

폴리아크릴로나이트릴/리그닌 복합소재로부터 생성된 탄소 필름의 전기적 성질 및 흡착 성능

배준원[†]

동덕여자대학교 응용화학과
(2023년 1월 14일 접수, 2023년 2월 1일 수정, 2023년 2월 3일 채택)

Preparation of Carbon Films from Polyacrylonitrile@Lignin Composites, and Their Electrical Properties and Adsorption Behavior

Joonwon Bae[†]

Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea
(Received January 14, 2023; Revised February 1, 2023; Accepted February 3, 2023)

초 록

리그닌(lignin)은 고분자와 혼합될 수 있고 탄화도 가능하므로 효용성이 크다. 본 실험에서는, 탄화에 유리한 고분자인 폴리아크릴로나이트릴(polyacrylonitrile, PAN)과 리그닌을 혼합하여 탄소 전구체(precursor)로 제조하고, 탄화(carbonization)하여 안정한 탄소 필름이 제어된 탄화 과정을 통해 제조되었다. 얻어진 탄화 소재의 형태적, 전기적 특성들이 분석되었으며, 흡착 성능이 실험적으로 제시되었다. 탄소 전구체 복합소재의 형성은 적외선 분광기(Fourier-transform infrared, FT-IR)를 통해 확인하였고, 생성된 탄소 필름의 외형적 특성은 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 고찰하였다. 이를 통해 전구체 필름의 구조적 안정성이 탄화 이후에도 유지됨을 확인하였으며, 필름 내부에 존재하는 리그닌의 흔적도 고찰할 수 있었다. 탄소 필름의 미세 구조는 라만(Raman) 분광기를 통해 분석하였으며, 표면적 및 기공 구조는 BET (Brunauer-Emmett-Teller) 법으로 측정하여, 비교적 균일한 기공이 형성됨을 확인하였다. 탄소 시료의 전기적 특성도 고찰하여, 흡착 소재로서 사용 가능함을 확인하였고, 흡착(adsorption) 테스트를 통해 금속 양이온을 효율적으로 제거할 수 있음을 증명하였다. 본 연구는 해당 분야 향후 연구에 중요한 정보를 제공할 것이다.

Abstract

Lignin is compatible with various polymeric materials and useful as a carbon precursor. In this work, carbon monolith films were produced from polyacrylonitrile (PAN)@lignin precursor films by a controlled carbonization cycle. In addition, their morphological features, electrical properties, and adsorption behavior were analyzed and compared with those of carbonized PAN films. The successful formation of PAN@lignin precursor was confirmed by Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy. SEM was used to examine the morphology of precursor and carbonized films, revealing that both precursor and carbonized films retained structural stability following carbonization. A trace of lignin in the carbonized films was also found. The pore structure of the carbonized PAN@lignin film was measured using the BET method, indicating the formation of fairly uniform pores. The electrical properties were also analyzed to obtain the Ohmic relation, which demonstrated that the electrical signal was influenced by incoming materials. Finally, the carbonized PAN@lignin films were useful as adsorbents to remove metal ions. This study provides important information for future initiatives in relevant research fields.

Keywords: Lignin, Polyacrylonitrile, Carbon film, Adsorption, Electrical properties

1. 서 론

자연계에 풍부한 저독성 소재의 활용은 환경 보호 측면에서나 실용적 견지에서 매우 중요한 이슈가 되고 있다[1]. 이들 중에서, 목질 외

피의 주요 성분인 리그닌이 큰 관심을 끌고 있다[2]. 리그닌은 대부분의 목질 또는 식물에서 발견되는 성분이며, 다양한 성질을 갖는 리그닌이 얻어질 수 있으므로 화학적으로 매우 유용하다. 특히, 리그닌은 셀룰로오스(cellulose) 성분을 이용한 제지 과정에서 부산물로 대량으로 얻을 수 있고, 구조적 안정성, 기계적 물성, 화학적 저항성, 흡착 성능 등을 지니고 있어 향후 활용가치 역시 매우 크다[1]. 리그닌은 구조적으로 페놀(phenol)계 단량체(monomer)가 고분자를 이루고 있는 형태이므로, 단량체를 단리(fractionation)하여 기존 석유화학물질을 대체하는 것이 가장 효율적인 이용방법이다[2]. 그러나, 이 방법은 아

