

## 초음파 발생 미스트를 이용한 $TiO_2$ 광촉매 시스템에서의 가스상 톨루엔 제거

### Removal of Gaseous Toluene Using a $TiO_2$ Photocatalytic System with Mist Generated by Ultrasonic Atomization

최민석 · 한세현 · 장성찬 · 정용원\*

인하대학교 환경공학과

(2009년 1월 19일 접수, 2009년 6월 17일 채택)

Min-Suk Choi, Sehyun Han, Sung-Chan Jang and Yong-Won Jung\*

Department of Environmental Engineering, Inha University

(Received 19 January 2009, accepted 17 June 2009)

#### Abstract

Feasibility study of using  $TiO_2$  mist generated by ultrasonic atomization for photocatalytic degradation of gaseous toluene was attempted in this study. For this, the photocatalytic reactor consisting of mist generator and photo-reactor was designed. Most of experimental results showed that steady state reached about 30 minutes after the start of experiments. The effects of  $TiO_2$  concentration, toluene concentration, and UV wavelength on toluene removal ratio were investigated. It was found that the highest removal efficiency was obtained when  $TiO_2$  concentration was 0.6 g/L in slurry. At this condition, it was found that the toluene removal efficiency increased as toluene concentration in feed decreased. In order to investigate the effect of UV wavelength, experiments were carried out using three UV lamps with different UV wavelength. The results showed that the highest removal efficiency was achieved when the lamp with the shortest wavelength were employed.

**Key words** : Ultrasonic mist, Photocatalytic oxidation,  $TiO_2$ , VOCs, Toluene

#### 1. 서 론

휘발성 유기화합물 (VOCs)은 도장시설, 인쇄시설, 석유화학공장 등의 사업장뿐만 아니라 실내공간 등에서도 발생하며 질소산화물과 반응하여 광화학 스모그의 원인이 되거나, 그 자체만으로도 악취 및 발

암 유발 물질로서 지구 및 실내환경, 인체 등에 악영향을 초래하고 있다 (Wang *et al.*, 2007; 한국실내공기·산소연구회, 2005; 환경부, 2001). 이러한 기체상 VOCs 처리를 위한 흡착, 흡수, 응축, 열소각 및 촉매소각 등의 기존의 방법들은 고비용, 짧은 수명, 저효율, 2차 오염 등 각기 고유의 단점들이 있는 것으로 평가되고 있다 (Jeong *et al.*, 2005; 손현석 등, 2003; Wang and Bay, 2000). 이에 보다 친환경적이며, 비용효과가 있는 VOCs 처리기술들이 다양한 방식으로

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-860-7508, E-mail : jungyw@inha.ac.kr

폭넓게 연구되어 왔으며, 그 중에서 광촉매 산화기술이 대표적으로 주목받아 왔다(이승범 등, 2005; 최소영 등, 2005; Tompkins, 2002).

고도산화법(Advanced Oxidation Process)의 한 종류인 광촉매 산화기술은 실온과 대기압 하에서 적용할 수 있으며(Jeong *et al.*, 2004), band gap energy 이상의 광 에너지로 산화력이 큰 OH radical을 생성해 VOCs를 H<sub>2</sub>O와 CO<sub>2</sub>와 같은 무기물로 분해한다는 장점이 있다(Zhang and Liu, 2004). 광촉매로는 가격이 저렴하고 화학적으로 안정한 TiO<sub>2</sub>가 많이 이용되는데(Fujishima and Zhang, 2006), 고정화를 위해 주로 박막 형태로 제조해 사용된다(박중숙 등, 2002). 그리고 TiO<sub>2</sub>의 광원으로는 TiO<sub>2</sub>의 band gap energy(3.2 eV) 이상의 에너지를 지닌 자외선(UV)이 사용된다. 그러나 광촉매를 이용하여 VOCs를 처리하는 방식은 다른 공정에 비해 처리용량이 작고 고농도 처리에 적합하지 않다는 단점이 있어(김성욱, 2002), 국내의 경우에 이를 보완하기 위한 복합공정 등이 검토된 바 있다(이 찬 등, 2005; 최소영 등, 2005).

또한 UV/TiO<sub>2</sub> 광촉매 분해반응은 적절한 수분조절이 필요하고, 상당한 양의 수용성 중간물질들이 생성되는 등의 문제점이 있는 것으로 알려져 있다(Sekiguchi *et al.*, 2008; Jeong *et al.*, 2005). 최근 Seki-

guchi *et al.* (2008)은 이러한 문제를 개선하기 위해 초음파로 발생시킨 TiO<sub>2</sub> 미스트를 이용하여 저농도 톨루엔의 제거특성 등을 살펴본 바 있다. 그 원리는 안정된 상대습도 조건에서 자외선을 조사하여 TiO<sub>2</sub> 미스트로 오염물을 분해하고, 수용성 중간생성물을 미스트 내에 포획하여 광분해하는 것이다.

