

실내공기질 오염 저감을 위한 나노-환경기술

최재훈 · 김현중 · 이영규 · 정현석 · 홍국선

1. 서론

실내 환경 (indoor environment)에 대한 관심은

1990년대 이후 급격한 산업구조의 발달을 통한 에너지 소비가 급증하여 환경오염이 가중되면서 본격적으로 대두되었다고 할 수 있다. 실내 환경문제의 대

최재훈		김현중		이영규	
2002	서울대학교 입산공학과 (학사)	1987	서울대학교 입산공학과 (학사)	1999	국민대학교 입산공학과 (학사)
2004	서울대학교 입산공학과 (석사)	1989	서울대학교 입산공학과 (석사)	2001	서울대학교 입산공학과 (석사)
2004~	서울대학교 입산공학과	1995	The University of Tokyo	2001~	농업과학기술기센터 (NICEM)
현재	박사과정		생물재료학과 (박사)	현재	연구원
		1995~	Virginia Tech 화학과, 접착제 및		
		1996	실란트 과학연구소 박사후연구원		
		1996~	State University of New York		
		1999	(@Stony Brook), 재료공학과		
			고분자나노구조연구실 연구조교수		
		1999~	서울대학교 입산공학과 조교수,		
		현재	부교수		

정현석		홍국선	
1997	서울대학교 무기재료공학과 (학사)	1980	서울대학교 공과대학 요업공학과 (학사)
1999	서울대학교 재료공학부 (석사)	1982	한국과학기술원 재료공학과 (석사)
2004~	서울대학교 재료공학부 (박사)	1990	Alfred University (박사)
현재		1990~	Alfred University 박사후연구원
		1991	
		1991~	한국과학기술원 선임연구원
		1993	
		1993~	서울대학교 무기재료공학과 조교수
		1997	
		1997~	서울대학교 재료공학부 부교수,
		현재	교수

최재훈



김현중



이영규



정현석



홍국선



Environmental Nanotechnology for the Control of Indoor Air Quality

바이오복합재료 및 접착과학 연구실 (Jae-Hoon Choi and Hyun-Joong Kim, Lab. of Adhesion & Bio- Composites, Dept. of Forest Products, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)
농업과학공동기기센터 (Young-Kyu Lee, NICEM, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)
전자기능재료연구실 (Hyun Suk Jung and Kug Sun Hong, Electronic Functional Materials Laboratory, School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)
e-mail : hjokim@snu.ac.kr (<http://www.adhesion.org>)

표적인 실내공기질 (Indoor Air Quality, IAQ)에 대한 문제의 발생배경을 보면 1970년대 이후 각종 산업분야에서 에너지 절감 및 효율을 높이기 위한 노력의 일환으로 건물의 열효율을 위한 밀폐화 및 고기밀화에 따른 실내공간의 변화에 따라 이들 건물의 실내공기질이 악화되면서 발생되었다. 또한, 산업기술의 발달에 따라 다양한 합성물질이 새로운 건축자재 및 실내공간에 사용되었고 다양한 화학물질의 방산에 의한 실내공기 오염으로 거주자들에게 나타나는 다양한 건강 이상 증상에 대해서 보고되고 있다. 1970년대 초 새집증후군 (Sick Building Syndrome SBS, Sick House Syndrome, SHS)이라 하는 새로운 증상이 보고되었으나 최근에 본격적으로 관심을 갖게 되었다.¹⁻⁴

현대인이 실내에서 생활하는 시간이 하루 중 90% 이상을 차지하고 있으며, 이에 따라 실내공기질은 현대인의 건강에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 실내공기오염 문제와 해결방안에 대한 논의는 최근 나날이 늘어가고 있다. 이에 따라 국내에서도 본격적인 실내공기질 관리방안으로 2004년 5월부터 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법” 시행을 앞두고 있다. 이에 따라 실내공기 오염물질의 오염도를 줄이는 친환경자재의 개발과 오염물질 저감법에 대한 관심이 더욱더 증가하고 있는 실정이다.⁵⁻⁸

