

# 새집증후군 유발 벤젠가스 흡착에 미치는 활성탄소섬유의 함산소불소화 영향

임형순 · 김민지\* · 공은영\* · 정진도<sup>†</sup> · 이영석\*,<sup>†</sup>

호서대학교 기후변화융합기술학과, \*충남대학교 응용화학공학과  
(2018년 1월 27일 접수, 2018년 2월 17일 심사, 2018년 3월 4일 채택)

## Effect of Oxyfluorination of Activated Carbon Fibers on Adsorption of Benzene Gas Causing Sick House Syndrome

Hyung Soon Lim, Min-Ji Kim\*, Eun Young Kong\*, Jin-do Jeong<sup>†</sup>, and Young-Seak Lee\*,<sup>†</sup>

Department of Fusion Technology for Climate Change, Hoseo University, Asan 31499, Korea

\*Department of Applied Chemistry and Biological Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea  
(Received January 27, 2018; Revised February 17, 2018; Accepted March 4, 2018)

### 초 록

본 연구에서는 새집증후군 원인가스 중 하나인 벤젠 가스 흡착특성을 향상시키기 위하여 활성탄소섬유에 함산소불소화 처리를 실시하였다. 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유 표면특성 및 기공특성은 X-선광전자분광기(XPS)와 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 분석을 통해 확인하였으며, 벤젠 가스 흡착 특성은 가스크로마토그래피(GC)로 평가하였다. XPS 결과로부터 불소분압이 증가함에 따라 활성탄소섬유 표면의 불소관능기가 증가함을 알 수 있었다. 함산소불소화 처리 후 모든 샘플의 비표면적은 감소하였으나, 불소 분압이 0.1 bar일 때 그 미세기공 부피비가 증가하였다. 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유는 11 h 동안 100 ppm의 벤젠 가스를 모두 흡착하였으며, 이는 미처리 활성탄소섬유와 비교하여 벤젠 가스 흡착효율이 약 2배 향상됨을 알 수 있었다.

### Abstract

In this study, activated carbon fibers (ACFs) were treated by oxy-fluorination to improve the adsorption property of benzene gas, one of the gases causing sick house syndrome. Surface properties and pore characteristics of oxyfluorinated activated carbon fibers were confirmed by X-ray photoelectron Spectroscopy (XPS) and Brunauer-Emmett-Teller (BET), and adsorption properties of benzene gas were evaluated by gas chromatography (GC). As a result of XPS data, it was confirmed that the fluorine functional groups on activated carbon fibers surface increased with increasing the fluorine partial pressure. The specific surface area of all samples decreased after the oxyfluorination treatment, but the micropore volume ratio increased when the fluorine partial pressure was at 0.1 bar. The oxyfluorinated activated carbon fibers adsorbed 100 ppm benzene gas for an 11 h, it was found that the adsorption efficiency of benzene gas was improved about twice as much as that of untreated ones.

**Keywords:** benzene, adsorption, activated carbon fibers, oxyfluorination

## 1. 서 론

새집증후군(sick house syndrome)은 신축 및 리모델링 건물에 사용되는 건축자재나 벽지, 접착제 등에서 발생하는 유해물질로 인하여 인체에 발생하는 이상 증세를 의미한다. 새집증후군을 발생시키는 대표적인 유해물질로는 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs), 포름알데하이드, 클로로폼 등이 있으며, 이러한 유해물질은

일반적으로 두통, 현기증, 피로감, 아토피, 호흡기 질환, 알레르기 등의 증상을 유발한다고 알려져 있다[1,2]. 특히 VOCs의 경우 톨루엔과 벤젠이 포함되어 그 자체만으로도 독성이 있으며, 이를 호흡할 시 압과 빈혈을 유발할 수 있고 중추신경계 마비 등의 문제점이 있는 것으로 알려져 있다[3,4]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 VOCs의 발생을 제어하는 여러 기술들이 연구되고 있으며(연소법, 열산화법, 응축법 등), 그중 하나로 흡착제를 이용하여 VOCs를 흡착하여 제거하는 연구가 진행되고 있다[5].

일반적으로 VOCs를 제거하기 위하여 활성탄소(activated carbon, AC)를 이용한 흡착법이 널리 사용되고 있으나, 활성탄소는 파괴점(breakthrough point)에 도달하는 시간이 짧아 흡착재 교체 빈도가 높으며, 분말상의 활성탄소의 경우 취급이 어려운 단점이 있다[6,7]. 반면 활성탄소섬유(activated carbon fibers, ACFs)는 균일한 미세기공(micropore)과 비교적 큰 비표면적을 가지고 있어 흡착속도가 매우 빠

<sup>†</sup> Corresponding Author: J.-D. Jeong, Hoseo University, Department of Fusion Technology for Climate Change, Asan 31499, Korea / Y.-S. Lee, Chungnam National University, Department of Applied Chemistry and Biological Engineering, Daejeon 34134, Korea  
Tel: +82-42-821-7007  
e-mail: jindo7@naver.com, youngslee@cnu.ac.kr

