

## 광촉매 카트리지를 활용한 악취 및 VOC를 함유한 폐기스의 광촉매처리

임 광 희<sup>†</sup>

대구대학교 화학공학과, 산업 및 환경폐가스연구소  
712-714 경상북도 경산시 진량읍 내리리 15  
(2013년 1월 7일 접수, 2013년 1월 21일 채택)

### Photocatalytic Treatment of Waste Air Containing Malodor and VOC by Photocatalytic Reactor Equipped with the Cartridges Containing the Media Carrying Photocatalyst

Kwang-Hee Lim<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Daegu University, Research Institute for Industrial and Environmental Waste Air Treatment,  
15 Naeri-ri, Jillyang-eup, Kyungsan, Gyeongbuk 712-714, Korea  
(Received 7 January 2013; accepted 21 January 2013)

#### 요 약

본 연구에서는 광촉매담지 실리카담체 카트리지를 장착한 광촉매반응기시스템을 활용하여 악취 가스인 황화수소 및 휘발성유기화합물(VOC)인 에탄올 및 톨루엔이 함유된 폐가스처리를 수행하고, 그 연구결과를 상용 광촉매담지 부직포필터 카트리지를 장착한 광촉매반응기시스템을 활용한 연구결과와 비교 및 평가하였다. 광촉매담지 실리카담체 카트리지를 장착한 광촉매반응기시스템의 경우는 1단계 운전에서 에탄올 및 톨루엔의 제거율은 각각 80% 및 20% 값을 계속 유지하였으나, 에탄올의 제거율은 톨루엔과 다르게 점점 떨어져서 1단계 끝에는 제거율 40% 값을 보였다. 한편 황화수소의 제거율은 100%에서 90%로 감소하였다. 에탄올의 제거율은 2단계 운전에서 10% 값을 보여서 더욱 감소하였으나, 황화수소 및 톨루엔 제거효율은 처리대상 폐기스의 톨루엔 부하가 4배로 급격히 증가하였음에도 불구하고 제거효율이 각각 90% 및 20% 값을 그대로 유지하였다. 3단계 운전은 알루미늄 코팅된 반사막필름을 광촉매반응기에 사용한 결과로서, 에탄올 및 톨루엔의 제거율은 각각 약 5%가 증가한 15% 및 25%의 제거율을 보였다. 한편 광촉매담지 부직포필터 카트리지를 장착한 광촉매반응기시스템의 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 제거율은 1단계 운전에서 각각 10%, 97% 및 100% 값을 유지하였다. 그러나 2단계 운전에서 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 제거율은 각각 5%, 95% 및 2~3% 미만의 제거율을 보여서 에탄올과 황화수소는 제거율이 약간 저하되었으나 톨루엔의 경우에는 완전 제거에서 급락하였다. 또한 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 모든 경우에서 반사막필름의 효과를 전혀 보지 못하였다. 따라서 상용 광촉매담지 부직포필터 카트리지를 장착한 광촉매반응기시스템에서 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 제거는 부직포필터의 흡수성 VOC에 대한 흡착능에 주로 기인하였고, 광촉매 활성에 의한 제거는 광촉매담지 실리카담체 카트리지를 장착한 광촉매반응기시스템보다 훨씬 미미하였다.

**Abstract** – In this study, the photocatalytic reactor system equipped with photocatalyst-carrying-silica-media cartridges [photocatalytic reactor system (1)] was used to perform the treatment of waste air containing malodor and volatile organic compound (VOC). The result of its performance was evaluated and compared with that of the photocatalytic reactor system equipped with commercial photocatalyst-carrying-nonwoven filter-media cartridges [photocatalytic reactor system (2)]. In case of photocatalytic reactor system (1), at the 1st stage of run the removal efficiencies of ethanol and toluene continued to be 80% and 20%, respectively. However, unlike toluene, the removal efficiency of ethanol dropped to 40% at the end of the 1st stage of run. The removal efficiency of hydrogen sulfide decreased from 100% to 90%. At the 2nd stage of its run the removal efficiency of ethanol decreased to 10% while the removal efficiencies of hydrogen sulfide and toluene remained as same as 90% and 20%, respectively, even though the inlet load of toluene increased by factor of four. In the 3rd stage of its run, as the result of application of aluminium-coated reflector film to the inner wall of photocatalytic reactor system, the removal efficiencies of ethanol and toluene increased by 5% to be 15% and 25%, respectively. In case of photocatalytic reactor system (2), at the 1st stage of its run, the removal efficiencies of ethanol, hydrogen sulfide and toluene continued to be 10%, 97% and 100%, respectively. However, at 2nd stage of its run their removal efficiencies became 5%, 95% and 2~3%, respectively, which showed that the removal efficiencies of ethanol and hydrogen sulfide decreased insignificantly while the removal efficiency of toluene dropped signifi-

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: khlim@daegu.ac.kr

cantly from the perfect elimination. Moreover, the reflector film did not affect the performance of photocatalytic reactor system (2) at all. Therefore the removal of ethanol, hydrogen sulfide and toluene by photocatalytic reactor system (2) was mainly attributed to hydrophobic adsorption of its nonwoven filter media and its extent of photocatalytic removal turned out to be negligible, compared to that of photocatalytic reactor system (1).

