

# 물질수지식을 이용한 주택의 환기량 및 이산화질소 발생량 추정

- 한국의 서울과 호주의 브리즈베인의 실내공기 비교 연구 -

## Estimation on Air Exchange Rate of Residential House and Source Strength of Nitrogen Dioxide Using Mass Balance Model

- Comparative study of indoor air in Seoul, Korea  
and in Brisbane, Australia -

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

양 원 호

Wonho Yang

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

## 1. 서론

대부분의 사람들은 80% 이상을 실내에서 생활하기 때문에 실내공기질(indoor air quality)은 개인의 오염물질 노출에 주요한 요인이 될 수 있다<sup>1)</sup>. 특히, 어떤 오염물질들은 실외보다 실내에서 높기 때문에 더 큰 건강위해를 줄 가능성이 있다. 이것은 현대 사람들이 실내에서 호흡하는 공기질이 공기 오염물질 노출에 주요한 고려 사항임을 의미한다. 또한, 건축디자인의 변화와 합성물질의 사용증가는 가정 및 작업장에서 실내공기질에 대한 빌딩증후군(SBS: sick building syndrome)의 증가를 야기시키고 있다.<sup>2)</sup>

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 실내인 현장에서 직접 측정하는 것은 한계점이 많다.<sup>3)</sup>

실외와 실내의 공기환기량은 침투(infiltration), 자연환기(natural ventilation)와 기계적환기(mechanical ventilation) 세 가지로 구분할 수 있다.<sup>4)</sup> 상업적 건물과 공공건물에서는 기계적 환기시설이 일반적이며 환기량은 덕트시스템에서 측정 가능하다.<sup>5)</sup> 일반 주택에서는 기계적환기 시설은 드문 편이기 때문에 환기량은 수동식 perfluorocarbon tracers(PFTs)를 이용하여 측정할 수 있지만 약 10%의 오차를 일으킬 수 있으며,<sup>6)</sup> 측정 및 분석 등의 제한점으로 주로 침투를 자연환기로 대신하여 측정한다.<sup>7)</sup> 침투는 공기가 주택 실내로 창문이나 벽 등의 틈새로 들어오는 것으로 정의되며, 이것은 창문과 문을 열어서 공기가 실내로 들어오는 자연환기를 의미하지는 않는다.

실내에서 오염물질의 발생량은 직독기나 용액포집에 의해서 측정될 수 있다. 가스레인지와 같은 연소도구에서 발생하는 이산화질소( $\text{NO}_2$ ) 발생량은 연소도구의 사용기간이 오래 될 수록 증가한다.<sup>8)</sup> 또한 연소도구 작동요인, 연료의 투입율, 습도 및 온도도 발생량에 영향을 준다.<sup>9)</sup> 따라서, 일반주택의 현

장에서 오염물의 발생량 측정은 일반적으로 발생원에서 발생량이 일정한 것으로 가정하여 측정하지만, 매일 사용량의 변화가 있기 때문에 정확한 발생량 측정은 어려운 실정이다.

일반 주택에서 오염물질의 감소율은 실외 및 실내의 침투를 이용한 환기량과 오염물질 제거율을 동시에 측정함으로써 계산할 수 있다.<sup>10)</sup> NO<sub>2</sub>와 SO<sub>2</sub>와 같은 반응성 가스는 실내공간에서 실내표면과 다른 공기오염물질의 반응으로 농도가 감소한다. 감소율은 실내 온도 및 습도의 영향을 받기 때문에 매시간 변화할 수 있다.<sup>11)</sup>

NO<sub>2</sub>는 고온연소의 부산물로써 차량, 발전소 및 산업공정에서 주로 발생된다. 실내에서는 가스레인지, 케로센(kerosene) 난방기, 흡연 등과 같은 연소과정에서 발생된다. 또한 실내의 NO<sub>2</sub> 농도는 공기환기량과 실내의 표면반응과 같은 주택특성에 영향을 받는다.<sup>12)</sup> 실험실에서 조사된 NO<sub>2</sub>의 생체실험에 의하면 NO<sub>2</sub>는 호흡기와 기관지 계통에 영향을 주는 것으로 보고 되었다.<sup>13)</sup> 다른 연구에서는 가정 연소기구에서 발생된 비슷한 NO<sub>2</sub> 농도에서 기과진 계통에 영향을 주는 것으로 나타났다.<sup>14,15)</sup>

본 연구에서는 호주 브리스베인(Brisbane)에서 30일 동안 그리고 한국의 서울에서 21일 동안 매일 실내 및 실외 NO<sub>2</sub> 농도를 측정하였다. 생활방식과 주택특성에 관련된 설문지를 작성하여 함께 조사하였다. 이 연구의 목적은 물질수지식과 회귀분석을 이용하여 측정기간 동안 환기량(자연환기) 및 NO<sub>2</sub> 발생량을 동시에 예측함으로써 실내공기질의 특성을 파악하는 것이다.

