

질소 플라즈마 처리에 따른 활성탄소섬유 페이퍼의 포름알데하이드 흡착 특성

민충기* · 임채훈* · 명성재* · 이영석*,**,†

*충남대학교 응용화학공학과, **충남대학교 탄소융복합기술연구소
(2022년 9월 16일 접수, 2022년 10월 15일 수정, 2022년 10월 18일 채택)

Formaldehyde Adsorption Properties of Activated Carbon Fiber-Papers by Nitrogen Plasma Treatment

Chung Gi Min*, Chaehun Lim*, Seongjae Myeong* and Young-Seak Lee*,**,†

*Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea
**Institute of Carbon Fusion Technology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea
(Received September 16, 2022; Revised October 15, 2022; Accepted October 18, 2022)

초 록

포름알데하이드는 호흡기 및 피부 질환을 일으키는 등 인체에 유해한 실내 환경 오염물질로 알려져 있다. 본 연구에서는 활성탄소섬유 표면에 질소 작용기를 도입하기 위하여 질소 플라즈마 처리를 하였고, 질소 작용기 함유 활성탄소섬유에 대한 포름알데하이드 흡착 특성을 고찰하였다. 주입되는 질소 가스의 유량이 증가함에 따라 활성탄소섬유 표면에 도입되는 질소 작용기의 함량이 약 7% 정도 증가하였으며, 존재하는 질소 작용기의 종류별 비율도 유사하였다. 또한 플라즈마 처리에 의한 식각 효과로 인하여 활성탄소섬유 표면에 초미세기공이 증가하였다. 이에 따라 표면 개질된 활성탄소섬유의 포름알데하이드 흡착 효율도 증가하였다. 그러나, 질소 유량이 120 sccm 이상인 조건에서는 활성탄소섬유 표면이 과도하게 식각되어, 비표면적이 감소하고 포름알데하이드 흡착 능력이 오히려 저하되었다. 따라서, 질소 플라즈마 처리된 활성탄소섬유의 포름알데하이드 흡착은 도입된 질소 작용기의 함량이 주요 요인이지만, 이와 함께 적합한 기공 구조를 가질 때 포름알데하이드의 흡착 효율이 향상됨을 알 수 있었다.

Abstract

Formaldehyde is an indoor pollutant that is harmful to humans, such as causing respiratory and skin diseases. Nitrogen plasma treatment was performed to introduce nitrogen groups on the surface of the activated carbon fibers (ACFs), and the adsorption characteristics of formaldehyde for the surface-modified ACFs were considered. As the nitrogen gas flow rate increased, the content of nitrogen functional groups introduced to the surface of the ACFs increased by about 7%, and the ratio of nitrogen functional groups to each type present was similar. Ultramicropores increased on the ACFs surface due to the etching effect of plasma treatment. The adsorption efficiency of formaldehyde on the modified ACFs surface was also enhanced. However, under the nitrogen flow rate of 120 sccm or more, the surface of the ACFs was excessively etched, and the specific surface area and the formaldehyde adsorption capacity decreased. Therefore, the content of the nitrogen groups is the main factor in the adsorption of formaldehyde on the nitrogen plasma-treated ACFs, but it can be found that the adsorption efficiency of formaldehyde is improved when the ACFs have a suitable pore structure.

Keywords: Activated carbon fiber, Plasma, Adsorption, Formaldehyde, Nitrogen functional group

1. 서 론

벤젠, 톨루엔, 클로로폼, 포름알데하이드 등으로 대표되는 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs) 등은 증기압이 높아 상온에서 쉽게 기화된다는 특징이 있다. 이러한 휘발성 유기화합물은

벽지, 페인트, 접착제 등을 제조할 시 생성되었다가 실내 공기 중으로 천천히 방출된다는 문제점이 있다. 이때 방출된 기체가 호흡기 및 피부 질환을 일으키는 등 인체에 악영향을 미치게 되므로 휘발성 유기화합물의 위험성이 사회적 문제로 대두되고 있다[1-3]. 그중 포름알데하이드는 대표적인 실내 환경 오염물질로 0.1~0.5 ppm의 농도에서 비강에 대한 자극 및 천식을, 0.6~1.9 ppm에서 습진 및 가려움증 등을 일으키며 그 이상의 농도에서는 두통, 메스꺼움, 호흡기 내 종양 등을 유발할 수 있다. 이러한 유해성 때문에 포름알데하이드를 포집 및 제거하기 위한 다양한 연구가 시도되고 있다[4-6]. 포름알데하이드를 비롯한 휘발성 유기화합물을 제거하기 위해 흡수 및 응축 기술, 생물학

