

커피찌꺼기로부터 얻어진 탄소 소재의 전기화학적 성질 및 흡착 성능

유진주¹ · 고나연¹ · 오수현¹ · 오정연* · 김미정** · 이재은*** · 엄태식*,[†] · 배준원[†]

동덕여자대학교 응용화학과, *홍익대학교 화학공학과,
창원대학교 보건대학원 뷰티켄스전공, *오산대학교 뷰티코스메틱계열
(2023년 8월 11일 접수, 2023년 8월 27일 수정, 2023년 8월 30일 채택)

Electrochemical Properties and Adsorption Performance of Carbon Materials Derived from Coffee Grounds

Jin Ju Yoo¹, Nayeon Ko¹, Su Hyun Oh¹, Jeongyeon Oh*, Mijung Kim**, Jaecun Lee***, Taeshik Earmme*,[†] and Joonwon Bae[†]

Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea

*Department of Chemical Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Republic of Korea

**Major of Health and Beauty, Graduate School of Public Health, Changwon University, Changwon-si 51140, Republic of Korea

***Department of Beauty Cosmetics, Osan University, Osan-si 18119, Republic of Korea

(Received August 11, 2023; Revised August 27, 2023; Accepted August 30, 2023)

초 록

우리 일상에서 대량으로 생성되는 리그노셀룰로오스(lignocellulose) 물질인 커피 찌꺼기(coffee grounds)를 탄화하여 얻어지는 탄소 소재의 전기화학적 특성과 흡착 성능을 고찰하였다. 커피 찌꺼기를 섭씨 600도 정도의 상대적 저온에서 탄화하여 얻어지는 탄소의 형태적 구조를 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)으로 고찰하였다. Raman 분석을 통하여 얻어진 탄소 재료의 결정성 정보를 얻었다. 기본적인 전기적 특성을 간단한 옴의 관계(Ohmic relation)를 통하여 확인하였다. 나아가, 탄화된 재료가 리튬 이차 전지의 음극(anode) 소재로 활용될 수 있는지 여부를 반쪽 전지(half-cell) 충방전(charge/discharge) 테스트를 통해 살펴보았으며, 초기 음극재의 비용량은 약 520 mAh/g으로 나타났다. 이어서, 커피 찌꺼기 탄화로 얻어진 탄소 소재의 다공성 구조로 인해 분자를 흡착할 수 있음을 자외선(ultraviolet, UV) 흡광도(absorption) 측정을 통해 확인하였다. 탄소 소재의 표면 개질을 통해 극성이 다른 분자들의 선택적으로 흡착할 수 있음을 추가로 확인하였다. 본 연구는 향후 목질계 폐기물의 활용에 대한 중요한 정보를 제공할 것이다.

Abstract

The fundamental electrochemical properties and adsorption capabilities of the carbonized product derived from coffee grounds, a prevalent form of lignocellulose abundantly generated in our daily lives, have been extensively investigated. The structure and morphology of the resultant carbonized product, obtained through a carbonization process conducted at a relatively low temperature of 600 °C, were meticulously examined using a scanning electron microscope. Raman spectroscopy measurements yielded a relative crystallinity (D/G ratio) of the carbon product of 0.64. Electrical measurements revealed a linear ohmic relationship within the carbonized product. Furthermore, the viability of utilizing this carbonized material as an anode in lithium-ion batteries was evaluated through half-cell charge/discharge experiments, demonstrating an initial specific capacity of 520 mAh/g. Additionally, the adsorption performance of the carbon material towards a representative dye molecule was assessed via UV spectroscopy analyses. Supplementary experiments corroborated the material's ability to adsorb a distinct model molecule characterized by differing surface polarity, achieved through surface modification. This article presents pivotal findings that hold substantial implications for forthcoming research endeavors centered around the recycling of lignocellulose waste.

Keywords: Coffee ground, Carbonization, Lithium-ion Battery anode, Adsorption, Lignocellulose

¹ Co-first authors

1. 서 론

[†] Corresponding Authors: T. Earmme: Hongik University, Department of Chemical Engineering, Seoul 04066, Republic of Korea
J. BAE: Dongduk Women's University, Department of Applied Chemistry, Seoul 02748, Republic of Korea;
Tel: T. Earmme: +82-2-320-3061; J. BAE: +82-2-940-4506
e-mail: T. Earmme: earmme@hongik.ac.kr; J. BAE: redsox7@dongduk.ac.kr

pISSN: 1225-0112 eISSN: 2288-4505 © 2023 The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. All rights reserved.

