

측정시간에 따른 거주주택의 환기량 계산 오류에 관한 연구

양원호[†] · 배현주 · 이기영* · 정문호

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

*Department of Epidemiology and Preventive Medicine, School of Medicine, University of California

A Study on the Error Associated with Ventilation Rate Calculation Using Different Sampling Intervals

Won Ho Yang[†], Hyun Joo Bae, Ki Young Lee* and Moon Ho Chung

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University

*Department of Epidemiology and Preventive Medicine, School of Medicine, University of California

(Received 18 July 2000 ; Accepted 24 August 2000)

ABSTRACT

Ventilation rates can be measured directly by a tracer decay method, although little is known of the effects of different sampling intervals on decay rate calculations. This study determined variations in decay rates calculated by three techniques using residential ozone decay data. The calculation techniques were a regression technique, decay techniques using half-life and average-life, and finite difference techniques using two different time intervals. Variation associated with regression technique calculations for residential ozone decay rates based on data from both sample intervals were within 10% ($2.81 \pm 1.88 \text{ hr}^{-1}$). However, both half-life and finite difference technique calculations using a shorter-time interval were significantly different from those obtained with the regression technique ($p < 0.05$). Therefore, the use of short sampling intervals in tracer decay may cause significant error in decay rate calculations.

Keywords : Ventilation, Tracer decay, Decay rate, Finite difference

I. 서 론

실내공기질(indoor air quality)은 일반적으로 불충분한 환기, 화학적 오염과 미생물학적 오염의 세 가지 문제를 가지고 있다. 그 중에서 환기는 일정 공간에 오염물질의 축적에 가장 큰 영향을 미치며, 불충분한 환기는 실내공기질과 관련된 질병 및 빌딩관련 질병에 가장 큰 요인으로 작용한다.¹⁾

환기는 어떤 공간에 자연적·인공적 방법에 의하여 공기가 공급되거나 제거되는 과정으로 정의된다. 환기의 목적은 안락함을 위하여 온도와 습도를 조절하여 거주 지역 또는 빌딩환경에 깨끗한 공기를 제공하는 것이다. 미국의 ASHRAE(The American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineerings)는 모

든 종류의 빌딩에서 안정적인 공기질을 제공하기 위하여 최소한의 환기량을 제안하였다. 거주지역에 대해서는 표준 환기량은 0.35ACH(air exchange rate, hr^{-1})을 제시하였으며, 1인당 7.5 l/sec 이상으로 하였다.²⁾ 또한 사무실 환경에서는 1인당 10 l/sec 을 권장하였다.

환기량은 미량가스(tracer gas)를 이용하여 직접 측정할 수 있다. 이상적인 미량가스의 특성은 비반응성, 무독성이며, 저농도에서 측정 가능해야 한다. 미량가스를 이용하면서 환기량의 측정은 미량가스 감소법(tracer decay), 일정 주입법(constant injection), 일정 농도법(constant concentration)의 세 가지 방법에 의하여 가능하다.³⁾ 이 중 미량가스 감소법은 가장 광범위하게 사용되는 방법이다.⁴⁾

미량가스 감소법에서 환기량을 계산하는 방법은 회귀방법(regression), 감소방법(decay) 및 두 시간점 측정방법(finite difference)을 이용한다. 이 세 가지 계산방법의 차이에 대한 연구가 부족하여 미량가스 감소법을 이용하여 환기량을 측정할 때 연구자 개인의 성향에 따라 한가지 방법을 선택하여 측정하였다.⁵⁾ 본 연구는 거

[†]Corresponding author: School of Public Health, Seoul National University 28 YeonGun-Dong, Jongro-Gu, Seoul, Korea
Tel: 02-740-8881, Fax: 02-745-9104
E-mail: yangwonho@hotmail.com

주지역 오존감소의 자료를 이용하여 회귀방법, 감소방법과 두 시간점 측정방법의 차이점을 비교하였다. 실내 오존감소는 일차반응(first order)을 따르기 때문에, 오존 감소를 환기량 계산방법의 세 가지 다른 측정시간의 오차를 예상하는데 미량가스 방법으로 고려하여 분석하였다.