본 연구에서는 기존의 광촉매 반응기의 단점을 개선하는 것으로 제안된 초음파 발생기를 이용하여 TiO<sub>2</sub>를 고정하지 않고 미스트로 분사하는 방식의 광촉매 반응기를 설계하여 VOCs의 대표물질인 톨루엔 가스의 제거특성을 살펴보았다. 그리고 광촉매 분해반응에 대해 오염물 농도, 반응시간, 광촉매 농도, 광원 등이 미치는 영향들을 검토하였다. 참고로 본 연구에서는 Sekiguchi *et al.* (2008)의 연구결과와 비교하기 위해 상대적으로 고농도의 톨루엔가스를 적용하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 초음파 발생 미스트를 이용한 광촉매 반응 시스템

본 연구의 초음파 발생 미스트(mist generated by

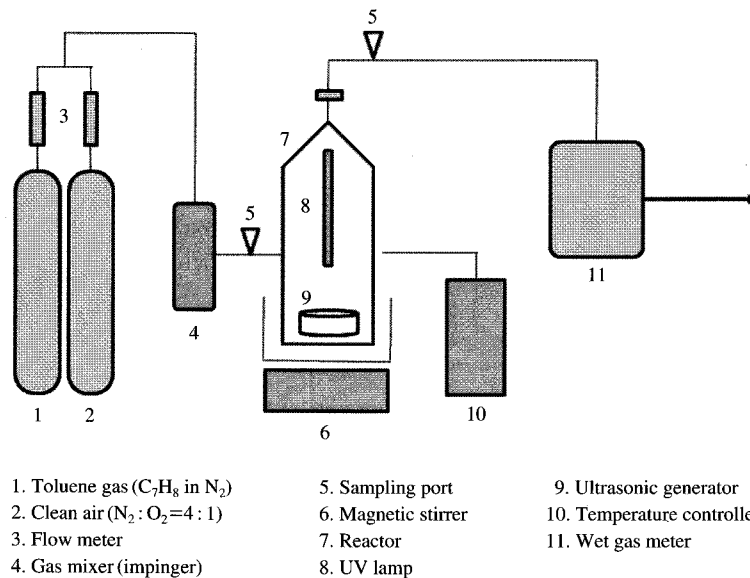


Fig. 1. Schematic of TiO<sub>2</sub> photocatalytic system with mist generated by ultrasonic atomization.

ultrasonic atomization)를 이용한 TiO<sub>2</sub> 광촉매 시스템의 개략도는 그림 1과 같다. 실험 장치는 크게 톨루엔 발생부, 광촉매 반응부, GC 분석부로 구성하였다.

톨루엔 발생부에는 약 400 ppm의 고농도와 약 20 ppm의 저농도의 톨루엔(C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> in N<sub>2</sub>) 가스와 공기(N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=4:1)를 1:1로 혼합하여 톨루엔 유입농도를 약 200 ppm과 약 10 ppm으로 일정하게 유지하였다.

광촉매 반응기는 유리 재질로 높이 43 cm, 직경 9.5 cm인 원통형 모양으로 내부 용적이 약 2L가 되도록 제작하였으며, 크게 초음파 미스트 발생부와 UV 광 반응부로 나눌 수 있다. 초음파 발생 광촉매 미스트(이하 초음파 미스트)는 일정한 농도로 제조한 TiO<sub>2</sub> 용액을 반응기 하단에 주입한 후, 1.72 MHz 인 초음파 발생기를 이용하여 발생시켰다. TiO<sub>2</sub> 용액은 물에 TiO<sub>2</sub> 분말을 용해시켜 제조하였으며, 반응기 내에서 덩어리지는 것을 방지하기 위해 자기 교반기(magnetic stirrer)를 이용하여 일정한 농도와 혼합상태를 유지하였다. 실험에는 비표면적이 약 50 cm<sup>2</sup>/g 이고, 평균 입경이 약 21 nm인 Degussa P25 TiO<sub>2</sub> 광촉매 분말을 이용하였는데, 결정구조는 Rigaku사 Miniflex XRD (X-Ray Diffractometer)로 분석한 결과, 아나타제 (anatase)와 루타일 (rutile)이 3:1인 것으로 확인하였다.

