

거주지역 실내공기 특성 및 이산화질소 노출에 관한 연구

양 원 호 · 배 현 주* · 정 문 호

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

Residence's Exposure to Nitrogen Dioxide and Indoor Air Characteristics

Won-Ho Yang, Hyun-Joo Bae*, Moon-Ho Chung

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

ABSTRACT

Indoor air quality is affected by source strength of pollutants, ventilation rate, decay rate, outdoor level and so on. Although technologies exist to measure these factors directly, direct measurements of all factors are impractical in most field studies. The purpose of this study was to develop an alternative methods to estimate these factors by multiple measurements. Daily indoor and outdoor NO₂ concentrations for 21 days in 20 houses in summer and winter, Seoul. Using a mass balance model and linear regression analysis, penetration factor (ventilation divided by sum of air exchange rate and deposition constant) and source strength factor (emission rate divided by sum of air exchange rate and deposition constant) were calculated. Subsequently, the ventilation and source strength were estimated. During sampling period, geometric mean of natural ventilation was estimated to be 1.10±1.53 ACH, assuming a residential NO₂ decay rate of 0.8 hr⁻¹ in summer. In winter, natural ventilation was 0.75±1.31 ACH. And mean source strengths in summer and winter were 14.8ppb/hr and 22.4ppb/hr, respectively. Although the method showed similar finding previous studies, the study did not measure ACH or the source strength of the house directly. As validation of natural ventilations, infiltrations were measured with CO₂ tracer gas in 18 houses. Relationship between ventilation and infiltration was statistically correlated (Pearson r=0.63, p=0.02).

Keywords: Indoor air quality, mass balance, air exchange rate, source strength

I. 서 론

실내공기질에 영향을 미치는 주요 요인은 실내 오염물질의 발생량, 환기량, 오염물질 감소율, 실내 공기 혼합정도, 실외 오염물질 농도 및 실내 공간 크기이다. 실내공간 크기와 실내 표면적은 직접 측정할 수 있으며, 환기량, 공기오염물질의 실내 발생량 및 감소율은 각기 측정방법은 있으나 실내환경인 주택에서 직접 측정하는 것은 한계가 있다.¹⁾ 실외와 실내의 공기환기는 침투

(infiltration), 자연환기(natural ventilation)와 기계환기(mechanical ventilation) 세 가지로 구분할 수 있다.²⁾ 상업건물과 공공건물에서는 기계환기 시설이 일반적이며 환기량은 덕트시스템에서 측정 가능하다.³⁾ 일반주택에서는 기계환기 시설은 드문 편이기 때문에 환기량은 수동식 perfluorocarbon tracers(PFTs)를 이용하여 측정할 수도 있지만 약 10%의 오차를 일으킬 수 있다.⁴⁾ 따라서 측정 및 분석 등의 제한점으로 주로 침투를 자연환기로 대신하여 측정한다.⁵⁾ 침투는 공기가 주택 실내로 창문이나 벽 등의 틈새로 들어오는 것으로 정의되며, 창문과 문을 열어서 공기가 실내로 유입되는 자연환기를 의미하지는 않는다. 실내에서 오염물질의 발생량은 직독기나 용액포집으로 측정할 수 있다. 가스레인지와 같은

* Corresponding author : Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University