현재 자원의 재활용에 대한 관심이 나날이 증가함에 따라, 일상생활에서 쉽게 많이 얻어지고, 독성이 낮으며, 재활용이 가능한 식품 부산물에 대한 관심이 쏠리고 있다. 특히, 기호 식품에 대한 선호와 소비가 늘어남에 따라 현대 사회에서 국내외적으로 커피 소비가 가파르게 증가하고 있다. 이에, 대량으로 생성되는 커피 찌꺼기(coffee grounds)를 효과적으로 재활용하는 측면에 관심이 증대하고 있다. 커피 찌꺼기는

구운 커피빈(coffee bean)을 갈아서 분말 형태로 만든 후 커피 성분을 추출하고 남은 물질이다. 이것은 식물유래 물질들과 유사하게 ligno-cellulose를 주성분으로 갖고 있다[1]. 즉, 커피 찌꺼기는 약 10~20%의 셀룰로즈(cellulose), 30%의 리그닌(lignin), 약 30~40% 정도의 연결 성분인 hemicellulose, 및 약 10~20% 정도의 기타 성분으로 구성되어 있다[2]. 성분에서 알 수 있듯이 커피 찌꺼기는 셀룰로즈와 리그닌의 특성을 드러낼 것으로 예상할 수 있다. 따라서, 유기물 분자, 염료, 금속 이온 등에 대한 흡착 성능을 어느 정도 보유하고 있을 것으로 판단된다[3]. 한편, 커피 찌꺼기에는 약간의 유지(oil) 성분과 유기물(향기 물질 등)을 포함하고 있다[4].

이러한 특성을 지니는 커피 찌꺼기를 그대로 활용하는 것도 의미가 있으나, 유지나 유기 분자와 같은 저분자 물질을 제거하며 탄화를 통해 구조적으로 안정화된 상태의 탄소 물질을 얻을 수 있다면 더욱 활용 가치가 높아질 것으로 기대할 수 있다. Cellulose의 경우 탄화에 비교적 약한 특성을 가지고 있으나, 이를 lignin과 hemicellulose가 상당 부분 완화해 줄 것으로 예상할 수 있다[5]. 특히, 탄화 과정에서 cellulose는 분해되는 경향이 있으나 lignin이 구조를 지탱할 수 있다면 오히려 다공성 구조를 형성하기에 유리할 가능성도 추측할 수 있다[6]. 한편, 리그닌은 풍부한 유기 관능기를 포함하고 있으므로, 이러한 특성이 탄화 후에도 보존된다면 커피 찌꺼기 탄화를 통해 다공성과 극성 표면을 지니는 매우 흥미로운 탄소 소재가 생성될 것으로 판단된다[7]. 최근까지 커피찌꺼기는 다음과 같은 연구에서 주로 활용되어 왔다. 먼저, 당분과 유지 성분을 추출하여 바이오연료로 사용할 수 있다. 풍부하게 함유된 폴리페놀이나 항산화 기능 성분 및 물질은 식용으로 주로 활용되어 왔다[8]. 한편, 다른 물질과의 혼합으로 복합체를 형성하거나 시너지 효과를 일으키기 위해서도 이용될 수 있다[9].

