

## 악취 및 VOC를 함유한 폐가스의 광촉매 처리: 1. 처리효율에 대한 광촉매담체 다공성의 영향

이은주\*\*\* · 박혜리\*\*\* · 임광희\*\*\*,†

\*대구대학교 화학공학과  
712-714 경상북도 경산시 진량읍 내리리 15  
\*\*산업 및 환경폐가스연구소  
712-714 경상북도 경산시 진량읍 내리리 15  
(2012년 10월 16일 접수, 2012년 11월 18일 채택)

### 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

Eun Ju Lee\*\*\*, Hyeri Park\*\*\* and Kwang-Hee Lim\*\*\*,†

\*Department of Chemical Engineering, Daegu University, 15 Naeri-ri, Jillyang-eup, Kyungsan-si, Kyungbuk 712-714, Korea

\*\*Research Institute for Industrial and Environmental Waste Air Treatment, 15 Naeri-ri, Jillyang-eup, Kyungsan-si, Kyungbuk 712-714, Korea

(Received 16 October 2012; accepted 18 November 2012)

#### 요 약

광촉매반응기의 충전제로서 glass bead-광촉매담체를 control로 하고 다공성의 silica-based 광촉매담체를 사용하였을 때의 악취 및 VOC를 함유한 폐가스의 광촉매 처리효율에 대한 광촉매담체 다공성의 영향평가를 수행하였다. 다공성의 silica-based-광촉매담체의 광촉매 코팅량은 1,716.3  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로서 nonporous glass bead(control)에 담지된 광촉매코팅량인 670  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  값의 약 250%이었다. Porous silica-based 담체가 충전된 광촉매반응기의 황화수소 및 톨루엔 제거효율은 각각 22% 및 82%로서, glass-bead 담체가 충전된 UV/광촉매반응기의 경우의 황화수소 및 톨루엔 제거효율인 각각 19% 및 53%와 비교하였을 때에 황화수소의 경우는 약 16% 증가하였고 톨루엔의 경우는 약 55% 증가하였다. 따라서 다공성의 silica-based 광촉매담체를 사용함으로써 황화수소와 톨루엔의 동시처리효율을 각각 제고하였고, 처리효율의 제고율은 황화수소보다 톨루엔의 경우가 3.4배 높았다.

**Abstract** – The effect of photocatalyst-carrying media porosity on the photocatalytic removal efficiency of malodor and VOC of waste air was evaluated when the photocatalytic removal efficiency of porous silica-based media was compared with that of glass bead as control. The amount of photocatalyst coated on the surface of porous silica-based media was observed to be 1,716.3  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ , which was 250% as much as that of nonporous glass bead (control) of 670  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ . The removal efficiencies of hydrogen sulfide and toluene in case of porous silica-based media were observed to be 22% and 82%, respectively, while the removal efficiencies of hydrogen sulfide and toluene in case of nonporous glass bead media were observed to be 19% and 53%, respectively. Therefore, the removal efficiencies of hydrogen sulfide and toluene increased by 16% and 55%, respectively, when the removal efficiencies of porous silica-based media were compared with those of nonporous glass bead media. Thus the increment ratio of the removal efficiency of toluene was observed to be 3.4 times higher than that of hydrogen sulfide.

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

#### 1. 서 론

건물 등에서 휘발성 유기화합물(VOC)로 인한 공기질 문제에 대한 현재 해결대책은 주로 필터나 흡착제를 사용하는 방법에 의존하고 있다[1]. 그러나 이러한 방법들은 포집이나 흡착된 VOC에 대한

추가적인 2차 처리가 요구된다. 광촉매는 광을 받으면 촉매 반응을 일으키는 물질로서, 인체에 무해하고, 여러 분야에서 응용가능하다. 광촉매 물질로는  $\text{TiO}_2$ 가 가장 많이 사용되고 있으며 n형 반도체로서 UV 영역에서 활성을 나타내는 광촉매 물질의 band-gap은 3.0~3.2 eV이고, 광을 받으면 수분존재 시에 전자(electron) 및 정공(hole)이 형성되어 강한 산화력을 가진 하이드록시 라디칼( $\cdot\text{OH}$ )과 슈퍼 옥사이드( $\text{O}_2^-$ )를 생성한다. 광촉매작용은 VOC,  $\text{H}_2\text{S}$  및  $\text{NH}_3$ 를 산화

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

분해시켜 이산화탄소와 기타 중간유도체, N<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>, 그리고 solid S를 생성시킨다. 기상의 VOC 중에서 디클로로메탄[2], 프로펜[3]과 벤젠[4] 등에 대한 광촉매분해가 연구되어 왔다. 광촉매작용이 최적화된 경우에는 유기화합물의 이산화탄소와 물로의 완전무기화가 이루어진다. 이와 같은 광촉매공정과 바이오필터공정으로 하이브리드시스템을 구성하여 기상의 VOC를 처리하였을 경우에 상당한 시너지효과가 있음이 보고되었다[5,6].

