

활성탄소섬유의 기공구조가 기계적 특성에 미치는 영향

최윤정^{*,**} · 이영석^{**} · 임지선^{*,***,†}

*한국화학연구원(KRICT) 탄소산업선도연구단, **충남대학교 응용화학공학부, ***과학기술연합대학원대학교 화학소재 및 공정 (2018년 2월 14일 접수, 2018년 3월 14일 심사, 2018년 3월 15일 채택)

Effect of Pore Structure of Activated Carbon Fiber on Mechanical Properties

Yun Jeong Choi^{*,**}, Young-Seak Lee^{**}, and Ji Sun Im^{*,***,†}

*Carbon Industry Frontier Research Center, Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT), Daejeon 34114, Republic of Korea

**Department of applied chemical engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

***Advanced Materials and Chemical Engineering, University of Science and Technology(UST), Daejeon 34113, Republic of Korea
(Received February 14, 2018; Revised March 14, 2018; Accepted March 15, 2018)

초 록

본 연구에서는 물리적 활성화법인 수증기 활성화법을 이용하여 PAN (Polyacrylonitrile)계 활성탄소섬유를 제조하였다. 활성화는 온도와 시간을 변수로 하였으며, 활성화 온도(700, 750, 800 °C)에 도달하였을 때 200 mL/min의 수증기 유량의 조건으로 PAN 탄소섬유의 활성화를 진행하였다. 제조된 활성탄소섬유의 기공구조를 분석하기 위하여 질소가스의 흡·탈 등온선을 통한 비표면적(S_{BET}) 측정과 표면분석을 위한 AFM 분석을 실시하였다. 또한 인장시험을 실시하여 활성화 결과 형성된 기공구조가 섬유의 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 그 결과, 활성화 후 섬유의 비표면적(S_{BET})은 448~902 m^2/g 의 값을 나타냈으며, 인장강도는 58.16~84.92%, 탄성계수는 69.81~83.89%의 감소를 보였다.

Abstract

In this study, PAN (polyacrylonitrile) based activated carbon fibers were prepared by water vapor activation method which is a physical activation method. Activation was performed with temperature and time as parameters. When the activation temperature reached 700, 750 and 800 °C, the activation was carried out under the condition of a water vapor flow rate of 200 ml/min. In order to analyze the pore structure of activated carbon fibers, the specific surface area (S_{BET}) was measured by the adsorption/desorption isotherm of nitrogen gas and AFM analysis was performed for the surface analysis. Tensile tests were also conducted to investigate the effect of the pore structure on mechanical properties of fibers. As a result, the S_{BET} of fibers after the activation showed a value of 448~902 m^2/g , the tensile strength decreased 58.16~84.92% and the tensile modulus decreased to 69.81~83.89%.

Keywords: Activated carbon fiber, steam activation, BET, AFM, mechanical properties

1. 서 론

해마다 더욱 악화되는 대기 및 수질 오염으로 인하여 이를 개선하기 위한 대책 마련이 지속적으로 대두되고 있다. 환경부에 따르면 지난 2014년 대기오염 물질의 국내 배출량은 NOx 1,136천 톤, VOCs 906천 톤, CO 595천 톤, SOx 343천 톤에 달했다[1]. 또한 산업화로 인한 사업장 증가로 하수처리시설이 늘어나며 오염물질 배출관리가 어려워 수질오염 역시 대책이 필요한 실정이다[2]. 따라서 이와 같은 환경문제를 개선하기 위하여 실생활에서 널리 쓰일 수 있는 유해물질 제거용 흡착제에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다[3-7].

이러한 유해물질 제거용 흡착제로는 다공성 소재가 주로 사용되고 있고, 그중에서 일반적으로 활성탄이 가장 많이 쓰이고 있다. 주로 활성탄은 높은 비표면적 및 미세기공구조에 따라 다양한 흡착 특성을 나타낸다[8]. 고체 흡착제의 기공크기는 IUPAC의 기준에 따라 2 nm 이하는 micropore, 2~50 nm는 mesopore, 50 nm 이상은 macropore로 분류된다. 이러한 기공들은 각각의 크기에 따라 서로 다른 물질 흡착 특성을 나타낸다. macropore는 일반적으로 비표면적이 작아서 흡착량은 상대적으로 적지만 물질의 이동 통로로서 확산속도에 영향을 끼치고, mesopore는 물질이 macropore에서 micropore로 원활히 이동할 수 있는 통로 역할을 한다. 이러한 활성탄은 주로 유해 물질 흡착 및 제거를 목적으로 정수시설, 식품제조공정, 용제회수분야 등 다방면으로 사용되고 있다[9-10]. 하지만 이러한 활성탄은 물질 흡착 시간이 길고, 분진 발생률이 높기 때문에 2차 오염 가능성이 있으며, 세공 크기의 분포가 광범위해서 미량의 오염 물질의 흡착 분리나 혼합물의 선택적