† Corresponding Author: Chungnam National University
Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Daejeon 34134, Republic of Korea
Tel: +82-42-821-7007 e-mail: youngslee@cnu.ac.kr

적 처리 방법, 그리고 흡착 기술 등이 사용되고 있다[2,6-8]. 특히 흡착의 경우 다른 공정보다 상대적으로 경제적이고 공정이 간단하여 흡착을 통한 포름알데하이드 제거에 대한 연구가 다방면으로 수행되고 있다[9-11].

일반적으로 활성탄소, 활성탄소섬유, 제올라이트, 및 MOF (Metal-organic Framework) 등의 다공성 물질들이 유해가스의 분리 및 제거를 위한 흡착제로 사용된다. 이중 활성탄소섬유의 경우는 활성화 조건에 따라 큰 비표면적과 균일한 미세기공을 나타내는 형태로 제조할 수 있기 때문에 흡착 및 재생 속도가 다른 다공성 물질에 비해 더 빠르다는 장점이 있어 유해 가스를 제거하기 위한 재료로 주목받고 있다[3,8].

한편 포름알데하이드는 분자 동적 직경이 2.5 Å 미만으로 매우 작고, 약 -19 °C 정도의 낮은 끓는점과 높은 증기압으로 인하여 기존의 활성탄소섬유를 사용하여 흡착하였을 때 좋은 흡착 효율을 나타내지 못하는 것으로 알려져 있다. 또한 활성탄소섬유에 물리적으로 흡착된 포름알데하이드는 활성탄소섬유로부터 다시 탈착되어 공기중으로 쉽게 휘발된다. 이러한 현상들을 보완하기 위하여 활성탄소섬유 표면에 작용기를 도입함으로써 화학적 흡착 능력을 부여하여 피흡착질에 대한 흡착 성능을 향상시키기 위한 연구가 진행 중이다[4,12,13]. 대표적으로 산소, 질소, 불소, 황 등의 다양한 작용기를 도입하기 위하여 산 처리, 전자선 조사, 플라즈마 처리 등 여러 표면 처리 방법이 수행되고 있다[14-19]. 그중 플라즈마 처리의 경우, 사용하는 가스에 따라 여러 종류의 작용기를 도입할 수 있으며 적은 에너지 및 처리 시간을 통하여 활성탄소섬유 표면에 효과적으로 작용기를 도입할 수 있어 경제적이고 공정이 간단하다는 장점이 있다[20-22].

따라서, 본 연구에서는 활성탄소섬유의 포름알데하이드 흡착 성능을 향상시키기 위하여, 활성탄소섬유를 질소 플라즈마 처리하고 그 표면 화학적 특성 및 기공 특성 변화에 대하여 분석하였다. 또한 질소 플라즈마 반응에 의해 생성된 질소 작용기 및 기공 특성이 포름알데하이드 흡착 성능에 미치는 영향에 대하여 고찰하였으며, 그 흡착 메커니즘을 제시하였다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

활성탄소섬유의 포름알데하이드 흡착 특성 평가를 위하여, 본 연구에서는 핏치계 활성탄소섬유 페이퍼(Jirisanhanji Co., Ltd, Korea)를 사용하였다. 이 활성탄소섬유 페이퍼의 표면 처리를 위한 표면 플라즈마 반응은 고순도 질소 가스(99.999%)를 이용하여 실시하였다. 또한 흡착질로는 포름알데하이드 가스(3.05 μmol/mol, Rigas Co., Korea)를 사용하였다.