Tel : 02-740-8881, Fax : 02-3672-1140
E-mail : bhj507@hanmail.net

연소도구에서 발생하는 이산화질소(NO_2) 발생량은 연소도구의 사용기간이 오래될수록 증가한다.⁶⁾ 또한 연소도구 작동요인, 연료 투입율, 습도 및 온도도 발생량에 영향을 준다.⁷⁾ 따라서, 일반주택에서 오염물의 발생량 측정은 일반적으로 발생원에서 발생량이 일정한 것으로 가정하고 측정하지만⁸⁾, 매일 사용량의 변화가 있기 때문에 정확한 발생량 추정은 어려움이 많다. 일반주택에서 공기오염물질의 감소율은 실외 및 실내의 침투를 이용한 환기율과 오염물질 제거율을 동시에 측정함으로써 계산할 수 있다.⁹⁾ NO_2 및 오존(O_3)과 같은 반응성 가스는 실내공간에서 실내표면과 다른 공기오염물질의 반응으로 농도가 감소한다.¹⁰⁾ 감소율은 또한 실내 온도 및 습도의 영향을 받기 때문에 매 시각 변화할 수 있다.¹¹⁾ NO_2 는 고온연소의 부산물로서 차량, 발전소 및 산업공정에서 주로 발생된다. 실내에서는 가스레인지, 석유난로 난방기, 흡연 등과 같은 연소과정에서 발생된다.¹²⁾ 또한 실내의 NO_2 농도는 공기환기량과 실내 표면반응과 같은 주택 특성에 영향을 받는다.¹³⁾ 실험실에서 조사된 NO_2 의 생체실험에 의하면 NO_2 는 호흡기와 기관지 계통에 영향을 주는 것으로 보고되었다.¹⁴⁾ 다른 연구에서는 가정 연소기구에서 발생된 비슷한 NO_2 농도에서 기관지 계통에 영향을 주는 것으로 나타났다.¹⁵⁻¹⁶⁾ 본 연구의 목적은 물질수지를 이용한 한공간모델(one-compartment model)과 선형회귀의 통계적 방법을 이용하여 측정기간 동안 환기량(자연환기) 및 NO_2 발생량을 동시에 추정함으로써 실내공기질의 특성을 파악하는 것이며, 본 연구의 결과는 실내공기질 관리 및 노출평가에 도움을 줄 것이다.

II. 연구방법

1. 조사지역

주택실내의 공기환기율 및 NO_2 의 발생량을 추정하기 위해서 정인지역에서 실내 및 실외의 NO_2 농도를 총 20주택에서 겨울철인 2000년 11

월부터 12월초까지 21일 동안 매일 NO_2 농도를 측정하였다. 그리고 여름철인 2001년 6월부터 8월초까지 21일 동안 매일 측정하였다. NO_2 개인노출은 이 기간중 주택에 거주하는 가족 중 한 명을 대상으로 2일 동안 각각 여름과 겨울에 측정하였다. 주택특성과 생활양식은 설문지에 의해서 조사하였다.

2. 측정 및 분석방법

모든 NO_2 의 농도측정은 수동식 시료채취기(passive sampler)를 이용하였다.¹⁷⁾ 수동식 시료채취기는 참여자들에게 측정방법(protocol)과 기록지(data-logger)를 함께 나누어주었으며, 설치 방법과 주의사항을 참여자에게 각각 직접 설명하였다. 수동식 시료채취기는 1주일 단위로 분배 및 수거하였다. 수동식 시료채취기의 정밀도(precision)를 분석하기 위해서 수요일마다 실내 및 실외에 각각 이중측정(duplicate measurements)하였다. 수동식 시료채취기는 가정에서 사람들이 가장 잘 모이는 거실에 설치하였으며, 측정 위치는 연소장치 발생원에서 3m 이상 그리고 창문 또는 문으로부터 2m 이상이 되도록 하였다. 실외에 설치된 수동식 시료채취기는 지면으로부터 1m 이상이 되도록 하고, 비나 눈으로부터 보호될 수 있도록 했으며 환기가 잘 되는 곳에 위치하도록 하였다.

3. 실내공기 box model

물질수지를 이용한 box model은 완전 혼합된 하나의 공간으로 공기의 유입 및 유출 사이의 관계를 기술하며 실내공기질을 설명하기 위해 자주 이용된다.¹⁸⁾ 물질수지에 의한 실내공기질 모델은 실내공기 오염물질 농도와 관련 변수들 사이의 관계를 나타낼 수 있는 유용한 방법이며, 오염물질의 확산과 이동, 오염물질 발생강도, 환기율, 제거율 등의 요인들을 기술한다.¹⁹⁾ 실내공기오염물질은 다음의 4가지 가정에 의해 결정된다. 첫째, 공기오염물질은 비압축성이다. 둘째, 공기가 실내·외로 유입 및 유출할 때 오염물질의 충돌(impaction)과 확산 등으로 인한 손실은

무시한다. 셋째, 실내 공기오염물질은 가능한 실내공간내 표면반응으로 감소 및 제거된다. 넷째, 실내에서 연소도구 및 흡연 등으로 공기오염물질이 발생된다.

