

## 이산화질소 다중측정을 이용한 실내공기의 환기량 및 발생량 추정에 관한 연구

서울대학교 보건대학원<sup>1)</sup>, Queensland University of Technology<sup>2)</sup>  
양원호<sup>1)</sup> · 이기영<sup>2)</sup> · 정문호<sup>1)</sup> · 정문식<sup>1)</sup>

### -Abstract-

### A Study on Estimation on Air Exchange Rate and Source Strength in Indoor Air Using Multiple Measurements of Nitrogen Dioxide

Won-Ho Yang<sup>1)</sup> · Ki-Young Lee<sup>2)</sup> · Moon-Ho Chung<sup>1)</sup> · Moon-Shik Zong<sup>1)</sup>

*Graduate School of Public Health, Seoul National University, Korea<sup>1)</sup>*  
*School of Public Health, Queensland University of Technology, Australia<sup>2)</sup>*

Daily indoor and outdoor nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) concentration for 30 days were measured in 28 houses with questionnaire of housing characteristics in Brisbane, Australia. Using mass balance equation and regression analysis, penetration factors and source strength factors were calculated. The penetration factors of 27 houses except one house were between zero and 1, though penetration factor should be between zero and 1 by means of mass balance equation. Relationship between indoor and outdoor concentrations in each 27 house was calculated using regression analysis. According to the obtained linear regression equation, the slope means penetration factor and the intercept means source strength factor. Calculated mean and standard deviation of coefficients of determination (R<sup>2</sup>) in electric and gas range houses were 0.70±0.13 and 0.57±0.21, respectively. The source strength factors were more than zero in 27 houses. Mean and standard deviation of slopes in electric and gas

range houses were 0.65±0.18 and 0.56±0.12, respectively. Mean and standard deviation of intercepts in electric and gas range houses were 1.49±1.25 and 5.77±3.55, respectively. Air exchange rate and source strength were calculated from penetration factor and source strength factor, respectively. Geometric mean and standard deviation of calculated air exchange rates in 27 houses were 1.1/hr±1.5. Presence of gas range was the most significant factor contributing to indoor NO<sub>2</sub> level in house characteristics (p=0.003). In gas range houses, source strengths ranged from 4.1 to 33.1cm<sup>3</sup>/hr·m<sup>3</sup> with a mean 12.7cm<sup>3</sup>/hr·m<sup>3</sup> and a standard deviation 9.8. The source strengths of gas range houses were significantly different from those of electric range houses by t-test (p<0.001).

**Key Words:** Indoor air quality, Nitrogen dioxide,  
Mass balance, Air exchange rate,  
Source strength

접수일 : 2000년 1월 20일, 채택일 : 2000년 4월 24일

\* 본 연구는 Korea-Australia Fellowship에 의하여 수행되었습니다.

† 교신저자 : 서울시 종로구 연건동 28, 서울대학교 보건대학원 환경보건학과

Tel) 02-740-8870, E-mail) yangwonho@hotmail.com

## I. 서론

대부분의 사람들은 90% 이상을 실내에서 생활하기 때문에 실내공기질(indoor air quality)은 개인의 오염물질 노출에 주요한 요인이다(Levy et al., 1998). 특히, 어떤 오염물질들은 실외보다 실내에서 높기 때문에 더 큰 건강위해를 줄 가능성이 있다. 이것은 현대 사람들이 실내에서 호흡하는 공기질이 공기오염 물질 노출에 주요한 고려 사항임을 의미한다. 또한, 건축디자인의 변화와 합성물질의 사용증가는 가정 및 작업장에서 실내공기질에 대한 빌딩증후군(SBS: sick building syndrome)의 증가를 야기시키고 있다(Wood, 1991).

실내공기질에 영향을 미치는 주요 요인은 실내 오염물질 발생강도, 환기량, 오염물질 감소율, 실내 공기 혼합정도, 실외 오염물질 농도 및 실내공간 크기이다. 실내공간 크기와 실내 표면적은 직접측정 할 수 있으나, 환기량, 실내 오염물질의 발생량, 감소율은 각기 측정방법은 있으나 현장에서 직접 측정하는 것은 제한점이 많다.