[†] Corresponding Author: Dongduk Women's University
Department of Applied Chemistry, Seoul 02748, Republic of Korea
Tel: +82-2-940-4506 e-mail: redsox7@dongduk.ac.kr

직도 매우 난해한 과정이므로, 대량으로 직접이용하는 방법이 더욱 관심을 끌고 있다. 예를 들면, 외장재의 소재로 활용하거나 유해물질 제거를 위한 흡착제로 활용하는 것이 여기에 포함된다[3].

리그닌은 열적 저항성이 비교적 높은 폐놀계 단량체들이 연결된 고분자 구조를 형성하고 있으므로, 열에 의한 탄화 산물도 상당히 흥미로울 것으로 예상된다. 따라서, 탄화를 통하여 가교도가 높은 망상형(networked) 탄소 구조체를 형성할 수 있고 이를 유해성분 제거용으로 활용한 사례도 보고되고 있다[4]. 이러한 탄소 구조는 비교적 높은 결정도를 갖는 고분자 전구체로부터 얻어지는 탄소 구조와 매우 유사하다[5]. 기존의 리그닌도 흡착 성능이 우수하다고 알려져 있는데, 탄화 후 미세 기공(micropore)이 형성되면 흡착 성능은 더욱 개선될 것으로 기대된다. 이를 위해서는 탄화 공정에서 온도 프로파일(temperature profile)을 정교하게 조절할 필요가 있다. 이렇게 얻어지는 탄소 소재는 수처리, 유해 가스 제거, 고형물질 흡착 제거 등 다양한 환경 분야에서 중요한 매체가 될 것이다[6].

리그닌의 탄화(carbonization)는 다양한 장점을 얻을 수 있으므로, 상당히 효율적인 공정으로 고려되나, 탄화 과정에서 일어나는 형태 변화가 다른 전구체에 비하여 큰 편이라는 단점이 있다[7]. 따라서, 이러한 요소를 최소화하고 형태 변화를 억제하기 위하여 고분자 전구체와 혼합하는 방식이 효율적일 것으로 사료된다. 이 경우, 전통적으로 탄소 전구체로 널리 활용되어 왔던 PAN 같은 소재들이 관심을 끌 수 있다. 특히, PAN 분자는 다소간의 극성을 지니고 있으며, 무엇보다 탄화 과정에서 부피 변화는 나타나지만 분자 내 결합이 유지되는 장점이 있다[8]. 따라서, 리그닌과 혼합하여 탄화 과정을 거칠 경우 리그닌의 약점을 보완해 줄 수 있는 좋은 소재가 될 수 있다.

PAN의 탄화에 관하여는 오랜 기간동안 많은 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 한편, 리그닌의 탄화에 관하여는 단편적인 연구가 이루어져 왔으나 아직도 그 사례가 제한적이다. 따라서, 본 연구에서는, 고분자와 리그닌의 복합소재를 제조하여 각각의 구성 요소가 가진 장점을 최대화하기 위하여 다음과 같은 내용의 연구를 수행하였다. 먼저, PAN과 리그닌을 혼합하여 복합소재 전구체를 필름 형태로 얻는다. 이 과정은 간단하나, 혼합 시 조성 및 공정 변수 조절이 필요하다. 이를 제어된 탄화 공정 안에서 정교한 온도 조절을 실시함으로써 구조가 잘 형성된 탄소 필름을 얻음과 동시에, 적합한 탄화 조건을 확보할 수 있다. 수득된 탄소 필름은 적외선 분광기(Fourier-transform infrared, FT-IR), 라만(Raman) 분광법, 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM), 전기 측정법 등의 방법으로 분석하였다. 특히, 얻어진 탄소 필름(Carbonized PAN@lignin film)은 옴(Ohm)의 법칙을 따르며, 흡착된 물질의 농도에 따라 전기 신호가 변화하는 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다. 나아가, 금속 양이온의 흡착에 탄화된 필름이 상당히 효과적이라는 것도 증명할 수 있었다. 이를 통해, 수득된 탄소 필름이 물질의 검출과 흡착이라는 두 가지 목적을 동시에 달성할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 점차 활발해지고 있는 리그닌 관련 연구에 중요한 정보를 제공할 것이다.

