

Session III-1

물질수지를 이용한 실내공기질 개선정도 평가

Evaluation Method for Improvement of Indoor Air Quality Using Mass Balance

양 원 호

대구가톨릭대학교 산업보건학과

Won Ho Yang

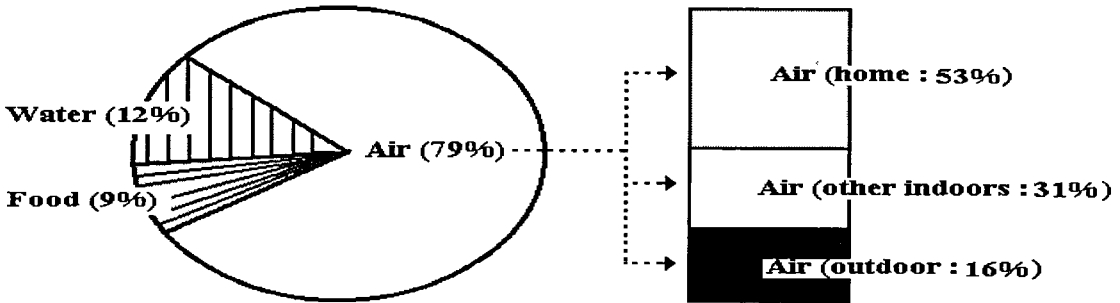
Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

1. 서론

인간이 생명을 유지하기 위해서는 항상 신선한 공기를 충분하게 공급받아야 함에도 불구하고 세계의 주요 도시는 대기오염이 심각한 실정이며, 우리나라에서도 1970년대 이후 산업구조의 대형화로 에너지 소비가 급증함으로써 대기오염의 발생량이 증가하여 최근에는 주요 도시의 대기오염은 인체에 영향을 미칠 정도로 그 수준이 악화되어 가고 있다.¹⁾ 따라서 도시지역의 대기오염 문제를 해결하기 위하여 대기환경보전법에서 오존정보·예보 발령시 차량 통행 제한을 법제화하는 등 적극적인 노력을 기울이고 있다. 그러나 대부분의 사람들은 실내공기오염(Indoor Air Pollution, IAP)이 인체에 미치는 영향은 실외 대기오염보다 더욱 중요하다는 사실을 대부분 인식하지 못하고 있다.²⁾

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.^{3,4)} 인간은 일반적으로 대략 하루에 1.5kg의 음식물을 섭취하고 2kg 정도의 물을 마시며, 공기는 이보다 거의 10배에 달하는 약 13kg 정도를 마셔야 살 수 있고 단 몇 분만 호흡을 멈추더라도 곧 사망하게 될 만큼 중요하다. <그림 1>는 직장 성인이 하루 중 활동에 따른 공기, 물, 음식물 섭취와 공기에서는 주택실내, 기타 실내환경, 실외 대기환경의 비율을 나타내었다. 인간은 하루 24시간 중 90% 이상을 실내(주택, 일반사무실, 실내작업장, 공공건물, 지하시설물, 상가, 음식점, 자동차, 지하철

등)에서 생활하는 것으로 조사보고 되고 있다.^{5,6)} 특히, 실내환경 중에서도 주택은 가장 많이 시간을 보내는 공간으로 대략 하루 중 50% 이상 체류한다.



<그림 1> 인간이 하루 중 종량당 물질 섭취량 비율

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.⁷⁾ 실내공기오염의 주요 원인은 인구의 밀집화, 현대사회의 실내 생활화, 실내공간의 밀폐화 등으로 도시의 집중화가 증가될수록 심화되고 있다. 실내공기오염은 각종 실내공간에서 공기오염, 생활쓰레기, 소음, 악취 등의 각종 환경오염에 이르기까지 다양한 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.⁸⁻¹⁰⁾ 즉, 실내에서의 공기오염물질 노출이 실외 대기노출보다 실제적 영향 즉 건강장해를 야기할 수 있음을 알 수 있다. 더욱 중요한 것은 실내 공기오염물질의 농도가 낮더라도 노약자, 유아, 환자들은 실내환경에서 장기간 생활하기 때문에 매우 큰 건강영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾

한편 실내환경 중에서 학교 실내공기질의 중요성은 선진 외국에서 이미 인식되어 많은 연구가 수행되고 있다. Shendell 등은 학교 교실에서 CO₂ 농도가 1000 ppm 증가할 때 학생들의 결석률이 10~20% 증가했음을 보고하였고,¹²⁾ Rosen과 Richardson은 학교 교실에 전기집진기를 이용한 공기정화기를 설치하여 학생들의 결석률을 감소시켰다.¹³⁾ 프랑스 학교 교실에서 VOCs, 암모니아, 이산화황을 측정한 Memmhaus 등은 실내공기오염물질이 학생들에게 감각기능에 영향이 있음을 보고하였고,¹⁴⁾ Daisey 등은 학교교실에서 HCHO, VOCs, bioaerosol, 불충분한 환기가 천식 등의 호흡기 질환을 야기할 수 있다고 하였다.¹⁵⁾ 또한 홍콩, 이탈리아 등