**Table 1. XPS Analysis of Untreated and Oxy-fluorinated ACFs**

sample	Elemental contents (Atomic %)			O/C (%)	F/C (%)
	C	O	F		
(a) R-ACF	87.03	12.97	-	0.14	-
(b) FO-19	76.70	12.22	11.07	0.16	0.14
(c) FO-28	70.53	16.90	12.57	0.25	0.19
(d) FO-37	62.28	13.77	23.95	0.24	0.42

른 장점으로 인하여 현재 기상용 필터(filter) 재료로 널리 쓰이고 있다 [8,9]. 최근에는 SOx, NOx, 및 VOCs와 같은 유해가스를 흡착하기 위한 흡착제로 많은 연구가 진행되고 있다[10-13].

또한, 이러한 활성탄소섬유의 흡착 및 제거 성능을 높이기 위하여, 피흡착질 흡착에 도움을 주는 관능기를 활성탄소섬유에 부여하는 다양한 표면처리(산화, 오존, 플라즈마, TiO<sub>2</sub> 도입 등) 기술이 연구되고 있다[14-17]. 그중에서도 불소를 이용한 다양한 표면처리가 상온에서도 효과적으로 관능기가 도입되는 장점이 있어 관련 연구가 활발하게 진행 중이다[18,19]. 일반적으로 함산소불소화는 불소가스와 산소가스를 혼합하여 표면을 개질하는 방법으로, 그 처리 조건에 따라 친수/소수성이 조절 가능하다. 함산소불소화 처리 후 탄소재료 표면에는 C-F 공유결합(covalent bonding), 반공유결합(semi-covalent bonding) 및 이온결합(ionic bonding)이 생성되며[7,20,21], 이러한 관능기는 불소의 높은 표면에너지로 인하여 벤젠흡착에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

본 연구에서는 함산소불소화 처리 후 활성탄소섬유 표면에 도입되는 불소 및 산소 함량에 따른 벤젠흡착 특성을 확인하고자, 불소 분압을 변수로 상온에서 함산소불소화 처리를 실시하였다. 또한 다양한 조건에서 표면처리된 활성탄소섬유가 VOCs 흡착소재로서의 응용 가능성이 있는지 확인하기 위하여 벤젠가스를 피흡착질로 선정하여 흡착 특성을 평가하였다.

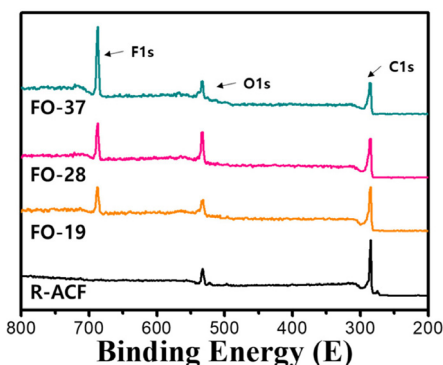
## 2. 실험

### 2.1. 시약 및 재료

본 연구에서는 벤젠가스 제거를 위하여 레이온계 활성탄소섬유인 TK-1800 (Tongkang, China)을 사용하였다. 함산소불소화 반응에는 불소가스(99.0%, Messer Griesheim GmbH, Germany)와 고순도 산소가스(99.999%)를 사용하였으며, 벤젠 흡착실험에는 질소가스(99.999%), 수소가스(99.999%) 및 Zero air (고순도 공기)를 사용하였고, 피흡착질로는 100 ppm 농도의 벤젠가스를 사용하였다.

### 2.2. 활성탄소섬유의 함산소불소화 반응

활성탄소섬유의 함산소불소화 반응은 상온에서 0.7 g의 활성탄소섬유를 니켈보트(11 × 5 × 2 cm)에 넣고 밀봉 후 배치식으로 반응을 수행하였다. 반응기 내부(1730 cm<sup>3</sup>)는 감압펌프와 질소가스를 이용하여 3회 배기하였으며, 그 후 불소가스와 산소가스의 압력비를 총 압 1 bar를 기준으로 각각 1 : 9, 2 : 8, 3 : 7 (F<sub>2</sub> : O<sub>2</sub>)의 분압비로 각각 주입하여 상온(23 ± 1 °C)에서 10 min 동안 반응시켰다. 반응이 종료된 후 미반응 된 불소가스를 제거하기 위하여 반응기 내부를 질소가스를 이용하여 3회 배기하였다. 이렇게 준비된 샘플에 대하여 미처리 활성탄소섬유는 R-ACF로, 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유는 주입된 불소분압비 조건에 따라 FO-19, FO-28, FO-37로 각각 명명하였다.



