

물질수지 모델을 이용한 주택 실내의 이산화질소 감소율

유승진* · 배현주 · 양원호 · 정문호
서울대학교 보건대학원 환경보건학과

Decay Rate of the Nitrogen Dioxide in Indoor Residence Using Mass Balance Model

Seung Jin Yoo^{*}, Hyun Joo Bae, Won Ho Yang and Moon Ho Chung

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University
(Received 30 May 2001 ; Accepted 20 June 2001)

ABSTRACT

The purpose of this study was to determine nitrogen dioxide (NO₂) decay rate by reaction between NO₂ and interior materials in Korean residence. The results of this research could be helpful to choose the interior construction materials and to study on reduction of indoor air pollutants. The results of this research are as follows;

For 30 residences in Seoul and Incheon from october 2000 to march 2001, the mean of infiltration rate was 0.70 ± 0.44 ACH, and single-detached houses (7 houses) and apartments (19 houses) were 0.97 ± 0.55 ACH and 0.61 ± 0.34 ACH, respectively. The CO₂ decay followed approximately first-order process ($R^2=0.97 \pm 0.02$). There existed a statistic significance in filtration rate between houses built in 1980's and built in 1990's by t-test ($p<0.02$). Mean of NO₂ decay rates in 26 residences except 4 residences was 0.94 ± 0.49 hr⁻¹, and also 0.86 ± 0.49 hr⁻¹, 0.97 ± 0.50 hr⁻¹ in single-detached houses and apartments, respectively. Mean NO₂ decay rates in houses built in 1980's and 1990's were 0.78 ± 0.37 hr⁻¹, 1.33 ± 1.03 hr⁻¹, respectively. Nothing were showed statistical significance among indoor temperature, indoor humidity, and NO₂ decay rate. However, NO₂ decay rates had a tendency to increase by increase of temperature and humidity. Average volume/surface of participated houses was 0.55 ± 0.07 m and mean NO₂ deposition velocity was calculated as 1.46 ± 0.59 m sec⁻¹.

Keywords : Nitrogen Dioxide, Decay rate, Infiltration rate, Mass Balance Model

I. 서 론

대부분의 사람들은 하루 24시간 중 약 80% 이상을 실내(주택, 사무실, 실내작업장, 공공건물, 학교, 병원, 지하시설물, 상가, 음식점, 자동차, 지하철 등)에서 생활하기 때문에 실내공기질(IAQ:Indoor Air Quality)은 개인의 공기 오염물질 노출에 주요한 요인이 될 수 있다.¹⁾ 특히, 정상인에 비해 유해인자에 민감한 임산부, 성인보다 단위 체중 당 50% 이상의 많은 공기를 호흡하는 어린이, 그리고 만성질환자의 경우는 실내에서 정상인보다 더 많은 시간을 보내기 때문에 이들에게 실내공기질의 중요성은 더욱 크다.²⁾

실내공기질은 외부의 공기가 실내로 유입, 실내의 발생원에 의한 생성, 실내에서 반응으로 인한 감소, 실내에서의 인간활동 등에 영향을 받는다. 실외 대기 오염은 자연적인 희석률이 크고, 사회적 인식 확대 및 각종 규제 등으로 인하여 오염수준이 억제되고 있으나, 실내공기는 한정된 공간에서 오염된 공기의 지속적인 순환 및 건물의 밀폐화 추세에 따른 실내 오염물질 누적과 다양한 건축자재 및 생활가구의 사용으로 내부적 실내오염원이 존재하므로 이에 따른 오염 농도가 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있을 정도로 증가될 수 있다.³⁾

이산화질소(NO₂)는 미국, 일본 등의 선진국에서도 대기환경기준으로 규제하는 오염물질이며, 고온의 연소과정(thermal NO_x)에서 발생하는 부산물로서 실외 대기에서는 발전소, 산업공정, 자동차 배기가스 등에서 발생된다. 또한 탄화수소(HCs)와 함께 광화

*Corresponding author : Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University.
Tel : 02-740-8870, Fax : 02-745-9104
E-mail : yoolee@dreamwiz.com

학 스모그를 발생시키는 원인 물질이다. 실내에서는 가스레인지(gas range) 같은 취사용 도구, 난방기구, 흡연과 같은 연소과정, 실내로 유입되는 오염물질 등이 NO₂를 발생시키는 원인이 되므로 환경보건학적 측면에서 중요한 오염물질이다.^{4,5)}

NO₂는 자극적인 냄새와 부식성이 있는 강한 산화 가스로서, 동물실험에서 급성과 만성 노출로 인해 생물학적 변형과 폐 조직에 손상을 주는 것으로 나타났으며, 실험실 통제하에 행해진 인체 실험에서 0.05 ppm의 낮은 농도에서 2시간 노출시 아세틸콜린에 대한 기관지의 과민성이 증가되었고, 1 ppm에서 2시간 노출시 약간의 폐기능 용적 감소, 5 ppm에서 2시간 노출시 기도저항 증가, 폐포와 동맥의 산소분압 감소 증상이 보고되었다.⁶⁾