실외와 실내의 공기환기량은 침투(infiltration), 자연환기(natural ventilation)와 기계적환기(mechanical ventilation) 세 가지로 나눌 수 있다(Esmen, 1985). 상업적 건물과 공공건물에서는 기계적환기 시설이 일반적이지만, 일반 주택에서는 기계적환기 시설은 드문 편이다. 그러므로, 일반주택에서 공기환기량은 자연환기를 측정해야 하지만 측정의 제한점으로 주로 침투를 이용하여 측정한다. 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. 가스레인지에서 발생하는 이산화질소( $\text{NO}_2$ )의 발생량은 사용기간이 오래 될 수록 증가한다(Moschandreas과 Relwani, 1987). 또한 작동요인, 연료의 투입율, 실내 습도 및 온도도 발생량에 영향을 준다(Relwani, 1986). 따라서, 일반 주택

현장에서 오염물질의 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 환기량과 오염물질 제거율을 동시에 측정함으로써 계산할 수 있다(Spicer, 1989).  $\text{NO}_2$ 와  $\text{SO}_2$ 와 같은 반응성 가스는 실내공간에서 실내표면과 다른 공기오염물질의 반응으로 농도가 감소한다. 감소율은 실내 온도 및 상대습도의 영향을 받기 때문에 매 시각 크게 변한다(Yamanka, 1984).

$\text{NO}_2$ 는 고온연소의 부산물로서 차량, 발전소 및 산업공정에서 주로 발생된다. 실내에서는 가스레인지, 케로센(kerosene) 난방기, 흡연 등과 같은 연소과정에서 발생된다. 또한 실내의  $\text{NO}_2$  농도는 공기환기량(air exchange rate)과 실내의 표면반응과 같은 주택특성에 영향을 받는다(Sexton et al., 1983). 실험실에서 조사된  $\text{NO}_2$ 의 생체실험에 의하면  $\text{NO}_2$ 는 호흡기와 기관지계에 영향을 주는 것으로 보고되었다(WHO, 1987). 다른 연구에서는 가정 연소기구에서 발생한 결과와 비슷한  $\text{NO}_2$  농도에서 기도에 영향을 주는 것으로 나타났다(Bauer et al., 1986; Mohensin, 1987).

본 연구에서는 호주 브리스베인(Brisbane)에서 30일 동안 매일 실내 및 실외  $\text{NO}_2$  농도를 측정하였다. 생활방식과 주택특성에 관련된 설문지를 작성하여 함께 조사하였다. 이 연구의 목적은 물질수지식과 회귀분석을 이용하면서 30일 동안의 평균 공기환기량 및 평균  $\text{NO}_2$  발생강도를 동시에 예측함으로써 실내 공기질의 특성을 파악하는 것이다.

## II. 연구방법

### 1. 조사지역

공기환기량 및  $\text{NO}_2$ 의 발생강도를 추정하기 위해서, 호주 북동부에 위치하는 브리스베인에서 실내 및

실외의 NO<sub>2</sub> 농도를 1999년 4월부터 6월 초까지 30일 동안 매일 측정하였다. 주택특성과 생활방식은 설문지에 의해서 조사되었다.

## 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(5×4×1cm) 가벼운 장점을 지니고 있다(15g). 수동식 시료채취기 내부에 있는 셀룰로우스 필터에 triethanolamine 용액이 흡수되어 NO<sub>2</sub>를 포집한다(Yanagisawa과 Nishimura, 1982). 농도 계산에 이용된 물질전환계수(mass transfer coefficient)는 0.10cm/sec를 이용하였으며(Lee et al., 1992), NO<sub>2</sub>의 농도분석은 photospectrometer (Beckman DU 640)를 이용하여 정량분석을 하였다. 수동식 시료채취기는 부품(badge case, spacer)을 이용하여 Queensland University of Technology의 보건연구소에서 직접 제조 및 분석 하였다.