**Figure 1. XPS wide scan spectra of untreated and oxy-fluorine treatment ACFs.**

### 2.3. 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유의 물성 분석

미처리 및 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유의 표면 화학 특성을 확인하기 위하여 X선 광전자 분광기(XPS, MultiLab 2000, Thermo Electron Corp., England)를 이용하여 분석하였다. 또한, 활성탄소섬유의 기공특성 변화는 ASAP 2020 (Micromeritics Instrument Corp., US)을 이용하여 분석하였으며, 비표면적 및 기공분포도는 각각 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 및 density-functional theory (DFT) 식을 이용하여 계산하였다.

### 2.4. 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유의 벤젠 흡착실험

벤젠흡착 실험은 주입장치, 반응장치 및 측정장치로 이루어진 gas chromatography (GC, Agilent HP-6890)를 사용하였다. 반응기는 내경 10 mm, 외경 11 mm, 높이 200 mm의 석영관을 사용하였고, 벤젠 흡착실험시 미처리 활성탄소섬유 또는 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유 0.02 g을 투입하여 진행하였다. 반응기 내부로 주입되는 벤젠 가스(농도 100 ppm)는 질량유속 조절기(MFC, mass flow controller, Korea)를 사용하여 100 sccm의 유속으로 일정하게 주입하였다. 과과(breakthrough)가 시작되며 배출되는 벤젠가스의 농도를 GC 분석장치를 이용하여 일정 시간 간격으로 측정하여 과과곡선을 산출하였다. 이때 장착된 컬럼은 Porapak<sup>TM</sup> Porous Polymer Adsorbent (matrix Porapak Q, 80-100 mesh)이며, 그 피크 측정 온도는 50 °C로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유의 표면특성

미처리 및 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유의 표면분석을 위하여 XPS 분석을 수행하였다. 그 XPS 분석결과는 Figure 1 및 Table 1에 나타내었다. XPS 분석 결과, 미처리 활성탄소섬유의 경우는 결합에너지 284.5 및 532 eV 부근에서 탄소 및 산소 피크가 각각 나타났

Table 2. C1s Peak Parameters of Untreated and Oxy-fluorinated ACFs

Component	Peak position (eV)	Concentration (%)				
		R-ACF	FO-19	FO-28	FO-37	
C(1)	C-C (sp <sup>2</sup> )	284.5	87.35	76.23	71.03	62.56
C(2)	C-O	285.8	8.17	7.12	8.89	9.41
C(3)	C=O	287.2	4.48	5.43	7.58	4.12
C(4)	Semi-covalent C-F	288.8	-	8.45	8.10	21.60
C(5)	Covalent C-F	290.4	-	2.77	4.40	2.31

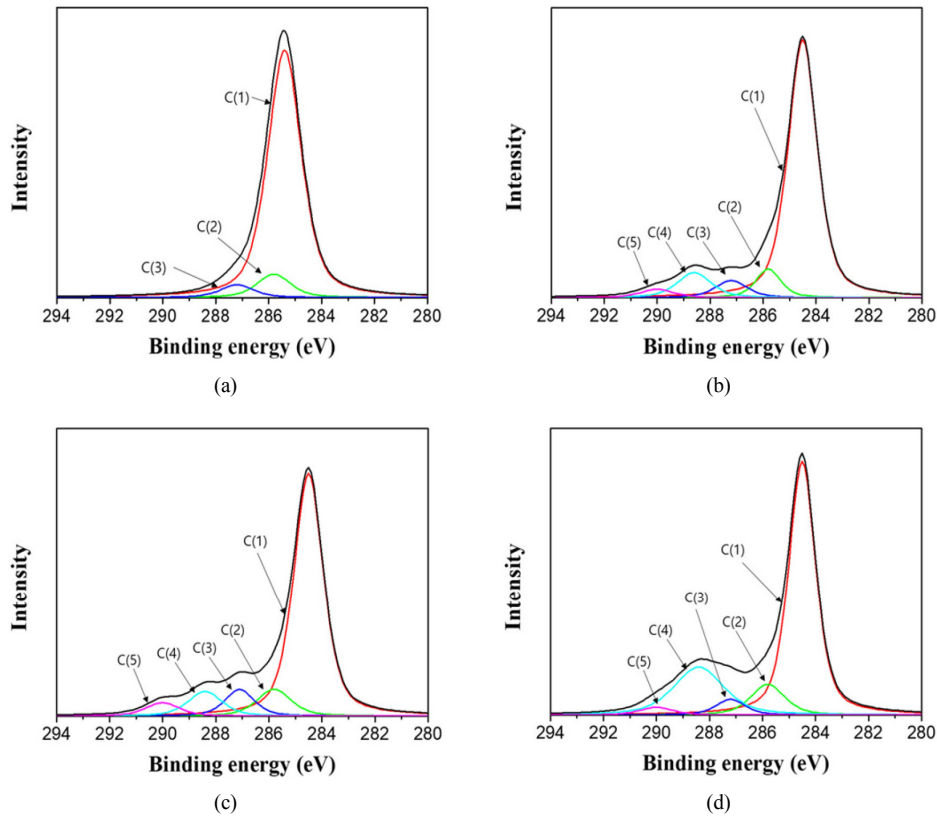


Figure 2. C1s core level spectrum of untreated and oxy - fluorinated ACFs; (a) R-ACF, (b) FO-19, (c) FO-28, (d) FO-37.

