

# 실간환기량 측정을 위한 추적가스 실험방법론에 관한 연구

한 화택<sup>†</sup>, 조석효<sup>\*</sup>

국민대학교 기계자동차공학부, \*국민대학교 기계공학과 대학원

## A Study on Tracer Gas Methodology to Measure Interzonal Airflow Rates

Hwataik Han<sup>†</sup>, Seok Hyo Cho<sup>\*</sup>

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

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

*(Received June 22, 2009; revision received October 4, 2009)*

**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 공기유동)

### 기 호 설 명

- $A_n$  : 노즐 단면적 [ $m^2$ ]
- $C$  : 추적가스 농도 [ppm]
- $\dot{C}$  : 농도변화율 [ppm/s]
- $\epsilon$  : 데이터 선정기준 [식(5)]
- $\rho$  : 공기의 밀도 [ $kg/m^3$ ]
- $O()$  : 계산차수
- $Q$  : 풍량 [CMH]
- $s$  : 상대적 농도구배 [식(5)]
- $t$  : 시간 [s]

$V$  : 실 체적 [ $m^3$ ]

하첨자

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

### 1. 서 론

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

실내공기질 유지를 위해 공동주택 및 다중이용 시설에 대한 환기량 기준이 건물용도별로 제시되

어 있다. 대부분의 건물은 다수의 실로 이루어져 있으며 각 실별로 개별적인 급배기가 이루어지지 않기 때문에 건축물 전체에 대한 환기량 기준은 만족될지라도 실별 환기량은 불균일한 상태로 머무를 수 있다. 실간 공기교환은 이러한 실별 불균형을 조절하거나 특정한 방향으로 공기유동을 형성함으로써 건물의 전체 환기상태에 커다란 영향을 미친다.

실간 공기교환은 압력차에 의해서 한쪽 방향으로 지속적으로 일어나는 경우도 있지만 대부분의 경우는 양방향으로 서로 교환하는 형태로 나타난다. 작은 틈새로 시간차를 두고 이루어지는 경우도 있고, 큰 개구부를 통하여 공간적으로 분할되어 동시에 반대방향 기류가 형성되기도 한다.

그동안 실내 오염물질의 확산 및 분포기동을 파악하고 실내의 공기유동의 적정성을 파악하기 위해서 추적가스를 이용한 환기실험이 수행되어 왔다. 다수실의 실간 환기량 및 침기량을 측정하기 위한 방법에 관한 이론적 기초는 Sinden<sup>(1)</sup>에 의하여 잘 정리되었다. Sherman<sup>(2)</sup>은 멀티추적가스를 이용한 환기량 산정시 데이터 평가를 통한 오차분석을 수행하였고, Irwin<sup>(3)</sup>은 감쇠법을 이용한 멀티추적가스 실험과 수치미분, 수치적분, 고유치, 세 가지의 이론적인 유동량의 비교 분석하였다. 또한 Nazaroff<sup>(4)</sup>는 비선형 최소자승법을 이용하여 멀티추적가스 법과 고유치를 이용한 이론적인 해에 대한 비교를 하였다. 이외에 단일 추적가스를 이용하여 실간 환기량을 측정하기 위한 방안들도 시도된 바 있다.<sup>(5)</sup>

본 논문에서는 실간 환기량을 측정하기 위한 추적가스 실험방법론을 제시하기 위하여 단순화된 두 개의 실로 구성된 실험장치에서 환기량이 정확하게 제어된 상태에서 멀티, 싱글 추적가스 실험을 수행하였다. 몇가지 다른 형태의 실간 공기교환 패턴에 대하여 결과 데이터의 특성을 비교, 분석하고 환기량 산정에 필요한 데이터 산정 범위와 분석방법을 제안하고, 산정된 환기량과 각 요인에 대한 불확실성 해석을 통하여 추적가스 방법을 정교화하고 공기교환 풍량 결과를 검증하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 실험 모델