수동식 시료채취기는 30명에게 프로토콜(protocol)과 기록지(data-logger)를 함께 나누어 주었으며, 설치 방법과 주의사항을 30명에게 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 설치되었으며, 샘플링 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 물질수지 모델

물질수지(mass balance) 모델은 실내공기질을 설명하기 위해 자주 이용된다. 물질수지에 의한 실내공기질 모델은 실내공기 오염물질 농도와 관련 변수들 사이의 관계를 나타낼 수 있는 유용한 방법이다(Nazaroff과 Cass, 1986). 실내공기질 모델들은 오염물질의 확산과 이동, 오염물질 발생강도, 공기환기량, 제거량 등의 요인들을 기술한다. 주택을 하나의 공간으로 가정하면, 실내공기의 농도변화는 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서,

- C<sub>i</sub>= indoor concentration (ppm),
- C<sub>o</sub>= outdoor concentration (ppm),
- I= air exchange rate (1/hr),
- S= source strength (cm<sup>3</sup>/hr · m<sup>3</sup>),
- R= removal rate (cm<sup>3</sup>/hr),
- V= volume of the space (m<sup>3</sup>).

식 (1)에서 제거율(R)은 감소상수(K, hr<sup>-1</sup>)와 실내의 존재하는 질량(VC<sub>i</sub>)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 (4)가 구해질 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 A로 대체하고,  $S/(I+K)$ 는 B로 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 (5)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, 다중측정이 실내 및 실외에서 동시에 수행된다면, 일차선형회귀식을 식 (6)과 같이 구할 수 있다. 본 연구에서 30일 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 30명의 참가자가 자발적으로 지원하였다. 참가자는 Queensland University of Technology의 직원 및 학교 주변의 주민이었다.  $\text{NO}_2$ 의 농도측정은 참가자 30명중에서 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 (Spengler et al., 1994). 주택 30가구에서 64%는 난방장치가 없었으며, 케로센 또는 석탄 난방기를 사용하는 주택은 없었다. 샘플링 기간동안 약 93%가 창문을 자주 열고 있는 것으로 나타났다.

#### 2. 상대정밀도

이중측정(duplicate measurement)을 이용하여 수

Table 1. House characteristics in 28 houses

	Number of house with the house characteristic	Number of house without the house characteristic
House type (single detached house)	21	7
Number of bedroom (=1 or 2)	7	21
Attached garage	17	11
Smoker	2	26
Gas range	16	12
Gas water heater	8	20
Window open	26	2

동식 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.

### 3. 실내 및 실외 이산화질소 농도

측정된 각각의 28가구에서 실내 NO<sub>2</sub>의 30일 동안 평균농도는 12.6ppb이었고, 표준편차는 8.2였다. 실내의 측정된 농도 범위는 0.2~60.2ppb였다. 실외 NO<sub>2</sub>의 30일 동안 평균농도는 15.5ppb였고, 표준편차는 8.5였다. 실외의 측정된 농도 범위는 0.1~58.8였다. 평균 실내 및 실외의 농도비는 0.85였고, 표준편차는 0.41이었다 (Table 2).

실내 NO<sub>2</sub> 농도는 흡연, 가스레인지의 사용, 차고, 침대수 및 실내 주된 재질 등과 같은 주택특성과 관련이 있다(Spengler et al., 1994). 본 연구에서는 주택특

성과 관련하여 취사용 가스레인지의 사용유무가 실내 NO<sub>2</sub> 농도에 가장 큰 영향을 주는 요인이었다 (Table 3). 이 결과를 토대로 가스레인을 사용하는 주택에서 평균 실내 NO<sub>2</sub> 농도는 17.0ppb였고, 가스레인을 사용하지 않는 주택에서 평균 실내 NO<sub>2</sub> 농도는 9.6ppb였다. 실내 및 실외 NO<sub>2</sub> 평균 농도비는 전기레인지와 가스레인을 취사용으로 사용하는 주택에서 각각  $0.7 \pm 0.3$  및  $0.9 \pm 0.3$ 였다.