## II. 연구방법

### 1. 조사지역

공기환기량 및 NO<sub>2</sub>의 발생량을 추정하기 위해서 호주 북동부에 위치하는 브리스베인에서 실내 및 실외의 NO<sub>2</sub> 농도를 총 30주택에서 1999년 4월부터 6월 초까지 30일 동안 매일 측정하였다. 주택특성과 생활방식은 설문지에 의해서 조사되었다. 또한 한국의 서울에서는 총 35주택에서 2000년 6월부터 8월까지 21일 동안 매일 NO<sub>2</sub> 농도를 측정하였다.

### 2. 측정 및 분석방법

모든 NO<sub>2</sub>의 농도측정은 수동식 시료채취기(passive sampler)를 이용하였다. 수동식 시료채취기는 자연적인 기류를 이용하여 확산(diffusion)과 투과(infiltration)라는 물리적인 과정과 반응에 의한 화학적 반응을 이용하여 실내와 실외의 NO<sub>2</sub>를 측정하는 장치이다. 수동식 시료채취기는 작으며 (5x4x1cm) 가벼운 장점을 지니고 있다(15g). 수동식 시료채취기 내부에 있는 셀룰로우스 필터에 triethanolamine 용액이 흡수되어 NO<sub>2</sub>를 포집한다.<sup>16)</sup> 농도 계산에 이용된 물질전환계수(mass transfer coefficient)는 0.10cm/sec를 이용하였으며<sup>17)</sup>, NO<sub>2</sub>의 농도분석은 photo-spectrometer (Beckman DU 640)를 이용하여 정량분석을 하였다.

수동식 시료채취기는 참여자들에게 프로토콜(protocol)과 기록지(data-logger)를 함께 나누어 주었으며, 설치 방법과 주의사항을 참여자 각각 직접 설명하였다. 수동식 시료채취기는 1주일 단위로 분배 및 수거를 하였다. 수동식 시료채취기의 정밀도를 분석하기 위해서 수요일마다 실내 및 실외에 각각 이중측정(duplicate measurement)하였다. 수동식 시료채취기는 가정에서 사람들이 가장 잘 모이는 거실에 설치 되었으며, 샘플링 위치는 연소

장치 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 물질수지 모델

물질수지(mass balance) 모델식은 완전 혼합된 하나의 공간으로 공기의 유입 및 유출 사이의 관계를 기술하며 실내 공기질을 설명하기 위해 자주 이용된다.<sup>18)</sup> 물질수지에 의한 실내공기질 모델은 실내공기 오염물질 농도와 관련된 변수들 사이의 관계를 나타낼 수 있는 유용한 방법이며, 오염물질의 확산과 이동, 오염물질 발생강도, 공기환기량, 제거량 등의 요인들을 기술한다<sup>19)</sup>. 실내의 공기 오염물질은 다음의 4가지 과정에 의해 결정된다.

1. 공기 오염물질은 비압축성이다.
2. 실내공간으로 공기의 유입 및 공기의 실외로 유출 때 충돌(impaction) 및 확산 등으로 인한 손실은 무시한다.
3. 실내 공기 오염물질은 가능한 표면반응으로 감소 및 제거된다.
4. 실내에서 연소도구, 흡연 등으로 공기 오염물질이 발생된다.

일반 가정주택을 하나의 공간으로 가정하면, 실내공기의 농도변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서,

$C_i$  = indoor concentration (ppm),

$C_o$  = outdoor concentration (ppm),

$I$  = air exchange rate (1/hr),

$S$  = source strength ( $\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3$ ),

$R$  = removal rate ( $\text{cm}^3/\text{hr}$ ),

$V$  = volume of the space ( $\text{m}^3$ ).

식 (1)에서 제거율( $R$ )은 감소상수( $K$ ,  $\text{hr}^{-1}$ )와 실내의 존재하는 질량( $VC_{in}$ )으로 표현된다.

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

식 (2)을 식 (1)에 대입하면, 식 (1)은 다음과 같이 변화된다.

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

정상상태( $dC_i/dt=0$ )를 가정하면, 식 (3)은 식 (4)로 바꿀 수 있다.

$$C_i = \frac{C_o \cdot I}{I+K} + \frac{S}{I+K} \quad (4)$$

식 (4)는 식 (5)와 같이 재배열 할 수 있다.

$$C_i = \left(\frac{I}{I+K}\right) \cdot C_o + \frac{S}{(I+K)} \quad (5)$$

$I/(I+K)$ 를  $A$ 로 대체하고,  $S/(I+K)$ 는  $B$ 로 대체하면, 식 (5)는 식 (6)과 같이

간단한 일차방정식으로 표현할 수 있다.

$$C_i = AC_o + B \quad (6)$$

식 (6)은 수학적으로 환기를 통해 실외 오염물질이 실내로 유입되는 투과요인(A)과 실내 오염원의 발생요인(B)에 의해서 정의될 수 있다. 식 (6)에서, 투과요인(A)는 I와 K의 값이 0보다 크기 때문에 0과 1사이 이어야만 한다. 또한 오염원 발생요인(B)은 S가 0과 같거나 크기 때문에 0 이상이어야 한다. 따라서, 일정기간 동안 연속측정 실내 및 실외에서 동시에 수행된다면, 일차 선형회귀식을 식 (6)과 같이 구할 수 있다. 본 연구에서 측정기간 동안 매일의  $C_i$ 와  $C_o$  측정은 식 (6)에서 최소자승직선을 이용하여 기울기와 절편 값으로부터 투과요인과 발생요인의 값을 구할 수 있었다.

