

## 건축자재의 산화티타늄 코팅을 통한 휘발성 유기화합물 분해

조 완근·전희동<sup>\*</sup>  
경북대학교 환경공학과 · 포항산업과학연구원 환경에너지센터  
(2005년 1월 7일 접수; 2005년 7월 18일 채택)

## Destruction of Volatile Organic Compounds Using Photocatalyst-Coated Construction Materials

Wan-Kuen Jo and Hee-Dong Chun<sup>\*</sup>

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea  
<sup>\*</sup>Environment and Energy Research Center, Research Institute of Industrial  
Science and Technology, Pohang 790-330, Korea

(Manuscript received 7 January, 2005; accepted 18 July, 2005)

In order to reduce roadside and indoor air pollution for volatile organic compounds (VOC), it may be necessary to apply photocatalyst-coated construction materials. This study evaluated the technical feasibility of the application of TiO<sub>2</sub> photocatalysis for the removal of VOC present in roadside or indoor air. The photocatalytic removal of five target VOC was investigated: benzene, toluene, ethyl benzene and o,m,p-xylenes. Variables tested for the current study included ultraviolet(UV) light intensity coating materials, relative humidity (RH), and input concentrations. Prior to performing the parameter tests, adsorption of VOC onto the current experiment was surveyed, and no adsorption was observed. Stronger UV intensity provided higher photocatalytic destruction(PCD) efficiency of the target compounds. For higher humidity, higher PCD efficiency was observed. The PCD efficiency depended on coating material. Contrary to certain previous findings, lower PCD efficiencies were observed for the experimental condition of higher input concentrations. The current findings suggested that the four parameters tested in the present study should be considered for the application of photocatalyst-coated construction materials in cleaning VOC of roadside or indoor air.

Key Words : Construction material, Photocatalytic-coated, Roadside air, Indoor air, VOC

### 1. 서 론

과거 Anti-Knocking을 위해서 Tetraethyl Lead ((C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub>Pb)를 휘발유에 첨가하였으나 이로 인해 납이 배기ガ스와 함께 자동차로부터 배출되고 이로 인한 대기의 납 오염 문제가 인식됨으로서 무연 휘발유 사용이 의무화되었다. 최근 Knocking 현상을 줄이고 육탄기를 증가시키기 위해서 정유 회사에서는 Tetraethyl Lead의 사용 대신에 휘발유의 방향족 화합물 함량을 증가시키고 있다. 1980년에는 미국의 무연 휘발유의 방향족 화합물 함량이 22% 였

던 반면에, 최근에는 33%에 달하고 있다<sup>1)</sup>. 국내의 경우, 과거 자료는 이용할 수 없고 1993년에 국내 무연 휘발유의 방향족 화합물 함량은 30~40%로 조사되었다<sup>2)</sup>. 이러한 방향족 화합물의 함량 증가와 관련하여 국외 뿐만 아니라 국내에서도 도로변에서 방향족 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds: VOC)의 농도가 매우 높은 것으로 확인되었다<sup>3~6)</sup>. 도로변에서의 이러한 고농도 VOC는 차량 운행시 배출되는 미연소 및 연소생성물 그리고 차량엔진과 주유소에서의 휘발유 증발에 기인한다<sup>3,7,8)</sup>. 이러한 VOC는 실세로 암을 유발시키거나 다른 건강영향을 미칠 수 있다<sup>9,10)</sup>. 특히 도로상의 대기오염은 도로변 건물내로 침투하기 때문에 건물 이용자들의 VOC에 대한 노출과 이로 인한 건강위해성을 중대된다. 따

Corresponding Author : Wan-Kuen Jo, Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea  
Phone: +82-53-950-6584  
E-mail: wkjo@knu.ac.kr

라서, 도로변 인근 거주자들의 VOC 노출과 이로 인한 건강위해성을 줄이기 위한 기술개발과 이용이 필요하며, 이러한 기술 중에는 VOC 분해능이 확인된 건축물 재료 개발과 이용도 포함된다.

도로변 인근의 실내공기오염뿐만 아니라, 실내공기오염도 건물중후군을 포함하여 인체 위해성을 증가시키므로 여러 실내공기 중 VOC 제어에 대한 연구가 많은 환경기술적 관심을 받고 있는 실정이다<sup>11~13)</sup>. 이러한 VOC은 우리가 건물내에서 흔히 사용하는 폐인트, 스프레이, 세탁, 난방 및 흡연 등으로부터 배출되어 건물의 실내를 오염시킨다<sup>14~16)</sup>. 따라서, 건물중후군과 인체 위해성을 줄이기 위해서는 이들 실내공기오염물질을 제어하는 다양한 연구가 수행되어야 한다. 그러나, 실내공기오염 제어 기술에 대한 개발 속도가 실내공기오염의 중요성에 대한 인식이 증가하는 속도를 따르지 못하고 있는 실정이다. 특히, 실내공기 오염물질을 제어하기 위해서 몇 가지 공기정화기가 개발되어 실용화되어 있지만 거의 대부분이 활성탄 흡착법을 활용하고 있으며, 활성탄의 잦은 교환으로 인한 비용 문제와 교환된 활성탄의 후처리 문제가 큰 단점으로 대두되고 있다<sup>17)</sup>. 실내공기 중 가스오염물질을 제어하는 대안으로서 이산화티타늄( $TiO_2$ )을 이용한 광촉매산화법이 아주 최근에 많은 관심을 받고 있다<sup>17)</sup>.

