

구획모델을 이용한 주택에서 이산화질소의 발생강도 및 감소상수 동시 추정

양원호 · 손부순* · 손종렬**

대구가톨릭대학교 산업보건학과, *순천향대학교 환경보건학과, **고려대학교 보건대학

Estimation of Source Strength and Deposition Constant of Nitrogen Dioxide Using Compartment Model

Won-Ho Yang · Bu-Soon Son* · Jong-Ryeul Sohn**

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

*Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University

**College of Health Science, Korea University

(Received May 3, 2005; Accepted July 16, 2005)

ABSTRACT

Indoor air quality might be affected by source strength of indoor pollutants, ventilation rate, decay rate, outdoor level, and so on. Although technologies measuring these factors exist directly, direct measurements of all factors are not always practical in most field studies. The purpose of this study was to develop an alternative method to estimate the source strength and deposition constant by application of multiple measurements. For the total duration of 60 days, indoor and outdoor NO₂ concentrations every 3 days were measured in 30 houses in Seoul, Asan and Daegu. Using a compartment model by mass balance 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 source strength and deposition constant were estimated. Natural ventilation was 1.80 ± 0.42 ACH, 1.11 ± 0.50 ACH, 0.92 ± 0.26 ACH in Seoul, Asan and Daegu, respectively. Calculated deposition constant(K) and source strength of NO₂ in this study were 0.98 ± 0.28 hr⁻¹ and 16.28 ± 7.47 ppb/h, respectively.

Keywords: nitrogen dioxide, indoor air, compartment model, source strength, deposition constant

I. 서 론

실내공기오염의 주요 원인은 인구의 밀집화, 현대사회의 실내 생활화, 실내공간의 밀폐화 등으로 도시의 집중화가 증가될수록 심화되고 있다. 실내공기오염은 각종 실내환경에서 공기오염, 생활쓰레기, 소음, 악취 등의 각종 환경오염에 이르기까지 다양한 형태로 발생될 수 있으며 이 중에서도 실내공기오염은 대표적으로 인간의 건강까지 위협하고 있다.¹⁾

실내공기질에 영향을 미치는 주요 요인은 실내오염물질의 발생량, 환기량, 오염물질 감소율, 실내 공기 혼합

정도, 실외 오염물질 농도 및 실내환경 체적이다. 실내 환경 체적, 실내 표면적, 환기량은 직접 측정할 수 있으며, 공기오염물질의 실내 발생량 및 감소율은 각기 측정방법은 있으나 실내 환경에서 직접 측정하는 것은 한계가 있다.²⁾

실내에서 오염물질의 발생량은 직독기나 용액포집으로 측정할 수 있다. 가스렌지(gas range)와 같은 연소도구에서 발생하는 이산화질소(NO₂) 발생량은 연소도구의 사용기간이 오래될수록 증가한다.³⁾ 또한 연소도구 작동요인, 연료 투입율, 습도 및 온도도 발생량에 영향을 준다.⁴⁾ 따라서, 일반주택에서 오염물질의 발생량 측정은 일반적으로 발생원에서 발생량이 일정한 것으로 가정하고 측정하지만,⁵⁾ 매일 사용량의 변화가 있기 때문에 정확한 발생량 추정은 어려움이 많다. 일반 주택에서 공기오염물질의 감소율은 실외 및 실내의 침투를 이

†Corresponding author : Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University
Tel: 82-41-530-1270, Fax: 82-41-530-1272
E-mail : sonbss@sch.ac.kr

용한 환기율과 오염물질 제거율을 동시에 측정함으로써 계산할 수 있다.⁶⁾ NO₂와 오존(O₃) 같은 반응성 가스는 실내환경에서 실내표면과 다른 공기오염물질의 반응으로 농도가 감소할 수 있다.⁷⁾ 감소율은 또한 실내 온도 및 습도의 영향을 받기 때문에 매 시간 변화할 수 있다.⁸⁾ NO₂는 고온연소의 부산물로서 차량, 발전소 및 산업공정에서 주로 발생하며, 실내에서는 가스렌지, 석유난로 난방기, 흡연 등과 같은 연소과정에서 발생된다.⁹⁾ 또한 실내의 NO₂ 농도는 공기환기량과 실내 표면 반응과 같은 주택특성에 영향을 받는다.¹⁰⁾