† Corresponding Author: C-Industry Incubation, Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT), Daejeon 34114, Republic of Korea
Tel: +82-42-860-7366 e-mail: jsim@kRICT.re.kr

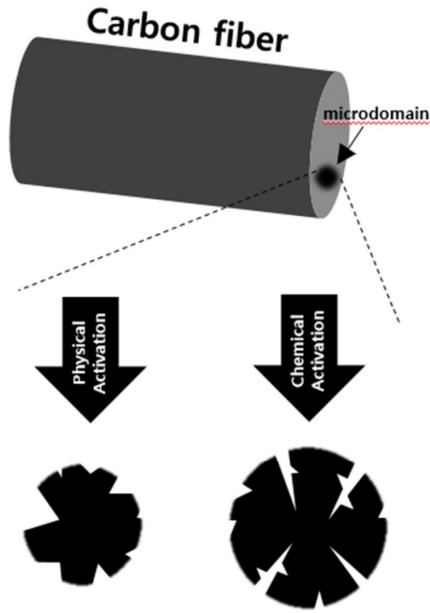


Figure 1. Structural mechanism model of pore development for physical ACF and chemical ACF.

흡착에 한계점을 가지고 있다[11].

이런 한계점을 해결하고자 최근 활성탄소섬유에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 활성탄소섬유의 경우 활성탄에 비해 micropore 구조가 비교적 잘 발달되어 있기 때문에 상대적으로 비표면적이 더 크고, 빠른 흡착 속도와 높은 흡착용량을 갖는다[12]. 또한 흡착성능 외에도 밀도가 낮은 섬유 형태로 되어 있어 가벼울 뿐만 아니라 굴곡성과 성형성이 뛰어나기 때문에 부직포나 직물 등으로 제품화도 용이하다는 장점을 가지고 있다[13]. 이러한 특성을 갖는 활성탄소섬유는 탄소섬유의 활성화 공정을 거쳐 제조된다. 활성화 공정은 그 제조방법에 따라 물리적, 화학적 활성화법으로 분류할 수 있다. 물리적 활성화법은 산화성 기체인 수증기, 이산화탄소, 산소 등을 이용하여 탄소를 기화시키는 방법을 말한다. 화학적 활성화법은 KOH, Na₂CO₃, NaOH, H₃PO₄ 등의 산성 및 염기성 약품 등을 활성화제로 사용하며 물리적 활성화보다 낮은 공정조건에서 제조가 가능하다는 장점을 갖고 있다 [9]. 화학적 활성화법을 이용하면 높은 비표면적의 활성탄소섬유 제조가 용이하지만[14,15] 추가적으로 약품 회수를 위한 부가적인 공정 필요하기 때문에 제조 공정이 복잡하고 2차 오염 등의 환경문제가 발생될 수 있다. 이에 비해 물리적 활성화법은 화학적 활성화보다 비교적 실험방법이 간단하고, 친환경적이며 별도의 환경 처리비용이 발생되지 않으므로 비용적인 면에서도 유리하다[16].

Figure 1에 탄소섬유가 수증기 활성화(물리적 활성화법)와 KOH 활성화(화학적 활성화법)를 거치게 될 때 각각의 기공 형성 메커니즘을 나타내었다. 물리적 활성화의 경우, 가스가 섬유 표면에서 불균일하게 반응하지만 화학적 활성화의 경우, 활성화제가 촉매적 역할을 하며 비교적 균일하게 기공을 발달시킨다. 따라서 화학적 활성화법이 물리적 활성화법에 비해 섬유 형태를 잘 유지하면서 주로 탄소섬유 내부에 micropore를 발달시키는 반면, 물리적 활성화법은 활성화 가스에 의해 탄소섬유 표면에 손상이 발생하면서 내부보다는 주로 외부에 상대적으로 큰 기공이 형성된다. 따라서 물리적 활성화법의 경우, 화학적 활성화법보다 더 큰 질량 손실에 따른 수율 하락이 동반된다[17]. 이처럼 활성화 방법에 따라 기공 구조가 다르게 형성되므로 이를 고

려하여 기공 구조 분석 시 다른 접근법이 요구된다. 지금까지의 흡착제에 대한 연구는 흡착에 관여하는 미세기공 구조 및 비표면적의 특성 발달에 중점을 두었지만, 최근 다양한 흡착제물에 적용됨에 따라 지속적인 사용을 위한 내구성 또한 중요한 평가항목이다. 내구성은 활성탄소섬유가 세탁과 같은 재생 공정을 견뎌내는데 있어 중요한 요소이기 때문에 섬유의 기공구조 발달에 따른 기계적 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 수증기 활성화법으로 제조된 활성탄소섬유의 기공 구조를 분석하고, 기계적 강도와와의 연관성에 대해 고찰하였다. 제조된 활성탄소섬유의 기공구조를 분석하기 위해 BET 분석을 진행하였으며, XRD 분석을 통해 활성화 조건에 따른 섬유의 결정구조를 알아보았다. 또한 활성화에 따른 섬유의 표면 특성을 분석하기 위해 AFM 분석을 실시하였고 인장시험을 통해 활성탄소섬유의 구조적 특성에 따른 기계적 강도를 분석하였다.