Key words: Photocatalytic Reactor System, Photocatalyst-carrying-media-cartridge, Removal Efficiency, Malodor, VOC

## 1. 서 론

휘발성유기화합물(VOC)은 모든 도시 및 산업지역의 대기에서 발견되는 중요한 오염원군이다. 광촉매산화는 VOC 제거를 위한 대안으로서 점차 보편화되고 있다[1]. 광촉매산화는 전통적인 공기정화 기술[2]보다 낮은 농도 오염원의 산화분해, 주변 온도 및 압력에서 운전, 낮은 동력소모, 쉬운 유지조건과 공조설비와 연결사용가능성과 같은 여러 장점을 제공한다. 낮은 농도의 VOC에 대한 TiO<sub>2</sub> 광촉매산화는 지금까지 포괄적으로 광범위하게 연구되었다. 대부분의 연구가 액상에서의 광분해를 다루었지만 최근에는 주로 공기정화를 위한 기상의 유기화합물분해가 중요해지고 있다[3-5]. 광촉매 비활성화는 현장에서 광촉매산화기술을 적용할 때의 치명적인 약점으로 알려졌는데, 특히 벤조익산과 같은 산소함유 화합물은 TiO<sub>2</sub> 광촉매 활성에 대한 비가역적 비활성화를 초래한다고 보고되었다[6,7]. 이러한 광촉매 비활성화는 타이타니아-실리카[7,8], 타이타니아-바나디아[9,10], 타이타니아-철[11], 타이타니아-텅스텐[10,12] 또는 타이타니아-주석혼합산화물[13]과 같은 이원촉매를 사용하여 지연시킬 수 있다.

이러한 광촉매활성관련 문제를 차지하고 광촉매산화기술이 당면한 문제는 광촉매에 대한 낮은 광도(light intensity) 효율이다[14]. 최근 환형[15,16], 고정층[17,18], 평판[19-21], 유동층[22,23], 허니컴[24,25]과 광섬유[26-28]를 포함한 많은 광촉매반응기들이 연구되었다. 환형광촉매반응기의 내경에 광원이 삽입되고 외경과 내경 사이에 광촉매담체가 충전되는 환형광촉매반응기[29-31]는 광원의 축방향이 처리대상인 악취 및 VOC 함유 폐가스 흐름방향과 같아서, 환형광촉매반응기는 내경에서 외경으로 광원으로부터 멀어질수록 광도가 제한되어 궁극적으로 광촉매반응기의 유효부피당 악취 및 VOC의 제거성능이 떨어지게 된다. 따라서 환형광촉매반응기는 외경과 내경 사이의 간극을 크게 배치할 수 없어서 처리대상 폐가스의 흐름방향에 수직방향의 단면적이 작아지게 된다. 그에 따라서 환형광촉매반응기 내에서 폐가스의 선속도가 상대적으로 증가하여 압력강하가 커지게 되므로 많은 유량의 폐가스를 처리하는 현장에는 광촉매담체가 충전된 환형광촉매반응기의 적용이 효과적이지 않다.

본 연구에서는 광원의 축방향을 처리대상인 악취 및 VOC 함유 폐가스 흐름방향과 수직인 광촉매반응기의 단면과 평행으로 배치하여 광촉매담체가 충전된 광촉매반응기의 단면적을 크게 하더라도 광원으로부터의 광도가 제한되지 않도록 하였다. 또한 광촉매반응기 내에서 악취 및 VOC 함유 폐가스 흐름방향으로 광원으로부터의 광도가 제한되지 않기 위하여 광촉매를 담지한 실리카담체의 충전두께를 한정하는 광촉매담체 카트리지를 장착한 광촉매반응기를 활용하여 악취 및 VOC가 함유된 폐가스처리를 수행하였다. 한편 그 연구결과를 광촉매담지 실리카담체 카트리지를 대신에 상용 광촉매담지 부직포필터 카트리지를 장착한 광촉매반응기를 활용하여 악취 및 VOC가 함유된 폐가스처리를 수행한 연구결과와 비교 및 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2-1. 실험장치 및 구성

#### 2-1-1. 광촉매반응기 시스템의 구성

비정상상태의 UV/광촉매반응실험을 위하여 아크릴을 소재로 한 사각관을(140 mm×150 mm×650 mm) 제작하고, 그 사각관 내부에 광촉매를 담지한 다공성 SiO<sub>2</sub> 광촉매담체(Fuji 사, CARiAct Q-30) 58cc를 각각 충전한 광촉매담체 카트리지(140 mm×150 mm×30 mm) 두 개와 그 사이에 폐가스 흐름방향과 수직으로 상하로 설치된 4 W UVB 램프 2개로 구성된 광촉매카트리지 set 3기를 설치하고, 입구와 출구에 각각 sampling port를 설치한 광촉매반응기 시스템(1)을 Fig. 1과 같이 구축하였다. 이와 같이 구축된 UV/광촉매공정에 내부 광원으로부터 조사된 UV를 광촉매반응기 내부로 반사시킴으로써 광촉매반응기 외경지지체를 통한 광투과 및 광흡수손실을 최소화 하여 광도를 극대화하기 위한 알루미늄이 코팅된 반사필름을 활용한 UV/광촉매공정을 구축하였다. 또한 다공성 SiO<sub>2</sub> 광촉매담체를 충전한 카트리지를 대신에 상용 광촉매담지 부직포필터 카트리지(140 mm×150 mm×30 mm)를 장착한 광촉매반응기 시스템(2)을 추가적으로 구축하였다.

#### 2-1-2. 폐가스 공급장치의 구성

블러워(Young Nam Yasunnaga, 토출압력; 0.12 kg/cm<sup>2</sup>, 최대유량; 43 L/min)로 에탄올, 톨루엔 및 황화수소 발생장치들 및 mixing chamber에 각각 0.5 L/min 씩의 공기를 공급하였으므로 총 2 L/min의 공기를 공급하였다. 에탄올 공급장치에 0.5 L/min 유량의 공기를 공급하여 heating band에 의하여 약 140 °C 정도로 가열된 관을 통과할 때에 에탄올을 syringe pump (KD Scientific, Model: KDS200)를 이용하여 조절된 양을 이 관에 주입하여 에탄올이 함유된 공기를 mixing chamber에 공급하였다. 톨루엔이 함유된 폐가스도 같은 방법으로 제조하여 mixing chamber에 투입하였다. 또한 0.2% Na<sub>2</sub>S 용액을 peristaltic pump (Masterflex)를 이용하여 염산에 공급하여 황화수소를 발생시키고 이러한 황화수소 발생장치에 0.5 L/min 유량의 공기를 공급하여 발생한 황화수소 가스를 lead acetate 용액을