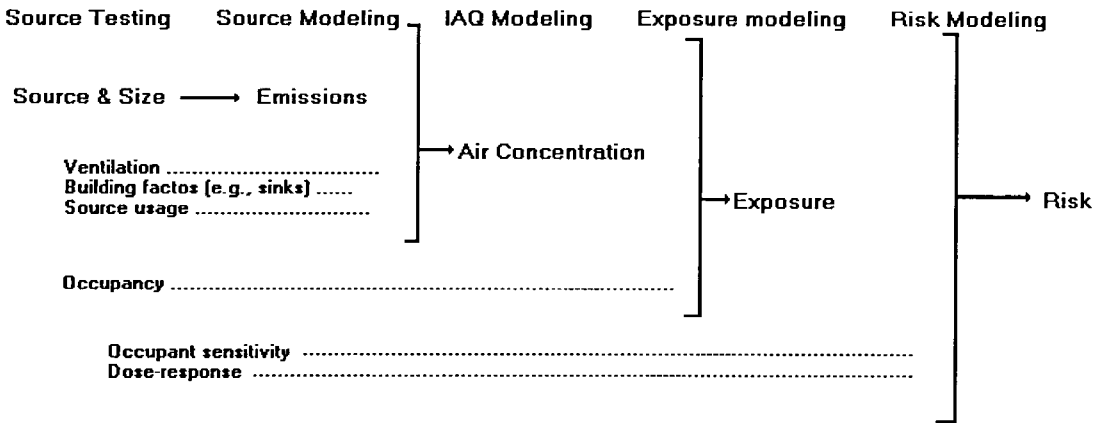
세계 각국에서 학교교실의 실내 공기질을 평가하고 개선시키려는 노력을 하고 있다. 반면, 국내에서는 학교 교실의 실내공기질을 대상으로 일부 연구가 수행되었으나 부족한 형편이고,¹⁶⁾ 최근 교육인적자원부 주관으로 전국 초·중·고등학교를 대상으로 학교 실내공기질을 측정 평가하였다.¹⁷⁾

실내환경의 주요 유해공기물질 중 이산화질소(NO₂)는 고온의 연소과정에서 발생하는 부산물로서 실외 대기환경에서는 차량, 발전소와 산업장 등에서 발생되고 있다. 주택 실내환경에서 NO₂의 농도는 가스렌지(gas range), 케로센(kerosene) 난방기, 흡연 등에 주로 영향을 받는다. 그리고, 주택 등 실내공간의 NO₂ 농도는 환기량(air exchange rate) 및 실내 표면반응과 같은 주택특성에 영향을 받는다.¹⁸⁾ 인간에 대한 NO₂의 체감양상은 1~3 ppm에서 냄새를 감지하고, 13 ppm 정도의 농도에서 눈의 고통과 코의 자극이 심하며, 100 ppm 이상의 농도에서는 치명적이고 폐수종과 사망에까지 이르게 된다. 또한 NO₂은 식물세포를 파괴시키는 작용을 하여 20~40 ppm이 되면 잎을 갈색으로 변화시키며, 잎의 맥간 반점, 잎 전체에 점상 반점을 일으킨다. 화훼식물은 잎 전체를 갈색으로 변화시키고 소나무의 경우에는 잎 내부를 갈색 혹은 흑갈색으로 변화시킨다. 특히 우리나라에서는 취사용으로 거의 모든 주택들이 가스렌지(gas range)를 사용하기 때문에, 가스렌지 연소에 의한 NO₂ 노출·위해성 평가 및 개선에 대한 연구가 필요하다. 또한 한국의 노약자, 유아와 전업주부는 일반적으로 주택내에서 보내는 시간이 다른 인구집단에 비하여 훨씬 높기 때문에 NO₂의 제어 방법은 중요하며, 그 제어 방법을 평가하는 기법을 개발하는 것은 더욱 필요하다.

주택 등의 비작업 실내환경에 관한 연구 및 보고는 비교적 최근이지만,¹⁹⁾ 실내공기오염은 미국 환경청 과학자문회의(Science Advisory Board, SAB)에서 중요 환경문제인 31개 목록에서 4와 5 번째에 위치할 만큼 중요한 분야이다.²⁰⁾ 주요 선진국의 연구에 의하면, 실내공기질 성분 중 1 ppb와 1 ppm 사이의 농도를 가진 공기오염물질이 250 종류 이상이며, 유기화합물(organic compounds)만 800개 이상이 확인된 상태이다.²¹⁾ 실내공기 중에는 물리적, 화학적 및 생물학적으로 다양한 오염물질이 존재할 가능성이 있으며 이러한 공기오염물질들은 외부공기의 유입, 담배연기, 난방기, 오븐(oven), 취사도구, 시멘트, 세정제, 건축자재, 페인트 등과 같은 복합적인 배출원에서 기인되므로 그 배출량 역시 오염물질에 따라 상당한 편차를 나타내는 것으로 알려져 있다.²²⁾ 최근에는 실내공기오염의 건강영향을 보다 정확히 분석하기 위하여 개인의 하루 24시간 중 활동행태(time activity)에 따른 특정 오염물질에 노출되는 양을 측정하고 있으며, 단일물질뿐 아니라 복합 화학물질의 영향에 의한 복합화학물질 과민증(MCS) 관련 연구도 확대되고 있다.²³⁾

Nazaroff와 Weschler는 ‘실내공기와 공익(公益)’이란 주제에서 실내공기오염 노출과 연관된 건강위해성은 다른 환경 매개체와 비교하여 위해성이 매우 높다고 했다.²⁴⁾ 예를 들면, 음용수, 실외 대기오염물질, 유해폐기물 매립지에 의한 평생기간 동안 조기사망(premature death)의 위해성은 10⁻⁶~10⁻⁵에 반하여 실내공기오염에 의한 조기사망의 위해성은 적어도 10⁻⁴~10⁻³이며 최대로 10⁻²인 것을 고려하면, 과연 유해폐기물 매립지 등의 위해성을 감소시키기 위해 막대한