### 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 투과요인과 발생요인을 의미한다. 28주택에서 기울기 값들은 1주택을 제외하고 모두 0과 1 사이에 놓여 있었다. 그리고, 절편 값들은 28주택 모두에서 0 이상 이었다. 따라서, 물질수지식이 연속적 다중측정에 의해 투과요인과 발생요인을 예측하는 것은 적합

Table 2. Mean and standard deviation of NO<sub>2</sub> concentrations, and ratio of indoor to outdoor concentration for 30 days in total 28 houses

	Mean (ppb)	Standard deviation	Minimum	Maximum
Indoor	12.6	8.2	0.2	60.2
Outdoor	15.5	8.5	0.1	58.8
Indoor/outdoor ratio	0.85	0.41	0.15	4.06

Table 3. House characteristic associated with indoor NO<sub>2</sub> concentration

	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 water heater	16.8 ± 8.0	11.1 ± 5.9	0.047

하였다. 전기레인지와 가스레인지에서 기울기의 평균과 표준편차는 각각  $0.65 \pm 0.18$ 과  $0.56 \pm 0.12$ 였다. 절편의 평균과 표준편차는 각각  $1.49 \pm 1.25$ 와  $5.77 \pm 3.55$ 였다. 투과 요인(A: 기울기)과 발생요인(B: 절편) 사이에 관계는 Fig. 1에 나타내었다.

상관분석 결과를 이용하여, 기울기 값이 0과 1사이

를 벗어난 1 주택을 제외한 27주택에서 30일 동안 매일의 실내 및 실외  $\text{NO}_2$  농도 사이의 관계를 계산하였다. 계산된 결정계수( $R^2$ )의 평균 및 표준편차는 전기레인지와 가스레인지에서 각각  $0.70 \pm 0.13$  및  $0.57 \pm 0.21$ 였다. 결정계수와 발생요인 사이의 관계는 Fig. 2에 나타내었다.

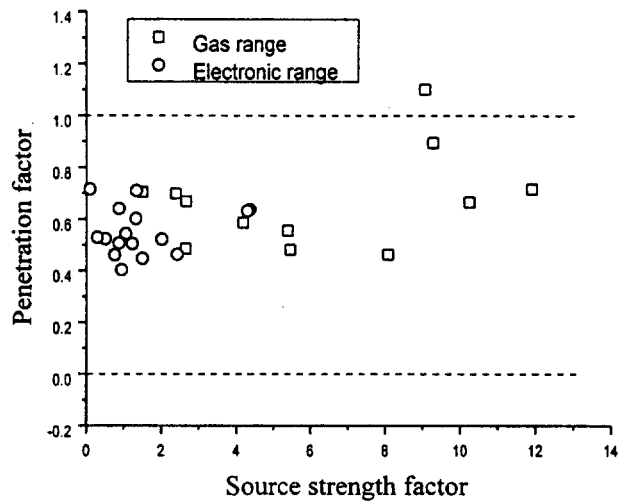


Figure 1. Relationship between penetration factor and source strength factor.

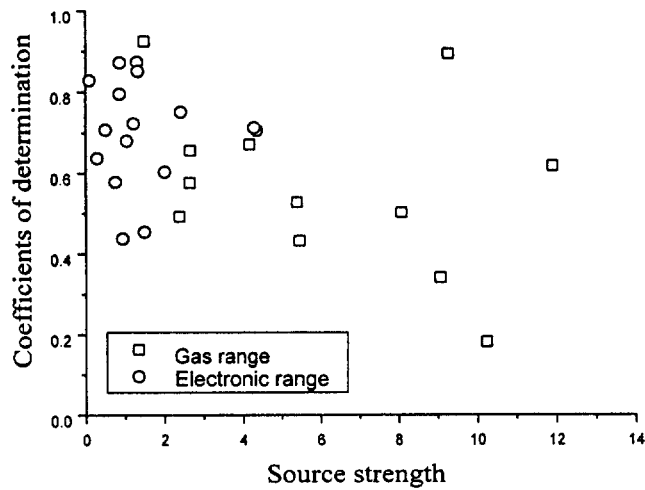


Figure 2. Relationship between coefficient of determination and source strength.