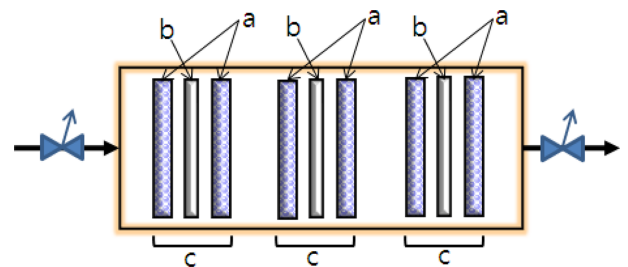


Fig. 1. Schematic diagram of photocatalytic reactor system (1) and (2): a. photocatalyst-carrying-media[porous silica-based carrier and porous non-woven fabric filter media for photocatalytic reactor system (1) and (2), respectively]; b. UV source; c. a set of photocatalyst cartridges.

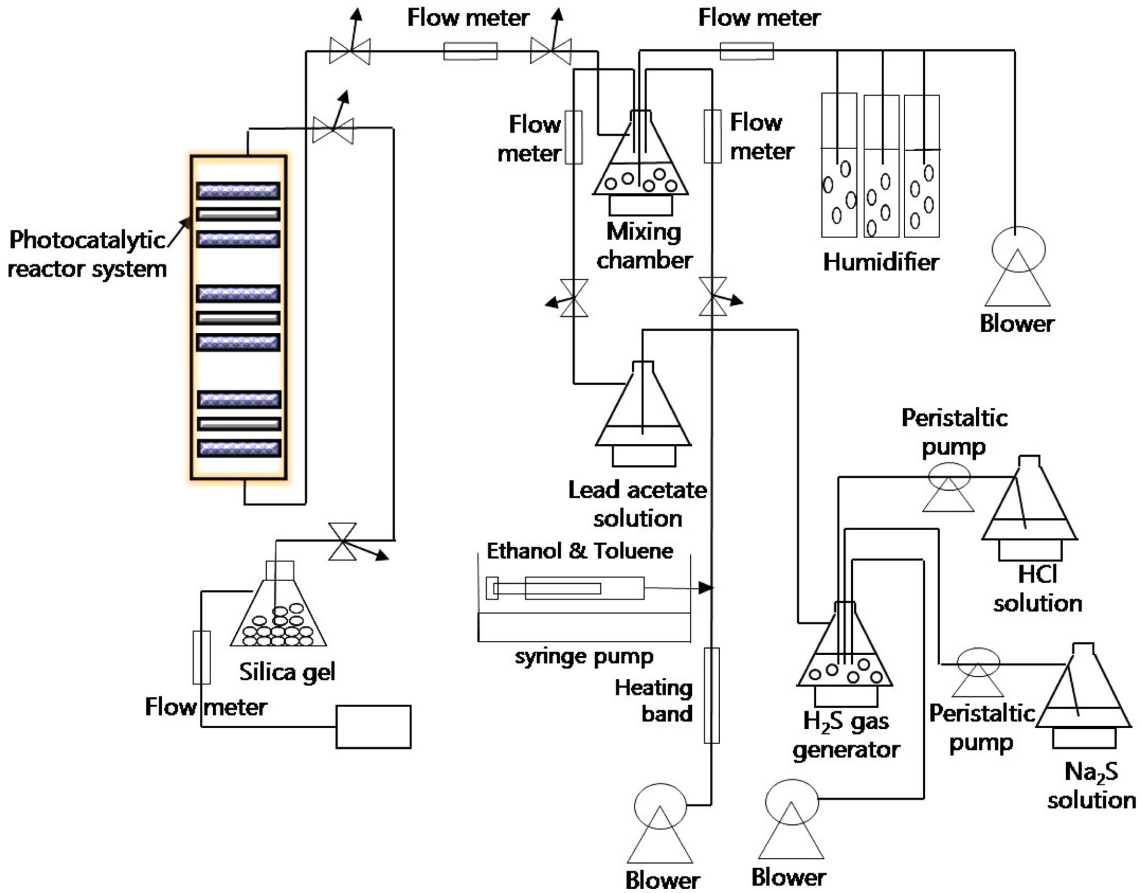


Fig. 2. Schematic diagram of UV/photo-catalytic reactor system fed with synthetic contaminated air containing ethanol, hydrogen sulfide and toluene.

통과시킨 후에 mixing chamber에 공급하였다. 그리고 mixing chamber에서 에탄올, 황화수소와 톨루엔이 함유한 공기들을 혼합하였다. 블로워에서 공기를 이송하는 관은 tygon 관을 사용하였고 mixing chamber에서 에탄올, 황화수소와 톨루엔이 동시 함유된 공기를 UV/광촉매반응기 시스템(1) 또는 (2)까지 공급하기 위하여 내산성이 있는 viton 관을 사용하여 배관하였다. 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 공급 장치를 포함한 광촉매반응기시스템 구성은 Fig. 2와 같다.

2-2. 광촉매를 담지한 광촉매담체 카트리지

2-2-1. 다공성 SiO<sub>2</sub> 광촉매담체 카트리지

광촉매반응기 시스템(1)의 광촉매담체 카트리지에 충전되는 다공성 SiO<sub>2</sub> 광촉매담체(Fuji 사, CARIAct Q-30)에 광촉매를 담지시키기 위하여 titanium tetra-isopropoxide를 isopropanol 환경에서 가수분해하여 생성된 광촉매졸(나노팩, P&T-31C)을 나노팩에서 구입하였다. Porous silica-based 담체의 경우는 광촉매졸에 1일 동안 담가 놓은 후에 상온에서 1일 동안 건조하였다. 그 후에 광촉매졸을 담지한 porous silica-based 담체를 dry oven에서 80 °C에서 10분간, 150 °C에서 10분간 건조시키고, furnace에서 450 °C에서 30분간 소성시켰다. 광촉매졸(나노팩, P&T-31C)의 소성 후 XRD 분석 패턴은 Fig. 3과 같이 전형적인 anatase 형의 피크를 보이고 있다. 한편 광촉매반응기 시스템(1)의 광촉매담체 카트리지에 충전되는 다공성 SiO<sub>2</sub> 광촉매담체에 대한 특성은 Table 1과 같다.