비용을 사용하는 것이 올바른 것인가? 라고 주장하였다. Lee 등의 연구에 의하면 NO₂의 개인 노출은 실외 대기의 NO₂ 농도보다 주택 실내농도와 더 높은 상관성을 나타내었다.²⁵⁾ NO₂ 뿐만 아니라 휘발성 유기화합물질(VOCs), 미세분진(PM)의 개인노출도 실외 대기환경보다 주택의 실내농도가 더 큰 영향을 주었다.²⁶⁾ 실외 대기환경에서 여름철 광화학스모그에 의해서 발생하는 오존(O₃)조차도 개인노출은 실내환경과 더 높은 연관성을 가지고 있다. 이것은 현대 도시인의 경우 많은 시간을 실내환경에서 생활하기 때문이며, 공기오염물질에 대한 건강영향은 대부분 실내공기질에 의한 것으로 생각할 수 있다. 결론적으로, 개인 또는 어떤 인구집단의 공기오염물질 노출정도에 영향을 일으키는 주된 미세환경은 실내공간이며, <그림 2>은 실내공기와 연관된 건강영향 과정을 나타내고 있다.²⁷⁾



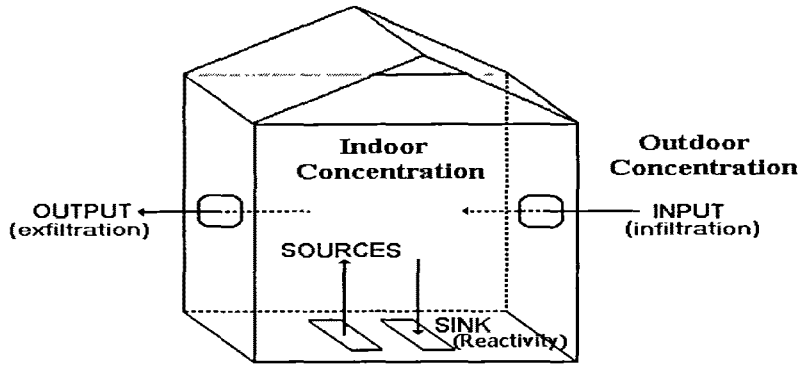
<그림 2> 실내환경에서 공기오염물질 발생과 건강 위해성

전 세계적으로 실내공기질의 중요성이 인식·확대되어 선진국을 중심으로 실내공기 발생원, 발생원 모델, 실내·외 환기량, 실내공기질 모델, 노출모델, 건강영향 평가 과정 순으로 많은 연구가 진행되고 있다. 한국의 경우 2004년 3월 ‘실내환경학회’ 창립되었으며, ‘다중이용시설등의 실내공기질 관리법’이 2004년 5월 시행 등 학계·기술계·기업·정부 등의 급속한 관심과 연구가 진행되고 있으나 기초연구, 실내공기질 현황, 제어기술, 건강영향 등 부족한 부분이 많은 형편이다.²⁸⁾

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. 실내공기의 제어 및 개선의 방법들은 각각 장단점을 가지고 있으나, 실내환경 내 광촉매 코팅은 실내환경 공기질 개선 방법 중 첫 번째인 완벽한 실내오염 배출원 감소의 불가능과 두 번째인 실외 대기오염이 심

각한 지역의 환기는 오히려 실내공기를 더욱 악화 시킬 수 있는 것으로 고려하면, 표면반응을 증대시키는 것은 매우 유효하게 실내공기질을 개선할 수 있다. 그럼에도 불구하고 실제 주택 현장에서 광촉매 코팅 후 실내공기질 개선 정도를 평가할 수 있는 방법이 현재 부재한 상태이다

2. 실내공기질 개선 방법



<그림 3> 실내공기질의 주요 영향 인자

실내환경을 하나의 공간(one-compartment)으로 가정하면, 실내환경에 공기오염물질이 축적되는 율은 실외 대기에서 유입되는 공기오염물질, 실내발생량, 유출되는 공기오염물질, 반응으로 감소되는 양으로 표현할 수 있다; $\text{Rate of accumulation} = \text{rate of} [\text{input} + \text{sources} - \text{output} - \text{sink}]$ <그림 3>. 즉, 실내공기질의 개선 방법은 ① 실내 오염원의 감소, ② 실내·외 공기 환기량 증대, ③ 공기오염물질과 실내환경 내 건축자재와 가구 등과의 표면반응에 의한 감소를 통해서 청정한 실내환경을 조성할 수 있다. 더불어 ④ 광촉매의 실내환경내 코팅 및 공기청정기의 이용은 실내 공기질 개선에 도움을 줄 수 있다. 각각을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

■ 실내 오염원 감소(source control)

일반적으로 실내공기질 개선을 위한 최선의 방안은 실내환경 내에서 오염물질의 배출을 줄이거나 개별적인 오염원을 제어하는 것이다. 최근 들어 친환경적인 건축을 추구하면서 오염물질 방출률이 낮은 자재들을 많이 사용함으로써 좀 더 나은 실내환경에서 지낼 수 있게 되었다. 이처럼 오염원을 완전히 제거하지 않더라도 오염물질 방출률이 낮은 물질로 대체 하면 실내공기질을 개선할 수 있다. 하지만 실내공기오염은 건축자재, 가구, 장식품, 건물내에서 사용되는 소비재, 복사, 다양한 인간활동 등에서 발생하므로 오염원이 없는 실내환경을 만드는 것은 거의 불가능 하다

