

활성탄소섬유의 비표면적에 따른 유해가스 흡착 및 전기화학적 감응 특성

강진균^{1,2} · 정용식² · 배병철^{1,†} · 류지현^{3,†}

¹ECO융합섬유연구원, ²전북대학교 유기소재섬유공학과, ³원광대학교 탄소융합공학과
(2020년 05월 15일 접수, 2020년 06월 08일 수정, 2020년 06월 16일 채택)

Effect of Specific Surface Area of Activated Carbon Fiber on Harmful Gas Adsorption and Electrochemical Responses

Jin Kyun Kang^{1,2}, Yong Sik Chung², Byong Chol Bai^{1,†} and Ji Hyun Ryu^{3,†}

¹Korea Institute of Convergence Textile (KICTEX), 594,
Seodong-ro, Iksan-si, Jeollabuk-do 54588, Republic of Korea

²Department of Organic Materials and Textile Engineering, Chonbuk National University,
567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

³Department of Carbon Convergence Engineering, Wonkwang University,
460 Iksan-daero, Iksan-si, Jeollabuk-do 54538, Republic of Korea

(Received May 15, 2020, Revised June 08, 2020; Accepted June 16, 2020)

요약: 최근 산업활동을 통해 배출되는 유해 오염물질 제거에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 연구에서는 수증기 활성화 법을 이용하여 활성탄소섬유를 제조하고, 이의 유해가스 흡착 및 전기화학적 감응 특성을 분석하였다. 활성탄소섬유의 균일한 기공 구조, 활성 반응 면적 및 반응 위치를 조절하기 위하여, 활성화 온도(750-850 °C) 및 활성화 시간(30-240 min)을 조절하였고, 다양한 활성화 조건을 통해 제조된 활성탄소섬유의 SO₂와 NO 가스 흡착 및 가스 센서를 통한 감응 특성을 분석하였다. 특히, 850 °C에서 45 min 동안 수증기 활성화 반응을 통해 제조된 활성탄소섬유가 가장 높은 비표면적(1,041.9 m²/g)과 기공 특성(0.42 cm³/g)을 보였으며, 우수한 SO₂ (1.061 mg/g) 및 NO (1.210 mg/g) 가스 흡착 특성을 보였다.

Abstract: Recently, there has been growing interest in the study of removal of harmful and hazardous pollutants emitted by industrial activities. In this study, we have developed porous activated carbon fibers prepared by a water vapor activation method and analyzed the adsorptions of the harmful gases with electrochemical responses of activated carbon fibers. To control the uniformity of pore structures, active reaction areas, and active sites, the reaction conditions of activation temperatures were varied from 750 to 850 °C with the predetermined reaction time intervals (30 to 240 min). The SO₂ and NO gas adsorptions of activated carbon fibers prepared by various reaction conditions were analyzed and monitored by electrochemical sensor responses. In particular, the activated carbon fibers prepared at the reaction temperature of 850 °C and time of 45 min showed the highest specific surface area (1,041.9 m²/g) and pore characteristics (0.42 cm³/g), and excellent adsorption capabilities of SO₂ (1.061 mg/g) and NO (1.210 mg/g) gases, respectively.

Keywords: harmful gas, activated carbon fiber, specific surface area, adsorption, electrochemical response

† Corresponding author: Byong Chol Bai (baibc820@kictex.re.kr)
Ji Hyun Ryu (jhryu4816@wku.ac.kr)

1. 서론

일반적으로 SO_x, NO_x, 및 VOCs (volatile organic compounds)와 같은 인체유해물질을 흡착 및 제거하기 위한 흡착물질로 제올라이트(zeolite), 금속유기골격체(metal organic framework, MOF) 및 다공성 탄소소재(porous carbon material) 등이 활용되고 있다. 이 중에서 다공성 탄소소재로는 활성탄소(activated carbon, AC)와 활성탄소섬유(activated carbon fiber, ACF)가 주로 사용되고 있다[1-3]. 특히, 유해물질 및 가스를 제거하기 위해 활성탄소가 주로 사용되고 있으며, 활성화 방법에 따라 500~1,500 m²/g의 다양한 비표면적을 얻을 수 있다. 또한, 제조 방법 및 조건에 따라 미세기공(micropore) 비율을 70% 이상 높일 수 있어 뛰어난 가스 흡착 성능을 갖게 제조가 가능하다[4,5]. 그러나 파과점(break-through point) 도달시간이 짧아 흡착제 교체 빈도가 높을 뿐만 아니라 형상에 따라 취급이 어렵다는 단점이 있다[6,7].