광촉매분말을 큰 펠렛(pellet)으로 성형을 하여 반응기 내에 광촉매를 보존하고 압력강하를 제한할 수 있으나[3], 표면적 감소로 인한 심각한 광촉매활성 감소 및 고비용의 단점이 있다. 광촉매 기재(support)에 광촉매를 코팅한 광촉매고정화에 있어서 광촉매 막 두께가 얇을 경우에는 광촉매 표면에 조사되는 UV의 일부는 광촉매 막을 투과하여 광촉매 지지체 또는 기재에 흡수되므로 광촉매 막의 두께를 크게 하여 광에너지 손실을 방지할 수 있다[7]. 한편 광촉매 막 두께 100 nm까지는 UV 침투가 가능하여 광촉매활성을 보인다고 보고되고 있다[8,9].

광촉매장치 구성에서 반대편으로부터 조사되는 광촉매입자로 코팅된 사각형관으로 구성된 광촉매반응기가 가장 보편적이며[10], 실린더형 기재(support)에 광촉매가 코팅되고 환형관의 내부 관에서 조사되는 환형설계[11,12]도 연구되었다. 이들의 경우는 광촉매 코팅된 구로 충전된 충전층(packed bed)과 비교하였을 때에 광촉매 코팅되는 기재의 크기가 커서 비표면적이 제한되는 단점이 있다. 본 연구에서는 내부 조사되는 환형의 광촉매반응기에 광촉매 코팅된 입상의 기재로 충전하여 환형설계의 단점을 개선하였다. 또한 입상의 광촉매 기재를 다공성으로 선정하여서 광촉매 기재의 다공성 표면에 흡착된 악취 또는 VOC의 농도가 높아져서 광촉매반응기의 악취와 VOC 제거효율이 제고되고 광촉매 코팅효율 또한 제고되리라 예상된다. 따라서 흡착능이 있고 투명한 광촉매 담지.다공성 기재인 실리카 비드(SiO<sub>2</sub> bead)를 충전한 UV/광촉매공정과 비다공성 유리비드(glass bead)를 충전한 UV/광촉매공정을 운전하여 상호 결과를 비교 분석하여 악취 및 VOC를 함유한 폐가스의 광촉매 처리효율에 대한 광촉매담체 다공성의 영향을 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2-1. 실험장치 및 구성

블러워(Young Nam Yasunnaga, 토출압력; 0.12 kg/cm<sup>2</sup>, 최대유량; 43L/min)에서 공기를 공급하고 공급공기가 heating band에 의하여 약 140 °C 정도로 가열된 관을 통과할 때에 톨루엔(0.3 μL/min)을 syringe pump(KD Scientific, Model: KDS200)들을 이용하여 이 관에 주입하여 톨루엔이 함유된 인공적인 농도(50 ppm)의 폐가스를 제조하여 mixing chamber에 투입하였다. 0.2% Na<sub>2</sub>S 용액을 peristaltic pump (Masterflex)를 이용하여 염산에 공급하여 일정농도의 황화수소를 발생시키고 다른 블러워를 활용하여 발생한 황화수소 가스(25 ppm)를 lead acetate 용액을 통과시킨 후에 mixing chamber에 공급하여 황화수소와 톨루엔을 혼합한다. 블로워에서 공기를 이송하는 관은 tygon 관으로 사용하였고 mixing chamber에서 황화수소와 톨루엔이 동시 함유된 공기를 UV/광촉매반응기까지 공급하기 위하여 내산성이 있는 viton관을 사용하여 배관하였다. 한편 UV/광촉매반응기는 외경, 내경 및 길이가 각각 8 cm, 4 cm 및 47 cm인 환형의 pyrex 관을 제작하여 360 nm에서 주파장을 갖는 15W UV-A 램프(437 mm(L)

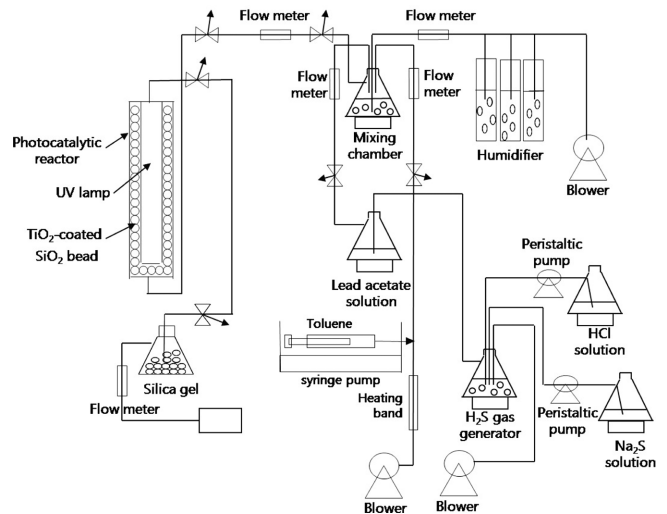


Fig. 1. Schematic diagram of UV/photo-catalytic reactor fed with synthetic contaminated air containing hydrogen sulfide and toluene.

×28 mm(φ), 한성자외선)를 pyrex 관의 내경 안에 삽입하였다. 그리고 두 개의 pyrex 관의 내경 및 외경 사이에는 평균지름이 1 cm 또는 0.3 cm인 nonporous glass bead (control) 또는 porous silica-based 담체(Fuji 사, CARIAct Q-30)를 각각 충전시켰다. 황화수소와 톨루엔의 feeding 및 mixing 시스템과 구축된 UV/광촉매반응기공정을 Fig. 1 과 같이 나타내었다.

