한국환경위생학회지, 제30권 제2호(2004)
Kor. J. Env. Hlth., Vol. 30, No. 2, pp 92~97(2004)

이산화티탄 광촉매 졸(sol)의 실내환경 코팅에 의한 실내공기질 개선

양원호† · 김대원* · 정문호** · 양진섭*** · 박기선***
대구가톨릭대학교 산업보건학과, *대구가톨릭대학교 환경과학과,
서울대학교 보건대학원 환경보건학과, *(주)이앤비 코리아 환경연구소

Improvement of Indoor Air Quality by Coating of Indoor Materials of TiO_2 Photocatalyst Sol

Won Ho Yang† · Dae Won Kim* · Moon Ho Chung · Jin Sup Yang*** · Ki Sun Park*****

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu
**Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu*
***Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University*
****Environmental Institute of Environmental Technology, E&B Korea Ltd.*
(Received April 1, 2004; Accepted June 3, 2004)

ABSTRACT

Three methods for VOCs emissions control in indoor air are reduction at the source, ventilation between indoor and outdoor, and removal. The best alternative should be to replace highly emitting sources with sources having low emissions, but the pertinent information on VOCs is not always available from manufactures. Other ways of improving indoor air quality are needed. It is to increase the outside fresh-air flow to dilute the pollutants, but this method would generally provide only a dilution effect without destruction in residence. An ideal alternative to existing technologies would be a chemical oxidation process able to treat large volumes of slightly contaminated air at normal temperature without additional oxidant such as ozone generator and ion generator. Photocatalytic oxidation(PCO) represents such a process. It is characterized by a surface reaction assisted by light radiation inducing the formation of superoxide, hydroperoxide anions, or hydroxyl radicals, which are powerful oxidants. In comparison with other VOCs removal methods, PCO offers several advantages. The purpose of this study was to explore the possibilities for photocatalytic purification of slightly contaminated indoor air by using visible light such as flurescent visible light(FVL). In this study, a PCO of relatively concentrated benzene using common FVL lamps was investigated as batch type and total volatile organic compounds(TVOCs) using a common FVL lamp and penetrated sun light over window. The results of this study shown the possibility of TiO_2 photocatalyst application in the area of indoor air quality control.

Keywords: indoor air quality, TiO_2 photocatalyst, volatile organic compounds

I. 서 론

최근 들어 산업화와 도시화가 급진전되면서 도시의 인구집중과 산업시설 증가 및 교통량 팽창은 도시지역 대기환경의 오염을 더욱 악화시켰으며, 경제적 수준의 향상과 더불어 도시인의 생활양식과 직장인의 근무양식에도 큰 변화를 가져왔다. 이와 함께 현대 도시인의 경우 대부분의 일상생활 중 약 80% 이상의 시간을 실내에서 생활하게 됨으로써 쾌적한 실내환경(IE: Indoor Environment)에 대한 인식이 새롭게 부각되기에 이르렀다.[1)]

실내에서 사용되는 기구나 건축재료의 다양화로 인해 새로운 오염물질의 배출이 증가하는 실정이며, 실내공기의 오염이 악화되면 실내환경에서 생활 또는 근무하는 사람들의 신체에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 아직까지 정확한 원인이 밝혀지지 않은 빌딩증후군(Sick Building Syndrome) 등도 이러한 관점에서 설명할 수 있다.[2)] 미국 환경청(EPA)에 의하면 국민건강에 영향을 야기할 수 있는 10가지 환경 위해성 중에 실내공기오염을 포함시켰으며, 실외 대기오염보다

†Corresponding author : Department of Occupational Health, Catholic University
Tel: 82-53-850-3739, Fax: 82-53-850-3736
E-mail : whyang@cu.ac.kr

실내공기가 사람에게 더 유해한 노출을 야기 시킬 수 있다고 결론지었다.[3,4)]

