

## TiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 기상 VOCs 흡착 특성 평가 및 다양한 구조체로의 성형을 통한 열적 내구성 확보에 관한 연구

황인혁<sup>1</sup>, 이상문<sup>2</sup>, 김성수<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과  
경기도 수원시 영통구 광교산로 154-42(이의동)  
<sup>2</sup>경기대학교 환경에너지공학과  
경기도 수원시 영통구 광교산로 154-42(이의동)

(2018년 7월 7일 접수; 2018년 7월 25일 수정본 접수; 2018년 7월 26일 채택)

## A Study on the Evaluation of Adsorption Characteristics of VOCs on TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Investigation of the Thermal Durability by Molding Various Structures

In-Hyuck Hwang<sup>1</sup>, Sang Moon Lee<sup>2</sup>, and Sung Su Kim<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Energy Engineering, Graduate school of Kyonggi University  
154-42, Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16227, Korea  
<sup>2</sup>Department of Environmental Energy Systems Engineering, Kyonggi University  
154-42, Gwanggyosan-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16227, Korea

(Received for review July 7, 2018; Revision received July 25, 2018; Accepted July 26, 2018)

### 요 약

본 연구에서는 금속산화물 2종, TiO<sub>2</sub> 분말과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말을 이용하여 건식 조건에서의 기상 VOCs 흡착 성능을 평가하였으며, BET분석과 암모니아 *in-situ* FT-IR 분석을 통해 비표면적, 표면 산점을 분석하고 성능과의 상관성을 평가하였다. 그 결과 TiO<sub>2</sub> 분말, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말은 각각 317.6 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, 64 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>의 비표면적을 갖으며, TiO<sub>2</sub> 분말의 경우 표면에 다수의 산점이 관찰되었다. 두 금속 산화물 분말을 이용하여 기상 VOCs 흡착 성능을 평가한 결과, 비표면적이 크고 다수의 산점을 보유한 TiO<sub>2</sub> 분말이 비교적 우수한 흡착 성능을 나타내었다. 특히 비표면적이 흡착성능에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단되며, 산점에 의한 영향에 대해서는 추가적인 연구가 요구된다. 우수한 흡착 성능을 나타낸 TiO<sub>2</sub>를 기반으로 honeycomb, hollow fiber, disc의 성형체로 제조 한 결과, 분말보다 흡착 성능은 낮았으나 적용성 측면에서 유리하며 제조공정의 특성상 우수한 열적 내구성을 갖는 polymeric disc 흡착제의 경우, 수회의 고온 탈착공정 후에도 흡착 성능을 안정적으로 유지함을 확인하였다.

**주제어** : 휘발성유기화합물, 금속산화물, 흡착제

**Abstract** : In this study, the adsorption performance of vapor phase VOCs under dry conditions was evaluated by using two metal oxides, TiO<sub>2</sub> powder and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder. BET analysis and ammonia *in-situ* FT-IR analysis were used to analyze specific surface area and surface acid site. As a result, TiO<sub>2</sub> powder and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder had a specific surface area of 317.6 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> and 64 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, respectively. In the case of TiO<sub>2</sub> powder, many acid sites were observed on the surface. As a result of evaluating the vapor phase VOCs adsorption performance using two metal oxide powders, TiO<sub>2</sub> powder having a relatively large specific surface area and a large number of acid sites exhibited relatively good adsorption performance. In particular, it is considered that the specific surface area directly affects the adsorption performance, and further study on the effect of the acid site is required. Based on the TiO<sub>2</sub> exhibited excellent adsorption performance, it manufactured into various forms of honeycomb, hollow fiber and disc. As a result, the adsorption performance was lower than that of the powder, but it is advantageous in view of applicability. In addition, it was confirmed that the disc adsorbent having excellent thermal durability due to the characteristics of the manufacturing process stably maintains adsorption performance even at a high temperature desorption process several times.

**Keywords** : Volatile organic compounds, Metal oxide, Adsorbents

\* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sskim@kyonggi.ac.kr; Tel: +82-31-249-9741; Fax: +82-31-248-3987

doi: 10.7464/ksct.2018.24.4.280 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