특히 실내공기의 주 오염물질은 실내 인테리어 자재에 사용되는 고분자 물질 (접착제, 도료 등)에 포함되어 있는 휘발성유기화합물 (volatile organic

compounds, VOCs)의 방출로 인해 일어난다. 실내공기 오염도를 줄이기 위한 방법으로는 재료적인 측면에서 친환경자재 및 고분자 재료 (도료 및 접착제)를 사용하는 방법과 유해물질이 대기 중으로 방산되는 것을 막기 위하여 재료의 표면을 2차 가공하는 방법, 그리고 기존의 실내 환경에서 유해물질을 제거하는 방법으로 구분할 수 있다. 최근 실내환경오염 저감법으로 TiO₂ 나노입자를 이용한 광촉매가 부각되고 있다. 본 고에서는 이러한 광촉매 반응의 기본원리를 중심으로 TiO₂ 나노입자를 이용한 광촉매를 사용한 실내공기오염 저감법에 대하여 논하고자 한다.

2. 실내공기 오염물질과 광촉매

2.1 실내공기 오염물질

새집증후군의 원인은 실내공기의 오염으로 인한 것이며, 이러한 실내공기의 주 오염물질과 발생원은 연소과정, 실내에서의 흡연, 오염된 외부공기의 실내유입 등이 있다. 이러한 실내 오염물질은 사람들의 호흡기와 순환기에 영향을 미치며, 특히 VOCs 중의 벤젠, 1,3-부타디엔 등의 일부 물질은 발암성을 내포하고 있다.³ 실내에서 발생하는 주요 오염물질의 발생원 및 인체의 영향은 **표 1**과 같다.⁵⁻⁸

이러한 실내공기질 오염물질 중에서 VOCs 물질들은 증기압이 높아서 대기 중으로 쉽게 증발되고, 물질에 따라 인체에 발암성을 보이고 있다. 실내에서 발생

표 1. 실내 오염물질과 주요 발생원

오염물질	주요 발생원	인체 영향
먼지, 중금속	대기 중 먼지가 실내로 유입, 실내 바닥의 먼지, 생활활동 등	규폐증, 진폐증, 탄폐증, 석면폐증 등
석 먼	단열재, 절연재, 석면타일, 석면브레이크, 방열재 등	피부질환, 호흡기질환, 석면증, 폐암, 중피증, 편평상피 등
담배연기 (각종가스, HC, PAHs, 먼지 등)	담배, 켄련 등	두통, 피로감, 기관지염, 폐렴, 기관지천식, 폐암 등
연소가스 (CO, NO ₂ , SO ₂ 등)	각종 난로, 연료연소, 가스렌지 등	만성 폐질환, 기도저항 증가, 중추신경 영향 등
라돈	흙, 바위, 지하수, 화강암, 콘크리트 등	폐암 등
포름알데히드	합판, 보드, 가구, 단열재, 소취제, 담배연기, 화장품, 옷감 등	눈, 코, 목 자극증상, 기침, 설사, 어지러움, 구토, 비염, 피부질환, 정서불안증, 기억력 상실 등
미생물성물질 (곰팡이, 박테리아, 바이러스, 꽃가루 등)	가습기, 냉방장치, 냉장고, 애완동물	알레르기성 질환, 호흡기질환 등
휘발성유기화합물 (VOCs)	페인트, 접착제, 건축자재, 스프레이, 연소과정, 세탁소, 의복, 방향제, 왁스 등	피로감, 정신착란, 두통, 구토, 현기증, 중추신경 억제작용 등
약취	외부 약취가 실내로 유입, 채취, 음식물의 부패 등	식욕감퇴, 구토, 불면, 알레르기증, 정신신경증 등
오존	복사기기, 생활용품, 연소기기	기침, 두통, 천식, 알레르기성 질환



그림 1. VOCs 주 발생 원인과 인체에 미치는 영향.

표 2. 실내에서 발생되는 VOCs 물질들과 주요 발생원⁷⁻¹³

VOCs 물질	주요 발생원
벤젠	PB, MDF, 합판, 세척 및 청소용품, 페인트 제거제, 접착제
디클로로벤젠	방향제, 증약
펜타클로로벤젠	목재보존제, 곰팡이 제거제, 제충제
부틸아세테이트	락커
톨루엔, 자일렌	페인트, 바닥용 왁스, 니스, 염료착제, 등유용 난방기구, 벽지
스틸렌	담배 연기, 코팅제, 발포형 단열재, MDF

되는 VOCs 물질과 발생원은 그림 1과 표 2와 같다.⁷⁻¹³ 이러한 VOCs 물질들은 건축자재와 마감재료의 실내 시공 시 사용되는 고분자 물질인 접착제, 코팅제, 페인트, 바닥재 등에서 주로 발생한다.