2.2. 활성탄소섬유의 질소 플라즈마 처리

플라즈마 장비(CUTE-MPR/Dual Mode, Femto Science Co., Korea)를 사용하여 활성탄소섬유에 표면처리를 수행하였으며, 해당 장비는 알루미늄 합금 반응기(200 × 145 × 115 mm), 감압 펌프, 가스, 전원 공급기, 유량 조절기 등으로 구성되어 있다. 표면 처리를 위하여 0.2 g의 활성탄소섬유를 장비에 넣고 반응기 내부를 감압한 뒤에 주파수 50 kHz, 전력 90 W, 반응 시간 15 min으로 고정된 상태에서 질소 가스를 30~120 sccm으로 주입하였다. 이때 미처리된 활성탄소섬유는 Pristine-ACF_P, 질소 플라즈마 처리된 활성탄소섬유는 질소 가스 유량에 따라 각각 N30-ACF_P, N60-ACF_P, N90-ACF_P, 및 N120-ACF_P

등으로 명명하였다.

2.3. 미처리 및 질소 플라즈마 처리된 활성탄소섬유의 표면 및 구조 특성 분석

질소 플라즈마 처리된 활성탄소섬유의 기공 특성 변화를 파악하기 위하여 3-Flex (Micromeritics Ins. Corp., USA) 장비를 통하여 77 K에서 질소 기체의 흡·탈착법으로 분석하였다. 이때 비표면적은 Brunauer-Emmett-Teller (BET), 기공분포도는 Density-Functional theory (DFT) 식을 이용하여 계산하였다. 또한 질소 플라즈마 처리에 따른 표면 화학 특성과 결합 구조의 변화를 확인하기 위하여 X선 광전자 분광기(XPS, K-alpha+, Thermo scientific, USA)를 이용하여 분석을 실시하였다.

2.4. 포름알데하이드 흡착 성능 평가

포름알데하이드 흡착 성능을 평가하기 위하여 반응장치, 주입장치 및 측정장치로 구성된 가스 크로마토그래피(GC, HP-6890, Agilent Technologies, US)를 이용하였다. 반응기에 활성탄소섬유 시료 0.2 g을 넣고, 90 ppm 포름알데하이드 가스는 질량 유속 조절기(mass flow controller)를 통하여 100 sccm의 일정한 유속으로 반응기 내부에 주입하였다. 이후 질소 플라즈마 처리된 활성탄소섬유의 화학적 흡착 능력 변화를 확인하기 위하여 포름알데하이드 흡착을 진행한 시료의 기공 특성을 고찰하였다. 흡착 이후의 시료를 100 °C에서 12 h 동안 건조하였으며, 3-Flex 장비를 활용하여 기공 특성 변화를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 질소 플라즈마 처리된 활성탄소섬유의 기공 및 표면 화학적 특성

질소 플라즈마 처리된 활성탄소섬유의 기공 특성을 Figure 1과 Table 1에 나타내었다. Figure 1 (a)에서 확인할 수 있듯이, 모든 시료에서 IUPAC 흡착 등온선 중 Type I 형태의 그래프가 나타났으며 이를 통해 질소 플라즈마 처리 이후에도 활성탄소섬유 내에 미세 기공 구조를 유지하고 있음을 확인할 수 있다. Figure 1 (b)에서는 DFT 식을 이용하여 기공 크기 분포를 나타내었다. Figure 1 (b)에서 볼 수 있듯이, 질소 플라즈마 처리 유량이 90 sccm까지 늘어날수록 0.8 nm 이하의 초미세기공의 양이 증가하는 현상이 나타났다. 이는 플라즈마 에너지에 의해 활성화된 질소 성분이 활성탄소섬유 표면을 식각하여 일어난 것으로 사료된다. 그러나 질소 유량이 120 sccm이 되었을 때, 0.6 nm 부근의 기공이 줄어들고, 0.7 nm 부근의 기공의 양이 늘어난 것을 확인할 수 있는데, 이는 플라즈마 에너지에 의해 활성화된 질소 화학종의 양이 늘어남에 따라 활성탄소섬유 표면이 식각되어 발생하는 기공의 직경이 넓어져 나타난 현상으로 사료된다. 이와 마찬가지로

Table 1. Pore Characteristics of the Untreated and Nitrogen Plasma Treated ACFs

Samples	Specific surface area (m ² /g)	Micropore volume (cm ³ /g)	Total pore volume (cm ³ /g)
Pristine-ACF_P	1172	0.38	0.49
N30-ACF_P	1217	0.40	0.49
N60-ACF_P	1229	0.41	0.49
N90-ACF_P	1204	0.40	0.48
N120-ACF_P	1148	0.38	0.48