실내공기질(IAQ: Indoor Air Quality)에 대한 문제의 발생 배경은 각종 산업분야에서 에너지 절약 및 효율을 높이기 위한 노력으로 건물의 단열을 위해 밀폐화와 에너지 절감 장치를 설치하는 건물의 증가로 인하여 실내공기 질이 악화되는 것이다. 또한 그 건물에서 생활 또는 근무하는 사람이 그 건물의 특성을 충분히 이해하지 못한 경우와 건축자재, 공조 시스템 등의 특성이 복잡하고 민감한 실내환경 조건을 변화시킴으로 실내공기질을 악화시켜 발생된 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 환기량이 감소되어 자연히 실내공기가 오염되고 있다.[5)]

실내공기질에 영향을 미치는 주요 요인은 실내오염물질의 발생량, 환기량, 오염물질 감소율, 실내 공기 혼합율, 실외 오염물질 농도 및 실내공간 크기이다.[6)] 또한 건축물 구조, 생활양식, 지리적 위치, 내부 환경조절을 위한 장치, 온·습도 기타 미확인 요인 등에 의해서 좌우된다. 이러한 복합적인 환경에 의해서 실내공기오염이 발생될 수 있으며, 실내공기오염을 예방하기 위해서는 상기의 구조적 환경 뿐만 아니라, 흡연장소의 축소, 금연 운동의 전개와 같은 방법도 될 수 있지만, 실내공기질의 제어 및 개선의 효율적 방안으로는 오염원의 제어(source control), 환기개선(ventilation), 제거(removal)이다.[7)]

실내공기질 개선을 위한 최선의 방안은 실내환경에서 발생되는 오염물질의 배출을 줄이거나 개별적인 오염원을 제어하는 것이다.[8)] 최근 들어 친환경적인 건축을 추구하면서 오염물질 방출률이 낮은 자재들에 대한 연구 및 현장 적용이 증가하고 있다.[9)] 하지만 실내공기오염은 건축자재, 가구, 장식품, 건물내에서 사용되는 소비재, 다양한 인간 활동 등에서 발생하므로 오염원이 없는 실내환경을 만든다는 것은 불가능 하다. 실내공기질 개선의 다른 방법 중 환기량 증가는 실내환경의 공기오염물질 제거 없이 단지 희석효과만을 주며, 실외 대기오염 상태가 심각한 지역에서는 오히려 새로운 실내 오염원의 발생원이 될 수 있다.[10)] 환기장치 등의 공조시설(HVAC: Heating, Ventilation, and Air-Conditioning)에서 활성탄 등의 설치는 휘발성 유기화합물(VOCs: Volatile Organic Compounds)을 흡착하여 실내로 유입되는 것을 제어할 수 있지만, 활성탄의 2차 처리, 재생, 파과 등의 문제점을 가지고 있다. 실내공기에서 VOCs의 제어로 유망한 방법은 벽면, 벽지, 가구 등과 표면반응에 의한 제거로, Spicer *et al.*은 이산화질소(NO_2)의 경우 환기량보다 실내환경내 표면반응에 의해서 더 효과적으로 제거될 수 있는 것으로 보고하였다.[11)]

실내공기오염물질이 실내환경내 표면반응으로 감소하는 속도를 증가시킬 수 있는 방법 중 현재 유망한 것은 광촉매에 의한 산화이다.[12)] 광촉매 산화(PCO: Photocatalyst Oxidation)는 자외선의 조사에 의해 발생되는 강력한 산화제인 superoxide, hydroperoxide anions 또는 hydroxyl radicals를 광촉매 표면에 발생시켜 VOCs를 무해한 CO_2와 H_2O로 분해시키는 것이다. 광촉매 중 이산화티탄(TiO_2)는 산, 염기, 유기용매에 침식되지 않는 화학적 안정성, 생물학적 안정성, 지구상에서 9번째로 많은 원소 등의 장점을 가지고 있기 때문에 환경촉매로 광범위하게 이용되고 있다.