실내의 NO₂는 실내·외 공기 환기량과 실내 건축 자재와 가구 등과의 표면반응 및 실내 다른 오염물질과의 반응으로 인한 감소^{7,8)}, 실내에서 연소도구로 인한 발생, 실내 환기장치 등 주택특성에 따라 영향을 받기 때문에 각 지역 및 주택 종류에 따른 차이가 있을 수 있다.⁹⁾ 또한 최근의 연구에 의하면 실내·외 환기의 과정을 통한 실내공기질 개선보다, 실내의 건축 자재 및 표면반응에 의해 더 빨리 감소될 수 있는 것으로 보고되었으며⁷⁾, 이에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다.

그 동안, 연구자들이 각 가정에서 사용하는 취사도구의 종류에 따른 실내의 NO₂농도 비교¹⁰⁾, NO₂ 개인 노출량 비교^{11,12)}, 실내 및 실외의 NO₂ 발생원에 따른 실내와 실외 농도비 연구 등을 수행해왔다. 또한 실험실 수준에서 NO₂ 감소율(decay rate)을 각각 측정하기도 하였다. 그러나 국내의 경우 취사 및 난방도구로 가스레인지의 사용이 대부분이지만, NO₂ 발생량 및 감소율에 대한 연구가 부족한 실정이다.

저농도의 NO₂는 장기간 노출되면, 사람들에게 위해 요인(risk factor)이 된다는 사실을 감안할 때, 특정 발생원이 있는 실내에 있어서 NO₂의 실내표면반응에 의한 감소율을 측정할 필요가 있다. 우리나라에서는 1998년부터 건축물의 자재생산, 설계, 건설, 유지관리 등 전과정을 대상으로 에너지 및 자원의 절약, 오염물질 배출감소, 쾌적성 등 환경에 미치는 요소에 대한 평가를 통해 건축물의 환경 성능을 인증하는 그린빌딩인증제도를 도입, 국내 도입 방안에 대하여 종합 검토를 거쳐, 1999년 12월부터는 연구 용역사업으로 그린빌딩 시범 인증 제도를 운영하고 있다.⁴⁾ 또한 생활수준의 향상에 따른 쾌적한 환경에 대한 요구가 증가함에 따라 실내의 NO₂ 실내표면 반응에 의한

감소율을 측정함으로써, 주택의 건축자재 및 재료 선정, 부속 취사도구의 선택에 도움을 줄 수 있을 것이다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구 기간 및 대상

본 연구는 2000년 10월 1일부터 2001년 3월 30일까지 서울과 인천에 소재한 30주택(단독 또는 아파트)을 대상으로, 이산화탄소(CO₂) 농도 감소를 이용하여 환기율(infiltration rate)을 측정하였고, 이를 이용하여 NO₂의 감소율을 추정하였다.

2. 연구방법

2.1. 주택환경 및 설문조사

주택특성과 NO₂ 감소율과의 관련성을 파악하기 위해 주택의 소재지 및 가스레인지 형태, 주택의 부피, 표면적, 주거 형태(단독, 아파트), 벽지, 소파, 커튼, 카펫, 나무, 창문, 유리, 기타섬유, 가구 등의 보유 여부 및 크기, 재질 등을 실측 조사하여 점검표(checklist)를 작성하였다. 실내공기 오염물질의 발생 증가와 감소에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위하여 각 가정의 거주지 형태, 흡연자수, 건물벽, 바닥, 천장의 재질 등의 주택특성과 주부들의 취사도구, 사용시간, 환기방법, 기관지 계통의 질환여부, 거주지 주변의 환경 특성 등 총 17문항으로 작성된 기초 설문문항을 거주자에게 의뢰하여 작성하였다.

2.2. NO₂와 CO₂ 농도, 온도, 상대습도의 실내·외 측정

취사도구로 이용되는 가스레인지의 연소를 CO₂와 NO₂ 발생원으로 이용하여, 각 주택에서 NO₂와 CO₂ 농도를 각각 측정하였다. 또한, 시간별로 변화되는 온도와 상대습도를 측정하였다. NO₂ 농도는 배지형태(badge-type)의 NO₂ 수동식 시료채취기(passive monitor)를 이용하여 측정하였으며, 이를 수거하여 분석하였다. NO₂ 농도는 자연적인 기류를 이용하여, 확산과 투과라는 물리적인 과정과 반응에 의한 화학적 반응에 의해 농도가 변화한다. 본 연구에 이용된 NO₂ 측정장치는 측정시간 동안 cellulose fiber badge에 용해되어 있는 triethanolamine의 solution에 NO₂가 흡수되는 메커니즘을 가진 수동식 시료채취기(Toyo Roshi Ltd. Japan)로 측정하였다. 수동식 시료채취기는 최대 20%의 오류를 야기할 수 있으며,