2.2 VOCs 저감법

VOCs 물질들을 제거하기 위하여 현재 사용되고 있는 방법으로는 직접연소법, 촉매연소법, 흡착법을 이용한 제거법과 미생물을 이용한 생물학적 방법 등이 주류를 이루고 있다. 최근에는 기존에 사용되었던 공정들을 대신할 수 있는 고급 산화공정이 개발되고 있다.

가장 널리 사용되는 공정인 직접연소법과 촉매연소법은 VOCs 물질들을 고온으로 태워서 제거하는 방법으로써 많은 에너지의 소비를 요구하며 또는 2차 오염물질의 배출이 문제가 된다. 촉매연소법은 연소 온도를 낮출 수 있으나 반응물질에 따라 촉매의 피독 현상이 일어나거나 수명을 단축시키며 효율을

저하시키게 된다. 흡착법은 대규모의 흡착질을 필요로 하며 정기적으로 필터를 교체해 줄 필요가 있게 된다. 그리고 bio-filtration을 이용한 방법은 높은 운전비용과 대용량에 적합하다.

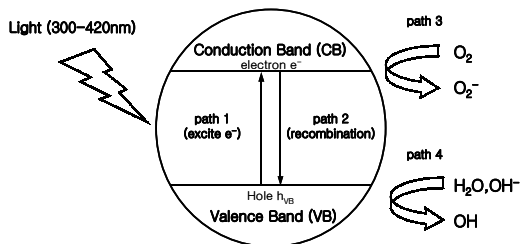
최근에 광촉매를 이용하여 VOCs 제거 및 폐수의 정화에 관한 연구가 주목받고 있다. 광촉매 공정은 광 (ultraviolet light) 조사 하에 산소와 광촉매를 이용하여 유독물질을 제거하는 방법으로서 비교적 최근에 개발된 방법이다. 최근의 해외연구 동향으로 Mehrab 등은¹⁴ 광촉매 반응에서 동적 모델을 위한 비선형 변수의 측정에 대한 연구를 수행하였고, VOCs 물질의 광촉매 반응에 대하여 Ray 등의¹⁵ 연구가 이루어져 왔다.

2.3 광촉매

2.3.1 광촉매

광촉매는 빛 (photo=light)과 촉매 (catalyst)의 합성어로 빛 (ultraviolet light)을 받으면 촉매반응을 일으키는 물질을 말한다. 일반적으로 광촉매로 사용할 수 있는 물질로는 TiO_2 (anatase), TiO_2 (rutile), ZnO, CdS, ZrO_2 , V_2O_5 , WO_3 등과 페로브스카이트형 복합금속산화물 (SrTiO_3) 등이 있다.

그림 2의 광촉매의 광반응 메커니즘은 광촉매가 가전자대 (valence band, VB)와 전도대 (conduction band, CB) 사이의 띠간격 (band gap, E_g) 이상의 빛 에너지를 흡수하여 CB에는 전자 (electron, e^-), VB에는 전공 (electron hole, h^+)을 형성시킨다. 발생한 전자와 홀은 각각 CB에서 산소와 같은 산



- path 1 : 빛에 의한 전자여기과정 (정공과 전자 생성)
 path 2 : 정공과 전자 재결합 과정
 path 3 : 전자에 의한 슈퍼옥사이드 생성
 path 4 : 정공에 의한 히드록실 라디칼 생성

그림 2. 광촉매의 광반응 메커니즘.

화제를 환원시키고, VB에서 환원제를 산화시킨다. 특히 VB에 생성된 홀은 광촉매 표면에 흡착되어 있는 H₂O 분자 또는 OH⁻ 이온을 산화시킴으로써 hydroxyl radical (·OH)을 만들고 이때 형성된 ·OH는 반응성이 매우 강하여 페놀 등 난분해성 유기물을 산화시켜 분해할 수 있다.