본 연구는 실내공기질 개선 방법 중 공기오염물질의 실내환경 표면반응에 의한 감소를 증가시키는 방법이 현재의 기술상 실내공기질 개선에 가능성이 높음을 감안할 때, 환경촉매인 이산화티타늄 광촉매를 sol-gel 방법으로 제조하고, 가시광선으로 이용되는 형광등(FVL: Fluorescent Visible Light)이 사용되는 실내공간에 적용하여 휘발성유기화합물 대상으로 실내공기질 향상 가능성을 평가하는 것이다.

II. 연구내용 및 방법

TiO_2는 결정구조에 따라 anatase, rutile 및 brookite가 있는데, 광촉매 반응에서 가장 활성이 좋은 것은 anatase 구조인 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 광촉매 반응에서 널리 사용되는 TiO_2를 반응 활성이 우수한 anatase 구조인 sol로 제조, 실내환경의 벽지(壁紙)에 코팅(coating)하여 휘발성유기화합물의 제거율을 연구하였다.

1. TiO_2 sol의 제조와 코팅

현재 사용되어지는 TiO_2의 경우는 대부분 분말을 이용한 것이다. 이러한 TiO_2 분말 중 활성이 우수한 것으로 알려진 것이 상업용 촉매인 Degussa P25(Degussa Co.)로 anatase 구조와 rutile 구조를 동시에 가지고 있으며, 그 중 anatase 구조가 약 75% 정도를 차지하는 것으로 알려지고 있다. 그러나 이러한 분말을 이용하여 코팅할 경우 코팅하기도 어려울 뿐만 아니라 박리가 일어나기 쉽다.[13)] 따라서 본 연구에서는 박리 현상을 예

방하기 위하여 전구물질로서 $Ti(OC_3H_7)_4$로부터 sol을 제조하였다. 먼저 $Ti(OC_3H_7)_4$, 증류수, 화학적 첨가제로서 디에틸아민(diethylamine)를 첨가하여 혼합한 후 이 용액을 압력 용기에 넣고 10에서 20 atm, 150~200°C의 조건에서 약 2시간 반응시켰다. 이렇게 만들어진 sol 용액에 무기계 binder로 SiO_2의 화합물을 일정량 혼합하였다. 코팅 방법은 일반적으로 dip-coating, spin-coating과 spray coating으로 구분할 수 있으며,[14] 본 연구에서는 컴퓨레서(compressor)를 이용하여 spray-coating 방법으로 실내환경내 벽지에 TiO_2 sol을 코팅하였다.

2. TiO_2 sol의 특성 분석

광촉매의 물성을 분석하기 위해 XRD(x-Ray diffraction analysis)로 TiO_2 입자의 anatase 결정구조 여부를 확인하였고 SEM(scanning electron microscopy)과 TEM (transmission electron microscope) 분석을 통하여 입자크기를 측정하였다. 촉매 입자의 크기가 반응 활성에 영향을 줄 수 있으므로 SEM으로 100,000V의 가속전압을 사용하여 반응기에 고정화시킨 각각의 TiO_2 입자의 크기를 100,000배로 촬영하였다. 띠간격에 의해 전자와 정공의 재결합속도가 결정되므로 촉매 띠간격을 측정하기 위해 DRS(diffuse reflectance spectroscopy : Varian Cary 100)로 흡광도를 측정하여 Planck의 법칙을 이용하여 띠간격을 계산하였다.

3. Batch type 실험

Chamber 실험은 Fig. 1과 같이 제작(60 cm(W)×40 cm(H)×80 cm(L))하여 형광등(20W) 4개를 위부분에 부착하였고, 제조한 광촉매 sol을 벽지(0.5 m×0.7 m = 0.35 m²) 컴퓨레서를 이용한 spray 방법으로 코팅하였다. Chamber 부피는 192 L이었고, VOCs 중 Benzene를 식 (1)을 이용하여 각각 30 ppm으로 기지농도로 미세주사기(micro-syringe)를 이용하여 주입하였다. 주입된 VOCs는 고온의 hot-plate에서 즉시 증발하도록 하였으며, fan을 작동시켜 10분 동안 Chamber에서 완전혼합 상태에서 3회씩 실험하였다.