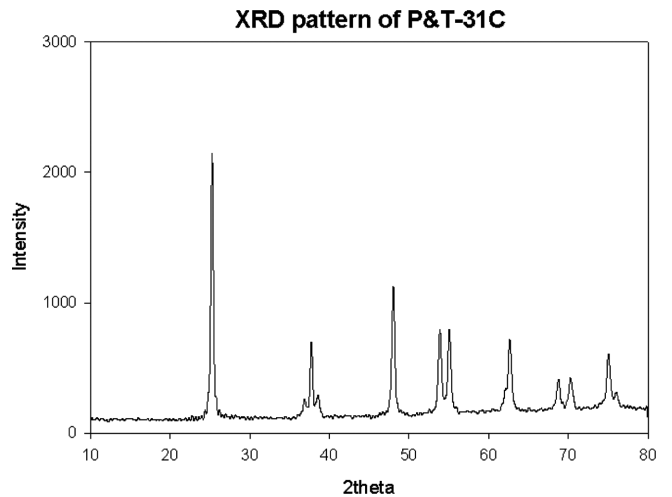


Fig. 3. XRD analysis of TiO<sub>2</sub> photocatalyst obtained by calcination of P&T-31C at 450 °C [Nanopac].

Table 1. Characteristics of porous silica-based carrier

Description	Unit	Specification
BET Surface Area	m <sup>2</sup> /g	114
Pore Volume	ml/g	1.01
Bulk Density	g/ml	0.42
Average Pore Diameter	nm	28.7

**Table 2. Operating conditions of photocatalytic reactor**

Pollutants in waste air	Feed concentration (stage)			Air flow rate
	I	II	III*	
Ethanol	50 ppm	50 ppm	50 ppm	2 L/min
H <sub>2</sub> S	10 ppm	10 ppm	10 ppm	
Toluene	50 ppm	200 ppm	200 ppm	

\*Aluminium-coated film reflector was attached to the inner support-surface of photocatalytic reactor system (1) and (2).

2-2-2. 다공성 부직포필터 카트리지

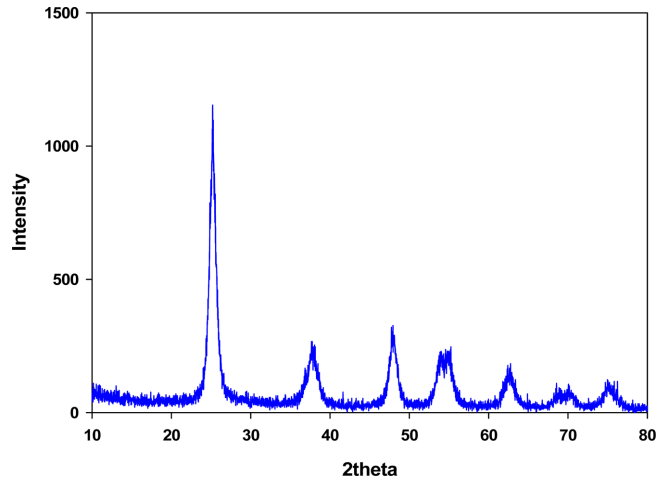
(주)무경에서 공기청정기에 사용하는, 광촉매를 담지한 초지를 파형화(corrugate)되도록 편파성형하여 적층하여 가공한 상용 다공성 부직포필터를 기증받아서 카트리지 규격에 맞추어 절단하여 사용하였다. 다공성 부직포필터의 표면특성을 확인하기 위하여 Surface area & Pore Size Analyzer (Quantachrome, Autosorb-iQ & Quadrasorb SI)를 사용하여 BET 비표면적, 기공부피 및 기공크기 등을 측정하였다.

2-3. 광촉매반응기 시스템의 운전조건

다공성 SiO<sub>2</sub> 광촉매담체 카트리지(140 mm×150 mm×30 mm)와 상용 광촉매담지 부직포필터 카트리지(140 mm×150 mm×30 mm)를 충전한 각각의 광촉매반응기 시스템(1)과 (2)를 다음과 같은 조건으로 각각 운전하였다. 에탄올, 황화수소 및 톨루엔의 농도가 각각 50, 10 및 50 ppmv (또는 200 ppmv)이 함유된 공기를 2 L/min의 유량으로 광촉매반응기 시스템(1) 또는 (2)로 공급하여 상대습도 35% 및 실온 24 °C에서 Table 2와 같이 운전하면서 광촉매 반응기 시스템(1)과 (2)의 악취(황화수소) 및 VOC (에탄올 및 톨루엔)를 함유한 폐가스 처리농도 및 제거효율 추이를 각각 관찰하였다. 단계별 운전조건으로서 1단계 운전에서는 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 농도를 각각 50, 10 및 50 ppmv로 유지하고; 2단계 운전에서는 각각 50, 10 및 200 ppmv로 유지하며; 3단계 운전에서는 2단계 운전조건에 알루미늄 코팅된 반사막 조건을 추가하였다.

2-4. 광촉매반응기 시스템(1)과 (2)의 제거효율

악취 및 VOC를 함유한 폐가스의 광촉매 처리효율을 평가하기 위하여, 광촉매반응기의 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 제거효율(removal efficiency)을 식 (1)에 준하여 계산하였다.