$TiO_2$  광촉매산화법이 가지는 두 가지의 대표적 기능은 환경오염물질 분해능과 자정기능(self cleaning) 기능이다<sup>18~19)</sup>. 환경오염물질 분해능은  $TiO_2$  광촉매에 태양에너지(혹은 UV)를 조사하게 되면 여러 가지 경로를 거쳐 강력한 산화력을 가지는 수산 라디칼(hydroxyl radical)가 생성되는 데에 기인한다. 또한 자정기능은  $TiO_2$  광촉매를 코팅한 재료의 표면이 초친수성을 띠게 됨에 따라 표면에 붙어 있는 먼지, 기름(oil) 또는 검댕(soot) 등이 빗물에 의해 쉽게 씻겨져 내려 인위적인 청소 등을 하지 않더라도 재료의 표면이 항상 깨끗하게 유지된다. 이러한 특성에 의해 광촉매를 코팅한 재료는 환경을 정화 할 수 있을 뿐 아니라 항상 깨끗한 외관을 유지할 수 있으므로 특히 건축분야에 그 용도가 광범위하게 응용될 수 있을 것으로 여겨지고 있다. 건축자재로서 이러한 기능성 재료가 이용된다면 대기오염의 완화, 실내공기오염 제거, 유지관리 비용 절감, 건축물의 수명 연장 등 그 효과가 를 것이다.

1980년대 후반부터 미국, 유럽, 호주 등에서 환경분야의 새로운 미래기술로서 본격적으로 연구되기 시작한 광촉매 관련기술은 초기에는 광촉매의 강력한 산화력을 이용한 환경오염물질 처리기술 개발에 초점이 맞추어져 왔으나 1990년대 후반 광촉매(특히  $TiO_2$ )를 코팅한 재료 표면의 초친수성(super hydro-

philicity)이 발견되면서 일본을 중심으로 각종 기능성 재료(특히 건축자재)개발이 대단히 활발하게 진행되고 있다<sup>20)</sup>. 특히 일본의 TOTO사는 2000년대 중반 광촉매를 이용한 기능성 재료의 시장이 세계적으로 수 조원에 달할 것으로 보고 다양한 재료개발에 많은 노력을 하고 있다. 현재 일부 기능성제품을 시판하고는 있으나 아직까지는 본격적으로 상업화를 하고 있지는 못한 형편이다. 우리나라에서도 많은 사람들이 광촉매에 대한 연구를 하고 있으나 대부분 환경오염물질 처리기술로서 연구 중이며 기능성 재료로서의 연구는 선진국 특히 일본에 크게 뒤쳐져 있다. 따라서 본 연구의 궁극적 목표는 자동차로 인한 도로상의 대기오염물질을 분해시키기 위하여 건물 외벽에 광촉매 기술을 적용하고, 동시에 실내 공기 정화를 위해서 건물 내벽의 건축자재에 광촉매 기술 적용 가능성을 평가하는 것이다. 이러한 연구목표를 달성하기 위하여 일차적으로 제작 반응장치를 고안·제작하고 이를 이용하여 광촉매로 코팅된 건축자재인 타일의 VOC에 대한 광촉매 분해능을 연구·평가하기 위해서 광촉매 반응시 주요 인자인 UV강도, 코팅 재질, 습도 및 오염농도 인자에 대한 VOC 광촉매 분해능을 조사하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 실험 고안

광촉매 분해능 시험에 앞서 반응장치(Fig. 1)의 조사대상오염물질에 대한 오염을 확인하기 위하여 바탕시험(background test)이 수행되었다. 이 시험을 위해서 반응장치 내에서 UV 램프를  $TiO_2$ 로 코팅된 유리에 조사시키면서 zero-grade 공기를 시험장치로 통과시켜 시험장치를 12시간 정도 정화시켰다. 정화 후 시험장치로부터 시료 채취 및 분석을 통하여 시험장치 내에 오염정도를 확인하였다.

반응장치가 오염되지 않았다는 것을 확인한 후에 반응장치 내의 농도 평형상태와 타일의 흡착 여부

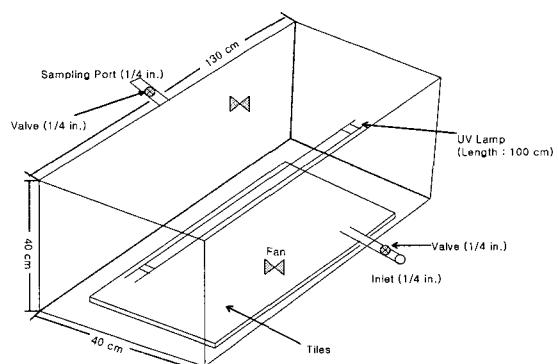


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up.