본 연구에서는 커피 찌꺼기의 cellulose 성분은 탄화를 통해 제거하는 것을 추구하고, 리그닌 성분은 표면 관능기를 유지하면서 탄소 구조의 뼈대를 형성할 것으로 기대하여 상대적으로 저온(약 섭씨 600도) 탄화 공정을 도입하여 탄화 생성물을 얻고자 시도하였다. 얻어진 탄소 소재의 구조 및 형태적 특성은 주사전자현미경을 통해 탄화 전후 상태를 비교 관찰함으로써 확인하였다. 간단한 전기측정을 통해 얻어진 탄소 재료가 옴(Ohm)의 법칙을 만족함을 알 수 있었고, 이를 통해 탄소 소재가 전기를 통할 수 있음을 확인하였다. 얻어진 소재의 다공성 특성을 활용하기 위해 해당 소재를 리튬 전지의 음극 활물질로 사용할 수 있는지 가능성을 반쪽 전지 충방전 실험으로 탐색해 보았다[10-12]. 나아가, 얻어진 탄소 소재로 분자에 대한 흡착 실험을 수행한 결과, 양전하 특성을 갖는 분자에 대한 흡착이 상대적으로 우수함을 확인할 수 있었다. 또한, 생성된 탄소 소재의 표면을 표면 개질제로 처리한 후 흡착 실험을 수행하였을 때, 음전하 특성을 갖는 분자를 흡착함을 알 수 있었다. 이를 통해, 표면 개질이 흡착 성능을 조절할 수 있는 방법론이 될 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 식물계 부산물의 재활용에 관한 향후 연구에 중요한 정보를 제공할 것이다.

2. 실험

2.1. 재료

커피 찌꺼기는 시중에서 구매할 수 있는 커피 원두에서 얻어지는 것을 물로 세척한 후 사용하였다. 탄화 시 흑연화를 촉진하기 위해 사용된 철 촉매 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Iron(III) nonahydrate)와 표면 개질제로 사용된 실란 커플링제(silane coupling agent) 3-aminopropyl triethoxy silane (APTES)는 알드리치(Aldrich, Wisconsin, USA)에서 구매하여

추가 정제 없이 사용하였다. 염산, 초산 및 용매류는 삼전화학(서울, 대한민국)에서 구매하여 그대로 사용하였다.

2.2. 커피 찌꺼기 탄화 과정

일정량(5 g)의 건조한 커피찌꺼기를 질소 분위기 하에서 아래 공정을 통해 탄화하였다. 먼저, 상온에서 300 °C까지는 분당 3 °C로 승온하였고, 이후 600 °C까지는 분당 10 °C로 승온하였다.

2.3. 커피 찌꺼기 촉매 처리 및 추가 탄화

탄화과정을 통해 얻어진 커피 찌꺼기 탄화물 일정량(1 g)을 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 가 녹아있는 수용액(6 mM)에 담겨 24 시간 동안 교반하며 쉰다[6]. 이후, 물을 제거한 후 섭씨 70도 오븐에서 24시간 동안 건조하였다. 탄화물의 흑연화를 촉진하기 위해 촉매 처리된 커피 찌꺼기 탄화 생성물을 추가로 탄화하였다. 이 때, 위에서 제시된 탄화 과정과 동일한 방식을 사용하였으며, 최고 온도를 섭씨 800도로 설정하였다. 잔류 촉매 성분을 제거하기 위해 염산(10 M)으로 처리한 후 세척하였다.

2.4. 탄화 생성물의 표면 처리

초산으로 pH 4로 맞춘 에탄올/증류수(4:1) 용액에 APTES (커피탄화물 무게에 대하여 2.5 wt%의 농도)를 첨가하여 1시간 동안 상온 교반하였다. 커피탄화물을 위 용액에 넣어 2시간 동안 상온 교반하였다. 반응이 끝난 후 pH 7이 되도록 증류수로 여러 번 세척 후, 110 °C 오븐에서 3시간 동안 최종 건조하여 생성물을 얻었다.

