

주택 실내·외 이산화질소 측정을 이용한 환기량 및 발생량 추정

양원호 · 임성국 · 손부순*

대구가톨릭대학교 산업보건학과, *순천향대학교 환경보건학과
(2008년 2월 29일 접수; 2008년 9월 18일 수정; 2008년 10월 2일 채택)

Estimation of Ventilation and Generation Rates Using Nitrogen Dioxide Measurements of Indoor and Outdoor in Houses

Won-Ho Yang, Sung-Guk Im and Bu-Soon Son*

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea
*Department of Environment Health Science, Soonchunhyang University, Chungnam 336-745, Korea
(Manuscript received 29 February, 2008; revised 18 September, 2008; accepted 2 October, 2008)

Abstract

Indoor air quality can be affected by indoor sources, ventilation, decay and outdoor levels. Although technologies exist to measure these factors, direct measurements are often difficult. The purpose of this study was to develop an alternative method to characterize indoor environmental factors by multiple indoor and outdoor measurements. Using a mass balance model and regression analysis, penetration factor (ventilation rate divided by the sum of ventilation rate and deposition constant) and source strength factor (source strength divided by the sum of ventilation rate and deposition constant) were calculated using multiple indoor and outdoor measurements. Subsequently, the ventilation rate and NO₂ generation rate were estimated. Mean of ventilation rate was 1.41 ACH in houses, assuming a residential NO₂ deposition constant of 0.94 hr⁻¹. Mean generation rate of NO₂ was 16.5 ppbv/hr. According to house characterization, inside smoking and family number were higher NO₂ generation rates, and apartment was higher than single-family house. In conclusion, indoor environmental factors were effectively characterized by this method using multiple indoor and outdoor measurements.

Key Words : Indoor air quality, Nitrogen dioxide, Mass balance, Ventilation rate, Generation rate

1. 서 론

사람들은 실내환경에서 대부분 많은 시간을 생활하기 때문에 실내공기 오염물질 노출에 따른 건강위해성의 중요성이 부각되고 있다¹⁾. 실내공기질에

영향을 미치는 주요 요인은 실내 오염물질 발생량, 환기량, 오염물질 감소율, 실내 공기 혼합정도, 실외 오염물질 농도 및 실내공간 크기이다. 실내공간 크기와 실내 표면적은 직접측정 할 수 있으며, 환기량, 공기 오염물질의 실내 발생량 및 감소율은 각기 측정방법은 있으나, 개인공간인 실내환경 현장에서 직접 측정하는 것은 한계점이 많다²⁾.

상업적 건물과 공공건물에서는 기계적 환기시설이 일반적이며 환기량은 덕트 시스템에서 측정 가

Corresponding Author : Bu-Soon Son, Department of Environmental Health Science, Soonchunhyung University, Chungnam 336-745, Korea
Phone: +82-41-530-1270
E-mail: sonbss@sch.ac.kr

능하다. 일반 주택에서는 기계적환기 시설은 드문 편이기 때문에 환기량은 수동식 perfluorocarbon tracers(PFTs)를 이용하여 측정할 수 있지만 약 10%의 오차를 일으킬 수 있으며, 측정 및 분석 등의 제한점으로 주로 침투를 자연환기로 대신하여 측정한다³⁾. 침투는 공기가 주택 실내로 창문이나 벽 등의 틈새로 들어오는 것으로 정의되며, 이것은 창문과 문을 열어서 공기가 실내로 들어오는 자연환기를 의미하지는 않는다.

가스렌지와 같은 연소 장치에서 발생하는 이산화질소(NO₂) 발생량은 연소도구의 사용기간이 오래될수록 증가한다⁴⁾. 또한 연소도구 작동요인, 연료 투입율, 습도 및 온도도 발생량에 영향을 준다. 따라서 일반주택의 현장에서 오염물의 발생량 측정은 일반적으로 발생원에서 발생량이 일정한 것으로 가정하여 측정하지만, 매일 사용량의 변화가 있기 때문에 정확한 발생량 측정은 어려운 실정이다⁵⁾.