휘발성 유기 화합물(volatile organic compounds, VOCs)은 미국 환경 보호청(EPA)에 의해 carbon monoxide, carbon dioxide, carbonic acid, metallic carbides 및 carbonates를 제외한 대기 중의 광화학 반응에 관여하는 모든 탄소 화합물로 정의된다. VOCs의 정의는 국가마다 서로 상이하지만 모두 광촉매 반응과 관련하여 낮은 끓는점, 높은 증기압 및 강한 반응성 등 일반적인 특성을 갖는다. 이러한 VOCs는 인위적 또는 자연적으로 배출되는데, 산업의 발달로 인해 인위적 배출량이 급격히 증가하고 있다. 중국의 경우 산업체에서 배출되는 VOCs의 양이 1980년 이후 연평균 8.5% 증가하였으며, 2010년에는 1.15 Tg에서 2010년에는 13.35 TTU로 증가하였다[1]. 산업체 뿐만 아니라 조리, 흡연을 포함한 거의 대부분의 생활공간에서 VOCs가 발생될 수 있기 때문에 그 영향이 점차 확대되고 있다[2]. 대부분의 VOCs는 인간 건강과 생태 환경에 유해한 것으로 알려져 있는데, 특히 방향족 화합물인 벤젠, 톨루엔 및 에틸벤젠 등은 독성 및 발암성을 나타낸다. 이러한 방향족 화합물에 낮은 농도로 노출될 경우 피로감, 메스꺼움, 식욕 상실, 기억력 및 시력 감퇴 등을 유발할 수 있으며, 고농도로 노출될 경우 의식 불명, 어지럼증, 심지어 사망에까지 이를 수 있다[3-5]. 인체 영향 외에도 벤젠, 톨루엔과 같은 방향족 VOCs는 성층권 오존층 파괴에 기여하는 주요 원인물질로 취급된다[6,7].

이러한 VOCs를 제어하기 위해 다양한 방법이 제시되었는데, 일반적으로 VOCs의 회수 여부에 따라 회수법과 파괴법으로 구분할 수 있다. 회수법에는 흡착, 응축, 흡수 및 막 분리가 포함되며 파괴법에는 소각, 광촉매 산화, 오존 촉매 산화, 플라즈마 촉매 및 생물학적 분해 등이 포함된다. VOCs를 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 전환시키는 파괴법의 경우 2차 오염물의 발생, 고온의 반응조건에 따른 에너지 소비 등의 이유로 회수법이 보다 경제적인 기술로 알려져 있으며, 그 중에서도 특히 저비용, 고효율의 흡착 기술이 가장 유리한 방법 중의 하나로 간주되어 왔다[8,9].

현재까지 VOCs 흡착제에 관한 연구가 다수 수행되었다[10-13], 특히 비표면적이 넓고 복잡한 세공구조 및 소수 특성을 갖는 활성탄을 기반으로 한 연구가 가장 많이 수행되었으며, 우수한 성능을 검증받아 산업 현장에서 가장 널리 사용되고 있다. 하지만 carbon이 주요 성분인 활성탄의 경우 재사용을 위한 가열 탈착공정을 수행할 경우 일정 온도 이상에서 carbon이 산화되어 소실되어 재사용이 불가능하다는 문제점이 있다. 금속산화물의 경우 대부분 녹는점이 고온 탈착 공정의 운전 온도 이상으로 매우 높기 때문에 위와 같은 carbon 산화 문제에 대한 대안이 될 수 있다. 최근 금속산화물을 이용한 VOCs 제어에 관한 몇몇 연구가 수행되었으나 대부분 촉매 산화 특성과 관련된 연구 혹은 carbon 기반 흡착소재의 개질에 관한 연구이며[14,15], 흡착 및 흡착제의 열적 내구성에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 비교적 고온에서 안정적인 금속산화

물 2종, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 TiO<sub>2</sub>를 사용하여 VOCs 흡착 성능을 평가하고, VOCs 흡착 성능에 영향을 미칠 수 있는 흡착제의 물성을 고찰하였으며, 다양한 형태로 성형하여 성형체 형태와 흡착 특성간의 상관성을 평가하였다. 또한 제조된 흡착소재를 VOCs에 대하여 흡착 및 고온 탈착을 반복적으로 수행하여 열적 내구성 및 재사용 가능성을 평가하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 흡착제 제조

#### 2.1.1. 분말

본 연구에서는 녹는점이 매우 높은 대표적인 금속산화물인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 TiO<sub>2</sub>를 사용하였다. 각각의 시약은 Alfa aesar Co.의  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Millenium Co.의 TiO<sub>2</sub> (G-5)를 사용하였으며, 각각의 분말 흡착제는 고정층 반응기 내부에서의 압력 구배를 최소화하기 위하여 Carver Co.의 유압프레스를 사용하여 10,000 lb의 세기로 압축한 후 40 ~ 50 mesh 규격으로 크기를 일정하게 거름하여 사용하였다.

#### 2.1.2. 성형체

흡착제로써 공정에 적용되기 위해서는 분말이 아닌 일련의 형태를 갖는 소재로의 성형이 요구된다. 본 연구에서는 총 세 가지(honeycomb, hollow fiber, disc) 형태의 성형체를 제조하여 그 특성을 평가하였다. Honeycomb의 경우 Sigma-aldrich Co.의 LUDOX HS-40을 binder로 하여 제조한 TiO<sub>2</sub> coating solution에 담금법을 반복적으로 수행하여 일정 중량만큼 코팅되도록 한 후, 400 °C에서 2시간 동안 열처리하여 제조하였다. 또한 hollow fiber는 비용매상전이법을 이용하여 제조하였으며, 제조 과정은 다음과 같다. 용매로 사용되는 Sigma-aldrich Co.의 NMP, 고분자 물질인 solvay Co.의 polysulfone, TiO<sub>2</sub> (G-5), 첨가제인 Sigma-aldrich Co.의 polyvinylpyrrolidone를 중량비로 50 : 17 : 32 : 1가 되도록 혼합하여 교반한 후, hollow fiber 노즐을 이용하여 제조된 슬러리와 내부응고액인 증류수를 동시에 주입하며 방사하였다. 방사된 hollow fiber는 외부 응고액과 충분히 반응할 수 있도록 6시간 이상 유지하였고, 제조가 완료된 TiO<sub>2</sub> hollow fiber는 길이 약 5 mm로 균일하게 절단하여 사용하였다. Disc의 경우 hollow fiber와 같은 원리로 제조되지만, 노즐을 사용하지 않고 슬러리를 외부응고액에 직접적으로 투입하여 외부에서만 상전이가 이루어지도록 하였다. 외부응고액과 충분히 반응된 polymeric disc는 900 °C에서 2시간 소성하여 polymer의 대부분을 기화시켜 최종적으로 TiO<sub>2</sub> disc의 형태로 제조하였다.