일반 가정주택을 하나의 공간(one-compartment)으로 가정하면, 실내공기의 농도변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서, C_i =indoor concentration (ppm), C_o =outdoor concentration (ppm), I =air exchange rate (ACH : air exchanges per Hour, 1/hr), S =generation rate ($\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3 = \text{ppm}/\text{hr}$), R =removal rate (cm^3/hr), V =volume of the space (m^3), t =time (hr) and m =mixing factor ($0 \leq m \leq 1$).

식 (1)에서 실내오염물질(NO_2) 제거율(R)은 감소상수(K , hr^{-1})와 실내에 존재하는 부피(V)로 나타낼 수 있다.

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

식 (2)를 식 (1)에 대입하고 대상 실내공간에서 완전혼합(completely mixed condition, $m=1$)을 가정하면,²⁰⁾ 식 (1)은 다음과 같이 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

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

시간 $t=0$ 일 때 초기농도를 C_0 라면, 식 (3)에서 시간에 따른 농도변화 속도는 미분방정식을 이용하여 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$C(t) = \frac{(S + IC_o)}{I + K} [1 - e^{-(I+K)t}] + C_0 e^{-(I+K)t} \quad (4)$$

하나의 공간모델(one-compartment model)에서 NO_2 의 농도가 평형상태($t \rightarrow \infty$)에 도달할 때

시간에 따른 농도 변화는 정상상태(steady-state; $dC_i/dt=0$)로 가정할 수 있으며, 실내·외 NO_2 농도에 적용하여 식(5)에 나타내었다.

$$C_{i(ss)} = \frac{IC_o}{I+K} + \frac{S}{I+K} \quad (5)$$

여기서, $C_{i(ss)}$ = average steady-state indoor NO_2 concentration (ppm), S =average NO_2 generation rate ($\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3 = \text{ppm}/\text{hr}$) and C_o =average outdoor NO_2 concentration (ppm).

식 (4)는 식 (5)와 같이 실내 NO_2 농도 ($C_{i(ss)}$)와 실외 NO_2 농도(C_o)의 관계로 재배열할 수 있다.

$$C_{i(ss)} = \left(\frac{I}{I+K}\right)C_o + \left(\frac{S}{I+K}\right) \quad (6)$$

식 (6)에서 $I/(I+K)$ 를 A 로 대체하고, $S/(I+K)$ 는 B 로 대체하면, 식 (6)은 수학적으로 환기를 통해 실외 오염물질이 실내로 유입되는 투과요인(A : penetration factor)과 실내 오염원의 발생요인(B : source strength factor)으로 정의될 수 있다.²¹⁾ 식 (6)은 식 (7)과 같이 간단한 실내 및 실외 NO_2 농도 관계인 일차방정식으로 표현할 수 있다.

$$C_{i(ss)} = AC_o + B \quad (7)$$

식 (7)에서, 투과요인 (A)는 I 와 K 의 값이 0보다 크기 때문에 0과 1사이여야만 한다. 또한 오염원 발생요인 (B)는 S 가 0과 같거나 크기에 0 이상이어야 한다. 따라서, 일정기간 동안 다중측정으로 실내 및 실외의 NO_2 농도를 측정한다면, 식 (7)에서 일차선형회귀식을 이용하여 투과요인과 발생요인을 구할 수 있다. 본 연구에서 측정기간 동안 매일의 C_i 와 C_o 측정은 식 (7)에서 최소자승직선을 이용하여 기울기와 y 절편 값으로부터 투과요인(A)과 발생요인(B)의 값

을 계산하였다. 그리고, 투과요인(A)에서 K값을 대입하여 측정기간 동안의 평균 환기횟수(ACH)를 계산하고, 이 환기횟수를 발생요인(B)에 대입하여 측정기간 동안 평균 NO₂ 발생량을 추정하였다.

4. 통계자료처리

본 연구에서 NO₂ 농도 측정값의 자료 처리는 SPSS(version9)를 이용하였고, 모의실험(simulation)은 상용프로그램인 @Risk(Palisade Co.)를 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 주택특성

참가자는 총 20명으로 자발적이거나 권유에 의해서 참여하였다. NO₂ 농도측정은 참가자 20명 중에서 2명이 중도에서 불참하여 총 18주택에서 수행되었다. 조사된 가족의 평균수는 3.4명이었고, 단독주택은 4주택, 아파트는 14주택이었다(표 1). 실내벽의 주요 물질은 시멘트였으며, 18주택 모두에서 벽면에 벽지를 사용하였다. 18주택 모두 취사용으로 가스레인지 사용했으며, 가스 점화장치는 가스레인지 자체의 불꽃 점화장치를 사용하였다. 겨울철의 난방장치는 16주택에서 가스, 2주택은 석유를 사용한다고 응답하였다.

