 농도 [ppm]
 ε : 데이터 선정기준 [식 (5)]
 ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]

Q : 풍량 [CMH]
 s : 상대적 농도구배 [식 (5)]
 t : 시간 [s]
 V : 실 체적 [m^3]

하 침 자

A : 실 A
 B : 실 B
 E : 외기
 1 : 추적가스 1 (SF6)
 2 : 추적가스 2 (R134a)

[†] Corresponding author
 Tel.: +82-2-910-4687; fax: +82-2-910-4839
 E-mail address: hhan@kookmin.ac.kr

1. 서론

최근 건설교통부에서 실내공기질 개선을 위해 ‘건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 일부 개정령안’이 공포되었고 이에 다수의 실로 이루어진 주거건물이나 다중이용시설에서는 전체에 대한 환기량을 고려하고 있으나 오염물질이 각 실에 존재할 경우 실별로 개별적인 급배기가 이루어지지 않는 경우에는 건축물 전체의 환기량이 만족되더라도 실제 실별 환기량은 취약할 수 있다. 따라서 다수실 각각에 적절한 급배기를 시켜줄 수 있는 적정환기량 산정이 필요하다.

실간의 공기교환은 압력차에 의해서 한쪽 방향으로 지속적으로 일어나는 경우도 있지만 대부분의 경우에는 양방향으로 서로 교환하는 형태로 나타나게 된다. 다수실에서의 개별적인 급배기를 위해서는 실외와 건물과의 환기량보다는 실간공기교환율이 더욱 중요한 요소로 작용한다. 실내 오염물질의 확산 및 분포거동을 파악하고 실내외 공기유동의 적정성을 파악하기 위해서 추적가스를 이용한 환기실험이 수행되어 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⁾

본 논문에서는 실내외간 적정환기량을 산정하고 분석방법을 제시하기 위해서 2개의 제어되고 단순화된 실로 구성되고 있는 실간의 공기교환량이 제어될 수 있는 실험장치를 이용하여 멀티, 싱글 추적가스 실험을 수행하였고 몇 가지의 다른 형태의 실간 공기교환 패턴에 대해서 결과 데이터의 특성을 비교, 분석하고 환기량 산정에 필요한 데이터 선정범위를 제안하고자 한다. 또한 산정된 환기량의 오차를 각 요인의 오차의 불확실성 해석을 통하여 분석함으로써 추적가스 방법을 정교화하고 공기교환량 결과를 검증한다.

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 여섯개의 풍량이 존재한다.

정상상태의 연속방정식으로부터 다음과 같은 풍량 밸런스가 이루어진다.

$$\begin{aligned} Q_{AB} + Q_{AE} &= Q_{BA} + Q_{EA} \\ Q_{AB} + Q_{EB} &= Q_{BA} + Q_{BE} \end{aligned} \quad (1)$$

실 A의 추적가스 1, 2의 농도 C_1^A, C_2^A 의 시간에 따른 변화는 인근 실 B와 외부와 교환되는 추적가스의 순 유입량으로부터 결정된다. 즉,

$$\begin{aligned} V_A \frac{d}{dt} C_1^A(t) &= [C_E Q_{EA} + C_1^B(t) Q_{BA} - C_1^A(t) (Q_{AB} + Q_{AE})] \\ V_A \frac{d}{dt} C_2^A(t) &= [C_E Q_{EA} + C_2^B(t) Q_{BA} - C_2^A(t) (Q_{AB} + Q_{AE})] \end{aligned} \quad (2)$$

마찬가지로 실 B에서 추적가스 1과 2에 대한 비정상 질량보존식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_B \frac{d}{dt} C_1^B(t) &= [C_E Q_{EB} + C_1^A(t) Q_{AB} - C_1^B(t) (Q_{BA} + Q_{BE})] \\ V_B \frac{d}{dt} C_2^B(t) &= [C_E Q_{EB} + C_2^A(t) Q_{AB} - C_2^B(t) (Q_{BA} + Q_{BE})] \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 해석방법