2. 실험

2.1. 물리적 활성화법을 이용한 활성탄소섬유의 제조

본 실험에서는 코오롱인더스트리(주)에서 제조한 PAN계 직물을 시료로 사용하였다. PAN계 탄소섬유는 230 °C에서 안정화 및 900 °C에서 탄화공정을 거쳐 제조되었다. 이와 같은 조건에서 제조된 PAN계 탄소섬유를 700, 750, 800 °C에서 수증기 활성화하여 활성탄소섬유를 제조하였다.

불활성 분위기를 위해서 질소 가스를 200 cc/min으로 흘려주었고, 이때의 승온 속도는 5 °C/min으로 하였다. 활성화 온도에 도달했을 때 수증기를 20 mL/min의 유량으로 17 L 반응기 내부로 유입하여 활성화를 진행하였다. 활성화 가스는 증류수를 300 °C로 가열된 steam generator에 통과시켜 생성되었다. 활성화 공정은 700 °C (3, 4, 6 h), 750 °C (2, 3, 4 h), 800 °C (0.75, 1, 1.25, 1.5 h)에서 진행하였으며, 활성화 수율 및 비표면적을 고려하여 고온에서는 상대적으로 짧은 반응시간에서 실험을 진행하였다.

2.2. BET를 이용한 활성탄소섬유의 기공구조 분석

비표면적 측정장치를 이용하여 질소 흡·탈착등온선을 구하였고, 이를 통해 활성탄소섬유의 비표면적(S_{BET} , m²/g)과 총 기공부피(V_T , cm³/g)를 계산하였다. 샘플의 전처리 조건은 진공 분위기에서 200 °C, 8 h으로 하였고, 그 후 77.3 K에서 N₂를 흡·탈착한 후 비표면적을 측정하였다. 비표면적은 다중점 BET 법을 이용하여 측정하였으며, micropore의 표면적은 t-plot 방법을 이용하여 구하였다. t-plot 방법은 Harkins-Jura식을 사용하여 주어진 범위에서의 기울기로부터 중·거대 기공을 포함하는 외부표면적을 구한 후, BET 비표면적으로부터 외부 비표면적을 뺀 값으로 미세기공의 표면적을 구하는 방법이다. Micropore 부피는 t-plot 직선의 절편 값을 통해 계산하였고, mesopore 및 macropore의 부피는 Barrett-Joyner-Halenda (B-J-H)법을 이용해 구하였다.

2.3. AFM을 이용한 활성탄소섬유의 표면구조 관찰

수증기 가스(활성화 가스)로 인해 형성되는 표면 기공구조를 관찰하기 위하여 AFM 장비를 이용하여 섬유 표면을 관찰하였다. AFM (atomic force microscopy)은 나노미터 크기의 탐침을 관찰하고자 하는 시료의 표면에 근접시켜 탐침의 끝 부분과 시료표면의 원자 사이에서 발생하는 원자간 힘을 이용하여 시료의 표면을 관찰하는 분석법

Table 1. Textural Properties of Prepared ACFs

Sample	700-3 h	700-4 h	700-6 h	750-2 h	750-3 h	750-4 h	800-45 m	800-1 h	800-1 h 15 m	800-1 h 30 m
S _{BET} (m ² /g)	448	529	535	678	759	816	707	770	817	902
V _{micro} (cm ³ /g)	0.169	0.200	0.202	0.258	0.295	0.320	0.272	0.297	0.316	0.358
V _{meso} (cm ³ /g)	0.020	0.023	0.025	0.035	0.058	0.081	0.051	0.045	0.086	0.100
V _T (cm ³ /g)	0.188	0.220	0.222	0.286	0.334	0.373	0.309	0.330	0.376	0.417
Yield (%)	68.00	56.38	47.86	45.55	40.13	33.08	56.90	40.26	38.93	34.81

S_{BET} : Specific Surface Area, V_{micro} : micropore volume, V_{meso} : mesopore volume, V_T : total pore volume.

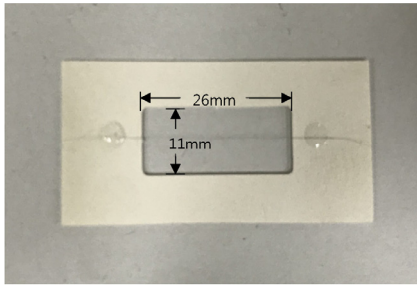


Figure 2. Specimen prepared for tensile testing.

이다. scanning range는 500 nm × 500 nm와 3 μm × 3 μm 두 가지로 하였으며, 각각 2D와 3D 이미지로 나타내었다.