반면 활성탄소섬유는 미세기공이 섬유표면에 비교적 균일한 형성되어 있어, 활성탄소에 비해 흡착 속도가 빠를 뿐만 아니라 흡착질과의 분리가 용이하여 재생성이 높다고 보고되었다[8]. 또한, 특유의 기공 구조로 인해 물리적 흡착뿐만 아니라, 화학적 흡착 능력 부여가 용이하여 유해물질 흡착 및 제거가 가능한 작용기를 부여하기가 용이하다. 이러한 장점으로 인해 활성탄소섬유는 기상용 흡착 필터(filter) 소재로 활용되고 있다[9-13]. 또한, 활성탄소섬유의 뛰어난 전기 전도성을 가지고 있어 다공성 전극소재로 이용되고 있으며, 흡착 특성을 이용하여 유해가스를 감지할 수 있는 가스센서 소재로 주목 받고 있다. 이는 기존의 접촉 연소식, 반도체식 가스센서의 높은 작동온도 및 가열 장치와 같은 작동 안정성의 한계를 극복할 수 있는 전극소재로 인식되고 있기 때문이다[14,15]. 그러므로 유해가스 흡착물질 및 검출 센서로 활용하기 위한 활성탄소섬유의 제조 및 이의 특성 분석이 중요하다.

본 연구에서는 다양한 활성화 조건에서 제조된 활성탄소섬유의 유해가스 흡착특성 및 전기화학적 감응특성을 분석하기 위하여 폴리아크릴로니트릴(polyacrylonitrile, PAN)계 탄소섬유를 이용하여 다공성 흡착소재 및 가스센서용 전극을 제조하였다. 수증기 활성화법을 사용하여 다양한 비표면적 및 균일한 기공특성을 확보하고, 활성 반응면적을 증대시킴으로써 단위 중량당 활성점(active site)을 극대화시킨 후 유해가스 흡착 특성 및 감응특성을 파악하였다. 다양한 수증기 활성화 조건으로 제조된 활성탄소섬유의 유해가스 흡착 및 감응 특성은 SO₂와 NO가스를 이용하여 측정하였으며, 각각의 가스에 대한 흡착 및 전기화학적 특성에 대하여 고찰하였다.

2. 실험

2.1. 활성탄소섬유의 제조 및 기공특성분석

본 연구에서는 PAN (Kolon Industries, INC.) 계 탄소섬유를 제조한 후 다양한 수증기 활성화 조건(750~850°C)을 바탕으로 안정적이고 일정한 비표면적과 수율을 갖는 활성탄소섬유 제조 조건 확립에 중점을 두고 연구를 진행하였다. 활성탄소섬유의 미세기공 구조를 파악하기 위해 BET (Brunauer-Emmett-Teller) 비표면적 분석 장비(Micromeritics instrument Co., ASAP2020)를 이용하여 미세기공 분석을 실시하였으며, N₂흡착등온선은 Fig. 1, 비표면적 및 미세기공률은 Table 1에 나타내었다. 수증기 활성화 공정은 불활성 기체(N₂) 분위기 하에서, 승온속도 5°C/min을 유지하면서 목표 활성화 온도 조건(750~850°C)에 도달하면, 그 시점부터 물을 주입(10 mL/min)하였으며, 이 때 수증기가 생성되면서 탄소섬유 표면과 반응하게 된다. 이를 통해, 활성화 공정 온도에 따른 기공 구조의 변화를 관찰하였으며, 추가적으로 공정온도와 함께 반응시간을 변수로 두어 동일 온도에서 활성화 반응 시간에 따른 기공 구조의 변화를 관찰하였다.

2.2. 기계적 강도 분석

활성탄소섬유의 내구성과 관련된 기계적 강도를 측정하기 위해 섬유 인장시험기(SIMADZU, AG-X)를 이용하여 다양한 수증기 활성화 조건으로 제조된 활성탄소섬유의 인장강도를 측정하였다. 인장시험편으로 사용한 활성탄소섬유의 길이는 25 mm로 결정하였으며, 활성탄소섬유 한 가닥을 채취한 후, 이를 시험 틀 위에 올려놓고 에폭시로 접착시킨 뒤, 가능한 섬유의 상태를 팽팽하게 고정하였다.

인장시험은 각 활성화 조건으로 제조된 활성탄소섬

Table 1. 다양한 수증기 활성화 조건에 따라 제조된 활성탄소섬유의 비표면적 및 미세기공도

Temp. (°C)	Activation time	Yield (%)	S _{BET} (m ² /g)	V _{micro} (cm ³ /g)	V _{total} (cm ³ /g)
750	120 m	45.55	677.9	0.26	0.29
	180 m	40.13	759.5	0.29	0.33
	240 m	33.08	816.3	0.32	0.37
800	1 h	40.26	770.1	0.30	0.33
	1 h 15 m	38.93	817.2	0.32	0.38
	1 h 30 m	34.81	902.3	0.36	0.42
850	30 m	45.42	662.5	0.26	0.29
	45 m	40.76	1041.9	0.42	0.49
	50 m	34.94	735.0	0.29	0.34