Titanium tetra-isopropoxide를 isopropanol 환경에서 가수분해하여 생성된 광촉매졸(나노팩, P&T-31C)을 나노팩에서 구입하였다. 폐가스가 pyrex 관에 들어와서 접촉하는 pyrex 관의 내부 표면과 nonporous glass bead의 표면을 광촉매졸에 dip-coating하여 상온에서 10분간 건조 후에 furnace에서 450 °C의 조건으로 30분 이상 소성시키고 이러한 dip-coating 및 소성공정을 3회 반복 시행하였다. 한편 porous silica-based 담체의 경우는 위와 같은 광촉매졸에 1일 동안 담가놓은 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. 광촉

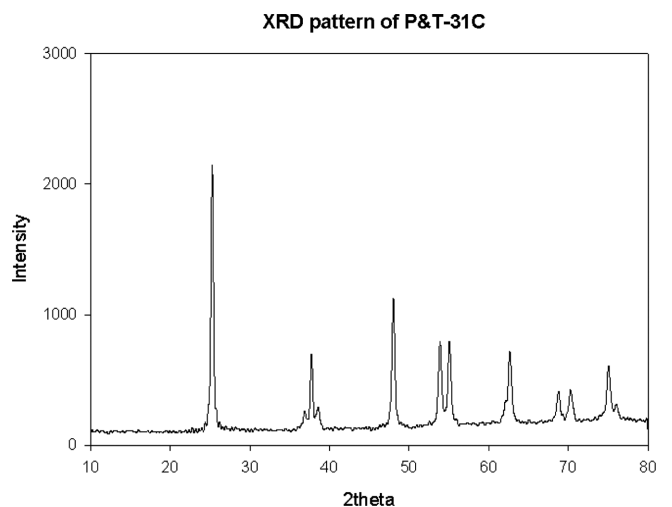


Fig. 2. XRD analysis of TiO<sub>2</sub> photocatalyst obtained by calcination of P&T-31C at 450 °C [Nanopac].

**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          |

매질(나노팩, P&T-31C)의 소성 후 XRD 분석 패턴은 Fig. 2와 같이 전형적인 anatase 형의 피크를 보이고 있다.

**2-2. 광촉매담체 특성 및 광촉매 담지량**

광촉매담체의 단위 면적당 광촉매 담지량을 산출하기 위하여 광촉매 졸에 담그고 소성한, 광촉매 담지 porous silica-based 담체 100cc 및 광촉매를 담지하지 않은 porous silica-based 담체 100cc의 무게를 각각 측정하고 무게 차이를 산출하여 porous silica-based 담체 100cc에 담지된 TiO<sub>2</sub> 광촉매 양을 측정하였다. 한편 구입한 porous silica-based 담체의 특성은 Table 1과 같다.

**2-3. 광촉매담체 비표면적**

Porous silica-based 담체의 wet 비표면적을 다음과 같이 산출하였다.

$$a = \frac{A}{V} = \frac{6(1-\varepsilon)}{\Phi_s D_p} \quad (1)$$

where D<sub>p</sub>=평균입자 지름(평균공칭크기)

ε=wet porosity

φ=구형도(sphericity)

**2-4. 광촉매반응기 운전조건**

악취 및 VOC를 함유한 폐가스의 광촉매 처리효율에 대한 광촉매담체 다공성의 영향을 평가하기 위하여, nonporous glass bead(control)와 porous silica-based 담체로 충전된 UV/광촉매반응기들의 황화수소와 톨루엔을 동시 함유한 폐가스의 처리효율을 Fig. 1과 같은 UV/광촉매반응기공정을 운전하여 각각 관찰하였다. 실험실규모의 UV/

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

| Pollutants in waste air | Feed concentration | Blower rate | Air flow rate | Total air rate |
|-------------------------|--------------------|-------------|---------------|----------------|
| Toluene                 | 50 ppm             | 0.5 L/min   | 0.5 L/min     | 1.5 L/min      |
| H <sub>2</sub> S        | 25 ppm             | 0.5 L/min   |               |                |

광촉매반응기공정의 운전조건을 Table 2와 같이 설정하였다.

**2-5. 광촉매반응기 제거효율 및 제거성능**

악취 및 VOC를 함유한 폐가스의 광촉매 처리효율을 평가하기 위하여, 광촉매반응기의 톨루엔 및 황화수소 제거효율(removal efficiency)을 식 (2)과 같이 계산하였다.

$$\text{Removal efficiency (\%)} = \frac{C_i - C_o}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

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

한편 광촉매반응기의 톨루엔 및 황화수소의 제거성능(elimination capacity) 및 부하(inlet load)를 각각 식 (3)과 (4)로 계산하였다.