### III. 연구결과

#### 1. 주택특성

본 연구는 호주 브리스베인에서 30명의 참가자가 자발적으로 지원하였다. 참가자는 Queensland University of Technology의 직원 및 학교 주변의 주민이었다.  $NO_2$ 의 농도측정은 참가자 30명 중에서 2명이 측정 중에 개인 사정으로 불참하게 되어 주택 총 28가구에서 수행되었다 <Table 1>. 설문지를 이용하여 조사된 가족의 평균수는 3.4명이었고, 침대수는 3.4이었다. 실내벽의 주요 물질은 목재(주택 10가구)와 플라스터(plaster: 주택 11가구)였다. 주택 12가구가 취사용으로 가스레인지 사용했으며, Pilot light를 사용하는 주택은 없었다.<sup>20)</sup> 주택 30가구에서 64%는 난방장치가 없었으며, 케로센 또는 석탄 난방기를 사용하는 주택은 없었다.

한국의 서울에서의 참여자들은 자발적이거나 권유에 의해서 38명이 참여하였다. 참가자는 일반 시민들이었다. NO<sub>2</sub>의 농도측정은 참가자 38명 중에서 3명이 중도에서 불참하여 주택 총 35가구에서 수행되었다. 조사된 가족의 평균수는 3.5명이었고, 단독주택은 5가구, 아파트는 19가구였다. 실내벽의 주요 물질은 시멘트(24가구)였으며, 35가구 모두에서 벽면에 벽지를 하였다. 35주택 모두 취사용으로 가스레인을 사용했으며, 가스 점화장치는 가스레인지 자체의 불꽃 점화장치를 사용하였다. 난방장치는 27가구에서 가스를 사용했으며, 8가구는 석유를 사용하였다.

**Table 1. House characteristics in Brisbane, Australia and in Seoul, Korea**

		Number of house with the house characteristic	Number of house without the house characteristic
Brisbane (Australia) (n= 28)	House type (single detached house)	21	7
	Attached garage	17	11
	Inside smoker	2	26
	Gas range	16	12
	Gas water heater	8	20
Seoul (Korea) (n= 35)	House type (single detached house)	5	30
	Attached garage	0	26
	Inside smoker	20	15
	Gas range	35	0
	Gas water heater	27	8

## 2. NO<sub>2</sub> 수동식 시료채취기의 정확도 및 정밀도

2000년 7월에 이산화질소 수동식 시료채취기 2개씩을 각 이화동, 남가좌 1동, 불광동의 대기오염 측정망의 측정기 흡입구간 바로 옆에 설치하였다. 설치된 2개의 시료채취기 사이는 약 10-20cm 정도의 거리를 유지하였다. 고정 측정소에서 측정된 자료는 1시간 평균치로 수동식 시료채취기 측정시간과 동일한 시간을 평균하여 <Table 2>에 나타내었다. 정확도는 고정측정값을



기준으로 수동식 시료채취기의 측정값을 나누어 계산하였다. 불광동의 평일 2일 측정값은 측정기의 고장으로 매우 낮은 값을 나타내었다. 모든 수동식 시료채취기의 측정값이 고정측정소의 측정값 보다 높은 값을 나타내었다. 불광동의 평일 측정값을 제외한 정확도의 평균값은 약 107.9%로 수동식 시료채취기의 측정값이 과장된 측정값을 나타낼 수 있는 것으로 나타났다.<sup>21)</sup> 수동식 시료채취기는 최대 20% 오류를 야기할 수 있으며, 그 오류의 대부분은 바람의 영향 때문이다.<sup>16)</sup> 고정측정소의 위치가 보통 3-4층 건물의 옥상에 설치되어있으며 기류의 속도가 높은 것을 고려할 때, 고정측정소의 측정값 보다 높은 값을 나타낸 것으로 생각된다.<sup>22)</sup>

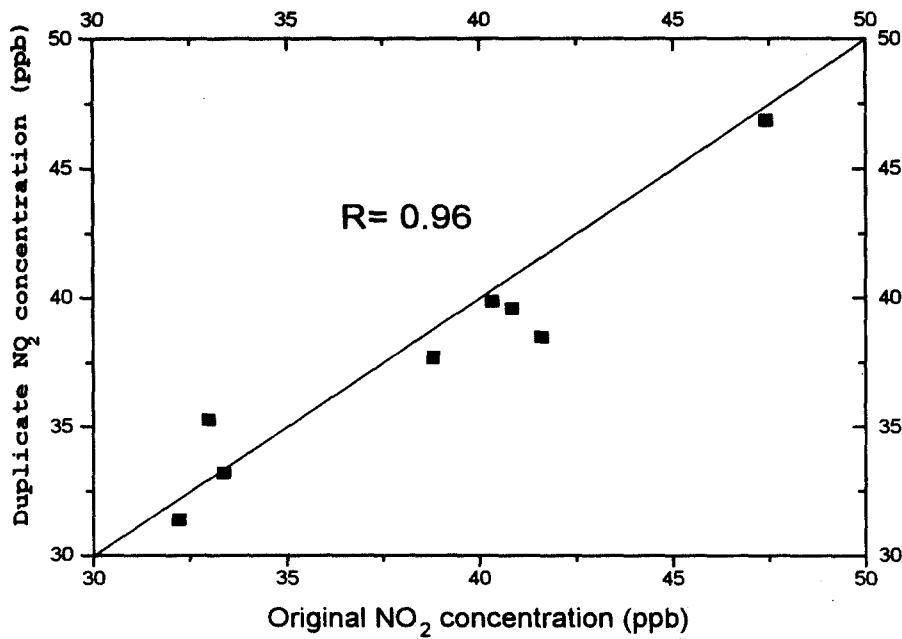
**Table 2. Accuracy(%) between on-site chemiluminescence monitors and passive sampler levels (Unit: ppb).**

