

논문

세탁시설에서 배출되는 휘발성 유기화합물 제거를 위한 비탄소성 흡착제 평가

Evaluation of Non-Carbon Adsorbents for the Removal of Volatile Organic Compounds Emitted from Laundry Facilities

김도아, 박정민, 이상섭*

충북대학교 환경공학과

Doah Kim, Jeong Min Park, Sang-Sup Lee*

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University,
Cheongju, Republic of Korea

접수일 2020년 11월 27일
수정일 2021년 1월 8일
채택일 2021년 1월 27일

Received 27 November 2020

Revised 8 January 2021

Accepted 27 January 2021

*Corresponding author

Tel : +82-(0)43-261-2468

E-mail : slee@chungbuk.ac.kr

Abstract Volatile organic compounds (VOCs) are emitted from various sources. Laundry facilities are one of the emission sources located near a residential area. Especially, a high concentration of VOCs is emitted during a dry cleaning process in the laundry facility. An adsorption method has been used for the removal of VOCs from an exhaust gas. Although a carbonaceous adsorbent has been used for VOCs removal, it has a risk of fire and explosion. In this study, non-carbon adsorbents such as mesoporous silica (MCM-41, SBA-15 and KIT-6), activated alumina and aluminum silicate were tested for the adsorption of VOCs from the organic solvent used in the dry cleaning process. A fixed-bed reactor system was used for the adsorption tests at 30°C. The inlet concentration of the solvent vapor was 2,000 ppm ($\pm 10\%$). For some tests, 0.8% water vapor was also injected to investigate the effect of water vapor on the adsorption capacity and the desorption efficiency of the adsorbent. Desorption tests were conducted by injecting fresh air at 30°C after the adsorption tests. Activated alumina was found to be a regenerable adsorbent. Although activated alumina also showed a high adsorption capacity without the injection of water vapor, it showed a significant decrease in the adsorption capacity with the injection of water vapor. MCM-41, SBA-15 and KIT-6 showed lower desorption efficiencies than activated alumina. Considering the high costs of MCM-41, SBA-15 and KIT-6, those adsorbents may not be applicable the removal of VOCs from the dry cleaning process.

Key words: VOCs, Dry cleaning, Adsorption, Desorption, Adsorbent

1. 서 론

휘발성유기화합물 (volatile organic compounds, VOCs)은 휘발성이 높아 쉽게 증발되며, 대기 중의 화학반응을 통해 오존(O₃), 이차유기 에어로졸 (secondary organic aerosol formation, SOA), 광화학산화물을 생성하는 전구물질이다 (Jeon and Jeon, 2018; Kim and Yoo, 2017; Son *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2001). 환경부 통계에 따르면, 2016년 기준으로 국내에서 배출되는

VOCs의 전체 배출량은 1,024,029 ton으로 생산공정, 도장산업, 이동오염원, 생활밀착형 시설 등에서 배출된다 (KOSIS, 2020). 이 중 유기용제 사용에 의한 VOCs 배출이 558,004 ton으로 전체 배출량의 55%를 차지한다. 이러한 유기용제 사용시설은 도장, 세정, 세탁시설 등이 있다. 유기용제 사용시설 중 하나인 세탁 시설에서는 석유계 용제를 사용하고 있으며 (Park *et al.*, 2016; Lee and Moon, 2009; Roh *et al.*, 2001), 세탁물 건조 과정에서 다양한 물질의 VOCs가 배출된다

(Lee, 2020; Jeong, 2003). 세탁물의 건조 초기에 약 2,000 ppm, 4,800 ppm의 높은 VOCs 농도가 측정되었음을 보고한 연구결과들도 있다. (Lee *et al.*, 2019; Lee and Moon, 2009). 소규모 세탁시설에서는 별도의 방지시설 없이 VOCs가 대기 중으로 배출되어 (Kim and Yoo, 2017) 대기오염을 유발하고, 노란, 데칸, 도데칸, 운테칸 등의 VOCs는 오존생성능력(photochemical ozone creation potential, POCP)과 연관되어 있어 대기 중 광화학반응을 통해 오존 생성 가능성이 있다 (Lee *et al.*, 2016). 또한 실내 작업 종사자들의 건강에 위해를 끼치는 문제점으로 세탁시설과 같은 생활 밀착형 VOCs 배출시설에 대한 실질적인 저감 대책 마련이 요구된다.

배출가스 내의 VOCs 제거 방법으로는 활성탄과 같은 탄소성 흡착제를 사용하여 제거하는 흡착법이 일반적으로 알려져 있다. 그러나 세탁시설과 같은 소규모 배출시설에서 화재 및 폭발의 위험성을 줄이고 안정적으로 적용할 수 있는 비탄소성 흡착제의 사용이 요구된다. 비탄소성 흡착제인 실리카 계열 물질들은 활성탄보다 흡착용량이 낮지만, 탈착이 용이해 지속적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 이 중 SBA-15 (Santa Barbara Amorphous-15), MCM-41 (Mobil Composition of Matter No. 41)은 톨루엔에 대한 흡착 가능성을 보여주었으며, SBA-15의 경우 낮은 온도에서도 탈착이 우수하여 장시간 VOCs 제거에 효율적인 흡착제라는 것을 보여주었다 (Zhang *et al.*, 2012). SBA-15는 두꺼운 세공벽으로 인해 MCM-41보다 큰 VOC 분자 제거에 유리한 것으로 알려져 있으며, VOC에 대해 높은 친화력을 갖는 것으로 보고되었다 (Dou *et al.*, 2011; Kosuge *et al.*, 2007; Vinh-Thang *et al.*, 2005).