2.5. 분석 및 측정

생성물의 구조 및 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. 전기적 측정은 Keithley 2612 B (Tektronix, USA) 소스미터(source meter)와 MST 4000A probe-station (MSTECH, Republic of Korea)으로 측정하였다. 전기 테스트는 아래와 같이 수행되었다. 커피 찌꺼기 탄화물(80 wt%), 바인더(binder) polyvinylidene fluoride (PVDF, 10 wt%), 그리고 carbon black (10 wt%)를 용매인 *N*-methylpyrrolidone 안에서 섞어 활물질 paste를 제조하였다. 이 paste는 9 μm 두께를 갖는 구리 포일(Cu foil) 위에 코팅되었고, 섭씨 100도 진공 오븐에서 8시간 동안 건조되었다. 반쪽 전지 테스트를 위해, 이 전극물질은 직경 14 mm 원형으로 압축되었다. 이후 전극 물질은 동전형 셀(coin-type cell, CR2032)로 조립되었다. 이 때, 리튬 금속 상대 전극, polypropylene (PP) separator, 및 전해질이 함께 사용되었다. (1 M LiPF_6 in EC/DEC 1:1 volume ratio, Sigma Aldrich, USA). 전기 화학적 측정은 전압 0.005~2 V (vs. Li/Li^+) 범위에서 0.1 C rate로 진행되었다. 흡착 측정을 위한 자외선/가시광선 분광 스펙트럼은 Shimadzu UV/Visible 1200 분광기를 통해 얻어졌다. 흡착 대상 염료 분자(1 mM)를 에탄올에 섞어 자외선 측정용 시료 용액을 제조하였다. 이후, 일정량(0.1 g)의 흡착제(탄화된 커피 찌꺼기)를 위의 용액에 넣고 약하게 교반하였다(300 rpm). 흡착 성능은 1~4시간 동안 관찰되었고, 일정시간마다 위의 용액에서 일정량의 용액을 자외선 분광기로 분석하였다.

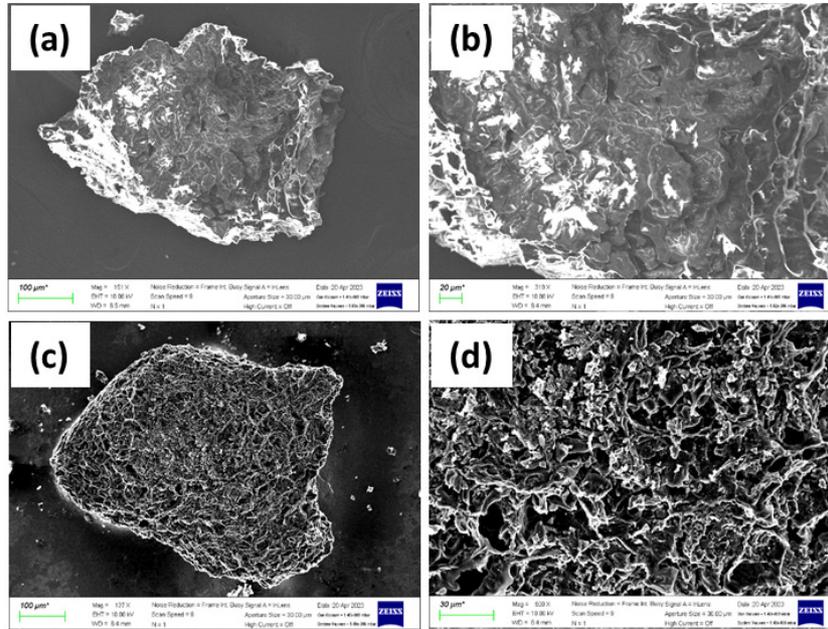


Figure 1. SEM image of coffee grounds obtained before (a, b) and after (c, d) carbonization process.

3. 결과 및 고찰

이전에 언급한 대로, 본 연구에서는 커피 찌꺼기 탄화 후 기공성을 살리고 표면 관능기를 유지하기 위해 상대적으로 저온 탄화 공정을 활용하였다. Figure 1은 탄화 전후에 얻은 커피 찌꺼기의 주사전자현미경 사진들이다. 탄화 전 커피 찌꺼기는 셀룰로스의 함량이 높은 특성으로 인해 선형으로 뻗은 구조가 나타나고 있으며, 리그닌의 판상 구조도 선형 구조 사이에서 다수 발견되고 있다(Figure 1a & 1b). 이를 제외한 구조적 특이성은 찾아보기 어렵다. 다만, 셀룰로스와 리그닌이 중간 매개체인 헤미셀룰로스에 의해 지지되어 있으므로 monolith형이 유지될 수 있는 것으로 판단된다. 탄화 과정동안 열에 비교적 약한 셀룰로스는 분해될 것으로 예상되며, 리그닌은 상대적으로 열에 강하므로 구조가 유지될 수 있을 것이다. 따라서, 탄화 후에는 셀룰로스는 제거되고 리그닌 뼈대는 유지되는 다공성 격벽 구조라 나타날 것으로 추론할 수 있으며, 전자현미경 사진에서 보듯이 이러한 경향이 드러나고 있음을 확인할 수 있었다(Figure 1c & 1d). 다만, 확대된 사진에서 볼 수 있듯이 구조적 규칙성은 상당히 약한 것으로 드러났다. 이러한 형태적 특징으로 유추해 볼 때 고온 탄화는 생성물의 물성에 긍정적인 요소로 작용하기는 어렵다는 점을 예상할 수 있다. 나아가, 탄화 생성물의 미세 구조 규칙성도 상당히 낮을 것으로 예측할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 촉매 도입을 통해서 미세 구조적 규칙성, 즉 결정성을 향상시키고자 시도하였고 이를 위해 철 계통 촉매인 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 를 도입하였고, 촉매 처리 후 추가 탄화를 실시하였다.