본 연구에서 사용된 모델은 Fig. 1과 같다. 각 실

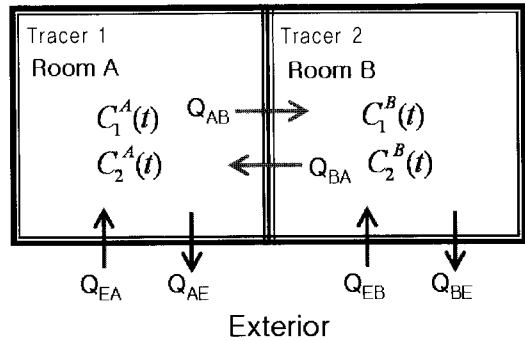


Fig. 1 Two-zone model for interzonal air exchange experiment.

(A와 B)와 외부(E)는 서로 공기교환이 이루어지므로 여섯개의 풍량이 존재한다. 정상상태의 연속방정식으로부터 다음과 같은 풍량 밸런스가 만족되어야 한다.

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

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

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

$$V_A \frac{d}{dt} C_2^A(t) = [C_E Q_{EA} + C_2^B(t) Q_{BA} - C_2^A(t) (Q_{AB} + Q_{AE})]$$

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

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

$$V_B \frac{d}{dt} C_2^B(t) = [C_E Q_{EB} + C_2^A(t) Q_{AB} - C_2^B(t) (Q_{BA} + Q_{BE})]$$

### 2.2 해석방법

위 지배방정식을 행렬 형태로 표현하면 식(4)와

같다. 행렬 [C]에는 각 실별, 각 추적가스의 농도 값이 들어가고 우변에는 농도변화율, 즉 농도 기울기가 들어간다. 여기서 행렬 [C]를 구성할 때 대각성분에 0 또는 매우 작은 값이 나타나지 않도록 순서를 배치하는 것이 중요하다.

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

식(4)에서 구하고자 하는 미지수는 풍량 행렬 {Q}이며 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 된 두개의 2m x 2m x 0.9m의 개별 실로 이루어져 있다. 각 실에는 내부공기를 완전혼합 시키기 위하여 내부 혼합팬(mixing fan)이 설치되어 있다. 또한 실간 또는 외기와의 공기교환량을 제어하기 위하여 6개의 풍량 제어장치를 한 쌍씩 3곳의 격벽에 설치하였다. 풍량 제어장치는 직경 100mm의 덕트에 축류식 송풍기와 댐퍼 그리고 직경 20mm의 유동노즐로 이루어져 있다. 노즐의 상류에는 정압탭이 설치되어 있고 마이크로 마노미터를 써서 노즐을 통한 풍량

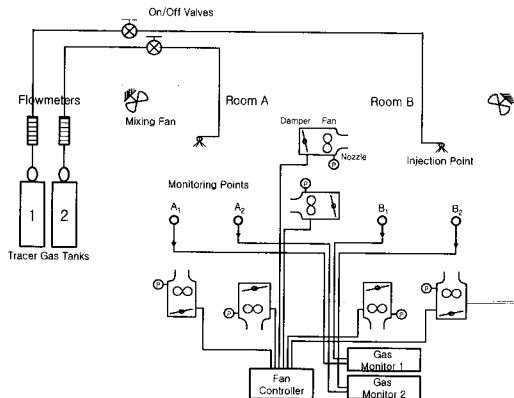


Fig. 2 Schematic of the experimental setup.

을 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 되어 있다.

추적가스 탱크로부터 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. 추적가스 주입시 취출구는 내부 혼합팬 부근에 위치시킴으로써 추적가스가 실내로 주입되면서 공기와의 밀도차가 있더라도 적절히 전 공간으로 확산되도록 하였다.

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

#### 3.2 실험방법

본 실험에서는 농도 감쇠법을 사용하였으며 멀티추적가스 실험시 SF6를 실 A에, R134a를 실 B에 각각 동시에 분사하였으며, 싱글추적가스 실험시에는 SF6를 실 A에 먼저 분사하고 감쇠가 충분히 이루어진 후 실 B에 분사하였다. 가스모니터의 샘플링 속도는 30초이고 2실의 측정점을 번갈아 측정하므로 각 지점 당 데이터 샘플링 인터벌은 1분이다. 시간이 경과하면서 농도가 감쇠하여 양쪽 실의 농도가 초기농도의 1% 이하가 될 때까지 측정을 진행하였다.

