

## 주택의 실내공기질 개선 평가 방법

양원호<sup>†</sup> · 손부순\* · 임성국

대구가톨릭대학교 산업보건학과, \*순천향대학교 환경보건학과  
(2007. 4. 5. 접수/2007. 8. 10. 채택)

## Evaluation Method for Improvement Efficiency of Indoor Air Quality in Residence

Won-Ho Yang<sup>†</sup> · Bu-Soon Son\* · Sung-Kuk Yim

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu  
\*Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University  
(Received April 5, 2007/Accepted August 10, 2007)

### ABSTRACT

Indoor air quality is the dominant contributor to total personal exposure because most people spend a majority of their time indoors. The purposes of this study were to evaluate the alternative method for improvement of indoor air quality in house after coating titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) photocatalyst for interior part of the house using nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) multiple measurements. To evaluate the alternative method in indoor environment, daily indoor and outdoor NO<sub>2</sub> concentrations of an apartment and a detached house were daily measured for consecutive 21 days in winter and summer, respectively. Another daily 21 measurements were carried out after TiO<sub>2</sub> coating on wall paper of interior part in houses. All NO<sub>2</sub> concentrations were measured by passive filter badges. Indoor air quality models using mass balance are useful tool to quantify the relationship between indoor air pollution levels, ambient concentrations, and explanatory variables. Using a mass balance model and linear regression analysis, penetration factor (ventilation rate divided by sum of ventilation rate and decay rate) and source strength factor (emission rate divided by sum of ventilation rate and decay rate) were calculated. Subsequently, the decay constants were estimated. In this study, magnitude of improvement of indoor air quality could be evaluated by decay constant.

**Keywords:** indoor air quality, evaluation, titanium dioxide, nitrogen dioxide, ventilation

### I. 서 론

대기오염은 바람 등에 의한 자연적인 희석률이 크고 사회적 인식 확대 및 각종 환경규제 등으로 대기오염 수준은 억제되고 있으나, 실내공기는 한정된 공간에서 오염된 공기가 계속적으로 순환되면서 오염농도가 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있을 정도로 증가될 수 있기 때문에 실내환경에 대한 인식이 새롭게 부각되기에 이르렀다.<sup>1)</sup> 인간은 하루 24시간 중 80% 이상을 실내(주택, 일반사무실, 실내작업장, 공공건물, 지하시설물, 상가, 음식점, 자동차, 지하철 등)에서 생활하는 것

으로 조사보고 되고 있다.<sup>2,3)</sup> 특히, 실내환경 중에서도 주택은 가장 많이 시간을 보내는 공간으로 대략 하루 중 50% 이상 체류한다.

실내공기질(Indoor Air Quality, IAQ)에 대한 문제의 발생 배경은 각종 산업 분야에서 에너지 절약 및 효율을 높이기 위한 노력으로 건물의 단열을 위한 밀폐화와 에너지 절감 장치를 설치하는 건물의 증가로 인하여 공기의 질이 악화되는 것이다. 실제로 에너지 절약형 건물은 외부로부터의 공기 침투(infiltration)를 막는 것에 초점을 맞추어 건축되었고, 에너지 절약형의 산업용 건물에서는 건물의 유지 관리비를 줄이기 위해 의도적으로 환기량을 감소시키기도 하여 공기의 유입과 환기가 감소되어 자연히 실내공기가 오염되고 있다.<sup>4)</sup>

실내공기오염은 각종 실내공간에서 공기오염, 생활소레기, 소음, 악취 등의 각종 환경오염에 이르기까지 다

<sup>†</sup>Corresponding author : Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu  
Tel: 83-53-850-3739, Fax: 83-53-850-3739  
E-mail: whyang@cu.ac.kr

양한 형태로 발생될 수 있으며, 건물병 증후군(Sick Building Syndrome, SBS), 복합화학물질 과민증(Multi-Chemical Sensitivity, MCS), 새집 증후군(Sick House Syndrome, SHS) 등을 유발시켜 인간에게 정신적 고통을 주거나 위해요소로 작용할 수 있다. 그 뿐만 아니라, 개인 및 국가에 의료비용 증가라는 경제적 부담을 안긴다는 점에서 그 심각성을 무시하기 어렵다.<sup>5)</sup> 더욱 중요한 것은 실내 공기오염물질의 농도가 낮더라도 노약자, 유아, 환자들은 실내환경에서 장기간 생활하기 때문에 매우 큰 건강영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>6)</sup>