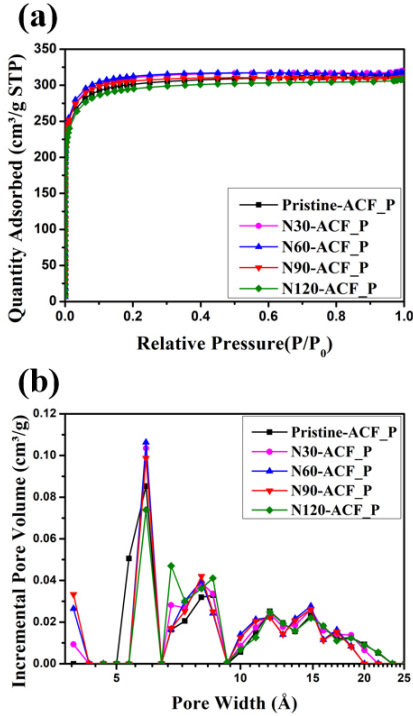


Figure 1. (a) Nitrogen adsorption isotherms at 77 K, (b) pore size distribution of the untreated and nitrogen plasma treated ACFs.

로, Table 1에서 활성탄소섭유에 질소 플라즈마 처리를 하면, 활성탄소섭유의 비표면적이 1172 m²/g에서 최대 1229 m²/g까지 증가함을 알 수 있다. 이는 미세기공의 양이 0.38 cm³/g에서 0.41 cm³/g까지 증가하여 발생한 결과인 것으로 사료된다. 그리고 N120-ACF_P 샘플의 경우 미처리 활성탄소섭유보다 다소 낮은 비표면적을 보이는데, 이는 앞서 설명하였듯이 식각 작용에 의해 미세기공의 크기가 다소 커졌기 때문에 발생한 결과로 사료된다. Figure 1 및 Table 1을 통하여 질소 플라즈마 표면처리의 표면 식각 작용을 통한 초미세기공의 도입 효과를 확인할 수 있었다.

질소 플라즈마 표면 처리에 따른 활성탄소섭유의 표면 화학적 특성을 XPS를 통하여 Figure 2 및 Table 2와 3에 나타내었다. Table 2에서 활성탄소섭유 표면에 도입된 질소 작용기의 경우 플라즈마 처리 유량이 늘어날수록 증가한다는 사실을 알 수 있다. 그러나 질소 유량이 90 sccm이 넘어가면 질소 작용기의 증가량이 더 이상 가파르게 증가하지 않고 포화된 양상을 보인다. 또한 Figure 2 및 Table 3에서, 질소 플라즈마 표면 처리한 활성탄소섭유에 도입된 질소 작용기의 종류를 확인할 수 있다. 특히 Table 3에서 질소 플라즈마 표면 처리를 수행한 시료에 존재하는 질소 작용기인 피리디닉(pyridinic), 아민(amine), 피롤릭/피리도닉(pyrrolic/pyridonic), 그리고 그래피틱(graphitic)의 전체적인 비율이 비슷하다는 것을 알 수 있다. 질소 플라즈마로 얻어진 피리디닉, 아민, 피롤릭/피리도닉 질소 작용기 등은 질소 원자에 의하여 루이스 염기로 작용한다. 이때 포름알데하이드의 탄소 원자는 산소 원자에 의하여 상대적으로 양의 전하를 띠므로, 질소 작용기와 포름알데하이드 간에 화학적 결합이 이루어지는 것으로 알려져 있다. 또한, 산소의 전기음성도가 높기 때문에, 수소 원자가 존재하는 질소 작용기와 포름알데하이드의 산소 원자에 의하여 수소 결합이 형성될 수