실험조건으로 Table 1에 보이는 바와 같이 기밀도 실험(Run #0), 일방향 공기이동실험(Run #1), 양방향 공기교환실험(Run #2)을 수행하였다. 기밀도 실험은 6개의 풍량 제어 팬을 모두 정지한 상태에서 각 실의 기밀도를 측정하였고, 일방향 공기이동실험은 한쪽 방향으로 3개의 풍량 제어 팬은 가동하고 나머지 3개는 정지시킨 상태에서 수행한 실험이다. 양방향 공기교환실험은 각 실의 풍량 밸런스가 맞도록 6개의 팬을 모두 가동한 상태

Table 1 Experimental airflow settings(CMH)

Run #	Description	Q <sub>AE</sub>	Q <sub>EA</sub>	Q <sub>AB</sub>	Q <sub>BA</sub>	Q <sub>BE</sub>	Q <sub>EB</sub>
0	Leakage	0	0	0	0	0	0
1	One-way	0	4.0	4.0	0	4.0	0
2	Two-way	6.2	4.2	3.9	5.9	3.8	5.8

에서 수행한 실험이다.

#### 4. 실험결과 및 분석

기밀도 실험(Run #0) 결과는 Fig. 3에 나타나 있다. 실 A에서 분사된 SF6는 농도가 서서히 감소하고 인접실 B의 농도는 서서히 증가한다. 실 B에서 분사된 R134a 가스도 마찬가지로이다. 팬이 가동하지 않는 상태에서 각실 농도가 감소한 것은 팬이 설치된 틈새를 통한 누설 때문이다. 각 실간의 누설량은 0.01ACH 이하로 측정되어 실험장치의 기밀도는 매우 우수한 것으로 나타났다.

일방향 공기이동실험(Run #1)에서 두 종류의 추적가스를 각 실에 동시 주입한 후 각 실의 농도 변화의 측정 결과는 Fig. 4에 보인다. 공기의 주된 흐름이 외부에서 실B, 실B에서 실A, 실A에서 외부로 일방향으로 이동하기 때문에 실B에서 주입된 R134a(추적가스 2)는 실A로 유입되어 농도가 점점 증가하여 최대값을 이룬 후 감소하지만, 실A에서 주입된 SF6(추적가스 1)은 실B에 거의 나타나지 않는 것을 관찰할 수 있다. 싱글추적가스 실험은 유동상태가 동일하게 유지되고 있다는 가정하에서 SF6를 실A와 실B에 시간차를 두고 주입한 결과로서 동일한 사실을 확인할 수 있다. 상류측(실A)에서 약간의 추적가스가 나타나는 이유는 미작동 풍량제어 팬의 틈새를 통하여 공기교환이 일부분 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

양방향 공기교환실험(Run #2)에 대한 각 실의 농도변화 측정 결과는 Fig. 5와 같다. 실A와 실B의 실질적인 양방향 공기교환으로 인하여 각실에서 주입된 추적가스는 인접실로 유입되면서 인접실의 농도를 증가시킨다. 이후 각실의 농도는 보