VOCs 흡착에 대한 국내외 연구는 BTEX (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene), methyl ethyl ketone, isopropyl alcohol 중심으로 많이 이루어졌다. 반면에, 세탁시설에서 배출되는 세탁용제 성분에 대한 흡착 연구는 매우 부족하다. 따라서 본 연구에서는 세탁시설에서 적용할 수 있는 효율적인 비탄소성 흡착제를 조사하여 제안하고자 한다. 세탁시설에서 고농도의

세탁용제 증기가 배출되는 것을 고려하여 세탁용제 증기 약 2,000 ppm 농도를 고정층 흡착장치에 주입하여 흡착, 탈착 실험을 수행하였다. 비탄소성 흡착제로는 SBA-15, MCM-41, KIT-6, 활성 알루미늄(activated alumina), 규산 알루미늄(aluminum silicate)을 사용하였다. 이 흡착제들의 효율을 평가하기 위하여 VOCs 제거에 상용화된 활성탄에 대해서도 흡탈착 실험을 수행하였다. 또한, 수분의 영향을 조사하기 위하여 건조 조건과 습윤 조건에서도 실험을 수행하여 그 결과를 서로 비교하였다.

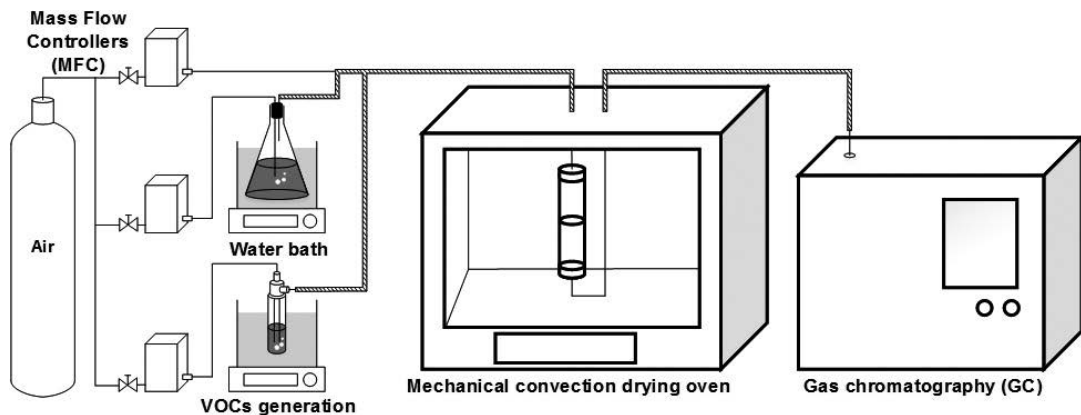
2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

기존 문헌에서 VOCs에 대해 우수한 흡착능력을 가지는 것으로 보고된 비탄소 흡착제를 조사하여 선정하였다. 먼저 중기공이 발달한 실리카 계열인 MCM-41 (Sigma Aldrich, USA), SBA-15 (Sigma Aldrich, USA), KIT-6 (ACS Material LLC, USA)를 사용하였고, 흡착제의 원료로 주로 사용되는 활성 알루미늄(M&E Tech, Korea), 규산 알루미늄(M&E Tech, Korea)을 사용하였다. MCM-41, SBA-15, KIT-6, 규산 알루미늄, 활성 알루미늄의 구매가격은 각각 g당 58,400원, 71,200원, 22,800원, 17원, 14원이다. 비탄소성 흡착제의 효율을 평가하기 위하여 VOCs 흡착에 상용화된 야자각 원료 활성탄(SYG, SCT CO., LTD, Korea)을 사용하여 실험 결과를 서로 비교하였다. 실험에 사용되는 흡착제의 표면 특성은 비표면적 분석기(BELSORP-mini, BEL Japan, Inc., Japan)를 이용하여 분석하였고, 그 결과는 표 1에 나타내었다. 비탄소성 흡착제 중 MCM-41은 가장 높은 비표면적을 나타내었고, KIT-6는 중기공 부피와 미세기공 부피가 모두 가장 높은 것으로 나타났다. 그리고 활성탄은 비탄소 흡착제들보다 높은 비표면적과 미세기공 부피를 가졌지만, 중기공 부피는 비탄소 흡착제들에 비해서 매우 낮았다. 그리고 세탁 시설에서 사용되고 있는 세탁용제를 구입하여 실험에

Table 1. Physical properties of adsorbents.

Adsorbent		Specific area (m ² /g)	Mesopore volume (cm ³ /g)	Micropore volume (cm ³ /g)	Type
Mesoporous silica	MCM-41	889	0.557	0.073	Bead
	SBA-15	484	0.306	0.100	
	KIT-6	677	0.629	0.120	
Activated alumina		226	0.335	0.021	Ball (4~8 mesh)
Aluminum silicate		503	0.170	0.094	
Activated carbon		1073	0.039	0.406	Granular (4 × 8 mesh)

**Fig. 1.** Schematic of the TVOCs adsorption and desorption test system.

사용하였다. 이 세탁용제는 기체크로마토그래피-질량 분석기를 이용하여 분석한 결과 데칸 36%, 노난 27%, 운데칸 23%, 옥탄 11%, 도데칸 3%의 혼합 VOCs 물질들로 구성되어 있는 것으로 나타났으므로, 본 논문에서는 세탁용제의 증기를 TVOCs (total volatile organic compounds)로 표현하였다.