2. 실험

2.1. 재료

폴리아크릴로니트릴(PAN, polyacrylonitrile, M_w 150 kg/mol), 디메틸포름아마이드(N, N-dimethylformamide, purity > 99.8%), 리그닌(lignin, alkali), 및 세슘 표준 용액(ICP 용)은 알드리치(Aldrich, Wisconsin, USA)에서 구매하여 추가 정제없이 사용하였다.

2.2. PAN@lignin 전구체 필름 제조

일정량의 PAN (10 wt%)을 DMF에 녹인다. 이 용액은 1시간 동안 초음파로 처리하여 분산을 촉진하였고, 하룻밤 동안 격렬하게 교반하였다. 얻어진 용액에 리그닌 파우더(PAN 질량 대비 15 wt%)를 넣고 호모제나이저(homogenizer)로 30분간 교반하였다. 만들어진 용액을 유리 기판 위에 놓고 닥터 블레이드(Dr. Blade, film applicator)를 이용하여 필름 형태로 제조하였다. 형성된 필름은 섭씨 80도에서 하룻밤 동안 건조하고, 진공에서 추가적으로 3시간 동안 건조하였다. 제조된 필름의 두께는 약 200마이크로미터(μm)이다.

2.3. PAN@lignin 전구체 필름의 탄화

온도 조절을 통한 제어된 탄화 공정은 안정된 탄소 필름을 얻는데 필수적이다. 사용된 탄화 공정은 질소 분위기에서 수행되었고 4단계로 구성된다[6].

- 1단계 (안정화, 상온에서 섭씨 300도까지 분당 1도 승온)
- 2단계 (탄화, 섭씨 300도에서 800도까지 분당 3도 승온)
- 3단계 (정지, 섭씨 800도에서 30분)
- 4단계 (냉각, 비강제 냉각)

2.4. 분석 및 측정

적외선 분광 스펙트럼은 Perkin Elmer Spectrum One (Perkin Elmer, USA) 분광기를 이용하여 얻었다. 형태적 특성은 JEOL 6700 (JEOL, Japan) 주사전자현미경으로 가속전압 10 kV에서 관찰하였다. 라만 분광 스펙트럼은 LabRam Aramis spectrometer (Horiba Jobin-Yvon, Kyoto, Japan) 분광기를 이용하여 얻었다. 기공 크기는 autosorb iQ3 BET (Anton Parr, USA) 장치로 측정되었다. 전기적 측정은 Keithley 2612 B (Tektronix, USA) 소스미터(source meter)와 MST 4000A probe station (MSTECH, Republic of Korea)으로 측정하였다. 탄화된 PAN 및 PAN@lignin film에 에탄올 용액(암모니아 NH_3 포함)을 도입하여 전류의 변화를 초기 전류 값으로 나누어 측정하였다. 이 때 $\Delta I/I_0 = (I - I_0)/I_0$ 로 표시되고, I_0 와 I 는 각각 초기 및 감지된 전류값이다.