광촉매 반응기 상단으로 분무된 TiO<sub>2</sub> 입자를 포함한 초음파 미스트는 유입가스와 함께 상단의 UV 광 반응부로 들어가게 된다. 광 반응부 내부는 유체의 원활한 흐름을 위해 원추형으로 제작하였으며, 광의 고른 조사를 위해 UV 램프를 광 반응부 중앙에 위치시키고 외부표면은 알루미늄 호일로 경면(mirror) 처리하였다. UV lamp는 광촉매 미스트와 직접적인 접촉을 방지하기 위해 pyrex 재질의 housing에 넣어 사용하였다. UV 광원으로는 파장에 따른 톨루엔 제거율을 비교하기 위해 4 W의 UV-A (peak 352 nm, Sankyo F4T5.BLB), UV-B (peak 306 nm, Sankyo G4T5E), UV-C (peak 254 nm, Sankyo G4T5) 램프를 사용하였다. 한편 초음파 진동 및 광반응에 의한 온도상승의 영향을 배제하기 위해 광 반응기 외부에 온도조절기(Eyela, Tokyo Rikakikal Co., Ltd.)를 설치하여 상온(약 25°C)을 유지하였다.

톨루엔가스의 시료채취를 위해 광 반응기 전·후에 시료채취구를 설치하였으며, GC-FID (Gas Chromatography-Flame Ionization Detector, Agilent tech-

nologies 6890N)를 이용하여 정량 분석하였다.

## 2. 2 초음파 발생 광촉매 미스트의 SEM/EDX 분석

초음파 미스트 내의 TiO<sub>2</sub> 입자를 확인하기 위해 TiO<sub>2</sub> 용액의 농도를 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 g/L로 변화시키면서 초음파 발생기에 의해 분무된 미스트를 포집하여 표면분석 실험을 수행하였다. TiO<sub>2</sub> 입자를 포함한 초음파 미스트는 반응기 하단의 물방울 충돌판 (impactor) 위에 알루미늄 호일을 놓고, 중력침강에 의해 포집하였다 (Sekiguchi *et al.*, 2008). 그리고 105°C 에서 약 30분간 건조시킨 후, Oxford사 ultra-thin window EDX (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy) 검출기를 장착한 Hitachi사 3500N SEM (Scanning Electron Microscopy)을 이용하여 분석하였다.

## 2. 3 초음파 발생 광촉매 미스트에 의한 톨루엔 제거를 측정

본 연구의 초음파 미스트를 이용한 TiO<sub>2</sub> 광촉매 시스템의 톨루엔 제거실험은 다음과 같이 진행하였다. 먼저 초음파 발생기와 UV 램프를 끈 상태에서 반응기 용적의 3배인 약 6 L의 톨루엔 가스를 1 L/min의 유량으로 주입하고 광 반응기 전·후의 톨루엔 농도가 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 이후 반응기를 가동하여 약 10분 간격으로 광 반응기 전·후의 시료채취구에서 Gas Tight Syringe (Hamilton Co.)를 이용하여 시료를 각각 3회씩 채취한 후, GC-FID로 톨루엔 농도를 측정하였으며, 평균값을 이용해 제거율을 계산하였다.

본 연구에서는 톨루엔 제거율에 미치는 영향 인자를 파악하기 위해 반응시간에 따른 톨루엔 제거 특성을 살펴보았다. 또한 TiO<sub>2</sub> 용액의 농도 (0.0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0 g/L), UV 광원의 종류 (UV-A, UV-B, UV-C), 톨루엔 가스의 유입농도 (10 ppm, 200 ppm)를 변화시켜가며 실험을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3. 1 초음파 발생 광촉매 미스트의 SEM/EDX 분석