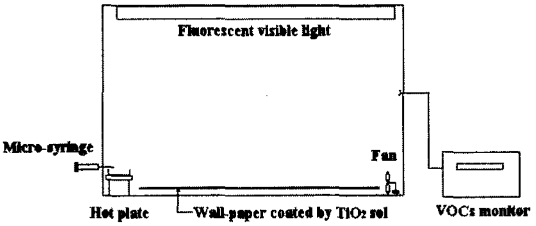

Fig. 1. Chamber test for Benzene removal by wall-paper coated by TiO_2 sol and fluorescent visible light.

$$C = \frac{22.4 \times 10^6 \left(\frac{T}{273K}\right)\left(\frac{760\ mmHg}{P}\right)\rho V_L}{VM} \qquad (1)$$

여기서, *C*: concentration(ppm), *T*: absolute temp(K), *P*: system pressure(mmHg), *V*: volume of the system(L), *M*: the molecular weight(g/mol), ρ: density(g/m*l*), and *VL*: the liquid volume(m*l*)

4. 주택현장 실험

대전광역시 소재 신축 다세대 주택에서 실내환경 내부에 TiO_2 sol 코팅 전·후의 농도를 측정하였다. 주택의 실내공간의 크기는 0.27 m×0.36 m×0.25 m = 0.024 m³이었고, 2003년 4월 30일부터 5월 30일까지 4일 간격으로 총휘발성유기화합물(TVOCs: Total Volatile Organic Compounds)의 농도를 직독기(AreaRAE IAQ, RAE System Inc.)를 이용하여 측정하였다. 또한 자외선 강도는 Radiometer(VLX-3W, France)를 이용하여 측정하였다. 측정은 2004년 5월 실시될 「다중이용시설 등의 실내공기질 관리법」의 실내공기질 측정 공정시험법에 준하여 바닥으로부터 1.2~1.5 m 높이에서 측정하였다. 측정방법은 창, 문, 내장가구의 문 등을 모두 개방하고 1시간 이상 사전환기를 행하고, 외부공기에 면한 창 및 문 등의 모든 개구부를 닫고 5시간 이상 밀폐상태를 유지시킨 후 총휘발성유기화합물(TVOCs) 농도를 측정하였다.[15]

III. 결과 및 고찰

1. TiO_2 sol의 물리적 특성

TiO_2의 결정 구조에는 anatase, rutile 및 brookite의 세 종류가 있으며, anatase 및 rutile 구조를 가지는 것이 주로 광촉매 반응에 사용된다.[16] 기존 연구에 의하면 anatase에 비해 rutile 구조의 흡착능력이 작으며 또한 빛에 의해 생성된 전자와 정공의 재결합 속도가 빠르기 때문에 anatase 구조가 rutile 구조보다 우수한 광촉매 활성을 보였다.[17] 따라서 본 연구에서는 TiO_2 sol을 광촉매 활성이 우수한 anatase 구조로 제조하였고 이는 XRD 분석으로 결정 구조를 확인하였다. Fig. 2에서는 TiO_2 촉매의 XRD 결과로 피크(peak) 분석한 결과이다. XRD에서 25°와 30° 정도에서 가장 민감한 peak 형태를 나타내어 제조된 TiO_2 광촉매 활성이 우수한 anatase 구조임을 알 수 있다.