	Yeehwa-Dong			Namgaza 1-Dong			Bulkwang-Dong		
	weekday (2days)	weekday (2days)	weekend (2days)	weekday (2days)	weekday (2days)	weekend (2days)	weekday (2days)	weekday (2days)	weekend (2days)
Chemiluminescence measurement on-site monitor	43.4	37.2	34.6	35.7	29.9	32.3	N.D.	N.D.	31.5
Passive monitor	47.1 (±1.2)	39.0 (±2.1)	38.3 (±0.7)	40.2 (±0.8)	32.2 (±0.7)	33.3 (±0.6)	37.1 (±0.3)	38.1 (±0.5)	34.1 (±1.6)
Accuracy of passive sampler (%)	108.5	104.8	110.7	112.6	107.7	103.1	N.A.	N.A.	108.3

N.D.: not detected

N.A.: not applicable

불광동 평일의 측정값을 제외한 고정측정소의 측정값과 수동식 시료채취기의 측정값 사이의 상관관계를 <Figure 1>에 나타내었다. 두 측정값 사이의 Pearson 상관계수는 0.97였으며 통계학적으로 유의하였다 ( $p < 0.001$ ).



**Fig. 1. Correlation between measurements of NO<sub>2</sub> with passive monitors and on-site chemiluminescence monitors.**

호주 브리스베인서 수행된 연구의 이중측정된 측정값을 이용하여 수동식 시료채취기의 상대정밀도를 분석하였다. 매주 수요일마다 실행된 이중측정의 상대정밀도는 각 이중측정의 절대 차이의 표준편차를 총 평균농도로 나누어 계산하였다. NO<sub>2</sub>의 측정은 모든 수동식 시료채취기에서 8.5%의 상대정밀도를 보였다. 실내 및 실외의 샘플링 장소에 따른 정밀도 측정은 실내에서 7.1%와 실외에서 11.3%를 나타내었다. 실내에서 이중측정된 수동식 시료채취기간의 상관계수는 0.98 ( $r = 0.98$ )이었으며, 실외의 상관계수는 0.96 ( $r = 0.96$ )였다. 본 연구의 결과는 수동식 시료채취기의 높은 정밀도를 나타낼 수 있는 값으로 여겨질 수 있었다. 비교적 높은 정밀도를 보였으며 실외 보단 실내에서 높은 정밀도를 보였다. 이것은 확산과 투과의 원리를 이용한 수동식 시료채취기는 바람 속도의 영향을 많이 받기 때문에 실외 측정의 정밀도는 상대적으로 실내보다 낮았다. Matthews(1987) 등의 연구에 의하면 일반

주택의 평균 실내 속도는 0.07m/sec였으며<sup>23)</sup>, 상대적으로 실외의 바람속도는 실내보단 높다. 이중측정에서 실내 및 실외의 평균 농도 및 표준편차와 상대정밀도를 <Table 3>에 나타내었다.

**Table 3. Relative standard deviations(RSD) and correlation coefficients between original and duplicate measurement in indoor and outdoor**

	Mean ( $\pm$ STD)		Total mean both original and duplicate (3)	Absolute difference between (1) and (2)	RSD (%)	Correlation coefficient (R)
	Original (ppb) (1)	Duplicate (ppb) (2)				
Indoor level (n=90)	11.72 ( $\pm$ 7.15)	11.63 ( $\pm$ 6.99)	11.7	0.83	7.1	0.98
Outdoor level (n=88)	15.85 ( $\pm$ 8.82)	16.01 ( $\pm$ 8.90)	15.9	1.80	11.3	0.96

### 3. 실내 및 실외 이산화질소 농도

호주의 브리스베인에서 측정된 각각의 28가구에서 실내 NO<sub>2</sub>의 30일 동안 평균농도는 12.6ppb( $\pm$ 8.2)이었고, 농도 범위는 0.2~60.2ppb였다. 실외 NO<sub>2</sub>의 평균농도는 15.5ppb( $\pm$ 8.5)였다. 평균 실내 및 실외의 농도비는 0.85였고, 표준편차는 0.41이었다 <Table 4>. 서울에서는 측정된 35가구에서 실내 NO<sub>2</sub>의 21일 동안의 평균농도는 30.4ppb( $\pm$ 15.2)이었고, 실외는 36.9ppb( $\pm$ 19.2)였다. 브리스베인과 비교하여 서울의 실외 및 실내의 NO<sub>2</sub> 농도는 높았으며, 실내/실외 농도비도 상대적으로 높았다.