NO₂는 고온연소의 부산물로서 차량, 발전소 및 산업공정에서 주로 발생된다. 실내에서는 가스레인지, 석유난로 난방기, 흡연 등과 같은 연소과정에서 발생된다⁶⁾. 또한 실내의 NO₂ 농도는 공기 환기량과 실내 표면반응과 같은 주택특성에 영향을 받는다⁷⁾. 실험실에서 조사된 NO₂의 생체실험에 의하면 NO₂는 호흡기와 기관지 계통에 영향을 주는 것으로 보고되었다⁸⁾. 다른 연구에서는 가정 연소기구에서 발생된 비슷한 NO₂ 농도에서 기관지 계통에 영향을 주는 것으로 나타났다⁹⁾.

본 연구에서는 공단지역의 주택을 대상으로 실내 및 실외 NO₂ 농도를 측정하였고, 설문지를 이용하여 주택 특성에 따른 NO₂ 발생량 및 물질수지 모델을 이용한 환기량을 추정하였다. 이 연구의 목적은 실내환경의 물질수지와 회귀분석을 이용하여 측정기간 동안 대상 주택의 평균 환기량 및 NO₂ 발생량을 동시에 추정함으로써 실내공기질의 특성을 파악하는 것이며, 본 연구의 결과는 실내공기질 관리에 도움을 줄 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지역

공기환기량 및 NO₂의 발생량을 추정하기 위해서 공단지역에 위치하는 주택의 실내 및 실외의 NO₂

농도를 총 120 주택에서 2007년 9월 10일(월)~14일(금)까지 5일 동안 측정하였다. 주택특성과 생활방식은 설문지에 의해서 조사하였다.

2.2. 측정 및 분석방법

모든 NO₂의 농도측정은 수동식 시료채취기(passive sampler)를 이용하였다¹⁰⁾. 수동식 시료채취기는 연구원들이 직접 주택에 설치 및 수거하였다. 시료채취기는 가정에서 사람들이 가장 잘 모이는 거실에 설치되었으며, 측정 위치는 연소장치 발생원에서 3 m 이상 그리고 창문 또는 문으로부터 2 m 이상이 되도록 하였다. 실외에 설치된 수동식 시료채취기는 지면으로부터 1 m 이상이 되도록 하고, 비나 눈으로부터 보호될 수 있도록 했으며 환기가 잘 되는 곳에 위치하도록 하였다. 수동식 시료채취기는 NO₂가 존재하지 않는 챔버(chamber)에서 분해하여 셀룰로우스 여지를 시험관에 넣고, color reagent 10.0 mL를 시험관에 주입하였다. 챔버는 실리카겔, 활성탄, Purafil filter(과망간산 칼륨, 활성 알루미늄과 활성탄으로 합성된 물질)를 연속으로 연결하여 대기 중 공기를 챔버로 유입시켜 NO₂ 포함한 공기오염물질이 없는 상태에서 분석하였다. NO₂ 농도 계산식에 이용된 물질전환계수 값은 0.10 cm/sec를 이용하였고, 정량분석은 photospectrometer (SHIMADZU UV-1201)를 이용하여 545 nm 파장에서 측정하였다¹¹⁾.

2.3. 실내공기 물질수지 모델

물질수지(mass balance)에 의한 실내공기질 모델은 실내공기 오염물질 농도와 관련 변수들 사이의 관계를 나타낼 수 있는 유용한 방법이며, 오염물질의 확산과 이동, 오염물질 발생량, 공기환기량, 제거량 등의 요인들을 기술한다. 일반 가정주택을 하나의 공간(one-compartment)으로 가정하면, 실내공기의 농도변화는 다음과 같이 표현할 수 있다¹²⁾.

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

여기서, C_i= 실내 농도(ppmv), C_o= 실외 농도(ppmv), I= 공기환기횟수(air exchanges per hour, ACH), S= 발생량(cm³/hr · m³), R= 제거율(cm³/hr), V= 실내공간 부피(m³), t= 시간(hr), m= 실내공간의 혼합계수

식 (1)에서 제거율(R)은 감소상수(K, hr⁻¹)와 실내에 존재하는 질량(V·C_i)으로 나타낼 수 있다.