실내공기질에 따른 건강위해성을 고려할 때, 실내환경의 연소기구, 가구류, 내장재 등에서 발생하는 공기오염물질의 발생량 또는 실내공기 농도 측정만으로는 지금까지 알려진 오염물질의 종류 및 노출로 인한 건강영향을 명확하게 규명할 수는 없다. 이것은 실내공기질이 공기오염물질 발생량뿐만 아니라 실외공기, 환기량, 실내공간에서 오염물질의 표면반응에 의한 감소, 온도, 습도, 기타 미확인 요인 등에 영향을 받기 때문이다.<sup>7)</sup>

현재 실내공기질의 개선 방법은 실내 오염원의 감소, 실내·외 공기 환기량 증대, 공기오염물질과 실내환경내 건축자재와 가구 등과의 표면반응에 의한 감소를 통해서 청정한 실내환경을 조성할 수 있다. 더불어 광촉매의 실내환경내 코팅 및 공기청정기의 이용은 실내공기질 개선에 도움을 줄 수 있다.<sup>8)</sup> 실내공기의 제어 및 개선 방법들은 각각 장단점을 가지고 있으나, 실내환경내 광촉매 코팅은 실내환경 공기질 개선 방법 중 첫 번째인 완벽한 실내오염 배출원 감소의 불가능과 두 번째인 실외 대기오염이 심각한 지역의 환기는 오히려 실내공기를 더욱 악화시킬 수 있는 것으로 고려하면, 표면반응을 증대시키는 것은 매우 유효하게 실내공기질을 개선할 수 있다.<sup>9)</sup>

그럼에도 불구하고 실제 주택 현장에서 광촉매 코팅 후 실내공기질 개선 정도를 평가할 수 있는 방법이 현재 부재한 상태이다. 본 연구는 실내공기질 개선 평가 방법으로 실내환경 물질수지에 의한 이산화질소(NO<sub>2</sub>)를 목적물질로 감소상수를 측정하여 광촉매의 실내환경 코팅에 의한 실내공기질 개선 정도를 평가할 수 있는 방법을 제안하는 것이다.

## II. 연구내용 및 방법

본 연구는 실내공기질 개선의 한 방법인 실내환경용 특히 벽지 코팅용 이산화티탄(TiO<sub>2</sub>) 광촉매를 제조하여 주택 실내환경 내에 코팅한 후 실내공기질 개선의 효

율을 평가하는 방법으로, 주택 실내 및 실외의 이산화질소(NO<sub>2</sub>) 농도를 연속적으로 다중측정하였다.

### 1. 표본크기 및 시간

본 연구에서 수행될 표본은 2주택(아파트와 단독주택)을 제외하여 TiO<sub>2</sub> 광촉매 코팅 전·후의 NO<sub>2</sub> 농도를 실내의 침실, 거실, 부엌과 실외를 각각 21일씩 총 42일 동안 연속적으로 매일 겨울(2004년 12월)과 여름(2005년 7월)에 각기 측정하였다. 그리고 환기량도 42일 동안 매일 NO<sub>2</sub> 측정과 동시에 측정하였다. 21일 동안의 측정기간 결정은 매일 21일 동안 측정된 공기오염물질 농도 값 사이의 자기상관을 나타내지 않았으며, 매일 30일 동안 측정된 결과와 통계적으로 유의한 차이가 없었다는 문헌을 고려하여 결정하였다.<sup>10)</sup>

아파트의 실내 공간을 실측한 결과 체적은 160 m<sup>3</sup>이었고, 단독주택은 230 m<sup>3</sup>이었다. 아파트의 실내환경의 바닥은 나무 목재재질이었고, 침실, 거실, 주방에 벽지가 있었다. 건축 연수는 10년이었고, 새로 구입한 가구류가 없기 때문에 신축건물 또는 신가구류에서 발생하는 휘발성유기화합물질(VOCs) 및 포름알데히드(HCHO)에 의한 NO<sub>2</sub> 반응기전은 없는 것으로 가정할 수 있었다. 단독주택의 실내환경 바닥은 베니어판이었고, 침실, 거실, 부엌에 벽지가 있었다. 건축연수는 12년이었고, 아파트와 마찬가지로 새로 구입한 가구류가 없기 때문에 VOCs 및 HCHO의 발생은 없는 것으로 가정하였다.