Table 2. 활성화 조건 별 최대 비표면적을 갖는 활성탄소섬유의 SO₂ 가스 흡착 특성 분석

Sample	Superficial Velocity	Initial Concentration	Total Time	Breakthrough Time	Saturation Time	Effluent Volume	Total Amount Removed	Total Removal	Adsorption Capacity
	Q (L/min)	C ₀ (mg/L)	t _{total} (min)	t _{0.05} (min)	t _{0.95} (min)	V _{eff} (L)	m _{total} (mg/g)	R _{total} (%)	q _{total} (mg/g)
750_240 m	0.5	37.61	150	8.22	93.12	75	2.821	28.97	0.817
800_90 m	0.5	36.88	150	5.15	124.63	75	2.766	35.74	0.989
850_45 m	0.5	28.92	150	9.42	138.6	75	2.169	48.92	1.061

유 당 시편을 10개 이상 제조하였으며, 각 10번씩 반복 실험을 실시하였고, 이를 통해 도출된 결과값들의 평균을 구하였다. 또한, 결과값의 기울기를 이용하여 인장탄성계수를 결정하였다.

2.3. 전기화학적 가스 감응 특성 분석

활성탄소섬유의 가스 감응 특성을 확인하기 위해 인장강도 시편 제조와 같은 방법으로, 활성탄소섬유 한 가닥을 채취하여 양끝을 실버 페이스트로 유리판 위에 부착시켰고, 50 mm의 실버 와이어를 그 양쪽에 각각 부착시켜 센서 전극을 제조하였다. 실버와이어가 부착된 전극을 반응기(3,400 cc)의 중앙에 위치시켰으며, 상온 조건에서 유해가스 감응 특성을 평가하였다. 가스 감응 특성은 100 ppm 농도를 갖는 SO₂ 가스를 기반으로 농도를 조절하여 측정하였다. 실험에서 가스의 유속은 질량유속 조절기(mass flow controller)를 이용하여 500 sccm으로 일정하게 유지하였고, 전극의 저항 변화는 Keithley 6514 system electrometer로 측정하였다 [16].

2.4. SO₂ 및 NO 가스 흡착 특성 분석

수증기 활성화 처리한 활성탄소섬유의 유해가스 흡

착 특성을 파악하기 위해 Multi-gas detector (Teledyne Technologies, Model 7600) 장비를 이용하여 분석에 사용된 활성탄소섬유 1 g당 SO₂ 및 NO 가스의 흡착 정도를 확인하였다. SO₂와 NO 가스 투입시간에 따른 활성탄소섬유의 흡착 정도를 다음과 같은 공식을 사용하여 계산하였고 이를 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

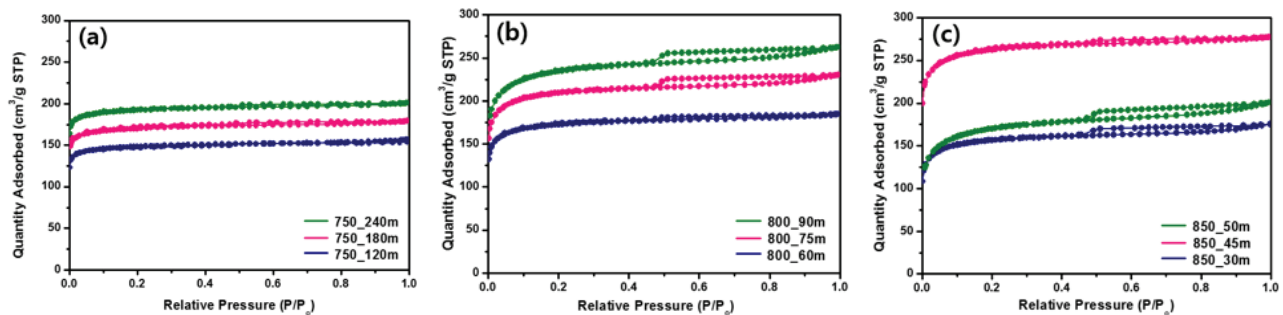
$$V_{eff} = Q \cdot t_{total} \tag{1}$$

$$m_{total} = \frac{C_0 V_{eff}}{1,000} \tag{2}$$

$$q_{total} = \frac{Q}{1,000} \int_{t=0}^{t=t_{total}} C_{ad} dt \tag{3}$$

$$R_{total} = \frac{q_{total}}{m_{total}} \times 100 \tag{4}$$

식 (1)은 투입된 유해가스(SO₂, NO)의 전체 양 V_{eff} (L)을 구하는 공식이며 Q (L/min)는 가스유량, t_{total} (min)은 유해가스 투입시간을 나타낸다. 식 (2)는 활성탄소섬유 질량 1 g당 투입된 전체 가스에서 SO₂와 NO 가스의 양 m_{total} (mg/g)을 구하는 공식이며 C₀ (mg/L)는 사용한 SO₂와 NO 가스의 농도를 나타낸다. 식 (3)은 활성탄소섬유 질량 1 g당 활성탄소섬유에 흡착된 유해



- (a) 반응온도: 750°C, 반응시간: 120~240 min,
- (b) 반응온도: 800°C, 반응시간: 60~90 min
- (c) 반응온도: 850°C, 반응시간: 30~50 min

Figure 1. 다양한 수증기 활성화 조건에 따라 제조된 활성탄소섬유의 N₂ 흡착등온선.