광촉매는 광산화 반응을 통한 유기물 분해작용과 항균·살균·방취기능 이외에도 광환원성, 초친수성, 양친매성, 초발수성 등의 다양한 기능을 가지고 있다.^{15,16}

실제 광촉매 반응에 사용할 수 있는 반도체 물질은 우선, 광학적으로 활성이 있으면서 광부식이 없어야 한다. 또한 화학적으로나 생물학적으로도 비활성이어야 하며, 인체에 무해할 뿐만 아니라 경제적으로도 저렴해야 한다. 이러한 조건을 충분히 만족시킬 수 있는 광촉매는 TiO₂ 광촉매이다.

2.3.2 TiO₂ 광촉매

TiO₂은 백색도와 착색력이 뛰어난 고품질 재료로 종래부터 페인트, 잉크, 플라스틱, 제지, 고무와 섬유의 광택도 조절과 화학섬유 및 합성섬유 내구성 향상을 위해 그리고 화장품에서 자외선 차단제 등으로 사용되어 왔다. 일반적으로 안료로 사용되는 경우에 순도는 약 98.0% 이상, 입자크기는 0.25~0.35 μm 정도를 많이 사용해 왔다. 그러나 TiO₂가 광촉매로 사용되는 경우에는 TiO₂ 광촉매의 성능은 입자의 크기, 표면적과 UV를 흡수할 수 있는 양과의 관계에서 결정이 된다. 그러므로 광촉매의 입자 크기는 5nm 이하의 나노수준에서는 표면적은 넓지만 UV를 흡수할 수 있는 양이 줄어 오히려 성능이 떨어지므로 그 이상의 입자 수준을 유지하면서 입자의 표면적을 최대화할 수 있는 것이 좋은 성능을 유지하는 방법이다.

TiO₂ 광촉매는 특히 난분해성 오염물질의 분해반응에 있어서 그 성능을 인정받아 환경정화용 촉매로서 각광을 받고 있는데 이는 주로 TiO₂의 다음과 같은 특성들에 기인한다.

첫째, 오염물질 분해반응은 대부분 산화반응이므로 광촉매 VB 정공의 산화력에 의존한다. 산화물 반도체의 광산화 반응 활성도에 있어서도 TiO₂(anatase) > TiO₂(rutile) > ZnO > ZrO₂ > SnO₂ > V₂O₃의 순으로, TiO₂가 가장 큰 활성도를 보이므로 오염물질의 분해반응에 보다 유리하다.

둘째, TiO₂의 화학적, 광화학적 안정성을 들 수 있다. TiO₂는 강산, 강알칼리 조건에서 모두 안정하여 빛이 조사되는 조건 하에서 전자쌍이 고체격자 이온들과 직접 반응하여 반도체 물질 자체를 분해시키는 광부식 현상이 거의 없다. 이러한 화학적 안정성 때문에 TiO₂는 독성이 없고 식료품이나 의약품에 흰색을 착색시킬 필요가 있을 경우 첨가되기도 할 정도로 안정하므로 환경정화용 촉매로 사용하기에 매우 안정한 물질이다.

셋째, 공업적으로 이미 대량생산되고 있는 물질로 가격이 매우 싸고 구하기 쉬우며 실험실에서도 간단히 합성될 수 있다. 가시광선을 전혀 흡수하지 않으나 태양광에 포함된 소량의 자외선만으로도 충분히 활성화 되어 다양한 난분해성 오염물질들을 완전 분해시킬 수 있다는 사실이 확인되었으며, 대부분의 광산화 분해반응에 있어서 다른 산화물 반도체 광촉매보다 높은 활성을 보이는 것으로 알려져 있다.

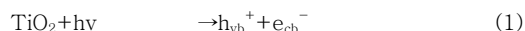
높은 산화반응과 화학적, 광화학적 안정성 그리고 경제적인 TiO₂ 광촉매가 현재 가장 널리 쓰이며 가장 활발한 연구가 진행 중이다.

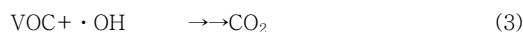
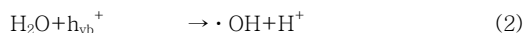
3. TiO₂ 광촉매의 VOCs 저감방법과 실례

3.1 TiO₂ 광촉매의 VOCs 저감 메커니즘

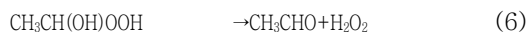
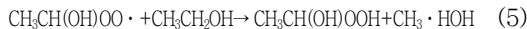
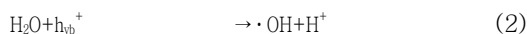
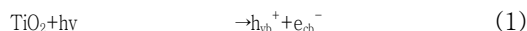
TiO₂ 광촉매는 정공의 산화력이 각종 유기물을 분해할 뿐만 아니라 NO_x, SO_x를 제거하는데 탁월한 효과를 갖고 있다. 일본에서는 도로 및 고가도로 기둥, 터널 내벽에 광촉매 타일 및 블록을 부착시켜 자동차 배기가스 정화 실험을 통해 NO_x, SO_x가 90%이상 제거되는 효과를 확인하였다.