Figure 2는 커피 찌꺼기의 탄화 생성물과 이에 촉매 처리를 실시한 후 추가 탄화하여 얻어진 탄소 소재의 라만 스펙트럼을 나타낸다. 먼저, 탄화된 커피 찌꺼기의 D/G ratio는 0.64로 나타났다. 이는 다양한 식물 부산물에서 얻어지는 탄화 생성물의 값에 비하여 상당히 낮은 값이다. 즉, 이 값이 낮을수록 무정형 비결정성 탄소의 함량이 낮다는 것을 의미하는데, 해당 탄화 생성물은 불규칙성 구조를 지니는 탄소 domain의 비율이 낮고, 결정성 또는 규칙성을 지니는 탄소 domain의 비율이 높다는 것을 의미한다. 이 값은 탄소 전구체의 종류에 의존하는 것으로

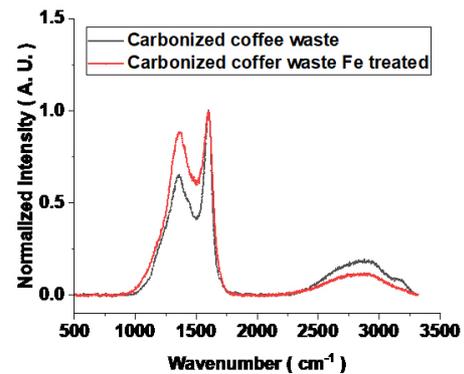


Figure 2. Raman spectra of carbonized coffee grounds and catalyst treated product.

볼 수 있는데, 커피 찌꺼기는 다른 부산물에 비해서는 우수한 전구체로 볼 수 있다. 위의 전자현미경 사진에서는 비교적 구조적 규칙성이 약한 것으로 나타났으나, 실제 미세구조는 상당히 규칙적으로 형성되어 있음을 의미한다. 철 계통 촉매를 도입한 후 추가 탄화된 생성물의 경우 예상과는 달리 D/G ratio가 0.88로 증가하였는데, 이는 결정성 탄소의 비율이 낮아졌음을 의미한다. 구조 규칙성은 전구체 리그노셀룰로스의 조성비 및 특성에 따라 의존한다고 판단하였다. 유사 사례를 비교해 보면 대나무를 이용한 탄화 실험에서 철 촉매를 도입하여 흑연화 공정을 진행하여 흑연화도를 높인 사례가 있었는데, 이 때에는 상대적으로 고온(1000 °C)에서 탄화를 진행하였다[6]. 만약, 커피 찌꺼기 탄화를 600 °C보다 높은 곳에서 수행한다면 흑연화도 향상 효과를 볼 가능성도 있다.

이어서 커피 찌꺼기 탄화 생성물의 전기적 특성에 대하여 고찰해 보았다. 리그닌의 탄화 생성물은 전기전도도를 지닐 수 있음을 이전 연구에서 확인하였다[13]. 따라서, 해당 탄화물도 역시 전기전도도를 나타낼 것으로 예측되었다. 이는 간단한 $I-V$ relation으로 확인할 수 있

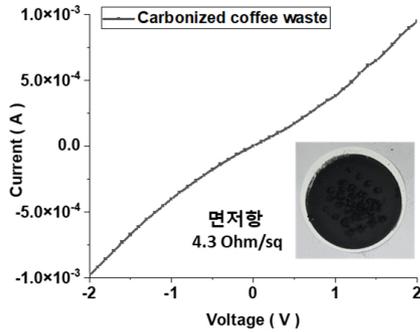


Figure 3. I-V relation obtained with carbonized coffee grounds. Inset is the digital image of carbonized coffee ground showing sheet resistance.