크기가 작으며(5×4×1 cm³), 무게는 15 g으로 손쉽게 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다.¹³⁾

실내에 설치한 수동식 시료채취기는 거실에, NO₂ 발생원으로부터 2 m 이상, 창문으로부터 1.5 m 이상, 지상으로부터 약 1.2 m 위에 위치하도록 설치하였고, 실외용 수동식 시료채취기는 베란다 또는 현관 밖의 외부에 지상으로부터 약 1.2 m 위에 위치하도록 설치하였다. CO₂ 농도는 Continuous Monitor Instrument (TSI 8731)로, 온도와 상대습도는 Thermometer Hygrometer (HD 8901)로 각각 측정하였다.

각 주택에 도착 후, 실외에 NO₂ 수동식 시료채취기를 설치하고, 초기 실내 및 실외 온도, 상대습도, 이산화탄소 농도를 측정 후, NO₂와 CO₂의 발생원인 가스레인지를 작동시켰다(Fig. 1). 가스레인지를 30분간 또는 실외 CO₂ 농도의 10배인 값이 나타나면 가스레인지의 작동을 정지시켰다. 가스레인지 정지 10분 후 NO₂ 수동식 시료채취기 1번, 2번을 동시에 설치하고, 50분 경과 후 1번 NO₂ 시료채취기 수거, 110분 경과 후 2번 NO₂ 시료채취기 수거하였다. 동시에 20분 간격으로 시간, 온도, 상대습도, CO₂ 농도를 측정, 기록하였다. 실내 측정이 끝난 후, 설치했던 실외 NO₂ 수동식 시료채취기 수거하고, 동시에 시간, 온도, 상대습도, CO₂ 농도를 측정, 기록하였다. 측정의

변수를 방지하기 위해, 측정의 시작과 진행, 종료까지의 약 3시간 20분 동안, 거주자가 주택으로부터 완전히 분리되도록 하였고, 실험자의 호흡으로 인한 CO₂ 발생 억제를 위해 마스크를 착용하였다.

2.3 물질수지 모델

물질수지 모델은 완전 혼합된 하나의 공간으로 공기의 유입 및 유출 사이의 관계를 나타내며, 실내 공기질을 설명하기 위해 자주 이용된다.^{14,15)}

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

여기서, C_i : indoor concentration(ppm), C_o : outdoor concentration(ppm), I : infiltration rate (ACH: Air Exchanges per Hour), G : generation rate(cm³/hr), R : removal rate(cm³/hr), V : volume of the room(m³), m : air mixing factor.

제거율 R 은 침착상수(K , hr⁻¹)와 실내에 있는 질량의 양(VC)으로 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

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

완전혼합을 가정하고($m=1$), 실내 발생원이 없다면($G=0$), 식 (2)를 식 (1)에 적용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

실외 NO₂의 실내 유입은 높은 반응성과 낮은 환기율 때문에 대단히 낮으므로 $IC_o=0$ 으로 가정할 수 있으며, 식 (3)을 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_i}{dt} = IC_i - KC_i = -(I+K)C_i \quad (4)$$

식 (4)을 적분하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -(I+K)t \quad (5)$$

여기서, C_t : Indoor NO₂ concentration at time= t , C_0 : Indoor NO₂ concentration at $t=0$.

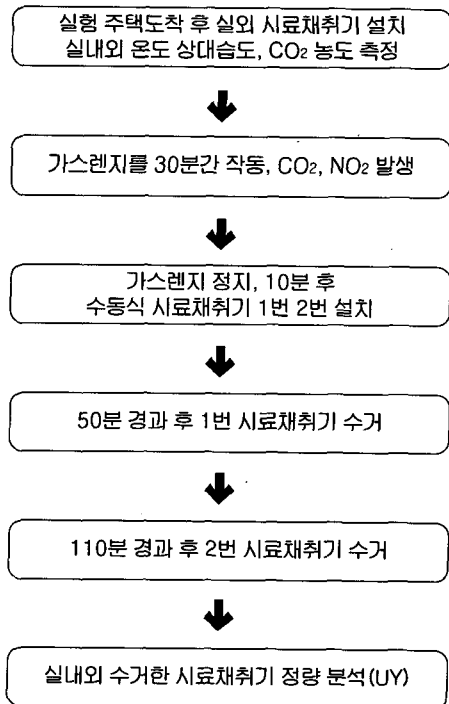


Fig. 1. The flow chart of this study.

즉, 시간 t에 대한 $\ln C_t/C_0$ 의 1차 직선의 기울기 $(I+K)$ 에서 I 는 환기율이고, K 는 감소상수이다. 따라서 환기율(I)은 직독기를 통하여 측정할 수 있고, 따라서 NO_2 감소상수(K)를 구할 수 있다. 환기율(I)은 식 (6)에 의해 CO_2 농도 감소를 이용하여 결정할 수 있다.