위의 여섯 개 지배방정식을 행렬 형태로 표현하면 식 (4)와 같다. 행렬 [C]에는 각 실, 각 추적가스의 농도값이 들어가고 우변에는 농도변화율, 즉 농도 기울기가 들어간다. 여기서 행렬 [C]를

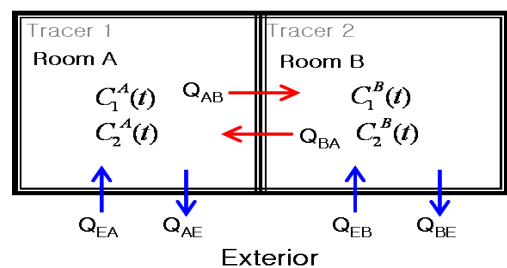


Fig. 1 Two-zone model for interzonal air exchange experiment

구성할 때 대각성분에 0 또는 매우 작은 값이 나타나지 않도록 순서를 배치하는 것이 중요하다.

$$\begin{bmatrix} -C_1^A & C_E - C_1^A & C_1^B & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_1^A - C_1^B - C_1^B & C_E & 0 & 0 \\ -C_2^A & C_E - C_2^A & C_2^B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_2^A - C_2^B - C_2^B & C_E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{AE} \\ Q_{EA} \\ Q_{AB} \\ Q_{BA} \\ Q_{BE} \\ Q_{EB} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} V_A \Delta C_1^A \\ 0 \\ V_B \Delta C_1^B \\ V_A \Delta C_2^A \\ V_B \Delta C_2^B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)에서 미지행렬 {Q}는 구하고자 하는 풍량 값이며 이를 구하기 위해서 가우스 소거법을 이용하여 [C]의 역행렬을 구한다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

전체적인 실험장치의 구성은 Fig. 2에 보인다. 실험에 사용된 모델은 기밀이 잘 되어있는 두개의 2m x 2m x 0.9m의 실로 이루어져 있다. 각 실에는 공기를 완전혼합 시키기 위하여 혼합팬(mixing fan)이 설치되어 있다. 또한 실간 또는 외기와와의 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 마노미터를 써서 노즐을 통한 풍량을 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 하였다.

추적가스탱크로부터 SF6(Gas 1)와 R134a(Gas 2)를 각 실로 주입할 수 있도록 직경 3mm의 타이콘 튜브가 연결되어 있다. 추적가스의 총주입량은 유량계와 온오프 밸브의 개폐시간으로 조절하였다. 가스의 유출구는 혼합팬 부근에 위치시킴으로써 추적가스가 실내로 주입되면서 공기와의 밀도차가 있더라도 적절히 전 공간으로 확산되도록 하였다.

추적가스농도의 측정은 두 대의 I사 멀티가스 모니터를 사용하였고 여러 지점의 가스 샘플링을 위해 멀티샘플러를 연결하여 순차적으로 측정하였다. 멀티가스모니터의 최저 측정한계는 5ppm, 정확도는 약 5%로 알려져 있다. 농도 측정점의 위치는 각 실의 중앙, 높이 1m 지점으로 하였다.