는데, Figure 3에 보이는 것과 같이 전압이 인가될 때 전류가 선형으로 증가하는 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 이는 탄화 생성물이 일정 수준의 저항을 지니고 전류가 흐를 수 있음을 보여준다. 탄화 생성물이 가루 형태로 얻어지므로 이를 수집하여 필름 형태로 제조한 후 면저항을 측정하였을 때 충분히 낮은 면저항이 얻어짐을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 탄화 생성물이 전하 저장 및 전기화학적 기능을 할 수 있을 것으로 판단하였다.

Figure 4는 탄화 생성물을 리튬 2차 전지 음극으로 도입하여 반쪽 전지 충방전 테스트한 결과를 나타내고 있다. 가용 전압 범위(0~1.5 V)에서 비교적 안정적인 충방전 profile을 보여주고 있으며, 갑작스런 곡선 변화 양상은 눈에 띄지 않는다. 첫 번째와 두 번째 충전 profile에서는 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 용량 값의 차이도 크지 않다. 반대로, 첫 번째와 두 번째 방전 profile은 상당한 차이를 나타내고 있으며 용량 값의 차이도 상당하다. 탄화 생성물의 미세 구조 규칙성이 상대적으로 약하므로 충방전이 진행될수록 용량의 현저한 감소를 나타내는 것으로 추론할 수 있다. 특히, 첫 번째 사이클의 쿨롱 효율(coulombic efficiency)이 개략적으로 50% 이하로 볼 수 있는데, 이는 탄화 생성물 자체의 구조적 규칙성 결여 그리고 전구체의 구조가 일정하지 않으므로 나타나는 현상으로 추론된다. 이 현상은 실제 응용을 위해서는 극복되어야 할 요소이며, 향후 연구에서 다루어질 수 있는 주제이다.

한편, 전통적으로 목질 부산물은 특정 분자 및 이온에 대한 흡착 성능이 우수하다고 알려져 있다. 따라서, 커피 찌꺼기 탄화 생성물의 분자에 대한 흡착 특성을 살펴보기 위해 UV/Vis 분광 측정 실험을 실시하였다. Figure 5에서 시간에 따라 탄화 생성물이 염료 분자인 methylene blue 분자를 흡착함에 따라 염료 분자에 의한 파장 650 nm 근처 전자파 흡수량이 감소함을 알 수 있다. 탄화 과정에서 언급하였듯이 본 연구에서는 저온 탄화 공정을 선택하였으므로 탄화 생성물의 표면은 리그닌의 관능기가 일부 잔류하고 있을 것으로 예상된다. 흡착 대상 분자인 methylene blue는 부분적으로 양의 전하를 갖는 분자이므로 탄화 생성물의 표면은 상대적으로 음의 전하를 띠 가능성이 높음을 의미한다. 흡착은 수 시간에 걸쳐 점진적으로 진행됨을 확인할 수 있다.

커피 찌꺼기 탄화 생성물의 표면을 간단한 방법으로 개질하여 다른 전하 특성을 갖는 분자를 흡착할 수 있는지 판단하고자 추가적인 실험을 진행하였다. 우선, 탄화 생성물의 표면을 상대적으로 양전하를 갖는 표면 개질용 silane coupling agent인 APTES으로 처리하였다. 해당 물질을 간편하게 수용액에 담그는 것으로 표면의 변화를 이끌어낼 수 있는 효과적인 방법이다. 표면 개질제 중에서 실란의 경우 넓은 범

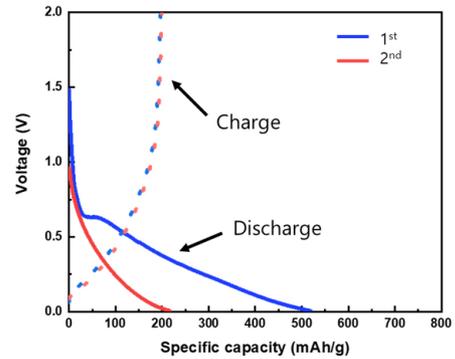


Figure 4. Voltage profiles of carbonized coffee grounds measured at 0.1 C rate between 0.05 and 2.0 V in coin-type half-cell.