으며[14], 반면에 합산소불소화 처리된 샘플에서는 모두 결합에너지 686 eV 부근에서 불소 피크가 새롭게 생성됨을 확인할 수 있었다[22]. Table 1에서 확인할 수 있듯이, 합산소불소화 처리된 활성탄소섬유는 모두 불소 분압이 증가함에 따라 표면에 도입되는 불소함량이 증가하였고 탄소 함량은 감소하는 경향을 나타내었다. 즉, 불소 분압이 증가함에 따라 활성탄소섬유 표면에 존재하는 탄소 함량은 최대 62.3%까지 감소하였고, 불소는 최대 24.0%까지 도입됨을 확인하였다. 이러한 현상은 불소가 탄소와 반응하여 C-F 결합(공유 또는 반공유결합)을 형성 하였으며, 탄소가 불소로 치환되어 탄소 함량이 감소된 것으로 여겨진다.

산소 함량의 경우에도 FO-28까지는 불소 분압이 증가함에 따라 증가되는 경향을 나타내다가, FO-37에서는 FO-28에 비하여 산소 함량이 다소 감소하였는데, 이러한 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. 우선 불소화 반응은 라디칼 반응에 의해 진행되며[22], 불소가 분압이 충분할 때 개시반응이 일어나고, 그 후 성장 및 종료 반응을 거친

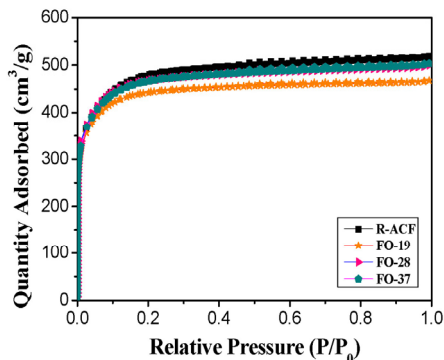
다. 이 라디칼 반응을 통해 활성탄소섬유 표면에 여러 활성점이 생성되고, 불소 분압이 높아질수록 이 활성점은 증가하게 된다. 합산소불소화 처리 후 FO-28까지는 표면에 도입되는 불소함량의 변화가 미미하지만, FO-37 샘플의 경우 불소함량이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 F<sub>2</sub> : O<sub>2</sub> = 3 : 7 분압 조건에서 불소 라디칼의 개시 및 성장 반응이 급격하게 진행되어 과량의 불소가 도입되고, 이에 따라 활성탄소섬유 표면에 도입될 수 있는 산소함량은 상대적으로 감소한 것으로 사료된다[7].

XPS C1s 피크를 각각의 결합구조를 의미하는 세부 피크로 분할하여 Figure 2에 나타내었고 그 함량을 Table 2에 나타내었다. 피크 분할은 pseudo-Voigt식 (1)을 이용하여 계산하였다[23].

$$F(E) = H \left[ (1-S) \exp \left( -\ln(2) \left( \frac{E-E_0}{FWHM} \right)^2 \right) + \frac{S}{1 + \left( \frac{E-E_0}{FWHM} \right)^2} \right] \quad (1)$$

**Table 3. Pore Characteristics of Untreated and Oxy-fluorinated ACFs**

Samples	BET-specific surface area (m <sup>2</sup> /g)	Total pore volume (cc/g)	t-plot Micropore volume (cc/g)	Micropore V/Total pore V (%)
R-ACF	1800	0.80	0.78	97.5
FO-19	1688	0.73	0.72	98.6
FO-28	1760	0.76	0.74	97.3
FO-37	1745	0.78	0.76	97.4