2.4. XRD을 이용한 활성탄소섬유의 결정구조 분석

활성화 조건에 따른 활성탄소섬유의 구조 변화를 관찰하기 위해 X선 회절(XRD) 분석을 실시했다. 시료는 막대사발을 이용해 분쇄한 후, 25 μm의 입자크기로 분급하여 분말 형태로 만들어 사용하였다. XRD (Rigaku, Ultima IV)는 40 mA의 전류, 40 kW의 전압조건(2 kW)에서 Cu-K α (λ = 1.5418 Å)의 광원을 사용하여 진행하였고, 0 < 2θ < 90°의 범위에서 3 °C/min의 주사 속도로 측정하였다. 또한 회절 분석기를 이용하여 data collection한 후, PDXL 프로그램을 사용하여 data reduction 하였다. 회절 패턴 분석을 통하여 활성탄소섬유의 격자면 간격인 층간 간격(d)과 결정크기(L_c)를 구하였으며 이때, Bragg와 Scherrer 공식을 이용하였다.

$$d = \lambda / 2 \sin \theta$$

Bragg 방정식에서 각 θ는 XRD 패턴 그래프상에 (002)면 피크의 위치(2θ)로부터 계산하였다.

$$L_c = K \lambda / (\beta_{2\theta} \cdot \cos \theta)$$

L_c = 결정 c축의 평균 높이
 K = Scherrer 상수 (K = 0.9)
 β = 반폭값(radian)
 θ = 최대 피크에서의 각

또한 Scherrer 공식에서 θ와 β는 (002)면의 회절 피크와 반폭값 B(002)을 이용하여 계산하였다[18,19].

2.5. 물리적 활성화에 따른 활성탄소섬유의 인장강도 분석

활성탄소섬유의 기계적 강도를 측정하기 위해 인장시험(AGS-X

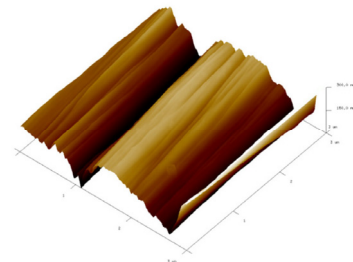
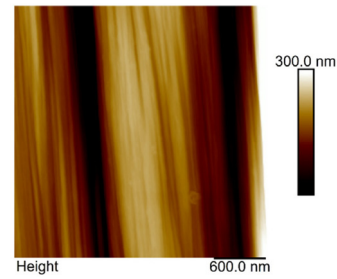


Figure 3. AFM micrographs of the carbon fibers before activation : 2D and 3D images.

STD, Shimadzu)을 실시하였다. 시험 시편은 Figure 2와 같이 활성탄소섬유 다발 중 한 가닥을 이용하여 시편 틀에 올려놓고 집착제 및 에폭시로 양 옆을 고정시켜 준비하였다. 인장시험 값 계산 시 필요한 섬유의 직경은 광학현미경을 이용하여 측정하였다. 0.5 mm/min의 속도로 정속 신장시켜 각 시편편에 대한 하중-신장 곡선을 기록하였다. 측정된 곡선의 기울기를 이용해서 인장탄성계수를 구하여 TS-TM 그래프를 도시하였다. 시편은 동일 샘플당 20회 반복실험을 실시하였으며 상/하위 5% 값을 제외한 결과값들의 평균을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 섬유의 다공성 구조 분석 및 표면 구조 관찰

수증기 활성화법을 이용하여 제조된 활성탄소섬유의 기공 구조 및 표면을 분석하기 위하여 BET와 AFM 분석을 진행하였다. 비표면적 및 기공 구조를 분석하기 위해 BET 분석을 실시한 결과를 Table 1에 나타내었다. S_{BET}는 BET 비표면적, V_{micro}는 micropore의 부피, V_{meso}는 mesopore의 부피 그리고 V_T는 섬유의 총 기공 부피를 나타낸다. 동일한 활성화 온도에서는 활성화 시간이 길어짐에 따라 비표면적이 증가하였으며, 활성화 시간을 동일하게 하고 온도를 변수로 두었을 경우, 활성화 온도가 증가할수록 비표면적이 증가하였다. 이를 통해 활성화 시간과 온도는 섬유의 기공발달 정도에 영향을 끼치는 요인으로 판단된다. 하지만 활성화 시간보다는 활성화 온도가 증가하였을 때 상대

Table 2. XRD Data of Precursor Fiber and Various Activated Carbon Fibers

Sample	002 peak			
	2 θ ($^{\circ}$)	Spacing D ₀₀₂ (nm)	FWHM (2 θ)	Crystallite size, L _c (nm)
Raw	25.36	0.3509	5.98	14.2
700-3 h	25.70	0.3463	5.4	15.9
700-4 h	25.69	0.3465	5.69	15.0
700-6 h	25.87	0.3441	4.85	17.5
750-2 h	25.67	0.3467	5.22	16.3
750-3 h	25.76	0.3456	5.5	15.4
750-4 h	25.80	0.3451	5.5	15.6
800-45 m	25.79	0.3452	6.1	14.0
800-1 h	25.69	0.3465	5.36	15.9
800-1 h 15 m	25.59	0.3479	5.61	15.2
800-1 h 30 m	25.62	0.3474	5.69	15.0