이러한 TiO₂ 광촉매의 VOCs 즉, 유기물을 분해하는 간략한 메커니즘을 살펴보면 다음과 같다.





TiO₂ 광촉매에 UV를 조사하여 생성된 전도대의 정공 ($h\nu^+$)이 표면으로 이동하여 광촉매 표면에 흡착되어 있는 H₂O 분자 또는 OH⁻ 이온을 산화시킴으로써 반응성이 매우 강한 hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$)을 생산하고 바로 이것이 유기물을 산화시켜 분해할 수 있는 것이다. 한편 가전자대의 전자 (e_{cb}^-)는 역시 O₂를 환원시켜 O₂의 음이온을 생성시킨다. 다양한 VOC들의 정확한 광촉매 반응 메커니즘을 규명하는 데에는 현실적으로 큰 어려움이 있으나 에탄올의 예를 들면 다음과 같다.



TiO₂ 표면의 O₂와 반응하여 organoperoxy 라디칼 (CH₃CH(OH)OO $\cdot$)을 생성, 결국 에탄올의 연쇄분해 반응을 유도한다.

3.2 TiO₂ 광촉매를 이용한 VOCs 저감 실험

3.2.1 벤젠의 분해

벤젠은 파티클보드 (PB), MDF (중밀도 섬유판), 합판 등의 건축자재나 세척제, 페인트 제거제, 접착제와 같은 물질들의 사용 시 발생할 수 있는 VOCs 물질로 발암물질이다. 이러한 벤젠을 분해하기 위해 졸·겔법으로 제조된 TiO₂ 나노입자 분말을 원통형 반응기에 넣고 4W-Black Light Bulb (BLB)를 사용하여 자외선을 조사하였다. 이 결과 가스 상태의 벤젠을 CO₂로 전환시킬 수 있었다. 이 때의 벤젠과 CO₂의 농도는 gas chromatography (GC)를 이용하여 측정하여 벤젠의 분해율을 측정하였다.

벤젠은 **그림 3**의 (1)과 같이 열을 가하여 분해시킬 수도 있으며 이때의 분해 전환율은 약 25% 정도이지만, **그림 3**의 (2)와 같이 TiO₂ 나노입자를 이용한 광촉매를 사용하고 가열한 결과 약 95%의 벤

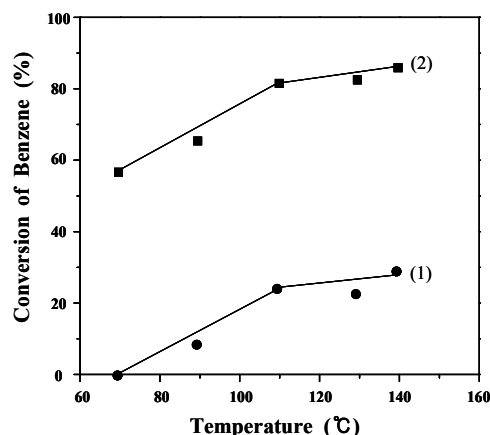


그림 3. 열(1)과 열과 TiO₂ 광촉매 반응 (2)을 이용한 벤젠의 분해.¹⁷⁾

젠을 분해시킬 수 있었다. 열만으로도 분해가 가능하지만, 광촉매를 사용해야 인체에 유해한 벤젠을 효율적으로 분해시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.2.2 톨루엔 및 자일렌의 분해