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -It \quad (6)$$

가스레인지를 정지시킨 후의 NO_2 와 CO_2 의 감소율은 일반적으로 일차반응식으로 감소한다. 본 연구의 NO_2 , CO_2 의 감소율을 모의실험(simulation) 한 것을 <Fig. 2>에 나타내었다.

식 (5)에서 환기율(I)과 감소율(K)의 합을 $A=I+K$ 라 하면, 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$C_t = C_0 \cdot e^{-At} \quad (7)$$

여기서, A : combination of infiltration rate and decay rate.

식 (7)을 적분하면 식 (8)로 나타낼 수 있으며, 두 측정값(two-points)을 이용하면 식 (8)은 초기의 NO_2 의 농도에 상관없이 일정 시간 동안 NO_2 누적 평균농도를 이용하여 감소율과 환기율의 합(A)을 추정할 수 있다.

$$C_{ave-conc} \cdot [time\ 2 - time\ 1] = \left[-\frac{C_0}{A} \cdot e^{-At} \right]_{time\ 1}^{time\ 2} \quad (8)$$

CO_2 에 의한 환기율(I)과 NO_2 의 두 측정점 누적 평

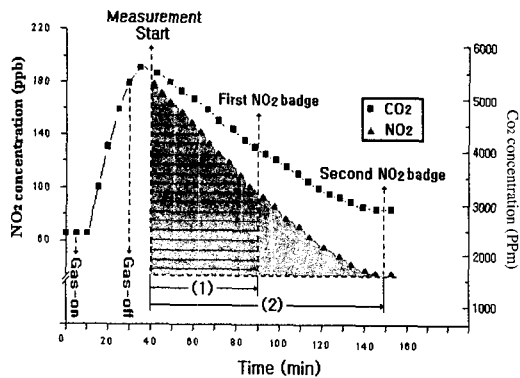


Fig. 2. Schematic of determination of NO_2 and CO_2 decay rates.

균농도 측정을 통해 감소율(K)을 추정할 수 있다. 결론적으로 NO_2 두 측정점(two-points) 측정을 이용하여 식 (7)에서 A 값을 계산할 수 있으며 침투량을 통해 NO_2 감소율(K)을 추정할 수 있다. 그리고, 주택의 부피와 표면적을 실측하여 NO_2 의 침착 속도는 식 (9)로 계산할 수 있다.

$$K_{dep} = K_{NO_2} \frac{V}{A} \quad (9)$$

여기서, K_{dep} : deposition velocity(m/sec), A (surface) : area of contact(m^2), V (volume) : room volume(m^3).

III. 결과 및 고찰

1. 주택 및 거주자 특성

본 연구는 서울과 인천에 소재한 총 30 주택을 대상으로 하였고, 그 중 측정과정에서 주택 측정치의 오류로 인해 4가구의 측정값은 제외하였다. NO_2 의 발생 증가와 감소에 영향을 미칠 수 있는 주택특성을 <Table 1>과 같다.¹⁶⁾ 대상 주택에서 평균 가족수는 2.6명이었으며, 조사된 주택 모두가 취사용으로 가스레인지를 사용하고 있었고, 각 가정은 하루 평균 대략 1.3시간 동안 취사용으로 가스레인지를 사용하는 것으로 조사되었다. 대상 주택의 취사시 환기방법은 가스레인지 위의 후드를 이용하는 주택이 18가구(60.0%), 창문 이용이 6가구(20.0%), fan을 이용하는 경우가 4가구(13.3%), 환기를 하지 않는 경우 2가구(6.7%)로 조사되었다. 또한 최근 6개월 동안 호흡기 질환을 경험한 가구가 35.7%로 조사되었다.

2. 주택형태(단독, 아파트)에 따른 환기율 측정

주택에서 CO_2 의 농도 감소를 이용하여 환기율을 측정하였으며 결과를 <Table 2>에 나타내었다. 시간에 따른 CO_2 감소는 대략적으로 일차반응식을 보였다($R^2=0.97 \pm 0.02$). 모든 주택의 CO_2 환기율 평균

Table 1. House characteristics of participants in relation to indoor NO_2 level

	Smoker		Gas range	
	Yes	No	Yes	No
Single detached houses (n=7)	3	4	7	0
Apartments (n=23)	9	14	23	0

Table 2. Comparison of infiltration rates between single detached houses and apartments (unit:ACH)

	Single detached houses (n=7)	Apartments (n=19)	Total
Mean ±S.D	0.97 ±0.55	0.61 ±0.34	0.70 ±0.44
Range	0.44~2.01	0.13~1.59	0.13~2.01