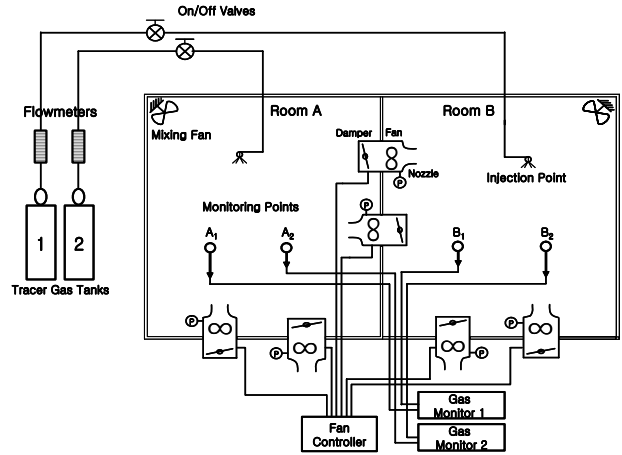


Fig. 2 Schematic of the experimental setup

3.2 실험방법

본 실험에서는 농도 감쇠법을 사용하였으며 멀티추적가스 실험시 SF6가스를 실 A에, R134a가스를 실 B에 각각 동시에 분사, 싱글추적가스 실험시 실 A와 B에 SF6가스를 시간차를 두고 분사하여 초기농도가 100ppm 정도가 유지되도록 하였다. 가스모니터의 최고 샘플링 속도는 30초이고 2실의 측정점을 번갈아 측정하므로 각 지점당 데이터 샘플링 인터벌은 1분이다. 시간이 경과하면서 농도가 감쇠하여 양쪽 실의 농도가 초기농도의 1% 이하가 되면 데이터 측정을 종료하였다.

실험조건으로 Table 1에 보이는 바와 같이 기밀도 실험 (Run #0), 실간 공기교환실험(Run #1), 그리고 일방향 공기이동 실험(Run #2)을 수행하였다. 기밀도 실험은 6개의 팬을 모두 정지한 상태에서 각 실의 기밀도를 측정하였고, 실간 공기교환실험은 각 실의 풍량 밸런스가 맞도록 6개의 팬을 모두 가동한 상태에서 수행한 실험이다. 일방향 공기이동실험은 한쪽 방향으로의 3개 팬을 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	0	0	0	0	0	0
1	Interzone	6.2	4.2	3.9	5.9	3.8	5.8
2	1-way	0	4	4	0	4	0

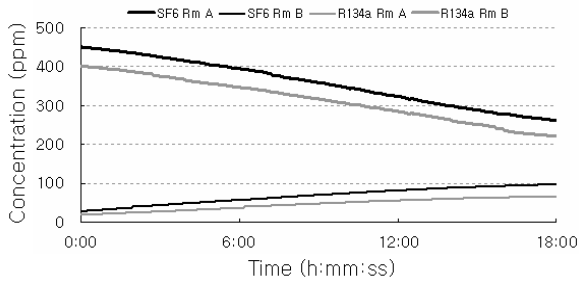


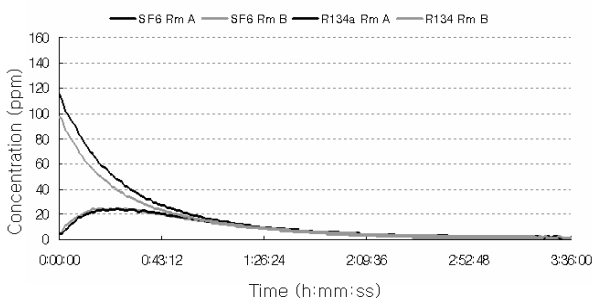
Fig. 3 Decay concentration curves for Run #0

4. 실험결과 및 분석

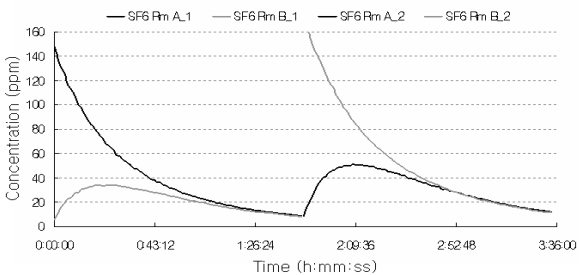
예비실험에서 수행한 기밀도 실험에서 각 실간의 누설량이 0.01 회/h 이하로 나타나 매우 기밀도가 우수한 것으로 나타났다.

실간 공기교환실험(Run #1)에서 추적가스 주입 후 각 실의 농도변화 과정은 Fig. 4와 같다. 왼쪽 그림은 멀티가스, 오른쪽 그림은 싱글가스이고 추적가스가 주입된 실에서는 초기농도로부터 지수적으로 감소하는 반면, 인근 실에서는 고농도의 추적가스가 서서히 유입되면서 처음에는 농도 상승이 이루어지다가 일정 시간 경과 후에는 다 함께 지수적으로 감소하게 된다.