톨루엔과 자일렌은 대표적인 발암물질이다. 이러한 톨루엔과 자일렌은 페인트, 바닥용 왁스, 니스, 등 유용 난방기구 등에서 발생하는 VOCs 물질이다. 톨루엔과 자일렌을 분해시키기 위해 TiO₂ 나노입자를 이용한 광촉매가 코팅된 유리망을 원기동형의 반응기에 넣고 기체상태의 발암물질인 톨루엔 및 크실렌이 유입된 상태에서 9W UV 램프를 이용하여 자외선을 조사하였다. 분해되고 남은 톨루엔과 자일렌의 양을 측정하기 위하여 GC를 이용하였다. 반응시간에 따른 각 물질의 농도를 측정한 결과, **그림 4**와 같이 초기량의 약 60%의 톨루엔이 반응 1시간 만에 분해되었으며, 크실렌도 50% 가량 분해되었다. 결과적으로 톨루엔과 자일렌과 같이 유해한 물질도 TiO₂ 나노입자를 이용한 광촉매를 이용하여 절반이상을 분해할 수 있어 톨루엔과 자일렌의 제거에 효율적으로 쓰일 수 있다.

3.2.3 NO_x의 분해

각종 난로, 연료연소, 가스렌지 등에서 연소과정에서 발생하는 NO_x 형태의 질산 화합물은 만성 폐질환이나 기도저항 증가, 중추신경에 영향을 주는 등 인체에 유해한 물질이다. 이러한 질산 화합물은 분말 형태 (Honeycomb 모양)의 TiO₂에 Zeolite를 첨가하여 UV를 조사하여 분해시킬 수 있다. **그림 5**에서와 같이 광분해 반응 초기에 거의 완벽하게 NO_x를 분해하지만 반응생성물인 HNO₃의 촉매 표면에 흡착

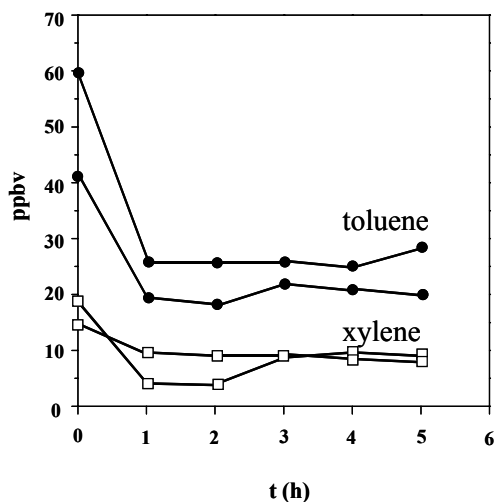


그림 4. TiO_2 광촉매 반응을 이용한 톨루엔과 크실렌의 분해.¹⁸

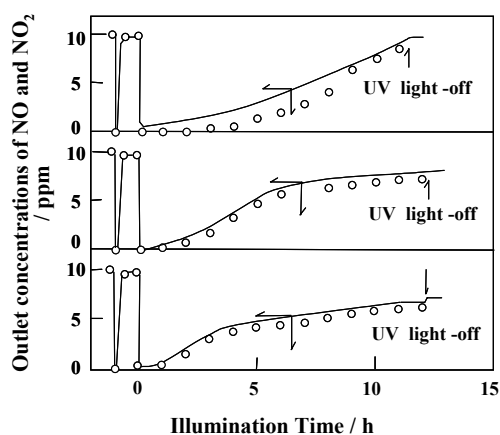


그림 5. TiO_2 광촉매 반응을 이용한 질소화합물의 분해.¹⁹

으로 인하여 시간이 지남에 따라 분해효율이 다소 감소하는 경향을 보였다.

3.3 TiO_2 광촉매의 적용사례

TiO_2 광촉매는 광산화 반응을 통한 유기물 분해작용을 통해 실내공기 오염물질의 저감과 항균·살균·방취기능 이외에도 광환원성, 초친수성, 양친매성, 초발수성 등의 다양한 기능을 가지고 있는 만큼이나 다양한 분야에서 사용되고 있다.

인간의 생활에서 가장 많이 사용되고 있고, 가까운 곳에서 사용되는 고분자 물질들 (도료, 접착제)은 VOCs를 방출하고 있다. 최근 이러한 VOCs의 저감을 위해 광촉매의 이용이 활발해지고 있다. 이러한 TiO_2 광촉매는 공기청정기의 필터나 벽지, 유리창,

목질바닥재(마루판)에 코팅되어 쓰여지고 있다.