질소산화물에 의한 건강장해는 호흡기 자극제로서 기침, 점액성 또는 거품성 객담 생성, 호흡곤란, 흉통, 폐부종의 증상과 증후, 청색증, 빈호흡(tachypnea), 빈맥, 눈자극 증상을 나타낸다.¹¹⁾ 가정 연소기구에서 발생된 NO₂ 농도에서 기관지 계통의 건강 영향을 주는 것으로 보고되고 있다.^{12,13)}

본 연구는 실내공기질 모델에 적용될 주택 실내 NO₂의 발생강도 및 감소상수를 구획모델과 선형회귀식을 이용하여 동시에 추정하는 것이다. 이 결과는 실내공기질 모델에 직접적으로 적용할 수 있으며 실내공기질 관련 노출평가 및 위해성평가, 그리고 실내공기질 관리에 유용하게 이용될 수 있다.

II. 연구대상 및 방법

1. 조사지역

NO₂의 발생강도와 감소상수를 추정하기 위해서 서울, 아산, 대구에서 각각 10주택씩 총 30주택에서 2004년 8월부터 9월까지 60일 동안 3일 간격으로 연속 측정하였다. 주택특성과 생활양식은 설문지에 의해서 조사되었다.

2. 측정 및 분석방법

NO₂ 농도측정은 수동식 시료채취기(passive sampler)를 이용하였다.¹⁴⁾ 참여자들에게 측정방법(protocol)과 기록지(recording paper)를 나누어 주었으며, 수동식 시료채취기의 설치 방법과 주의사항을 참여자에게 각각 직접 설명하였다. 수동식 시료채취기는 2주 단위로 분배 및 수거하였다. NO₂ 수동식 시료채취기는 거실에 설치하였으며, 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 비교적 잘 되는 곳에 위치하도록 하였다.

3. 환기량 측정

환기량은 추적가스(tracer gas)를 이용하여 직접 측정할 수 있다. 이상적인 추적가스의 특성은 비반응성, 무독성이며, 저농도에서 측정 가능해야 한다. 추적가스를 이용하면서 환기량의 측정은 추적가스 감소법(tracer decay), 일정 주입법(constant injection), 일정 농도법(constant concentration)의 세 가지 방법에 의하여 가능하다. 이 중 추적가스 감소법은 일반적으로 가장 많이 사용되는 방법이다. 추적가스 감소법에서 환기량을 계산하는 방법은 회귀방법(regression), 감소방법(decay) 및 두 시간점 측정방법(finite difference)을 이용한다.¹⁵⁾ 본 연구에서는 CO₂ 표준가스를 이용하여 주택실내의 CO₂ 농도가 약 1500 ppm에 도달했을 때 CO₂ 표준가스를 정지시키고 5분마다 CO₂를 농도를 측정하여 주택의 CO₂ 농도가 약 600 ppm 정도에 이르면 측정을 중지하였다. CO₂ 표준가스 분사 전에 충분히 Fan을 이용하여 완전혼합(complete mixing) 상태로 하였으며 주택의 CO₂ 농도가 약 1500 ppm에 이르면 Fan은 정지시키고 약 5분 후로부터 CO₂ 농도를 측정하였다 (TSI Inc., Model 8762, USA).

4. 실내공기 구획모델

물질수지를 이용한 구획모델은 완전 혼합된 하나의 공간으로 공기의 유입 및 유출 사이의 관계를 기술하며 실내공기질을 설명하기 위해 자주 이용된다.¹⁶⁾ 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.¹⁷⁾ 일반 가정주택을 1구획(one-compartment)으로 가정하면, 실내공기의 농도변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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 (cm³/hr · m³=ppm/hr), R=removal rate (cm³/hr), V=volume of the space (m³), t=time (hr) and m=mixing factor (0≤m≤1).

식 (1)에서 실내오염물질(NO₂) 제거율(R)은 감소상수(K, hr⁻¹)와 실내에 존재하는 부피(V, m³)로 나타낼 수 있다.

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

식 (2)을 식 (1)에 대입하고 대상 실내환경에서 완전 혼합(completely mixed condition, $m = 1$)을 가정하면,¹⁸⁾ 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 농도변화는 미분방정식을 이용하여 식 (4)로 나타낼 수 있다.