2. 실내 및 실외 NO₂ 농도

본 연구의 참여자 18명의 여름철 21일 동안 매일 측정된 주택 실내 및 실외의 NO₂ 평균농도는 각각 29.9±14.7ppb 및 36.2±18.9ppb를 나타내었고, 실내/실외 NO₂ 농도비는 0.88±0.22이었다. 주택 실·외의 측정기간 동안 2일을 선택하여 측정된 NO₂의 개인노출은 평균 32.4±15.3ppb였으며 주택 실내 NO₂ 농도와 실외 NO₂ 농도 사이 값을 나타내었다. 2000년 서울시 NO₂의 1년간 대기의 평균농도가 30ppb인 점을 고려할 때 다소 높은 개인노출을 나타

내었다.

NO₂ 실내농도는 실내 발생원인인 가스레인지의 고연소(thermal NO_x)에 의한 발생 및 흡연 그리고 환기에 의한 실외공기 유입에 영향을 받는다. 참여자 모든 주택에서 가스레인지를 사용했기 때문에 가스레인지에 의한 실내 NO₂ 농도 영향은 분석할 수 없었다. 실내 흡연자 유무에 의한 실내 NO₂ 농도는 비흡연자 주택 실내 농도는 28.3±13.5ppb 및 흡연자 주택 실내 농도는 34.2±12.5ppb이었다. 실내 흡연자가 3명으로 직접적 비교는 어렵지만, 실내 가스레인지의 사용으로 주요 NO₂ 발생원이 존재할 때는 흡연에 의한 NO₂ 발생은 무시할 수 있다는 Dimitroulopoulou 등의 연구결과로 설명될 수 있다.²²⁾ 따라서 실내 NO₂ 농도에 가장 큰 영향을 주는 주택특성은 가스레인지일 것으로 판단된다.

한편 겨울에 측정된 NO₂ 개인노출은 36.8±16.5ppb였으며, 주택 실내 및 실외의 평균 NO₂ 농도는 각각 34.4±16.1ppb 및 42.7±17.4ppb를 나타내었다. 실내/실외 NO₂ 농도비는 0.80±0.2로 여름에 비해 낮았으며, 이것은 겨울은 여름에 비해 상대적으로 난방 때문에 창·문 등의 개폐(開閉)가 적으므로 환기횟수가 낮아지기 때문이다. 따라서 여름의 높은 실내/실외 NO₂ 농도비는 겨울에 비해 실외 공기에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 참여자 18명의 겨울 NO₂ 노출은 여름에 비해 다소 높았으나, 짝비교(paired t-test)의 결과를 보면 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이것은 비록 개인노출 측정기간이 2일 이었지만 여름은 겨울에 비해 실외 활동이 상대적으로 높기 때문이며, 시간에 따른 활동(time-activity)이 공기오염물질에 고노출(high exposure) 또는 저노출(low exposure)될 수 있음을 나타낸다. 한편, 실내, 실외 및 개인노출의 NO₂ 농도는 근사적으로 대수정규(log-normal) 분포(p<0.05)를 나타냈기 때문에 표 2에서는 기하평균과 기하표준편차로 나타내었다.

Table 1. House characteristics of participants in this study

	Number of house (n=18)
Type of house	
Single house	4
Apartment	14
Attached garage	0
Inside smoker	3
Gas range	18
Gas water heater	16

Table 2. Measured NO₂ levels for daily 21 days and personal exposure for 2 days in summer and winter

		Summer (n=18)	Winter (n=18)
Indoor	GM(ppb)	26.2	30.4
	GSD	1.5	1.7
Outdoor	GM(ppb)	31.3	38.6
	GSD	1.7	2.0
Personal	GM(ppb)	28.9	33.3
	GSD	1.6	1.8
Indoor/outdoor		0.88±0.3	0.82±0.2