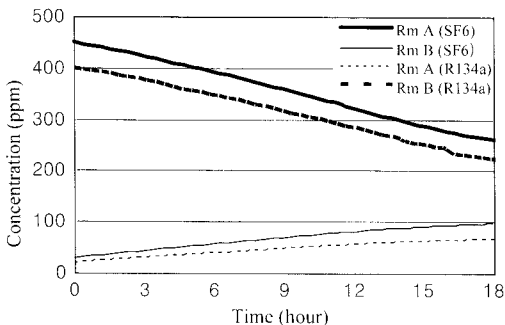
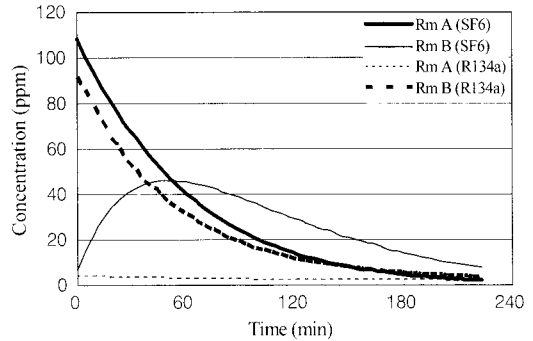
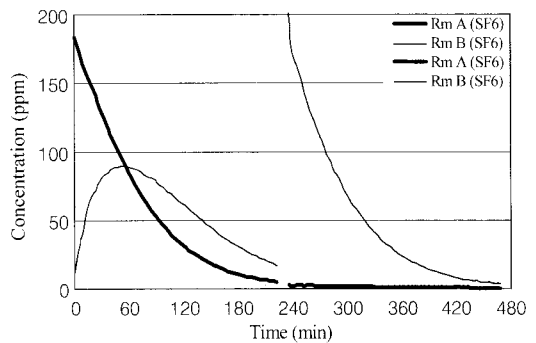


Fig. 3 Concentration curves for leakage test (Run #0).



(a) Multi-gas experiment



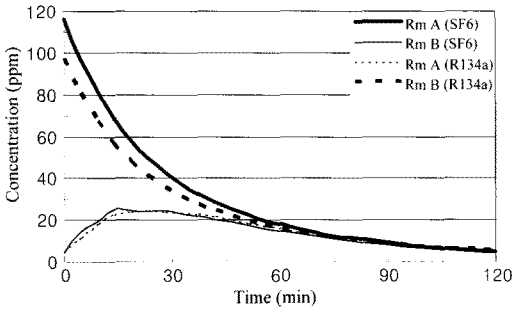
(b) Single gas experiment

Fig. 4 Tracer concentration curves for one-way airflow experiment(Run #1).

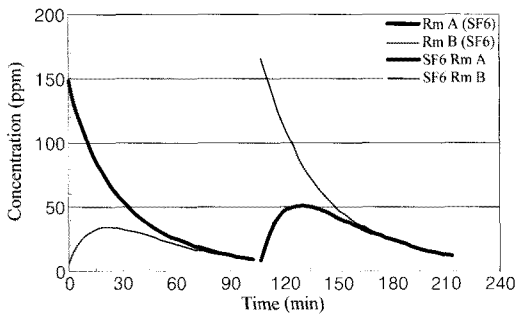
두 지수적으로 감소한다. 각실에서 이루어지고 있는 농도변화는 유사한 형태를 보인다.

추적가스의 농도변화로부터 실간 환기량을 분석할 때, 데이터 처리는 측정결과를 동시적으로 맞추기 위한 이동(shift)작업과 농도 기울기를 부드럽게 하는 완만화(smoothing)작업을 수행하였다. 데이터 처리작업 절차에 관한 설명은 참고문헌 [7]에 있으므로 여기서는 상세한 설명은 생략한다. 각 실의 농도변화율을 구하는 방법으로 전진차분(forwarding differencing)과 중앙차분(central differencing)을 적용하였다.<sup>(7)</sup> 단, 싱글추적가스 실험시에는 각 실마다 농도측정이 개별적으로 이루어지기 때문에 측정결과를 이동하는 작업이 불필요하다.

데이터 처리방법에 따라 계산된 양방향 공기교환유동에 대한 멀티추적가스 실험의 풍량 결과값이 시간경과에 따라 변동하는 정도를 Fig. 6에 보인다. 왼쪽 3개의 그림은 전진차분을, 오른쪽 3개의 그림은 중앙차분을 적용하였을 때의 결과이다.



(a) Multi-gas experiment



(b) Single gas experiment

Fig. 5 Tracer concentration curves for two-way ventilation experiment(Run #2).