**Table 4. Mean and standard deviation of NO<sub>2</sub> concentrations**

		Mean (ppb)	Standard deviation	Minimum	Maximum
Brisbane (n= 28)	Indoor	12.6	8.2	0.2	60.2
	Outdoor	15.5	8.5	0.1	58.8
	Indoor/outdoor	0.85	0.41	0.15	4.06
Seoul (n= 35)	Indoor	30.4	15.2	2.4	85.2
	Outdoor	36.9	19.2	2.97	112.38
	Indoor/outdoor	0.88	0.32	0.18	4.17

실내 NO<sub>2</sub> 농도는 흡연, 가스레인지의 사용, 차고, 침대수 및 실내 주된 재질 등과 같은 주택특성과 관련이 있다.<sup>24)</sup> 본 연구에서 호주의 브리스베인에서 주택특성과 관련하여 취사용 가스레인지의 사용유무가 실내 NO<sub>2</sub> 농도에 가장 큰 영향을 주는 요인이었다 <Table 5>. 이 결과를 토대로 가스레인지를 사용하는 주택에서 평균 실내 NO<sub>2</sub> 농도는 17.0ppb였고, 가스레인지를 사용하지 않는 주택에서 평균 실내 NO<sub>2</sub> 농도는 9.6ppb였다. 실내 및 실외 NO<sub>2</sub> 평균 농도비는 전기레인지와 가스레인지를 취사용으로 사용하는 주택에서 각각 0.7±0.3 및 0.9±0.3였다. 한국의 서울에서는 측정된 35가구 모두가 취사용으로 가스레인지를 사용하여 주택특성과 관련된 특성을 알 수 없었다. 또한 측정기간이 여름철이어서 난방이나 온수의 석유와 가스 방식에 의한 실내 NO<sub>2</sub> 농도는 신뢰도 95%에서 차이를 보이지 않았다.

**Table 5. House characteristic associated with indoor NO<sub>2</sub> level in Brisbane, Australia**

	Mean indoor NO <sub>2</sub> with characteristics (ppb)	Mean indoor NO <sub>2</sub> without characteristics (ppb)	p-value
Gas range	17.0 ± 7.4	9.6 ± 4.5	0.003
Attached garage	16.1 ± 8.9	10.6 ± 4.3	0.038
Gas waterheater	16.8 ± 8.0	11.1 ± 5.9	0.047

#### 4. 투과요인 및 발생요인

환기를 통해 실외 오염물질이 실내로 유입되는 투과요인과 실내 오염원의 발생요인을 계산하기 위해서, 실내 및 실외 NO<sub>2</sub> 농도사이의 선형회귀 방정식을 계산하였다. 식 (6)에서 계산되어진 기울기와 절편은 각각 투과요인 (penetration factor)과 발생요인(source strength factor)을 의미한다. 호주 브리스베인 28주택에서 기울기 값들은 1주택을 제외하고 모두 0과 1사이 에 놓여 있었다. 그리고, 절편 값들은 28주택 모두에서 0이상 이었다. 한국 서울의 35주택에서 기울기 값들은 모두 0과 1사이 에 었으며, 절편 값들은 모두 0이 상 이었다. 따라서, 이용된 물질수지식이 연속적 다중측정에 의해 투과요인 과 발생요인을 예측하는 것은 적합하였다. 브리스베인에서 전기레인지와 가 스레인지에서 기울기의 평균과 표준편차는 각각  $0.65(\pm 0.18)$ 과  $0.56(\pm 0.12)$  였으며, 서울에서는 가스레인지에서 기울기의 평균과 표준편차는  $0.58(\pm 0.12)$ 였다. 브리스베인에서 절편의 평균과 표준편차는 전기레인지와 가스레인 지에서 각각  $1.49\pm 1.25$ 와  $5.77\pm 3.55$ 였고, 서울에서는 가스레인지에서  $9.12\pm 4.50$ 였다. 투과 요인(A: 기울기)과 발생요인(B: 절편) 사이에 관계는 <Figure 2>에 나타내었다.

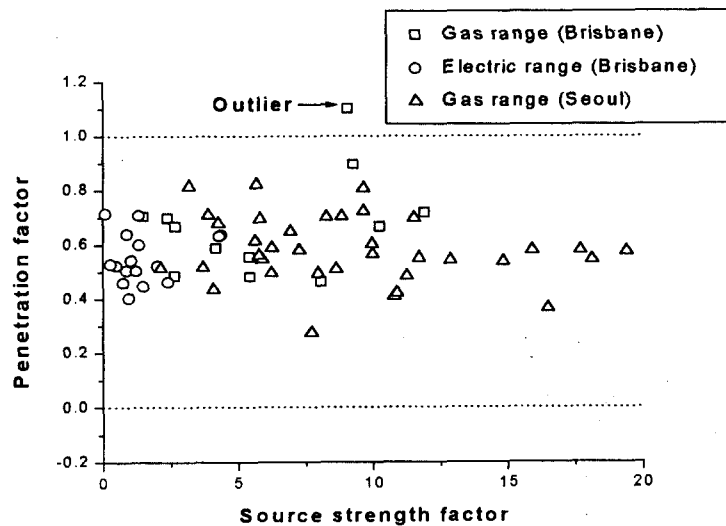


Figure 2. Relationship between penetration factor and source strength factor.