### 2. 이산화질소(NO<sub>2</sub>) 측정 및 분석

측정기간 매일 가스렌지(gas range)를 30분간 작동하여 NO<sub>2</sub>를 발생시켰고, 이것은 측정기간 동안 NO<sub>2</sub>의 실내 발생량을 일정하게 할 수 있다. NO<sub>2</sub> 측정은 badge type의 수동식 시료채취기를 사용하였다. NO<sub>2</sub> 수동식 시료채취기는 작고(5×4×1 cm<sup>3</sup>) 가벼운 장점을 지니고 있다(15 g, Toyo Roshi Ltd.).<sup>11)</sup> NO<sub>2</sub> 농도분석은 sulfanilic acid 5g, phosphoric acid(85%) 50 ml과 NEDA(N(1Naphthyl) ethylenediamine dihydrochloride, 98%) 0.05 g을 이용하여 color reagent(azodyeforming) 1 l를 제조하였다. 수동식 시료채취기를 NO<sub>2</sub>가 존재하지 않는 챔버(chamber)에서 분해하여 셀룰로오즈 여지를 시험관(16×100 mm)에 넣고, color reagent 10.0 ml를 시험관에 주입 후, NO<sub>2</sub>의 정량분석은 photo-spectrometer(Shimabzu UV-1201)를 이용하였다.

### 3. 환기량 측정

환기량의 측정은 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도를 이용하여

측정하였다. 환기율의 측정은 환기에 의한 농도 감소법으로 회귀방법(regression method)을 이용하여 공기환기 횟수(Air Change per Hour; ACH)를 계산하였다.<sup>12)</sup> NO<sub>2</sub>의 농도 측정동안 동시에 광촉매 코팅 전·후 각각 21일씩 총 42일 동안 매일 측정하였다. CO<sub>2</sub>의 발생량도 NO<sub>2</sub> 마찬가지로 가스렌지에서 발생되며, 가스렌지 30분 작동 후 10분 동안 팬(fan) 3개를 작동시켜 실내 환경 내에서 완전혼합 후 10분 후에 바로 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하였다.

4. 광촉매 제조

본 연구에서 분말 형태의 광촉매의 단점인 박리 현상을 방지하기 위하여 전구물질로서 Ti(OC<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)<sub>4</sub>로부터 sol을 제조하였다. 먼저 Ti(OC<sub>3</sub>H<sub>7</sub>)<sub>4</sub>, 증류수, 화학적 첨가제로서 디에틸아민(diethylamine)을 첨가하여 혼합한 후 이 용액을 압력 용기에 넣고 10~20 atm, 150~200°C의 조건에서 약 2시간 반응시켰다. 이렇게 만들어진 sol 용액에 무기계 binder로 SiO<sub>2</sub>의 화합물을 일정량 혼합하였다.<sup>13)</sup> 코팅 방법은 일반적으로 dip-coating, spin-coating과 spray coating으로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 컴프레서(compressor)를 이용하여 spray-coating 방법으로 실내환경내 벽지에 TiO<sub>2</sub> sol을 코팅하였다.

5. 실내공기질 평가방법

물질수지를 이용한 1구획모델(one-compartment)은 완전 혼합된 하나의 공간으로 공기의 유입 및 유출 사이의 관계를 기술하며 실내공기질을 설명하기 위해 자주 이용된다.<sup>14)</sup> 물질수지에 의한 실내공기질 모델은 실내 공기오염물질 농도와 관련 변수들 사이의 관계를 나타낼 수 있는 유용한 방법이며, 공기오염물질의 확산과 이동, 공기오염물질 발생강도, 환기율, 제거율 등의 요인들을 기술한다.

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

여기서, C<sub>i</sub>=indoor concentration (ug/m<sup>3</sup>), C<sub>o</sub>=outdoor concentration (ug/m<sup>3</sup>), I=air exchange rate (ACH : Air exChanges per Hour, hr<sup>-1</sup>), S=source strength (ug/m<sup>3</sup>/hr), R=decay rate (ug/hr), V=volume of the space (m<sup>3</sup>), t=time (hr) and m=mixing factor (0≤m≤1).