II. 실험재료 및 방법

미량가스 감소에 대한 다른 측정시간에 영향을 거주 지역 오존감소 자료를 이용하여 결정하였다. 오존 감소율은 UV photometric ozone monitor 직독기를 이용하여 대기중 오존의 발생이 심각한 미국 California 남부 지역 43개 주택의 실내 및 실외에서 1995년 여름과 초가을에 측정되었다. 실외 공기를 blower fan을 이용하여 실내 주택으로 유입하였다. 실내 오존 농도가 실외 오존 농도의 약 80%에 도달했을 때, blower fan을 정지시켰다.⁶⁾ 모든 문, 창문 및 환기되는 부분을 닫고 오존이 발생될 수 있는 레이저 프린터, 휘발성 유기화합물이 발생될 수 있는 청소기와 deodorizers, 질소산화물이 발생될 수 있는 가스관련 도구들은 작동을 정지시킨 후 실내 오존 농도를 40분 동안 또는 3분 동안 실내 오존 농도가 일정할 때까지 1분마다 계속적으로 측정하였다.

주택을 하나의 공간으로 가정하면, 물질수지평형식을 적용할 수 있다.

$$\frac{dC_i}{dt} = IC_o + \frac{S}{V} - IC_i - \frac{R}{V} \quad (1)$$

여기서, C_i =indoor concentration(mg/m^3), I =air exchange rate(hr^{-1}), C_o =outdoor concentration(mg/m^3), S =generation rate(mg/hr), V =volume of the space(m^3), and R =removal rate(mg/hr).

식 (1)에서 제거율(R)은 감소상수(K , hr^{-1})와 실내농도(C_i)로 나타낼 수 있다.

$$R = KVC_i \quad (2)$$

실내 발생원이 없으면($S=0$), 실외에서 실내로 침투하는 공기에서 오존의 높은 반응성으로 침투동안 제거된다면 무시할 수 있다고 가정할 수 있다. 따라서, 식 (1)은 식 (3)으로 변형시킬 수 있다.

$$\frac{dC_i}{dt} = -IC_i - KC_i = -(I+K)C_i \quad (3)$$

식 (3)을 적분하여 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -(I+K)t \quad (4)$$

여기서, C_t =indoor concentration at any time, C_0 =indoor concentration at time = 0, and t =time.

미량가스가 비반응성 일 때 K 는 0이며, 미량가스 감소 방법에서 다음의 식 (5)은 공기환기량을 결정할 때 이용될 수 있다.

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -I(t) \quad (5)$$

미량가스 감소법에서 환기량을 예측하기 위한 계산방법은 1) 회귀방법, 2) 반감기(half-life)를 이용한 감소방법, 3) 평균수명(average-life)을 이용한 감소방법, 4) 5분과 20분의 두 시간점 측정방법과 5) 0분과 20분 두 시간점 측정방법이었다. 본 연구에서 오존 감소율은 환기량과 제거율의 혼합을 나타내지만, 오존의 감소는 환기량과 같은 일차반응으로 감소하기 때문에, 오존 감소율은 미량가스로 이용되었다.

1) 회귀방법은 시간(t)에 대하여 선형회귀모델 $\ln(C_t/C_0)$ 을 이용하면서 오존 감소율을 계산하였다.

2) 반감기를 이용한 감소방법은 식 (6)에 나타내었다. 반감기, $t_{1/2}$ 은 처음 농도가 50%로 감소할 때 요구되는 시간이다.

$$\ln 0.5 = -It_{1/2} \quad (6)$$

3) 평균수명을 이용한 감소방법은 식 (7)에 나타내었다. 평균수명, τ 는 처음 농도가 1/e로 감소할 때 요구되는 시간이다.⁷⁾

$$\ln 0.37 = -It_{1/e} \quad (7)$$

다른 두 측정 시간점 측정방법은 식 (8)을 이용할 수 있다. 두 측정 시간점은 5분과 20분의 두 점, 0분과 20분의 두 점을 정하여 분석하였다.

$$\ln \frac{C_{i+1}}{C_0} = -I(t_{i+1} - t_i) \quad (8)$$

여기서, C_i =indoor concentration at $t=i$.