■ 환기개선(ventilation improvement)

실내공기오염물질의 농도를 낮추기 위한 또 다른 방법으로는 실내로 들어오는 외부공기의 양을 증가시키는 것이다. 창이나 문을 열거나, 팬(fan)을 가동시키고 또는 환기율을 높이기 위해 환기구가 설치된 공기조절시설을 가동할 수 있다. 단지, 문제가 될 수 있는 것은 직장인 등의 사무실은 기계적 환기시스템이 공기청정 장치가 있지만, 주택 등은 창·문 등의 개폐가 주된 환기입을 생각하면 실외 대기오염이 심각한 지역에서는 환기에 의해 오염된 외부 공기의 유입이 실내공기질 상태를 더욱 악화시킬 수 있기 때문에 환기량을 감소시키는 것이 오히려 더 좋은 방법이 될 수 있다.

■ 실내환경내 물질과 표면반응(removal by residential materials)

실내의 이산화질소(NO_2)는 실내·외 공기 환기량과 실내 건축자재, 카펫, 담요, 커튼, 벽지, 가구 등과의 표면반응 및 실내 다른 오염물질과의 반응으로 인한 감소, 실내에서 연소도구로 인한 발생, 실내 환기장치 등 주택특성에 따라 영향을 받기 때문에 각 지역 및 주택 종류에 따른 차이가 있을 수 있다. Spicer 등의 연구에 의하면 실내·외 공기 환기량을 통한 실내공기질 개선보다 실내환경의 물질과 표면반응에 의해 더 높게 감소될 수 있는 것으로 보고하였으며,²⁹⁾ VOCs의 경우 건축자재 등에서 발생할 수 있지만 오히려 흡착시켜 감소시킬 수도 있는 것으로 나타났다.³⁰⁾

■ 광촉매(photocatalyst) 실내환경내 코팅 또는 공기청정기(air cleaner) 사용

쾌적한 실내환경을 유지할 수 있는 효과적인 방법은 광촉매 실내환경내 코팅 또는 공기청정기를 사용하는 것이라고 할 수 있다. 실내환경의 완전한 오염원 감소는 불가능한 것이고, 환기를 통해서 개선하는 것도 실외 대기의 공기가 깨끗한 상태가 아니므로 실내의 오염도를 감소시킬 수 있지만 청정하게 할 수는 없기 때문이다. 일반적으로 도심의 대기는 각종 공기오염물질에 의해 오염되어 있어 공기청정 장치를 사용하여 유입되는 외부 공기를 정화시켜야 한다. 하지만 대부분의 사람들이 하루 중 가장 많은 시간을 보내는 주택 같은 실내환경에서는 공조설비는 거의 없으며, 이것은 실외 대기오염물질이 창 및 문을 통하여 직접적으로 실내공기질을 악화시킬 수 있다. 따라서 광촉매의 실내환경내 코팅 또는 공기청정기의 사용은 효과적으로 실내공기질을 향상시킬 수 있다. 중요한 점은 광촉매의 실내환경내 코팅은 결국 공기오염물질의 실내환경내 물질들과 표면반응을 증대시켜 실내공기질을 제어 및 개선한다는 것이다.

3. 연구내용 및 방법

본 연구는 2가지로 구분하여 수행하였다. 첫 번째 연구는 대구시 A 고등학교의 새로 신 책상을 구입한 도서관에서 포름알데히드(HCHO)을 대상으로 광촉매 코팅 전·후의 실내공기질

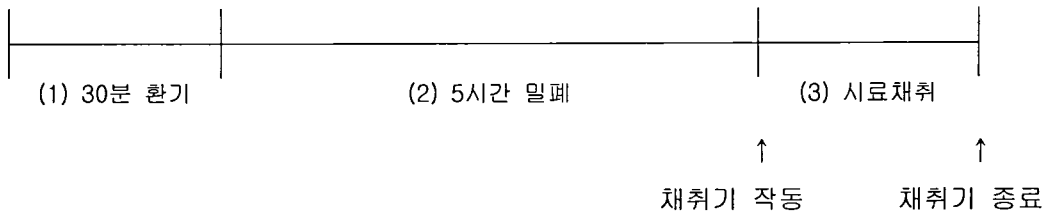
개선 정도 평가이고, 두 번째 연구는 주택의 가스렌지(gas range)에서 발생하는 이산화질소(NO₂)를 대상으로 하였다.

3-1. 신 책상구입 도서관

대구시에 위치한 A 고등학교의 신 책상 구입 도서관을 대상으로 TiO₂ 광촉매 코팅에 의한 HCHO 배출량 감소 정도를 현장 실험하였다. 본 연구에서 대상 교실은 신 책상 구입전과 구입후, 그리고 광촉매 코팅 후 각각 도서관에서 2개의 지역시료, 도서관 실외 공기 1 곳에서 HCHO를 측정 후, 즉시 환기량을 측정하였다. A 고등학교 도서관의 체적은 265 m³으로 실험되었고, 측정기간은 2005년 2월이었다.

(1) 시료채취방법

포름알데히드(HCHO)의 시료채취는 환경부의 실내공기질 공정시험방법에 준하여 수행하였다(환경부, 2004). <그림 3>과 같이 실내출입문, 창문 등을 개방하고 이 상태를 30분 이상 지속한 후, 외부공기와 면하는 개구부(창호, 출입문, 환기구 등)을 5시간 이상 모두 닫아 실내의 공기의 이동을 방지한 후 포집하였다.