2.2 실험 장치

흡탈착 실험 장치는 그림 1과 같다. 실험장치는 세탁용제 증기 및 수증기 주입 부분, 고정층 흡착 부분, 기체크로마토그래피 (YL6500 GC, Youngin Chromass, Korea)를 이용한 배출농도 측정 부분으로 구성되었다. 주입 공기의 유량은 질량유량 조절기 (5850E, Brooks Instrument, USA)를 이용하여 정밀하게 조절하였다.

세탁용제가 담긴 임핀저와 물이 담긴 삼각 플라스크는 30°C의 온도로 유지되는 수조에 각각 위치시켰다. 세탁용제가 담긴 임핀저 내부에 공기를 주입하여 세탁용제 증기를 발생시켰고, 물이 담긴 삼각 플라스크 내부에 공기를 주입하여 수증기를 발생시켰다. 흡착제는 1.25 cm 직경의 고정층 반응기 내부에 넣은 후 30°C의 온도로 일정한 향온기 (VS-4028D, Vision Scientific Co., Ltd)에 위치시켰다. 흡착 또는 탈착을 거친 후 세탁용제 증기가 응축되는 것을 방지하기 위해 30°C 온도로 테플론관 (teflon tubing)을 가열 테이프 (heat tape)로 감싸주었다. 실내 공기 중 VOCs 농도를 측정하는 방법인 환경부 고시 (제 2017-11호)의 실내공기질 측정 시험기준 (Korea Ministry of Environment, 2017)에 따라 배출증기의 농도는 톨루엔으로 환산하여 분석하

였다. 배출증기는 불꽃 이온화 검출기가 장착된 기체 크로마토그래피를 사용하여 분석하였고, GC 컬럼 (YL-5, Youngin Chromass, Korea)은 30 m × 0.32 mm × 0.25 μm 조건으로 사용하였다. 주입구 온도 및 검출기, 오븐의 온도는 각각 200, 250, 230°C로 설정하였다.

2.3 실험 방법

각 흡착제는 유리 알갱이 (beads)와 혼합하여 고정층 흡착층을 구성하였다. 입경이 작은 실리카 계열인 MCM-41, SBA-15, KIT-6은 0.1 g을 사용하였고, 입경이 큰 규산 알루미늄, 활성 알루미늄, 활성탄은 0.5 g을 실험에 사용하였다. 고정층 반응기는 30°C의 항온기에 위치시켜 실험을 수행하였다. 총 유량 150 mL/min 중에서 70 mL/min을 세탁용제가 담긴 임핀저 내부에 주입하여, 세탁용제 증기의 농도가 2,000 ppm (±10%) 이 되도록 주입하였다. 건조가스 조건에서는 80 mL/min의 건조공기를 주입하였고, 습윤가스 조건에서는 50 mL/min의 건조공기를 주입하고, 30 mL/min은 물이 담긴 삼각 플라스크 내부에 공기를 주입하여 수증기를 발생시켰다. 습윤가스 조건에서 수분의 농도는 약 0.8%이며, 상대습도로는 20%가 된다. 흡착 실험이 시작하기 전에 우회 라인 (bypass line)으로 주입하여, 세탁증기의 주입농도가 2,000 ppm (±10%)이 됨을 확인하였다. 흡착 실험 후에는 동일 온도 30°C에서 150 mL/min의 건조공기만을 주입하여 세탁용제 증기의 탈착을 진행하였다. 각 흡착제에 대하여 흡탈착 실험

Table 2. Summary of experimental conditions.

Item	Condition	
	Adsorption	Desorption
Concentration of dry cleaning solvent vapor	2,000 ppm (±10%)	-
Concentration of water vapor	0, 0.8%	-
Air flow rate	150 mL/min	150 mL/min
Temperature	30°C	30°C

은 1회씩 수행하였으며, 흡탈착 과정을 거친 후 배출되는 가스는 기체크로마토그래피를 사용하여 2분 간격으로 측정하였다. 실험 조건은 표 2에 나타나 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 건조 조건 결과

3.1.1 Mesoporous silica 흡착제 결과

그림 2는 건조가스 조건에서 MCM-41, SBA-15, KIT-6의 세탁용제 증기 흡탈착 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, MCM-41과 KIT-6은 흡착이 진행됨에 따라 매우 유사한 배출 농도를 보여준다. 그리고 SBA-15는 조금 더 빠르게 파과하는 곡선을 보여준다. 세 가지 흡착제는 모두 흡착시간 60분 안에 거의 포화되는 것으로 나타났다. 흡착시간 60분 이후에 150 mL/min의 건조공기를 주입하여 탈착 실험을 수행하였다. SBA-15는 세 가지 흡착제 중에서 가장 작은 흡착량을 보여주었음에도 탈착 초기 약 20분 동안 가장 높은 탈착농도를 보여서 탈착효율이 높은 것으로 나타났다. 그리고 매우 유사한 흡착 경향을 보인 MCM-41과 KIT-6은 탈착에서는 서로 다른 농도를 나타내었다.