## 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(Wikes et al., 1996; Wade III et al., 1975; Ryan et al., 1983; Traynor et al., 1982). 식 (5)에서 투과요인에서 계산된 27주택 각각의 30일 동안 평균 환기량의 기하평균과 기하표준편차는  $1.1/\text{hr} \pm 1.5$ 였다. 각 27주택에서 계산된 환기량의 빈도분포는 대략적으로 Lognormal 분포를 보였다(Wilson et al., 1996). 30일 동안 계산된 NO<sub>2</sub> 발생량의 평균과 표준편차는  $6.9\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3 \pm 8.1$ 였다. 주택특성을 고려하여, 전기레인지어를 사용하는 주택에서 계산된 NO<sub>2</sub> 발생량의 평균은  $12.7\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3$ 였고, 표준편차는 9.8였다. 또 가스레인지어를 사용하는 주택에서 계산된 발생량의 평균은  $2.8\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3$ 였고, 표준편차는 2.6였다 (Table 4). 전기레인지와 가스레인지어를 사용하는 주택에서 NO<sub>2</sub> 발생량은 통계학적으로 유의한 차이를 보였다 ( $p < 0.001$ ).

## IV. 고찰

브리스베인(Brisbane)의 거주지에서 30일 동안 매일 측정된 실내 및 실외 NO<sub>2</sub> 농도의 표준편차는 보스턴(Boston) 거주지역의 자료로 시뮬레이션 하여 예측된 표준편차보다 다소 낮은 값을 보였다(Ryan et al., 1988). 그 이유는 매일의 다중측정이 자기상관

(autoregression) 관계가 있기 때문으로 생각된다. 실외의 바람속도가 실내보다 높기 때문에, 실외 NO<sub>2</sub> 농도의 표준편차가 실내의 표준편차보다 높았다. 가스레인지어를 사용하는 주택들의 실내 및 실외의 농도비가 다른 연구에 비해서 낮게 나타났으며(Levy et al., 1998), 이것은 참가자들의 93%가 측정기간 동안 자주 창문을 열고 있었기 때문으로 판단되었다.

실내 NO<sub>2</sub>의 농도는 취사용으로 가스레인지의 사용과 강하게 연관되어 있었다. 또한 실내 NO<sub>2</sub>의 농도는 전기레인지어를 사용하는 주택에 비해서 가스레인지어를 사용하는 주택에서 더 높은 표준편차를 보였다. 이것은 가스레인지의 사용정도 및 사용강도, 또는 NO<sub>2</sub>와 관련하여 환기량과 감소율과 같은 발생원에 영향을 주는 요인 때문 일 것이다. Sexton 등(1983)은 전기와 가스레인지어를 사용하는 주택에서 실내 NO<sub>2</sub>의 농도는 실외 NO<sub>2</sub> 농도의 약 60%와 40%로 각각 예측하였다. 이 연구에서는 전기 및 가스레인지어를 사용하는 주택에서 실내 NO<sub>2</sub>의 농도는 실외농도의 65%와 56%를 각각 나타내었다. 이것은 창문 등의 자주 열어놓고, 주택들이 외부와 환기량이 큰 주택구조를 갖고 있었기 때문에 높은 값을 나타낸 것으로 사료된다.

주택특성을 결정계수와 발생요인 사이의 관계로 나타낼 수 있었다 (Fig. 2). 전기레인지어를 사용하는 주택들은 Fig. 2에서 왼쪽 부분에 위치하고 있었으며, 가스레인지어를 사용하는 주택들은 주로 오른쪽 부분에 산발적으로 위치하고 있었다. 가스레인지어를 이용하는 주택에서 산포도가 높았는데, 이것은 가스레인지의 사용량이 매일마다 차이가 있기 때문으로 생각된다. 가스레인지어를 사용하는 주택들은 오른쪽과 오른쪽 하위 부분에 위치하고 있었다.

Table 4. Calculated source strengths for 30 days in each electric and gas range house

	Mean ( $\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3$ )	Standard deviation	Minimum	Maximum
Electronic (16 houses)	2.8	2.6	0.3	9.6
Gas (11 houses)	12.7	9.8	4.1	33.1

식 (5)에서 환기량을 투과요인에서 추정하기 위해서 K(감소상수) 값을 고정시켰다. K 값의 고정이 환기량 값의 오차를 야기할 수 있기 때문에, 참고문헌을 이용하여 I 값과 K 값의 범위를 정하고 @Risk 프로그램을 이용하여 몬테칼로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 하였다(Smith, 1994). 참고문헌에 의하면, I 값은 0.5ACH와 3ACH의 범위를 가지며, K 값의 변이는 0.8/h로부터 3/h까지였다. 시뮬레이션 결과에 의하면, K의 값의 변화는 식 (5)에서 다른 요인들을 고정시키면서 I 값에 영향을 끼치지 못했다. 그리고, 호주의 주택특성은 미국과 비슷하기 때문에, NO<sub>2</sub>의 감소율은 0.8/hr로 가정하였다.