식 (1)에서 실내 공기오염물질(NO<sub>2</sub>)의 감소율(R)은 감소상수(K, hr<sup>-1</sup>)와 실내에 존재하는 질량(VC<sub>i</sub>)로 나타

낼 수 있다.

$$R = KVC_i \tag{2}$$

식 (1)과 (2)에서 완전혼합(m=1)과 정상상태(dC<sub>i</sub>/dt=0)을 가정하면 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$C_{i(ss)} = \left(\frac{I}{I+K}\right)C_o + \left(\frac{S}{I+K}\right) \tag{3}$$

여기서, C<sub>i(ss)</sub>=average steady-state indoor concentration, S=average source strength and C<sub>o</sub>=average outdoor concentration.

일정기간(21일) 동안 다중측정으로 실내 및 실외의 NO<sub>2</sub> 농도를 측정한다면, 식 (3)에서 일차 선형회귀식을 이용하여 기율기와 절편 값으로부터 투과요인((I)/(I+K))과 발생요인(S)/(I+K)의 값을 각각 계산할 수 있다. 그리고, 투과요인은 I와 K의 값이 0보다 크기 때문에 0과 1사이여야만 한다. 또한 오염원 발생요인은 S가 0과 같거나 크기 때문에 0이상이어야 한다. 투과요인에서 측정된 환기량을 대입하여 측정기간 동안의 감소상수(K)를 계산할 수 있다.

그리고 Chao가 수동식 시료채취기를 이용하여 발생강도와 제거율을 시간가중에 의해 동시에 계산한 방법을 적용하였다.<sup>15)</sup> 이 방법은 식 (4)와 같이 공기오염물질 측정에서 일정 기간 동안의 포집의 평균 농도에서 처음농도와 끝농도를 근사하게 같다고 가정하여 발생강도와 제거율을 실내공기 및 실외공기 농도, 체적, 환기율로 나타낸 것이다.

$$(S - R) = [C_i - C_o]VI \tag{4}$$

식 (4)에서 (S-R)은 정(+) 값을 나타낼 수 있으며, 부(-) 값을 나타낼 수도 있다. 즉, 식 (4)은 대상 공기 물질에 대해 평균 실내 및 실외농도, 그리고 실내체적과 환기율을 측정된다면 (S-R)을 계산할 수 있음을 알 수 있다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 다중측정에 의한 이산화질소 감소상수

본 연구에서 아파트를 대상으로 TiO<sub>2</sub> 광촉매 코팅 전·후의 실내·외 NO<sub>2</sub> 농도값을 Table 1에 나타내었다. 겨울철의 경우 대상 아파트 실내의 21일 동안의 평균 실내 NO<sub>2</sub> 농도(35.3 ug/m<sup>3</sup>)는 광촉매 코팅전에

Table 1. NO<sub>2</sub> concentrations and ventilation rate measured in an apartment

	Winter						Summer					
	Before coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst		After coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst		Before coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst		After coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst		Before coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst		After coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst	
	Kitchen (n=21)	Bed room (n=21)	Living room (n=21)	Kitchen (n=21)	Bed room (n=21)	Living room (n=21)	Kitchen (n=21)	Bed room (n=21)	Living room (n=21)	Kitchen (n=21)	Bed room (n=21)	Living room (n=21)
Indoor (mg/m <sup>3</sup> )	38.3±5.4	28.5±2.8	32.4±3.6	32.9±5.2	22.8±2.4	28.5±3.8	41.5±6.6	31.2±3.1	36.4±6.1	40.2±8.2	28.9±4.2	30.9±7.8
		35.3±8.3			28.4±9.9			37.6±8.3			32.8±9.5	
Outdoor (mg/m <sup>3</sup> )					38.1±9.3			47.9±10.2			49.8±9.9	
Indoor/outdoor	0.89±0.12	0.72±0.09	0.80±0.11	0.86±0.13	0.67±0.12	0.73±0.14	0.87±0.13	0.69±0.10	0.77±0.14	0.81±0.11	0.61±0.09	0.64±0.13
ACH (hr <sup>-1</sup> )		0.53±0.12			0.58±0.15			0.72±0.19			0.69±0.21	

비해 코팅후(28.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 약 19.5% 감소하는 모습을 보이고 있으며,<sup>16,17)</sup> 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다( $p=0.03$ ). 여름철의 경우 평균  $\text{NO}_2$  농도값은 코팅전에 비해 코팅후가 낮았으며 약 11.8% 감소하였지만 통계적 차이를 나타내지 않았다. 여름철의 평균  $\text{NO}_2$  농도값은 겨울철에 비해서 실내, 실외 모두 높았으며, 환기량도 겨울철에 비해 상대적으로 높은 값을 보였다.