그림 2는 광촉매 반응기 내의 TiO<sub>2</sub> 용액의 농도를

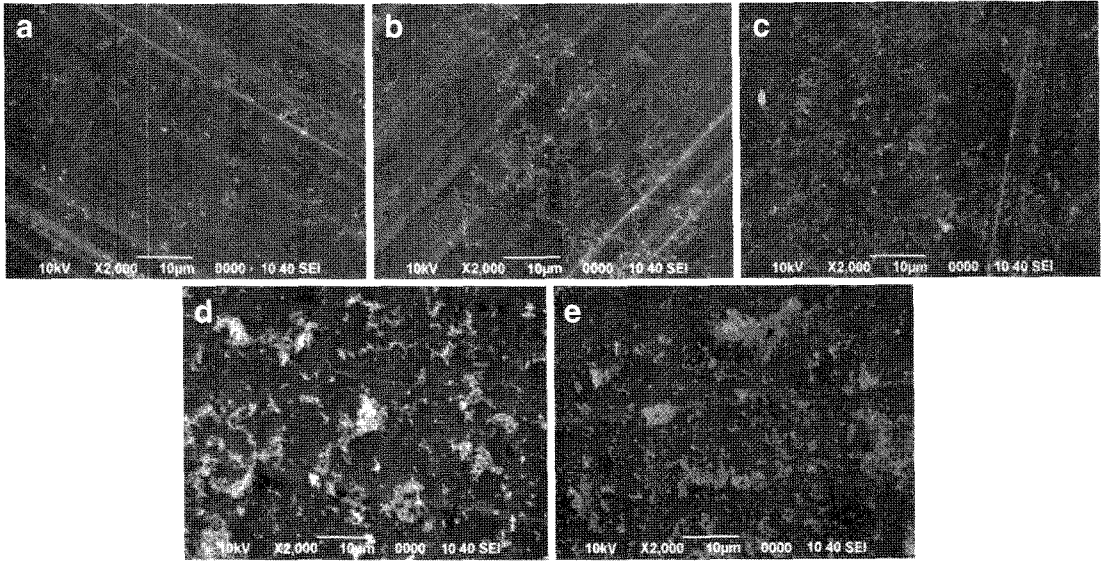


Fig. 2. SEM images of collected and dried ultrasonic mists generated from slurries containing (a) 0.2 g/L, (b) 0.4 g/L, (c) 0.6 g/L, (d) 0.8 g/L, and (e) 1.0 g/L of TiO<sub>2</sub>.

변화시켜가면서 초음파에 의해 발생한 미스트를 포집하여 건조한 후, 2,000배로 확대하여 촬영한 SEM 이미지들이다. SEM 이미지를 통해 초음파 미스트 내의 TiO<sub>2</sub> 광촉매 입자의 형상(morphology)을 확인할 수 있었으며, EDX 무기물 분석을 통해 Ti와 O 원소로 이루어져 있음을 확인하였다. TiO<sub>2</sub> 용액의 농도가 0.0~0.6 g/L인 경우의 SEM 이미지들을 살펴보면, 초음파 미스트 내의 TiO<sub>2</sub> 입자들은 덴드라이트(dendrite)와 같은 모양으로 넓게 퍼져 있는 응집형태를 보이고 있다. 이는 TiO<sub>2</sub> 용액의 농도가 증가하면 미스트에 포함된 광촉매의 입자 수가 증가하여, 결국 광반응에 참여할 수 있는 광촉매의 표면적이 증가하는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 TiO<sub>2</sub> 용액이 상대적으로 0.8~1.0 g/L와 같이 고농도인 경우에는 TiO<sub>2</sub> 입자들이 포도송이와 같은 클러스터(cluster) 형태의 큰 응집체를 형성하는 것을 확인할 수 있었으며, 이와 같은 경우에는 오히려 광반응에 참여할 수 있는 광촉매의 표면적이 응집체의 내부에 많은 양의 TiO<sub>2</sub>가 존재하게 되므로 크게 감소하는 것으로 사료된다. 또한 Sekiguchi *et al.* (2008)에 의하면, TiO<sub>2</sub> 용액의 농도가 증가하는 경우에는 발생하는 미스트의 수 농도가 감소하는 경향을 보였으며, 해당 연구의 1.5 g/L

TiO<sub>2</sub> 농도에서는 초음파 미스트가 발생하지 않았다고 보고하였다. 즉, 반응기에 투입된 TiO<sub>2</sub> 용액이 일정 농도 이상인 경우에는 초음파 미스트 발생이 크게 감소하며, TiO<sub>2</sub> 입자의 응집형태로 인해 광촉매 반응에 참여할 수 있는 TiO<sub>2</sub> 입자의 표면적이 전체적으로 감소하는 것으로 사료된다.

### 3.2 초음파 광촉매 시스템에 의한 톨루엔 제거 특성

3.2.1 반응시간과 유입농도에 따른 톨루엔 제거율  
초음파 미스트를 이용한 광촉매 시스템의 반응시간과 유입농도에 따른 톨루엔 제거특성을 파악하기 위해 TiO<sub>2</sub> 용액의 농도를 0.6 g/L로 고정하고, 10분 간격으로 1시간 동안 톨루엔의 유입농도(C<sub>in</sub>)와 유출농도(C<sub>out</sub>)를 측정된 후 제거율을 계산하였다. 그림 3을 보면 톨루엔 제거율은 유입농도가 10 ppm과 200 ppm인 경우 모두에서 반응시작 후 점차 증가하다가 약 30분 이후에 안정화되는 경향을 보였다. 즉, 본 시스템의 광촉매 반응이 정상상태에 도달하는 것으로 판단된다. 한편, 단파장인 UV-C 광원 하에서 반응이 약 30분 경과하였을 때, 톨루엔 유입농도가 10