2.5. 흡착 실험

세슘 표준 용액(1 ppm, 질산 함유)을 증류수(100 mL)에 섞어 세슘 이온을 포함한 시료 용액을 제조하였다. 이후, 일정량(0.1 g)의 흡착제(탄화된 PAN@lignin 필름)를 위의 용액에 넣고 약하게 교반하였다(300 rpm). 흡착 성능은 4시간 동안 관찰되었다. 흡착이 진행된 후, 용액은 시린지 필터(PTFE-H; pore size: 0.2 μm ; Hyundai Micro)를 통해 여과되었고, 이온 농도는 원소분석법(inductively coupled plasma, ICP)으로 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

리그닌과 PAN은 혼합이 가능한 조합으로, PAN 대비 리그닌의 함량이 약 25 wt%가 될 때까지는 혼합이 순조롭게 이루어진다. 이를 유리기판에 캐스팅(casting)하여 건조한 후 얻어지는 PAN@lignin 필름과 리그닌의 FT-IR 스펙트럼을 Figure 1에 나타내었다. 리그닌은 폐놀계 단량체가 주성분을 이루는 물질로 폐놀의 특성 피크가 두드러지게 나타나고 있다. 먼저, 3500 파수 근처에서 O-H (hydroxy) 그룹의 스트레칭(stretching)이, 3000 파수 근처에서는 C-H (alkyl) 그룹의 스트레칭이, 1600 파수 근처에서는 이중결합을 가진 벤젠(benzene)에 존재하는 C=C 그룹의 스트레칭이 드러나고 있다[6]. 이를 전제로, PAN@lignin

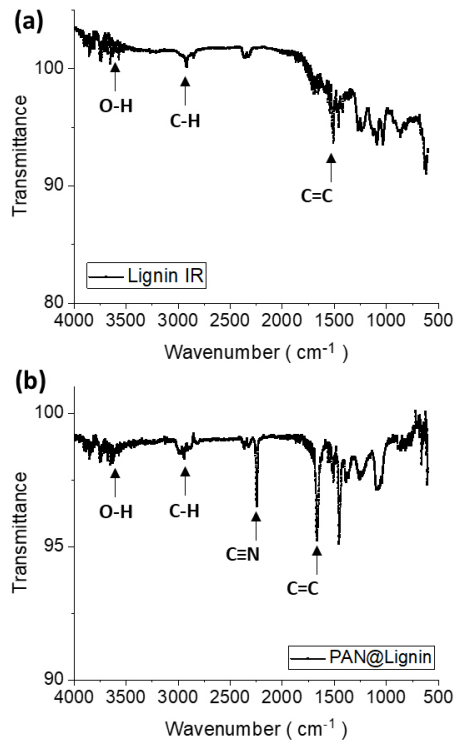


Figure 1. FT-IR spectra of (a) lignin and (b) PAN@lignin precursor.

의 적외선 분광 스펙트럼을 살펴보면 리그닌의 특성 피크(peak)들이 모두 나타나고 있으며, PAN의 특성 피크가 2200 파수 근처(C≡N 스트레칭)에서 나타나고 있다. 이러한 결과들을 고려할 때, PAN@lignin 필름이 성공적으로 형성되었음을 판단할 수 있다.

본 연구에서는 PAN@lignin 전구체를 탄화하여 얻어지는 물질의 특성을 주로 고찰하므로 탄화산물을 추가적으로 고찰하였다. 먼저 언급해야 할 점이, 리그닌도 탄화가 가능한데 리그닌을 탄화할 경우 숯과 같은 형태의 물질이 얻어진다. 이 물질 자체도 매우 흥미로우나 형태적 안정성이 약하며, 탄화 과정 전후에서 형태 변화가 급격하게 일어나는 특징이 있으므로 추가적이고 집중적인 연구와 고찰이 절실하다. PAN@lignin의 탄화는 실험파트에서 제시한 탄화 사이클을 동원하여 매우 효과적으로 진행된다는 점을 확인하였고, 비교 대상 물질로 리그닌 없이 PAN 필름만을 탄화한 소재를 비교하여 제시하기로 한다.

실험파트에서 설명한 탄화 1단계에서는 미량의 잔류 유기물 및 저분자량 체인이 제거되며, 나이트릴 그룹 간의 정렬이 진행되면서 육각형 구조화가 촉진된다. 2단계에서는 본격적으로 육각형의 탄소 구조가 도출이 되면서 결정성이 상대적으로 증가하게 된다. 3단계에서는 해당 온도까지 탄화가 된 상태에서 최종 온도의 효과가 탄화물질 전체에 균일하게 전달되도록 짧은 시간 유지하게 된다.