상관분석 결과를 이용하여, 기울기 값이 0과 1사이를 벗어난 1 주택을 제외한 브리스베인의 27주택에서 30일 동안 매일의 실내 및 실외 NO<sub>2</sub> 농도 사이의 관계를 계산하였다. 계산된 결정계수(R<sup>2</sup>)의 평균 및 표준편차는 전기레인지와 가스레인지에서 각각 0.70±0.13 및 0.57±0.21였다. 서울의 35주택에서 21일 동안 매일의 실내 및 실외 NO<sub>2</sub> 농도 사이에서 계산된 결정계수(R<sup>2</sup>)의 평균 및 표준편차는 가스레인지에서 0.52±0.20였다. 결정계수와 발생요인 사이의 관계는 <Figure 3>에 나타내었다.

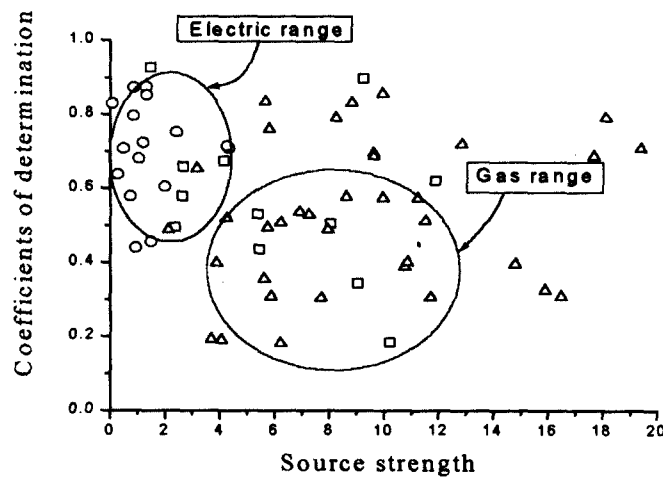


Figure 3. Relationship between coefficient of determination and source strength.

## 5. 환기량 및 발생량 추정

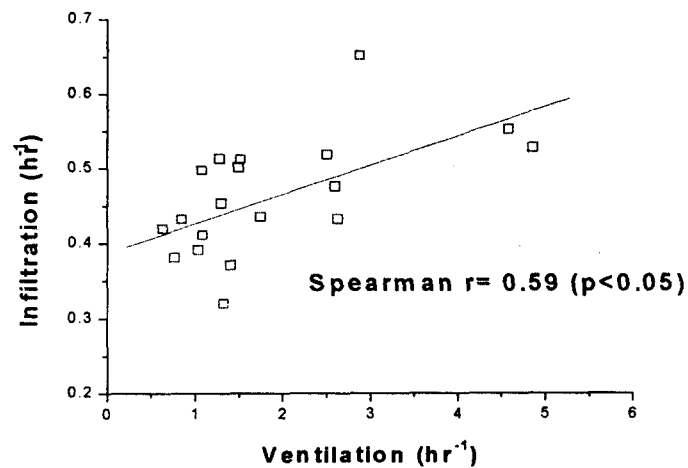
투과요인에서 환기량과 발생요인에서 발생량이 각 27주택에서 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 계산되었다. 식(5)에서 K 값은 참고문헌에 인용하여 0.8/hr로 가정하였다.<sup>25,26,27,28)</sup> 식 (5)에서 투과요인에서 계산된 브리스베인의 27주택 각각의 30일 동안 평균 환기량은 1.19/hr±0.48였고, 서울은 1.32/hr±0.81였다. 브리스베인의 27주택과 서울의 35주택에서 각각 계산된 환기량의 빈도분포는 대략적으로 Log-normal 분포를 보였다.<sup>29)</sup> 브리스베인에서 30일 동안 계

산된 NO<sub>2</sub> 발생량의 평균과 표준편차는 6.9cm<sup>3</sup>/hr · m<sup>3</sup>±8.1였으며, 서울에서는 18.4cm<sup>3</sup>/hr · m<sup>3</sup>±9.2였다. 주택특성을 고려하면 브리스베인에서 전기레인지를 사용하는 주택에서 계산된 NO<sub>2</sub> 발생량의 평균은 12.7cm<sup>3</sup>/hr · m<sup>3</sup>였고, 표준편차는 9.8였다. 또 가스레인지를 사용하는 주택에서 계산된 발생량의 평균은 2.8cm<sup>3</sup>/hr · m<sup>3</sup>였고, 표준편차는 2.6였다 <Table 6>. 전기레인지와 가스레인지를 사용하는 주택에서 NO<sub>2</sub> 발생량은 통계학적으로 유의한 차이를 보였다 (p<0.001).