- GM : Geometric mean
- GSD : Geometric standard deviation

3. 투과요인 및 발생요인

환기를 통해 실외오염물질이 실내로 유입되는 투과요인(penetration factor)과 실내 오염원의 발생요인(source generation factor)을 계산하기 위해서, 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 실내 및 실외 NO₂ 농도 사이의 선형회귀 모델을 이용하였다. 식 (7)에서 여름과 겨울에 각각 측정된 18 주택에서의 기울기(투과요인)는 모두 0~1 사이 값을 나타내었으며, y절편(발생요인)은 모두 0 이상 값을 나타내어 선형회귀 모델을 적용할 수 있는 것으로 나타났다. 여름에 측정된 자료의 주택에서 투과요인의 평균과 표준편차는 0.54±0.11

이었고, 겨울은 0.41±0.14로 계산되었다. 이것은 겨울에 비해 여름기간이 더운 날씨로 창·문 등의 개폐가 겨울에 비해서 높음을 나타낸 것으로 생각할 수 있다. 발생원으로 발생요인의 평균과 표준편차는 여름과 겨울의 주택에서 각각 8.16±3.52와 11.1±5.10으로 겨울계절은 취사 및 난방 등으로 여름보다 높은 NO₂ 발생을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서, 이 결과는 실내공간에서 환기 및 오염물질 발생을 일정기간 동안 다중측정에 의해 실내·외 상관성을 분석할 때 차이를 보여 주택특성을 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

Table 3. Calculated penetration factor and source strength factor by equation (7) in summer and winter

	Penetration factor (Slope : A)		Source strength factor (Intercept : B)	
	M±S.D.	Range	M±S.D.	Range
	Summer (n=18)	0.54±0.1 1	0.29~0.7 8	8.16±3.52
Winter (n=18)	0.41±0.1 4	0.14~0.7 1	11.1±5.10	3.45~19.70

Table 4. Coefficients of determination (R²) between daily indoor and outdoor NO₂ concentrations for 21 days in summer and winter

	Coefficient of determination (R ²)	Minimum Maximum	
		Summer (n=18)	0.56± 0.28
Winter (n=18)	0.45± 0.23	0.30	0.70

겨울과 여름기간 동안 매일의 실내 및 실외 NO₂ 농도 사이의 결정계수(R²) 값과 주택 실내의 NO₂ 발생요인 값들 사이의 관계를 (표 4)와 (그림 1)에 나타내었다. (그림 1)에서 여름과 겨울의 모든 값에서 산발적으로 나타났으며 여름에 비해 겨울이 발생요인이 높기 때문에 오른쪽 하위부분에 비교적 많았고, 여름은 상대적으로 높은 환기회수와 적은 발생량을 고려할 때 왼쪽 윗부분에 위치하였다. 이 결과는 실내공간에 오염물질 발생원이 존재하는 주택에서 계절에 따라 결정계수와 발생요인 사이의 관계를, 실내 및 실외 측정 오염물질 사이의 결정계수(R²)와 발생요인 관계로서 구분할 수 있음을 의미한다. 즉 실내공간 발생원에 따른 주택특성을 실내 및 실외의 다중측정에 의한 결정계수 값과 발생요인 값에 의하여 표현할 수 있다.

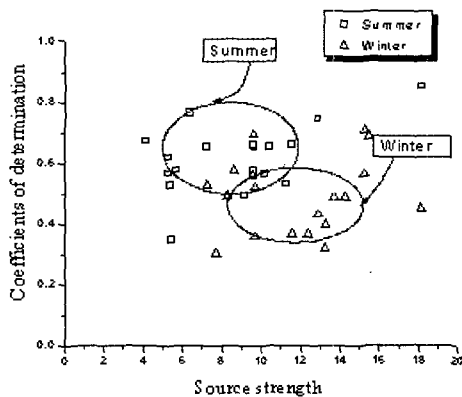


Fig. 1 Relationship between coefficient of determination (R²) of indoor and outdoor NO₂ concentrations and source strength factor of 18 houses in summer and winter.