### 2.2. 흡착제 성능 평가

흡착제의 VOCs 흡착성능 평가는 상온 고정층 반응기에서 수행되었으며, 공정의 모식도는 Figure 1과 같다. 제거 대상 물질은 대표적인 VOCs, toluene을 사용하였고, balance gas로는 고순도 N<sub>2</sub>를 사용하였다. VOCs 및 balance gas는 MKS Co.

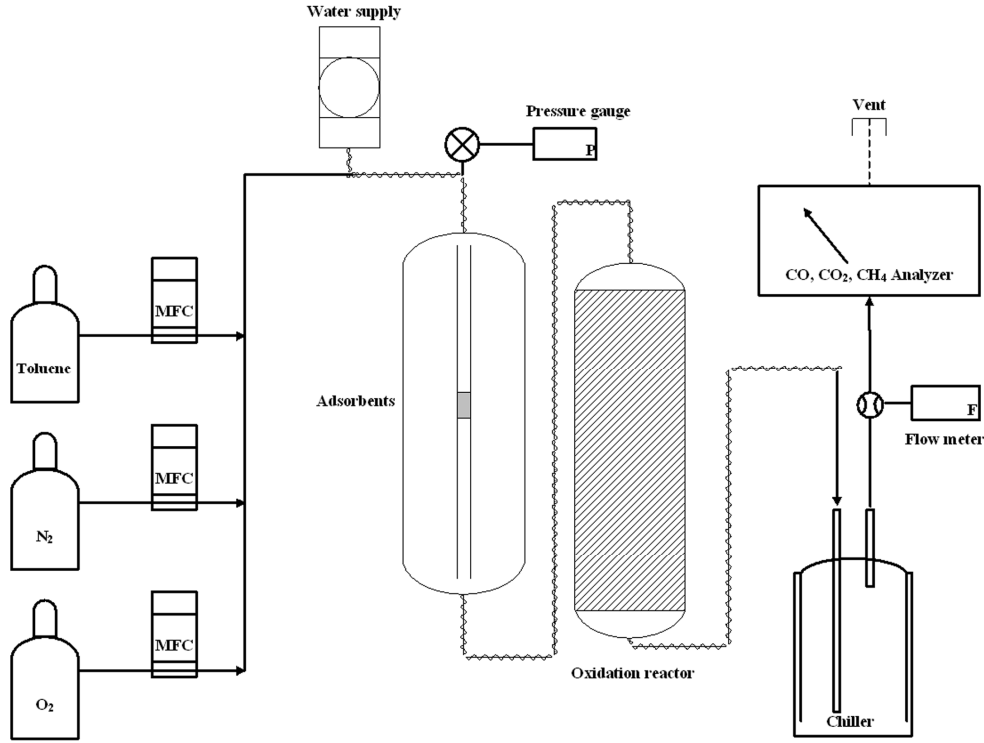


Figure 1. Schematic of adsorption test reactor.

의 Mass Flow Controller를 이용하였으며 50 ppm toluene, 21% O<sub>2</sub>, 0% R.H. (Relative Humidity) 조건에서 운전하였다. 공급되는 총 유량은 1,000 cc min<sup>-1</sup>으로 하였고, 충전되는 흡착제는 1 mL로 하여 총 공간속도가 60,000 hr<sup>-1</sup>가 되도록 하였다.

충진된 흡착제에 흡착되지 못하고 배출되는 VOCs는 흡착 반응기 직 후단에 설치된 고온 산화 반응기에서 100% CO<sub>2</sub>로 전환된다. 전환된 CO<sub>2</sub>는 산화 반응기 후단의 Fuji electric Co.의 infrared gas analyser를 이용하여 정량적으로 농도를 측정하였으며, 이를 역산하여 흡착된 VOCs 양을 계산하였다.

흡착제의 열적 내구성 평가를 위한 탈착 시험은 tube furnace를 이용하여 800 °C에서 고순도 N<sub>2</sub>를 500 cc min<sup>-1</sup>의 유량으로 주입하며 2시간 동안 수행하였다.