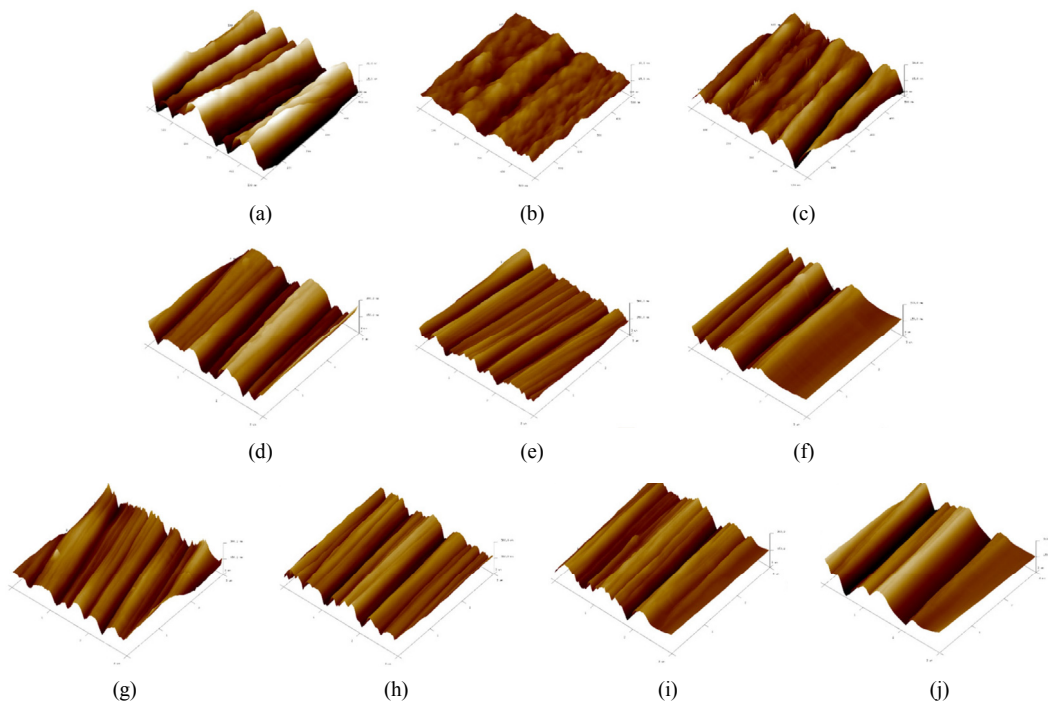


Figure 4. AFM micrographs of the ACFs : 3D images of (a) 700-3 h, (b) 700-4 h, (c) 700-6 h, (d) 750-2 h, (e) 750-3 h, (f) 750-4 h, (g) 800-45 m, (h) 800-1 h, (i) 800-1 h 15 m, (j) 800-1 h 30 m.

적으로 더 급격한 비표면적 증가를 동반하는 것으로 보아, 본 실험조건에서는 활성화 온도가 더 영향을 미치는 변수로 작용한 것으로 사료된다. 또한 유사한 활성화 수율을 가지는 750-3 h와 800-1 h 샘플 (약 40 wt%), 750-4 h와 800-1.5 h 샘플(약 33 wt%)을 비교해본 결과, 유사한 수율임에도 고온에서 활성화 처리된 샘플의 비표면적이 높은 것으로 보아, 고온에서 micropore 구조가 더 잘 발달함을 알 수 있었다. 이는 실제로 V_{micro} 값 결과와 일치하는 경향을 보였다. 가장 큰 비표면적을 나타내는 활성탄소섬유는 800-1.5 h로 비교적 짧은 활성화 시간에도 902 m²/g의 높은 비표면적 값을 나타내었다.

물리적 활성화 시 표면 거칠기의 변화를 관찰하기 위해 AFM 분석을 실시하였다. Figure 3에 활성화 처리를 하기 전 샘플의 이미지를

나타내었고, Figure 4에 다양한 공정변수에서 활성화 처리를 한 샘플들의 표면 AFM 3D 이미지를 도시하였다. 이를 비교해보면 활성화 후에 섬유 표면의 굴곡이 더욱 뚜렷해지고, 촘촘해지는 모습을 육안으로 확인할 수 있다. 이를 통해, 물리적 활성화법인 수증기 활성화는 섬유 표면 형상에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다. 활성화 반응시간에 따른 표면 거칠기를 관찰한 결과, 반응시간 증가 초기에는 섬유의 표면 굴곡변화가 관찰되었으나, 일정 반응시간 이상에서는 표면굴곡변화가 관찰되지 않았다. 이를 통해 활성화 시간 증가가 표면 기공구조를 발달시킬 수 있지만, 오히려 너무 긴 활성화 시간을 거치게 되면 활성화 가스가 섬유 표면을 깎아 내리는 효과가 더 커진 결과로 사료된다.