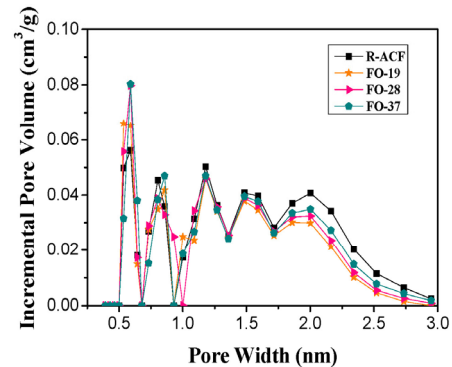


**Figure 3. Nitrogen isotherms of untreated and oxy-fluorine treated ACFs.**

R-ACF의 경우, 284.5, 285.8 및 287.2 eV의 결합에너지 부근에서 3가지 피크로 각각 분할되었으며, 이 피크는 각각 C-C, C-O 및 C=O 결합을 의미한다[24]. 반면 불소화 처리된 활성탄소섬유의 경우에는 semi-covalent C-F (반공유결합성 C-F) 및 covalent C-F (공유결합성 C-F) 결합을 의미하는 피크가 288.8, 290.4 eV에 부근에서 새롭게 나타났으며, 이를 통해 함산소불소화 반응 후 활성탄소섬유의 표면에 C-F 결합이 새로이 생성됨을 알 수 있었다[25]. 본 실험조건에서는 C-F 결합이 생성될 때, semi-covalent C-F 결합이 covalent C-F 결합보다 더 많이 생성되었는데, 이는 일반적으로 고온(300 °C 이상)에서는 covalent bond가, 저온에서는 semi-covalent bond가 쉽게 생성되기 때문인 것으로 알려져 있다[26]. 따라서, 본 실험에서는 상온에서 함산소불소화를 실시하였기에 semi-covalent C-F bond가 많이 형성된 것으로 판단된다. 또한 semi-covalent C-F bond는 covalent C-F bond보다 높은 표면에너지를 가지기 때문에 이러한 관능기는 벤젠 가스 흡착에 영향을 미칠 것으로 예상된다. C-F 결합은 불소 분압이 증가함에 따라 증가하였고, 이를 통해 C-F 결합의 생성은 불소 분압에 큰 영향을 받는 것을 확인하였다. 또한 활성탄소섬유 표면에 존재하는 결합 중에, C-O 결합이 C=O 결합에 비하여 더 높은 값을 나타내었는데, 이러한 결과는 함산소불소화 처리 후 -COF 및 -COOH 등의 결합이 많이 생성된 것으로 판단된다[7,27]. 그러나 주입되는 불소 농도가 가장 높은 분압인 3 : 7의 경우, 오히려 C-O 및 C=O 결합이 감소하였다. 이는 앞서 언급한 것과 같이, 2배 이상의 불소가 활성탄소섬유 표면에 도입되면서 상대적으로 도입될 수 있는 산소의 양이 감소되었기 때문으로 사료된다.

**3.2. 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유의 기공특성**

미처리 및 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유의 기공 변화를 확인하기 위하여 77 K 질소흡착법으로 그 기공특성을 고찰하였다. 활성탄소섬유 샘플의 비표면적과 기공부피는 BET식과 t-plot법을 사용하여



**Figure 4. Pore-size distribution of untreated and oxy-fluorinated ACFs.**

각각 계산하였으며, 이 샘플의 흡착등온선과 기공분포도를 Figure 3 및 Figure 4에 나타내었다. Figure 3에서 알 수 있듯이, 미처리 활성탄소섬유의 흡착등온선은 IUPAC의 흡착등온선 분류에 따라 미세기공이 많이 발달된 Type 1 형태의 그래프가 관찰되었다[28]. 또한 함산소불소화 처리된 샘플에서도 같은 형태의 그래프가 그려졌으며, 이를 통해 함산소불소화 처리 후 활성탄소섬유의 기공구조가 크게 변형되지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Table 3에서 확인할 수 있듯이, 함산소불소화 처리 후 전반적으로 비표면적과 기공부피가 감소하는 경향을 나타내었다. 미처리 활성탄소섬유의 경우 비표면적이 1,800 m<sup>2</sup>/g이었으나, 함산소불소화 처리 후 모든 샘플의 비표면적이 감소하는 경향을 나타내었다. 함산소불소화 처리된 샘플 중 FO-19 샘플의 비표면적이 1688 m<sup>2</sup>/g로 나타나 가장 큰 감소율을 나타내었다. FO-28에서는 비표면적이 1760 m<sup>2</sup>/g으로 약간 증가하였다가 FO-37에서 1745 m<sup>2</sup>/g으로 다시 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 함산소불소화 처리 시 나타나는 독특한 현상으로 탄소재료 표면이 식각(etching)되는 현상 때문으로 설명할 수 있다. 탄소재료 표면이 식각될 때, 결정면(basal plane)이 완전히 제거되면 기공이 확대되어 비표면적이 감소되지만, 결정면 일부가 식각 되어 표면 거칠기(roughness)가 증가되면 오히려 비표면적이 증가하는 것으로 본 연구실의 선행 연구를 통해 이미 확인한 바 있다[22]. 또한 Table 3에 나타난 것처럼, 미세기공/총기공 비율이 함산소불소화 처리 후 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 FO-19 샘플은 오히려 미처리 활성탄소섬유보다 미세기공 비율이 증가하였고, 이는 Figure 4의 기공분포도 데이터에서도 확인할 수 있었다. 함산소불소화 처리 후 0.5~0.75 nm 범위의 기공은 증가하였고, 1.25 nm 이상의 범위의 기공은 감소하였다. 또한 2 nm 이상의 메조기공은 확연하게 감소하는 것을 알 수 있었는데, 이러한 결과를 통해 불소에 의한 식각현상이 일어날 때 미세기공보다는 메조기공이 많이 식각된 것으로 판단된다.