Table 3. Comparison of infiltration rates by means of construction year (unit:ACH)

	Houses built after 1990's (n=15)	Houses built between 1980's (n=11)
Mean ±S.D.	0.51 ±0.29	0.94 ±0.49
Range	0.13~0.99	0.37~2.01

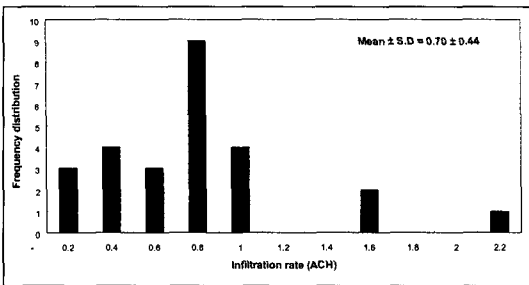


Fig. 3. Frequency distribution of infiltration rates in 26 houses.

은 0.70 0.44 ACH(Air Exchanges per Hour)이었다. 주택 특성별로는 단독주택의 경우 0.97 0.55 ACH, 아파트의 경우는 0.61 0.34 ACH로 아파트가 단독주택에 비해 밀폐공간으로 나타났으나, 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다(p=0.075). 각 주택에서 측정된 환기율의 분포는 대략적으로 대수 정규(log-normal) 분포를 나타내었다(p<0.05) <Fig. 3>.

실내와 실외 온도 차이는 기류의 이동을 야기하기 때문에 환기율에 중요한 영향을 미친다. 따라서, 환기율과 실내·외 온도차이에 따른 상관관계를 <Fig. 4>에 나타내었다. 실내·외 온도차이와 환기율 사이의 상관계수(R²)는 0.32이며, 통계적으로 유의한 상관성을 보였다(p=0.015). 실외 공기의 실내 환기량에

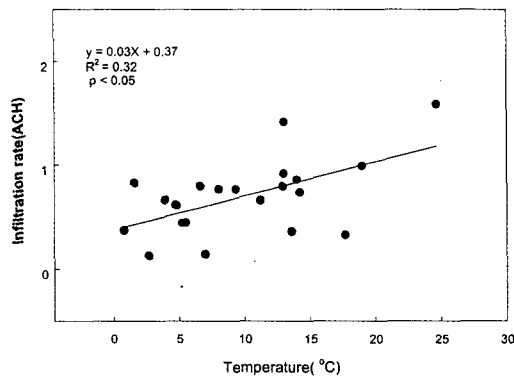


Fig. 4. Relationship between temperature difference(indoors-outdoors) and infiltration rate.

실내·외 온도차가 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다.¹⁷⁾ 실내·외 온도차이의 평균은 9.91℃였으며, 표준편차는 6.11℃이고, 온도차이의 범위는 0.8~24.7℃를 나타냈다. 또한 실외공기의 실내 환기율과 실내·외 습도차이에 따른 상관관계를 분석하였다. 분석 결과, 환기율과 실내·외 습도차이에 대한 일차선형 회귀모델의 상관계수(r)는 -0.36으로 역상관관계를 나타내고 있지만, 통계적으로 상관성을 나타내지 못했다(p=0.11). 따라서, 환기율은 습도보다는 온도에 주로 영향을 받는 것으로 판단된다.

측정 주택의 건축연도를 조사한 결과 1가구는 1960년대, 1가구는 1970년대, 1980~1989년 사이에 12가구, 1990년 이후에 16가구가 건축된 것으로 조사되었다. 1980년대에 건축된 가구의 평균 환기율은 0.94 ±0.49 ACH, 1990년 이후에 건축된 가구는 평균 0.51 ±0.29 ACH로, t-test 결과 통계적으로 유의한 차이를 (p<0.02)을 나타냈다<Table 3>. 이 결과는 건축물이 오래되면 벽 등의 틈새와 건축자재 부식에 따른 원인으로 환기량이 증가되고 있음을 나타낸다.

3. 주택형태(단독, 아파트)에 따른 NO₂ 감소율

두 측정값을 이용하여 추정된 NO₂ 감소율에서 한 개의 측정값(4.4)을 제외(outlier)했을 경우, NO₂ 감소율의 평균은 0.94 ±0.49 hr⁻¹를 나타내었다. 주택 형태별로 살펴보면, 단독 주택의 경우 NO₂ 감소율은 0.86 ±0.49 hr⁻¹이었고, 아파트의 경우 0.97 ±0.50 hr⁻¹로 나타났다<Table 4>. 단독주택과 아파트 사이의 주택형태별 t-검정 결과, 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다(p<0.31). 기존에 연구된 외국주택의 이산화질소 감소율을 살펴보면, 서구도시의 감

Table 4. Comparison of NO₂ decay rates between single detached houses and apartments (unit:hr⁻¹)