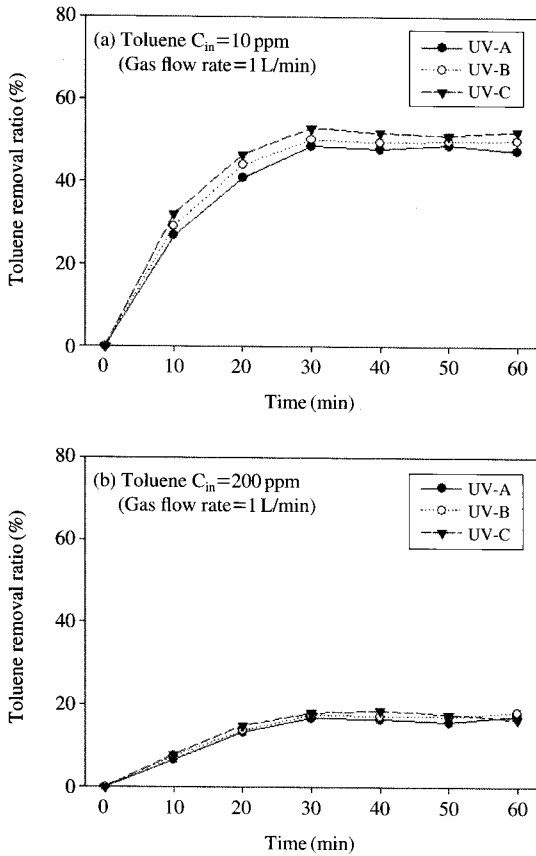


Fig. 3. Change in toluene removal ratio (%) with reaction time (TiO<sub>2</sub> concentration=0.6 g/L). (a) C<sub>in</sub>=10 ppm, (b) C<sub>in</sub>=200 ppm.

ppm과 200 ppm인 경우에 톨루엔 제거율은 각각 약 53.1%, 18.0%로 최대값을 나타내고 있다. 또한 유입 농도가 10 ppm인 실험과 유입농도가 200 ppm인 실험에서의 톨루엔 제거율을 비교하면 약 3배 정도의 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 본 실험의 조건에서는 톨루엔 유입가스가 상대적으로 저농도인 경우에 광촉매에 의한 톨루엔 제거율이 증가하는 것으로 나타나고 있다.

그림 4는 톨루엔 유입농도에 따른 톨루엔 제거율을 타 연구자의 연구결과(Sekiguchi *et al.*, 2008)와 비교하여 나타낸 것인데, 본 실험의 결과와 Sekiguchi *et al.*의 연구결과 모두에서 유입농도가 증가함에 따라 톨루엔 제거율이 크게 감소하는 경향을 보이고 있다. 본 연구와 Sekiguchi *et al.*의 실험조건들

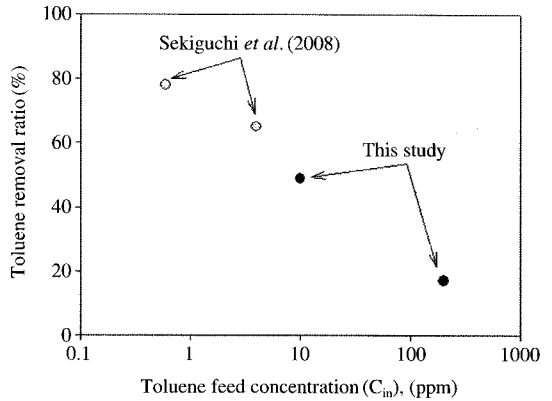


Fig. 4. Comparison of toluene removal ratios according to toluene gas feed concentration (C<sub>in</sub>).

Table 1. Comparison of experimental conditions of the previous study by Sekiguchi *et al.* (2008) and this study.

	Sekiguchi <i>et al.</i> (2008)	This study
Toluene feed concentration	0.6 ppm, 4.0 ppm	10 ppm, 200 ppm
Reactor volume	2 L (box type)	2 L (cylinder type)
Gas flow rate	1 L/min	1 L/min
TiO <sub>2</sub> concentration	1 g/L	0.6 g/L
Ultrasonic frequency	2.4 MHz	1.72 MHz
Light source	Sankyo BLB UV lamp (peak 365 nm, 4W GLZ4)	Sankyo BLB UV lamp (peak 352 nm, 4W F4T5)