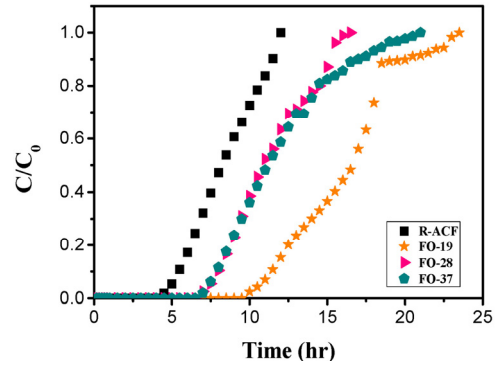
**Table 4. Breakthrough Point and Removal Efficiency of Untreated and Oxy-fluorinated ACFs**

Sample	Breakthrough point time (h)
R-ACF	5.4
FO-19	11.6
FO-28	7.9
FO-37	7.9

### 3.3. 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유의 벤젠가스 흡착특성

함산소불소화 처리된 활성탄소섬유의 새집증후군 가스에 대한 흡착 성능을 알아보기 위하여 벤젠가스(농도 100 ppm)를 100 sccm의 유속으로 반응기 내부로 주입하였다. 벤젠가스에 대한 흡착반응은 상온에서 이루어졌으며, 반응기 내부에 0.02 g의 활성탄소섬유를 투입하여 수행하였다. Figure 5 및 Table 4에 활성탄소섬유의 벤젠 흡착특성 결과를 나타내었는데, 파괴시간은  $C/C_0 = 0.1$ 일 때의 시간으로 간주하였다. 여기서  $C_0$ 는 흡착제를 채운 컬럼에 피흡착질을 주입하는 주입농도 유속,  $C$ 는 흡착되지 않은 피흡착질이 유출되는 유출농도 유속을 의미한다.

R-ACF의 경우 4 h까지 벤젠가스를 100% 제거하였으며, 5.4 h부터 파괴가 시작되어 최종적으로 포화상태에 도달하기까지는 약 12 h이 걸렸다. 반면 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유의 파괴점은 전반적으로 모두 증가하였으며, 그중에도 FO-19 샘플이 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유중 가장 높은 벤젠 흡착특성을 나타내었다. FO-19는 약 11.6 h부터 파괴가 진행되었고, 23.4 h 후에 포화상태에 도달하였다. 반면 FO-28 샘플은 약 7.9 h부터 파괴되기 시작하여 16 h에 포화상태에 도달하였고, FO-37 샘플 또한 이와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 두 샘플은 파괴되는 시점은 유사하였으나, 포화상태에 가까워짐에 따라 파괴곡선의 기울기가 달라졌으며, 최종적으로 FO-37은 약 22 h 후에 포화상태에 도달하였다. FO-28 및 FO-37의 벤젠 흡착능력은 미처리 활성탄소섬유보다는 증가하였지만 FO-19 샘플에 비해서는 감소하였다. 일반적으로 흡착반응에서는 흡착제가 갖는 비표면적 및 기공크기 등과 같은 기공특성이 매우 중요한 인자로 알려져 있지만 [29,30], 본 연구에서는 다소 상이한 결과를 나타내었다. 함산소불소화 처리된 활성탄소섬유는 모두 미처리 활성탄소섬유에 비하여 비표면적이 감소하였음에도 불구하고 벤젠 흡착성능은 더욱 향상된 결과를 보였으며, 특히 함산소불소화 처리 후 비표면적이 가장 크게 감소하였던 FO-19 샘플이 가장 우수한 벤젠 흡착능력을 나타내었다. 이러한 현상은 두 가지 원인 때문인 것으로 생각되는데, 첫째로 semi-covalent C-F 존재 여부와, 둘째로는 벤젠의 동적 거동(dynamic behavior)에 영향을 미치는 미세기공의 비율 때문인 것으로 사료된다. 우선적으로는 활성탄소섬유 표면에 semi-covalent C-F 결합이 생성되면서 높은 표면 에너지를 가지게 되어 피흡착질을 흡착제 표면으로 유도하였기 때문에 함산소불소화 처리된 모든 샘플이 미처리 활성탄소섬유보다 흡착 효율이 증가한 결과를 나타낸 것으로 보여진다[20,27]. 그러나 주입된 불소농도가 높아질수록 표면 극성이 증가되어, 비극성 물질인 벤젠과의 흡착력이 감소된 것으로 사료된다. 따라서, 이렇게 semi-covalent C-F가 존재할 때, 흡착능력을 결정짓는 요인은 미세기공 비율도 중요한 인자인 것으로 판단된다[22]. 흡착공정에서는 표면특성도 중요하지만 흡착 사이트가 되는 미세기공이 많을수록 흡착특성이 향상된다고 알려져 있다[31]. 상기 3.2절에서 언급한 바와 같이 함산소불소화 처리 후 전반적인 활성탄소섬유의 기공특성은 감소하였으나, FO-19

**Figure 5. Breakthrough curves of benzene for oxy-fluorinated ACFs.**

의 경우 미세기공 비율이 증가하였다. 이렇게 증가된 미세기공은 벤젠가스가 흡착될 수 있는 사이트가 되어 긍정적인 영향을 미친 것으로 사료된다. 이러한 결과들을 통해 활성탄소섬유 표면에 semi-covalent C-F가 존재하여 높은 표면에너지를 가지면서, 동시에 상대적으로 미세기공 비율이 높은 세공구조를 가질 때 최적의 벤젠 흡착성능을 나타내는 것을 확인하였다.