가스의 양 q_{total} (mg/g)을 구하는 공식이며 이는 유해가스 투입 시간(t)에 따른 흡착된 가스량(C_{ad})를 적분공식을 이용하여 계산하였다. 식 (4)에서 R_{total} (%)은 활성탄소섬유의 SO_2 와 NO 가스 흡착율을 계산하는 식이다[13]. 상기 제시된 식 이외에도, 파과점(breakthrough point) 및 파과시간(breakthrough time: t_b)은 다음과 같이 결정되었다. 파과곡선(breakthrough curve)에서 $C/C_0 = 0.05$ 값일 때 파과점으로 결정하였고, 그 때의 시간을 파과시간으로 결정하였다. 그리고 $C/C_0 = 0.95$ 가 되었을 때, 활성탄소섬유의 흡착이 포화되었다고 판단하였고, 이 점에서의 시간을 포화시간(saturation time: t_s)으로 결정하였다. 활성탄소섬유의 흡착 특성은 활성화 공정 결과 형성된 기공구조와 관련이 높을 것으로 판단되어 각 온도 별 가장 높은 비표면적을 갖는 샘플을 선별하여 흡착 특성 테스트를 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수증기 활성화 공정 조건에 따른 활성탄소섬유의 기공 구조 분석

Table 1.을 통해 나타난 바와 같이, 활성화 온도가 증가하고 활성화 시간이 길어질수록 활성탄소섬유의 비표면적이 증가하는 경향이 나타났다. 가장 높은 비표면적을 갖는 활성화 조건은 $850^\circ C$, 45 min으로, 이때의 비표면적 값은 $1,041 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ 으로 나타났다. 하지만 활성화 온도가 높아지고, 활성화 시간이 증가할수록 제조 수율은 하락하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 가장 높은 온도 조건인 $850^\circ C$ 조건 하에서 활성화 시간과 비표면적 간의 연관관계를 살펴보면, 활성화 시간이 길어질수록, 비표면적이 증가하는 거동을 보이다가 45 min 이후에 급격한 비표면적 감소가 나타났다. 이는 수증기 활성화에 의해 새로 생성되는 기공의 영향보다 기공의 확장 및 붕괴로 인한 영향이 더 크기 때문에 나타나는 결과로 보여진다[17-20].

3.2. 활성탄소섬유의 기계적 강도 특성 분석

Fig 2.에서 나타난 바와 같이, 수증기 활성화 시간과 활성화 온도가 증가할수록 활성탄소섬유의 인장강도와 인장탄성계수는 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 수증기 활성화 반응으로 인해 탄소 구조가 CO, CO_2 , H_2O 등으로 분해되고, 그 자리에 기공이 생성되기 때문에 활성탄소섬유의 기계적 강도가 낮아지는 것으로 나타났다. 따라서 수증기 활성화도가 높아질수록 활성탄소섬유가 불안정한 탄소 구조를 갖게 됨에 따라 인장강도, 탄성계수가 모두 감소하는 경향이 나타나게 된다. 이러한 결과는 활성탄소섬유를 제조함에 있어 온도가 높을수록 수증기 활성화 반응에 참여하는 탄소

구조의 활성점이 많이 생성되고, 수증기와 반응이 더욱 활발해짐에 따라 더 빨리 구조 붕괴 및 기공이 형성되기 때문이다[21].