위로부터 원본데이터(raw data), 이동데이터(shift data), 그리고 완만화 데이터(smoothing data)로 해석한 결과이며 데이터 처리과정을 거치면서 원본 데이터를 대입했을 경우에 비하여 결과값의 편차가 상당히 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다. 농도 변화율 계산시 중앙차분과 전진차분에 따른 결과는 서로 큰 차이를 보이지 않는다.

그럼에도 불구하고 일정시간 경과 후에는 계산된 풍량값의 진폭이 상당히 크게 증가한다. 풍량의 불확실성이 갑자기 커지는 이유는 추적가스의 농도곡선에서 시간경과에 따라 각 실의 농도차가 줄고 농도변화율이 줄어들에 따라서 이로부터 6개의 연립방정식을 풀어서 구해야 하는 풍량값의 모호성이 증가하기 때문이다. 즉, 식(4)에서 우변이 영에 접근하면 해를 구하는 것이 불가능해진다. 따라서 불필요한 데이터를 차단하고 유용한 데이터만을 선정하는 일정한 기준이 필요하다. 여기서는 식(5)와 같이 각 추적가스 별로 실 A의 농도변화율과 실 B의 농도변화율, 그리고 두 농도변화율의 차이를 이용하였다.

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

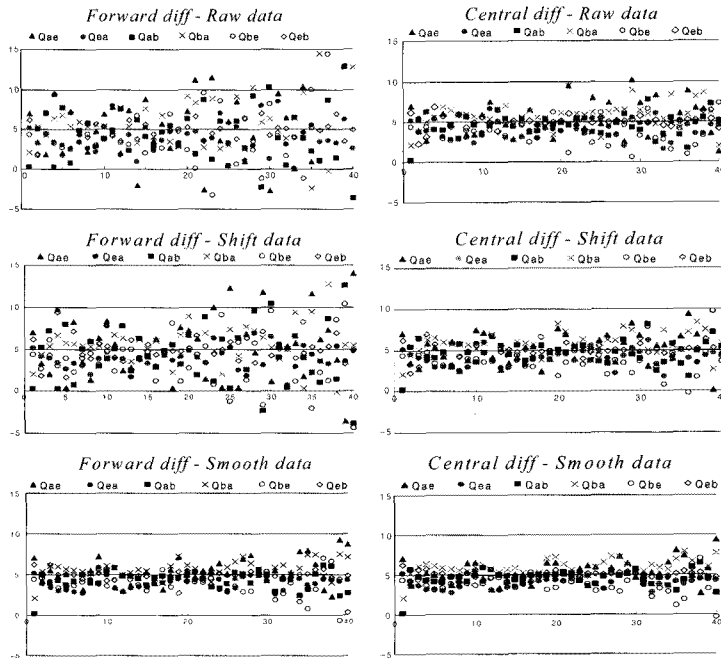


Fig. 6 Distributions of the results depending on data manipulation procedures.

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

Run # (Multi)		Q <sub>AE</sub>	Q <sub>EA</sub>	Q <sub>AB</sub>	Q <sub>BA</sub>	Q <sub>BE</sub>	Q <sub>EB</sub>
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	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%	-
2	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%

Run # (Single)		Q <sub>AE</sub>	Q <sub>EA</sub>	Q <sub>AB</sub>	Q <sub>BA</sub>	Q <sub>BE</sub>	Q <sub>EB</sub>
1	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%	-
2	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%

여기서  $s_1^A, s_1^B$ 는 각 실의 농도변화율을 실 A의 초기농도 변화율로 무차원화한 것이고,  $s_1^{A-B}$ 는 이들 무차원화된 농도변화율의 차이이다.

$$s_1^A = \dot{C}_1^A / (\dot{C}_1^A)_{t=0}, s_1^B = \dot{C}_1^B / (\dot{C}_1^B)_{t=0}, \quad (6)$$

$$s_1^{A-B} = (\dot{C}_1^A - \dot{C}_1^B) / (\dot{C}_1^A)_{t=0}$$

추적가스는 서로 독립적이므로 추적가스 2에 대해서도 동일한 기준을 적용한다. 여기서는  $\varepsilon$ 을 0.1로 설정하였고 선정된 데이터에 대하여 평균값과 표준편차값을 구하였다. 결과는 Table 2에 나타나 있으며 실제로 풍량제어 장치에서 주어진 실험 조건값과 비교한 상대적인 오차를 보이고 있다. 측정값의 표준편차는 0.25~1.6 CMH의 범위를 보이고 있으며 상대오차는 20% 이하로 나타남을 알 수 있다.