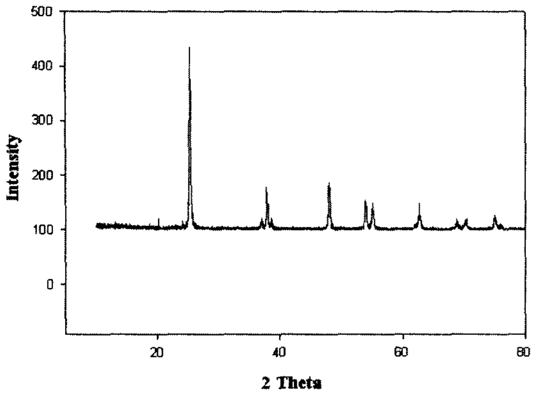

Fig. 2. Variation of XRD peak of TiO_2 sol used in this study.

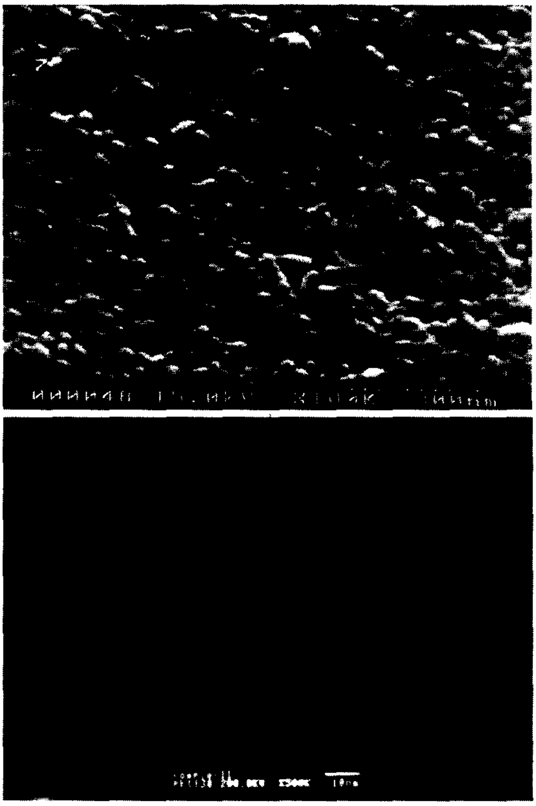

Fig. 3. SEM and TEM analysis of TiO_2 sol used in this study.

일반적으로 입자의 크기가 작아질수록 광촉매 반응의 활성이 좋아진다는 "미립자 효과"가 널리 알려져 있다.[18] 따라서 본 연구에서도 입자의 크기를 분석하기 위하여 SEM과 TEM을 이용하여 아민계 화합물을 사용한 TiO_2의 입자 크기를 분석하였다. 그 결과 Fig. 3

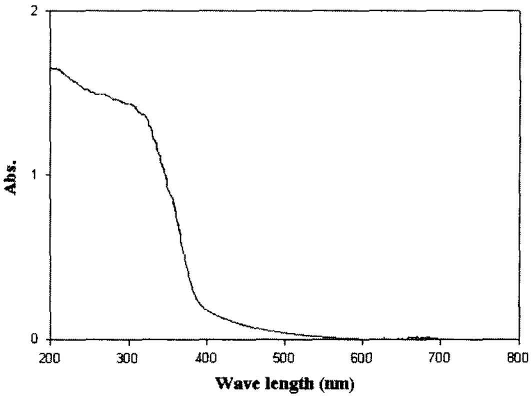

Fig. 4. DRS analysis of TiO_2 sol used in this study.

에서 보는 바와 같이 TiO_2 sol의 입자크기는 약 10 nm 이하의 입자 크기를 가지고 있는 것을 확인하였다.

또한 광촉매 반응에서 반응성에 영향을 줄 수 있는 또 다른 인자인 에너지의 흡수능력은 촉매 자체의 흡광용량(light-absorption capacity)에 의해 영향을 받으며 흡광용량은 띠간격의 간격이 클수록 그 보다 작은 에너지를 가지는 빛을 흡수할 수 없기 때문에 자연히 에너지 흡수율이 떨어지게 된다.