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

식 (2)를 식 (1)에 대입하고 대상 공간에서 완전혼합(completely mixed condition, m=1)을 가정하면, 식 (1)은 다음과 같이 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_i}{dt} = IC_o + S - IC_i - KC_i \quad (3)$$

한 공간모델(one-compartment model)에서 NO₂의 농도가 평형상태(t=∞)에 도달할 때 시간에 따른 농도 변화는 정상상태(dC/dt= 0)로 가정할 수 있으며, 이것을 식(4)에 나타내었다.

$$C_{i(ss)} = \left(\frac{I}{I+K}\right) \cdot C_o + \frac{S}{(I+K)} \quad (4)$$

여기서, C_{i(ss)}= 평균 정상상태에서의 실내 NO₂ 농도 (ppmv)

식 (4)는 수학적으로 환기를 통해 실외 오염물질이 실내로 유입되는 투과요인($\frac{I}{I+K}$: penetration factor)과 실내 오염원의 발생요인($\frac{S}{I+K}$: source strength factor)으로 정의될 수 있다¹³⁾. 식 (4)에서, 투과요인은 I와 K의 값이 0보다 크기 때문에 0과 1사이 이여야만 한다. 또한 오염원 발생요인은 S가 0과 같거나 크기 때문에 0 이상이어야 한다. 식 (4)에서 실내 및 실외의 공기오염물질을 다중 측정한다면, 일차선형 회귀식을 이용하여 투과요인과 발생요인을 구할 수 있다. 본 연구에서 측정기간 동안 공단지역 주택의 C_i와 C_o 측정은 식 (4)에서 선형회귀 직선을 이용하여 기울기와 절편 값으로부터 투과요인과 발생요인의 값을 계산할 수 있으며, 또한 투과요인에서 측정기간 동안의 환기량과 발생요인에서 NO₂ 발생량을 추정하였다¹⁴⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1. 주택특성

측정기 분실 등으로 최종 참여자는 111 주택이었다(Table 1). 주택실내에서의 간접흡연이 있는 곳은 51가구(48.1%), 가족수가 3명 이상인 곳은 60가구(56.6%)이었다. 주택의 형태는 단독주택이 71가구(67.0%)이었고, 새집증후군과 관련된 건축 년 수는

Table 1. Characterization of houses of participants according to questionnaire

Characteristics		Number	%
Passive smoking (Indoor)	Yes	51	48.1
	No	55	51.9
Family number	≤3	60	56.6
	>3	46	43.4
House type	Single-family	71	67.0
	Apartment	35	33.0
House age	≤1 year	0	0
	2~4 year	8	7.7
	5~10 year	39	37.5
	11~20 year	39	37.5
	>20 year	18	17.3
Road type near house	4 lanes	23	21.9
	2~3 lanes	37	35.2
	1 lane	32	30.5
	Others	13	12.4

대부분 5년 이상이였다. 도로변 공기오염물질과 연관된 주택 주변 도로의 형태를 살펴보면 가장 많은 것은 2~3차선이었다.

3.2 실내 및 실외 이산화질소 농도

대상 주택에서 측정된 5일 동안의 실내 NO₂ 평균 농도는 16.08±7.27 ppbv이었고, 실외는 15.23±7.48 ppbv이었다(Table 2). 측정된 주택 실내·외 농도는 대기환경기준인 연간 40 ppbv 및 24시간 50 ppbv를 초과하지 않았다. 그리고, 평균 실내 및 실외의 농도 비(I/O ratio)는 1.15 이었고, 표준편차는 0.51이었다. 주택에서 측정된 실내 및 실외의 NO₂ 농도는 근사적으로 대수정규분포(log-normal distribution)를 보였다(p< 0.05). 평균 실내 및 실외 농도비를 고려할 때 실내 NO₂ 발생원이 있는 것으로 생각할 수 있다¹⁵⁾.

Table 2. Measured NO₂ concentrations of indoor and outdoor

	Arithmetic mean (ppbv)	Arithmetic standard deviation	Minimum (ppbv)	Maximum (ppbv)
Indoor	16.08	7.27	1.10	45.41
Outdoor	15.23	7.48	2.37	35.93
Indoor/outdoor	1.15	0.51	0.33	3.43

3.3. 환기량 및 NO₂ 발생량

환기를 통해 실외 오염물질이 실내로 유입되는 투과요인과 실내 오염원의 발생요인을 계산하기 위해서, 실내 및 실외 NO₂ 농도사이의 선형회귀식을 이용하였다. Figure 1에서 실내 및 실외 NO₂ 농도는 유의한 상관관계를 나타내었다($R^2 = 0.79, p < 0.0001$). 연구방법에서 예상되었듯이 투과요인 값(0.60)은 0과 1사이이었으며, 발생요인 값(7.04)은 0 이상을 나타내었다. 식 (4)에서 NO₂의 K(감소상수, hr⁻¹) 값은 한국 주택에서 측정된 값을 인용하여 0.94 hr⁻¹로 고정하였다¹⁴⁾. 식 (4)를 이용하여 계산된 대상 주택 전체의 평균 환기량은 1.41 ACH 이었으며, NO₂ 발생량은 16.5 ppbv/hr 이었다.