4. NO₂ 감소율

본 연구에서 식 (6)의 NO₂ 감소상수(K, hr⁻¹) 값은 미국 등에서 보고된 것에 의하면 0.8hr⁻¹이지만, 한국과 주택구조 및 특성에 따라 다를 것으로 생각하여 Yang et al.²³⁾이 두 측정점을 이

용하여 계산한 NO₂ 감소상수(K) 값 0.94hr⁻¹을 이용하였다.²⁴⁻²⁷⁾ K값의 고정인 환기횟수 값의 오차를 야기할 수 있기 때문에 참고문헌을 이용하여 I값과 K값의 범위(평균과 표준편차)를 정하고, @Risk(Palisade Co.) 프로그램을 이용하여 Monte-Carlo 모의실험을 하였다.²⁸⁾ 참고문헌에 의하면, I 값의 변이는 밀폐형(tight) 주택의 0.5 ACH와 개방형(leaky) 주택의 3 ACH의 범위를 가지며,²⁹⁾ K값의 변이는 0.7hr⁻¹부터 2hr⁻¹까지였다. 식 (6)에서 21일 동안 연속 측정된 한 주택의 실내 및 실외 NO₂ 농도의 평균 및 표준편차를 이용하였고, 다른 요소인 NO₂ 발생량(S)은 상수값으로 고정하였다. I값을 고정하고 K값을 변화시키면서 실행한 모의실험 결과는 실내 NO₂ 농도와 실외 NO₂ 농도 사이의 상관관계(correlation coefficient)를 변화시키지 못했다. 그러나 K값을 고정하고 I값을 변화시키면서 실행한 모의실험 결과는 실내 NO₂ 농도와 실외 NO₂ 농도 사이의 관계를 변화시켰다.

5. 환기율 및 발생량 추정

식 (6)에서 투과요인에서 계산된 여름의 21일 동안 평균 환기회수는 1.28±0.85ACH이었고, 같은 방법으로 겨울철에 계산된 평균 환기회수는 0.81±0.72ACH이었다. 여름철에 측정된 환기회수가 겨울철에 측정된 환기회수 보다 높았다. 계절에 따른 18주택에서 각각 계산된 환기회수의 빈도분포는 대략적으로 대수정규 분포를 나타내었기 때문에 (p<0.05), 환기회수를 기하평균과 편차로 나타내었다(표5). 이것은 Wilson et al.이 미국 캘리포니아에서 8대략 800주택을 대상으로 측정된 공기환기량 분포가 대수정규 분포를 나타낸 것과 같은 결과를 나타내었다.²⁹⁾ 그리고 계산된 환기회수와 감소상수를 이용하여 식 (6)에서 예측된 여름의 21일 동안 NO₂ 발생량의 평균은 14.8±6.9ppb/hr이었으며, 겨울의 21일 동안 계산된 NO₂ 발생량의 평균은 22.4±9.8ppb/hr이었다 (표 6).

본 연구의 적용된 물질수지 및 회귀 모델의 검증(validation) 방법으로 18주택에서 CO₂ tracer gas를 이용하여 침투량(infiltration rate)을 측정하였다. 침투량과 자연환기는 다른 의미지만, 관련이 있는 것을 고려하여 계산된 환기횟

수와 측정된 침투량 사이의 상관관계를 (그림 2)에 나타내었다 (Spearman r=0.63, p=0.02). 따라서, 주택 실내·외 공기환기횟수를 물질수지 식을 이용해서 추정하는 것은 가능하였다.

Table 5. Estimated air exchange rate by mass balance model in summer and winter

	Air exchange rate			
	Geometric mean (ACH)	Geometric standard deviation	Minimum (ACH)	Maximum (ACH)
Summer (n=18)	1.10	1.53	0.32	3.31
Winter (n=27)	0.75	1.31	0.34	1.57

Table 6. Estimated NO₂ source strengths in electric and gas ranges by mass balance model in summer and winter

	NO ₂ source strength			
	Mean (ppb/hr)	Standard deviation	Minimum (ppb/hr)	Maximum (ppb/hr)
Summer (n=18)	14.8	6.9	3.4	31.3
Winter (n=18)	22.4	9.8	4.1	40.2

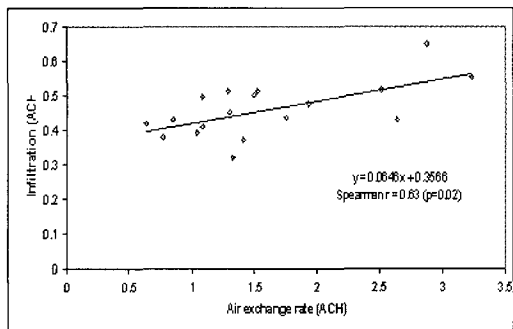


Fig. 2 Relationship between calculated natural ventilation and measured infiltration in 18 houses.