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

구획모델(one-compartment model)에서 NO_2 의 농도가 평형상태($t = \infty$)에 도달할 때 시간에 따른 농도 변화는 정상상태($dC_i/dt = 0$)로 가정할 수 있으며, 실내의 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 농도와($C_{i(ss)}$)와 실외 NO_2 농도(C_o)의 관계로 재배열 할 수 있다.

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

식 (6)에서 $I/(I + K)$ 를 A로 대체하고, $S/(I + K)$ 는 B로 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.¹⁹⁾ 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 I와 K의 값이 0보다 크기 때문에 0과 1 사이여야만 한다. 또한 오염원 발생요인(B)은 S가 0과 같거나 크기 때문에 0 이상이어야 한다. 따라서, 일정기간 동안 다중측정으로 실내 및 실외

의 NO_2 농도를 측정한다면, 식 (7)에서 일차선형회귀식을 이용하여 투과요인과 발생요인을 구할 수 있다. 본 연구에서 측정기간 동안 매일의 C와 C_o 측정은 식 (7)에서 최소자승직선을 이용하여 기울기와 절편 값으로부터 투과요인(A)과 발생요인(B)의 값을 계산하였다. 그리고, 투과요인(A)에서 환기량(I) 값을 대입하여 측정기간 동안의 감소상수(K)를 계산하고, 발생요인(B)에 대입하여 측정기간 동안 평균 NO_2 발생강도(S)를 계산·추정하였다.

III. 연구결과

1. 주택특성

NO_2 농도측정은 참가자 30명 중에서 2명이 중도에서 불참하였고, 1주택은 측정과정 중 측정기의 보관 상태가 불량하여 주택 총 27주택에서 농도분석을 하였다. 조사된 가족의 평균수는 3명이었고, 단독주택 2가구, 연립주택 3가구, 아파트는 25가구가 있었다. 실내벽의 주요 물질은 시멘트(30가구)였으며, 30주택 모두에서 벽면에 벽지를 하였다. 30주택 모두 취사용으로 가스렌지를 사용했으며, 1가구(성냥 또는 라이타 사용) 제외하고 가스 점화장치는 가스렌지 자체의 불꽃 점화장치를 사용하였다. 난방장치는 27주택에서 가스, 2주택은 석유, 1주택은 전기를 사용한다고 응답하였다(Table 1).

2. 실내 및 실외 이산화질소 농도

서울, 아산, 대구에서 60일 동안 3일 간격으로 측정된 주택 실내 및 실외의 NO_2 평균농도는 각각 32.7 ± 16.8 ppb 및 37.9 ± 19.3 ppb, 25.9 ± 8.6 ppb 및 20.7 ± 6.3 ppb, 19.7 ± 9.8 ppb 및 22.9 ± 11.4 ppb를 나타내었고, 실내/실외 NO_2 농도비는 각각 0.95 ± 0.60 ,

Table 1. House characteristics of participants in Seoul, Asan and Daegu

	Number of house			Total
	Seoul (n = 10)	Asan (n = 10)	Daegu (n = 10)	
Type of house				
Single house	10	9	9	28
Apartment	0	1	1	2
Attached garage	10	10	10	30
Inside smoker	0	1	3	4
Gas range	10	10	10	30
Gas water heater	10	10	10	30
Kerosene heater	0	0	0	0

Table 2. Measured NO₂ concentrations of indoor and outdoor for 60 days

		Average (ppb)	Standard deviation	GM (ppb)	Min. (ppb)	Max. (ppb)
Seoul (n = 9)	Indoor	32.7	16.8	28.8	4.9	93.3
	Outdoor	37.9	19.3	32.9	4.2	94.2
	Indoor/outdoor	0.95	0.60	N.A.	0.25	2.00
Asan (n = 9)	Indoor	25.9	8.6	24.3	4.1	48.3
	Outdoor	20.7	6.3	19.7	8.9	61.6
	Indoor/outdoor	0.82	0.24	N.A.	0.16	2.03
Daegu (n = 9)	Indoor	19.7	9.8	17.4	1.58	78.4
	Outdoor	22.9	11.4	20.0	2.53	62.3
	Indoor/outdoor	1.09	0.9	N.A.	0.04	3.58

0.82±0.24, 1.09±0.9이었다. 실내 및 실외의 NO₂ 농도의 기하평균은 서울, 아산, 대구에서 각각 28.8 ppb 및 32.9 ppb, 24.3 ppb 및 19.7 ppb, 17.4 ppb 및 20.0 ppb를 나타내었다(Table 2).