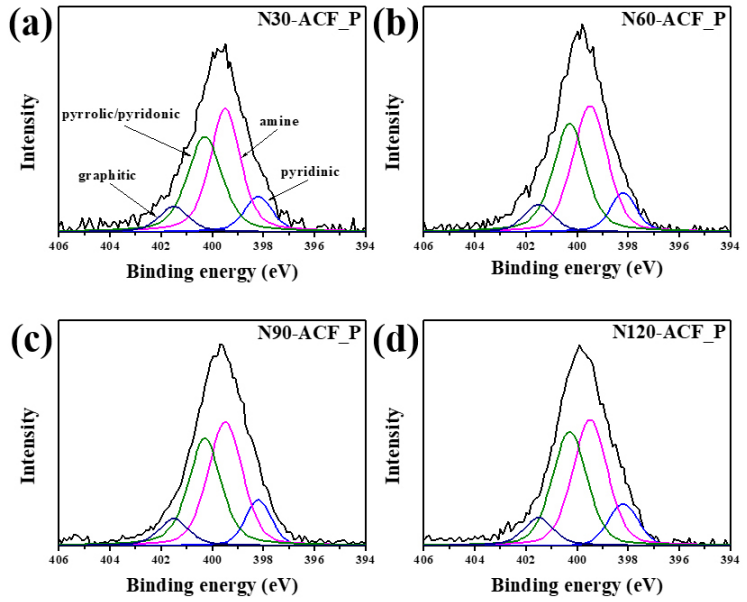


Figure 2. N1s XPS spectra of (a) N30-ACF_P, (b) N60-ACF_P, (c) N90-ACF_P and (d) N120-ACF_P.

Table 2. XPS Analysis of Untreated and Nitrogen Plasma Treated ACFs

Samples	Elemental contents (at %)		
	C	O	N
Pristine-ACF_P	78.26	21.74	-
N30-ACF_P	77.04	19.66	3.29
N60-ACF_P	75.25	20.10	4.65
N90-ACF_P	72.83	20.29	6.89
N120-ACF_P	72.59	20.43	6.98

Table 3. N1s Peak Parameter of Nitrogen Plasma Treated ACFs

Samples	Nitrogen species ratio (at %)			
	Pyridinic	Amine	Pyrrolic/Pyridonic	Graphitic
N30-ACF_P	11.5	42.3	37.4	8.8
N60-ACF_P	11.1	42.9	37.5	8.5
N90-ACF_P	11.9	42.2	37.2	8.7
N120-ACF_P	11.2	42.0	37.9	8.9

있다고 알려져 있다[23-27]. 따라서 본 질소 플라즈마 실험조건에서 처리된 활성탄소섭유는 높은 비표면적을 유지하면서도, 많은 양의 특성 질소 작용기를 보유하여 흡착 성능이 우수할 것으로 기대된다.

3.2. 질소 플라즈마 처리된 활성탄소섭유의 포름알데하이드 흡착 특성

질소 플라즈마 처리를 수행한 활성탄소섭유의 포름알데하이드 흡착 성능을 확인하기 위하여 활성탄소섭유가 충전된 반응기에 90 ppm

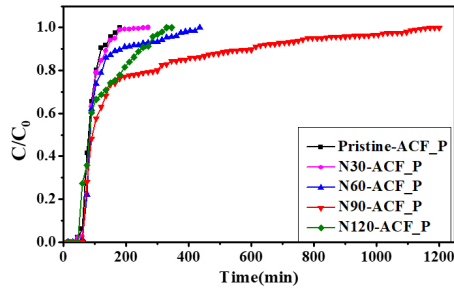


Figure 3. Breakthrough curves of the untreated and nitrogen plasma treated ACFs.

Table 4. Breakthrough Time and Saturation Time of the Untreated and Nitrogen Plasma Treated ACFs

Samples	Breakthrough time (min)	Saturation time (min)
Pristine-ACF_P	45	180
N30-ACF_P	45	270
N60-ACF_P	60	435
N90-ACF_P	75	1200
N120-ACF_P	60	330

농도의 포름알데하이드 가스를 100 sccm 유속으로 주입한 후 방출되는 기체를 가스 크로마토그래피를 이용하여 분석하였다. Figure 3 및 Table 4에 표현 처리한 활성탄소섬유의 포름알데하이드 흡착 특성을 나타내었다. 이때 과과 시간(breakthrough time)은 초기 포름알데하이드 가스 농도에 대한 검출된 포름알데하이드 가스 농도의 비율이 0.1 일 때의 시간으로 간주하였다.