IV. 결 론

본 연구에서는 여름과 겨울 계절에 따른 주택 특성과 관련하여 일반 가정집 18주택을 21일 3주 동안 매일 연속해서 각각 실내 및 실외의 NO₂를 측정하여 농도변화를 살펴보았다. 물질수지 모델과 선형회귀 모델을 통해 연속적인 매일의 다중측정을 이용하여 측정 기간동안의 평균 실내·외 환

기회수와 NO₂ 발생량을 추정할 수 있었으며, 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 참여자 18명의 여름철 21일 동안 매일 측정된 주택 실내 및 실외의 NO₂ 기하평균 농도는 각각 26.2±1.5ppb 및 31.3±1.7ppb를 나타내었다. 실내/실외 NO₂ 농도비는 0.88±0.22이었으며, NO₂의 개인노출은 기하평균 30.4±1.7ppb이었다. 겨울에 측정된 NO₂ 개인노출은 30.4±1.7ppb였으며, 주택 실내 및 실외의 평균 NO₂ 농도는 각각 38.6±2.0ppb 및 33.3±1.8ppb를 나타내었다. 실내/실외 NO₂ 농도비는 0.80±0.2로 여름에 비해 낮았다.
2. 계절에 따른 실내 및 실외의 NO₂ 농도 관계에서 얻어진 결정계수(R²)와 발생요인의 관계로 나타낼 수 있었다. 실내 NO₂ 발생원으로 가스레인지로 고려할 때, 여름철에 측정된 결정계수(R²)와 발생요인의 관계 그림에서 왼쪽 윗 부분에 위치하였으며, 겨울철은 상대적으로 오른쪽 아랫부분에 위치하였다.
3. 여름철에 계산된 21일 동안 기하 평균 환기 횟수는 1.10±1.53ACH였고, 겨울철에 계산된

기하 평균 환기횟수는 0.75 ± 1.31 ACH이었다. 추정된 환기횟수의 검증 방법으로 18주택에서 측정된 실내·외 침투율은 환기횟수와 통계적으로 유의한 상관성을 보였다(Spearman $r=0.63$, $p=0.02$).

4. 계산된 평균 환기횟수와 NO₂ 감소상수 값을 이용하여 발생요인에서 추정된 여름의 NO₂ 발생량의 평균은 14.8 ± 6.9 ppb/hr 이었으며, 겨울의 21일 동안 계산된 NO₂ 발생량의 평균은 22.4 ± 9.8 ppb/hr 이었다.

감사의 글

본 연구는 2000-2001년도 서울대학교 두뇌한국 21사업 대학교육개혁지원비의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Skillas, G., Huglin, C.H. and Siegmann, H.C. : 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, 1999.
2. Sherman, M.H. : Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment*, 25(4), 365-374, 1990.
3. Nazaroff, W.W. and Cass, G.R. : Mathematical modeling of chemically reactive pollutants in indoor air. *Environ. Sci. Technol.*, 20, 924-934, 1986.
4. Leaderer, B.P., Schaap, L. and Dietz, R.N. : Evaluation of the perfluorocarbon tracer technique for determining infiltration rates in residences. *Environ. Sci. Technol.*, 19, 1225-1232, 1985.
5. Esmen, N.A. : The status of indoor air pollution. *Environmental Health Perspectives*, 62, 259-265, 1985.
6. Moschandreas, D.J. and Relwani, S.M. : Emission rates from range top-burner assessment of measurement methods. *Atmospheric Environment*, 21, 285-289, 1987.
7. Relwani, S.M., Moschandreas, D.J. and Billick I.H. : Effects of operational factors on pollutant emission rates from residential gas appliances. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 36, 1233-1237, 1986.
8. Kraenzmer, M. : Modeling and continuous monitoring of indoor air pollutants for identification of sources and sinks. *Environment International*, 25(5), 541-551, 1999.
9. Spicer, C.W., Coutant, R.W., Ward, G.F. and Joseph, D.W. : Rates and mechanisms of NO₂ removal from indoor air by residential material. *Environmental International*, 15, 634-654, 1986.
10. Tichenor, B.A. : Overview of source/sink characterization methods. *American Society for Testing Materials, STP 1287*, 9-19, 1996.
11. Yamanaka, S. : Decay rates of nitrogen oxides in a typical Japanese living room. *Environ. Sci. Tech.*, 18, 566-570, 1984.
12. Cyrus, J., Heinrich, J., Richter, K., Wolke, G. and Wichmann, H.E. : Sources and concentrations of indoor nitrogen dioxide in Hamburg and Erfurt. *The Science of the Total Environment*, 250, 51-62, 2000.
13. Sexton, K., Letz, R. and Spengler, D. : Estimating human exposure to nitrogen dioxide: an indoor/outdoor modeling approach. *Environmental Research*, 32,