4) 5분과 20분의 두 시간점을 이용하였다.

5) 0분과 20분의 두 시간점을 이용하였다.

각 방법에 따라 감소율을 계산한 후에, 짝비교(paired t-test)와 상관분석(correlation analysis)을 이용하여 각 방법에 따른 차이를 비교하였다.

III. 결과 및 고찰

오존 감소율에 각 주택에서 두 장소에서 동시(simultaneous)측정과 재현(repeated)측정을 하였기 때문에 총 145 실험이 California 남부에서 수행되었다. 각 주택특성에 따라 오존감소율은 다르기 때문에 감소율 측정시간도 차이가 있었다. 오존감소 실험에서 총 145 실험 중 36 실험은 평균수명(e)의 시간까지 도달하지 않았기 때문에, 결국 43 주택에서 109 오존감소 실험 자료가 이용되었다. 동시측정과 재현측정으로 짝비교와 상관분석에 오류를 일으킬 수 있기 때문에 43주택에서만 행해진 오존감소 자료를 같은 방법으로 통계적 분석을 수행하였으며 결과는 본 연구와 같은 결과를 보여주었다

본 연구에서 실외 오존의 침투효과는 무시하는 것으로 가정하였다. 오존감소는 환기량과 제거율의 혼합이

지만, 오존 감소는 대략적으로 일차반응을 따랐다 ($R^2 > 0.96$). 그러므로 주택의 오존감소율은 본 연구에서 다른 측정기간에 의한 오류 예측의 미량가스 감소율로서 고려될 수 있었다.

1. 회귀방법(regression technique)

회귀방법에서 $\ln[C_t/C_0]$ 은 측정시간에 대해 그래프를 이용하여 나타낼 수 있으며, 일차선형 방정식에서 기울기는 환기량을 의미한다. 총 109 실험 자료에서 일차선형 회귀모델의 결정계수(R^2)는 0.96이상이었다. 본 연구에서, 실내 오존감소는 지수함수였으며 대략적으로 일차반응을 따랐다. 평균 오존감소율과 표준편차는 $2.81 \pm 1.88 \text{ hr}^{-1}$ 였다. 평균 측정시간은 30분였다.

2. 감소방법(decay technique)

감소방법에서는 두 시간기간이 이용되었다. 반감기에

Table 1. Comparison of decay rate by three calculation techniques

Decay rate	Regression technique	Decay technique		Finite difference technique	
		Half-life	Average-life	5 to 20 min	0 to 20 min
Mean (hr^{-1})	2.81	3.08	2.89	2.94	2.83
Std. deviation (hr^{-1})	1.88	2.97	2.29	3.06	2.31
Mean time (min)	30.0	15.2	22.7	15.0	20.0