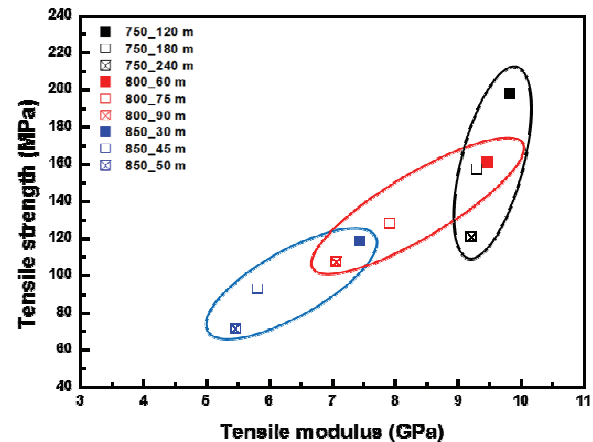
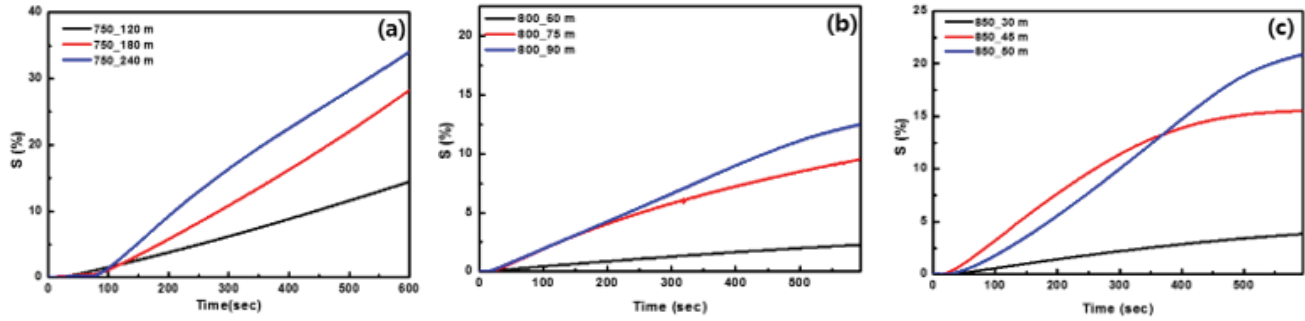


Figure 2. 다양한 수증기 활성화 조건에 따라 제조된 활성탄소섬유의 Tensile strength-Tensile modulus 그래프.

3.3. 활성탄소섬유의 전기화학적 가스감응 특성 분석

Fig. 3의 y축은 초기저항대비 목표 가스를 흘려준 뒤 나타나는 저항 변화(S%)를 의미하며, $(R-R_0)/R_0 \times 100$ (%)으로 나타낼 수 있다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이, 수증기 활성화 시간에 따른 저항 변화율은 비례하는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞선 BET 분석 결과에서 활성화 시간이 길어질수록 비표면적이 높아지고, 미세 기공 구조가 더 잘 발달한다는 결과와 함께 설명이 가능하다. 기공 구조가 발달될수록 저항 변화를 유발하는 SO_2 가스의 흡착이 더 활발하게 일어나므로, 더 오래 활성화된 활성탄소섬유일수록 저항변화율이 크게 나타나는 것으로 확인할 수 있었다. 또한, 비표면적이 가장 높은 $850^\circ C$, 45 min 조건에서 제조한 활성탄소섬유의 경우, 센서 측정을 시작한 이후 기울기가 가장 급격하게 증가하는 것을 보아, SO_2 가스에 대한 반응속도가 가장 우수한 것을 확인할 수 있었다. 상기 분석을 통해 활성탄소섬유의 SO_2 가스 감응에 따른 저항 변화를 측정해본 결과, 모든 샘플이 초기 저항(R_0) 대비 증가하는 경향성을 보였다. 이는 SO_2 가스가 활성탄소섬유의 기공에 Van der Waals force로 흡착되는 과정과 semi-ionic interaction으로 전자 교환이 일어나는 복합적인 현상으로 흡착 메커니즘을 설명할 수 있다[22].

일반적으로 가스센서 소재로 사용되는 금속 계열의 SnO_2 와 탄소나노튜브(carbon nanotube)는 P-type반도체로서, 산화성(NO , CO_2 가스 등) 가스와 접촉하게 되면 전자를 잃게 되어 가전도대에서의 정공 밀도가 증가한다. 그 결과 페르미 레벨이 가전도대로 이동하게 되고



(a) 반응온도: 750°C, 반응시간: 120~240 min
 (b) 반응온도: 800°C, 반응시간: 60~90 min
 (c) 반응온도: 850°C, 반응시간: 30~50 min

Figure 3. 다양한 활성화 조건으로 제조된 활성탄소섬유의 전기화학적 SO₂ 가스 감응 특성 분석.