Figure 3에서 알 수 있듯이, 미처리된 활성탄소섬유는 포름알데하이드 가스에 노출된 후 45 min이 지난 뒤에 과과가 시작되었으며 180 min에 걸쳐 포화 상태에 도달하였다. 질소 플라즈마 처리를 진행한 활성탄소섬유의 경우 미처리 활성탄소섬유보다 과과 및 포화 시간이 증가하였다는 사실을 알 수 있다. 또한 플라즈마 처리 질소 유량이 90 sccm까지 늘어남에 따라 활성탄소섬유의 과과점 및 포화점이 지연되는 양상을 보였다. 특히 N90-ACF_P 시료에서 75 min과 1200 min의 과과 및 포화 시간을 나타내며 가장 크게 증가하였다. 이러한 현상은 질소 가스 유량이 증가할수록 도입되는 질소 작용기의 양이 늘어났다는 점과, 포름알데하이드 흡착에 유리하게 작용하는 초미세기공이 증가하였다는 점 때문으로 사료된다. 그러나 N120-ACF_P 시료의 경우 과과 및 포화 시간이 감소하였는데, 해당 시료에서 질소 작용기의 증가량이 가파르게 증가하지 않았으며 포름알데하이드 흡착에 큰 영향을 미치는 미세기공의 양과 비표면적 값이 미처리 활성탄소섬유에 비해 줄어들었기 때문으로 사료된다.

또한, 질소 플라즈마 처리한 활성탄소섬유의 포름알데하이드 흡착 메커니즘을 파악하기 위하여 포름알데하이드 흡착을 수행한 활성탄소섬유를 100 °C에서 12 h 동안 건조한 후 기공 특성을 분석하였다. 미처리 활성탄소섬유와 가장 뛰어난 포름알데하이드 흡착 능력을 보였던 N90-ACF_P 시료의 흡착 이후 기공 특성을 비교하였으며 해당 내용을 Figure 4와 Table 5에 나타내었다. 포름알데하이드 흡착 이후 미처리 활성탄소섬유와 N90-ACF_P 시료 모두 비표면적과 미세기공 및 총 기공부피가 감소하였으며, N90-ACF_P에서 더욱 급격하게 감소

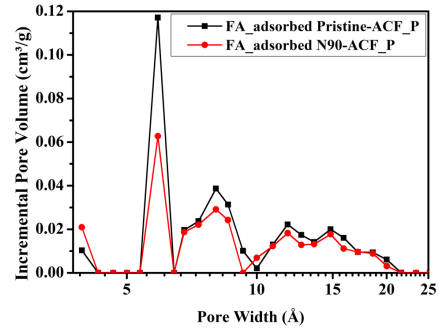


Figure 4. Pore size distribution of untreated ACF and N90-ACF_P after formaldehyde adsorption.

Table 5. Pore Characteristics of the Untreated ACF and N90-ACF_P after Formaldehyde Adsorption

Samples	Specific surface area (m²/g)	Micropore volume (cm³/g)	Total pore volume (cm³/g)
FA_adsorbed Pristine-ACF_P	1145	0.38	0.47
FA_adsorbed N90-ACF_P	879	0.29	0.36

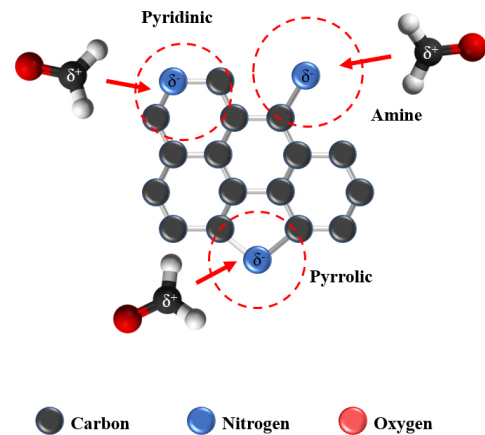


Figure 5. Proposed mechanism about formaldehyde adsorption of the nitrogen plasma treated ACFs.

하였다. 이러한 현상은 활성탄소섬유에 많은 양의 질소 작용기가 도입되면서 물리적 기반의 흡착 성능을 가지는 활성탄소섬유 표면에 일부 화학적 흡착 능력이 부여되었고, 이에 흡착된 포름알데하이드가 쉽게 탈착되지 않았기 때문으로 사료된다. 질소 작용기의 질소 원자가 음의 전하를 띠고 포름알데하이드 내 탄소 원자가 양의 전하를 띠는 점과, 해당 실험 결과를 근거로 하여 질소 플라즈마 처리된 활성탄소섬유가 포름알데하이드를 화학적으로 흡착하는 메커니즘을 Figure 5에 제시하였다.