**Fig. 4. XRD analysis of TiO<sub>2</sub> photocatalyst obtained by calcination of P&T-31C at 450 °C [29].**

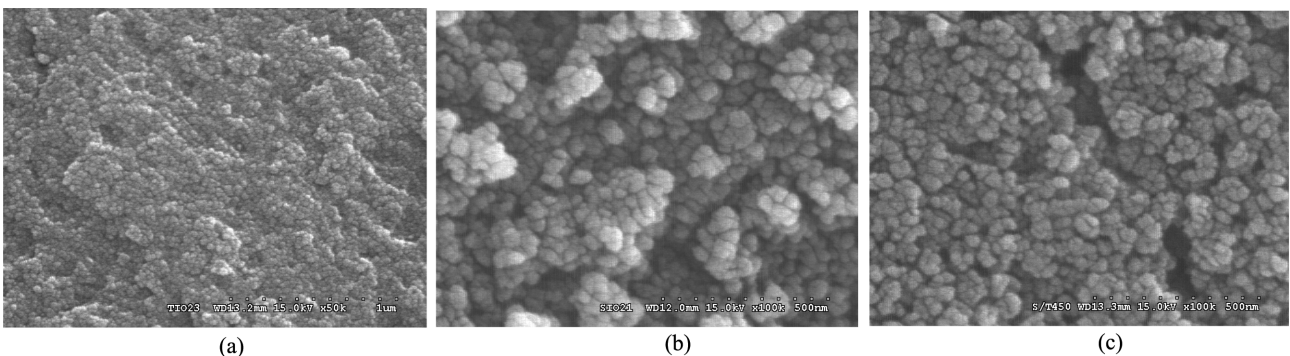
$$\text{Removal efficiency (\%)} = \frac{C_i \times C_o}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

where C<sub>i</sub> and C<sub>o</sub> denote the concentrations of ethanol, toluene or hydrogen sulfide of fed waste air and treated waste air, respectively.

3. 결과 및 토론

3-1. 광촉매 담체 특성

광촉매반응기 시스템(1)의 광촉매담체 카트리지를 충전하는 다공성 SiO<sub>2</sub> 담체의 입자 지름은 mesh 분석을 수행한 결과로서 1.7~4.0 mm (5-10 mesh) 이었고, 다공성 SiO<sub>2</sub> 입자의 평균 지름은 3 mm이었다. 450 °C에서 소성시킨 TiO<sub>2</sub> 입자에 대한 XRD 분석 결과로서 Fig. 3과 일치하는 anatase 형의 피크를 보이는 Fig. 4와 같은 XRD 분석패턴과, 450 °C에서 소성시킨 TiO<sub>2</sub> 입자, porous silica-based 담체 표면 및 titanium-alkoxide sol로 함침시키고 소성시킨 porous silica-based 담체 표면에 대하여 field emission scanning electron microscope (Hitachi, S-4300)으로 관찰한 결과(Fig. 5)가 본 연구에서 제조한 TiO<sub>2</sub> 담지 광촉매담체를 사용한 참고문헌에 나타나 있다. 한편 광촉매반응기 시스템(2)의 광촉매담체 카트리지의 다공성 부직포필터의 BET 비표면적, 기공부피 및 크기의 분석 결과는 Table 3과 같다.



**Fig. 5. (a) TiO<sub>2</sub> particle, (b) Raw surface of porous silica-based media, (c) Surface of porous silica-based media impregnated with titanium-alkoxide sol and calcined, observed by field emission scanning electron microscope (Hitachi, S-4300) [29].**

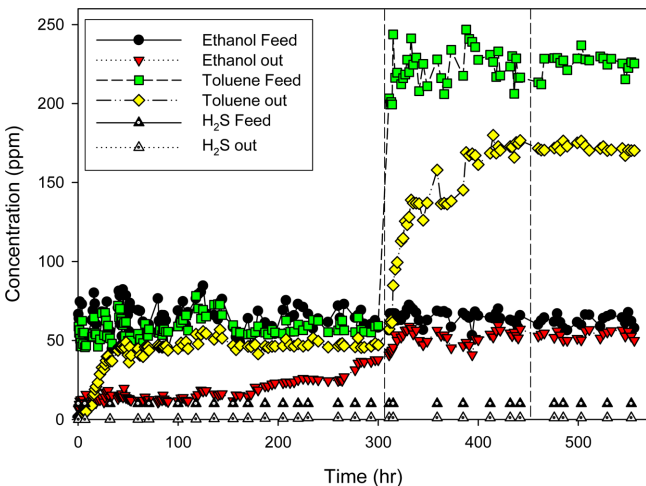
**Table 3. Characteristics of porous non-woven fabric filter media**

Description	Unit	Specification
BET Surface Area	m <sup>2</sup> /g	210
Pore Volume	ml/g	1.9
Average Pore Diameter	nm	3.6