- 151-166, 1983.
14. World Health Organization(WHO) : Air Quality Guidelines for Europe. European Series No. 23, Copenhagen, Denmark, 297-310, 1987.
 15. Bauer, M.A., Utell, M.J., Morrow, P.E., Speers, D.M. and Gibb, H.P. : Inhalation of 0.3 ppm nitrogen dioxide potentiates exercise-induced bronchospasm in asthmatics. *Am. Rev. Respir. Dis.*, 134, 1203-1208, 1986.
 16. Mohensin, V. : Airway responses to nitrogen dioxide in asthmatic subjects. *J. Toxicol. & Environ. Health*, 22, 371-380, 1987.
 17. Yanagisawa, Y. and Nishimura, H. : A badge-type personal sampler for measurement of personal exposures to NO₂ and NO in ambient air. *Environment International*, 8, 235-242, 1982.
 18. Tichenor, B.A., Sparks, L.A., White, J.B. and Jackson, M.D. : Evaluating sources of indoor air pollution. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 40, 487-492, 1990.
 19. Ott, W., Switzer, P. and Robinson, J. : Particle concentrations inside a tavern before and after prohibition of smoking: evaluating the performance of an indoor air quality model. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46, 1120-1134, 1996.
 20. Furtaw, E.J., Pandian, M.D., Nelson, D.R. and Behar, J.V. : Modeling indoor air concentrations near emission sources in imperfectly mixed rooms. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46, 861-868, 1996.
 21. Dockery, D.W. and Spengler, J.D. : Indoor-outdoor relationships of respirable sulfates and particles. *Atmospheric Environment*, 15, 335-343, 1981.
 22. Dimitroulopoulou, C., Ashmore, M.R., Byrne, M.A. and Kinnersley, R.P. : Modelling of indoor exposure to nitrogen dioxide. *Atmosphere Environment*, 35, 269-279, 2001.
 23. Yang, W., Bae, H., Yoo, S. and Chung, M. : Determination of deposition velocity for nitrogen dioxide in residence using two-point measurements. *Proceeding of the 12th World Clean Air & Environment Congress and Exhibition, Seoul, Korea, Paper No VI Session 3e*, 2001.
 24. Wade, W.A., Cote, W.A. and Yocom, J.E. : A study of indoor air quality. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 25(9), 933-939, 1975.
 25. Wikes, C.R., Koontz, M.D. and Billick, I.H. : Analysis of sampling strategies for estimating annual average indoor NO₂ concentrations in residence with gas appliance. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46, 853-860, 1996.
 26. Ryan, P.B., J.D. Spengler, and R. Letz : The effects of kerosene heaters on indoor pollutant concentrations: a monitoring and modeling study, *Atmospheric Environment*, 17, 1339-1345, 1983.
 27. Spicer, C.W., D.V. Kenny and F.W.Gerald : Transformations, lifetimes, and sources of NO₂, HONO, and HNO₃ in indoor environments, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 43, 1479-1485, 1993.
 28. Smith, R.L. : Use of Monte Carlo simulation for human exposure assessment at a superfund site, *Risk Analysis*, 14(4), 433-439, 1994.

29. Wilson, A.L., Colome, S.D., Tian, Y., Becker, E.W., Baker, P.E., Behrens, D.W., Billick, I.H. and Garrison, C.A. : California residential air exchange rates and residence volumes, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 6(3), 311-326, 1996.