	Single detached houses (n=7)	Apartments (n=19)	Total
Mean ±S.D.	0.86 ±0.49	0.97 ±0.50	0.94 ±0.49
Range	0.34~1.56	0.34~2.20	0.34~1.56

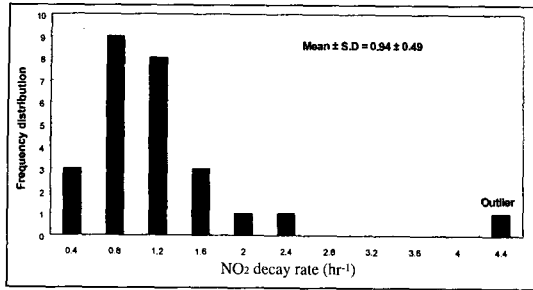


Fig. 5. Frequency distribution of NO₂ decay rates in 26 houses.

Table 5. Comparison of NO₂ decay rates by construction year (unit: hr⁻¹)

	Houses built after 1990's (n=15)	Houses built before 1990's (n=11)
Mean ± S.D.	1.33 ± 1.03	0.78 ± 0.37
Range	0.52~4.31	0.34~1.26

소율은 0.8 hr⁻¹¹⁶⁾, 일본의 감소율은 0.99 ± 0.19 hr⁻¹이었다.¹⁷⁾ 이 결과로 미루어 보면, 기존에 보고된 NO₂ 감소율의 값과는 차이를 보였지만, 그 범위에 포함되는 값을 보여 국가별로 거주지역은 서로 다르지만, NO₂ 감소율은 대부분 비슷한 양상을 나타냈다. NO₂ 감소율은 대략적으로 대수정규 분포를 나타내었다 (p < 0.05) <Fig. 5>.

1980년~1990년 사이에 건축된 가구의 NO₂ 평균 감소율은 0.78 ± 0.37 hr⁻¹, 1990년 이후에 건축된 가구는 1.33 ± 1.03 hr⁻¹이었다 <Table 5>. 건축연도에 따른 두 집단의 NO₂ 감소율은 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다 (p = 0.046). 1990년대 건축물이 1980년~1990년 사이의 건축물 보다 감소율이 높았다. 이는 시간이 경과되지 않은 가구, 벽지 등과 NO₂가 더 활발한 표면반응을 한다고 생각할 수 있다. 그러나 주택 실내는 벽면뿐만 아니라 카펫, 커튼 등의 유무가 신·구 건축물에 관계없이 있을 수 있기 때문에 영향요인을 건축연도에 의한 것으로만 결정할 수는 없을 것으로 생각된다.

4. 실내 온도 및 습도가 NO₂ 감소율에 미치는 영향

4.1. 실내 온도의 NO₂ 감소영향

총 조사 주택의 평균 실내 온도는 24.0 ± 3.1 °C였으며, 범위는 18~29 °C로 나타났다. 실내 온도의 증가는 반응을 촉진시켜 NO₂의 감소율 증가와 관련성이 있을 것으로 생각되어, 그 관계를 <Fig. 6>에 나타내

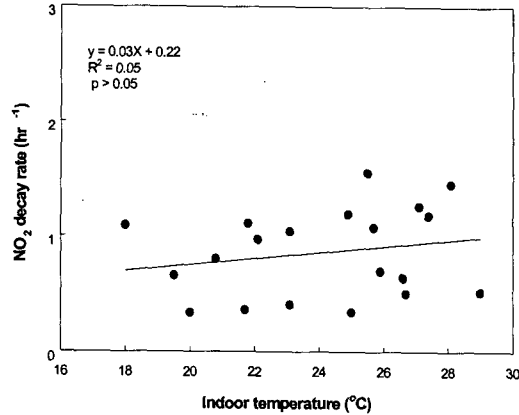


Fig. 6. Relationship between NO₂ decay rate and indoor temperature.

었다. 실내온도와 NO₂ 감소율 사이에는 통계적으로 유의한 연관성을 보이지는 않았다. 이 결과는 실험방법에서 NO₂ 발생원으로 가스레인지들 약 30분 동안 작동하여 측정된 각 가구마다 비슷한 실내온도를 나타냈고, 일반적으로 사람이 생활하는 실내공간은 온도가 비교적 비슷하기 때문에 그 관계를 나타내는 것은 쉽지 않았다. 그럼에도 온도에 따라 감소율이 증가되는 경향을 보였다.

4.2 실내 습도의 NO₂ 감소 영향

측정된 총 주택의 실내 상대 습도 평균은 41.3 ± 10.3%였으며, 범위는 24~59%였다. 실내 습도의 증가는 반응을 촉진시키므로, NO₂ 감소와 관련성이 있을 것으로 생각되어 그 관계를 <Fig. 7>에 나타내었다.