일방향 공기이동실험(Run #2)에 대한 농도측정 결과는 Fig. 5에 보인다. 외부에서 A실, A실에서

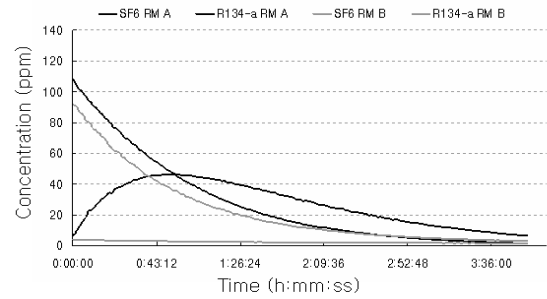


(a) Multi-gas experiment

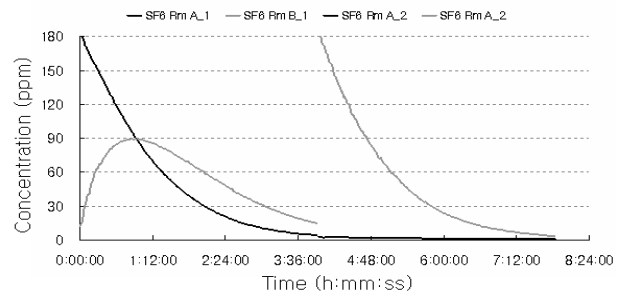


(b) Single gas experiment

Fig. 4 Decay concentration curves for Run #1



(a) Multi-gas experiment



(b) Single gas experiment

Fig. 5 Decay concentration curves for Run #2

B실, B실에서 외부로 공기가 일방향으로 이동하기 때문에 하류에서 주입된 추적가스는 상류측으로 거의 이동하지 못하는 것을 관찰할 수 있다.

추적가스의 농도값의 처리는 측정결과를 이동(shift), 완만화(smoothing)하는 작업이 필요하다. 농도기울기를 구하는 방법으로 전진차분(forwarding differencing)과 중앙차분(central differencing)을 적용하였다⁽⁷⁾. 단, 싱글추적가스 실험시에는 각 실마다 농도측정이 개별적으로 이루어지기 때문에 측정결과를 이동하는 작업을 제외하고 완만화하는 작업만을 수행하였다.

데이터 처리에 따라 계산된 Run #1의 멀티추적가스 실험의 풍량 결과값이 시간경과에 따라 변동하는 정도를 보인 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 왼쪽 3개의 그림은 전진차분을, 오른쪽 3개의 그림은 중앙차분을 적용하였을 때의 결과이다. 위로부터 원본데이터, 이동, 완만화 데이터로 해석한 결과이며 데이터를 처리과정을 거치면서 원본데이터를 대입했을 경우에 비하여 결과값의 편차가 상당히 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다. 중앙차분과 전진차분의 경우의 결과는 서로 큰 차이를 보이지 않는다.

그럼에도 불구하고 일정시간 경과 후에는 계산된 풍량값의 진폭이 상당히 크게 증가한다. 풍량

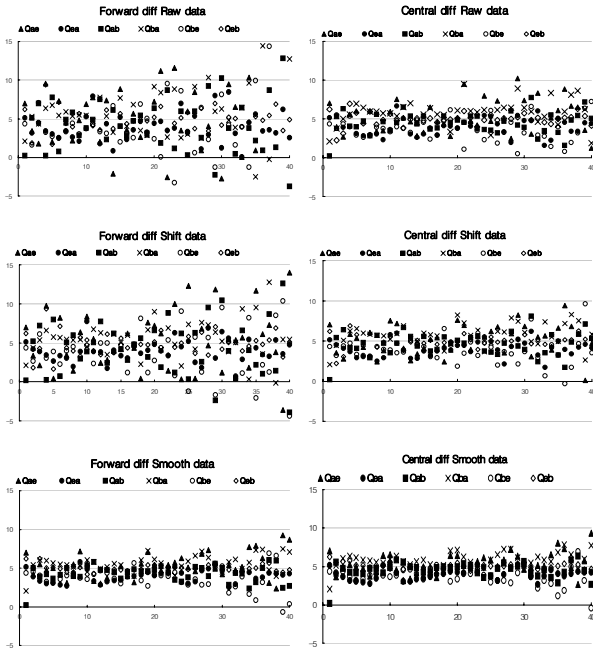


Fig. 6 Distributions of the results depending on data manipulation procedures

의 불확실성이 갑자기 커지는 이유는 추적가스의 농도곡선에서 시간경과에 따라 각 실의 농도차가 줄고 농도변화율이 줄어들어 따라서 이로부터 6 개의 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 초기농도 기울기로 무차원화된 추적가스 1의 각실 농도 변화율이고, s_1^{A-B} 는 두 농도기울기의 차이이다.