실내/실외의 평균  $\text{NO}_2$  농도비는 겨울철 광촉매 코팅 전에 주방 0.89, 침실 0.72, 거실 0.80을 각각 나타내었지만, 광촉매 후에는 0.86, 0.67, 0.73을 보여 광촉매에 의한 감소가 있음을 나타내고 있다. 여름철의 경우도 실내/실외의  $\text{NO}_2$  농도비를 광촉매 코팅 전후 비슷한 경향을 나타내었지만, 겨울철에 비해 상대적으로 낮은 값을 보였다. 아파트에서 주방이 가장 높은  $\text{NO}_2$  농도 값을 나타내었고, 침실이 가장 낮은 농도값을 보였다. 이것은  $\text{NO}_2$  발생원이 주방임을 감안하면 당연한 결과이며, 침실이 낮은 것은 이불류 등에 의한  $\text{NO}_2$  반응과 비교적 침실이 주방에서 가장 먼 곳을 감안할 때 확산에 의한 농도 감소로 볼 수 있다.<sup>18)</sup>

특히 고려할 점은 농도변화라고 할 수 있다. 즉, Table 1에서 각 측정지점에서의 표준편차를 살펴보면 광촉매 코팅을 한 후에도 코팅 전보다 높을 수 있음을 나타내고 있다. 본 연구에서 실내 발생강도는 30분 동안의 가스렌지 점화였기 때문에 실내 발생강도는 매일 같은 것으로 가정할 수 있다. 따라서 실내  $\text{NO}_2$  농도는 실내  $\text{NO}_2$  발생뿐만 아니라 다른 요인이 영향을 주고 있음을 나타내는 것이라 할 수 있다. 이 결과는 실제 주택 현장에서 실내공기질 개선 평가시 단순히 실내 농도 측정만으로는 정확한 개선정도를 평가할 수 없음을 나타내고 있는 것이다. 이것은 실내공기질이 다른 요인 즉, 실외  $\text{NO}_2$  농도가 환기에 따른 유입 때문이며, 그 영향 요인을 함께 고려하여 개선 정도를 평가해야 함을 나타내고 있다.

식 (3)에 의해 다중측정된  $\text{NO}_2$  농도에서 투과요인과 발생요인을 계산하였다. 겨울철의 경우  $\text{TiO}_2$  광촉매 코

팅전에 투과요인과 발생요인은 각각 0.393 및 11.562를 나타내었고, 광촉매 코팅후는 각각 0.387 및 9.973를 나타내었다(Table 2). 여름철은 투과요인과 발생요인이 광촉매 전 0.434, 9.711, 광촉매 코팅후 0.404, 9.205 나타내었다. 이 결과는 연구방법에서 예상한 것과 같이 투과요인이 0~1 범위이었고, 발생요인이 0 이상인 것과 일치하였다.

여름철, 겨울철 각각 코팅전·후 가스렌지에서 측정기간 동안 발생된 평균  $\text{NO}_2$  발생률은 비슷한 값을 나타내어, 매일 30분간의 가스렌지 작동이 실내  $\text{NO}_2$  발생 강도를 비슷한 값으로 나타낸 것으로 볼 수 있다.<sup>19)</sup> 측정된 평균 환기량을 이용하여 추정된 감소상수(K,  $\text{hr}^{-1}$ )는  $\text{TiO}_2$  광촉매 코팅전 0.82를 나타내었고, 광촉매 코팅 후는 0.92를 나타내어 약 10.9%의 증가를 나타내었다. 여름철의 경우 감소상수는 코팅전 0.94, 코팅후 1.02로 약 7.9%의 증가를 보였다. 결국 두 계절의 결과는  $\text{TiO}_2$  광촉매 코팅이 감소상수를 증가시킨 것으로 판단할 수 있다.