를 확인하는 실험도 수행되었다. 본 실험에서는  $TiO_2$  코팅이 되지 않은 타일을 반응장치 내에 두고, UV 램프는 작동시키지 않고 팬(fan)을 켜 상태에서 유량과 시간을 조절하여 연구대상 VOC, 수증기 및 zero-grade 공기가 포함된 혼합공기를 시험장치 부피의 10배만큼 시험장치 내로 통과시켰다. 물중탕기(water bath: Cole-Parmer HAAKE) 내에 설치된 가습장치(물일정량이 담긴 임파저(impinging))를 통하여 반응장치로 유입되는 zero-grade 공기의 유량과 bypass 라인을 통하여 반응장치로 직접 유입되는 유량의 비를 이용하여 반응기 내의 상대습도를 조절하였다. 조절되고 조사 VOC는 독성이 강한 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, o,m,p-자일렌(BTEX)으로서 마이크로실린지(micro-syringe)를 이용하여 시험장치 내로 유입되었다. 또한, 유량은 dry test meter(URG 3000-020C)를 이용하여 측정되었다. 반응장치 내의 오염물질 농도 평형상태를 확인하기 위하여 오염물질 유입 전과 유입 후 25시간 동안 임의적으로 계획된 시간에(0.5, 2, 5, 8, 20.5 및 25 h) 시료채취부에서 시료를 채취·분석하였다.

$TiO_2$  광촉매 분해능 실험이 앞의 농도 평형상태 확인 실험과 동일한 방법으로 수행되었다. 다만, 반응장치의 농도 평형 상태와 타일의 흡착 여부를 확인하는 실험에서 반응장치 내로 오염물질을 유입한 후 20.5시간에 측정된 농도는 불안정한 것으로 나타났기 때문에 본 실험에서는 여섯 개의  $TiO_2$  코팅 타일을 반응장치 내에 두고, UV 램프와 팬(fan)을 모두 켜 상태에서 오염물질 유입 전과 유입 후 8시간까지(0.5, 2, 5 및 8 h) 시료를 채취·분석하였다. 본 실험에서 광촉매 분해능에 영향을 미치는 주요 인자 중 UV강도, 코팅 재질, 습도 및 오염농도 인자를 평가하였다.

## 2.2. 반응 장치

본 실험에 이용된 반응기는 40cm(폭) × 40cm(높이) × 130cm(길이)로서 VOC에 대하여 불활성인 스테인레스-스틸로 제작되었다(Fig. 1). 이러한 규격은 본 연구에서 이용되는 시료채취유량과 시료채취 횟수를 고려하여 시료채취에 따른 반응기 내부 압력 감소를 최소화하기 위해서 결정되었다(최대 20% 압력감소). 또한 반응기 길이는 상업적으로 이용 가능한 형광 UV램프(SANKYO DENKI F40T10/BLB)의 길이에 기초하고, 반응기의 폭과 높이는 UV램프의 거리와 조사각도에 따른 조사량을 측정한 예비실험 결과에 기초하여 결정되었다.  $TiO_2$ 로 코팅된 타일은 반응기 본체 바닥에 두고, UV램프는 UV가 코팅면에 균일하게 조사되고 UV-light 강도가 쉽게 조절되도록 설치되었다. 반응기 내부에는 내부 공기의

혼합효율을 증대시키기 위해 두 개의 작은 소형 팬(fan)이 설치되었다. 반응기 본체에 연결된 1/4인치 외경의 스테인레스-스틸 튜브를 통하여 청정 공기가 반응기 내로 유입되고 반응기 내부 공기 시료가 채취되도록 하였다.

## 2.3. UV 강도 및 습도에 따른 VOC 분해능 평가 실험

UV 강도에 따른 VOC 분해능 실험을 수행하기 전에 UV 램프와  $TiO_2$ 로 코팅된 타일간의 거리에 따른 UV 강도 변화에 대한 실험이 먼저 수행되었다. Table 1에 나타난 바와 같이 거리와 UV 조사각도에 따라 UV 강도는 다르게 나타났으며, 이 결과에 근거하여 상대적으로 높고 낮은 두 개의 UV 강도를 선정하여 VOC 분해능 실험이 수행되었다.