추정대상 지역인 서울, 아산, 대구의 측정값을 비교해 보면 대도시인 서울의 실외 NO₂ 평균농도는 37.9 ppb로 아산 및 대구보다 높았으며, 그 영향으로 실내의 NO₂ 평균농도도 상대적으로 높을 값을 나타낸 것으로 생각한다. 대구의 경우는 추정 대상 주택에서 5주택이 대구와 경산 근접지점인 외각으로 다소 낮은 값을 보였다. 설문지 결과 가정에서 NO₂ 발생원으로 고려되는 흡연 및 가스레인지 사용이 비슷한 것을 고려하면, 대도시의 실외 대기의 NO₂ 농도가 실내 NO₂ 평균농도에 영향을 주었음을 알 수 있다. 따라서 실내공기질 개선은 실외 대기질 개선과 동시에 고려되어야 함을 나타내고 있다.

· 실내/실외 NO₂ 농도비는 가스렌지의 사용이 없는 주택의 경우 실내의 NO₂ 농도는 주로 실외에 의존하여 실내/실외의 NO₂ 농도비가 대략 0.6 그리고 가스렌지를 사용하는 주택의 실내/실외 NO₂ 농도비를 0.8~1.0으

로 예측한 Sexton 등의 발표와 비슷한 결과를 나타내었다.¹⁰⁾

3. 투과요인 및 발생요인

총 서울, 아산, 대구 27주택에서 서울의 1주택만이 기울기 값이 1 이상이었다. 본 연구에서 물질수지식과 선형회귀식을 이용한 투과요인(투과요인(A)은 0<A<1)과 발생요인(발생요인(B)은 0≤B)의 추정은 검증 평가 방법에 적합한 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서 1주택을 제외한 총 26주택에서 투과요인과 발생요인을 계산하였다(Table 3). 서울, 아산, 대구에서 평균 투과요인은 0.53±0.20, 발생요인은 7.68±4.26을 나타내었다. 특히 서울에서 투과요인이 아산과 대구에 비해 높았으며, 발생요인은 대구가 서울 및 아산에 비해 높았다. 이 결과는 환기를 나타내는 투과요인에 서울 참여 주택이 영향이 높았음을 나타내는 것이다.

실내공기질의 가장 큰 영향을 주는 것은 대부분 환기에 의한 실외공기의 유입이다.²⁰⁾ 본 연구에서는 일정기간 동안 3일 간격으로 실내 및 실외의 NO₂ 농도 사이의 관련성은 실내 NO₂ 발생원이 높은 주택과 낮은 주택은 차이가 있을 것으로 생각하여, 발생요인(기울기) 값이 0과 1사이를 벗어난 1주택을 제외한 26주택에서 실내 및 실외 NO₂ 농도 사이의 관계를 결정계수(R²)를 계산하였다. 그 결과 발생요인이 높은 대구의 결정계수는 평균 0.36±0.27를 나타내었으며, 발생요인이 낮은 서울은 0.68±0.22를 나타내었다. 이것은 실내환경에 오염물질 발생원이 유·無 또는 발생원 높고 낮음은 일정 기간 동안 다중추정에 의해 실내의 상관성을 분석할 때 차이를 보여 주택특성을 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 또한 높은 결정계수 값을 나타낸 서울은 환기를 나타내는 투과요인의 값이 아산과 대구에 비해 상대적으로 높아 실외의 영향을 그만큼 많이 받은 것

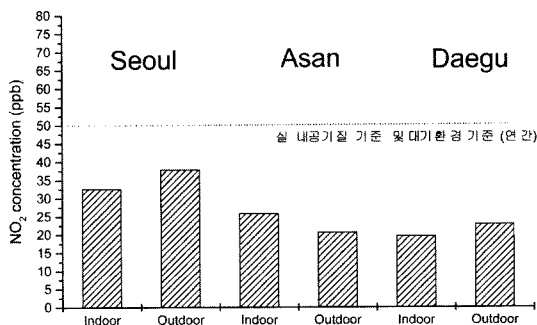


Fig. 1. Mean NO₂ concentrations in Seoul, Asan and Daegu.