실내환경의  $\text{NO}_2$  농도 측정에 의한 광촉매 전후의 감소 정도와 물질수지에 의한 감소상수(K)를 비교할 때, 실내환경의 단순 공기질 측정은 그 영향요인을 고려할 때 개선 정도의 효율 평가시 오차를 일으킬 수 있으나, 감소상수 결과 자료는 그 자체로 명확한 효율 평가를 제시할 수 있다고 판단한다.

단독주택 1곳을 대상으로  $\text{TiO}_2$  광촉매 코팅전·후의 실내·외  $\text{NO}_2$  농도값을 Table 3에 나타내었다. 겨울철의 경우 대상 아파트 실내의 21일 동안의 평균 실내  $\text{NO}_2$  농도(35.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 광촉매 코팅전에 비해 코팅후(36.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 오히려 높은 값을 보이고 있지만 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 여름철의 경우 평균  $\text{NO}_2$  농도값은 코팅전에 비해 코팅후가 낮았지만 통계적 차이를 나타내지 않았다. 실내/실외의 평균  $\text{NO}_2$  농도비는 겨울철 광촉매 코팅 전에 주방 0.93, 침실 0.71, 거실 0.82을 각각 나타내었지만, 광촉매 후에는 0.73, 0.63, 0.67을 보여 광촉매에 의한 감소가 있음을 나타내고 있다.

**Table 2.**  $\text{NO}_2$  decay constant and source strength in an apartment by multiple measurements

	Winter		Summer	
	Before coating of $\text{TiO}_2$ photocatalyst	After coating of $\text{TiO}_2$ photocatalyst	Before coating of $\text{TiO}_2$ photocatalyst	After coating of $\text{TiO}_2$ photocatalyst
Penetration factor	0.393	0.387	0.434	0.404
Source generation factor	11.562	9.973	9.711	9.205
Decay constant ( $\text{hr}^{-1}$ )	0.82	0.92	0.94	1.02
Source emission rate ( $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$ )	15.61	14.96	16.12	15.74

Table 3. NO<sub>2</sub> concentrations and ventilation rate measured in a detached house

	Winter						Summer					
	Before coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst		After coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst		Before coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst		After coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst		Before coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst		After coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst	
	Kitchen	Bed room (n=21)	Kitchen	Bed room (n=21)	Kitchen	Bed room (n=21)	Kitchen	Bed room (n=21)	Kitchen	Bed room (n=21)	Kitchen	Bed room (n=21)
Indoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	43.1±6.2	31.4±5.8	35.2±7.3	41.7±8.5	30.8±6.4	37.3±7.9	43.1±8.6	32.6±5.3	38.3±8.4	37.8±9.6	28.8±7.2	33.7±7.8
	35.8±9.9		36.2±11.9		37.2±10.3		37.2±10.3		37.2±10.3		32.8±9.7	
Outdoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	46.1±12.4		57.9±15.4		45.1±15.6		45.1±15.6		45.1±15.6		43.6±14.9	
Indoor/outdoor	0.93±0.12	0.71±0.11	0.82±0.13	0.73±0.15	0.63±0.14	0.67±0.16	0.89±0.17	0.74±0.11	0.85±0.17	0.85±0.13	0.68±0.09	0.76±0.12
ACH ( $\text{hr}^{-1}$ )	0.71±0.21		0.75±0.30		0.85±0.28		0.85±0.28		0.85±0.28		0.89±0.35	

Table 4. NO<sub>2</sub> decay constant and source strength in a detached house by multiple measurements

	Winter			Summer		
	Before coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst	After coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst	After coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst	Before coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst	After coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst	After coating of TiO <sub>2</sub> photocatalyst
Penetration factor	0.438	0.399	0.399	0.457	0.457	0.424
Source generation factor	9.759	8.622	8.622	8.624	8.624	7.848
Decay constant ( $\text{hr}^{-1}$ )	0.91	1.13	1.13	1.01	1.01	1.21
Source emission rate ( $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$ )	15.81	16.21	16.21	16.04	16.04	16.48