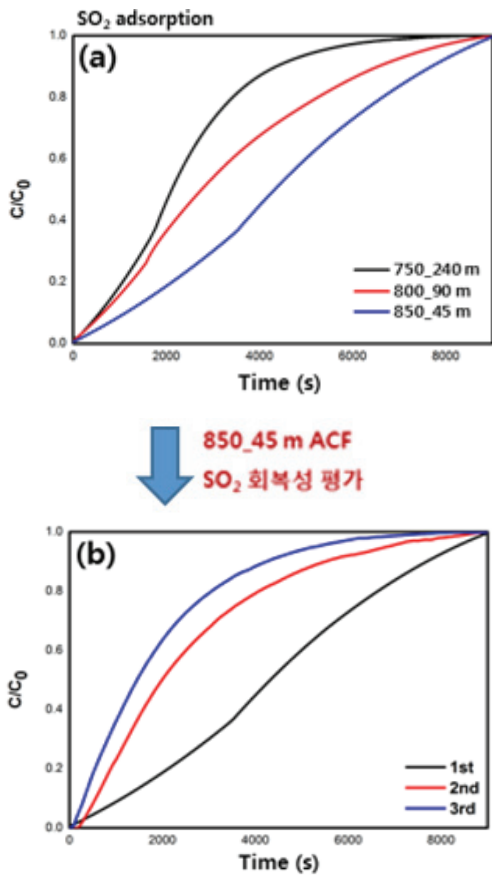


Figure 4. (a) 활성탄소섬유의 SO₂가스 파과곡선 및 (b) 850°C, 45 min 조건에서 제조된 활성탄소섬유의 흡·탈착 회복성 분석.

결과적으로 전기저항이 감소된다. 반면, 환원성(SO₂, NH₃ 등) 가스와 접촉하게 되면 가스로부터 전자를 얻게 되어 정공의 밀도가 감소하고 이에 따라 페르미 레벨이 전도대로 이동하여 전기저항이 증가하는 현상이

나타난다[23-25]. 본 연구에서는 Fig 3.의 결과로부터 SO₂ 환원성 가스에 노출되었을 경우 전기저항이 모두 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, 이로부터 활성탄소섬유 기반 전극이 반도체식 가스센서와는 동일한 방식으로 유해가스를 감응하는 것으로 판단된다.

3.4. 활성탄소섬유의 SO₂ 및 NO 가스 흡착 특성 분석

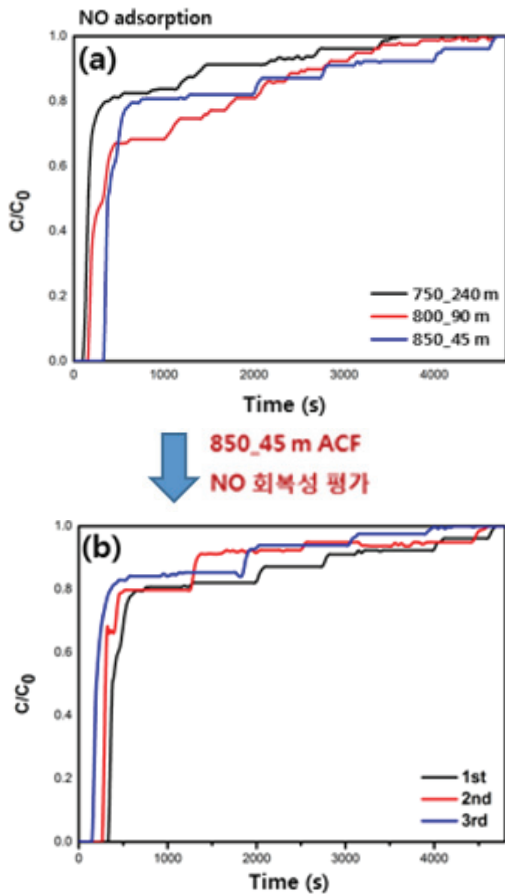
본 연구에서는 활성탄소섬유의 SO₂ 및 NO 가스의 흡착 특성을 파악하기 위해 Teledyne社의 Model 7600 장비를 사용하였고, 이를 Fig 4.와 Fig 5.에 각각 나타내었다. 그림에서와 같이 가스 종류에 따라 흡착 거동이 다른 것을 확인할 수 있는데 이는 측정장비 특성으로 인한 결과로, SO₂가스의 경우 측정범위가 소수점 둘째 자리까지 가능한 데 반해, NO가스는 정수까지 측정가능하기 때문에 매끄럽지 않은 계단형 그래프로 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 기존의 활성탄소섬유를 이용한 SO₂ 및 NO 흡착 특성과 비교하여 볼 때[26], 활성탄소섬유의 양, 비표면적, 기공도, 가스 농도, 유량, 온도 등을 고려하면 유사한 흡착 경향성이 나타난 것을 확인할 수 있다.

SO₂가스 흡착 특성은 Fig. 4에 나타난 것과 같이, 제조된 활성탄소섬유 중 가장 높은 비표면적을 보인 850°C, 45 min 조건에서 제조한 활성탄소섬유가 가장 우수한 것을 알 수 있었으며 이는 형성된 기공구조와 관련이 있는 것을 확인할 수 있었다. 활성탄소섬유의 SO₂ 가스 흡착 특성 실험 결과, Table 2에 나타난 것과 같이 850°C, 45 min 조건에서 제조한 활성탄소섬유의 흡착량이 1.061 mg/g으로 가장 우수했고, 파과시간 또한 9.42 min으로 가장 긴 시간 동안 흡착이 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 활성탄소섬유의 NO가스 흡착 특성에 대해 나타난 것이며, 시간에 따른 NO 가스 흡착량을 계산한 결과는 Table 3에 나타내었다. SO₂가스와 마찬가지로