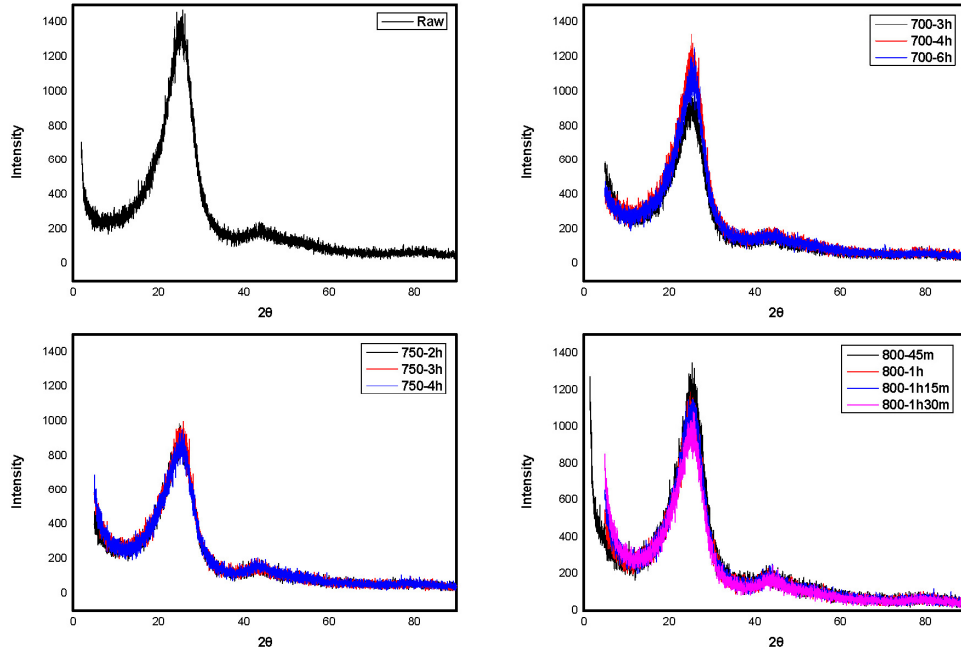


Figure 5. XRD spectra of the ACFs under different activation conditions.

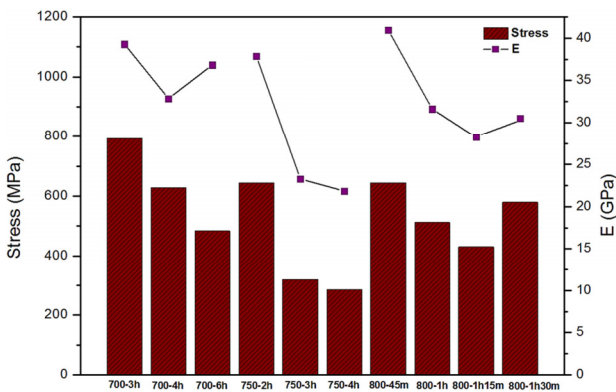


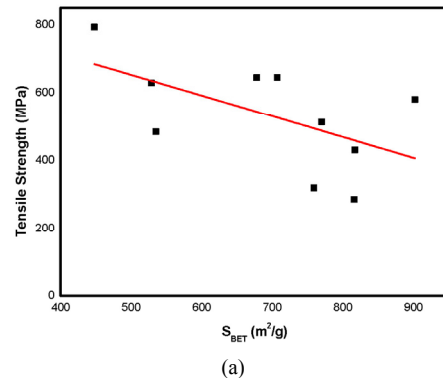
Figure 6. Tensile Strength and Tensile Modulus (E) of ACFs.

3.2. 활성화 조건에 따른 결정구조적 특성

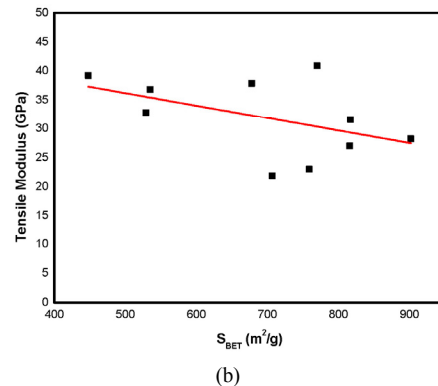
활성화 과정 후 탄소섬유의 구조변화를 확인하기 위해 XRD 분석을 실시하였다. 그 결과 데이터를 Table 2에 정리하였으며, 측정된 스펙트럼을 Figure 5에 나타내었다. 활성화 전과 후 샘플에서 비정질의 특징인 넓은 범위의 피크가 관찰되었다. XRD 스펙트럼에서 공통적으로 두 가지의 피크가 관찰되는데, 이는 각각 (002) 평면과 (10) 평면에 해당한다. 일반적으로 (002) 피크는 배향된 흑연 층을 갖는 구조의 층간 간격(d) 및 결정 길이(L_c)를 구하는데 사용되며, (10) 피크는 동일한 평면상의 탄소 원자 사이의 거리를 예측하는데 이용된다[20]. 제조된 활성탄소섬유의 (002) 층간 간격은 0.3441 nm-0.3479 nm의 분포를 보였다. 이를 통해 흑연의 층간 간격(d)인 0.3354 nm에 비해 약 2.59-3.73% 큰 간격을 예측할 수 있다. 활성화 전과 후 계산된 d 값을 비교한 결과 0.85-1.93%의 미세한 증가가 관찰되었으나, 활성화 공정을 통해 탄소섬유의 결정성이 크게 변하지 않은 것으로 사료된다.