은 표 1에 제시한 바와 같다. 즉, 반응기의 형상은 약간 다르나 부피와 유량, UV 광원이 거의 동일하고, TiO<sub>2</sub>의 농도는 본 연구가 Sekiguchi *et al.* (2008)의 농도의 60% 정도로 낮다. 또한 초음파 진동수는 각각 1.72 MHz와 2.4 MHz로 거의 유사한 반면, 톨루엔 유입농도는 본 연구가 약 17배~50배 정도가 높다. 따라서 본 연구의 광촉매 반응기에서 톨루엔 제거율이 높게 나타나지 않은 것은 광촉매 반응에 의한 분해능에 비해 톨루엔 유입농도가 크게 높았기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.2.2 TiO<sub>2</sub> 농도에 따른 톨루엔 제거율

본 연구에서는 반응기에 투입된 TiO<sub>2</sub> 용액의 농도 즉, 광촉매의 양이 초음파 미스트 발생 및 톨루엔 제거율에 미치는 영향을 살펴보았다. 톨루엔 유입농도

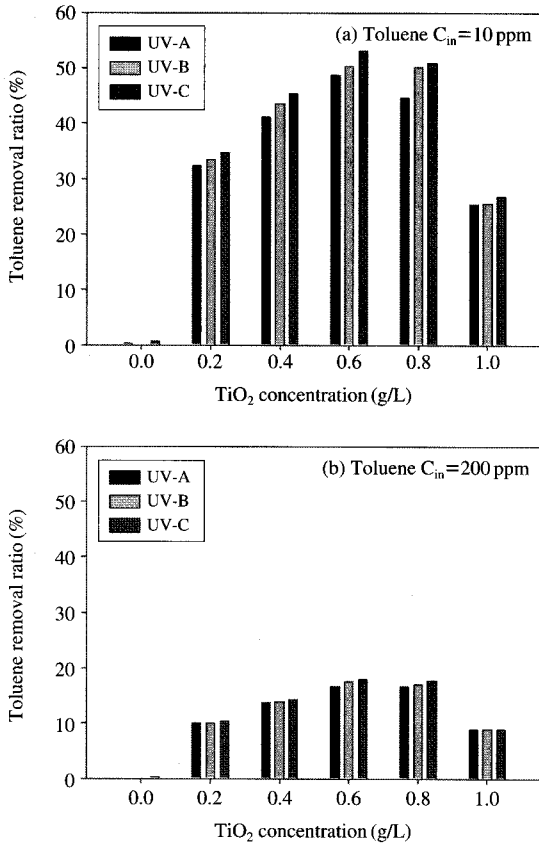


Fig. 5. Comparison of toluene removal ratios for various TiO<sub>2</sub> catalyst amounts and three light sources.

는 10 ppm과 200 ppm, UV 램프는 UV-A, UV-B, UV-C를 사용하였으며, 반응경과 약 30분에서의 톨루엔 유입농도와 유출농도를 이용하여 톨루엔 제거율을 계산하였다.

그림 5에서 보는 바와 같이 TiO<sub>2</sub> 광촉매가 투입되지 않은 경우에는 톨루엔이 거의 제거되지 않았으며, TiO<sub>2</sub> 용액의 농도가 0.6 g/L까지 증가할수록 톨루엔 제거율은 증가하였다. 그러나 그 이상의 농도에서는 TiO<sub>2</sub> 농도가 증가할수록 톨루엔 제거율이 감소하는 경향을 보였는데, 이와 같은 경향은 유입농도와 UV 램프의 종류에 관계없이 거의 유사한 것으로 나타났다. 이는 TiO<sub>2</sub>의 양이 0.6 g/L까지 증가할수록 초음파 미스트에 포함된 광촉매 입자가 증가하는 반면, 초음파에 의해 발생하는 미스트의 수 농도 감소로 UV 광의 투과도(transmission)가 증가하여 전반적으

로 광촉매 반응성이 증가한 결과로 풀이된다(Sekiguchi *et al.*, 2008). 하지만 본 연구에서의 최적 농도인 0.6 g/L보다 높은 TiO<sub>2</sub> 농도에서는 톨루엔 제거율이 크게 감소하는 경향을 보였다. 이는 고농도로 투입된 TiO<sub>2</sub> 입자가 그림 2에서와 같이 큰 응집체를 형성하면서 반응표면적이 감소하고, 초음파에 의한 미스트 발생이 저해되어 UV 광 반응기 내의 전체적인 광촉매의 양이 감소하면서 결국 광촉매 반응이 감소했기 때문인 것으로 사료된다(Sekiguchi *et al.*, 2008; Kawase *et al.*, 2006).