주택 특성에 따른 환기량 및 NO₂ 발생량을 같은 방법으로 계산하여 Table 3에 나타내었다. 주택 특성은 실내흡연 여부, 가족수, 주택 형태 이었으며,

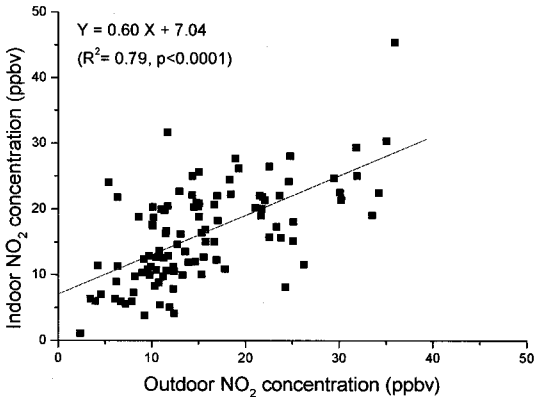


Fig. 1. Relation between indoor and outdoor NO₂ concentrations.

Table 3. Ventilation rate and NO₂ generation rate according to house characterization

		Ventilation rate (ACH)	NO ₂ generation rate (ppbv/hr)
Inside smoking	Yes	1.59	19.52
	No	1.25	15.31
Family number	≤3	1.06	16.16
	>3	1.92	16.94
House type	Single-family	1.77	15.88
	Apartment	0.70	18.60

각각으로 구분하여 분석한 투과요인은 모두 0과 1 사이 이었으며, 발생요인은 모두 0 이상을 나타내었다. 실내 흡연이 있는 주택과 없는 주택을 비교할 때, 실내 흡연이 있는 주택의 평균 NO₂ 발생량은 19.52 ppbv/hr로 실내 흡연이 없는 주택보다 상대적으로 높은 NO₂ 발생량을 나타내었다. 이것은 Jaakkola 등¹⁶⁾이 흡연이 NO₂의 주요 발생원이라고 보고한 내용한 일치함을 알 수 있다. 또한 이 결과는 가스렌지 사용량이 비슷하다고 하다고 가정한다면, 실내 흡연에 의한 NO₂ 발생량이 대략 4.21 ppbv/hr 인 것으로 추정할 수 있다. 가스렌지를 취사도구로 사용하는 주택에서 가족 수가 많으면 가스렌지의 사용이 많아질 수 있기 때문에 NO₂ 발생량이 높을 수 있다¹⁷⁾. 가족수 3명을 기준으로 할 때 가족수가 3명을 초과한 주택이 3명 이하인 주택보다 상대적으로 높은 NO₂ 발생량을 나타내었다. 주택 형태를 구분할 때 아파트가 단독주택에 비해 상대적으로 낮은 환기량을 나타내어 양 등이 아파트가 단독주택에 비해 높은 기밀성 구조로 환기율이 낮다고 보고한 내용과 일치하는 결과를 나타내었다¹⁸⁾.

4. 결론

본 연구는 공단지역 주변의 주택을 대상으로 실내 및 실외에서 측정된 NO₂ 농도를 이용하여 주택의 환기율 및 NO₂ 발생량을 추정하였다. 실내환경의 물질수지와 회귀방정식을 이용하여 추정된 대상 주택 전체의 평균 환기량은 1.41 ACH 이었으며, NO₂ 발생량은 16.5 ppbv/hr 이었다. 주택 특성을 고려할 때, 실내 흡연이 있는 주택의 NO₂ 발생량은 19.52 ppbv/hr로 흡연이 없는 주택에 비해 높았으며, 가족수가 많은 주택의 NO₂ 발생량도 높았다. 아파트의 환기량은 단독주택에 비해 상대적으로 낮은 값을 보여 기존 연구결과와 비슷하였다. 따라서 다중측정에 의한 환기량 및 대상 오염물질의 실내 발생량을 추정할 수 있었다.