3.1.2 활성 알루미늄, 규산 알루미늄, 활성탄 흡착제 결과

그림 3은 활성 알루미늄, 규산 알루미늄, 활성탄의 흡탈착 실험 결과를 보여준다. 활성탄은 VOCs 흡착에 상용화된 것으로 다른 흡착제들의 효율들을 비교 및 평가하기 위하여 사용하였다. 활성 알루미늄, 규산 알루미늄, 활성탄 시료의 경우는 실리카 계열 물질들보다 큰 입경을 가지고 있어 0.5g을 실험에 사용하였다. 그리고 흡착제의 사용량이 증가함으로 인하여, 흡탈착시간도 180분으로 각각 늘렸다. 그림 3에서 보는 바와 같이 활성 알루미늄과 규산 알루미늄은 흡착이 진행됨에 따라 배출농도가 서서히 증가하는 특성을 보였다. 반면에 활성탄은 흡착 초기 15분 정도 동안 매우 높은 효율을 보이다가 빠르게 파과되는 특성을

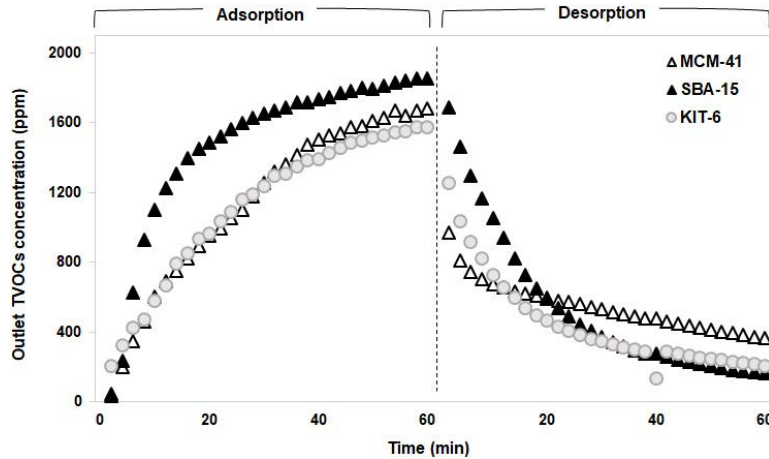


Fig. 2. Outlet TVOCs concentrations from the adsorption and desorption tests of MCM-41, SBA-15 and KIT-6 at a dry condition.

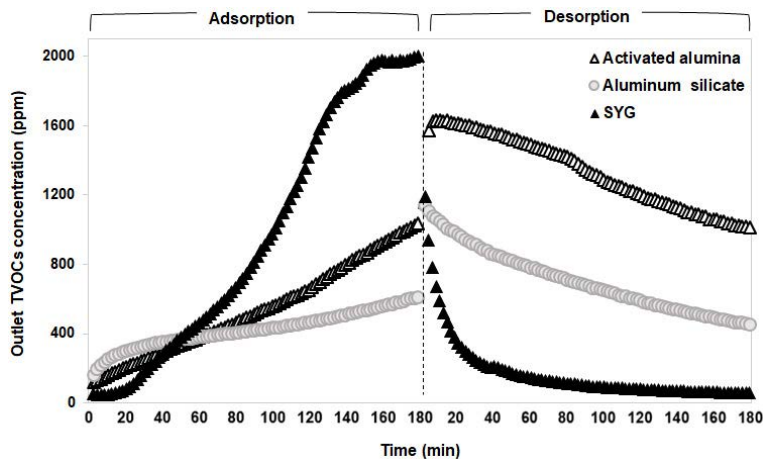


Fig. 3. Outlet TVOCs concentrations from the adsorption and desorption tests of activated alumina, aluminum silicate and activated carbon at a dry condition.

보였다. 따라서 활성탄이 가장 우수한 흡착 성능을 나타내었다. 그러나 활성탄은 탈착 초기부터 매우 낮은 농도를 나타내었다. 따라서 활성탄의 경우는 본 실험과 같이 흡착온도와 동일한 온도에서 공기를 주입하는 방식으로는 탈착이 어려운 것으로 나타났다. 반면에 활성 알루미늄이나는 탈착 초기 1,600 ppm 정도의 매우 높은 농도를 보이고, 이후에도 높은 농도를 유지하여 매우 우수한 탈착 성능을 보였다. 그리고 규산 알루미늄은 탈착 초기 1,200 ppm 정도의 농도를 보이다가

500 ppm 정도의 농도로 감소하는 것으로 나타났다.

3.2 습윤 조건 결과

3.2.1 Mesoporous silica 흡착제 결과

앞서 실험에서 사용한 건조가스 조성에 0.8% 수증기를 추가하여 습윤가스 조건에서 흡탈착 실험을 수행하였다. 그림 4~6은 MCM-41, SBA-15, KIT-6의 실험 결과를 각각 나타내고 있는데, 습윤 조건 결과를 건조 조건 결과와 함께 나타내었다. 그림 4에 나타난 바와 같

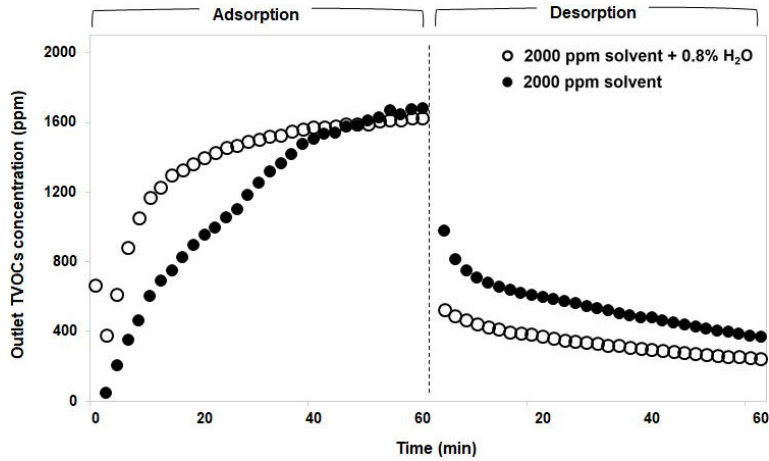


Fig. 4. Outlet TVOCs concentrations from the adsorption and desorption tests of MCM-41 at dry and wet conditions.