4. 결 론

질소 플라즈마 처리된 활성탄소섬유는 미처리 활성탄소섬유와 비교하였을 때 모두 포름알데하이드 흡착 효율이 향상되었으며, 이는 활성탄소섬유 표면에 도입된 질소 작용기 함량의 증가 때문으로 사료

된다. 특히 주입되는 질소 가스의 유량이 90 sccm일 때 과과 시간과 포화 시간이 각각 30 min 및 1020 min 지연되어 가장 높은 흡착 효율을 나타내었으며 포름알데하이드가 흡착된 이후에 쉽게 탈착하지 않는 양상을 보였다. 이것은 해당 시료에 포름알데하이드 흡착에 유리한 초미세기공이 발달하였으며 화학 흡착능을 부여하는 질소 작용기 함량이 높은 쪽으로 증가하였기 때문으로 판단된다. 그러나 주입된 질소 가스의 유량이 120 sccm인 경우 포름알데하이드 흡착 효율이 크게 증가하지 못하였는데, 활성탄소섬유에 많은 양의 질소 작용기가 도입되었으나 미세기공 부피가 질소 플라즈마 처리를 수행한 다른 시료에 비하여 감소하였기 때문으로 사료된다. 따라서, 질소 플라즈마 처리된 활성탄소섬유의 포름알데하이드 흡착은 도입된 질소 작용기의 함량이 주요 요인이지만, 이와 함께 적합한 기공 구조를 가질 때 포름알데하이드의 흡착 효율이 향상됨을 알 수 있었다.

감 사

본 연구는 한국 산업기술평가관리원의 탄소산업기반조성사업(고순도 가스 분리용 탄소분자체 및 시스템 제조기술 개발: 20016789)의 지원에 의하여 수행하였으며 이에 감사드립니다.