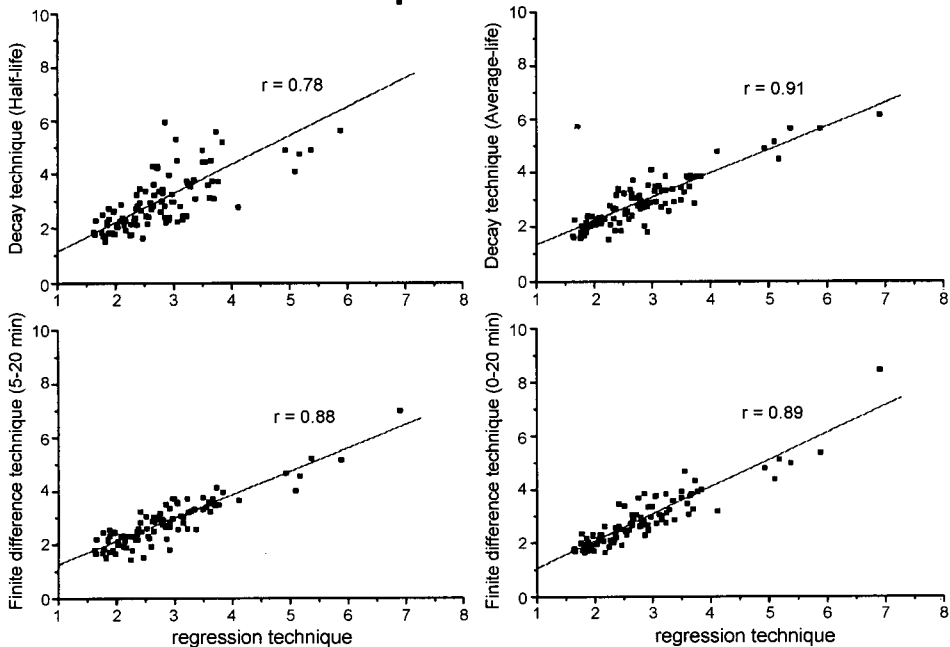


Fig. 1. Comparison for decay and finite difference technique relative in to regression technique.

의한 감소율은 식 (6)에서 계산되었을 때 평균 오존감소율과 표준편차는 $3.08 \pm 2.97 \text{ hr}^{-1}$ 였다. 평균시간은 15.2분였다. 평균수명에 의한 감소율은 식 (7)을 이용하여 계산될 때, 평균 오존감소율과 표준편차는 $2.89 \pm 2.29 \text{ hr}^{-1}$ 였다. 평균 측정시간은 22.7분였다.

3. 두 시간점 방법(finite difference technique)

두 시간점 방법은 식 (8)을 이용하면서 계산되었다. 5분과 20분 두 시간점에 의한 평균 오존감소율과 표준편차는 $2.94 \pm 3.06 \text{ hr}^{-1}$ 였다. 또한 0분과 20분 두 시간점에 의한 평균 오존감소율과 표준편차는 $2.83 \pm 2.31 \text{ hr}^{-1}$ 였다.

세 가지 방법을 이용한 오존감소율과 평균시간을 Table 1에 나타내었다. 회귀방법을 기준으로 각 방법사이의 평균감소율의 차이는 감소방법의 반감기와 평균수명에서 각각 9.6%와 2.8%였으며, 두 시간대 15분(5-20분)과 20분(0-20분)에서 각각 4.6%와 0.7%였다. 감소방법과 두 시간점 방법을 이용한 오존감소율은 짝비교(paired t-test)에 의한 회귀방법의 감소율과 비교하였다. 감소방법의 반감기와 두 시간점 방법의 15분(5-20분)은 회귀방법과 통계학적으로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 회귀방법과 다른 방법들 사이의 감소율의 상관관계를 Fig. 1에 나타내었다.

환기량 계산의 불확실성(uncertainty)은 측정기간을 명목시간상수(nominal time constant, $T_{opt} \approx 1/I$)와 동일하게 함으로써 최소화할 수 있다.⁸⁾ 본 연구에서 회귀방법에 의하여 계산된 감소율은 2.81 hr^{-1} 였으며, 감소율의 역수(T_{opt})는 21.4분였다. 평균수명(평균시간 22.7분)을 이용한 감소방법 및 0분과 20분(평균시간 20분)의 두 시간점 방법은 비슷한 결과로 나타났다. 반면에 측정기간이 명목시간상수보다 적을 때 즉 감소방법의 반감기와 두 시간점 방법의 5분과 20분 점의 감소율은 회귀방법에서 구해진 것과는 통계학적으로 차이를 보였다($p < 0.05$).

환기량은 다양한 주택특성과 환경조건 때문에 상당히 변화할 수 있다. 주거지역 환기량은 겨울철 California에서 0.1과 3ACH 사이의 값으로 측정되었다.⁹⁾ 평균 2일 동안의 주거지역 공기환기량은 미국의 L.A., California 북부와 San Diego에서 각각 0.79, 0.47과 0.54 hr^{-1} 였다. 환기량을 0.5ACH로 가정하면, SF₆가스를 이용한 전통적 미량가스를 측정법으로써는 평균수명시간(e)에 도달하는데 약 2시간이 소요된다. 비슷하게, 본 연구와 같이 두 시간점 0분과 20분의 감소에 도달하기 위해서는 1.9시간이 필요하다. 환기량 측정에서 그 동안 저비용, 계산의 간편성 등으로 1시간 또는 2시간의

두 시간점 방법이 광범위하게 이용되었다.^{10,11)} 그러나, 본 연구의 결과에 의하면 2시간 보다 적은 두 시간점 방법은 환기량이 0.5ACH 이하인 밀폐주택(tight house)의 환기량 측정에서 통계학적 오류를 야기할 가능성이 있는 것으로 나타났다.