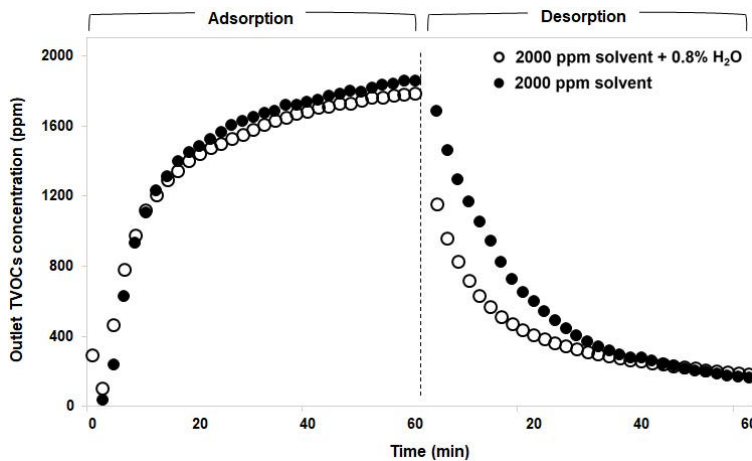


Fig. 5. Outlet TVOCs concentrations from the adsorption and desorption tests of SBA-15 at dry and wet conditions.

이 MCM-41의 경우 수증기가 주입되었을 때는 더 빠르게 파과되는 경향을 보여준다. 그리고 흡착량이 감소하여 탈착농도도 조금 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 반면에 그림 5의 SBA-15는 수증기가 주입되어도 매우 유사한 흡착 경향을 보여주었다. 그러나 흡착량은 거의 비슷하였음에도 탈착농도는 수증기를 주입하였을 때 조금 감소하는 특성을 나타내었다. 그림 6의 KIT-6의 경우 흡착할 때는 파과가 조금 빨리 일어나면서도 탈착농도는 유사한 수준을 나타내었다. 따라서 흡

착제마다 수증기의 영향은 조금씩 달랐으나, 흡착량의 감소 또는 탈착농도의 감소를 나타내었다. 이것은 실리카 계열 물질이 실라놀(silanol)을 형성하고 있어 친수성을 갖는 표면 특성으로 수분 존재 시 세공 응축이 일어나는 것과 관련있는 것으로 판단된다(Seo, 2009).

3.2.2 활성 알루미나, 규산 알루미늄, 활성탄 흡착제 결과

0.8% 수증기를 추가한 습윤 조건에서 알루미나, 규

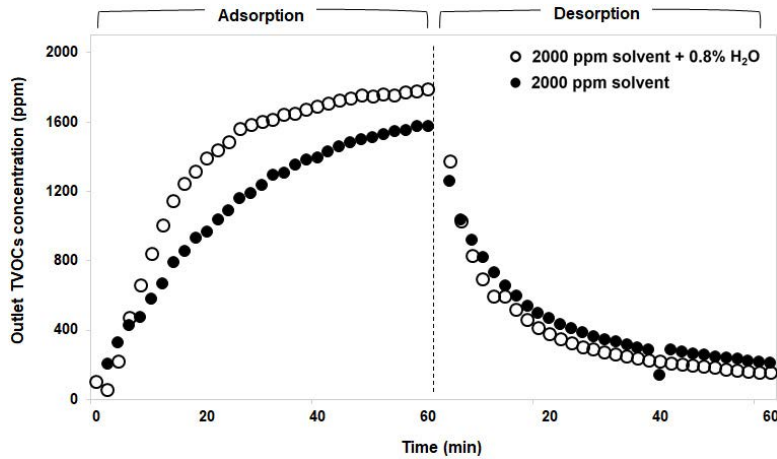


Fig. 6. Outlet TVOCs concentrations from the adsorption and desorption tests of KIT-6 at dry and wet conditions.

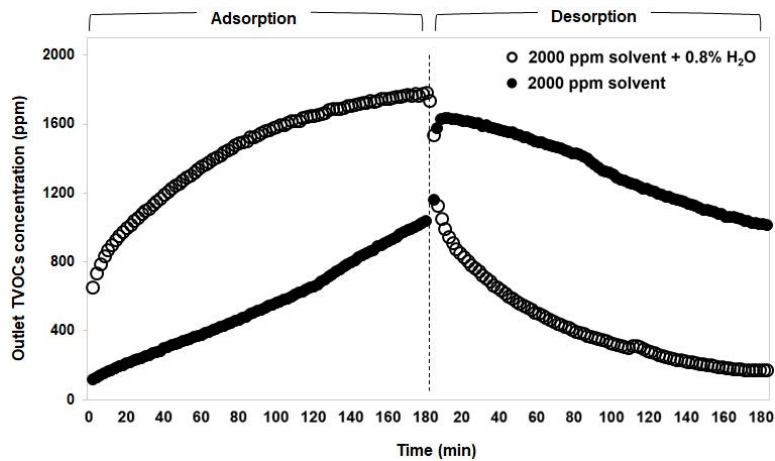


Fig. 7. Outlet TVOCs concentrations from the adsorption and desorption tests of activated alumina at dry and wet conditions.