또한 띠간격이 너무 작으면 산화 · 환원 반응에 대한 구동력(driving force)이 작아지므로 오염물질 제거효율의 감소를 보인다.[19] 이러한 흡수능력에 대한 영향인자로서 화학적 첨가제의 종류와 TiO_2 sol의 제조온도에 따른 띠간격에 대해 DRS(Diffuse refraction system)실험을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 일반적으로 약 3 eV의 띠 간격 상태에서 대부분의 오염물질을 처리할 수 있다고 한다.[14] 또한 파장에 따른 각 물질의 흡광도의 조사는 200 nm 부분에서 가장 높은 흡광도를 보였다. 광반응에 사용되는 빛의 파장은 약 387 nm보다 작은 파장을 갖고 있는 것으로서 파장 400 nm 이상에서는 흡광용량의 감소를 볼 수 있다.

2. Batch type 실험에 의한 VOCs 제거율

실험실에서 유리로 제작한 Chamber 실험에서 VOCs 중 Benzene의 감소율을 광(光)이 없는 상태와 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 실험동안의 온도와 습도는 21°C 와 55%이었고, 자외선 세기는 29 mW/cm^2 나타내었다.

위부분에 부착한 형광등은 진공의 유리관 내부에 약간의 수은을 봉입(封入)하여, 이것에 교류 전압을 걸면 수은이 자극을 받아 광(光)을 발생한다. 본 실험에서는 이용된 일반 형광등은 P社의 제품으로 파장 범위가 380~750 nm이었다. 3회 실험한 결과에 의하면 형광등

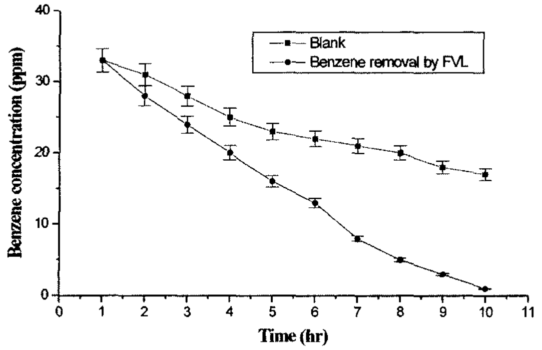

Fig. 5. Benzene removal efficiency by wall-paper coated by TiO_2 sol using fluorescent visible light.

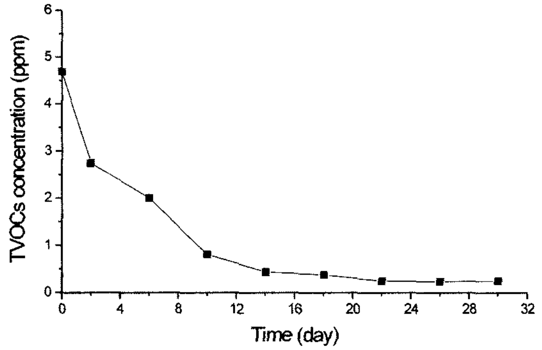

Fig. 6. Photodegradation of TVOCs by TiO_2 photocatalyst in indoor air.

에서 Benzene의 제거가 일어나고 있음을 나타내고 있다. 이 결과는 연속 흐름조(plug-flow)에서 형광등을 이용하여 Butanol과 Propanal을 Black Light 보다 효율은 낮지만 휘발성유기화합물을 제어할 수 있다고 보고한 Chapuis *et al.*와 비슷한 결과를 보였다.[20] 공장이나 특수한 작업환경이 아닌, 일반 주택이나 사무실의 실내환경은 공기오염물질의 농도가 저농도의 ppb 수준이고, 빛의 광자효율(光子效率)을 고려하면 실내환경의 적용가능 할 것으로 생각할 수 있다. 또한 실내환경은 창문 등을 통하여 태양에너지를 받을 수 있기 때문에 실내환경내 벽지 등에 광촉매 코팅에 의한 실내공기질을 향상시킬 수 있을 것으로 생각할 수 있다.