$$\text{Elimination capacity (g/m}^3\text{/hr)} = \frac{C_i - C_o}{\tau} \quad (3)$$

$$\text{Inlet load (g/m}^3\text{/hr)} = \frac{C_i}{\tau} \quad (4)$$

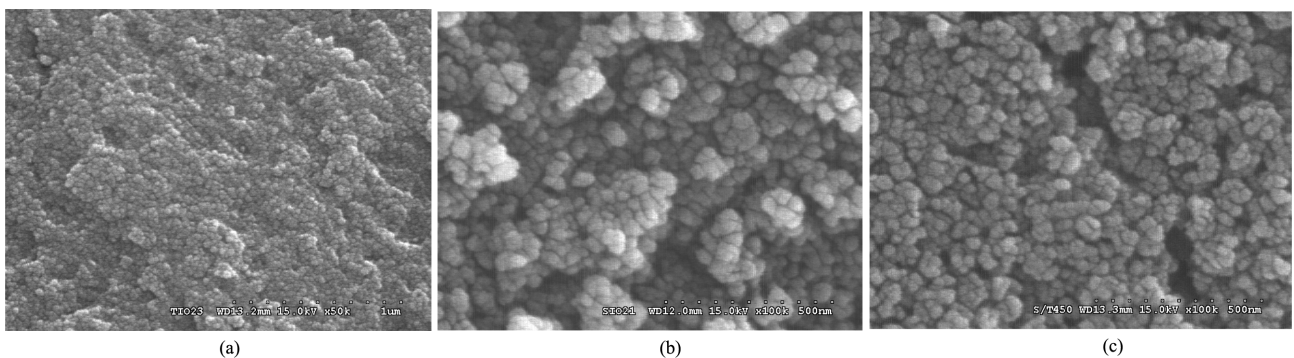
where 1) C<sub>i</sub> and C<sub>o</sub> denote the concentrations (g/m<sup>3</sup>/hr) of toluene or hydrogen sulfide of fed waste air and treated waste air, respectively; 2) τ denotes empty bed contact time (hr) of photocatalytic reactor, obtained by dividing apparent volume of the media coated with photocatalyst by feed flow rate.

**3. 결과 및 토론**

**3-1. 광촉매 담체특성 및 광촉매 담지량**

**3-1-1. 광촉매 담체특성**

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 Fig. 3a-c와 같이 관찰하였다. TiO<sub>2</sub> 입자는 Fig. 3a에서와 같이 10~20 nm의 크기였고, porous silica-based 담체 입자는 Fig. 3b에서와 같이 약 40~50 nm 정도이고 검게 보이는 pore의 지름은 약 30 nm 정도로서, Fig. 3c에서 titanium-alkoxide sol로 함침시키고 소성시킨 porous silica-based 담체 입자 표면 및 pore의 내부에 10~20 nm의 TiO<sub>2</sub> 입자가 코팅된 것으로 보인다. 450 °C에서 소성시킨 TiO<sub>2</sub> 입자에 대한 XRD 분석 결과 Fig. 2와 일치하는 anatase 형의



**Fig. 3. (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).**

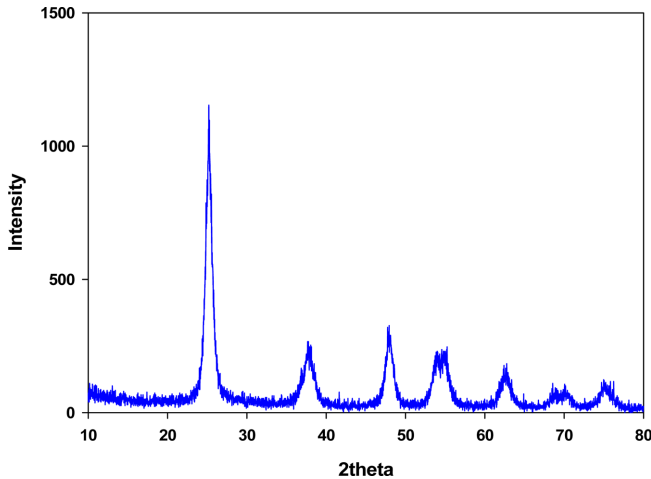


Fig. 4. XRD analysis of TiO<sub>2</sub> photocatalyst obtained by calcination of P&T-31C at 450 °C.

피크를 보이는 XRD 분석패턴(Fig. 4)을 얻었다.

### 3-1-2. 광촉매 담지량

구입한 porous silica-based 담체의 특성으로 pore 평균지름은 28.7 nm, BET 표면적은 114 m<sup>2</sup>/g이고 pore 부피는 1.01 ml/g이었고 입자 지름은 1.7~4.0 mm이었다. Mesh 분석을 수행한 결과로서 porous silica-based 입자의 평균 지름은 3 mm이었다. porous silica-based 입자의 겉보기 밀도는 0.42 g/cc이었으나, wet porosity를 측정한 결과 0.36으로서 입자의 진밀도는 0.657 g/cc가 산출되었다. 구형도가 1로 가정한 porous silica-based 담체의 wet porosity 값인 0.36 및 평균지름 0.3 cm를 식 (1)에 대입하여 porous silica-based 담체의 wet 비표면적을 12.8 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>으로 구하였다. 또한 porous silica-based 담체 100 cc에 담지된 TiO<sub>2</sub> 광촉매 양으로부터 단위부피당 광촉매 loading 양을 0.021969 g/cc로 구하였다. 따라서 이 단위부피당 광촉매 loading 양을 wet 비표면적으로 나누어서 porous silica-based 광촉매담체 wet 표면적당 광촉매 loading 양을 1,716.3 μg/cm<sup>2</sup>로 구하였다. 이러한 porous silica-based 광촉매담체 wet 표면적당 광촉매 loading 양은 nonporous glass bead에 담지된 670 μg/cm<sup>2</sup> 값의 약 250%에 도달하였다. 이것은 porous silica-based 광촉매담체 표면에 많은 pore가 형성되어 상대적으로 큰 pore 내부표면적에 기인한다.