산 알루미늄, 활성탄 흡착제에 대한 흡탈착 실험도 수행하였다. 그 결과를 건조 조건에서의 결과와 함께 그림 7~9에 나타내었다. 그림 7은 활성 알루미늄에 대한 흡탈착 실험 결과를 보여주는 것으로 수증기가 주입되었을 때 흡착량이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 습윤 조건에서 흡착량 감소로 인하여 탈착 농도도 크게 감소하였다. 이는 활성 알루미늄이 수분의 영향을 크게 받음을 보여준다. 그림 8은 규산 알루미늄에 대한 결과인데 활성 알루미늄과 마찬가지로

수증기가 주입되었을 때 흡착량이 크게 감소하고, 탈착 농도도 감소하였다. 활성탄에 대한 흡탈착 결과인 그림 9를 보면, 습윤 조건과 건조 조건에서 비교적 유사한 흡착 경향을 보이지만, 흡착 초기의 효율이 감소한 것을 확인할 수 있다. 그리고 탈착은 거의 되지 않는 수준으로 탈착 농도가 감소하였다. 따라서 활성 알루미늄, 규산 알루미늄, 활성탄 흡착제들 모두 수분의 영향으로 흡착량이 감소하거나 흡착 농도가 감소하는 현상을 확인하였고, 그 정도는 앞서 SBA-15, KIT-6보

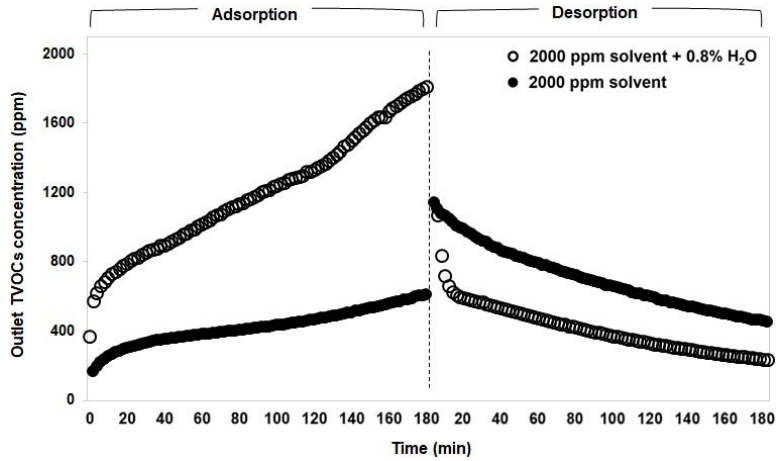


Fig. 8. Outlet TVOCs concentrations from the adsorption and desorption tests of aluminum silicate at dry and wet conditions.

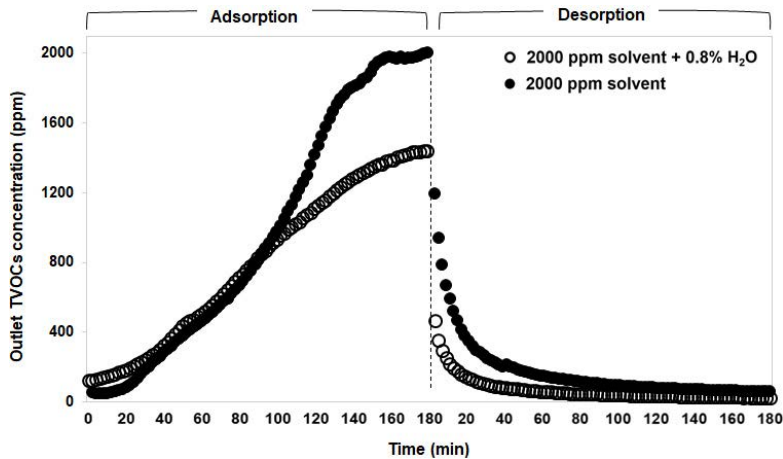


Fig. 9. Outlet TVOCs concentrations from the adsorption and desorption tests of activated carbon at dry and wet conditions.

다도 더 크게 나타났다.

3.3 흡착용량 및 탈착효율

건조 조건과 습윤 조건에서의 흡탈착 실험 결과를 바탕으로 각 흡착제의 흡착용량(g/g)과 탈착효율(%)을 결정하였다. 그림 10은 건조 조건에서 각 흡착제의 흡착용량과 탈착효율을 나타내었다. MCM-41, KIT-6, 활성 알루미나, 규산 알루미놀이 대체로 높은 흡착용량을 나타내었다. 그러나 건조 조건에서 활성 알루미

나와 규산 알루미늄은 흡착 실험 시간 내에 포화에 도달하지 않았으므로 최대 흡착용량은 활성 알루미나와 규산 알루미늄이 가장 높음을 알 수 있다. 반면에 활성탄은 다른 흡착제들보다 낮은 흡착용량을 보이지만, 초기의 흡착효율이 매우 높게 나타났다. 탈착효율에 있어서는 SBA-15와 활성 알루미나가 월등히 높게 나타났다. 반면에 활성탄은 탈착효율이 매우 낮아서 본 실험과 같이 흡착온도와 동일한 온도에서 공기 주입법을 통한 탈착은 적합하지 않은 것으로 나타났다.