이렇게 선정된 두 개의 UV강도(높은 UV 강도: 최대 3.7  $mW/cm^2$  및 최소 1.1  $mW/cm^2$ , 낮은 UV 강도: 최대 1.4  $mW/cm^2$  및 최소 0.9  $mW/cm^2$ )를 이용하여 VOC 분해능이 평가되었다. 높은 UV강도 조건은 코팅 타일과 UV램프 사이의 수직 거리 5cm에서 조절되었으며 낮은 UV강도 조건은 코팅 타일과 UV램프 사이의 수직 거리 10cm에서 조절되었다. 또한, 습도에 따른 VOC 분해능 평가를 위해서, 한정된 연구범위에 기인하여, 높은 UV 강도 조건에서 30~35%(다소 건조한 실내공기습도) 및 45~50%(안락한 실내 공기습도)의 두 상대습도 범위만이 이용되었다. 한편, 상대적으로 낮은 UV 강도에서는 상대 습도 함량이 45~50%의 하나의 습도범위 조건에서 VOC 분해능이 조사되었다. BEX 유입 농도는 일반적으로 도로변 또는 흡연실 실내공기에서 측정되는 가능농도 중 상한 수준인 10 ppm에<sup>10)</sup> 고정되었다. 시료 채취 시마다 습도와 온도를 기록하였다. 본 실험에서 사용된 타일의 코팅재질은 포항산업과학연구원에서 제조한 ST-K03이다(Table 2).

## 2.4. 코팅 재질, 습도 및 오염물질 농도에 따른 VOC 분해능 평가실험

타일에 코팅 된 재질에 따른 VOC 분해능 평가를 위해서 두 종류의 다른 재질로(P&T-Re 및 #5(5:10)

Table 1. UV intensity ( $mW/cm^2$ ) according to distance and irradiation angle

Distance(cm)	Irradiation angle			
	30°	45°	60°	90°
5	0.2	1.1	2.3	3.7
5.5	0.2	1.0	2.0	3.4
10	0.1	0.5	0.9	1.4
15	0.1	0.3	0.6	0.9
20	0.0	0.2	0.4	0.7

Table 2. Characteristics of two coating materials

Coating Material	Solid content (wt %)	Binder content (wt %)	TiO <sub>2</sub> content (wt %)	Solvent content	pH	Dry Condition
ST-K03	10/11.7	5.0	5.0	Alcohol(35%)/ water(65%)	1.5	Room temp-24hr or 150°C-30 min
P&T-Re	1.5	0.7	0.8	Alcohol(50%)/ water(50%)	3.5	500°C-15 min

(Table 2) 코팅된 타일을 이용한 실험이 추가적으로 수행되었다. P&T-Re 재질로 코팅된 타일을 이용하여 습도에 따른 VOC 분해능을 평가하였다. 이 평가를 위해서 높은 UV 강도 조건이 이용되었으며 15~20% 및 45~50%의 두 상대습도 범위가 조사되었고 오염물질 농도에 따른 VOC 분해능 평가를 위해서 유입농도 1 및 10 ppm이 조사되었다. 습도 조건에 따른 실험에서 낮은 습도 조건에서는 1회 코팅된 타일을, 높은 습도 조건에서는 1회, 3회 및 5회 코팅된 타일 모두가 이용되었다. 본 실험은 높은 UV 강도(최대 3.7 mW/cm<sup>2</sup> 및 최소 1.1 mW/cm<sup>2</sup>)에서 수행되었다. 한편, 다른 코팅재질인 #5(5:10)으로 코팅된 타일을 이용하여 유입농도 1 및 10 ppm 조건에서 VOC 분해능 평가 실험이 수행되었다. 유입농도를 조절하기 위해서, 반응장치 부피 대비로 계산된 조사오염물질의 주입량을 열선이 감긴 시료주입부를 통하여 반응장치로 주입하였고, 주입된 오염물질은 반응기 내부에 설치된 두 개의 작은 소형 팬(fan)에 의해 내부 공기와 혼합되었다.

### 2.5. 시료 채취 및 분석

Tenax-TA가 충진된 1/4인치 외경-7인치 길이의 트랩을 반응기 유출구에 연결하고 대기 시료 펌프(Ambient air sampler; Supelco)를 이용하여 VOC 시료를 채취하였다. 높은 시료 채취량은 반응기 내의 압력감소를 과다하게 유발할 수 있으므로, 시료 채취로 인해 야기될 수 있는 반응기 내의 압력 감소를 최소화하기 위하여 하나의 시료는 Tenax를 사용할 때 요구되는 최소 유량인 10 mL/min의 유량<sup>21)</sup>으로 1분 동안 채취되었다. Tenax 트랩을 취급시, 손의 지문 또는 화장품으로부터 트랩이 오염되는 것을 방지하기 위하여 항상 깨끗한 면장갑을 착용하였다. 보관시 트랩이 외부 공기에 노출되어 오염되는 것을 방지하기 위하여 분석 시까지 테프론 컨테이너에 넣어 보관되었다.

채취된 공기 시료는 미국의 환경보호국(United States Environmental Protection Agency, USEPA)의 방법 TO-1을 응용하여 대상 오염 물질에 대하

여 분석되었다. 모세관 컬럼(capillary column: J& W Scientific, 30m × 0.45mm inside diameter)과 불꽃 이온화 검출기(Flame Ionization Detector, FID)가 장착된 기체 크로마토그래피(Gas Chromatography, GC: Vatian 3400CX)와 열탈착 장치(Thermal Desorbing System, TDS: Tekmar Model Aerotrap 6000)가 분석 장치로 이용되었다.