### 2.3. 흡착제 특성 분석

흡착소재의 표면 기공을 분석하기 위해 주사전자현미경 (scanning electron microscopy, SEM)분석을 수행하였고, 비표면적을 분석하기 위해 Mitromeritics Co.의 Tristar II 3020를 사용하여 BET분석을 수행하였다. 또한, 표면 산점 분석을 위해 ThermoFisher scientific Co.의 Nicolet is10 FT-IR spectrometer를 이용하여 *in-situ* FT-IR분석을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 금속산화물 흡착제의 기상 VOCs 흡착 특성

Carbon 기반의 활성탄 흡착제의 기존 문제점을 해결하고자 1800 °C 이상의 매우 높은 녹는점을 갖는 금속산화물 2종,

TiO<sub>2</sub> 분말과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말의 toluene 흡착 성능을 평가한 결과와 BET 분석 결과를 각각 Figure 2와 Table 1에 나타내었다. BET 분석 결과에 따르면 TiO<sub>2</sub> 분말은 317.6 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>이 비표면적을 갖고, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말은 64 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>의 비표면적을 갖는다. 일반적으로 흡착제의 비표면적이 넓을수록 다수의 흡착점을 확보할

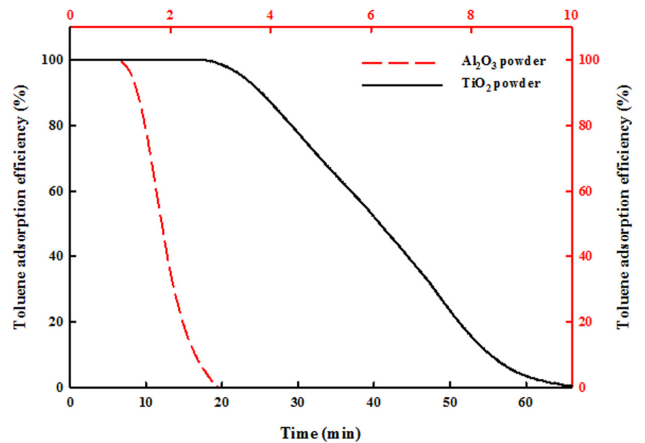


Figure 2. Comparison of adsorption performance of VOCs between TiO<sub>2</sub> powder and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder.

Table 1. BET analysis results of TiO<sub>2</sub> powder and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder

Type of metal oxides	Surface area (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )
TiO <sub>2</sub>	317.6
γ - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	64

수 있기 때문에 우수한 흡착 성능을 나타낼 수 있다[16,17]. 본 연구에서 수행한 VOCs 흡착실험 조건에서 역시 비표면적이 넓은 TiO<sub>2</sub> 분말이 비교적 우수한 성능을 나타내었으며, TiO<sub>2</sub> 분말과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말에 대한 VOCs의 비흡착량은 각각 1.83 mg g<sup>-1</sup>, 0.04 mg g<sup>-1</sup>으로 비표면적 차이와 거의 유사한 경향을 나타내었다.

TiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 물리화학적 특성 차이는 비표면적 외에도 환원성질로 구분 가능하다. TiO<sub>2</sub>는 대표적인 환원성 물질로써 표면 전자밀도 차이에 따라 루이스 산점, 브뢴스테드 산점이 형성될 수 있다. 이러한 산점은 흡착 메커니즘에서 주요한 흡착점으로 작용될 수 있다. 앞서 흡착소재의 흡착 성능과 표면 산점간의 상관성에 대한 연구가 다수 수행되어졌는데, 특히 수중에 존재하는 비소의 경우 흡착제 표면의 산점에서의 이온 교환 메커니즘에 의해 흡착이 발생하며, 해당 산점이 흡착 효율에 결정적인 영향 인자로서 작용하는 것으로 보고되고 있다[18,19].

본 연구에서는 사용된 2종의 금속산화물 TiO<sub>2</sub> 분말과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말의 표면 산점을 분석하기 위해 대표적인 루이스 산점, 브뢴스테드 산점 측정 방법인 암모니아를 이용한 *in-situ* FT-IR 분석을 수행하였다. 그 결과 Figure 3에서 확인할 수 있듯 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

분말과는 다르게 TiO<sub>2</sub> 분말에서 다수의 피크가 관찰되었다. 1430, 1670, 2808, 3019 cm<sup>-1</sup>에서 관찰되는 피크들은 각각 브뢴스테드 산점을, 1605, 3070, 3256, 3364 cm<sup>-1</sup>에서 관찰되는 피크들은 각각 루이스 산점의 존재를 대별한다[20]. 앞서 BET 분석 결과와 해당 산점 분석 결과를 고려하였을 때, 흡착 성능과 비표면적의 크기가 매우 선형적으로 잘 부합하기에, 흡착 성능에 결정적인 영향을 미치는 인자는 비표면적으로 판단되며, TiO<sub>2</sub> 분말 표면에 형성된 산점이 기상 VOCs 흡착에 결정적인 영향을 미치는 인자는 아닌 것으로 생각된다. 하지만 수분 유무에 따라 루이스 산점 및 브뢴스테드 산점으로 전환되는 산점의 형성 원리 특성상 반응 조건에서의 습도가 매우 지대한 영향을 미칠 것으로 생각되기에, 습식 운전조건에서의 상관성 평가가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2. TiO<sub>2</sub> 기반 다양한 성형체의 기상 VOCs 흡착 특성

앞서 우수한 VOCs 흡착 성능을 나타낸 TiO<sub>2</sub> 분말을 기반으로 하여 실제 흡착 공정에 적용할 수 있도록 다양한 형태의 성형체로 제조하여 각각의 VOCs 흡착 성능을 비교한 결과를 Figure 4와 Table 2에 나타내었다.