실간 환기량 산정과정에서 나타나는 오차의 근원을 파악하고 결과값에 영향을 크게 미치는 인자를 파악하기 위하여 몇가지 가정하에서 오차에 관한 계산차수를 분석하였다. 즉, 인접실에서 측정되는 농도는 추적가스가 주입된 실의 농도에 비하여 작아서  $\delta (< 1)$ 의 차원을 가지고, 각 실에서 주입된 추적가스 농도는 동일한 계산차수를 갖는다고 가정한다. 또 농도측정의 상대오차는 농도변화율의 상대오차에 비해 작다고 가정한다. 본 실험에서는 A에서 B방향 풍량이 A에서 B방향 풍량보다 작다. 이러한 가정을 식(7)에 정리하였다. 여기서  $\Delta C$ 는 농도의 불확실성을,  $\dot{\Delta C}$ 는 농도변화율의 불확실성을 의미한다.

$$\frac{o(C_1^B)}{o(C_1^A)} \approx \frac{o(C_2^A)}{o(C_2^B)} \approx \delta < 1 \quad (7)$$

$$o\left(\frac{\Delta C}{C}\right) < o\left(\frac{\dot{\Delta C}}{C}\right)$$

$$o\left(\frac{\Delta C_1^A}{C_1^A}\right) \approx o\left(\frac{\Delta C_2^B}{C_2^B}\right) < o\left(\frac{\Delta C_2^A}{C_2^A}\right) \approx o\left(\frac{\Delta C_1^B}{C_1^B}\right)$$

식(4)의 역행렬에 나타난 각 측정값 오차에 의하여 발생하는 계산값의 오차를 분석하는데 있어서 제곱합 제곱근을 구하는 기대 최고오차방법<sup>(6)</sup>을 사용하였다. 식(7)의 가정하에서는 Q<sub>EB</sub>, Q<sub>AB</sub>, Q<sub>AE</sub>는 다른 풍량에 비하여 태생적으로 큰 불확실성을 수반하고 있는 것으로 나타났다. 이는 환기량 실험 결과값에서 나타난 오차와 비교하여 유사한 경향을 확인할 수 있다.

$$\left|\frac{\Delta Q}{Q}\right|_{EB} \approx \left|\frac{\Delta Q}{Q}\right|_{AB} \approx \left|\frac{\Delta Q}{Q}\right|_{AE} \quad (8)$$

$$> \left|\frac{\Delta Q}{Q}\right|_{BE} \approx \left|\frac{\Delta Q}{Q}\right|_{EA} \approx \left|\frac{\Delta Q}{Q}\right|_{BA}$$

### 5. 결 론

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, 순차적 농도측정시 동일한 시점의 데이터로 환산해주는 것이 바람직하다.

농도감쇠법에 의한 실험에서 초기에 주어진 추적가스 농도는 시간경과에 따라서 소멸되므로 그로부터 유용한 정보를 얻을 수 있는 분별력이 점차 감소하게 된다. 특히 멀티추적가스법의 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 적은 인근실에서의 농도구배가 풍량값의 오차에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 추정된 오차의 계산차수는 실험적으로 구해진 것과 잘 일치하였다.

향후 다양한 실험조건에 대한 보다 일반화된 결론을 도출하고 측정된 실간 환기량 결과의 불확실성을 줄이기 위하여 추적가스 실험방법에 관한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 국민대학교 교내연구비 지원사업(2008년도)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

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.