Table 3. Calculated penetration factor and source strength factor

	Penetration factor (Slope)		Source strength factor (intercept)		Correlation coefficient (R ²)	
	M ± S.D.	Range	M ± S.D.	Range	M ± S.D.	Range
Seoul (n = 8)	0.71 ± 0.14	0.52~0.92	5.59 ± 4.02	0.1~12.01	0.68 ± 0.22	0.21~0.95
Asan (n = 9)	0.51 ± 0.20	0.23~0.92	7.53 ± 3.76	2.2~15.11	0.55 ± 0.22	0.09~0.81
Daegu (n = 9)	0.42 ± 0.13	0.08~0.63	9.67 ± 4.54	3.52~18.1	0.36 ± 0.27	0.02~0.69
Total	0.53 ± 0.20	0.08~0.92	7.68 ± 4.26	0.1~18.1	0.53 ± 0.27	0.02~0.95

로 해석할 수 있다.

4. 환기량 측정

주택의 환기량 측정은 방문시 주택의 현장 그 상태에서 측정 계산되었다. 그 결과를 살펴보면, 서울의 평균 환기량(ACH)는 1.80 ± 0.42 ACH(1/hr), 아산 1.11 ± 0.50 ACH(1/hr), 대구 0.92 ± 0.26 ACH(1/hr) 나타내었다. 이 결과는 Table 3에서 투과요인에서 예측 되었듯이 서울, 아산, 대구 순으로 나타났다. 환기량은 실내외 기온, 습도, 주택구조 등 매시간 변할 수 있기 때문에 각 주택에서 4회 측정된 결과는 오차가 있을 가능성이 있다. 하지만 현 기술상 자연환기(natural ventilation)을 일정기간 동안 측정할 수 있는 기술이 미흡하기 때문에 범위(range)를 고려한 값이 더 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 생각한다.

5. 이산화질소 발생강도 및 감소상수

2에서 4까지의 결과를 총괄하여 식 (7)을 이용하면, 투과요인(A)에서 주택내 NO₂ 감소상수(K)를 계산하고, 발생요인(B)에서 NO₂ 발생강도(S) 추정할 수 있다. 본 연구에서 투과요인이 0과 1 사이를 벗어난 1주택을 제외한 각 26주택에서 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 추정된 감소상수(K)와 발생강도(S)를 Table 4에 나타내었다.

본 연구에서 한국의 주택 실내에서 NO₂ 감소상수는 0.98 ± 0.28 hr⁻¹, NO₂ 발생강도는 16.28 ± 7.47 ppb/h로 계산 추정되었다. 총 26주택에서 감소상수 값이 0.18을

제외하면 NO₂ 감소 상수는 1.00 ± 0.23을 나타내어 미국 등의 서구국가의 감소율 0.8 hr⁻¹ 보다 다소 높은 값을 나타내었고,^{20,23)} 일본의 감소상수 0.99 ± 0.19 hr⁻¹와 비슷한 결과를 나타내었다.²⁴⁾ 이 결과는 서구와 동양의 주택구조의 차이로 설명할 수 있을 것이다. 또한 추정된 발생강도는 평균 16.28 ± 7.47 ppb/h이었으며, 대구에서 상대적으로 높았다. 이것은 Table 4에서 계산된 발생요인(B)에서 대구가 상대적으로 높은 것과 일치한다.