3. 주택현장에서 TVOCs 제거율

다세대 주택에서 실내환경 내부에 TiO_2 sol 코팅 전·후의 농도를 측정한 결과를 Table 1과 Fig. 6에 나타내었다.

광촉매 코팅 전 TVOCs의 농도는 4.69 ppm을 나타내었고, 광촉매 코팅 2일 후의 농도는 2.75 ppm으로 41%의 제거율을 보였다. 그리고 30일 후에는 0.25 ppm으로 나타내어 95%의 제거율을 나타내었다. 측정 동안 실외 TVOCs의 농도는 평균적으로 0.21 ppm을 나타내었다. 측정과정에서 오전에 시작하여 실제 측정 시간은 오후 3~4시로 자외선 강도는 형광등과 창문을 통한 태양광으로 평균적인 값은 3~6 μW/cm²로 측정되었다. 본 결과는 실내공기질 개선에 있어서 광촉매 코팅은 표면반응에 의해 휘발성유기화합물을 효과적으로 제어할 수 있음을 보여주고 있다.

실험결과는 신축건물에 대한 광촉매 반응의 단편적인 견해를 보여줄 수 있다. 즉, 실내·외 기상조건에 따른 광원(자외선)의 세기 변화와 VOCs의 주요 발생원이 되는 건축용 내·외장재의 종류나 특성, 코팅시공 시 작업자의 올바른 시공방법 등에 따라 광촉매 효율에 다소 차이를 보일 수 있으며, 또한 1개월 동안 측정날짜마다 실내환경에 영향을 줄 수 있는 요인의 차이, 예를 들면 습도, 온도, 실외 TVOCs 농도, 빛의 광도 등의 차이가 존재할 수 있기 때문이다. 그러므로 광촉매 코팅에 따른 실내공기질 개선 효율성 평가 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각한다. 그리고 위에서 제시된 실험 결과치를 토대로 다양한 종류의 신축건물에 대한 자료를 확보함으로써 VOCs의 저감과 동시에 실내공기질의 효과적인 관리 방향을 마련하여야 할 것이다.

IV. 결 론

실내공기질에 따른 거주자 및 근로자의 건강위해성으로 고려할 때, 실내공기질 개선을 위한 최선의 방안은 실내환경에서 오염물질의 배출을 줄이거나 개별적인 오

Table 1. Removal rate of TVOCs by TiO_2 sol coating on internal surface according to time in new building

	Before TiO_2 photocatalyst coating	After TiO_2 photocatalyst coating							
		2 day	6 day	10 day	14 day	18 day	22 day	26 day	30 day
Concentration(ppm)	4.69	2.75	2.01	0.81	0.44	0.38	0.25	0.24	0.25
Removal rate(%)	-	41	57	83	91	92	95	95	95
UV Intensity(μW/cm²)	2~6	3~6	2~6	3~6	3~6	1~6	1~6	2~6	3~6