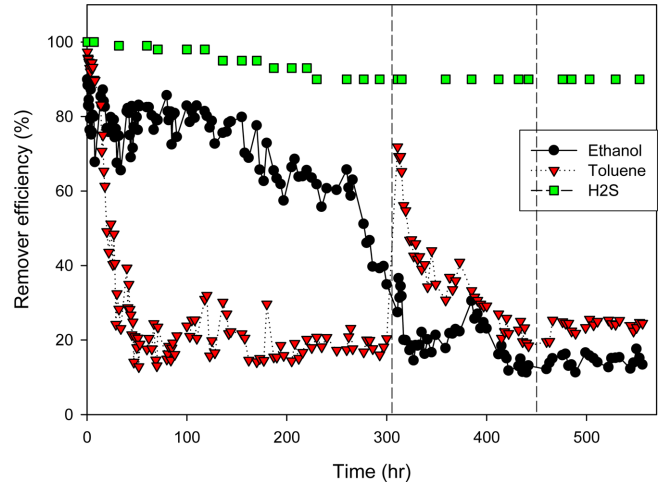
**3-2. 광촉매반응기 시스템(1) 및 (2)의 운전특성**

**3-2-1. 광촉매반응기 시스템(1) 운전특성**

광촉매반응기 시스템에 공급되는 공기유량은 2 L/min이고; 1단계 운전에서는 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 농도를 각각 50, 10 및 50 ppmv로 유지하고; 2단계 운전에서는 각각 50, 10 및 200 ppmv로 유지하였다. 광촉매반응기 시스템에 설치되는 다공성 SiO<sub>2</sub> 광촉매 담체 카트리지가(140 mm×150 mm×30 mm)의 단면적은 210 cm<sup>2</sup>이다. 따라서 공급공기의 접근 속도(approach velocity)는 0.159 cm/s일 때 광촉매담체 카트리지가 1개의 공담 체류시간(empty bed contact time)은 18.9 s이었다. 본 광촉매반응기 시스템에서는 광촉매 set 당 광촉매 담체 카트리지가 2개 사이에 4W UV램프 2개가 기계 이동방향과 수직으로 상하로 설치되고 이러한 광촉매카트리지가 set 3기가 설치되므로 결과적으로 광촉매담체 카트리지가 6개가 고정되었다. 따라서 공담 체류시간(empty bed contact time)은 113.4 s이었다. 이와 같은 광촉매반응기 시스템을 운전하여 시간에 따른 에탄올, 황화수소 및 톨루엔의 출구에서의 처리농도 추세와 제거효율을 각각 Fig. 6 와 Fig. 7에 나타내었다. 광촉매 실험 개시 후 1단계 운전 도입부에서 흡착이 포화됨에 따라서 에탄올과 톨루엔의 제거율이 급락하여 에탄올 및 톨루엔은 각각 제거율 80% 및 20% 값을 계속 유지하였다. 그러나 에탄올은 제거율 80%를 유지하다가 점점 떨어져서 1단계 운전 끝에는 제거율 40% 값을 보였다. 황화수소의 제거율은 100에서 90%로 감소하였다. 2단계 운전에서는 톨루엔 유입농도 값이 200 ppmv로 급격히 증가하였으므로 톨루엔 제거효율은 순간적으로 급등하고, 그 후에 가파른 감소를 보이며 제거효율이 다시 20% 값을 보였다. 에탄올은 제거율이 약간 감소하여 2단계 중말부에서는 제거율 약 10% 값을 보였다. 한편 황화수소 제거율은 90% 값을 유지하였다. 3단계에서 알루미늄 코팅된 반사막필름을 광촉매반응



**Fig. 6. Unsteady concentration profile of waste-air containing ethanol, hydrogen sulfide and toluene, treated with three set of photocatalyst cartridges charged with porous SiO<sub>2</sub> media containing photocatalyst.**

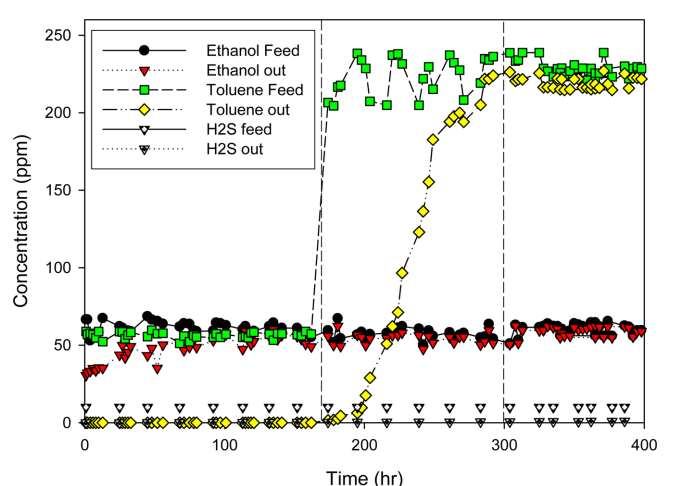


**Fig. 7. Unsteady removal efficiency profile of waste-air containing ethanol, hydrogen sulfide and toluene, treated by three set of photocatalyst cartridges charged with porous SiO<sub>2</sub> media containing photocatalyst.**

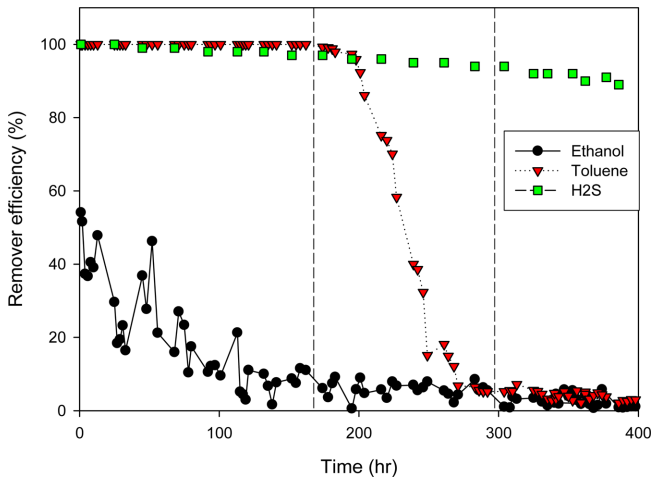
기에 사용한 결과로서 에탄올의 제거율은 운전시간이 지날수록 낮아짐에도 불구하고 약 5%가 증가한 15%의 제거율을 보였다. 한편 톨루엔의 제거율도 에탄올의 제거율과 마찬가지로 약 5%가 증가한 25%의 제거율을 보였다.