<그림 4> 학교 과학실에서 포름알데히드 시료채취 과정

(2) HCHO 측정 및 분석

실내공기 중에 존재하는 포름알데히드 농도를 측정하기 위한 시험방법으로 측정대상 실내 환경인 과학실에서 각각 1000 mL/min의 유량으로 30분 동안 채취하여 2,4-디니트로페닐히드라진(2,4-DNPH ; 2,4-Dinitrophenylhydrazine, Supelco, USA)으로 유도체화한 후, 이 2,4-DNPH 유도체를 고성능액체크로마토그래프(HPLC)에 주입하여 자외선흡광검출기의 흡수파장 360 nm에서 검출되는 크로마토그램의 면적으로 포름알데히드의 농도를 구하였다. 시료는 분석 전까지 냉장보관 하였으며, 실내공기질 공정시험법 및 NIOSH 2016 방법을 참조하여 분석하였다. 시료는 3 mL 아세토나이트릴(Acetonitrile)에 이용하여 추출하였다. 추출 용액은 2 mL 바이엘에 옮긴 후, HPLC/UV의 360 nm에서 분석하였다. 컬럼은 C8(150 mm × 3.9 mm × 5 μm) 역상 컬럼을 이용하였다. 이동상은 아세토나이트릴과 증류수를 45:55의 비율로 혼합한 용액을 이용하였으며, 컬럼의 유속은 1.5 mL/min으로 유지하였다. 분석시 시료 주입량은 20 μl이었다.

72 한국환경보건학회 가을학술대회

기기 및 분석조건은 <표 1>과 같다. 표준용액은 2,4-DNPH 유도체화 포름알데히드 표준용액 (100 ppm, Supelco, USA)을 아세토나이트릴로 희석하여 이용하였다. 0.06~3.85 ppm 범위의 4개 농도수준으로 제조하였으며, 각 피크의 면적과 농도를 이용하여 검량선을 작성하였다.

<표 1> 포름알데히드 농도 분석 조건

Instrument	HPLC (Waters 2690)
	UV Detector (Waters 2487), 360 nm
Column	C ₈ (Symmetry HPLC column), Reversed-phase
Effluent	Acetonitrile:DW = 45:55
Flow rate	1.5 ml/min
Injection Volume	20 µl

(3) 환기량 측정

환기량은 추적가스(tracer gas)를 이용하여 직접 측정할 수 있다. 연구 대상인 A 고등학교 도서관의 환기상태는 기계적 환기장치가 없었기 때문에 창문에 의한 자연환기만 존재하는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 HCHO 측정 후 즉시 CO₂ 표준가스를 이용하여 과학실 CO₂ 농도가 약 1000 ppm에 도달했을 때 CO₂ 표준가스를 정지시키고 5분마다 CO₂ 농도를 측정하여 과학실의 CO₂ 농도가 약 600 ppm 정도에 이르면 측정을 중지하였다. CO₂ 표준가스 분사 전 및 분사 중에 Fan 6대를 이용하여 A 고등학교의 도서관을 각각 완전혼합(complete mixing) 상태로 하였으며 CO₂ 농도가 약 1000 ppm에 이르면 Fan은 정지시키고 약 10분 후에부터 CO₂ 농도를 측정하였고, 측정된 농도 값은 data-logger에 의해 자동으로 저장되도록 하였다. CO₂ 농도 측정은 1 point에서 하였으며 과학실과 도서관 중앙에서 각각 측정하였다. 환기량 측정은 추적가스 농도 감소법으로 회귀방법(regression method)을 이용하여 공기환기횟수(Air Change per Hour; ACH)를 계산하였다.

3-2. 가스레인지 사용 주택

본 연구는 실내공기질 개선의 한 방법인 실내환경용 특히 벽지 코팅용 촉매(TiO₂)를 주택 실내환경 내에 코팅한 후 실내공기질 개선의 효율성을 평가하는 방법으로, 주택 실내 및 실외의 이산화질소(NO₂) 농도를 연속적으로 측정하였다. 측정기간 매일 가스레인을 이용하여 30분간 작동 시켰으며, 이것은 측정기간 동안 NO₂의 실내 발생량을 일정하게 할 수 있다.

1) 표본크기 및 시간

본 연구에서 수행될 표본은 거주자가 없는 주택(아파트)을 제외하여 TiO₂ 광촉매 코팅 전·후의 NO₂ 농도를 실내의 침실, 거실, 부엌과 실외를 각각 5일(코팅 전 2일, 코팅 후 3일)

씩 연속적으로 매일 2005년 7월에 측정하였다. 그리고 환기량도 매일 NO₂ 측정과 동시에 연속적으로 측정하였다.

2) 이산화질소(NO₂) 측정 및 분석

본 연구에서는 가스렌지를 매일 NO₂ 측정 전에 30분씩 작동시켜 주택 실내에서 발생하는 NO₂ 발생량을 고정시켰다. NO₂ 측정에는 수동식 시료채취기(passive sampler)를 이용하였고, 수동식 시료채취기는 자연적인 기류를 이용하여 확산(diffusion)과 투과(infiltration)라는 물리적인 과정에 의해 실내와 실외의 NO₂를 측정하는 장치이다. 시료채취기는 NO₂를 채취한 후 실험실에서 UV-VIS Spectrometer를 이용하여 정량분석을 하였다. 샘플링 위치는 연소장치(가스렌지) 발생원에서 3m 이상 그리고 창문 또는 문으로부터 2m 이상, 실외에 설치될 수동식 시료채취기는 지면으로부터 1m 이상이 되도록 하였고, 실외 측정에는 비나 눈으로부터 보호될 수 있도록 하였다.