Figure 4에서는 분말 형태의 흡착제와 비교하였을 때 제조된 성형체가 대부분 낮은 흡착 효율을 나타내었다. 이는 소재를 성형함에 따라 powder와 비교하였을 때 VOCs와 접촉할 수 있는 흡착점의 수가 감소하였기 때문으로 판단할 수 있으며, 특히 honeycomb의 경우 channelling effect에 의해 흡착에 매

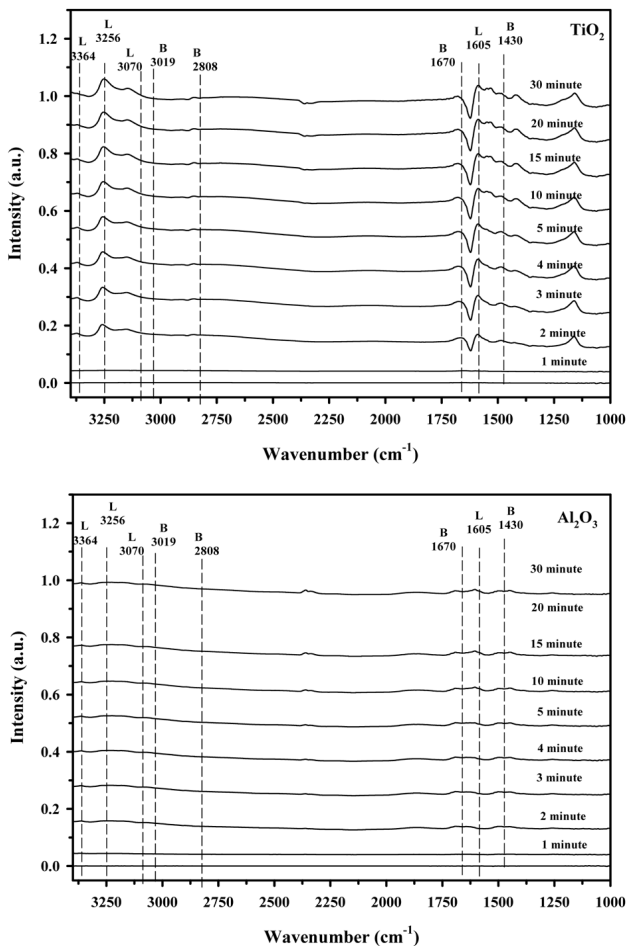


Figure 3. Ammonia in situ FT-IR analysis results of TiO<sub>2</sub> powder and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder.

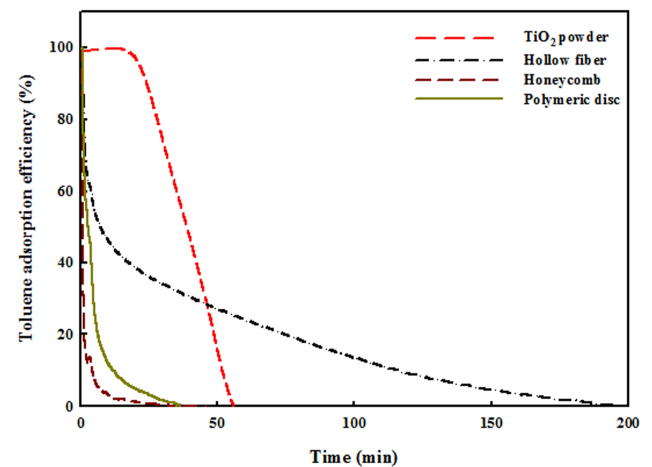


Figure 4. Comparison of VOCs adsorption performance of various form of TiO<sub>2</sub>-based adsorbents.