**3-2-2. 광촉매반응기 시스템(2) 운전특성**

광촉매반응기 시스템(2)를 구축하기 위하여 다공성 SiO<sub>2</sub> 광촉매 담체 카트리지가 대신에 상용 광촉매담체 부직포필터 카트리지가(140 mm×150 mm×30 mm)를 광촉매시스템에 설치하였고, 광촉매반응기시스템(1)과 나머지 사양은 동일하였다. 광촉매반응기 시스템(2)를 운전하여 시간에 따른 에탄올, 황화수소 및 톨루엔의 출구에서의 처리농도 추세와 제거효율을 각각 Fig. 8과 9에 나타내었다. 광촉매 실험 개시 후 1단계 운전이 시작하자마자 에탄올의 제거율이 급락하여 1 단계 운전 중반부에는 에탄올 제거율은 10% 미만



**Fig. 8. Unsteady concentration profile of waste-air containing ethanol, hydrogen sulfide and toluene, treated by three set of photocatalyst cartridges charged with porous non-woven fabric filter media containing photocatalyst.**



**Fig. 9. Unsteady removal efficiency profile of waste-air containing ethanol, hydrogen sulfide and toluene, treated by three set of photocatalyst cartridge charged with porous non-woven fabric filter media containing photocatalyst.**

을 보였다. 그러나 톨루엔의 경우에는 1단계 운전 동안 톨루엔 제거율이 100% 값을 계속 유지하였다. 황화수소는 초기 100%에서 97%의 제거율로 약간 떨어졌음이 관찰되었다. 그러나 2단계 운전에서 톨루엔 유입농도가 200 ppmv로 증가하였을 때에 톨루엔 제거율은 계속 떨어져서 2~3% 미만의 톨루엔 제거율을 보였다. 마찬가지로 에탄올 제거율도 약 5%의 제거율을 보였다. 한편 황화수소는 약간 더 떨어진 95%의 제거율을 보였다. 3단계 운전에서는 반사막 필름의 효과를 보지 못하고 오히려 에탄올과 톨루엔 제거율이 각각 1%까지 하락하였다. 또한 황화수소 제거율도 90%로 감소하였다. 따라서 광촉매반응기시스템(2)의 경우는 광촉매 담지 부직포필터의 광촉매 활성에 의한 에탄올, 황화수소 및 톨루엔의 제거율기보다는 다공성 부직포필터의 주로 흡착에 의한 제거라고 판단된다.

#### 4. 결 론

광촉매반응기시스템(1)의 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 제거율은 1단계 운전 도입부에서 흡착이 포화됨에 따라서 각각 제거율 80%, 100% 및 20% 값을 계속 유지하였다. 그러나 1단계 끝에는 각각 제거율 40%, 90% 및 20% 값을 보였다. 톨루엔 유입농도 값이 200 ppmv로 급격히 증가한 2단계 운전에서 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 제거율은 각각 10%, 90% 및 20%이었다. 따라서 광촉매반응기시스템(1)의 운전시간이 길어짐에 따라서 광촉매산화에 의한 에탄올 제거율은 감소하였으나 황화수소 및 톨루엔 제거율은 비교적 안정적으로 유지되었다. 3단계 운전에서 알루미늄 코팅된 반사막 필름을 광촉매반응기에 사용한 결과로서, 에탄올 및 톨루엔의 제거율은 각각 약 5%가 증가한 15% 및 25%의 제거율을 보였다. 한편 광촉매반응기시스템(2)의 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 제거율은 1단계 운전에서 각각 10%, 97% 및 100% 값을 유지하였다. 그러나 2단계 운전에서 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 제거율은 각각 5%, 95% 및 2~3% 미만의 제거율을 보였다. 톨루엔의 경우에는 완전 제거에서 급락하였다. 3단계 운전에서 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 모든 경우

에서 반사막 필름의 효과를 전혀 보지 못하였다. 따라서 광촉매반응기시스템(2)에서 에탄올, 황화수소 및 톨루엔 제거는 부직포필터의 흡수성 VOC에 대한 흡착에 주로 기인하였고, 광촉매 활성에 의한 제거는 광촉매반응기시스템(1)의 경우보다 훨씬 미미하였다.

#### 감 사

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성 사업으로 수행된 연구결과입니다.

#### 참고문헌

1. Lasa, H. D., Serrano, B. and Salices, M., Photocatalytic Reaction Engineering, Springer, London, 17(2005).
2. Jacoby, W. A., Blake, D. M., Noble, R. D. and Koval, C. A., "Kinetics of the Oxidation of Trichloroethylene in Air Via Heterogeneous Photocatalysis," *J. Catal.*, **157**, 87-96(1995).
3. Zhao, J. and Yang, X., "Photocatalytic Oxidation for Indoor Air Puri & Cation: a Literature Review," *Building and Environment*, **38**, 645-654(2003).
4. Raupp, G. B., Alexiadis, A., Hossain, M. M. and Changrani, R., "First-Principles Modeling, Scaling Laws and Design of Structured Photocatalytic Oxidation Reactors for air Purification," *Catal. Today* **69**, 41-49(2001).
5. Mills, A. and Lee, S. K., "A Web-based Overview of Semiconductor Photochemistry-based Current Commercial Applications," *J. Photochem. Photobiol. A-Chem.*, **152**, 233(2002).
6. Xie, C., Xu, Z., Yang, Q., Li, N., Zhao, D., Wang, D. and Du, Y., *A: Chem.*, "Comparative Studies of Heterogeneous Photocatalytic Oxidation of Heptane and Toluene on Pure Titania, Titania-silica Mixed Oxides and Sulfated Titania," *J. Mol. Catal.*, **217**, 193(2004).
7. Mendez-Roman, R. and Cardona-Martinez, N., "Relationship Between the Formation of Surface Species and Catalyst Deactivation During the Gas-phase Photocatalytic Oxidation of Toluene," *Catal. Today*, **40**, 353(1998).
8. Obuchi, E., Sakamoto, T. and Nakano, K., "Photocatalytic Decomposition of Acetaldehyde Over TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Catalyst," *Chem. Eng. Sci.* **54**, 1525-1530(1999).
9. Ge, H., Chen, G., Yuan, Q. and Li, H., "Gas Phase Catalytic Partial Oxidation of Toluene in a Microchannel Reactor," *Catal. Today*, **110**, 171(2005).
10. Keller, N., Barraud, E., Bosc, F., Edwards, D. and Keller, V., "On the Modification of Photocatalysts for Improving Visible Light and UV Degradation of Gas-phase Toluene Over TiO<sub>2</sub>," *Appl. Catal. B: Environ.*, **70**, 423(2007).
11. Kang, M., Chung, S. J. and Park, J. Y., "Photocatalytic Performance of Nanometer-sized FexOy/TiO<sub>2</sub> Particle Synthesized by Hydrothermal Method," *Catal. Today*, **87**, 87(2003).
12. Keller, V., Bernhardt, P. and Garin, F., "Photocatalytic Oxidation of Butyl Acetate in Vapor Phase on TiO<sub>2</sub>, Pt/TiO<sub>2</sub> and WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> Catalysts," *J. Catal.*, **215**, 129(2003).
13. Zuo, G. M., Cheng, Z. X., Chen, H., Li, G. W. and Miao, T., "Study on Photocatalytic Degradation of Several Volatile Organic Compounds," *J. Hazard. Mater. B*, **128**, 158-163(2006).
14. Gerven, T. V., Mul, G., Moulijn, J. and Stankiewicz, A., "A Review