3) 환기량 측정

환기율의 측정은 환기에 의한 CO₂ decay method를 적용하여 NO₂ 농도 측정동안 동시에 광촉매 코팅 전·후 각각 21일씩 연속적으로 측정하였다. CO₂의 발생량도 NO₂ 마찬가지로 가스렌지에서 발생되며, 가스렌지 30분 작동 후 10분 동안 팬(fan)을 작동시켜 실내환경 내에서 완전혼합 후 10분 후에 바로 CO₂ monitor와 일차반응식(first-order reaction)을 이용하였다.

3-3. 실내환경의 물질수지

실내공기질의 평가는 영향 요인의 다양성 때문에 전체적으로 파악하기 위해서는 각 요인 분석 및 예측이 필요하다. 실내공기질 예측의 필요성은 다음과 같다. 첫째, 오염물질의 반응, 이동을 정량화하기 위해, 둘째, 실내에서 인간의 오염물질에 대한 노출정도를 결정하기 위해, 셋째, 다양한 환경 하에서 관리 방안을 제시하기 위해서이다. 물질수지를 이용한 One-Compartment Model은 완전 혼합된 하나의 공간으로 공기의 유입 및 유출 사이의 관계를 기술하며 실내공기질을 설명하기 위해 자주 이용된다. 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. 일반 주택을 하나의 공간으로 가정하면, 실내 공기오염물질의 농도변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$VdC_i = mQC_o dt + Sdt - mQC_i dt - Rdt \quad (1)$$

여기서, C_i= indoor concentration (ug/m³), C_o= outdoor concentration (ug/m³), Q= air exchange rate (m³/hr) S= source emission rate (ug/hr), R= removal rate (ug/h), V= volume of the space (m³), t= time (hr) and m= mixing factor (0 ≤ m ≤ 1).

74 한국환경보건학회 가을학술대회

식 (1)에서 실내공간의 완전혼합(completely mixed condition, m=1)을 가정하고 재배열 시키면 식 (2) 나타낼 수 있다.

$$dC_i = IC_o dt + \frac{S}{V} dt - IC_i dt - \frac{R}{V} dt \quad (2)$$

여기서, I= air exchange per hour (hr⁻¹).

식 (2)에서 시간 t₁에서 t₂까지 적분시키면 다음과 같다.

$$\int_{t_1}^{t_2} dC_i = \int_{t_1}^{t_2} I(C_o - C_i) dt + \int_{t_1}^{t_2} \frac{S-R}{V} dt \quad (3)$$

여기서, t₁은 측정시작 시간 t₂는 측정끝 시간.

$$C_i(t_2) - C_i(t_1) = I \left[\int_{t_2}^{t_1} C_o dt - \int_{t_1}^{t_2} C_i dt \right] + \int_{t_1}^{t_2} \frac{S-R}{V} dt \quad (4)$$

식 (4)는 식 (5)로 계산될 수 있다.

$$C_i(t_2) - C_i(t_1) = I [C_o - C_i] T + \left[\frac{S-R}{V} \right] T \quad (5)$$

여기서, C_i는 실내공기오염물질의 평균농도, C_o는 실외공기오염물질의 평균농도, T는 측정 시간.

식 (5)에서 대상 공기오염물질 측정에서 직독기(direct-reading instrument)가 아니고 일정기간 동안의 포집(소형펌프로 흡착하여 포집, 수동식 시료채취기 이용 등)으로 평균농도라면, C_i(t₂)와 C_i(t₁)은 근사하게 같다고 할 수 있다. 따라서, 식 (5)가 성립하기 위해서는

$$I [C_i - C_o] T \approx \left[\frac{S-R}{V} \right] T \quad (6)$$

식 (6)을 재배열 하면 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$C_i = C_o + \left[\frac{S-R}{VI} \right] \quad (7)$$

식 (7)에서 (S-R)은 + 값을 나타낼 수 있으며, - 값을 나타낼 수도 있다. 즉, 식 (7)은 대상 공기물질에 대해 실내 및 실외농도, 그리고 실내체적과 환기율을 측정된다면 (S-R)을 계산할 수 있음을 알 수 있다 식 (8).

$$(S-R) = [C_i - C_o] VI \quad (8)$$

4. 연구결과

4-1. 신 책상구입 도서관

대상 A 고등학교 도서관에 새롭게 설치된 책상 및 걸상은 접착제의 사용으로 HCHO의 발생되고 있는 것으로 생각할 수 있으며, 식 (8)에서 실내 및 실외의 HCHO 농도를 측정하고 도서관의 체적과 환기량을 측정하여 (S-R) 값을 계산하였다. 또한 고려하여야 할 것이 도서관의 새로 구입한 책상에서는 발생하는 HCHO의 발생량은 온도 및 습도에 영향을 받을 수 있다. Sekine와 Nishimura (2001)은 일반 실내환경에서 HCHO의 발생량에 실내농도는 온도에 의해 크게 의존하기 때문에 식 (6)와 같이 회귀곡선을 이용한 온도에 따른 보정을 제시하였다³¹⁾. 본 연구에서는 Sekine와 Nishimura의 경험식을 이용하여 온도보정을 하였고, 습도는 보정 경험식에 대한 문헌 및 연구 자료가 없기 때문에 하지 못했다. 측정기간 동안 A 고등학교의 도서관의 온도 범위는 8~12℃ 및 상대습도 범위는 33~50%를 보였다.