Table 2. Adsorption amount of VOCs adsorbed per unit weight of various type of TiO<sub>2</sub>-based adsorbents

Type of adsorbents	X/M (mg g <sup>-1</sup> )
TiO <sub>2</sub> powder	1.83
Hollow fiber	0.82
Honeycomb	0.24
Polymeric disc	0.12



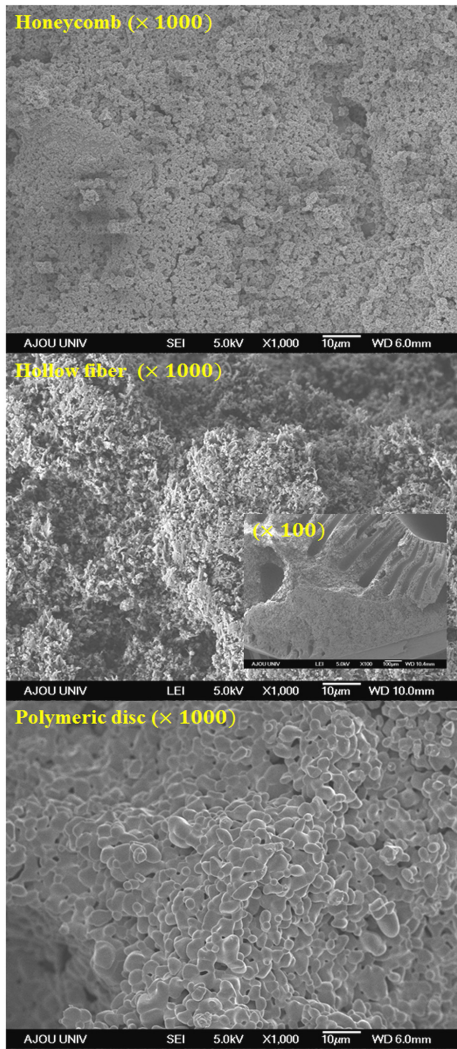


Figure 5. SEM analysis results of various type of TiO<sub>2</sub>-based adsorbents.

우 불리한 유동 조건이 형성되었을 것으로 추측된다. Hollow fiber 흡착제의 경우 TiO<sub>2</sub> 분말보다 흡착 성능은 낮았지만, 흡착이 진행되는 시간 측면에서는 약 4배 길게 지속되었는데, 이러한 현상은 hollow fiber 소재의 구조적 특성에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. Hollow fiber는 소재의 제조 원리 특

성상 외벽과 내벽, 그리고 bulk에 기공이 다수 형성된다. 특히 bulk에 형성되는 기공은 finger-like 구조와 sponge-like 구조로 구분된다. 이러한 기공 구조는 소재 제조 시 사용되는 용매인 NMP와 내부, 외부응고액으로 사용되는 비용매인 증류수가 교환되는 속도에 따라 다르게 형성되는데, 교환 속도가 빠르면 거대기공을 갖는 finger-like 구조를, 교환 속도가 느리면 미세기공을 갖는 sponge-like 구조를 형성한다. 위의 Figure 5(B)에서 hollow fiber 소재의 내벽에는 finger-like 구조, 외벽에는 sponge-like 구조가 형성된 것을 확인할 수 있는데, 흡착 반응 조건의 특성상 hollow fiber 외벽으로 가스가 접촉하기 때문에 내부의 기공까지 확산 저항이 비교적 크며, 이에 따라 비교적 흡착 속도가 느린 것으로 판단할 수 있다.

### 3.3. TiO<sub>2</sub> 기반 성형체의 재사용 가능성 평가

앞서 평가한 성형된 흡착소재 중 비용매상전이법을 이용하여 제조한 disc 형태의 흡착소재는 900 °C의 고온에서 열처리를 수행함에 따라 열적 내구성이 매우 우수하다. 이러한 특성은 흡착소재의 재사용을 위한 TSA와 같은 고온 탈착공정에서 큰 이점으로 작용할 수 있다. 기존 상용화되어있는 활성탄과 같은 carbon 기반 흡착소재는 carbon의 열화 특성에 의해 고온에서 일부가 소실된다. Table 3에 활성탄의 고온 탈착공정에 따른 무게 변화를 나타내었다. 고온에 노출됨에 따라 무게가 점차 감소하여 2회 노출 후 초기 대비 약 35%의 중량이 감소되었으며, 또한 Figure 6의 SEM 분석 결과에서 볼 수 있듯 고온 노출에 의한 소재의 소결현상이 관찰되었고, 소재의 소결에 의해 표면에 존재하던 다수의 기공이 대부분 사라진 것을 확인할 수 있다. 위와 같은 활성탄의 중량 및 물성의 변화는 흡착성능 저하에 크게 영향을 미치는데, 실제로 Figure 7에서 볼 수 있듯 탈착공정 이후에 활성탄의 흡착성능이 저하되었다. 반면 TiO<sub>2</sub>를 기반으로 제조한 disc 형태 흡착제의 경우 흡탈착 횟수가 증가함에 따라 흡착 성능 저하가 발생하지 않았고, 오히려 흡착 성능이 다소 증가하는 경향을 보였다 (Figure 8). 이는 TiO<sub>2</sub>를 기반으로 제조한 disc 형태 흡착제의 우수한 열적 내구성에 의해 소재 변형이 일어나지 않았음을 의미하며, 다소 증가한 흡착성능은 900 °C의 고온 열처리 시 완전히 제거되지 못한 내부의 polymer가 고온 탈착공정에서 제거되며 생성된 미량의 미세 기공에 의한 것으로 판단된다.