TiO_2 나노입자를 이용한 광촉매 제품은 고분자 유기바인더를 이용하여 피착재에 TiO_2 나노입자를 코팅 혹은 접착시켜 만든다. 이 때에 사용되는 고분자 유기바인더가 TiO_2 광촉매의 유기물질 분해작용에 의해 분해되지 않는 것이 중요하며, 분해되는 경우 분해정도가 TiO_2 광촉매 제품의 수명에 영향을 미친다. 또한 고분자 유기바인더의 양도 제품의 수명에 영향을 미친다. 바인더의 양이 적으면 제품의 수명이 짧아지며, 바인더의 양이 너무 많으면 빛이 충분히 광촉매에 도달하지 않아 성능이 줄어든다. 그러므로 광촉매에 의한 분해를 견딜 수 있는 적절한 바인더와 그 바인더를 적절한 양으로 사용하는 것이 중요하다.

4. 결론

최근 생활수준의 향상으로 환경에 대한 관심이 높아지고 새집증후군이 알려지게 되면서 실내환경에 대한 관심이 높아졌다. 이에 따라 국내에서도 본격적인 실내공기질 관리방안으로 2004년 5월부터 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법” 시행을 앞두고 있다. TiO_2 광촉매는 빛을 흡수하여 실내공기 오염물질 중 인체에 유해한 VOCs를 효율적으로 분해할 수 있으며, 광촉매 자체의 분해가 없어 지속적으로 사용이 가능한 나노수준의 입자를 사용하여 주목을 받고 있다.

본고에서는 이러한 TiO_2 광촉매의 VOCs 분해반응 및 실제 분해 사례를 살펴보고, 이에 따른 실내공기 오염물질의 저감 가능성에 대해 확인할 수 있었다. 그러나 실질적으로 TiO_2 광촉매를 사용하는 과정에서 바인더로 사용되는 고분자 유기화합물의 내구성에 의한 영향이 크므로 이에 따른 연구가 계속적으로 이루어져야 할 것이다. 본고가 TiO_2 광촉매와 실내공기 오염물질 저감을 연구하시는 분들에게 도움이 되었으면 하는 마음으로 글을 맺고자 한다.

참고문헌

1. 김현중 역, 새집증후군의 실체와 대응전략, 한국목재신문사 (2003).
2. 환경부, 대기환경보전법 (1998).
3. 대기환경과 휘발성유기화합물질, 한국대기보전학회 (1998).

4. 한화진, 유해대기오염물질구제에 관한 국내 대응방안 연구, 한국환경개발연구원 (1994).
5. 김윤신 외, 실내공기질 관리방안에 관한 연구, 환경부 (1999).
6. 이영웅 외, 실내공간 실내공기오염 특성 및 관리방법 연구, 환경부 (2002).
7. 김신도 외, 실내공간의 VOCs 특성 및 제어방안에 대한 기초조사, 환경부 (2001).
8. 실내 VOCs 오염물질의 방출특성 및 실태조사, 한국환경민간 단체진흥회, 한국공기청정협회 (2000).
9. P. Wolkoff and G. D. Nielsen, *Atmos. Environ.*, **35**, 4407 (2001).
10. J. Hollender, F. Sander, M. Moller, and W. Dott, *J. Chromatogr. A*, **962**, 175 (2002).
11. R. Wiglusz, E. Stitko, G. Nikel, I. Jarnusz-kiewicz, and B. LgIelska, *Build. Environ.*, **37**, 41 (2002).
12. T. W. Zinn, D. Cline, and W. F. Lehmann, *Forest Prod. J.*, **40**(6), 15 (1990).
13. H. F. Guo, Murray and S.-C. Lee, *Build. Environ.*, **37**, 1117 (2002).
14. M. Mehrab, W. A. Anderson, M. Y. Murray, and P. M. Reilly, *Chem. Eng. Sci.*, **55**, 4885 (2000).
15. M. B. Ray, *Developments in Dhemical Engineering and Mineral Processing*, **8**, 405 (2000).
16. S. Kim and S. Hong, *Appl. Catal. B-Environ.*, **35**, 305 (2002).
17. X. Fu, W. A. Zeltner, and M. A. Anderson, *Appl. Catal. B- Environ.*, **6**, 209 (1995).
18. P. Pichat *et al.*, *Catalysis Today*, **63**, 363 (2000).
19. K. Hashimoto, K. Wasada, M. Osaki, E. Shono, K. Adachi, N. Toukai, H. Kominami, and Y. Kera, *Appl. Catal. B-Environ.*, **30**, 429 (2001).