환기량과 NO<sub>2</sub> 발생량을 예측하기 위해서, 본 연구에서는 물질수지식과 회귀분석을 이용하였다. 주택에서 환기량과 발생량을 정확히 측정하는 것은 각각의 측정방법이 있지만 현장에서는 각기 한계점을 가지고 있다. 식 (5)에 의하면, 투과요인은 0과 1 사이에 있어야 하며 발생요인은 0이상 이하여야 한다. 1주택을 제외한 27주택에서 투과요인과 발생요인이 이 범위에 속하였다. 따라서, 대기 NO<sub>2</sub> 농도를 고정된 대기 자동 측정망에서 구할 수 있다면, 실내의 다중측정을 이용하여 측정기간 동안 평균 환기량 및 발생량을 예측할 수 있을 것이다. 또한 다른 공기오염물질에도 적용가능 할 것이다.

## V. 결 론

본 연구에서는 호주 브리스베인의 주택특성과 관련하여 일반 가정집 28가구를 30일 동안 매일 연속해서 실내 및 실외의 NO<sub>2</sub>를 측정하여 농도변화를 살펴 보았다. 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 한계 때문에 실제 일반 주택에서 측

정하는 것은 한계가 있다. 물질수지식과 회귀분석을 통해, 지속적인 매일의 다중측정은 측정기간동안 평균 환기량과 발생량을 예측할 수 있었으며, 본 연구의 결과는 실내의 NO<sub>2</sub> 및 다른 공기 오염물질에 관한 연구에 기초자료가 될 것이다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 이중측정(duplicate measurement)을 이용하여 상대정밀도를 분석하였다. NO<sub>2</sub>의 측정은 모든 수동식 시료채취기에서 8.5%의 상대정밀도를 보였다. 샘플링 장소에 따른 측정은 실내에서 7.1%와 실외에서 11.3%를 나타내었다
2. 측정된 각각의 28가구에서 실내의 NO<sub>2</sub>의 30일 동안 평균농도는 12.6ppb이었고, 표준편차는 8.2였다. 또한 실내의 측정된 농도 범위는 0.2~60.2ppb였다. 실외 NO<sub>2</sub>의 30일동안 평균농도는 15.5ppb였고, 표준편차는 8.5였다. 실외의 측정된 농도 범위는 0.1~58.8ppb였다. 평균 실내 및 실외의 농도 비는 0.85였고, 표준편차는 0.41이었다
3. 주택특성과 관련하여 취사용으로 가스레인지의 사용유무가 실내 NO<sub>2</sub> 농도에 가장 중요한 영향을 미치는 주는 요인이었다 (p=0.003). 가스레인지 사용 하는 가구에서 실내 평균 NO<sub>2</sub> 농도는 17.0ppb였으며, 전기레인지를 사용하는 가구에서는 9.6ppb였다.
4. 주택특성은 실내 및 실외의 관계에서 얻어진 결정계수(R<sup>2</sup>)와 발생요인의 관계로 나타낼 수 있었다. 전기레인지를 사용하는 주택들은 왼쪽 윗 부분에 위치하였으며, 가스레인지를 사용하는 주택들은 산발적이며 오른쪽 하위 부분에 위치하였다.
5. 물질수지식과 회귀분석을 통하여, 투과요인과 발생요인을 계산하였다. 물질수지식에 의하면 투과요인은 0과 1 사이에 있어야만 하며, 발생요인은 0이상 이하여야만 했다. 한 주택을 제외한 27주택에서 투과요인은 0과 1 사이였다. 또한 발생요인은 28주택 모두에서 0이상 이었다. 따라서, 물질수지식이 연속적 다중측정에 의해 투과요



인과 발생요인을 예측하는 것은 적합하였다.