오존감소 자료가 다른 측정기간과 연관된 감소율 계산 오류를 예측하는데 이용되었다. 이전의 연구에서는 오존은 반응성이기 때문에 미량가스 방법으로 이용되지 않았다. 본 연구에서는 주택의 오존감소가 일차반응을 따랐기 때문에 이용될 수 있었다. 하지만, 전통적 미량가스 방법을 이용한 다른 측정시간과 연관된 오류를 밝히는 연구가 요구된다.

IV. 결 론

환기량은 미량가스 감소 방법을 이용하여 직접적으로 측정할 수 있다. 하지만, 측정기간에 따른 영향에 관한 연구가 부족한 실정이다. 본 연구는 주거지역 오존감소 자료를 이용하여 세 가지 방법에 의한 계산된 감소율의 차이점을 비교하였다. 계산방법은 회귀방법, 반감기와 평균수명을 이용한 감소방법, 두 다른 시간점을 이용한 방법이었다. 감소방법과 두 시간점 방법은 회귀방법과 차이는 10%($2.81 \pm 1.88 \text{ hr}^{-1}$)였다. 하지만, 감소방법중 반감기와 두 시간점 방법 중 5분-20분에서 구해진 환기량은 회귀방법에서 구해진 환기량과 통계학적으로 차이를 보였다($p < 0.05$). 그러므로, 미량가스를 이용한 환기량의 측정에서 짧은 시간측정은 통계학적 오류를 야기시킬 수 가능성이 있다고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 부분적으로 National Institute of Environment Health Sciences와 Australia-Korea Fellowship의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Brisson, C., Bourbeau, J. and Allaire, S.: Sick building syndrome before, 6 months, and 3 years being exposed to a building with an improved ventilation system, Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate Indoor Air, **96**, 2, 259-264, 1996.
- 2) ASHRAE.: ANSI/ASHRAE Standard 62-1989, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers Inc., 1989.

- 3) Roulet, C. A. and Vandaele, L.: Air flow patterns within buildings measurement techniques, *Air Infiltration and Ventilation Centre. Technical Note AIVC34*, pp. III.7-III.86, 1991.
- 4) Godish, T.: *Indoor Air Pollution Control*, New York, Lewis, 1991.
- 5) Lagus, P. L.: Air leakage measurements by the tracer dilution method A review, *Building Air Change and Infiltration Measurements*. ASTM STP 719, C.M. Hunt, J. C. King, and H. R. Trechsel, Eds., American Society for Testing and Materials, 36-49, 1980.
- 6) Lee, K, Spengler, J. D., and Ozkaynak, H.: Ozone decay rates in residences, *Journal of Air and Waste Management Association*, In press, 1999.
- 7) Chester, W. S., Donald, V. K., Gerald F. W., and Billick, I. H.: Transformations, lifetimes, and sources of NO₂, HONO, and HNO₃ in indoor environments, *Journal of Air and Waste Management Association*, **43**, 1479-1485, 1993.
- 8) Sherman, M. H.: Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone, *Building and Environment*, **35**(4), 365-374, 1990.
- 9) Wilson, A. L., Colome, S. D., Tian, Y., Becker, E. W., Baker, P., Behrens, D. W., Billick, I. H., and Garriso, C. A.: California residential air exchange rates and residence volumes, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, **6**(3), 311-33, 1996.
- 10) Hunt, C. M.: Air infiltration: A review of some existing measurement techniques and data, *Building Air Change and Infiltration Measurements*. ASTM STP 719, C. M. Hunt, J. C. King, and H. R. Trechsel, Eds., American Society for Testing and Materials, 3-23, 1980.
- 11) Grot, R. A.: A low-cost method for measuring air infiltration rates in a large sample of dwellings, *Building Air Change and Infiltration Measurements*. ASTM STP 719, C. M. Hunt, J. C. King, and H. R. Trechsel, Eds., American Society for Testing and Materials, 50-59, 1980.