References

1. M. S. Kamal, S. A. Razzak, and M. M. Hossain, Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs)—A review, *Atmospheric Environ.*, **140**, 117-134 (2016).
2. 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).
3. L. Zhu, D. Shen, and K. H. Luo, A critical review on VOCs adsorption by different porous materials: Species, mechanisms and modification methods, *J. Hazard. Mater.*, **389**, 122102 (2020).
4. S. Suresh and T. J. Bandoz, Removal of formaldehyde on carbon-based materials: A review of the recent approaches and findings, *Carbon*, **137**, 207-221 (2018).
5. Q. Wen, C. Li, Z. Cai, W. Zhang, H. Gao, L. Chen, G. Zeng, X. Shu, and Y. Zhao, Study on activated carbon derived from sewage sludge for adsorption of gaseous formaldehyde, *Bioresour. Technol.*, **102**, 942-947 (2011).
6. Z. Xu, L. Wang, and H. Hou, Formaldehyde removal by potted plant-soil systems, *J. Hazard. Mater.*, **192**, 314-318 (2011).
7. 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).
8. H. S. Lim, M.-J. Kim, E. Y. Kong, J.-d. Jeong, and Y.-S. Lee, Effect of oxyfluorination of activated carbon fibers on adsorption of benzene gas causing sick house syndrome, *Appl. Chem. Eng.*, **29**, 312-317 (2018).
9. V. Boonamnuyvitaya, S. Sae-ung, and W. Tanthapanichakoon, Preparation of activated carbons from coffee residue for the adsorption of formaldehyde, *Sep. Purif. Technol.*, **42**, 159-168 (2005).
10. J. Pei and J. S. Zhang, On the performance and mechanisms of formaldehyde removal by chemi-sorbents, *Chem. Eng. J.*, **167**, 59-66 (2011).
11. J.-P. Bellat, I. Bezverkhyy, G. Weber, S. Royer, R. Averlant, J.-M. Giraudon, and J.-F. Lamonier, Capture of formaldehyde by adsorption on nanoporous materials, *J. Hazard. Mater.*, **300**, 711-717 (2015).
12. C.-J. Na, M.-J. Yoo, D. C. Tsang, H. W. Kim, and K.-H. Kim, High-performance materials for effective sorptive removal of formaldehyde in air, *J. Hazard. Mater.*, **366**, 452-465 (2019).
13. H. Rong, Z. Liu, Q. Wu, D. Pan, and J. Zheng, Formaldehyde removal by Rayon-based activated carbon fibers modified by P-aminobenzoic acid, *Cellulose*, **17**, 205-214 (2010).
14. B. C. Bai, E. A. Kim, C. W. Lee, Y.-S. Lee, and J. S. Im, Effects of surface chemical properties of activated carbon fibers modified by liquid oxidation for CO₂ adsorption, *Appl. Surf. Sci.*, **353**, 158-164 (2015).
15. B. C. Bai, H.-U. Lee, C. W. Lee, Y.-S. Lee, and J. S. Im, N₂ plasma treatment on activated carbon fibers for toxic gas removal: Mechanism study by electrochemical investigation, *Chem. Eng. J.*, **306**, 260-268 (2016).
16. M.-J. Jung, M.-S. Park, S. Lee, and Y.-S. Lee, Effect of e-beam radiation with acid drenching on surface properties of pitch-based carbon fibers, *Appl. Chem. Eng.*, **27**, 319-324 (2016).
17. K. Okajima, K. Ohta, and M. Sudoh, Capacitance behavior of activated carbon fibers with oxygen-plasma treatment, *Electrochim. Acta*, **50**, 2227-2231 (2005).
18. M.-S. Park, S. Lee, M.-J. Jung, H. G. Kim, and Y.-S. Lee, NO gas sensing ability of activated carbon fibers modified by an electron beam for improvement in the surface functional group, *Carbon Lett.*, **20**, 19-25 (2016).
19. C. Lim, C. H. Kwak, S. G. Jeong, D. Kim, and Y.-S. Lee, Enhanced CO₂ adsorption of activated carbon with simultaneous surface etching and functionalization by nitrogen plasma treatment, *Carbon Lett.*, 1-7 (2022).
20. H.-C. Huang, D.-Q. Ye, and B.-C. Huang, Nitrogen plasma modification of viscose-based activated carbon fibers, *Surf. Coat. Technol.*, **201**, 9533-9540 (2007).
21. R. Lee, C. H. Kwak, H. Lee, S. Kim, and Y.-S. Lee, Effect of nitrogen plasma surface treatment of rice husk-based activated carbon on electric double-layer capacitor performance, *Appl. Chem. Eng.*, **33**, 71-77 (2022).
22. E. J. Song, M.-J. Kim, J.-I. Han, Y. J. Choi, and Y.-S. Lee, Gas adsorption characteristics of by interaction between oxygen functional groups introduced on activated carbon fibers and acetic acid molecules, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 160-166 (2019).
23. G. de Falco, M. Barczak, F. Montagnaro, and T. J. Bandoz, A new generation of surface active carbon textiles as reactive adsorbents of indoor formaldehyde, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 8066-8076 (2018).
24. G. de Falco, W. Li, S. Cimino, and T. J. Bandoz, Role of sulfur and nitrogen surface groups in adsorption of formaldehyde on nanoporous carbons, *Carbon*, **138**, 283-291 (2018).
25. K. J. Lee, J. Miyawaki, N. Shiratori, S.-H. Yoon, and J. Jang, Toward an effective adsorbent for polar pollutants: Formaldehyde adsorption by activated carbon, *J. Hazard. Mater.*, **260**, 82-88 (2013).
26. Y. Song, W. Qiao, S. H. Yoon, I. Mochida, Q. Guo, and L. Liu, Removal of formaldehyde at low concentration using various activated carbon fibers, *J. Appl. Polym. Sci.*, **106**, 2151-2157 (2007).
27. C. Su, K. Liu, J. Zhu, H. Chen, H. Li, Z. Zeng, and L. Li,

Adsorption effect of nitrogen, sulfur or phosphorus surface functional group on formaldehyde at ambient temperature: Experiments associated with calculations, *Chem. Eng. J.*, **393**, 124729 (2020).

Authors

Chung Gi Min; Undergraduate student, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; 201702442@o.cnu.ac.kr

Chaehun Lim; B.Sc., Master Course, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; 201502629@o.cnu.ac.kr

Seongjae Myeong; Undergraduate student, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; seongj99@o.cnu.ac.kr

Young-Seak Lee; Ph.D., Professor, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea; youngslee@cnu.ac.kr