IV. 결 론

본 연구는 물질수지를 적용한 실내공기질 모델인 구획모델(compartment model)과 선형회귀의 통계적 방법을 이용하여 실내 미량 유해 공기오염물질인 NO₂의 발생강도 및 감소상수(K)를 동시에 추정하였다. 그 결과를 간략히 요약하면, 서울, 아산, 대구에서 각각 10주택씩 총 30주택에서 3일 간격으로 60일 동안 NO₂를 주택의 실내 및 실외에서 동시에 연속적으로 측정하였다. 감소상수와 발생강도를 동시에 측정하기 위해 적용된 물질수지와 선형회귀 방법은 총 27 주택에서 1주택을 제외하고 투과요인(penetration factor)인 0과 1 사이에 값을 나타내었으며, 발생요인(source strength factor)은 0 이상을 보여, 응용 적용된 방법이 적정한 것을 판단하였다. 본 연구에서 주택 실내에서 NO₂ 감소상수는 0.98 ± 0.28 hr⁻¹, NO₂ 발생강도는 16.28 ± 7.47 ppb/h로 추정되었다.

Table 4. Estimated deposition constant (K) and source strength of NO₂ using multiple measurements

	Deposition constant (K, hr ⁻¹)		Source strength (S, ppb/h)	
	M ± S.D.	Range	M ± S.D.	Range
Seoul (n = 8)	0.88 ± 0.15	0.71~1.20	15.97 ± 9.18	0.32~29.56
Asan (n = 9)	1.03 ± 0.4	0.18~1.52	15.64 ± 7.14	4.47~27.98
Daegu (n = 9)	1.01 ± 0.18	0.85~1.36	17.38 ± 6.89	8.38~27.16
Total	0.98 ± 0.28	0.18~1.52	16.28 ± 7.47	0.32~29.56

감사의 글

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업 지원에 의해 수행하는 결과의 일부임.

참고문헌

- Jones, A. P. : Indoor air quality and health, *Atmospheric Environment*, **33**, 4536-4564, 1999.
- 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.
- Moschandreas, D. J. and Relwani, S. M. : Emission rates from range top-burner assessment of measurement methods. *Atmospheric Environment*, **21**, 285-289, 1987.
- 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.
- Kraenzmer, M. : Modeling and continuous monitoring of indoor air pollutants for identification of sources and sinks. *Environment International*, **25**(5), 541-551, 1999.
- 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.
- Tichenor, B. A. : Overview of source/sink characterization methods, *American Society for Testing Materials, STP 1287*, 9-19, 1996.
- Yamanaka, S. : Decay rates of nitrogen oxides in a typical Japanese living room. *Environ. Sci. Technol.*, **18**, 566-570, 1984.
- 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.
- Sexton, K., Letz, R. and Spengler, D. : Estimating human exposure to nitrogen dioxide: an indoor/outdoor modeling approach. *Environmental Research*, **32**, 151-166, 1983.
- World Health Organization(WHO) : Air Quality Guidelines for Europe, European Series No. 23, WHO: Copenhagen, Denmark, 297-310, 1987.
- 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.
- Mohensin, V. : Airway responses to nitrogen dioxide in asthmatic subjects. *J. Toxicol. & Environ. Health*, **22**, 371-380, 1987.
- Yanagisawa, Y. and Nishmura, H. : A badge-type personal sampler for measurement of personal exposures to NO₂ and NO in ambient air. *Environment International*, **8**, 235-242, 1982.
- 양원호, 배현주, 이기영, 정문호 : 측정시간에 따른 거주주택의 환기량 계산 오류에 관한 연구. *한국환경위생학회지*, **26**(3), 50-54, 2000.
- 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**, 120-1134, 1996.
- 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.
- Dockery, D. W. and Spengler, J. D. : Indoor-outdoor relationships of respirable sulfates and particles. *Atmospheric Environment*, **15**, 335-343, 1981.
- Yang, W., Lee, K. and Chung, M. : Characterization of indoor air quality using multiple measurements of nitrogen dioxide. *Indoor Air*, **14**, 105-111, 2004.
- Nazaroff, W. W. and Cass, G. R. : Mathematical modeling of chemically reactive pollutants in indoor air. *Environ. Sci. Technol.*, **20**, 924-934, 1986.
- Trynor, 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. *Environ. Int.*, **8**, 447-452, 1982.
- Wade, W. A., Cote, W. A. and Yocom, J. E. : A study of indoor air quality. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, **25**, 933-939, 1975.
- 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. *J. Air Wate Manag. Assoc.*, **46**, 853-860, 1996.
- Shin'lchl, Y. : Decay rate of nitrogen dioxide in a typical Japanese living room. *Environ. Sci. Technol.*, **7**, 566-570, 1984.