낮은 습도(43.5~50%)에서는 내부 표면 성질에 영향을 받지 않지만, 습도가 50% 이상(50~72.5%)

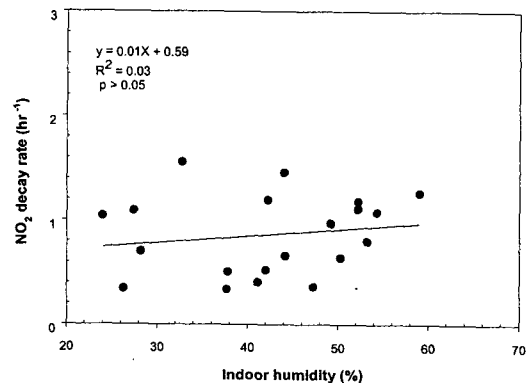


Fig. 7. Relationship between NO₂ decay rate and indoor humidity.

이 되면 NO₂ 감소율은 내부 표면 성질에 영향을 받게 된다는 연구결과가 보고되었지만¹⁷⁾, 본 연구에서는 실내습도와 NO₂ 감소율 사이에 통계적으로 유의한 연관성을 보이지는 않았으며 상관계수(R²)는 0.03이었다. 본 연구에서는 실내 습도가 60%를 넘는 경우가 없어 그 이상의 습도에 대해서는 확인하지 못했다.

5. NO₂ 침착속도(deposition velocity)

NO₂의 침착속도는 식 (9)에 의해 계산되었으며 결과를 <표 6>에 나타내었다.¹⁸⁾ 실측한 주택의 평균 부피는 63.34±29.93m³ 이었으며, 평균 표면적은 113.8±46.59m² 이었다. 평균 주택 부피(v)/표면적(A)는 0.55±0.07m 이었고, NO₂ 침착속도는 평균 1.46±0.59 ×10⁻⁴m·s⁻¹로 계산되었다. 주택형태별로 살펴보면, 단독 주택의 경우 NO₂ 침착속도는 1.44±0.71×10⁻⁴m·s⁻¹이며, 아파트의 경우 1.57±0.64×10⁻⁴m·s⁻¹을 나타내었다. Karlsson¹⁹⁾의 연구에 의하면 주택 실내의 A/V는 대략 0.5m 이었고, NO₂의 침착속도는 1.0~2.0×10⁻⁴m·s⁻¹로 보고하였고, 본 연구의 결과는 이 범위에 속하여 NO₂ 감소율과 마찬가지로 국가별로 주택구조가 다르지만, 국제화시대는 주택 실내의 물질들이 서로 비슷하다고 판단할 수 있다.

Table 6. NO₂ deposition velocity between single detached houses and apartments (unit: 10⁻⁴ m.s⁻¹)

	Single detached house (n=7)	Apartment (n=19)	Total
Mean ±S.D.	1.44 ±0.71	1.57 ±0.64	1.46 ±0.59
Range	0.57~2.84	0.81~2.65	0.57~2.84

IV. 결 론

본 연구는 국내 주택을 대상으로 물질수지 모델을 이용하여 공기 환기율과 상대습도, 온도, 내부 표면반응에 따른 이산화질소(NO₂)의 감소율을 추정하였다. NO₂ 감소율은 두 측정점 누적 평균농도를 물질수지 모델에 적용하여 추정할 수 있었다. 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. CO₂ 감소율을 이용한 전체 30주택의 CO₂ 평균 환기율은 0.70±0.44 ACH이었으며, 주택 특성별로는 단독주택의 경우 0.97±0.55 ACH, 아파트의 경우는 0.61±0.34 ACH였다. CO₂의 감소는 대략적으로 일차반응을 따랐다(R²=0.97±0.02).

2. 주택형태별 환기율의 차이가 예상되었지만, 단

독과 아파트 사이의 통계적 유의성은 없었다(p<0.075). 실내·외 온도 차이와 환기율 사이의 상관계수(R²)는 0.32였으며, 통계적으로 유의한 상관성을 보였다(p=0.015). 반면, 실내·외 습도 차이와 환기율 사이는 역상관 관계를 나타내었다(r=-0.36). 따라서 환기율은 습도보다는 온도에 주로 영향을 받는 것으로 판단된다.

3. 1980년~1990년 사이에 건축된 가구의 평균 환기율은 0.94±0.49 ACH, 1990년 이후에 건축된 가구는 평균 0.51±0.29 ACH로, 이는 t-test 결과 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(p<0.02).

4. 총 26 가구에서 NO₂ 감소율의 평균은 0.94 hr⁻¹이며, 표준편차는 0.49였다. 주택 형태별로 살펴보면, 단독 주택의 NO₂ 감소율은 0.86±0.49 hr⁻¹이며, 아파트는 0.97±0.50 hr⁻¹이었다.