Figure 2는 PAN, PAN@lignin 필름 그리고 이들의 탄화 생성물의 주사전자현미경 사진을 보여주고 있다. PAN의 표면 구조(Figure 2a)가 탄화 후에도 남아 있음을 확인할 수 있다(Figure 2b). PAN@lignin의 표면 구조는 PAN과 리그닌의 혼합으로 인해서 PAN 필름보다 좀더 조밀한 구조를 나타내고 있으며(Figure 2c), 탄화 후에는 PAN과 리그닌의 열적 팽창도 차이에 의해서 다소간의 응력(stress)이 발생하여 기공이 형성되는 경향이 있다(Figure 2d). 전체적으로 거시적인 구조의 안정성은 탄화에 의해서 손상되지 않았으며, 향후 전기 물성 측정

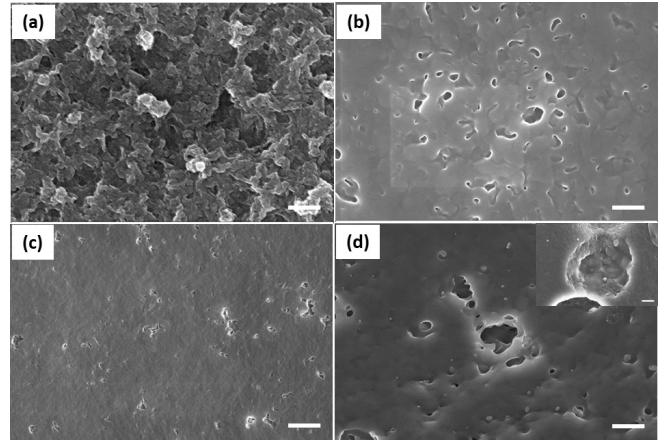


Figure 2. SEM image of (a) PAN, (b) PAN@lignin films and their carbonized products (c and d) (scale bar 1 μm). Inset is the magnified image of (d)(scale bar 200 nm).

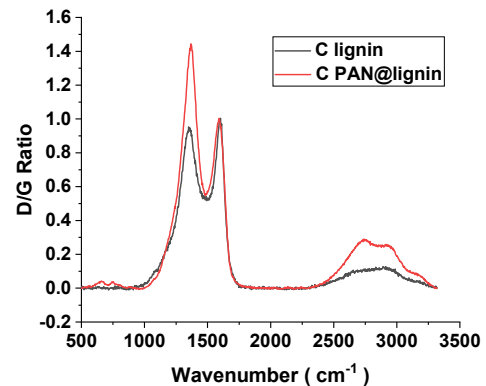


Figure 3. Raman spectra of carbonized lignin and PAN@lignin composite film.

및 흡착 테스트가 가능함을 보여주고 있다. Figure 2는 리그닌의 탄화로 인해 형성된 영역을 관찰한 주사전자현미경 사진을 보여주고 있다. 위에서 언급한 것처럼, 리그닌 파우더(powder)의 탄화에서 얻어지는 산물도 응집된 형태의 탄소가 얻어졌음을 볼 때, 리그닌은 표면의 극성으로 인해 탄화 사이클이 진행되는 동안 입자 간 응집과 가교 반응이 일어나는 것으로 판단할 수 있다[9]. 이러한 현상은 PAN@lignin의 탄화에서는 긍정적 요소가 많을 것으로 사료된다. 특히, 탄화 후에 리그닌이 본래 보유한 미세기공은 그대로 보존하고, 고분자에 의해 발생하기 쉬운 메조(meso) 혹은 매크로(macro) 기공은 억제하는 효과를 볼 수 있다.