GC의 온도 프로그래밍(Temperature programming)을 위해서 항온조(oven)의 초기 온도는 35°C에서 4 분간, 온도 상승 속도는 4°C/min, 그리고 최종 온도는 200°C로 조절되었다. TDS에서 열찰착을 위해 온도는 225°C로 설정되고 열탈착시간은 10분이 소요되었다. TDS에서 운반 기체(carrier gas, N<sub>2</sub>)의 유량은 10 mL/min, Transfer line의 온도는 200°C, 장치 내의 Valve 온도는 200°C로 고정되었다.

## 3. 연구 결과 및 고찰

### 3.1. 농도 평형상태와 타일의 흡착 평가

반응장치 내에서 UV 램프를 TiO<sub>2</sub> 코팅 유리에 조사시키면서 zero-grade 공기를 시험장치로 통과시켜 시험장치를 12시간 정도 정화시킨 후 시험장치로부터 시료 채취 및 분석한 바탕시험 결과에서 반응 장치가 BTEX로 오염이 되지 않았다는 것을 확인한 후에 반응장치 내의 오염물질 농도의 평형상태와 타일의 흡착 여부가 평가되었다. Table 3에 나타난 바와 같이, 오염물질 주입 후 8시간까지는 농도가 거의 일정하게 유지되었으므로 이 시간 동안에는 농도 평형이 이루어지는 것으로 평가된다. 이 결과를 재확인하기 위하여 주입농도 1 및 10 ppm에서 8시간 동안 정해진 시료 채취시간대에 시료를 채취하여 분석한 결과, Tables 4와 5에 나타난 바와 같이 오염물질 주입 후 8시간 까지는 농도가 거의 일정하게 유지된다는 것을 재확인할 수 있었다. 또한, 오염물질 주입 전(시료 채취시간 '영')과 평형 농도를 비교할 때 큰 차이가 없는 것으로 나타났고, 이러한 결과는 타일의 BTEX 흡착이 크지 않음을 나타낸다. 따라서, VOC 분해능 실험을 위해서

### 건축자재의 산화티타늄 코팅을 통한 휘발성 유기화합물 분해

Table 3. VOC concentrations(ppm) according to sampling time(up to 25 hr) with the input concentration of 10 ppm for each compound

Sampling time(hr)	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	m,p-Xylene	o-Xylene
0	10	10	10	10	10
0.5	9.6	9.5	9.2	9.9	9.9
2	9.5	8.9	10	9.8	9.4
5	9.0	9.7	9.2	9.5	10
8	9.7	9.5	9.7	9.4	9.3
20.5	9.1	8.2	7.6	7.4	7.4
25	7.4	6.2	4.9	4.6	4.7

Table 4. VOC concentrations(ppm) according to sampling time(up to 8 hr) with the input concentration of 1 ppm for each compound

Sampling time(hr)	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	m,p-Xylene	o-xylene
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.5	1.04	0.94	1.00	0.93	1.00
2	1.01	0.91	1.04	0.99	1.02
5	0.99	1.00	0.97	0.94	0.99
8	0.96	1.04	0.99	1.05	1.00

Table 5. VOC concentrations(ppm) according to sampling time(up to 8 hr) with the input concentration of 10 ppm for each compound

Sampling time(hr)	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	m,p-Xylene	o-xylene
0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
0.5	10.2	10.2	10.3	10.2	10.2
2	10.2	10.4	10.7	10.7	10.7
5	9.9	10.0	9.7	9.7	9.9
8	9.7	9.5	9.3	9.3	9.3

시료 채취는 오염물질 주입 후 8시간 이내에 수행되어야 하며, 타일의 흡착 영향은 무시해도 적합한 것으로 평가된다. 8시간 후에 평형상태가 없어지는 이유에 대해서는 시간에 따른 반응장치의 leaking 증대 때문으로 추정된다.

#### 3.2. UV 강도 및 습도에 따른 VOC 분해능

ST-K03 재질로 코팅된 타일을 이용한 UV 강도와 습도에 대한 VOC 분해능 시험 결과를 Table 6에 나타내었다. 본 실험에서 사용한 UV 강도보다 훨씬 큰 조건에서 순수 UV 램프만(광촉매 코팅 없이)을 사용하여 수행된 선행연구에서도 VOC 분해율은 크지 않기 때문에<sup>19)</sup> 본 연구에서는 이에 대한 실험은 수행되지 않았다. 본 연구에서는 높은 UV 강도와 낮은 UV 강도 모두에서 UV 램프를 켜고 30분 시점에서 BTEX 각 물질에 대한 분해율이 120분 시점에서의 분해율 보다 높게 나타났다. 이는 초기 30분에서는 UV 조사에 의한 광촉매 분해와 더불어 코팅 타일 표면으로의 오염물질의 흡착능 또한 UV 조사에 의해 증대되어 반응기 내의 가스 중