$$C_{20} = \frac{\exp(0.1066 \times 20)}{\exp(0.1066 \times T_r)} C_T \quad (9)$$

여기서, C_{20} : Indoor HCHO concentration at 20℃, T_r : mean room temperature(℃), C_T : measured indoor HCHO concentration

A 고등학교의 결과는 <표 2>에 나타내었다. 실내공기질 모델을 이용한 식 (5)에 의한 결과를 살펴보면 도서관에서 신 책상 구입 전의 HCHO의 발생률-감소율(S-R)은 94.61 ug/hr 이었으나 구입 설치후의 (S-R)은 3830.58 ug/hr으로 40배 증가하였다. 광촉매 코팅 1일 후의 (S-R)은 3341.39 ug/hr로 감소하였고, 2일, 3일 후에는 각각 2811.12 ug/hr, 2130.20 ug/hr으로 계속적으로 감소 상태를 나타내었다. 이는 각각 12.8%, 26.6%, 44.4%의 효율성을 나타내었다. 반면 실내환경에서 측정된 실내 HCHO 농도는 코팅전에 36.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 반면, 코팅 후는 51.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 51.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 42.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 오히려 평균 0.33%의 증가율을 보였다. 이 결과는 실내공기질 평가 방법시 실외공기와 환기량을 반드시 고려하여 발생량(또는 발생량-감소량)의 증감으로 표현하는 것이 더 정확함을 나타내고 있다.

<표 2> 신 책상 구입 도서관의 포름알데히드 발생률 및 감소율

Sampling	Sample site	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ACH (hr-1)	S-R ($\mu\text{g}/\text{hr}$)	S* ($\mu\text{g}/\text{hr}$)	
Before new desk installation	Outdoor	5.6	0.21 (R2= 0.94)	94.61	} +2716.51	
	Indoor	7.3				
After new desk installation	Indoor	7.0	0.49 (R2= 0.99)	3830.58		
	Outdoor	36.5				
1 day after coating	Indoor	5.2	0.27 (R2= 0.89)	3341.39		} -489.19
	Outdoor	51.9				
2 days after coating	Indoor	7.5	0.24 (R2= 0.95)	2811.12	} -680.92	
	Outdoor	51.7				
3 days after coating	Indoor	7.5	0.23 (R2= 0.97)	2130.20		
	Outdoor	42.45				

* Assuming R= constant
 + Volume: 265 m³
 + Standard 122.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ @20 °C, 1atm (Korea), 98.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ @20 °C, 1atm (Japan)

4-2. 가스렌지 사용 주택

4-1에서는 발생률에 관한 것이지만, 가스렌지 사용 주택의 경우는 실내환경의 연소도구에서 발생하는 NO₂가 벽지 등에 코팅된 광촉매의 표면반응으로 감소율로 평가해야 한다. 식(8)에서 실내 및 실외의 NO₂ 농도를 측정하고 아파트의 체적과 환기량을 측정하여 (S-R) 값을 계산하였다. (S-R) 값에 의하면 광촉매 코팅후 감소율이 증가함을 알 수 있다. 또한 식(1)에서 실내 공기오염물질(NO₂)의 감소율(R)은 감소상수(K, hr⁻¹)와 실내에 존재하는 질량(VC)으로 나타낼 수 있다 식(10).

$$R = KVC, \tag{10}$$

Yang 등(2004)이 가스렌지에서 발생하는 NO₂ 발생률을 다중측정에 의해 추정된 44.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{hr}$ 을 이용하면 감소상수(decay constant, hr⁻¹)을 <표 3>과 같이 대략 추정할 수 있다.³²⁾

<표 3> 신 책상 구입 도서관의 NO₂ 발생률 및 감소율

Sampling	Sample site	Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ACH (hr^{-1})	S-R ($\mu\text{g}/\text{hr}$)	R* ($\mu\text{g}/\text{hr}$)	K (hr^{-1})	
2 day before coating	Outdoor	70.1					
	Indoor	Kitchen	58.3	0.71 ($R^2= 0.95$)	-2249.3	9401.3	
		Bedroom	44.2				50.3
		Livingroom	48.4				
1 day before coating	Outdoor	79.2					
	Indoor (60.6)	Kitchen	62.4	0.67 ($R^2= 0.99$)	-2412.0	9564.0	
		Bedroom	53.2				56.7
		Livingroom	54.5				
1 day after coating	Outdoor	88.1					
	Indoor	Kitchen	62.8	0.76 ($R^2= 0.93$)	-4292.5	11444.5	
		Bedroom	49.8				52.8
		Livingroom	45.8				
2 days after coating	Outdoor	77.8					
	Indoor	Kitchen	59.8	0.84 ($R^2= 0.95$)	-4032.1	11184.1	
		Bedroom	40.5				47.8
		Livingroom	43.1				
3 days after coating	Outdoor	83.6					
	Indoor	Kitchen	65.3	0.73 ($R^2= 0.96$)	-3831.1	10983.1	
		Bedroom	40.8				50.8
		Livingroom	46.3				

* NO₂ source emission rate is 7152 $\mu\text{g}/\text{hr}$ in house volume of 160 m^3