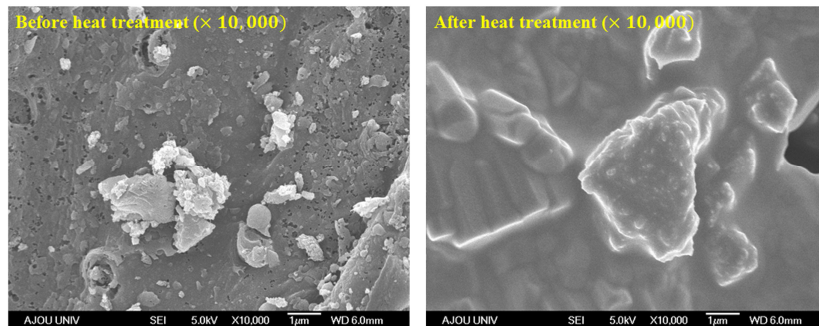


Figure 6. SEM analysis results of activated carbon before and after heat treatment.

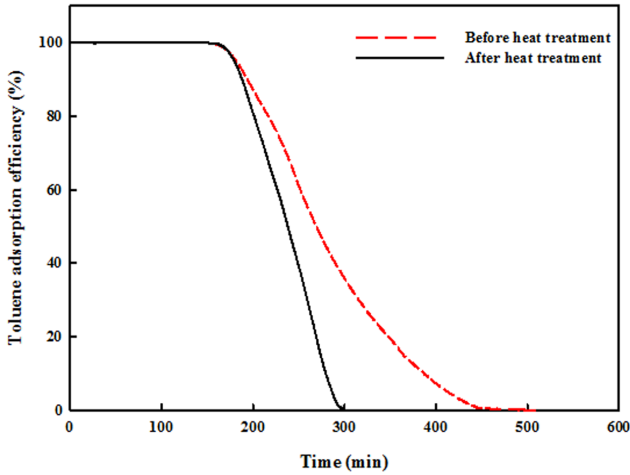


Figure 7. Performance comparison of activated carbon before and after heat treatment.

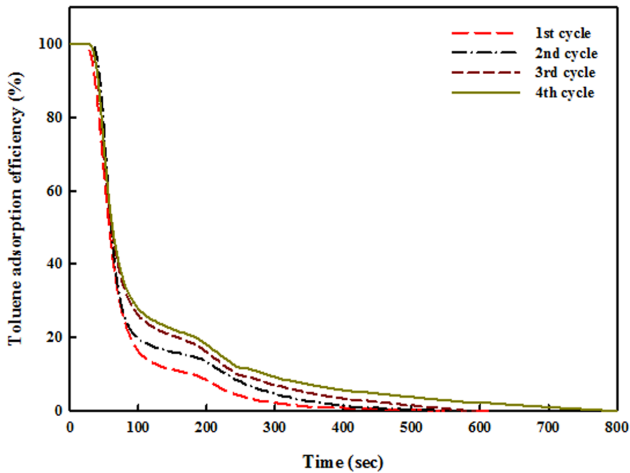


Figure 8. Performance comparison of TiO<sub>2</sub> disc before and after heat treatment.

Table 3. Comparison of weight of activated carbon before and after heat treatment

Type of adsorbents	Initial (g)	After 1st heat treatment	After 2nd heat treatment
Activated carbon	1.1528	0.9325	0.7518

#### 4. 결론

본 연구에서는 우수한 열적 내구성을 갖는 금속산화물 2종, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말과 TiO<sub>2</sub> 분말에 대하여 비표면적 및 표면의 전자밀도와 건식 운전조건에서의 기상 VOCs 흡착 성능과의 상관성을 분석하고자 하였으며, 비교적 우수한 성능을 나타낸 TiO<sub>2</sub> 분말을 다양한 형태의 성형체로 제조하고 흡탈착 특성 및 열적 내구성을 평가하여 기존 carbon 기반 활성탄 흡착제 열화 문제점의 해결 가능성을 평가하고자 하였다. 본 연구의

결론은 다음과 같다.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말과 TiO<sub>2</sub> 분말의 비표면적 분석 결과 TiO<sub>2</sub> 분말의 비표면적이 비교적 우수하였으며, 기상 VOCs의 흡착 성능과 비표면적 분석 결과가 선형적으로 매우 잘 부합하였다. 또한 암모니아 *in-situ* FT-IR 분석 결과에 따라 TiO<sub>2</sub> 분말 표면에서 다수의 산점이 관찰되었으나, 건식 반응조건에서는 기상 VOCs의 흡착 성능에 결정적인 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

TiO<sub>2</sub>를 이용하여 다양한 형태로 성형한 흡착소재들은 낮은 비표면적 및 구조적 특징에 의해 분말보다 낮은 기상 VOCs 흡착성을 나타내었으나, 비용매상전이법을 기반으로 제조된 disc 형태의 흡착소재는 제조공정 특성 상 고온의 열처리를 수반하기에 열적 내구성이 매우 우수하여, 수회의 흡탈착 평가 후에도 성능을 유지할 수 있기에 재사용이 충분히 가능하다. 또한 소재 제조 공정의 최적화를 통해 성능 증진이 가능하기에 기존 활성탄을 대체할 수 있는 소재로서 기대할 수 있다.