염원을 제어하는 것이다. 최근 들어 공기오염물질 방출률이 낮은 자재들에 대한 연구 및 현장 적용이 증가하고 있으나, 건축자재, 가구, 장식품, 건물내에서 사용되는 소비재, 다양한 인간 활동 등에서 발생하므로 오염 발생원이 없는 실내환경을 만든다는 것은 거의 불가능하다. 더욱이 실외 대기오염이 심한 곳에서는 환기에 의해 오히려 실내공기질이 더 악화될 수 있다. 본 연구는 실내공기질 개선 방법 중 공기오염물질의 실내환경내 벽지 등의 표면반응에 의한 감소를 증가시키는 방법으로 환경촉매인 이산화티타늄 광촉매를 sol-gel 방법으로 제조 및 실내환경내 코팅에 의한 실내공기질 개선 평가를 하여 그 가능성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2003학년도 대구가톨릭대학교 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Molhave, L. and Krzyanowski, M. : The right to healthy indoor air: status by *2002. Indoor Air*, **13**, 50-53, 2003.
2. Jones, A. P. : Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, **33**, 4535-4564, 1999.
3. US EPA : Unfinished business: a comparative assessment of environmental problems. EPA report EPA-230/2-87-025, 1987
4. US EPA : Characterizing air emissions from indoor sources. EPA Report EPA/600/F-95 /005, 1995.
5. Vincent, D., Annesi, I., Festy, B. and Lambrozo, J. : Ventilation system, indoor air quality, and health outcomes in parisian modern office workers. *Environmental Research*, **75**, 100-112, 1997.
6. Skillas, G., Huglin, C. 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, 2000.
7. Yang, W. H., Lee, K. Y. and Chung, M. H. : Characterization of indoor air quality using multiple measurements of nitrogen dioxide. Indoor Air, In Press, 2004.
8. Sparks, L. E., Molhave, L. and Dueholm, S. : Source testing and data analysis for exposure and risk assessment of indoor pollutant sources. ASTM STP 1287, American Society for Testing and Materials, 367-375, 1996.
9. 김신도 : 실내공기질 관리 및 측정. 한국대기환경학회 실내공기질 분과회 세미나, 102-115, 2003.
10. Bae, H., Yang, W. and Chung, M. : Potential exposure and traffic contribution to indoor air quality of shoe-stalls near busy road in Korea. *The Science of the Total Environment*, **323**, 99-105, 2004.
11. Spicer, C. W., Coutant, R. W., Ward, G. F. and Joseph, D. W. : Rates and mechanism of NO_2 removal from indoor air by residential materials. *Environmental International*, **15**, 643-654, 1989.
12. Jacoby, W. A., Blake, D. M., Fennell, J. A., Boulter, J. E., Vargo, L. M., George, M. C. and Dolberg, S. K. : Heterogeneous photocatalysis for control of volatile organic compounds in indoor air. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **46**, 891-898, 1996.
13. Bhowmic, K. M. and Semmens, M. J. : Batch studies on closed loop air stripping process. *Water Res.*, **28**(9), 2011-2020, 1995.
14. Fu, X., Zeltner, W. A. and Anderson. M. A. : The gas-phase photocatalytic mineralization of benzene on porous titania-based catalysts, *Applied Catalysis B, Environment*, 6, 209-224, 1995.
15. 장성기 : 실내공기질 공정시험방법 작성 방향. 대한주택공사 주택도시연구원 2003년 겨울호, 59-69, 2003.
16. 이병용, 김성욱, 정석진 : VOC 물질중 에탄올 광분해 반응을 위한 TiO_2 촉매의 제조 변수 고찰. 한국대기환경학회, **17**(4), 363-370, 2001.
17. Matralis, H. K., Ciardelli, M., Ruwet, M. and Grange, P. : Vanadia catalysts supported on mixed TiO_2-Al_2O_3 supports: Effect of composition on the structure and acidity. *Journal of Catalysis*, **157**, 368-379, 1995.
18. Yamashita, H., Ichihashi, Y., Harada, M., Stewart, G., Fox, M. A. and Anpo, M. : Photocatalytic degradation of 1-octanol on anchored titanium oxide and on TiO_2 power catalysts. *Journal of Catalysis*, **158**, 97-101, 1996.
19. Obbe, T. N. and Brown, R. T. : TiO_2 photocatalysis for indoor air applications: effects of humidity and trace contaminant levels on the oxidation rates of formaldehyde, toluene, and 1,2-butadiene. *Environmental Science & Technology*, **29**(5), 1223-1231, 1995.
20. Chapuis, Y., Klavana, D., Guy, C. and Kirchnerova, J. : Photocatalyst oxidation of volatile organic compounds using fluorescent visible light. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **52**, 845-854, 2002.