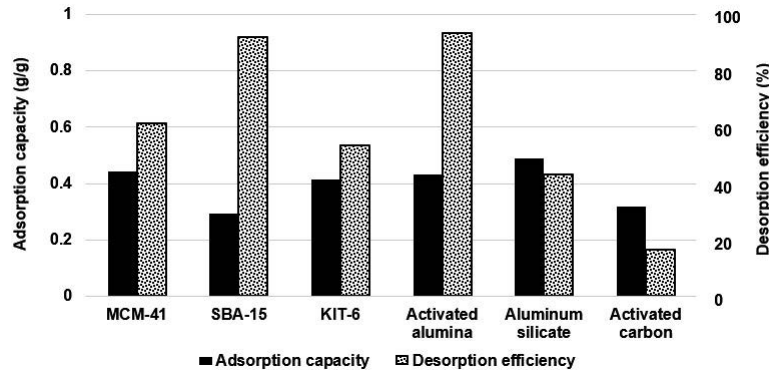


Fig. 10. Adsorption capacity and desorption efficiency of the adsorbents at a dry condition.

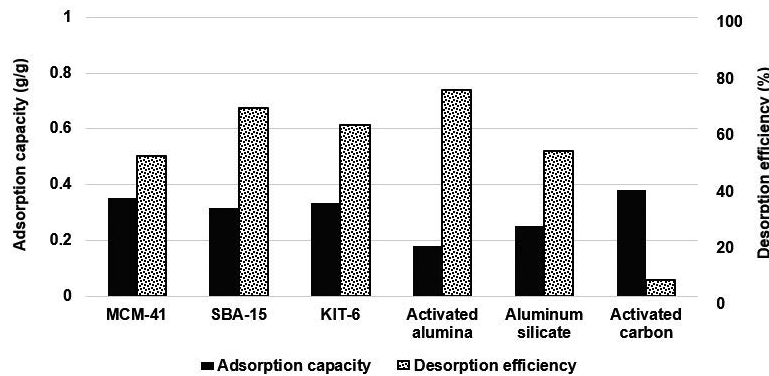


Fig. 11. Adsorption capacity and desorption efficiency of the adsorbents at a wet condition.

앞서 습윤 조건에서 활성 알루미나와 규산 알루미나 흡착 실험 시간 내에 포화에 도달함을 확인할 수 있었고, 그림 11의 흡착용량도 흡착제들 중에서 낮은 값을 나타내었다. 따라서 수증기 주입으로 인한 흡착량 감소가 활성 알루미나와 규산 알루미나에서 가장 크게 나타났다. 습윤 조건에서 흡착제들의 흡착용량 감소로 인하여 활성탄의 흡착용량이 가장 높게 나타났다지만, 앞서 살펴본 바와 같이 수증기 주입으로 인하여 활성탄의 초기 흡착효율은 감소하였다. 탈착효율에 있어서는 여전히 활성 알루미나가 가장 높은 값을 보였다. 따라서 활성 알루미나는 수증기 주입으로 인한 흡착량 감소의 문제가 있으나, 높은 탈착효율을 여전히 유지하는 것으로 나타났다. 그림 10과 11을 동시에 비교하면, KIT-6와 규산 알루미나는 수증기 주입

으로 인하여 흡착용량은 감소하고 탈착효율은 증가하였음을 알 수 있다. 그러나 습윤 조건에서 탈착효율이 60% 정도로 높은 수준은 아니었다. MCM-41은 수증기 주입 시 흡착용량과 탈착효율 모두 감소하였다. SBA-15는 수증기를 주입하여도 흡착용량은 비슷하였으나 탈착효율은 감소하였다.

4. 결 론

세탁시설에서 배출되는 TVOCs 물질에 대해 비탄소성 흡착제인 MCM-41, SBA-15, KIT-6, 활성 알루미나, 규산 알루미나의 흡탈착 성능을 조사하였다. 건조 조건에서는 흡착용량이 aluminum silicate > MCM-41 >

activated alumina > KIT-6 > activated carbon > SBA-15 순으로 높았으며, 탈착효율은 activated alumina > SBA-15 > MCM-41 > KIT-6 > aluminum silicate > activated carbon 순으로 높았다. 습윤 조건에서는 흡착용량이 activated carbon > MCM-41 > KIT-6 > SBA-15 > aluminum silicate > activated alumina 순으로 높았으며, 탈착효율은 activated alumina > SBA-15 > KIT-6 > aluminum silicate > MCM-41 > activated carbon 순으로 높았다. Mesoporous silica 흡착제 중에서는 건조 조건과 습윤 조건 모두 MCM-41이 SBA-15, KIT-6보다 높은 흡착용량을 보였다. 그러나 MCM-41, KIT-6는 50~60% 수준의 낮은 탈착효율을 나타내었다. SBA-15는 건조 조건에서 92%의 높은 탈착효율을 보였으나, 습윤 조건에서 67.5%로 탈착효율이 감소하였다. MCM-41, SBA-15, KIT-6는 단가가 높아 세탁시설에서 배출되는 TVOCs를 제거하는 흡착제로 사용하기에 적합하지 않은 것으로 판단된다. 건조 조건에서 활성 알루미나와 규산 알루미나는 MCM-41, SBA-15, KIT-6보다 높은 흡착용량을 나타내었다. 그리고 활성 알루미나는 93.5%의 높은 탈착효율을 나타낸 반면에 규산 알루미나는 43.3%의 낮은 탈착효율을 나타내었다. 습윤 조건에서는 활성 알루미나의 흡착용량은 크게 감소하였고, 탈착효율도 74%로 감소하였으나 실험에 사용한 흡착제들 중에서는 여전히 가장 높은 탈착효율을 보였다. 결론적으로 본 연구에서 사용한 비탄소성 흡착제 가운데서는 단가가 낮고 탈착효율이 높은 활성 알루미나가 세탁시설에서 배출되는 TVOCs를 제거하기에 가장 적합한 것으로 판단된다. 그러나 습윤 조건에서 활성 알루미나의 흡착량이 급격히 감소하므로 수분을 사전에 제거하는 과정이 필수적이다. 그리고 흡착 초기의 효율을 향상시키기 위한 흡착제의 개질이 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 기후변화대응기술개발사업

의 지원을 받아 수행된 연구이며 (2017M1A2A2086 647), 김도아 저자 석사논문의 일부임.