BTEX 함량이 감소됨으로 인해 나타나는 결과인 것으로 추정된다. 높은 UV 강도 조건은 두 습도 범위 조건에서 수행되었다. 시료 채취시간 대부분에 있어서 낮은 상태 습도 조건에 비하여 높은 상태 습도 조건에서 높은 VOC 분해가 일어나는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Obee et al.(1995)<sup>11)</sup>의 연구결과와 일치한다. 대부분의 경우 UV 조사 120분 이후에는 광촉매 분해율이 대략 정상 상태에 도달하였으므로 120분과 이후 시점에서의 분해율을 평균하여 BTEX 분해율을 결정하여 Fig. 2에 나타내었다. 높은 습도에서는 벤젠 18%, 톨루엔 30%, 에틸벤젠 59%, m,p-자일렌 66%, o-자일렌 66%의 분해율을 얻을 수 있었으며 벤젠의 경우 다른 오염물질에 비해 분해율이 낮았다. 낮은 상태 습도 조건에서는 벤젠 16%, 톨루엔 32%, 에틸벤젠 49%, m,p-자일렌 58%, o-자일렌 56%의 분해율을 얻었는데 이는 높은 상태 습도 조건의 분해율보다 낮은 값이다. 특히, UV 램프를 켜고 30분 시점에서의 분해율이 다른 시점에서의 분해율보다 낮고 벤젠의 경우 분해 전

Table 6. VOC removal efficiency (%) according to UV intensity and relative humidity with sampling time with the inlet concentration of 10 ppm for each compound

UV intensity (mW/cm <sup>2</sup> )	Relative humidity (%)	Sampling time (hr)	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	m,p-Xylene	o-Xylene
High	High	0.5	26	38	66	72	72
		2	15	22	51	58	57
		5	21	38	67	75	74
	Low	0.5	0	3	14	20	22
		2	10	18	30	37	36
		5	18	33	53	62	60
		8	19	45	66	75	73
Low	High	0.5	31	44	62	67	67
		2	1	16	19	18	21
		5	9	28	37	38	40
		8	8	27	36	38	38

\* "High" in UV intensity indicates high UV intensity (Max. 3.7 mW/cm<sup>2</sup>, Min. 1.1 mW/cm<sup>2</sup>); "Low" in UV intensity indicates low UV intensity (Max. 1.4 mW/cm<sup>2</sup>, Min. 0.9 mW/cm<sup>2</sup>); "High" in relative humidity indicates high relative humidity(45~50 %); "Low" in relative humidity indicates low relative humidity(30~35 %); Input concentration of each compound was 10 ppm.

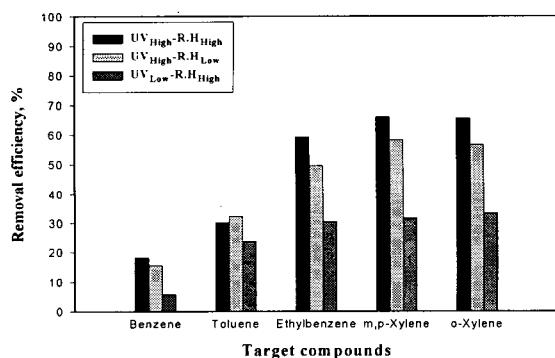


Fig. 2. VOC removal efficiencies according to UV intensity and relative intensity.

혀 이루어지지 않았다. 이러한 이유는 2가지로 추론된다. 첫째, 낮은 습도에서는 수분 감소로 인해 광촉매 분해능이 감소되었기 때문일 수 있다<sup>11)</sup>. 둘째, TiO<sub>2</sub> 촉매 표면으로의 오염 물질과 물 분자 사이의 경쟁적 흡착이 높은 상대 습도 조건에서보다 작기 때문에<sup>11)</sup>, 촉매 표면으로의 흡착 평형이 30분 이내에 모두 완결되어 정상상태로 변이하는 반응속도가 빨라져 앞의 높은 상대 습도 조건에서와 같은 시간에 따른 분해율 양상과 다른 결과가 나타났을 가능성이 있는 것으로 추론된다.

Table 6에 나타난 바와 같이 유사한 습도 범위(높은 습도 조건)에서 수행된 실험 결과를 비교할 때 낮은 UV 강도 조건에서 얻은 VOC 분해율은 전반적으로 높은 UV 강도 조건에서 얻은 VOC 분해율 보다 다소 낮다. 이러한 결과는 Jacoby et al.(1996)<sup>13)</sup>

의 연구결과와 일치한다. 높은 UV 강도의 상대 습도 조건의 결과와 같이 낮은 UV 강도 조건에서도 UV 램프를 켜고 30분에서의 분해율이 다른 시점에서의 분해율보다 높게 나타났으며, 벤젠 6%, 톨루엔 26%, 에틸벤젠 30%, m,p-자일렌 31%, o-자일렌 33%의 분해율을 나타내었으며 역시 벤젠의 분해율이 가장 낮았다.