위에서 탄소의 외형을 고찰하였으므로, 내부 구조 특성을 이해할 필요가 있다. 따라서, 라만 분석이 수행되었다. Figure 3은 탄화된 리그닌 및 PAN@lignin 필름의 라만 분광 스펙트럼을 나타내고 있다. 탄화된 리그닌에서 D, G peak가 두드러지게 관찰되었으며, 이러한 현상은 탄화된 PAN@lignin에서도 나타났다. 그리고, D/G ratio가 PAN@lignin을 탄화하였을 때 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 PAN과의 혼합으로 인해 탄화 시 defect가 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 본 실험에서 추구하는 PAN 도입의 긍정적 효과를 나타내는 결과이다. 700파수 인근의 작은 피크가 리그닌 탄화 생성물에서 보이고 있는데, 이는 완전히 탄화되지 않은 미량 리그닌의 존재를 암시한다고 판단된다. D, G

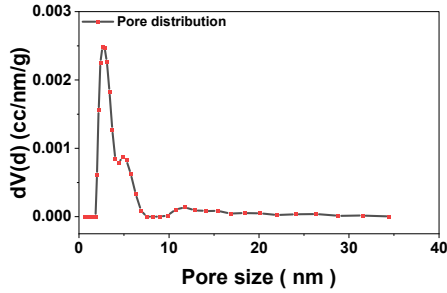


Figure 4. Pore size distribution of carbonized PAN@lignin film.

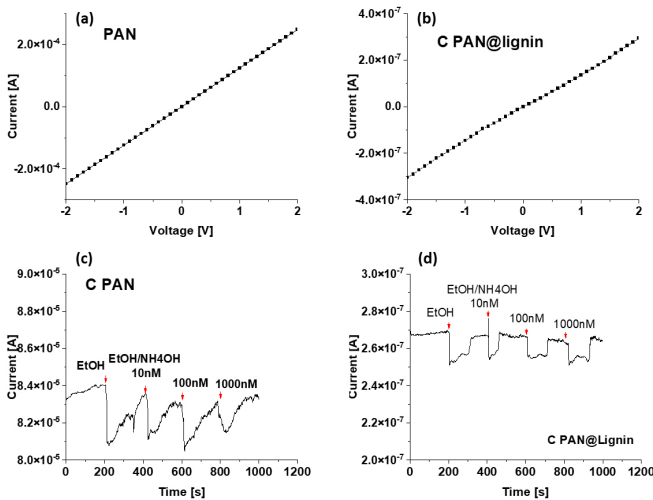


Figure 5. *I-V* relation in carbonized (a) PAN and (b) PAN@lignin. Variation in current (c and d) upon addition of ethanol and ammonia solution in ethanol as a function of ammonia concentration.

피크의 overtone 현상은 3000파수 근처에서 넓은 피크로 나타나 있다.

Figure 4는 PAN@lignin 필름을 탄화하여 얻은 생성물을 BET 분석하여 얻은 기공 크기 정보를 나타내고 있다. 리그닌은 비교적 넓은 표면적과 다양한 크기의 기공을 포함하고 있는 것으로 알려져 있다. 고분자인 PAN은 원칙적으로 일정량의 빈 공간(*free volume*)을 지니고 있다. 이는 고분자 사슬(*chain*)이 완벽하게 결정을 이루지 못하기 때문에 발생하는 현상이다. PAN과 리그닌을 섞으면 리그닌이 고분자 사슬간 빈 공간(*free volume*)을 매우 큰 기공들은 줄어드는 경향이 발생한다. 그럼에도 불구하고, 메조 또는 미세기공(*micropore*)는 탄화 후에도 존재하게 된다. Figure 4에 따르면 탄화된 필름 내부에는 4-5 나노미터 크기의 기공들이 가장 높은 비율로 존재한다는 것을 알 수 있다. 이는 위에서 설명한 내용과 일치하는 것으로 볼 수 있다. 기공 분포도에서 약 5 나노미터 크기를 갖는 기공과 약 2-3 나노미터 크기를 갖는 기공이 다수 존재하는 것으로 볼 수 있는데, 전자는 메조기공(*mesopore*)에 해당하며, 후자는 미세기공(*micropore*)에 해당한다고 볼 수 있다. 메조기공은 탄화의 산물로 미세기공은 리그닌에 존재하던 요소로 보는 것이 가장 타당하다.