Table 3. 활성화 조건별 최대 비표면적을 갖는 활성탄소섬유의 NO가스 흡착 특성 분석

Sample	Superficial Velocity	Initial Concentration	Total Time	Breakthrough Time	Saturation Time	Effluent Volume	Total Amount Removed	Total Removal	Adsorption Capacity
	Q	C0	t_{total}	$t_{0.05}$	$t_{0.95}$	V_{eff}	m_{total}	R_{total}	q_{total}
	(L/min)	(mg/L)	(min)	(min)	(min)	(L)	(mg/g)	(%)	(mg/g)
750_240 m	1	80.0	80	2.02	23.35	80	6.400	10.69	0.684
800_90 m	1	79.0	80	2.86	41.87	80	6.320	18.44	1.165
850_45 m	1	78.0	80	5.80	46.6	80	6.240	19.40	1.210

**Figure 5.** (a) 활성탄소섬유의 NO가스 파과곡선 및 (b) 850°C, 45 min 조건에서 제조된 활성탄소섬유의 흡·탈착 회복성 분석.

850°C, 45 min 조건에서 제조한 활성탄소섬유의 NO 가스 흡착량이 1.210 mg/g으로 가장 우수한 것을 알 수 있으며, 파과시간도 5.8 min으로 가장 긴 시간 동안 가스 흡착이 이뤄진 것을 확인할 수 있었다. 또한, 비표면적이 클수록 NO가스 흡착량과 파과시간이 증가하는 경향을 보였다(750°C, 240 min < 800°C, 90 min < 850°C, 45 min).

또한, 활성탄소섬유의 회복성을 평가하기 위해 3회 반복실험을 실시하였다. 회복성 실험은 가장 높은 비표면적을 보였던 850°C, 45 min에서 제조된 활성탄소섬유를 사용하여 실험을 진행하였다. 먼저 SO₂ 또는 NO 가스를 샘플 튜브에 주입해 활성탄소섬유의 가스 흡착 특성을 확인하였고, 상온조건에서 N₂가스를 주입하여 흡착된 가스를 다시 탈착시키는 과정을 거치게 된다. 이 과정을 반복하여 활성탄소섬유의 유해가스 흡착 회복성을 측정하였다.

Fig. 4와 같이, SO₂ 가스에 대한 회복성 테스트를 해 본 결과, 첫 번째 측정에서 흡착된 SO₂가스의 양(q_{total})은 1.061 mg/g, 두 번째 측정에서는 0.794 mg/g, 세 번째 실험에서는 0.589 mg/g으로 55.5%의 회복성을 나타냈다. Fig. 5와 같이, NO 가스에 대한 회복성 테스트를 진행한 결과, 첫 번째 측정에서 흡착된 NO가스의 양(q_{total})은 1.210 mg/g, 두 번째 측정에서는 0.947 mg/g, 세 번째 실험에서는 0.776 mg/g으로 64.4%의 회복성을 보였다. 이처럼 회복성 테스트를 반복할수록 활성탄소섬유의 유해가스 흡착 효율성이 낮아지는 결과는, 본 실험이 상온, 상압 조건에서 흡·탈착이 이뤄진다는 점을 고려하였을 때, 탈착 과정 시 활성탄소섬유의 미세기공에 Van der Waals force 상태로 흡착되어 있는 유해가스가 충분히 탈착 되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 그럼에도 활성탄소섬유의 유해가스 흡착 경향성이 비슷하게 나타난 이유는 미세기공 구조를 갖고 있는 활성탄소섬유가 유해가스를 Van der Waals force로 흡착과 동시에 semi-ionic interaction에 기인하기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 PAN계 탄소섬유를 기반으로 750~850°C 조건 하 수증기 활성화법을 이용하여 다양한 비표면적 및 균일한 기공특성을 갖는 활성탄소섬유를 개발하였다. 또한, 수증기 활성화 반응 조건을 조절하여 활성 반응 면적을 증대시키고 이와 동시에 활성점을