### 3-2. 광촉매반응기 운전 및 평가

#### 3-2-1. Porous silica-based 담체를 충전한 광촉매반응기 평가

Porous glass bead를 충전한 광촉매반응기의 경우에 폐가스 내에 동시 함유된 톨루엔 및 황화수소의 동시처리농도 추이는 각각 Figs. 5,6과 같다. 또한 그에 따른 톨루엔 및 황화수소의 동시처리효율에 대한 추이는 각각 Figs. 7,8과 같다. 동 실험에서 시간에 따른 톨루엔 및 황화수소의 inlet load 및 elimination capacity의 추이는 각각 Figs. 9,10과 같다. 톨루엔 및 황화수소의 제거효율은 정상상태에서 Figs. 7,8에서와 같이 각각 82% 및 22%로 관찰되었다.

#### 3-2-2. Nonporous glass bead를 충전한 광촉매반응기 평가

Nonporous glass bead를 충전한 광촉매반응기의 경우에 폐가스 내에 동시 함유된 톨루엔 및 황화수소의 동시처리농도 추이는 각각

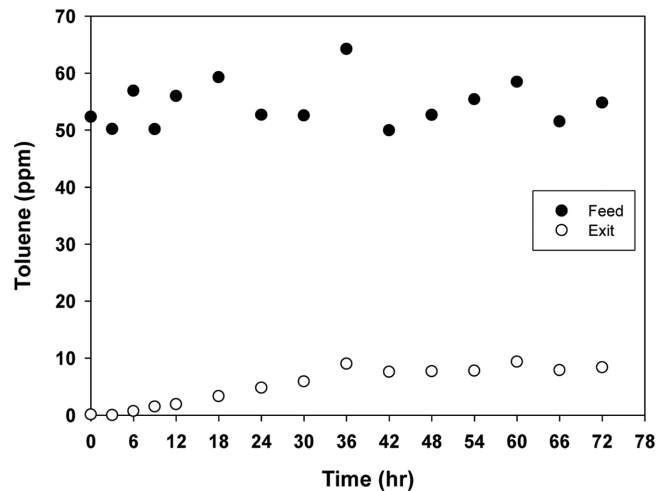


Fig. 5. Time-evolution of toluene concentration at the exit of UV/photo-catalytic reactor packed with porous silica bead media.

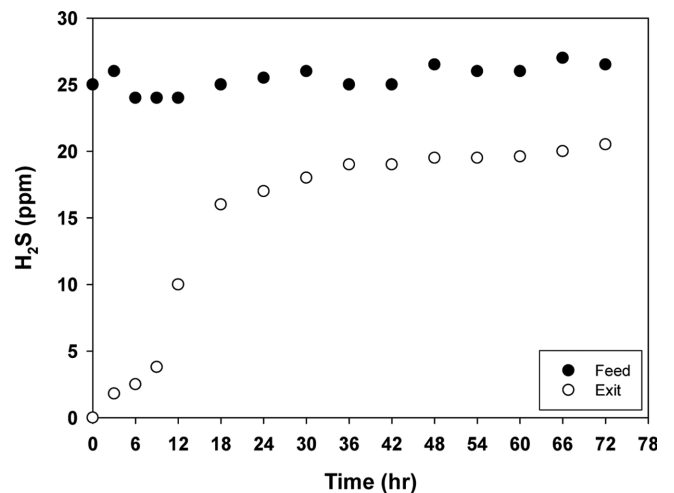


Fig. 6. Time-evolution of hydrogen sulfide concentration at the exit of UV/photo-catalytic reactor packed with porous silica bead media.

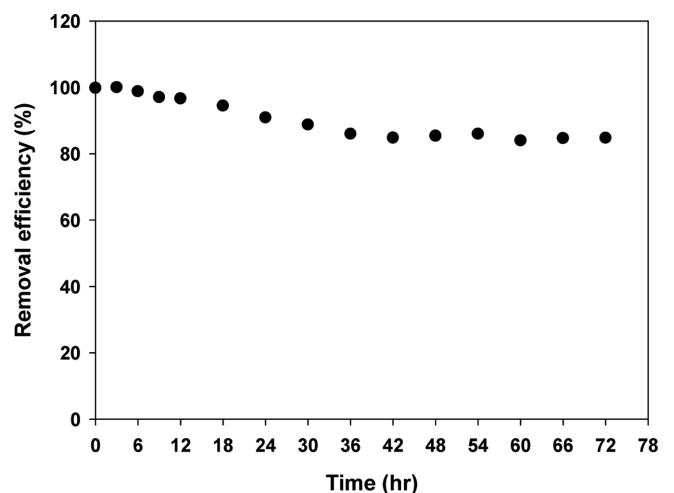


Fig. 7. Time-evolution of toluene removal efficiency with porous silica bead media.