요약하면 TiO<sub>2</sub> 용액의 농도는 초음파 미스트 발생과 UV 광 투과에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 광촉매에 대한 UV 광의 조사를 저해하지 않는 수준에서 광촉매 미스트를 발생시킬 수 있는 적절한 TiO<sub>2</sub> 용액을 적용하는 것이 필요할 것으로 사료된다. 실험 결과, 본 연구의 광촉매 시스템에서는 0.6 g/L가 최적농도인 것으로 확인하였다.

### 3.2.3 UV 광원에 따른 톨루엔 제거율

광촉매 반응을 활성화시키기 위해서는 광원이 필요하며, 일반적으로 TiO<sub>2</sub> 광촉매 반응을 이용한 VOCs 제거 시에 파장이 320~400 nm 영역인 black light blue (BLB) 램프, 즉 UV-A 램프를 주로 사용한다(최소영 등, 2005; Jeong *et al.*, 2004; Sekiguchi *et al.*, 2003; 손현석 등, 2003). 한편 일부 연구에서 OH radical 및 오존 등의 반응성이 강한 화학종을 많이 생성하는 단파장 UV (254+185 nm)를 VOCs 제거에 적용한 사례가 있다(Jeong *et al.*, 2005, 2004; 서정민 등, 2002).

본 연구에서는 이러한 UV 램프의 주 파장 영역에 따른 광촉매 반응의 톨루엔 제거 특성을 살펴보기 위해 4W의 동일한 출력을 가지며 파장 영역대 및 피크 파장이 다른 UV-A, UV-B, UV-C를 각각 적용하여 비교실험을 진행하였다. 표 2는 TiO<sub>2</sub> 용액의 농도가 0.6 g/L이며, 반응경과 30분에서의 톨루엔 제거율을 비교한 것이다. 측정 결과, UV 파장에 따른 톨루엔 제거율은 파장이 짧은 UV-C, UV-B, UV-A 순으로 높게 나타났으며, 전체 실험결과도 이와 거의 동일한 경향을 보였다. 이는 단파장인 UV-C 광원에서 상대적으로 높은 광 에너지가 TiO<sub>2</sub>의 정공과 전자의 생성율을 증가시켜 결국 광촉매 반응성이 증가되었기 때문인 것으로 판단된다(이병규와 정혁용,

**Table 2. Comparison of toluene removal ratios for three UV light sources.**

Type	UV sources		Toluene feed concentration	
	Wavelength range	Peak wavelength	C <sub>in</sub> =10 ppm	C <sub>in</sub> =200 ppm
UV-A	315~400 nm	352 nm	48.7%	16.7%
UV-B	280~360 nm	306 nm	50.3%	17.6%
UV-C	100~280 nm	254 nm	53.1%	18.0%

\*TiO<sub>2</sub> concentration: 0.6 g/L, Gas flow rate: 1 L/min

1999). 한편 본 연구의 UV 광원에 따른 톨루엔 제거율은 큰 차이를 보이지 않았으며, 향후 추가 실험을 통한 면밀한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

도에서의 VOCs 처리효율 향상 등에 대한 보완 연구가 요구된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초음파 발생 미스트를 이용한 TiO<sub>2</sub> 광촉매 시스템을 적용하여 VOCs의 대표물질인 톨루엔가스를 처리하는 기술의 적용가능성과 문제점 등을 검토하였다. 또한 톨루엔 제거율에 미치는 여러 영향인자들을 살펴보았다. 이를 위해 초음파 발생기로 TiO<sub>2</sub> 미스트를 분무시키는 소형 습식 광촉매 반응기를 제작하였으며, 저비용으로 간단하게 톨루엔을 처리하였다. 그러나 톨루엔 유입농도가 증가할수록 제거율은 크게 감소하는 경향을 보였다.

다양한 조건에서 광촉매 시스템을 운영한 결과, 반응시간의 초기 30분까지 톨루엔 제거율이 증가하였고, 그 이후에는 정상상태에 도달되는 것을 확인하였다. TiO<sub>2</sub> 농도는 광촉매 반응의 효율을 결정하는 중요한 인자로 확인되었는데, 기본적으로 초음파 발생기에 투입된 TiO<sub>2</sub> 농도가 증가할수록 미스트 내에 TiO<sub>2</sub> 입자가 많이 포함되며, 이는 광촉매 분해반응을 증가시키는 것으로 판단된다. 그러나 TiO<sub>2</sub> 농도가 너무 높으면 초음파에 의한 미스트 발생이 저해되고, TiO<sub>2</sub>의 농도가 너무 낮으면 미스트 발생량이 증가되어 UV 광의 투과를 방해하는 것으로 판단된다. 과장영역이 다른 세 가지의 UV 광원으로 톨루엔 제거율을 살펴본 결과, 단과장 UV일수록 톨루엔 제거율은 증가하였는데 상대적으로 높은 광 에너지가 OH radical 생성 등의 광촉매 반응성을 증가시킨 것으로 사료된다. 본 연구는 초음파 발생 미스트를 광촉매 반응에 적용하기 위한 기초연구로 수행되었으며, 향후 광촉매 반응의 중간생성물 처리 및 비교적 고농