리그닌은 절연성 물질로 잘 알려져 있으나, 이를 탄화하면 전기전도성이 부여될 가능성이 있다. 특히, PAN@lignin 전구체를 탄화할 경우 PAN고분자 탄화에 의한 전기전도도 발생 효과를 부차적으로 활용할 수 있을 것으로 예상되었다. 따라서, 본 연구에서는 탄화된 PAN@lignin 소재의 전기적 특성에 대하여 관심을 기울여 Figure 5에

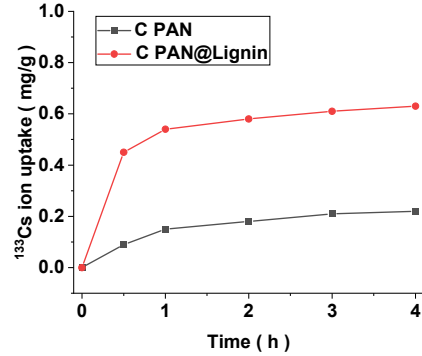


Figure 6. Adsorption profile of carbonized PAN and PAN@lignin as a function of adsorption time.

보이는 결과를 얻었다. PAN만을 탄화하여 얻은 탄소 소재와 PAN@lignin을 탄화하여 얻은 생성물은 모두 결정도가 상대적으로 낮으나 탄소의 특성을 그대로 지니고 있다. 따라서, 간단한 옴(*Ohm*)의 법칙이 적용되지는 알아보기 위해 전압을 변화하면서 얻어지는 전류의 특성을 살펴보았다(Figure 5a, b). 탄화된 두 소재 모두에서 선형의 관계가 얻어졌고, 이는 형성된 전류가 가해진 전압에 비례함을 나타낸다. 이는 두 탄화 생성물이 모두 일정 수준의 전기전도도를 지니고 있음을 의미한다. 이어서, 외부 물질을 탄화 생성물에 도입하였을 때 전기적 특성에 어떠한 변화가 일어나는지 간단히 살펴보기 위해 두 소재위에 에탄올과 다양한 농도의 암모니아 용액(에탄올 용매)을 떨어뜨려 보았다. 두 탄소 소재 모두에서 유사한 반응이 나타났다(Figure 5c, d). 즉, 외부 물질(에탄올 또는 용액)을 도입하였을 때 전류의 변화가 감지되었고, 에탄올만을 도입한 경우 전류 감소가 상대적으로 큰데, 이는 에탄올이 암모니아에 비해서 덜 극성이므로 탄소 소재 위에서 저항 요소로 작용한 것으로 판단된다[6]. 암모니아 용액을 도입할 때 전류 감소가 상대적으로 약하다. 이는, 암모니아의 극성이 상대적으로 커서 전하 전달 효과가 에탄올 자체보다는 약간 크기 때문인 것으로 판단된다. PAN만을 탄화한 시료의 경우 외부 물질 도입에 따른 전류 감소량이 PAN@lignin을 탄화한 소재보다 크게 나타나고 있다(Figure 5c). 특히, 탄화된 PAN@lignin 소재에서 암모니아의 농도가 증가할수록 전류 변화량이 다소 약하게 나타남을 볼 수 있다(Figure 5d). 이는 리그닌이 상대적으로 넓은 표면적을 갖고 절연 물질이지만, PAN과 혼합하여 탄화할 경우에도 전기적 특성이 유지됨을 의미한다[6].