- 환기량과 발생량이 투과요인과 발생요인에서 각각 계산되었다. 27주택에서 계산된 30일 동안의 평균 환기량의 기하평균 및 표준편차는  $1.1/\text{hr} \pm 1.5$ 였다. 27주택에서 계산된  $\text{NO}_2$  평균 발생량 및 표준편차는  $6.9\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3 \pm 8.1$ 였다. 가스레인지 사용 11주택에서 예측된  $\text{NO}_2$  발생량은 평균  $12.7\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3$ 였으며, 표준편차는 9.8이었다. 전기레인지와 가스레인지를 사용하는 주택에서  $\text{NO}_2$  발생량은 통계학적으로 유의한 차이를 보였다 ( $p < 0.001$ ).

## 감사의 글

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

## REFERENCES

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, 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.

Wood JE. An Engineering approach to controlling indoor air quality. *Environmental Health Perspectives* 1991; 95: 15-21.

Sexton K, Letz R, Spengler D. Estimating human exposure to nitrogen dioxide: an indoor/outdoor modeling approach. *Environmental Research* 1983; 32: 151-166.

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

Bauer MA, Utell MJ, Morrow PE, Speers DM, Gibb HP Inhalation of 0.3 ppm nitrogen dioxide potentiates exercise-induced bronchospasm in asthmatics. *Am Rev Respir Dis* 1986; 134: 1203-1208.

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

Esmen NA. The status of indoor air pollution. *Environmental Health Perspectives* 1985; 62: 259-265.

Moschandreas DJ and Relwani SM. Emission rates from range top-burner assessment of measurement methods. *Atmospheric Environment* 1987; 21: 285-289.

Relwani SM, Moschandreas DJ, Billick IH Effects of operational factors on pollutant emission rates from residential gas appliances. *Journal of the Air Pollution Control Association* 1986; 36: 1233-1237.

Spicer CW, Coutant RW, Ward GF, Joseph DW. Rates and mechanisms of  $\text{NO}_2$  removal from indoor air by residential materials. *Environmental International* 1989; 15: 634-654.

Yamanaka S. Decay rates of nitrogen oxides in a typical Japanese living room. *Environ Sci Tech* 1984; 18: 566-570.

Yanagisawa Y and Nishmura H. A badge-type personal sampler for measurement of personal exposures to  $\text{NO}_2$  and  $\text{NO}$  in ambient air. *Environment International* 1982; 8: 235-242.

Lee K, Yanagisawa Y, Spengler JD, Billick IH Wind velocity effects of sampling rate of  $\text{NO}_2$  badge. *J Expos Anal Environ Epi* 1992; 2: 207-219.

Nazaroff WW and Cass GR. *Mathematical*

modeling of chemically reactive pollutants in indoor air. *Environ Sci Technol* 1986; 20: 924-934.

Spengler JD, Schwab M, Ryan PB, Colome S, Wilson AL, Billick IH, Becker EJ. Personal exposure to nitrogen-dioxide in the Los-Angeles basin. *Journal of the Air & Waste Management Association* 1994; 39-47.

Smith RL. Use of Monte Carlo simulation for human exposure assessment at a Superfund site. *Risk Analysis* 1994; 14(4): 433-439.

Wikes CR, Koontz MD, Billick IH. 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.

Wade III WA, Cote WA, Yocom JE. A study of indoor air quality. *Journal of the Air Pollution Control Association* 1975; 25(9): 933-939.

Ryan PB, Spengler JD, Letz R. The effects of

kerosene heaters on indoor pollutant concentrations: a monitoring and modeling study. *Atmospheric Environment* 1983; 17: 1339-1345.

Traynor GW, Apte MG, Dillworth JF, Hollowell CD, Sterling EM. The effects of ventilation on residential air pollution due to emissions from a gas-fired range. *Environment International* 1982; 8: 447-452.

Wilson AL, Colome SD, Tian Y, Becker EW, Baker PE, Behrens DW, Billick IH, Garrison CA. California residential air exchange rates and residence volumes. *J Expos Anal Environ Epi* 1996; 6(3): 311-326.

Ryan PB, Soczek ML, Spengler JD, Billick IH. The Boston residential NO<sub>2</sub> characterization study I. Preliminary evaluation of the survey methodology. *Journal of the Air Pollution Control Association* 1988; 38: 22-27.