- of Intensification of Photocatalytic Processes,' *Chem. Eng. Process*, **46**, 781-789(2007).
15. Larson, S. A., Widegren, J. A. and Falconer, J. L., "Transient Studies of 2-propanol Photocatalytic Oxidation on Titania," *J. Catal.*, **157**, 611-625(1995).
  16. Esterkin, C. R., Negro, A. C., Alfano, O. M. and Cassano, A. E., "Air Pollution Remediation in a Fixed Bed Photocatalytic Reactor Coated with TiO<sub>2</sub>," *AIChE J.*, **51**, 2298-2310(2005).
  17. Park, O. H. and Na, H. Y., "Photocatalytic Degradation of Toluene Vapour Using Fixed Bed Multichannel Photoreactors Equipped with TiO<sub>2</sub> Coated Fabrics," *Environ. Technol.*, **29**, 1001-1007(2008).
  18. Salvad-Estivill, I., Hargreaves, D. M. and Puma, G. L., "Evaluation of the Intrinsic Photocatalytic Oxidation Kinetics of Indoor Air Pollutants," *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 2028-2035(2007).
  19. Mohseni, M. and Taghipour, F., "Experimental and CFD Analysis of Photocatalytic Gas Phase Vinyl Chloride (VC) Oxidation," *Chem. Eng. Sci.*, **59**, 1601-1609(2004).
  20. Obee, T. N., "Photooxidation of Sub-parts-per-million Toluene and Formaldehyde Levels on Titania Using a Glass-plate Reactor," *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 3578-3584(1996).
  21. Dibble, L. A. and Raupp, G. B., "Fluidized-bed Photocatalytic Oxidation of Trichloroethylene in Contaminated Air Streams," *Environ. Sci. Technol.*, **26**, 492-495(1992).
  22. Zhang, M. An, T., Fu, J., Sheng, G., Wang, X., Hu, X. and Ding, X., "Photocatalytic Degradation of Mixed Gaseous Carbonyl Compounds At Low Level on Adsorptive TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> Photocatalyst Using a Fluidized Bed Reactor," *Chemosphere*, **64**, 423-431(2006).
  23. Hossain, M. M., Raupp, G. B., Hay, S. O. and Obee, T. N., "Three-dimensional Developing Flow Model For Photocatalytic monolith reactors," *AIChE J.*, **45**, 1309-1321(1999).
  24. Taranto, J., Frochet, D. and Pichat, P., "Photocatalytic Air Purification: Comparative Efficacy and Pressure Drop of a TiO<sub>2</sub>-Coated Thin Mesh and a Honeycomb Monolith at High Air Velocities Using a 0.4 m<sup>3</sup> Close-loop Reactor," *Sep. Purif. Technol.*, **67**, 187-193(2009).
  25. Choi, W. Ko, J. Y., Park, H. and Chung, J. S., "Investigation on TiO<sub>2</sub>-coated Optical Fibers for Gas-phase Photocatalytic Oxidation of Acetone," *Appl. Catal. B: Environ.*, **31**, 209-220(2001).
  26. Denny, F., Scott, J., Peng, G. D. and Amal, R., "Channelled Optical Fibre Photoreactor for Improved Air Quality Control," *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 882-889(2010).
  27. Peill, N. J., Hoffmann, M. R., "Development and Optimization of a TiO<sub>2</sub>-Coated Fiber-Optic Cable Reactor: Photocatalytic Degradation of 4-chlorophenol," *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 2974-2981(1995).
  28. Devahasdin, S., Fan, C., Li, K. and Chen, D. H., "TiO<sub>2</sub> Photocatalytic Oxidation of Nitric Oxide: Transient Behavior and Reaction Kinetics," *J. Photochem. Photobiol. A-Chem.*, **156**, 161-170(2003).
  29. Lee, E. J., Park, H. and Lim, K. H., "Treatment of Waste Air Containing Malodor and VOC: 1. Effect of Photocatalyst-carrying Media Porosity on the Photocatalytic Removal Efficiency of Malodor and VOC of Waste Air," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **50**(6), 945-951(2012).
  30. Lee, E. J. and Lim, K. H., "Treatment of Waste Air Containing Malodor and VOC: 2. Effect of Light-intensity on the Photocatalytic Removal Efficiency of Malodor and VOC of Waste Air," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **50**(6), 952-959(2012).
  31. Lim, K. H., Park, S. W., Lee, E. J. and Hong, S. H., "Treatment of Mixed Solvent Vapors with Hybrid System Composed of Bio-filter and Photo-catalytic Reactor," *Korean J. Chem Eng.*, **22**(1), 70-79(2005).