감사의글

본 연구는 환경부 국립환경과학원의 지원에 의하여 수행되었음

참고 문헌

- 1) 양지연, 김호현, 신동천, 김윤신, 손종렬, 임준환, 임영욱, 2008, 일부 미적용 다중이용시설의 실내 공기 중 알데히드류 및 휘발성유기화합물 노출로 인한 건강위해성 평가, 한국환경과학회지, 17(1), 45-56.
- 2) Skillas G., Huglin C. H., Siegmann H. C., 1999, Determination of air exchange rates of rooms and deposition factors for fine particles by means of photoelectric aerosol sensors, Indoor Built Environment, 8, 246-254.
- 3) Leaderer B. P., Schaap L., Dietz R. N., 1985, Evaluation of the perfluorocarbon tracer technique for determining infiltration rates in residences, Environmental Science and Technology, 19, 1225-1232.
- 4) Moschandreas D. J., Relwani S. M., 1987, Emission rates from range top-burner assessment of measurement methods, Atmospheric Environment, 21, 285-289.
- 5) Kraenzmer M., 1999, Modeling and continuous monitoring of indoor air pollutants for identification of sources and sinks, Environment International, 25(5), 541-551.
- 6) Cyrus J., Heinrich J., Richter K., Wolke G., Wichmann H. E., 2000, Sources and concentrations of indoor nitrogen dioxide in Hamburg and Erfurt, the Science of the Total Environment, 250, 51-62.
- 7) Sexton K., Letz R., Spengler D., 1983, Estimating human exposure to nitrogen dioxide: an indoor/outdoor modeling approach, Environmental Research, 32, 151-166.
- 8) World Health Organization (WHO), 1987, Air Quality Guidelines for Europe, European Series No. 23. WHO, Copenhagen, Denmark, 297-310.
- 9) Bauer M. A., Utell M. J., Morrow P. E., Speers D. M., Gibb H. P., 1986, Inhalation of 0.3 ppmv nitrogen dioxide potentiates exercise-induced bronchospasm in asthmatics, Am.Rev.Respir.Dis., 134, 1203-1208.
- 10) Yanagisawa Y., Nishmura H., 1982, A badge-type personal sampler for measurement of personal exposures to NO₂ and NO in ambient air, Environment International, 8, 235-242.
- 11) 양원호, 변재철, 김영희, 김대원, 손부순, 이정은, 2005, 발생원에 따른 일부 학교 교실의 실내공기질 평가 사례연구, 한국환경과학회지, 14(10), 979-983.
- 12) Tichenor B. A., Sparks L. A., White J. B., Jackson M.D., 1990, Evaluating sources of indoor air pollution, J. Air & Waste Manage. Assoc., 40, 487-492.
- 13) Spengler J. D., Schwab M., Ryan P. B., Colome S., Wilson A. L., Billick I. H., Becker E. J., 1994, Personal exposure to nitrogen-dioxide in the Los-Angeles basin, J. Air & Waste Manage. Assoc., 39-47.
- 14) Yang W., Lee K., Chung M., 2004, Characterization of indoor air quality using multiple measurements of nitrogen dioxide, Indoor Air, 14, 105-111.
- 15) Hargreaves P. R., Leidi A., Grubb H. J., Howe M. T., Muggleston M. A., 2000, Local and seasonal variation in atmospheric nitrogen dioxide levels at Rothamsted, UK, and relationships with meteorological conditions, Atmospheric Environment, 34, 843-853.
- 16) Jaakkola M. S., Jaakkola J. J. K., 1997, Assessment of exposure to environmental tobacco smoke, European Respiratory Journal, 10, 2384-2397.
- 17) 고영림, 양원호, 정문호, 2002, 서울시 일부 음식점 종업원의 간접흡연 노출량 측정, 한국환경위생학회지, 28(2), 173-182.
- 18) 양원호, 손종렬, 손부순, 2005, 구획모형을 이용한 주택에서 이산화질소의 발생강도 및 감소상수 동시 측정, 한국환경보건학회지, 31(4), 260-265.