**Table 6. Calculated source strengths**

		Mean (cm <sup>3</sup> /hr · m <sup>3</sup> )	Standard deviation	Minimum	Maximum
Brisbane	Electronic (16 houses)	2.8	2.6	0.3	9.6
	Gas (11 houses)	12.7	9.8	4.1	33.1
Seoul	Gas (35 houses)	18.4	9.2	3.5	39.8

본 연구의 적용된 모델식을 검정의 방법으로 21주택에서 CO<sub>2</sub> tracer gas를 이용하여 침투량을 측정하였다. 그리고 계산된 환기량(ventilation)과 측정된 침투량(infiltration) 사이의 상관관계를 <Figure 4>에 나타내었다 (Spearman r= 0.59).



**Figure 4. Relationship between calculated ventilation rate and infiltration.**

## V. 결 론

본 연구에서는 호주 브리스베인과 한국의 서울의 주택특성과 관련하여 일반 가정집 28가구와 35가구를 30일과 21일 동안 매일 연속해서 각각 실내 및 실외의 NO<sub>2</sub>를 측정하여 농도변화를 살펴보았다. 실내공기질은 발생원, 환기량, 오염물질의 감소율, 공기의 혼합정도 및 실외 오염물질 농도에 의하여 영향을 받기 때문에 직접적으로 실내공기질을 결정하는 것은 불가능하다. 각 요인들은 측정될 수 있지만, 측정기술의 제한 때문에 실제 일반 주택에서 측정하는 것은 한계가 있다. 물질수지식과 회귀분석을 통해 지속적인 매일의 다중측정은 측정기간동안 평균 환기량과 NO<sub>2</sub> 발생량을 예측할 수 있었으며, NO<sub>2</sub> 발생원에 따른 실내공기 특성을 파악할 수 있었다. 또한 다른 공기 오염물질에 적용가능 할 것이다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 호주 브리스베인에서 주택특성과 관련하여 취사용으로 가스레인지의 사용유무가 실내 NO<sub>2</sub> 농도에 가장 중요한 영향을 미치는 주는 요인이었다 ( $p=0.003$ ). 가스레인지를 사용하는 가구에서 실내 평균 NO<sub>2</sub> 농도는 17.0ppb였으며, 전기레인지를 사용하는 가구에서는 9.6ppb였다.

2. 주택특성은 실내 및 실외의 NO<sub>2</sub> 농도 관계에서 얻어진 결정계수( $R^2$ )와 발생요인의 관계로 나타낼 수 있었다. 실내 NO<sub>2</sub> 발생원으로 가스레인지를 고려할 때, 전기레인지를 사용하는 주택들은 왼쪽 윗 부분에 위치하였으며, 가스레인지를 사용하는 주택들은 산발적이며 오른쪽 하위 부분에 위치하였다.

3. 물질수지식과 회귀분석을 통하여 투과요인과 발생요인을 계산하였다. 물질수지식에 의하면 투과요인은 0과 1사이에 발생요인은 0이상 이여야 한다. 한국의 서울과 호주의 브리스베인 모든 주택에서 한 주택을 제외한 62주택에서 투과요인은 0과 1 사이였다. 또한 발생요인은 63주택 모두에서 0이상 이었다. 따라서, 물질수지식이 연속적 다중측정에 의해 투과요인과 발생



요인을 예측하는 것은 적합하였다.

4. 환기량과 NO<sub>2</sub> 발생량이 투과요인과 발생요인에서 각각 계산되었다. 호주의 브리스베인에서 측정된 27주택에서 계산된 30일 동안의 평균 환기량은 1.19/hr(±0.48)였다. 27주택에서 계산된 NO<sub>2</sub> 평균 발생량은 6.9cm<sup>3</sup>/hr · m<sup>3</sup>(±8.1)였다. 가스레인지로 사용하는 11주택에서 예측된 NO<sub>2</sub> 발생량은 평균 12.7cm<sup>3</sup>/hr · m<sup>3</sup>였으며, 표준편차는 9.8이었다. 전기레인지와 가스레인지를 사용하는 주택에서 NO<sub>2</sub> 발생량은 통계학적으로 유의한 차이를 보였다 (p<0.001). 한국의 서울에서 측정된 35주택에서 계산된 21일 동안의 평균 환기량은 1.1/hr(±1.7)였다. 가스레인지를 사용하는 35주택에서 예측된 NO<sub>2</sub> 평균 발생량은 18.4cm<sup>3</sup>/hr · m<sup>3</sup>(±9.2)였다.

#### 감사의 글

본 연구는 Korea-Australia Fellowship에 의하여 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

#### REFERENCES

- 1) Levy JI, Lee K, Spengler JD, Yanagisawa Y, Bischof W, Braathen O, Chung Y, Coward S, Gutschmidt K, Jin K, Korenaga T, Ohkoda Y, Pastuszka J, Patil RS, Qing X, Raizenne M, Romieu I, Salonen R, Sega K, Seifert B, Shah S, Torres E, Yoon D, and Zhang X: Impact of residential nitrogen dioxide exposure on personal exposure: An international study. Journal of the Air & Waste Management Association 1998; 48: 553-560.
- 2) Wood J.E.; An Engineering approach to controlling indoor air quality. Environmental Health Perspectives 1991; 95: 15-21.