## 4. 결 론

새집증후군 원인가스 중 하나인 벤젠가스의 제거능을 향상시키기 위하여, 활성탄소섬유에 함산소불소화 처리를 실시하였으며, 함산소불소화 처리 조건에 따른 벤젠가스 흡착능력 평가를 실시하였다. 100 ppm의 벤젠 가스를 주입하였을 때, 함산소불소화 처리된 모든 활성탄소섬유는 미처리된 활성탄소섬유와 비교하여 흡착효율이 모두 증가되었으며, 최대 약 6 h까지 파괴시간이 지연됨을 확인할 수 있었다. 이는 함산소불소화 처리 후 도입된 semi-covalent C-F bond 때문에 활성탄소섬유의 표면에너지가 증가하여, 더 많은 피흡착질을 끌어당긴 것으로 사료된다. 또한 함산소불소화 처리된 샘플중에서는 미세기공 비율이 가장 높은 샘플의 벤젠 흡착효율이 가장 우수한 성능을 나타내었다. 이 결과를 통하여 흡착제의 표면특성과 기공구조가 적절한 조화를 이룰 때 벤젠가스 흡착효율이 더욱 향상됨을 확인할 수 있었다.

## References

1. Y. W. Ju and G. Y. Oh, Behavior of toluene adsorption on activated carbon nanofibers prepared by electrospinning of a polyacrylonitrile-cellulose acetate blending solution, *Korean J. Chem. Eng.*, **34**, 2731-2737 (2017).
2. Y. Koike and Y. Mitarai, Removal of causative factors for sick building syndrome using air plants, *Trans. Sci. Technol.*, **2**, 50-55 (2015).
3. Y. Lee, S. H. Lee, I. S. Kyeng, and S. S. Lee, Reduction properties of environment-friendly mortar for indoor air contaminant using phytoncide and palm active carbon, *J. Archit. Inst. Korea Struct. Constr.*, **32**, 27-34 (2016).
4. X. Zhang, B. Gao, A. E. Creamer, C. Cao, and Y. Li, Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review, *J. Hazard. Mater.*, **338**, 102-123 (2017).
5. M. S. Li, S. C. Wu, Y. H. Peng, and Y. H. Shih, Adsorption of volatile organic vapors by activated carbon derived from rice husk