탄화된 소재의 흡착 성질을 살펴보기 위해 ¹³³Cs⁺ 이온에 대한 흡착 테스트[10]를 실시하여 Figure 6에 나타내었다. 탄화된 PAN에 비해 PAN@lignin 탄화 생성물의 흡착 성능이 흡착 초기 단계부터 상당히 뛰어나다는 것을 확인할 수 있다. 이는 위에서 언급한 것처럼 리그닌의 흡착 성능과 상대적으로 넓은 표면적에 기인하는 것으로 볼 수 있는데, 탄화 후에도 이 성능은 퇴화하지 않고 그대로 유지됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고분자 리그닌 혼합 전구체를 정교한 탄화 과정을 적용하여 탄화된 PAN@lignin 소재를 수득하였고, 이 소재의 특성을 다양하게 분석한 후 전기적 특성 및 흡착 성능에 대하여 검증하였다. 리그닌의 탄화에 의한 변형을 고분자 도입으로 상당부분 억제할 수

있었고, 형태적 안정성을 확보할 수 있었다. 전자현미경 관찰을 통해 탄화 전후에 심각한 형태 변화가 없음을 확인하였다. 그리고, 전기적으로 옴의 관계가 유지되었으며 외부 물질이 도입이 되었을 때에도 전기적 특성 변화 양상이 일정하게 유지되었다. PAN의 탄화 산물에 비하여 리그닌의 장점이 결합된 관계로 금속 양이온 흡착 성능도 향상되었음을 확인하였다. 이 연구는 아직 정보가 부족한 향후 해당 분야 관련 연구에 중요한 사전 정보를 제공할 것이다.

감 사

이 연구는 동덕여자대학교의 지원으로 수행되었습니다. (2022년)

References

1. Z. Jiadeng, Y. Chaoyi, Z. Xin, Y. Chen, J. Mengjin, and Z. Xiangwu, A sustainable platform of lignin: From bioresources to materials and their applications in rechargeable batteries and supercapacitors, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **76**, 100788 (2020).
2. P. K. Dikshit, H. B. Jun, and B. S. Kim, Biological conversion of lignin and its derivatives to fuels and chemicals, *Korean J. Chem. Eng.*, **37**, 387-401 (2020).
3. S. Wang, L. Lyu, G. Sima, Y. Cui, B. Li, X. Zhang, and L. Gan, Optimization of fructose dehydration to 5-hydroxymethylfurfural catalyzed by SO₃H-bearing lignin-derived ordered mesoporous carbon, *Korean J. Chem. Eng.*, **36**, 1042-1050 (2019).
4. E. Svinterikos, I. Zuburtikudis, and M. Al-Marzouqi, Electrospun lignin-derived carbon micro- and nanofibers : A review on precursors, properties, and applications, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **8**, 13868-13893 (2020).
5. E. Frank, L. M. Steudle, D. Ingildeev, J. M. Spörl, and M. R. Buchmeiser, Carbon fibers: Precursor systems, processing, structure, and properties, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **53**, 5262-5298 (2014).
6. O. -N. Hur, S. Park, S. Park, B. H. Kang, C. -S. Lee, J. -Y. Hong, S. -H. Park, and J. Bae, A study on fabrication of polypyrrole@lignin composite and electrical sensing and metal ion adsorption capabilities, *Mater. Chem. Phys.*, **285**, 126166 (2022).
7. L. Zhu and Z. Zhong, Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on biomass pyrolysis kinetics, *Korean J. Chem. Eng.*, **37**, 1660-1668 (2020).
8. A. A. Ahmad, M. Al-Raggad, and N. Shareef, Production of activated carbon derived from agricultural by-products via microwave-induced chemical activation: A review, *Carbon Lett.*, **31**, 957-971 (2021).
9. A. El Nemr, R. M. Aboughaly, A. El Sikaily, M. S. Masoud, M. S. Ramadan, and S. Ragab, Microporous-activated carbons of type I adsorption isotherm derived from sugarcane bagasse impregnated with zinc chloride, *Carbon Lett.*, **32**, 229-249 (2022).
10. J. -Y. Hong, W. -K. Oh, K. -Y. Shin, O. S. Kwon, S. Son, and J. Jang, Spatially controlled carbon sponge for targeting internalized radioactive materials in human body, *Biomaterials*, **33**, 5056-5066 (2012).

Authors

Joonwon Bae; Ph.D., Associate Professor, Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea; redsox7@dongduk.ac.kr