### 3.3. 코팅 재질과 습도 및 유입농도에 따른 VOC 분해능 평가

타일에 코팅 된 재질에 따른 VOC 분해능 평가를 위해서 P & T-Re(Table 2)와 #5(5:10)(Titanium (IV) isoproxide와 Tetraethyl orthosilicate가 5:10의 비로 합성)의 다른 두 종류로 코팅된 타일을 이용한 실험이 추가적으로 수행되었다. P & T-Re로 코팅된 타일을 이용한 실험에서 습도 조건 (15~20% 및 45~55%), 오염물질의 유입농도 (1 및 10 ppm) 그리고 코팅횟수에 상관없이 VOC 분해능은 거의 없는 것으로 나타났다. 다만, 유입농도 10 ppm을 이용한 실험에서 3회 코팅한 타일에 대하여 경과시간 5시간과 8시간 후에, 오염물질에 따라 5%에서 9%까지 광분해되는 것으로 나타났으나 5회 코팅한 실험에서는 광분해능이 없는 것으로 나타났기 때문에 3회 코팅 타일을 이용한 결과는 실험오차에 기인하는 것으로 사료된다.

한편, #5(5:10) 재질로 코팅된 타일을 이용한 실험에서는 유입농도 1 ppm에 대한 실험에서는 경과시간과 코팅 횟수에 관계없이 VOC 분해능이 거의 없는 것으로 나타났으며, 유입농도 10 ppm에 대한 실

험에서는 5시간과 8시간이 경과하였을 때 오염물질의 종류에 따라 5%에서 41% 까지 분해되는 것으로 나타났다. 유입농도 10 ppm에 대한 실험에서 UV 조사 5시간 이후 시점에서의 분해능을 평균하여 BTEX 분해능을 결정한 값은 다음과 같다: (1) 1회 코팅: 벤젠 14%, 톨루엔 26%, 에틸벤젠 28%, m,p-자일렌 32%, o-자일렌 30%; (2) 3회 코팅: 벤젠 6%, 톨루엔 11%, 에틸벤젠 14%, m,p-자일렌 19%, o-자일렌 16%. 여기서 코팅 횟수가 3일 때 보다 1일 때가 오히려 VOC 분해능이 다소 높게 나타났으나, 이러한 차이는 실험오차 범위 내에 있으므로 코팅횟수에 따른 VOC 분해능 차이는 명확하지 않는 것으로 판단된다.

따라서, 본 실험에서 이용된 세 종류의 코팅 재질 중 ST-K03가 VOC 분해능이 가장 높게 나타났고 #5(5:10)이 다소 낮게 나타났으며 P&T-Re은 VOC 분해능이 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, 코팅 재질 ST-K03인 경우 UV 조사시간 0.5시간 이후에서도 VOC를 분해시키는 것으로 나타났으나 코팅 재질 #5(5:10)의 경우에는 UC 조사시간이 5시간 지난 후에 VOC를 분해시키는 것으로 나타났다. 한편, 본 실험 조건에서 오염물질의 유입농도가 1 ppm 일 때 보다 10 ppm일 때가 VOC 광촉매 분해능이 높았다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 제작 반응장치를 고안·제작하고 이를 이용하여 광촉매로 코팅된 건축자재인 타일의 VOC에 대한 광촉매 분해능을 연구·평가하기 위해서 광촉매 반응시 주요 인자인 UV강도, 코팅 재질, 습도 및 오염농도 인자에 대한 VOC 광촉매 분해능을 조사하였다. 광촉매 분해능 실험에 앞서 반응장치의 안정성을 확인하기 위해서 수행된 반응장치 내의 농도 평형상태와 타일 자체의 흡착 평가 실험에 따르면 VOC 분해능 실험을 위해서 시료 채취는 오염물질 주입 후 8시간 이내에 수행되어야 하며, 타일의 흡착 영향은 무시해도 적합한 것으로 평가되었다. VOC의 광촉매 분해능에 대한 UV 강도와 습도 영향을 확인하는 실험에서, VOC의 광촉매 분해능은 UV 강도가 강하고 상대 습도는 낮을 때 보다는 적정 실내공기 습도 범위에서 높게 나타났다. VOC의 광촉매 분해능에 대한 오염물질의 유입농도 영향을 확인하는 실험에서, 본 실험 조건에서 VOC의 광촉매 분해능은 높은 유입농도에서 다소 높은 것으로 나타났다. 한편, 코팅 재질 시험에서는 세 종류의 코팅 재질 중 ST-K03가 VOC 분해능이 가장 높게 나타났고 #5(5:10)이 다소 낮게 나타났으며 P&T-Re은 VOC 분해능이 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, 코팅 재질 ST-K03인 경우 UV 조사시간