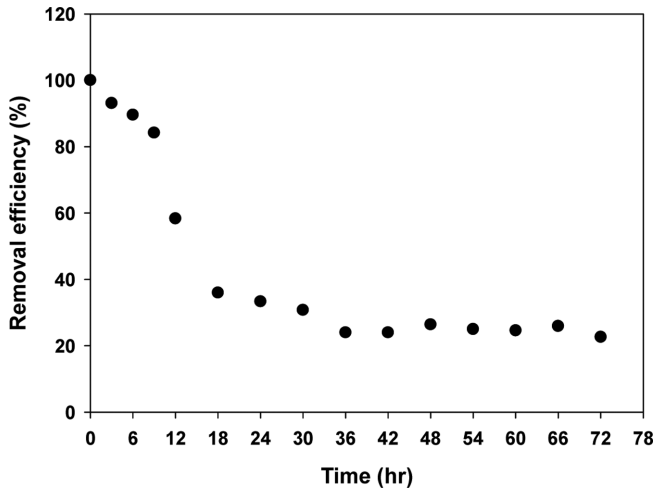


Fig. 8. Time-evolution of hydrogen sulfide removal efficiency with porous silica bead media.

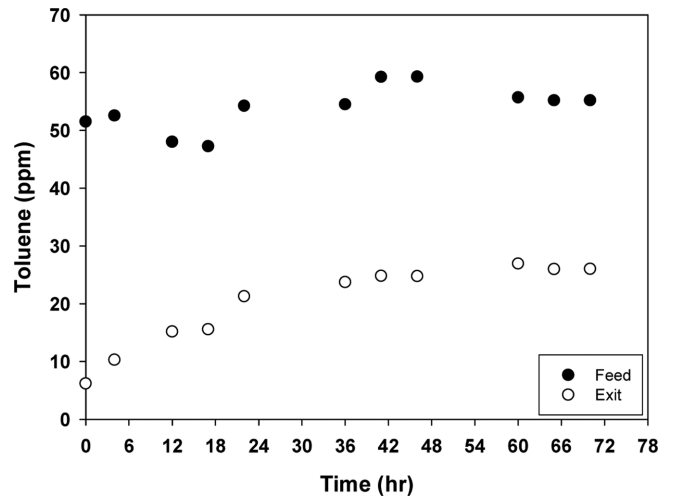


Fig. 11. Time-evolution of toluene concentration at the exit of UV/photo-catalytic reactor packed with nonporous glass-bead media.

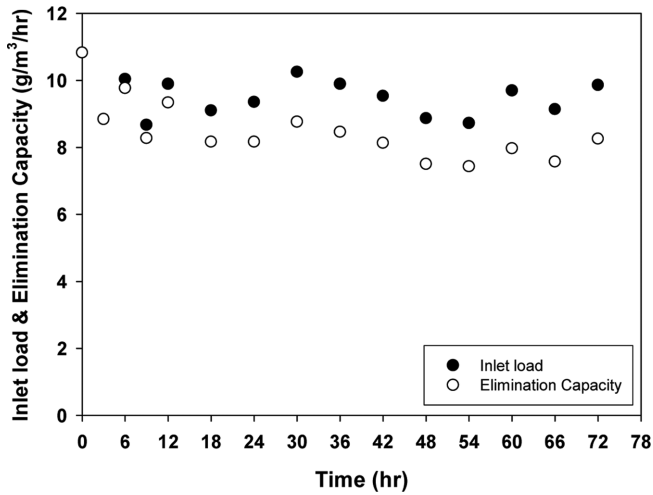


Fig. 9. Time-evolution of inlet load and elimination capacity of toluene of UV/photo-catalytic reactor packed with porous silica bead media.

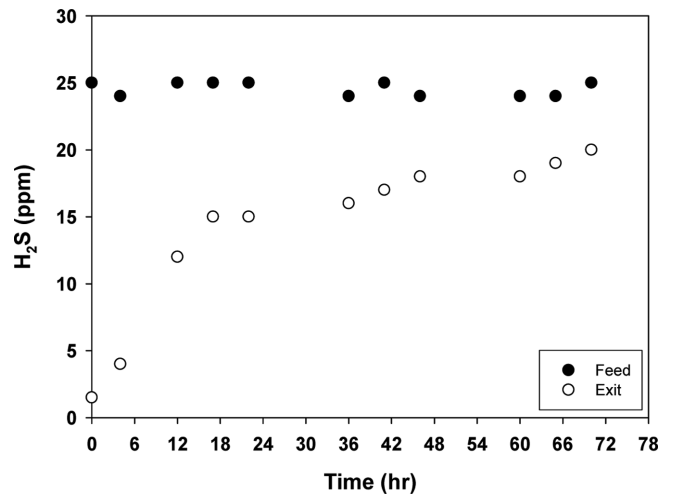


Fig. 12. Time-evolution of hydrogen sulfide concentration at the exit of UV/photo-catalytic reactor packed with nonporous glass-bead media.

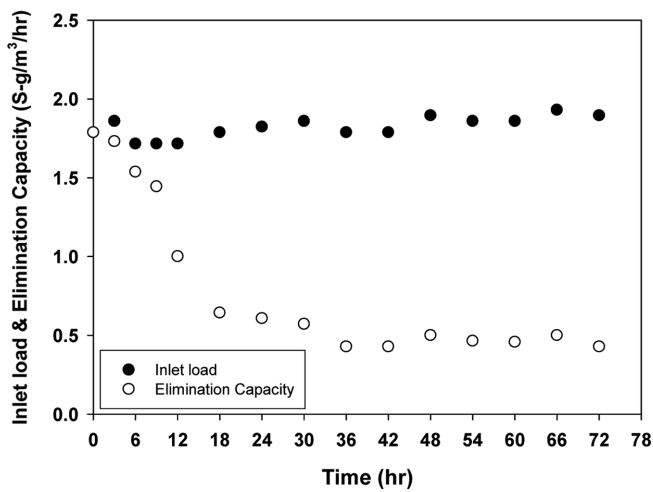


Fig. 10. Time-evolution of inlet load and elimination capacity of hydrogen sulfide of UV/photo-catalytic reactor packed with porous silica bead media.