3.3. 기공구조 발달과 기계적 강도의 연관성

제조된 활성탄소섬유의 인장시험 결과를 Figure 6에 나타내었다. 활



(a)



(b)

Figure 7. Tensile Strength (a) and Tensile Modulus (b) by specific surface area (S_{BET}).

성화를 하지 않은 섬유(raw)는 1894.74 MPa의 평균 인장강도(TS) 값과 135.64 GPa의 탄성계수(TM) 값을 보였다. 활성화 전후를 비교하였을 때, 인장강도와 탄성계수 모두 매우 급격하게 떨어지는 것으로 보아, 활성화 공정을 거치며 섬유에 생성되는 기공이 기계적 강도를

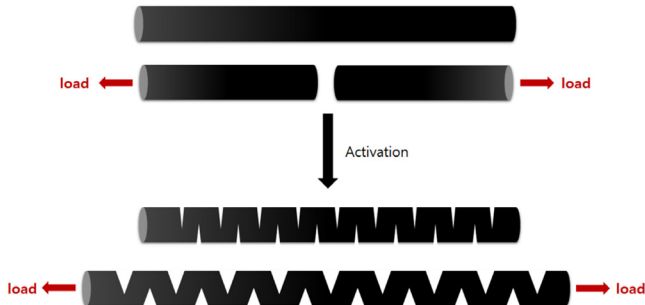


Figure 8. Effect of activation on Tensile Modulus of carbon fiber.

감소시키는 요인임을 판단할 수 있다.

비표면적(S_{BET})에 따른 인장강도(TS) 및 탄성계수(TM) 값의 변화를 Figure 7에 나타내었다. 활성화에 의해 비표면적이 증가할수록 인장강도와 탄성계수 모두 감소하는 경향을 보였다. 두 인장계수와 비표면적간의 관계를 파악하기 위해 1차 그래프로의 근사화를 실시하였다. 두 그래프의 Pearson's 상관계수는 $TS-S_{BET}$, $TM-S_{BET}$ 각각 -0.57522, -0.47263 정도의 일치도를 보였다. 각 그래프의 기울기는 $TS-S_{BET}$ (a) 그래프에서 -0.61339, $TM-S_{BET}$ (b) 그래프에서 -0.02172×10^3 의 값을 나타내었다. 이로부터 기공의 형성은 인장강도보다 탄성계수에 더 급격한 변화를 유발함을 알 수 있다. 활성화 공정은 취성 재료에 가까운 탄소섬유를 연성의 특성을 가지게 하는 것으로 판단되며, 이 결과로 인해 인장강도의 감소 또한 나타나지만, 상대적으로 탄성계수가 더 급격히 감소하는 경향을 나타내는 것으로 보인다. 이러한 구조적 변화를 Figure 8에 나타내었다. 섬유에 빈 공간이 거의 존재하지 않는 탄소섬유의 경우, 구조적으로 가해진 하중에 대한 연성을 갖기 어렵지만 활성탄소섬유의 경우, 섬유상에 분포된 기공들이 마치 스프링과 유사하게 작용하여 작은 응력에도 비교적 큰 변형이 발생하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 물리적 활성화법인 수증기 활성화법을 이용하여 활성탄소섬유를 제조하고, 이에 따른 기공구조 발달과 기계적 물성의 상관관계에 대해 고찰하였다. BET 분석 결과, 활성탄소섬유의 비표면적(S_{BET})은 448~902 m^2/g 범위의 값을 나타냈으며, 활성화 온도와 시간이 증가할수록 활성탄소섬유의 내부에 micropore 구조가 잘 형성되는 모습을 보였다. 특히, 온도에 의한 비표면적 변화가 더욱 뚜렷했다. AFM 분석을 통한 섬유의 표면관찰 결과, 활성화 시간이 길어짐에 따라 표면 굴곡변화가 뚜렷해졌지만, 활성화 시간이 너무 오래 지속되면 활성화 가스에 의해 표면에 깎이는 부분이 많아지며 섬유의 표면이 매끄러워지는 모습이 관찰되었다. 또한 기계적 물성 평가를 위한 인장시험 결과, 인장강도는 58.16~84.92%, 탄성계수는 69.81~83.89%의 감소폭을 보이며 인장강도에 비해 상대적으로 탄성계수 값이 급격하게 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 활성화 결과 형성되는 다공성 구조로 인해, 취성재료에 가까웠던 탄소섬유가 연성의 특성을 가지게 되며 나타나는 현상으로 판단된다.