5. NO₂ 평균 감소율은 1980년~1990년 사이에 건축된 주택 0.78±0.37 hr⁻¹, 1990년 이후에 건축된 주택 1.33±1.03 hr⁻¹이었다. 또한 건축연도에 따른 두 집단의 NO₂ 감소율은 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다(p=0.04). 실내온도, 실내습도와 NO₂ 감소율 사이에는 통계적으로 유의한 연관성을 나타내지 않았다. 그러나 온도, 습도 증가에 따라 NO₂ 감소율이 증가되는 경향을 보였다.

6. 평균 주택 부피(V)/표면적(A)는 0.55±0.07m 이었고, NO₂ 침착속도는 평균은 1.46±10⁻⁴m·s⁻¹로 계산되었다. 주택형태별로 살펴보면, 단독 주택의 경우 NO₂ 침착속도는 1.44±0.71×10⁻⁴m·s⁻¹이며, 아파트의 경우 1.57±0.64×10⁻⁴m·s⁻¹을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 대학연구센터(팀)에 의하여 지원된 연구결과와 일부이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1) Levy, J.I., Lee, K., Spengler, J.D. : Impact of residential nitrogen dioxide exposure on personal exposure, An international study, Journal of Air and Waste Management Association, Vol. 48, pp. 553-560, 1998.
 2) 하권철 : 실내환경의 공기질을 결정하는 인자와 관리 방안. 서울대 보건대학원 국민보건연구소

- 연구논총, 제9권, 제2호, pp. 29-36, 1999.
- 3) Woods, J.E. : An engineering approach to controlling indoor air quality, *Environmental Health Perspectives*, 95, pp. 15-21, 1991.
 - 4) 환경처 : 환경백서, pp.113-114, pp. 258-259, 2000.
 - 5) Wallace, L. : Indoor particles, *Journal of Air and Waste Management Association*, Vol. 46, pp. 98-126, 1996.
 - 6) Clayton, G.D. and Clayton, F.E. : *Pattys Industrial Hygiene and Toxicology*. 3rd, Vol. 2c, p. 4110, 1982.
 - 7) Spicer, C.W., Coutant, R.W., Ward, G.F., and Joseph, D.W. : Rates and mechanism of NO₂ removal from indoor air by residential materials, *Environment International*, 15, pp. 643-654, 1989.
 - 8) Sexton, K., Letz, R. and Spengler, J.D. : Estimating human exposure to nitrogen dioxide, an indoor/outdoor modeling approach, *Environmental Research*, Vol. 32, pp. 151-166, 1983.
 - 9) Christopher, Y., Chao, H. and Anthony, L. : A study of personal exposure to nitrogen dioxide using passive samplers, *Building and Environment*, Vol. 35, pp. 545-553, 2000.
 - 10) Charles, J., Weschler, F. and Helen, C.S. : Potential reactions among indoor pollutants, *Atmospheric Environment*, Vol. 31(21), pp. 3487-3495, 1997.
 - 11) 양원호, 손부순, 박종안, 정문호 : 평일과 주말의 활동변화에 따른 대학생들의 이산화질소 노출, *한국환경위생학회지*, 제26권, 제4호, pp. 58-64, 2000.
 - 12) Lee, K., Yang, W. and Bofinger, N.D. : Impact of microenvironmental nitrogen dioxide concentrations on personal exposures in Australia. *Journal of Air and Waste Management Association*, 50, pp. 1739-1744, 2000.
 - 13) Yanagisawa, Y. and Nishimura, H. : A badge-type personal sampler for measurement of personal exposures to NO₂ and NO in ambient air, *Environment International*, Vol. 8, pp. 235-242, 1982.
 - 14) Lee, K., Yanagisawa, Y., Spengler, J.D. and Billick, I.H. : Wind velocity effects of sampling rate of NO₂ badge. *Journal of Exposure Analysis Environmental Epidemiology*, Vol. 2, pp. 207-219, 1992.
 - 15) William, W., Nazaroff, W. and Glen, R.C. : Mathematical modeling of chemical reactive pollutants in indoor air, *Environ. Sci. Technol.* Vol. 20(9), pp. 924-934, 1986.
 - 16) Charles, R.W. and Michael, D.K. : Analysis of sampling strategies for estimating annual average indoor NO₂ concentrations in residences with gas ranges. *Journal of Air and Waste Management Association*, Vol. 46, pp. 853-860, 1996.
 - 17) Shin' ichi, Y. : Decay rates of nitrogen dioxide in a typical Japanese living room, *Environ. Sci. Technol.* Vol. 7, pp. 566-570, 1984.
 - 18) Dimitroulopouliu, C., Ashmor M.R., Byrne, M.A. and Kinnersley, R.P.: Modelling of indoor exposure to nitrogen dioxide in the UK. *Atmospheric Environment* 35, pp. 269-279, 2001.
 - 19) Karlsson, E.: Indoor deposition reducing the effect of toxic gas clouds in ordinary building *Journal of Hazardous Materials*, 38, pp. 313-327, 1994.