#### 감사

본 연구는 2018학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

#### References

1. Qiu, K., Yang, L., Lin, J., Wang, P., Yang, Y., Ye, D., and Wang, L., "Historical Industrial Emissions of Non-Methane Volatile Organic Compounds in China for the Period of 1980-2010," *Atmos. Environ.*, **86**, 102-112 (2014).
2. Wang, H., Nie, L., Li, J., Wang, Y., Wang, G., Wang, J., and Hao, Z., "Characterization and Assessment of Volatile Organic Compounds (vocs) Emissions from Typical Industries," *Chin. Bull.*, **58**, 724-730 (2013).
3. Main, D. M., and Hogan, T. J., "Health Effects of Low-Level Exposure to Formaldehyde," *J. Occup. Environ. Med.*, **25**, 896-900 (1983).
4. Kamal, M. S., Razzak, S. A., and Hossain, M. M., "Catalytic Oxidation of Volatile Organic Compounds (vocs) - A Review," *Atmos. Environ.*, **140**, 117-134 (2016).
5. Yu, C., and Crump, D., "A Review of the Emission of vocs from Polymeric Materials Used in Buildings," *Build. Environ.*, **33**, 357-374 (1998).
6. Kim, S. C., and Shim, W. G., "Catalytic Combustion of VOCs over a Series of Manganese Oxide Catalysts," *Appl. Catal. B: Environ.*, **98**, 180-185 (2010).
7. Suib, S. L., "New and Future Developments in Catalysis: Catalysis for Remediation and Environmental Concerns," Elsevier Amsterdam, The Netherlands, (2013).
8. Wang, S., Zhang, L., Long, C., and Li, A., "Enhanced Adsorption and Desorption of VOCs Vapor on Novel Micro-Mesoporous Polymeric Adsorbents," *J. Colloid Interf. Sci.*, **428**, 185-190 (2014).

9. Serna-Guerrero, R., and Sayari, A., "Applications of Pore-Expanded Mesoporous Silica. 7. Adsorption of Volatile Organic Compounds," *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 4761-4766 (2007).
10. Alslaibi, T. M., Abustan, I., Ahmad, M. A., and Foul, A. A., "A Review: Production of Activated Carbon from Agricultural Byproducts via Conventional and Microwave Heating," *J. Chem. Technol. Biot.*, **88**, 1183-1190 (2013).
11. Shafeeyan, M. S., Daud, W. M. A. W., Houshmand, A., and Shamiri, A., "A Review on Surface Modification of Activated Carbon for Carbon Dioxide Adsorption," *J. Anal. Appl. Pyrol.*, **89**, 143-151 (2010).
12. Yin, C. Y., Aroua, M. K., and Daud, W. M. A. W., "Review of Modifications of Activated Carbon for Enhancing Contaminant Uptakes from Aqueous Solutions," *Sep. Purif. Technol.*, **52**, 403-415 (2007).
13. Suhas, P. J. M., Carrott, M. M. L., and Carrott, R., "Lignin - from Natural Adsorbent to Activated Carbon: a Review," *Bioresour. Technol.*, **98**, 2301-2312 (2007).
14. Kim, S. C., "The Catalytic Oxidation of Aromatic Hydrocarbons over Supported Metal Oxide," *J. Hazard. Mater.*, **91**, 285-299 (2002).
15. Baur, G. B., Yuranov, I., and Kiwi-Minsker, L., "Activated Carbon Fibers Modified by Metal Oxide as Effective Structured Adsorbents for Acetaldehyde," *Catal. Today*, **249**, 252-258 (2015).
16. Figueiredo, J. L., Pereira, M. F. R., Freitas, M. M. A., and Órfão, J. J. M., "Modification of the Surface Chemistry of Activated Carbons," *Carbon*, **37**, 1379-1389 (1999).
17. Shen, W., Li, Z., and Liu, Y., "Surface Chemical Functional Groups Modification of Porous Carbon," *Recent Pat. Chem. Eng.*, **1**, 27-40 (2008).
18. Yazdani, M. R., Tuutjarvi, T., Bhatnagar, A., and Vahala, R., "Adsorption Removal of Arsenic (V) from Aqueous Phase by Feldspars: Kinetics, Mechanism, and Thermodynamic Aspects of Adsorption," *J. Mol. Liq.*, **214**, 149-156 (2016).
19. Li, Y., Cai, X., Guo, J., and Na, P., "UV-Induced Photoactive Adsorption Mechanism of Arsenite by Anatase TiO<sub>2</sub> with High Surface Hydroxyl Group Density," *Colloid Surf. A: Physicochem. Eng. Aspect*, **462**, 202-210 (2014).
20. Lee, S. M., Kim, S. S., and Hong, S. C., "Systematic Mechanism Study of the High Temperature SCR of NO<sub>x</sub> by NH<sub>3</sub> over a W/TiO<sub>2</sub> Catalyst," *Chem. Eng. Sci.*, **70**, 177-185 (2012).