5. 결론

본 연구는 신 책상을 구입한 고등학교 도서관을 대상으로 HCHO 제어용 TiO₂ 광촉매 코팅 물질을 이용하여 HCHO 발생율의 감소 정도, 그리고 아파트에서 5일 동안 매일 다중측정으로 TiO₂ 광촉매 코팅물질 표면반응에 의한 NO₂ 제거율의 감소상수를 실내환경 물질수지에 적용하여 평가하였다. 실제 현장에서 실내공기질 개선을 위한 노력이 다양한 방법으로 연구되고 있으나, 그 개선 정도를 평가하는 것에 현장 실무자들은 어려움을 갖고 있다. 실내공기질은 실외공기 농도, 환기, 반응을 통한 감소, 실내 발생량, 실내기류, 온도, 습도과 그리고 확인되지 못한 요인 등 다양한 인자에 영향을 받는다. 그 동안 실내공기질 개선 정도를 단순히 실내농도 측정만으로는 명확하게 평가할 수 없었다. 본 연구는 물질수지를 이용한 실내공기

질 모델에 적용하여 개선 정도를 평가하였다. 결과에 의하면, 단순히 실내공기 농도 측정으로
는 개선정도를 파악할 수 없었으며 실외공기질 및 환기를 고려한 실내환경 물질수지에 의해
유해공기물질의 발생률과 감소율(또는 감소상수)로 개선정도를 나타낼 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2004년 한국학술진흥재단(KRF-2004-041-D00395)의 일부 지원에 의하여 연구되었음

〈참고문헌〉

- 1) 환경백서 2001, 125-127, 2002.
- 2) Indoor air science: past, and future. The 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, 1996.
- 3) The use of environmental risk assessment methodologies for an indoor air quality investigation. Chemosphere, 41, 2000.
- 4) The right to healthy indoor air: status by 2002. Indoor Air, 13, 2003.
- 5) Impact of residential nitrogen dioxide exposure on personal exposure: An international study. Journal of the Air & Waste Management Association, 48, 1998.
- 6) 생활시간조사보고서, 제 1권 생활시간량편, 1999.
- 7) Determination of air exchange rates of rooms and deposition factors for fine particles by means of photoelectric aerosol sensors. Indoor Built & Environment, 8, 1999.
- 8) Approaches for assessing health risks from complex mixtures in indoor air: A panel overview. Environmental Health Perspectives, 95, 1991.
- 9) Risk Assessment of formaldehyde in typical office buildings in Taiwan. Indoor Air, 13, 2003.
- 10) Ventilation system, indoor air quality, and health outcomes in parisian modern office workers. Environmental Research, 75, 1997.
- 11) Indoor air quality and health. Atmospheric Environment, 33, 1999.
- 12) Shendell, D. G., R. Prill, W. J. Fisk, M. G. Apte, D. Blake and D. Faulkner, 2004, Association between CO2 concentrations and student attendance in Washington and Idaho, Indoor Air, 14, 333-341.
- 13) Rosen, K. G. and G. Richardson, 1999, Would removing indoor air particulates in children's environments reduce rate of absenteeism - A hypothesis, the Science of Total Environment, 234, 87-93.
- 14) Meinnghaus, R., A. Kounali, C. Mandin and A. Cicolella, 2003, Risk assessment of sensory irritants in indoor air - a case study in a French school, Environment International, 28, 553-557.
- 15) Daisey, J. M., W. J. Angell and M. G. Apte, 2003, Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information, Indoor Air, 13, 53-64.
- 16) 배운진, 김규한, 전효택, 안주성, 1998, 실내외 환경의 분진 중 중금속 농도 - 서울시 강서구,

- 양천구, 소재의 중학교를 중심으로 -, 한국지구과학회지, 19(5), 449-460
- 17) 교육인적자원부, 학교 교사내 환경위생 실태조사 중간보고서, 2005.
 - 18) Overview of source/sink characterization methods. ASTM STP 1287. American Society for Testing and Materials, 1996.
 - 19) A study of indoor air quality. Journal of the Air Pollution Control Association, 25(9), 1975.
 - 20) US. EPA. Science Advisory Board : Reducing risk-setting priorities and strategies for environmental protection. SAB-EC-90-021, 1990.
 - 21) Indoor air quality & control. PTR Prentice-Hall, Inc., 1993.
 - 22) Comparison of three small chamber test methods for the measurement of VOC emission rates from paint. Indoor Air, 13, 2003.
 - 23) 거주지역 실내공기 특성 및 이산화질소 노출에 관한 연구. 한국환경위생학, 8(2), 2002.
 - 24) Indoor air and the public good - Guest editorial. Indoor Air, 11, 2001.
 - 25) Effect of microenvironmental nitrogen dioxide concentrations on personal exposure in Australia. Journal of the Air and Waste Management Association, 50, 2000.
 - 26) Volatile organic compounds in residential indoor and outdoor and its personal exposure in Korea. Environment International, 29(1), 2003.
 - 27) Source testing and data analysis for exposure and risk assessment of indoor pollutant sources. ASTM STP 1287. American Society for Testing and Materials, 1996.
 - 28) 사단법인 한국대기환경학회, 실내공기질 관리 및 측정 세미나, 2003.
 - 29) Rate and mechanisms of NO₂ removal from indoor air by residential materials. Environmental International, 15, 1989.
 - 30) Chamber testing of adsorption of volatile organic compounds(VOCs) on material surfaces. Indoor Air, 9, 1999.
 - 31) Sekine Y and Nishimura A. Removal of formaldehyde from indoor air by passive type air-cleaning materials. Atmospheric Environment5, 2001-2007, 2001,
 - 32) W. Yang, K. Lee and M. Chung. Characterization of Indoor Air Quality Using Multiple Measurements of Nitrogen Dioxide", Indoor Air, 14, 105-111, 2004