- 3) Skillas G., Huglin Ch. 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* 1999; 8: 246-254.
- 4) Esmen N.A.; The status of indoor air pollution. *Environmental Health Perspectives* 1985; 62: 259-265.
- 5) Nazaroff W.W., and Cass G.R.; Mathematical modeling of chemically reactive pollutants in indoor air. *Environ Sci Technol* 1986; 20: 924-934.
- 6) Leaderer B.P., Schaap L. and Dietz R.N.; Evaluation of the perfluorocarbon tracer technique for determining infiltration rates in residences. *Environ Sci Technol* 1985; 19: 1225-1232.
- 7) Sherman M.H.; Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment* 1990; 25(4): 365-374.
- 8) Moschandreas D.J. and Relwani S.M.; Emission rates from range top-burner assessment of measurement methods. *Atmospheric Environment* 1987; 21: 285-289.
- 9) 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* 1986; 36: 1233-1237.
- 10) Spicer C.W., Coutant R.W., Ward G.F. and Joseph D.W.; Rates and mechanisms of NO<sub>2</sub> removal from indoor air by residential material. *Environmental International* 1989; 15: 634-654.
- 11) Yamanaka S.; Decay rates of nitrogen oxides in a typical Japanese living room. *Environ Sci Tech* 1984; 18: 566-570.
- 12) Sexton K., Letz R. and Spengler D.; Estimating human exposure to nitrogen dioxide: an indoor/outdoor modeling approach. *Environmental*

Research 1983; 32: 151-166.

13) World Health Organization (WHO), Air Quality Guidelines for Europe. European Series No. 23. WHO: Copenhagen, Denmark 1987; 297-310.

14) 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 1986; 134: 1203-1208.

15) Mohensin V.: Airway responses to nitrogen dioxide in asthmatic subjects. J Toxicol & Environ Health 1987; 22: 371-380.

16) Yanagisawa Y. and Nishmura H.: A badge-type personal sampler for measurement of personal exposures to NO<sub>2</sub> and NO in ambient air. Environment International 1982; 8: 235-242.

17) Lee K., Yanagisawa Y., Spengler J.D. and Billick I.H.: Wind velocity effects of sampling rate of NO<sub>2</sub> badge. J Expos Anal Environ Epi 1992; 2: 207-219.

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 1990; 40: 487-492.

19) Kraenzmer M.: Modeling and continuous monitoring of indoor air pollutants for identification of sources and sinks. Environmental International 1999; 25(5): 541-551.

20) Spengler J.D., Schwab M., Ryan P.B., Colome S., Wilson A.L., Billick I.H., and Becker E.J.: Personal exposure to nitrogen-dioxide in the Los-Angeles basin. Journal of the Air & Waste Management Association 1994; 39-47.

21) Berglund, M., Vahter M. and Bylin G.: Measurement of Personal Exposure to NO<sub>2</sub> in Sweden - Evaluation of a Passive Sampler. Journal

of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology 1992, 2(3), 295-307.

22) Treitman, R.D., Ryan P.B., Harlos D.P., Soczek M.L., Yanagisawa Y., Spengler J.D. and Billick I.H.: Sampling and Analysis of Nitrogen Dioxide and Respirable Particles in the Indoor Environment. Monitoring Methods for Toxics in the Atmosphere, ASTM STP 1052, American Society for Testing and Materials 1990, Philadelphia, 197-212.

23) Matthews, T.G., Thompson C.V., Wilson D.L., Hawthorne A.R. and Mage D.T.: Air Velocities Inside Domestic Environments: An Important Parameter for Passive Sampler Monitoring. The 4th International Conference on Indoor Air Quality and Climate 1987, Berlin, West Germany.

24) Spengler J.D., Schwab M., Ryan P.B., Colome S., Wilson A.L., Billick I.H., and Becker E.J.: Personal exposure to nitrogen-dioxide in the Los-Angeles basin. Journal of the Air & Waste Management Association 1994; 39-47.

25) Wikes C.R., Koontz M.D. and Billick I.H.: Analysis of sampling strategies for estimating annual average indoor NO<sub>2</sub> concentrations in residence with gas appliance. Journal of the Air & Waste Management Association 1996; 46: 853-860.

26) Wade III W.A., Cote W.A., and Yocom J.E.: A study of indoor air quality. Journal of the Air Pollution Control Association 1975; 25(9): 933-939.

27) Ryan P.B., Spengler J.D., and Letz R.: The effects of kerosene heaters on indoor pollutant concentrations: a monitoring and modeling study. Atmospheric Environment 1983; 17: 1339-1345.

28) Traynor G.W., Apte M.G., Dillworth J.F., Hollowell C.D., and

Sterling E.M.: The effects of ventilation on residential air pollution due to emissions from a gas-fired range. *Environment International* 1982; 8: 447-452.

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. *J Expos Anal Environ Epi* 1996; 6(3): 311-326.