#### 감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었습니다.

#### 참 고 문 헌

김성욱 (2002) TiO<sub>2</sub> 광촉매를 이용한 VOC 제거와 광반응기 설계에 관한 연구, 경희대학교 석사학위논문.  
 박종수, 이진홍, 김진석, 오상협, 김동현 (2002) TiO<sub>2</sub> 광촉매 반응기의 기체상 탄화수소의 분해효율, 한국대기환경학회지, 18(3), 223-230.  
 서정민, 정창훈, 최금찬 (2002) 대기 중 휘발성 유기화합물의 광산화 공정 및 광촉매산화 공정의 처리효율 비교, 한국대기환경학회지, 18(2), 139-148.  
 손현석, 양원호, 김현용, 이소진, 박종래, 조경덕 (2003) 세라믹과 유리에 코팅한 TiO<sub>2</sub> 광촉매를 이용한 가스상 벤젠의 제거, 한국대기환경학회지, 19(1), 57-66.  
 이병규, 정혁용 (1999) 저온플라즈마와 UV를 이용한 휘발성 유기화합물 제거연구 (1), 한국대기환경학회 1999 추계학술대회 논문집, pp. 255-257.  
 이승범, 이재동, 박윤신 (2005) VOCs 광촉매 분해용 TiO<sub>2</sub> 촉매제조 및 성능평가, 대한위생학회지, 20(4), 45-50.  
 이 찬, 차상원, 이태규 (2005) 도장공정 배기가스 내 VOC 처리를 위한 활성탄-광촉매 복합시스템, 에너지공학, 4(2), 113-139.  
 최소영, 심영숙, 이우근 (2005) 소각비산제로 제조한 광촉매 흡착제의 벤젠과 톨루엔 제거특성, 한국대기환경학회지, 21(4), 431-438.  
 한국실내공기·산소연구회 (2005) 실내공기와 건강, 1판, 신

광문화사, 서울, pp. 65-67.

환경부 (2001) VOC 배출억제 · 방지시설의 저감효율 및 농도기준 설정 등에 관한 연구.

Fujishima, A. and X.T. Zhang (2006) Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches, *Comptes Rendus Chimie*, 9, 750-760.

Jeong, J.Y., K. Sekiguchi, and K. Sakamoto (2004) Photochemical and photocatalytic degradation of gaseous toluene using short-wavelength UV irradiation with TiO<sub>2</sub> catalyst: comparison of three UV sources, *Chemosphere*, 57, 663-671.

Jeong, J.Y., K. Sekiguchi, W.K. Lee, and K. Sakamoto (2005) Photodegradation of gaseous volatile organic compounds (VOCs) using TiO<sub>2</sub> photoirradiated by an ozone-producing UV lamp: decomposition characteristics, identification of by-products and water-soluble organic intermediates, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 169, 279-287.

Kawase, Y., T. Masuya, K. Yasuda, and M. Nakamura (2006) Effects of operation conditions on the performance of a concentrator using ultrasonic atomization, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 39, 334-339.

Sekiguchi, K., A. Sanada, and K. Yamamoto (2003) Degrada-

tion of toluene with an ozone-decomposition catalyst in the presence of ozone, and the combined effect of TiO<sub>2</sub> addition, *Catalysis Communications*, 4, 247-252.

Sekiguchi, K., K. Yamamoto, and K. Sakamoto (2008) Photocatalytic degradation of gaseous toluene in an ultrasonic mist containing TiO<sub>2</sub> particles, *Catalysis Communications*, 9, 281-285.

Tompkins, D.T. (2002) Evaluation of photocatalytic air cleaning capability: a literature review and engineering analysis, ASHARE Research Project RP-1134.

Wang, J.H. and M.D. Bay (2000) Application of ultraviolet photooxidation to remove organic pollutants in the gas phase, *Separation and Purification Technology*, 19, 11-20.

Wang, S.B., H.M. Ang, and M.O. Tade (2007) Volatile organic compounds in indoor environment and photocatalytic oxidation: State of the art, *Environment International*, 33, 694-705.

Zhang, P. and J. Liu (2004) Photocatalytic degradation of trace hexane in the gas phase with and without ozone addition, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 167, 87-94.