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

$$s_1^{A-B} = \left(\frac{dC_1^A}{dt} - \frac{dC_1^B}{dt} \right) \bigg/ \left(\frac{dC_1^A}{dt} \right)_{t=0} \quad (6)$$

추적가스는 서로 독립적이므로 추적가스 2에 대해서도 동일한 기준을 적용한다. 여기서는 ϵ 을

0.1로 설정하였고 선정된 데이터에 대하여 평균값과 표준편차값을 구하였다. 그 결과는 Table 2에 나타나 있으며 실제로 풍량제어장치에서 주어진 실험조건값과 비교하여 상대적인 오차를 보이고 있다. 측정값의 표준편차는 0.25-1.6 CMH의 범위를 보이고 있으며 상대오차는 21% 미만으로 나타남을 알 수 있다.

실간 환기량 산정과정에서 나타나는 오차의 근원을 파악하고 결과값에 가장 영향을 크게 미치는 인자를 파악하기 위하여 오차에 관한 계산차수를 분석하였다. 오차분석은 각 측정값 오차에 의하여 발생한 계산값의 오차를 제공하여 합하고 이것의 제곱근을 구하여 추정하는 기대최고오차방법⁽⁶⁾을 사용하여 다음과 같은 가정 하에 식 (4)의 역행렬 식을 분석하였다.

$$\frac{O(C_2^A, C_1^B)}{O(C_1^A, C_2^B)} \approx \delta < 1, \quad \frac{\Delta C}{C} \ll \frac{\Delta(\Delta C)}{\Delta C}$$

$$\frac{\Delta(\Delta C_1^A)}{\Delta C_1^A} \approx \frac{\Delta(\Delta C_2^B)}{\Delta C_2^B} < \frac{\Delta(\Delta C_2^A)}{\Delta C_2^A} < \frac{\Delta(\Delta C_1^B)}{\Delta C_1^B} \quad (7)$$

즉, 추적가스가 주입된 실의 농도구배는 인접실에서 측정되는 농도구배에 비하여 $\delta (<1)$ 의 차원을 가지고, 농도측정의 상대오차는 농도구배의 상대오차에 비해 작다고 가정한다. 또한 실험시 농도의 변화량이 가장 적은 실 B의 1번 가스농도의 상대오차가 결과값에 가장 크게 영향을 미

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

Run # (Multi)		QAE	QEA	QAB	QBA	QBE	QEB
0	Avg	0.07	0.07	0.04	0.05	0.08	0.08
	Stdev	0.03	0.03	0.02	0.01	0.05	0.05
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	13%	6%	15%	1%	5%	17%
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	-	10%	3%	-	1%	-

Run # (Single)		QAE	QEA	QAB	QBA	QBE	QEB
1	Avg	4.98	3.82	4.67	5.84	3.21	4.38
	Stdev	1.66	0.75	0.96	1.34	1.58	0.69
	Error	19%	10%	18%	2%	12%	25%
2	Avg	-0.72	3.10	3.86	0.04	3.59	-0.23
	Stdev	1.20	0.46	1.02	0.02	0.82	0.77
	Error	-	21%	2%	-	9%	-