- under various humidity conditions and its statistical evaluation by linear solvation energy relationships, *Sep. Purif. Technol.*, **170**, 102-108 (2016).
6. M. Fayaz, P. Shariaty, J. D. Atkinson, Z. Hashisho, J. H. Phillips, J. E. Anderson, and M. Nichols, Using microwave heating to improve the desorption efficiency of high molecular weight VOC from beaded activated carbon, *Environ. Sci. Technol.*, **49**, 4536-4542 (2015).
  7. M. J. Kim, M. J. Jung, S. S. Choi, and Y. S. Lee, Adsorption characteristics of chromium ion at low concentration using oxy-fluorinated activated carbon fibers, *Appl. Chem. Eng.*, **26**, 432-438 (2015).
  8. M. J. Kim, M. J. Jung, S. S. Choi, and Y. S. Lee, Effects of the fluorination of activated carbons on the chromium ion adsorption, *Appl. Chem. Eng.*, **26**, 92-98 (2015).
  9. H. K. Son, S. Sivakumar, M. J. Rood, and B. J. Kim, Electrothermal adsorption and desorption of volatile organic compounds on activated carbon fiber cloth, *J. Hazard. Mater.*, **301**, 27-34 (2016).
  10. B. C. Bai, J. S. Im, and Y. S. Lee, Lyocell-based activated carbon fibers improved the adsorption of harmful gas properties when produced via dual-simultaneous treatments, *Carbon Lett.*, **23**, 69-73 (2017).
  11. Y. J. Heo, M. U. T. Le, and S. J. Park, Investigation of carbon dioxide adsorption by nitrogen-doped carbons synthesized from cubic MCM-48 mesoporous silica, *Carbon Lett.*, **18**, 62-66 (2016).
  12. L. Shi, K. Yang, Q. Zhao, H. Wang, and Q. Cui, Characterization and mechanisms of H<sub>2</sub>S and SO<sub>2</sub> adsorption by activated carbon, *Energy Fuels*, **29**, 6678-6685 (2015).
  13. Y. Guo, Y. Li, T. Zhu, and M. Ye, Investigation of SO<sub>2</sub> and NO adsorption species on activated carbon and the mechanism of NO promotion effect on SO<sub>2</sub>, *Fuel*, **143**, 536-542 (2015).
  14. M. J. Kim, K. M. Lee, S. Lee, S. Y. Yeo, S. S. Choi, and Y. S. Lee, Preparation and heating characteristics of N-doped graphite fiber as a heating element, *Appl. Chem. Eng.*, **28**, 80-86 (2017).
  15. O. Kazak, Y. R. Eker, H. Bingol, and A. Tor, Novel preparation of activated carbon by cold oxygen plasma treatment combined with pyrolysis, *Chem. Eng. J.*, **325**, 564-575 (2017).
  16. M. Li, B. Lu, Q. F. Ke, Y. J. Guo, and Y. P. Guo, Synergetic effect between adsorption and photodegradation on nanostructured TiO<sub>2</sub>/activated carbon fiber felt porous composites for toluene removal, *J. Hazard Mater.*, **333**, 88-98 (2017).
  17. K. M. Lee, M. J. Kim, H. Jo, S. Y. Yeo, and Y. S. Lee, The electrical and heating properties of copper-incorporated graphite fibers fabricated using different ultrasonication techniques, *Carbon Lett.*, **24**, 111-114 (2017).
  18. H. Jo, K. H. Kim, M. J. Jung, J. H. Park, and Y. S. Lee, Fluorination effect of activated carbons on performance of asymmetric capacitive deionization, *Appl. Surf. Sci.*, **409**, 117-123 (2017).
  19. K. M. Lee, S. E. Lee, and Y. S. Lee, Effect of fluorination on thermal and mechanical properties of carbon nanotube and graphene nanoplatelet reinforced epoxy composites, *Polymer (Korea)*, **40**, 553-560 (2016).
  20. Y. J. Choi, K. M. Lee, K. Kim, and Y. S. Lee, Mechanical properties of epoxy composites reinforced with carbon nanotube and oxy-fluorinated powdered-carbon fiber, *Polymer (Korea)*, **41**, 835-843 (2017).
  21. M. J. Jung, Y. Ko, K. H. Kim, and Y. S. Lee, Oxyfluorination of pitch-based activated carbon fibers for high power electric double layer capacitor, *Appl. Chem. Eng.*, **28**, 638-644 (2017).
  22. M. J. Kim, M. J. Jung, M. I. Kim, S. S. Choi, and Y. S. Lee, Adsorption characteristics of toluene gas using fluorinated phenol-based activated carbons, *Appl. Chem. Eng.*, **26**, 587-592 (2015).
  23. L. E. Cruz-Barba, S. Manolache, and F. Denes, Novel plasma approach for the synthesis of highly fluorinated thin surface layers, *Langmuir*, **18**, 9393-9400 (2002).
  24. M. J. Jung, E. Jeong, S. Cho, S. Y. Yeo, and Y. S. Lee, Effects of surface chemical properties of activated carbon modified by amino-fluorination for electric double-layer capacitor, *J. Colloid Interface Sci.*, **381**, 152-157 (2012).
  25. E. Jeong, M. J. Jung, and Y. S. Lee, Role of fluorination in improvement of the electrochemical properties of activated carbon nanofiber electrodes, *J. Fluor. Chem.*, **150**, 98-103 (2013).
  26. J. Giraudet, C. Delabarre, K. Guérin, M. Dubois, F. Masin, and A. Hamwi, Comparative performances for primary lithium batteries of some covalent and semi-covalent graphite fluorides, *J. Power Sources*, **158**, 1365-1372 (2006).
  27. D. Y. Kim, S. J. In, and Y. S. Lee, Effect of fluorination and ultrasonic washing treatment on surface characteristic of poly(ethylene terephthalate), *Polymer (Korea)*, **37**, 316-322 (2013).
  28. Y. C. Chiang, P. C. Chiang, and C. P. Huang, Effects of pore structure and temperature on VOC adsorption on activated carbon, *Carbon*, **39**, 523-534 (2001).
  29. S. W. Lee, S. K. Bae, J. H. Kwon, Y. S. Na, C. D. An, Y. S. Yoon, and S. K. Song, Correlations between pore structure of activated carbon and adsorption characteristics of acetone vapor, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **27**, 620-625 (2005).
  30. F. E. C. Othman, N. Yusof, H. Hasbullah, J. Jaafar, A. F. Ismail, N. Abdullah, N. A. H. M. Nordin, F. Aziz, and W. N. W. Salleh, Polyacrylonitrile/magnesium oxide-based activated carbon nanofibers with well-developed microporous structure and their adsorption performance for methane, *J. Ind. Eng. Chem.*, **51**, 281-287 (2017).
  31. H. S. Ju, S. I. Lee, Y. S. Lee, and H. G. Ahn, Surface modification of activated carbon by acid treatment and adsorption property of heavy metals, *Appl. Chem.*, **4**, 173-176 (2000).