감 사

본 연구는 한국산업기술평가관리원에서 지원하는 지식경제 기술혁신 사업(과제번호 : 10047017)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

1. National Air Pollutants Emission Service, Emissions of pollutants in 2014, <http://airemiss.nier.go.kr> (2014).
2. M. T. Bae, Water pollution at Paldang water source 'golf course · camping ground · water leisure facility' 108 places detection, Asia Today, 2017.09.20., <http://www.asiatoday.co.kr/view.php?key=20170920010009420>.
3. S. Mor, K. Chhoden, P. Negi, and K. Ravindra, Utilization of nano-alumina and activated charcoal for phosphate removal from wastewater, *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.*, **7**, 15-23 (2017).
4. 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).
5. D. Zhao, Y. Yu, and J. P. Chen, Fabrication and testing of zirconium-based nanoparticle-doped activated carbon fiber for enhanced arsenic removal in water, *RSC Adv.*, **6**, 27020-27030 (2016).
6. S. H. Pak, M. J. Jeon, and Y. W. Jeon, Study of sulfuric acid treatment of activated carbon used to enhance mixed VOC removal, *Int. Biodeterior. Biodegradation*, **113**, 195-200 (2016).
7. S. Pap, J. Radonic, S. Trifunovic, D. Adamovic, I. Mihajlovic, M. V. Miloradov, and M. T. Sekulic, Evaluation of the adsorption potential of eco-friendly activated carbon prepared from cherry kernels for the removal of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Ni^{2+} from aqueous wastes, *J. Environ. Manage.*, **184**, 297-306 (2016).
8. R. Yavuz, H. Akyildiz, N. Karatepe, and E. Çetinkaya, Influence of preparation conditions on porous structures of olive stone activated by H_3PO_4 , *Fuel Process. Technol.*, **91**, 80-87 (2010).
9. Y. S. Lee, Porous carbon, *Phys. High Technol.*, **13**, 18-23 (2004).
10. R. H. Gumus and I. Okpeku, Production of activated carbon and characterization from snail shell waste (*Helix pomatia*), *Adv. Chem. Eng. Sci.*, **5**, 51-61 (2015).
11. C. R. Park, S. J. Kang, and C. H. Yoon, Activated carbon fibers as a pioneering problem solver of environmental problems, *Polym. Sci. Technol.*, **7**, 130-139 (1996).
12. T. Lee, C. H. Ooi, R. Othman, and F. Y. Yeoh, Activated carbon fiber - The hybrid of carbon fiber and activated carbon, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, **36**, 118-136 (2014).
13. L. Wang, Y. Yao, Z. Zhang, L. Sun, W. Lu, W. Chen, and H. Chen, Activated carbon fibers as an excellent partner of Fenton catalyst for dyes decolorization by combination of adsorption and oxidation, *Chem. Eng.*, **251**, 348-354 (2014).
14. M. Song, B. Jin, R. Xiao, L. Yang, Y. Wu, Z. Zhong, and Y. Huang, The comparison of two activation techniques to prepare activated carbon from corn cob, *Biomass Bioenergy*, **48**, 250-256 (2013).
15. Y. Huang, E. Ma, and G. Zhao, Thermal and structure analysis on reaction mechanisms during the preparation of activated carbon fibers by KOH activation from liquefied wood-based fibers, *Ind. Crops Prod.*, **69**, 447-455 (2015).

16. J. A. Macia-Agullo, B. C. Moore, D. Cazorla-Amoros, and A. Linares-Solano, Activation of coal tar pitch carbon fibres: Physical activation vs. chemical activation, *Carbon*, **42**, 1367-1370 (2004).
17. D. W. Kim, H. S. Kil, K. Nakabayashi, S. H. Yoon, and J. Miyawaki, Structural elucidation of physical and chemical activation mechanisms based on the microdomain structure model, *Carbon*, **114**, 98-105 (2017).
18. F. C. Tai, C. Wei, S. H. Chang, and W. S. Chen, Raman and X-ray diffraction analysis on unburned carbon powder refined from fly ash, *J. Raman Spectrosc.*, **41**, 933-937 (2010).
19. H. J. Lee, J. S. Won, S. C. Lim, T. S. Lee, J. Y. Yoon, and S. G. Lee, Preparation and characterization of PAN-based carbon fiber with carbonization temperature, *Text. Sci. Eng.*, **53**, 103-108 (2016).
20. N. Yusof, D. Rana, A. F. Ismail, and T. Matsuura, Microstructure of polyacrylonitrile-based activated carbon fibers prepared from solvent-free coagulation process, *J. Appl. Res. Technol.*, **14**, 54-61 (2016).