**Table 5.** NO<sub>2</sub> decay constant and source strength in apartment by time weighted method

Sampling	Sample site	S-R (ug/hr)	R* (ug/hr)	K (hr <sup>-1</sup> )	
Winter	Outdoor				
	Before coating	Kitchen	-407.1	7559.1	1.34
		Indoor Bedroom			
		Livingroom			
	After coating	Outdoor	-900.2	8052.2	1.77
		Indoor Kitchen			
Bedroom					
Summer	Outdoor				
	Before coating	Kitchen	-1186.6	8338.6	1.39
		Indoor Bedroom			
		Livingroom			
	After coating	Outdoor	-1876.8	9028.8	1.72
		Indoor Kitchen			
Bedroom					
	Livingroom				

\*NO<sub>2</sub> source emission rate is 7152 ug/hr in house volume of 160 m<sup>3</sup>.

**Table 6.** NO<sub>2</sub> decay constant and source strength in detached house by time weighted method

Sampling	Sample site	S-R (ug/hr)	R* (ug/hr)	K (hr <sup>-1</sup> )	
Winter	Outdoor				
	Before coating	Kitchen	-1682.0	11963.0	1.45
		Indoor Bedroom			
		Livingroom			
	After coating	Outdoor	-3743.3	14024.3	1.68
		Indoor Kitchen			
Bedroom					
Summer	Outdoor				
	Before coating	Kitchen	-1544.5	11825.5	1.38
		Indoor Bedroom			
		Livingroom			
	After coating	Outdoor	-2210.8	12491.8	1.66
		Indoor Kitchen			
Bedroom					
	Livingroom				

\*NO<sub>2</sub> source emission rate is 10281 ug/hr in house volume of 230 m<sup>3</sup>.

단독주택 결과에 의하면 광촉매 코팅이 오히려 실내 NO<sub>2</sub> 농도를 증가시키는 것으로 판단할 수 있지만, 감소 상수(K)의 결과를 보면 겨울 코팅전 0.91, 코팅후 1.13으로 19.4% 증가한 것을 알 수 있다(Table 4). 이 결과는 실내 NO<sub>2</sub> 농도의 변이는 실내 NO<sub>2</sub> 발생뿐만 아니라 다른 요인이 영향을 주고 있음을 나타내는 것이

라 할 수 있다. 이 결과는 실제 주택 현장에서 실내공기질 개선 평가시 단순히 실내 농도 측정만으로는 정확한 개선정도를 평가할 수 없음을 나타내고 있다.

**2. 시간가중에 의한 이산화질소 감소상수**

식 (4)에서 필요한 발생량(S) 값은 Yang 등이 주택

의 가스렌지에서 발생하는 NO<sub>2</sub> 발생률을 다중측정에 의해 추정된 44.7 ug/m<sup>3</sup>/hr을 이용하였다.<sup>10)</sup> 식 (4)에 의해 추정된 감소상수를 Table 5에 나타내었다.

Table 5에서 아파트의 겨울과 여름에 각각 감소상수(K)는 24.3%, 19.2% 증가한 것으로 추정되었다. 이 결과는 1의 다중측정 결과와 다른 증가 효율을 나타내고 있다. 다중측정 결과보다 상대적으로 높은 증가를 나타내었다. 하지만 주요점은 감소상수의 증가가 광촉매 코팅에 의한 것이라는 것이다. Table 3의 단독주택의 결과를 보면, 실내 NO<sub>2</sub> 농도는 광촉매 코팅후 증가하였지만, 계산된 감소상수 값은 13.7% 증가한 것으로 나타났다.

#### IV. 결 론

실제 현장에서 실내공기질 개선을 위한 노력이 다양한 방법으로 연구되고 있으나, 그 개선 정도를 평가하는 것에 현장 실무자뿐만 아니라 연구자들도 어려움을 갖고 있었다. 그 이유는 실내 현장의 실내공기질이 실외공기 농도, 환기, 반응을 통한 감소, 실내 발생량, 실내기류, 온도, 습도 그리고 확인되지 못한 요인 등 다양한 인자에 영향을 받기 때문이다. 본 연구는 아파트 및 단독주택에서 TiO<sub>2</sub> 광촉매를 벽지에 코팅 전·후의 각각 21일 동안 매일 다중측정으로 TiO<sub>2</sub> 광촉매 코팅 물질 표면반응에 의한 NO<sub>2</sub> 제거율의 감소상수를 실내 환경 물질수지에 적용하여 실내공기질 개선 정도를 평가하였다. 본 연구결과는 새로운 환경문제로 부각되는 실내공기오염 측면에서 실내공기질 개선의 방법으로 다양한 방법이 시도되고 있으나, 그 개선정도를 명확히 방법을 제시한 것으로 광촉매뿐만 아니라 공기청정기, 환기장치 등 다른 제어장치에도 개선정도 평가에 같은 방법으로 적용될 수 있을 것으로 생각한다.