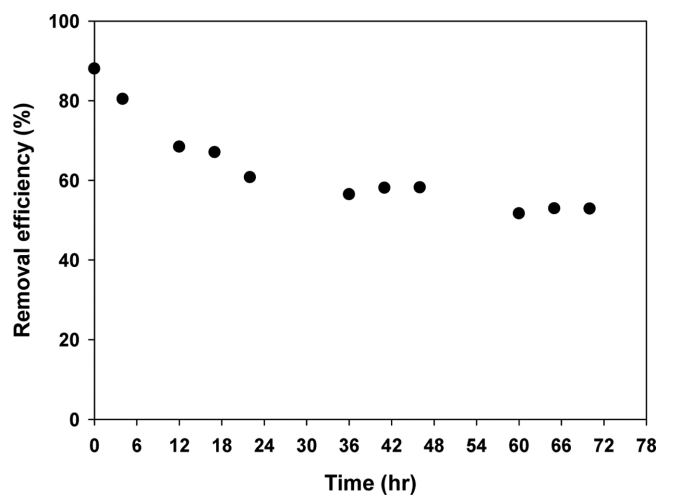


Fig. 13. Time-evolution of toluene removal efficiency with nonporous glass-bead media.

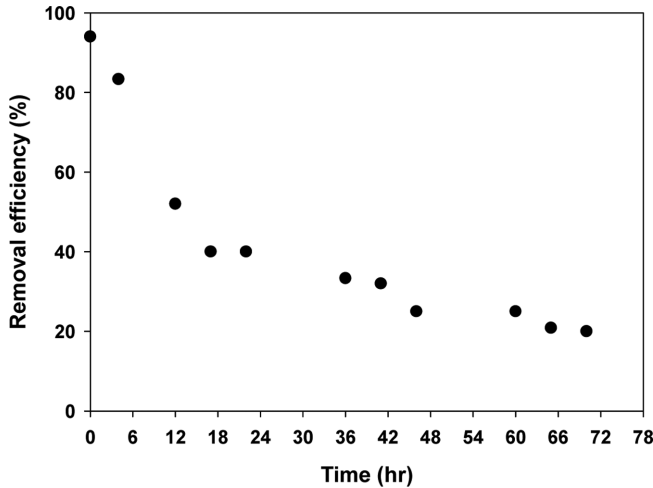


Fig. 14. Time-evolution of hydrogen sulfide removal efficiency with nonporous glass-bead media.

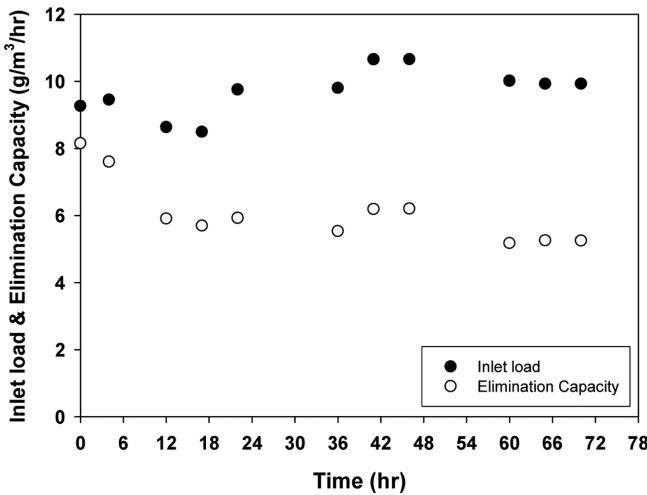


Fig. 15. Time-evolution of inlet load and elimination capacity of toluene of UV/photo-catalytic reactor packed with nonporous glass bead.

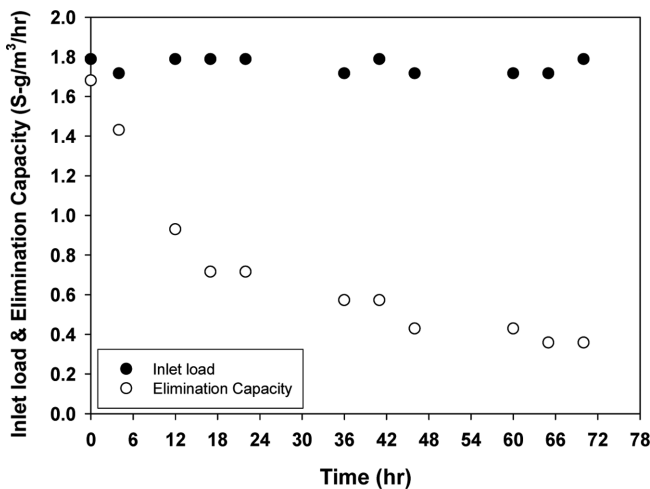


Fig. 16. Time-evolution of inlet load and elimination capacity of hydrogen sulfide of UV/photo-catalytic reactor packed with nonporous glass bead.