0.5시간 이후에서도 VOC를 분해시키는 것으로 나타났으나 코팅 재질 #5(5:10)의 경우에는 UC 조사시간이 5시간 지난 후에 VOC를 분해시키는 것으로 나타났다. 나아가, 코팅 횟수에 따른 VOC 분해능 차이는 크지 않는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 2004년 한국건설교통기술평가원의 “친환경 건축 자재 개발”과제의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Unzelman, G. H., 1990, Reformulated gasolines will challenge product-quality maintenance, Oil and Gas J., 88, 43-48.
- 2) 대한석유협회, 1994, 석유년보, 명성문화사, 서울 (1994).
- 3) Chan, C. C., S. H. Lin and G. R. Her, 1993, Student's exposure to volatile organic compounds while commuting by motorcycle and bus in Taipei city, J. Air Waste Manage. Assoc., 43, 1231-1238.
- 4) King, R. W., 1992, Automotive gasoline: Its composition and manufacture-past, present, and future, J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol., 2, 9-22.
- 5) Lioy, P. J., 1992, General summary and recommendations of the workshop on general population exposures to gasoline, J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol., 2, 5-8.
- 6) Jo, W. K. and K. B. Song, 2001, Exposure to volatile organic compounds for individuals with occupations associated with potential exposure to motor vehicle exhaust and/or gasoline vapor emissions, Sci. Tot. Environ., 269, 25-37.
- 7) Chan, C. Y., L. Y. Chan, X. M. Wang, Y. M. Liu, S. C. Lee, S. C. Zou, G. Y. Sheng and J. M. Fu, 2002, Volatile organic compounds in roadside microenvironments of metropolitan Hong Kong, Atmos. Environ., 36, 2039-2047.
- 8) SCAQMD, 1989, South Coast Air Quality Management District, in-vehicle characterization study in the south coast air basin, Final Report.
- 9) Tancrede, M., R. Wilson, L. Zeise and E. A. C. Crouch, 1987, The carcinogenic risk of some organic vapors indoors: a theoretical survey, Atmos. Environ., 21, 2187.

- 10) U. S. EPA, 1990, "Cancer risk from outdoor exposure to air toxics.", EPA-450/1-90-004a.
- 11) Obee, T. N. and R. T. Brown, 1995, TiO<sub>2</sub> photocatalysis for indoor air applications: effects of humidity and trace contaminant levels on the oxidation rates of formaldehyde, toluene, and 1,3-butadiene, Environ. Sci. Technol., 29, 1223-1231.
- 12) Anderson, M. A., W. A. Zeltner, X. Fu, D. T. Tompkins and D. T. Reindl, 1996, Photocatalytic degradation of formaldehyde and other VOC in indoor air, Center for Indoor Air Research Currents, December, 1, 4.
- 13) Jacoby, W. A., D. M. Blake, J. A. Fennell, J. E. Boulter, L. M. Vargo, M. C. George and S. K. Dolberg, 1996, Heterogeneous photocatalysis for control of volatile organic compounds in indoor air, J. Air & Waste Manage. Assoc., 46, 891-898.
- 14) Wallace, L. A., 1987, The TEAM study: Summary and analysis: Vol. I. U.S. EPA, EPA 600/6-87/002a, NTIS PB 88-100060, Washington, D.C.
- 15) Wallace, L., W. Nelson, R. Ziegenfus, E. Pellizzari, L. Michael, R. Whitmore, H. Zelon, T. Hartwell and R. Perritt, 1991, The Los Angeles TEAM study: personal exposures, indoor-outdoor air concentrations, and breath concentrations of 25 volatile organic compounds, J. Expos. Anal. Environ. Epidemiol., 1, 157-192.
- 16) Ilgen, E., N. Karfich, K. Levsen, J. Angerer, P. Schneider, J. Heinrich, H. Wichmann, L. Dunemann and J. Begerow, 2001, Aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment: Part I. Indoor versus outdoor sources, the influence of traffic, Atmos. Environ., 35, 1235-1252.
- 17) Yano, H. and M. Shoda, 1999, Selection and substantiation of an organic solvent removal apparatus at a print shop by comparative experiments using the activated carbon adsorption and catalytic oxidation methods, J. Air & Waste Manage. Assoc., 49, 324-331.
- 18) Peral, J. and D. F. Ollis, 1992, Heterogeneous photocatalytic oxidation of gas-phase organics for air purification, acetone, 1-butanol, butyraldehyde, formaldehyde and m-xylene oxidation, J. Catal., 136, 554-565.
- 19) Obee, T. N. and R. T. Brown, 1995, TiO<sub>2</sub> photocatalysis for indoor air applications: effects of humidity and trace contaminant levels on the oxidation rates of formaldehyde, toluene, and 1,3-butadiene, Environ. Sci. Technol., 29, 1223-1231.
- 20) 다케우찌 고우지, 무라사와 사다오, 이부스키 다가시, 1998, 김영도 옮김, 광촉매의 세계: 환경정화의 결정적인 수단, 대영사.
- 21) Winberry, W. T., Jr., N. T. Murphy and R. M. Riggan, 1988, Compendium of methods for the determination of toxic organic compounds in ambient air, EPA/600/4-89/017, U. S. EPA, Research Triangle Park.