극대화시켜, 유해가스 흡착 및 감응 특성을 분석하였다. 850°C 조건하에서 제조한 활성탄소섬유는 활성화 시간이 길어질수록 비표면적이 증가하다가 45 min 이후에 급격한 비표면적 감소가 나타나는 것을 확인하였다. 이는 수증기 활성화에 의해 새로 생성되는 기공의 영향보다 기공의 확장 및 붕괴로 인한 영향이 더 크기 때문에 나타나는 결과로 보여진다. 또한, 수증기 활성화 반응으로 탄소 구조가 CO, CO₂, H₂O 등으로 분해되고 그 자리가 기공이 생성됨에 따라 활성탄소섬유의 기계적 강도가 떨어지는 것으로 나타났다. 활성탄소섬유의 유해가스 감응 특성을 분석해본 결과, 수증기 활성화 시간과 저항 변화율은 비례하는 것을 확인할 수 있었으며 이는 활성탄소섬유의 비표면적이 높아지고, 미세 기공 구조가 발달할수록 감응 특성이 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 유해가스 흡착 특성 평가를 통해, 850°C, 45 min 활성화 조건에서 제조한 활성탄소섬유가 가장 많은 유해가스 흡착 특성을 보이는 것을 확인할 수 있었으나, 높은 비표면적과 미세기공으로 인해 회복 특성은 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 유해가스 제거용 소재 개발에 있어, 활성탄소섬유의 재생률은 중요한 평가 요소 중 하나이며 이에 대한 연구를 지속적으로 진행하여 높은 회복성을 갖는 활성탄소섬유 제조 관련 연구를 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 정부(교육부)와 한국연구재단의 기초연구사업(과제번호: NRF-2020R1I1A3060957)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1 S. Tang, N. Lu, J. K. Wang, S. K. Ryu, H. S. Choi, *J. Phys. Chem. C.*, **111**, 1820 (2007).
2. M. J. Kim, M. J. Jung, M. I. Kim, S. S. Choi, Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **26**, 587 (2015).
3. J. Zhang, Y. Duan, Q. Zhou, C. Zhu, M. She, W. Ding, *Chem. Eng. J.*, **294**, 281 (2016).
4. M. J. Kim, M. J. Jung, S. S. Choi, Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **26**, 432 (2015).
5. M. Fayaz, P. Shariaty, J. D. Atkinson, Z. Hashisho, J. H. Phillips, J. E. Anderson, M. Nichols, *Environ.*

- Sci. Technol.*, **49**, 4536 (2015).
6. S. C. Kang, J. S. Im, Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 243 (2011).
7. S. D. kim, J. W. Kim, J. S. Im, S. H. Cho, Y. S. Lee, *Trans. Korean Hydrog. New Energy Soc.*, **17**, 47 (2006).
8. H. S. Lim, M. J. Kim, E. Y. Kong, J. D. Jeong, Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 312 (2018).
9. M. J. Jung, M. S. Park, S. Lee, Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **27**, 319 (2016).
10. K. Okajima, K. Ohta, M. Sudoh, *Electrochim. Acta.*, **50**, 2227 (2005).
11. M. S. Park, S. Lee, M. J. Jung, H. G. Kim, Y. S. Lee, *Carbon Lett.*, **20**, 19 (2016).
12. S. Lee, M. S. Park, M. J. Jung, Y. S. Lee, *Trans. Korean Hydrog. New Energy Soc.*, **27**, 298 (2016).
13. B. C. Bai, H. U. Lee, C. W. Lee, Y. S. Lee, J. S. Im, *Chem. Eng. J.*, **306**, 260 (2016).
14. B. J. Kim, Y. S. Lee, S. J. Park, *Int. J. Hydrogen Energy*, **33**, 4112 (2008).
15. J. S. Im, S. J. Park, Y. S. Lee, *Int. J. Hydrogen Energy*, **34**, 1423 (2009).
16. M. I. Kim, Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **25**, 193 (2014).
17. S. Guo, J. Peng, W. Li, K. Yang, L. Zhang, S. Zhang, H. Xia, *Appl. Surf. Sci.*, **255**, 8443 (2009).
18. Y. Kawabuchi, H. Oka, S. Kawano, I. Mochida, N. Yoshizawa, *Carbon*, **36**, 377 (1998).
19. S. Lim, S. H. Yoon, Y. Shimizu, H. Jung, I. Mochida, *Langmuir*, **20**, 5559 (2004).
20. A. Bagreev, T. JBandosz, D. C. Locke, *Carbon*, **39**, 1971 (2001).
21. T. H. Ko, P. chiranairadul, C. K. Lu, C. H. Lin, *Carbon*, **30**, 647 (1992).
22. B. C. Bai, E. A. Kim, C. W. Lee, Y. S. Lee, J. S. Im, *Appl. Surf. Sci.*, **353**, 158 (2015).
23. J. Moon, J. A. Park, S. J. Lee, T. Zyung, I. D. Kim, *Sens. Actuators B Chem.*, **149**, 301 (2010).
24. W. S. Cho, S. I. Moon, K. K. Paek, Y. H. Lee, J. H. Park, B. K. Ju, *Sens. Actuators B Chem.*, **119**, 180 (2006).
25. J. Suehiro, H. Imakiire, S. I. Hidaka, W. Ding, G. Zhou, K. Imasaka, M. Hara, *Sens. Actuators B Chem.*, **114**, 943 (2006).
26. A. A. Abdulrasheed, A. A. Jalil, S. Triwahyono, M. A. A. Zaini, Y. Gambo, M. Ibrahim, *Renew. Sus. Energ. Rev.*, **94**, 1067 (2018).