References

- Dou, B., Hu, Q., Li, J., Qiao, S., Hao, Z. (2011) Adsorption performance of VOCs in ordered mesoporous silicas with different pore structures and surface chemistry, *Journal of Hazardous Materials*, 186, 1615-1624.
- Jeong, J. (2003) Assessment of exposure to harmful factors in the laundry industry and management of work environment, Korea in Incheon, Occupational Safety & Health Agency and Occupational Safety & Health Research Institute, 127pp.
- Jeon, M.J., Jeon, Y.W. (2018) An Experimental Study on Field Application of On-Site Activated Carbon Regeneration using the Low Temperature Vacuum Swing Adsorption Process, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 35(6), 499-506, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.9786/kswm.2018.35.6.499>
- Kim, J.H., Yoo, K.S. (2017) Study on the Enhancement of VOCs Management at Laundry Facilities in Korea, *Korea Environmental Policy and Administration Society*, 25(3), 139-171, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15301/jepa.2017.25.3.139>
- Kim, S.Y., Han, J.S., Kim, H.K. (2001) A Study on the Source Profile of Volatile Organic Compounds from Major Emission Sources, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 17(3), 233-240, (in Korean with English abstract).
- Korea Ministry of Environment (2017) Ministry of Environment Announcement No. 2017-11 (January 17, 2017).
- Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2020) http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_99_2300018&conn_path=I3
- Kosuge, K., Kubo, S., Kikukawa, N., Takemori, M. (2007) Effect of Pore Structure in Mesoporous Silicas on VOC Dynamic Adsorption/Desorption Performance, *Langmuir*, 23(6), 3095-3102, <https://doi.org/10.1021/la062616t>
- Lee, H.J. (2020) Organic Compounds Emission from Small-scale Dry Cleaning Process and its effects on Ambient Atmospheric Environment, Seoul National University of Science and Technology Graduate School.
- Lee, H.J., Song, M.G., Kim, D.K. (2019) Estimation of Emissions and Emission Factor of Volatile Organic Compounds from Small-scale Dry Cleaning Operations Using Organic Solvents, *Journal of Korean Society for Atmos-*

- pheric Environment, 35(4), 413-422, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.413>
- Lee, S.H., Lee, D.H., Park, K.S., Song H.M., Yang, Y.C., Lee, K.W., Cho, Y.G., Seo, G.Y. (2016) A Study on Characteristics of VOCs in Gwangju Using Statistical Analysis, *Journal of Korean Society for Environmental Analysis*, 19(1), 12-23, (in Korean with English abstract).
- Lee, S.J., Moon, S.H. (2009) Adsorption of VOCs from Dry Cleaning, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 31(11), 1025-1032, (in Korean with English abstract).
- Park, O.H., Lee, K.S., Min, K.W., Cho, G.W., Yoon, K.J., Jeong, W.S., Cho, Y.G., Kim, E.S., Yang, J.S. (2016) Generating Characteristics of VOCs in a Commercial Laundry Shop and the Effects on the Health of Workers, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 26(2), 159-169, (in Korean with English abstract).
- Roh, Y.M., Kwon, G.B., Park, S.H., Jeong, J.Y. (2001) A Survey on the Management of Chemical Substances and Airborne Concentration in Laundries Exposed to Organic Solvents, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(1), 70-77, (in Korean with English abstract).
- Seo, Y.G. (2009) Heterogeneous Adsorption of Volatile Organic Compounds (VOC) and Water Vapor in Mesoporous Media of MCM-41 and MCM-48, *Journal of Advanced Engineering and Technology*, 2(3), 229-232, (in Korean with English abstract).
- Son, M.S., Kim, S.D., Woo, K.J., Park, H.J., Seo, M.C., Lee, S.H., Ryu, S.K. (2006) Adsorption Characteristics of Three-components Volatile Organic Compounds on Activated Carbonaceous Adsorbents, *Korean Chemical Engineering Research (HWAHAK KONGHAK)*, 44(6), 669-675, (in Korean with English abstract).
- Vinh-Thang, H., Huang, Q., Eic, M., Trong-On, D., Kaliaguine, S. (2005) Adsorption of C₇ Hydrocarbons on Biporous SBA-15 Mesoporous Silica, *Langmuir*, 21(11), 5094-5101. <https://doi.org/10.1021/la050135o>
- Wang, H., Wang, T., Han, L., Zhong, J., Tang, M., Huang, W., Chen, R. (2016) VOC adsorption and desorption behavior of hydrophobic, functionalized SBA-15, *Journal Materials Research*, 31(4), 516-525.
- Zhang, W., Qu, Z., Li, X., Ma, D., Wu, J. (2012) Comparison of dynamic adsorption/desorption characteristics of toluene on different porous materials, *Journal of Environmental Sciences*, 24(3), 520-528.

Authors Information

김도아 (충북대학교 환경공학과 석사)
 박정민 (충북대학교 환경공학과 박사과정)
 이상섭 (충북대학교 환경공학과 교수)