Figs. 11,12와 같다. 또한 그에 따른 톨루엔 및 황화수소의 동시처리 효율에 대한 추이는 각각 Figs. 13,14와 같다. 동 실험에서 시간에 따른 톨루엔 및 황화수소의 inlet load 및 elimination capacity의 추이는 각각 Figs. 15,16과 같다. 톨루엔 및 황화수소의 제거효율은 Figs. 13,14에서와 같이 정상상태에서 각각 약 53% 및 19%로 관찰되었다.

3-2-3. 광촉매 처리효율에 대한 광촉매담체 다공성의 영향평가

Porous silica-based 담체가 충전된 광촉매반응기의 경우에 톨루엔 및 황화수소 제거효율은 각각 82% 및 22%로서, glass-bead 담체가 충전된 UV/광촉매반응기의 경우의 톨루엔 및 황화수소 제거효율인 각각 53% 및 19%와 비교하였을 때에 톨루엔의 경우는 약 55% 증가하였고 황화수소의 경우는 약 16% 증가하였다.

4. 결 론

광촉매반응기의 충전제로서 glass bead-광촉매담체를 control로 하고 다공성의 silica-based 광촉매담체를 사용하였을 때의 광촉매 처리효율에 대한 광촉매담체 다공성의 영향평가를 수행하였다. Porous silica-based 광촉매담체의 광촉매 코팅량은 1,716.3 μg/cm²로서 nonporous glass bead(control)에 담지된 광촉매코팅량인 670 μg/cm² 값의 약 250%이었다. 이와 같이 porous silica-based 광촉매담체의 광촉매코팅량이 큰 것은 porous silica-based 광촉매담체의 상대적으로 큰 pore 내부표면적에 기인하였다. Porous silica-based 담체가 충전된 광촉매반응기의 톨루엔 및 황화수소 제거효율은 각각 82% 및 22%로서, glass-bead 담체가 충전된 UV/광촉매반응기의 경우의 톨루엔 및 황화수소 제거효율인 각각 53% 및 19%와 비교하였을 때에 톨루엔의 경우는 약 55% 증가하였고 황화수소의 경우는 약 16% 증가하였다.

감 사

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. Chu, Y. H., Kim, H. J., Song, K. Y., Shul, Y. G., Jung, K. T., Lee, K. and Han, M. H., "Preparation of Mesoporous Silica Fiber Matrix for VOC Removal," *Catal. Today.*, **74**, 249-256(2002).
2. Hung, W. C., Fu, S. H., Tseng, J. J., Chu, H. and Ko, T. H., "Study on Photocatalytic Degradation of Gaseous Dichloromethane Using Pure and Iron Ion-doped TiO<sub>2</sub> Prepared by the Sol-gel Method," *Chemosphere*, **66**, 2142-2151(2007).
3. Bouazza, N., Lillo-Rodenas, M. A. and Linares-Solano, A., "Enhancement of the Photocatalytic Activity of Pelletized TiO<sub>2</sub> for the Oxidation of Propene at Low Concentration," *Appl. Catal.*, **B 77**, 284-293(2008).
4. Bouazza, N., Lillo-Rodenas, M. A. and Linares-Solano, A., "Photocatalytic Activity of TiO<sub>2</sub>-based Materials for the Oxidation of Propene and Benzene at low Concentration in Presence of Humidity," *Appl. Catal.*, **B 84**, 691-698(2008).
5. 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).
6. Lee, E. J. and Lim, K. H., "Treatment of Malodorous Waste Air Using Hybrid System," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONG-HAK)*, **48**(3), 382-390(2010).
  7. Yang, L. and Liu, Z., "Study of Light Intensity in the Process of Photocatalytic Degradation of Indoor Gaseous Formaldehyde for Saving Energy," *Energy Conv. Manag.*, **48**, 882-889(2007).
  8. Neti, N. R., Parmar, G. R., Bakardjieva, S. and Subrt, J., "Thick Film Titania on Glass Supports for Vapour Phase Photocatalytic Degradation of Toluene, Acetone, and Ethanol," *J. Chem. Eng.*, **163**, 219-229(2010).
  9. Bouzaza, A. and Laplanche, A., "Photocatalytic Degradation of Toluene in the Gas Phase: Comparative Study of some TiO<sub>2</sub> Supports," *J. Photochem. Photobiol.*, A **150**, 207-212(2002).
  10. Puddu, V., Choi, H., Dionysiou, D. D. and Puma, G. L., "TiO<sub>2</sub> Photocatalyst for Indoor Air Remediation: Influence of Crystallinity Crystal Phase, and UV Radiation Intensity on Trichloroethylene Degradation," *Appl. Catal.*, B **94**, 211-218(2010).
  11. Kim, S. B., Hwang, H. T. and Hong, S. C., "Photocatalytic Degradation of Volatile Organic Compounds at the Gas-solid Interface of a TiO<sub>2</sub> Photocatalyst," *Chemosphere*, **48**, 437-444(2002).
  12. Sanchez, B., Coronado, J. M., Caudal, R., Portela, R., Tejedor, I., Anderson, M. A., Tompkins, D. and Lee, T., "Preparation of TiO<sub>2</sub> Coatings on PET Monoliths for the Photocatalytic Elimination of Trichloroethylene in the Gas Phase," *Appl. Catal.*, B **66**, 295-301(2006).