#### 감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-041-D00395).

#### 참고문헌

- Lai, H. K., Bayer, L. B. and Colville, R. : Determinants of indoor air concentrations of PM<sub>2.5</sub>, black smoke and NO<sub>2</sub> in six European cities. *Atmospheric Environment*, **40**, 1299-1313, 2006.
- 통계청 : 생활시간조사보고서, 제 1권 생활시간량편, 1999.
- 양원호, 배현주, 정문호 : 거주지역 실내공기 특성 및 이산화질소 노출에 관한 연구. *한국환경위생학회지*, **28**(2), 183-192, 2002.
- Jones, A. P. : Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, **33**, 4536-4564, 1999.
- Hoddinott, K. B. and Lee, A. P. : The use of environmental risk assessment methodologies for an indoor air quality investigation. *Chemosphere*, **41**, 77-84, 2000.
- Henry, C. J., Fishbein, L., Meggs, W. J., Ashford, N. A., Schulte, P. A., Anderson, H., Osborne, J. S. and Sepkovic, D. W. : Approaches for assessing health risks from complex mixtures in indoor air: A panel overview. *Environmental Health Perspectives*, **95**, 135-143, 1991.
- Ellacott, M. V. and Reed, S. : Development of robust indoor air quality models for the estimation of volatile organic compound concentrations in buildings. *Indoor Built Environment*, **8**, 345-360, 1999.
- Ichiura, H., Kitaoka, T. and Tanaka, H. : Photocatalytic oxidation of NO<sub>x</sub> using composite sheets containing TiO<sub>2</sub> and a metal compound. *Chemosphere*, **51**, 855-860, 2003.
- Sekine, Y. and Nishimura, A. : Removal of formaldehyde from indoor air by passive type air-cleaning materials. *Atmospheric Environment*, **35**, 2001-2007, 2001.
- Yang, W., Lee, K. and Chung, M. : Characterization of indoor air quality using multiple measurements of nitrogen dioxide. *Indoor Air*, **14**, 1-7, 2004.
- Yanagisawa, Y. and Nishimura, H. : A badge-type personal sampler for measurement of personal exposures to NO<sub>2</sub> and NO in ambient air. *Environment International*, **8**, 235-242, 1982.
- 양원호, 배현주, 이기영, 정문호 : 측정시간에 따른 거주지역 환기량 계산 오류에 관한 연구. *한국환경위생학회지*, **26**(3), 50-54, 2000.
- 양원호, 김대원, 정문호, 양진섭, 박기선 : 이산화탄소 광촉매 졸(sol)의 실내환경 코팅에 의한 실내공기질 개선. *한국환경위생학회지*, **30**(2), 92-97, 2004.
- 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.
- Chao, C. Y. H. : Comparison between indoor and outdoor air contaminant levels in residential building from passive sampler study. *Building and Environment*, **36**, 999-1007, 2001.
- Ao, C. H., Lee, S. C. and Yu, J. C. : Photocatalyst TiO<sub>2</sub> supported on glass fiber for indoor air purification: effect of NO on the photodegradation of CO and NO<sub>2</sub>. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **156**, 171-177, 2003.
- Yumoto, H., Matsudo, S. and Akashi, K. : Photocatalytic decomposition of NO<sub>2</sub> on TiO<sub>2</sub> films prepared by arc ion plating. *Vacuum*, **65**, 509-514, 2002.
- Spicer, C. W., Coutant, R. W., Ward, G. F., Joseph, D. W., Graynor, A. J. and Billick, I. H. : Rate and



- mechanisms of NO<sub>2</sub> removal from indoor air by residential materials. *Environmental International*, **15**, 634-654, 1989.
19. Cyrys, 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.