칠 것이라 생각하고 오차분석을 하여 식(8)를 유도하였다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta Q}{Q}|_{AB} &= \delta^2 \left\{ \frac{\Delta(\Delta C_1^B)}{\Delta C_1^B} \right\}^2 \\
 \frac{\Delta Q}{Q}|_{BA} &= \delta^2 \left\{ \frac{\Delta(\Delta C_2^A)}{\Delta C_2^A} \right\}^2 \\
 \frac{\Delta Q}{Q}|_{AE} &= \delta^2 \left\{ \frac{\Delta(\Delta C_1^B)}{\Delta C_1^B} \right\}^2 + \left\{ \frac{\Delta(\Delta C_1^A)}{\Delta C_1^A} \right\}^2 \\
 \frac{\Delta Q}{Q}|_{BE} &= \delta^2 \left\{ \frac{\Delta(\Delta C_2^A)}{\Delta C_2^A} \right\}^2 + \left\{ \frac{\Delta(\Delta C_2^B)}{\Delta C_2^B} \right\}^2 \\
 \frac{\Delta Q}{Q}|_{EA} &= \delta^2 \left\{ \frac{\Delta(\Delta C_2^A)}{\Delta C_2^A} \right\}^2 + \left\{ \frac{\Delta(\Delta C_1^A)}{\Delta C_1^A} \right\}^2 \\
 \frac{\Delta Q}{Q}|_{EB} &= \delta^2 \left\{ \frac{\Delta(\Delta C_1^B)}{\Delta C_1^B} \right\}^2 + \left\{ \frac{\Delta(\Delta C_2^B)}{\Delta C_2^B} \right\}^2
 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (7)에 대한 결과는 다음과 같고 환기량산정 결과값의 오차와 비교하여 유사한 내용을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta Q}{Q}|_{EB} &\approx \frac{\Delta Q}{Q}|_{AB} \approx \frac{\Delta Q}{Q}|_{AE} > \frac{\Delta Q}{Q}|_{BE} \approx \frac{\Delta Q}{Q}|_{EA} \approx \frac{\Delta Q}{Q}|_{BA} \\
 \frac{\Delta Q}{Q}|_{EB}(17\%) &\approx \frac{\Delta Q}{Q}|_{AB}(15\%) \approx \frac{\Delta Q}{Q}|_{AE}(13\%) \\
 \frac{\Delta Q}{Q}|_{BE}(6\%) &\approx \frac{\Delta Q}{Q}|_{EA}(5\%) \approx \frac{\Delta Q}{Q}|_{BA}(1\%)
 \end{aligned} \quad (9)$$

5. 결론

본 연구에서는 실간 환기량 측정을 위해 싱글 및 멀티 추적가스 실험의 데이터 처리방법에 따른 불확실성을 해석하고 데이터 처리를 위한 실험방법론을 제시하였다. 본 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

실간 환기량은 순(net) 환기량의 개념과 달리 실간에 서로 교환되는 환기량을 의미하며 멀티가스 또는 반복적인 싱글가스 추적법에 의하여 구할 수 있다. 데이터 처리방법에 있어서 농도 변화율이 중요한 역할을 하므로 농도 곡선의 완만화 작업을 통하여 오차범위를 상당히 줄일 수 있으며, 가급적 동시점의 데이터로 환산해 주는 것이 바람직하다.

농도감쇠법에 의한 실험에서 초기에 주어진 추적가스 농도는 시간경과에 따라서 필연적으로 소멸되므로 그로부터 유용한 정보를 얻을 수 있는 분별력이 점차 감소하게 된다. 특히 멀티추적가

스법의 경우에는 각 실에서의 농도감쇠율로부터 풍량을 연립해서 구해야 하기 때문에 불확실성이 더욱 증가한다. 본 연구에서는 각 실의 농도구배의 RMS값이 초기의 최대 농도구배의 10% 이하가 되는 시점까지의 데이터를 선정할 것을 제시하였다. 또한 결과값에 대한 오차분석을 수행한 결과 상대적으로 농도구배가 가장 작은 인자가 결과값의 오차에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 향후 다양한 실험조건에 대한 보다 일반화된 결론을 도출하기 위하여 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

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.
6. Han, H., 2003, *Mechanical Measurement*, pp. 43-45.
7. Han, H., 2007, "An Experiment on Verification of Multi-Gas Tracer Technique for Air Exchange Rate Between Rooms," Proc. of the SAREK 2007 Winter Annual Conference, pp. 99-104.