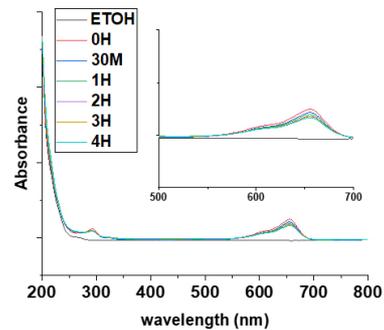


Figure 5. UV/Vis spectra obtained during adsorption test for methylene blue dye molecules in ethanol by carbonized coffee grounds as a function of adsorption time.

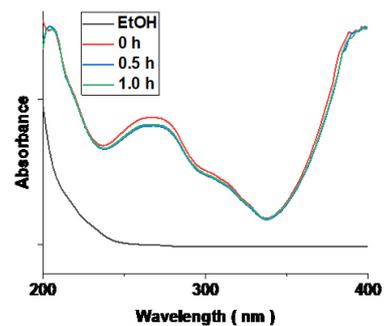


Figure 6. UV/Vis spectra obtained during adsorption test for methyl orange dye molecules in ethanol by surface modified carbonized coffee grounds as a function of adsorption time.

위의 특성을 갖는 다양한 표면에 사용될 수 있으며, 특히 표면 접착력과 침투력이 매우 우수한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 사용된 aminopropylsilane은 탄소 표면에 대해서도 높은 효율을 나타내는 것으로 알려져 있다[14]. 특히 carbon fiber에도 표면 처리 효과가 우수하다고 알려져 있는데, 약간의 관능기가 남아 있는 탄화 리그닌 표면에서도 동일하게 작동할 것으로 판단된다. 이러한 처리 후, 상대적으로 음의 전하 특성을 갖는 염료 분자인 methyl orange에 대한 흡착 테스트를 유사한 방식으로 실시하였다. Figure 6은 시간에 따라 methyl orange 흡수 영역인 270 nm 영역의 흡수도가 낮아지고 있음을 보여준다. 이는 개질된 표면에 methyl orange 분자가 흡착되는 것으로 이해할 수 있다. 특히, 1시간의 흡착으로도 흡착이 상당히 진행되는 것을

확인할 수 있었는데, 이는 표면 개질로 인해 흡착 속도가 향상되어 빠르게 진행된다는 사실도 추론할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는, 일상생활에서 대량으로 산출되는 커피 찌꺼기를 탄화하여 전기화학적 성질이 우수하고 흡착 성능을 보유한 탄화 생성물을 수득하였다. 해당 탄소 소재의 경우 저온 탄화 공정의 도움으로 셀룰로스 성분이 분해되면서 다공성 구조가 발현되었고, 리그닌 성분의 탄화 시 표면 관능기가 잔류함을 확인하였다. 해당 소재의 구조적, 형태적 특징은 비교적 규칙도는 낮은 다공성 구조이며, 전기화학적으로 활용 가능성을 지닐 수준의 전기 저항을 보유하고 있다. 특히, 리튬이온 이차 전지의 음극 소재로 테스트한 결과 충방전에 따른 용량 감소 현상이 나타났으나 향후 개선에 의한 활용 가능성을 확인하였다. 얻어진 탄소 소재의 특성으로 인해 물질 흡착이 가능함을 실험적으로 보여주었고, 특히 표면 개질을 통해 상이한 전하적 특성을 갖는 분자를 선택적으로 흡착할 수 있음을 추가적으로 확인하였다. 이 연구는 최근 활발해지고 있는 부산물 이용 분야의 향후 관련 연구에 중요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

감 사

이 연구는 한국연구재단(NRF-2021R1F1A1061939)과 과학기술정보통신부(RS-2022-00154546)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. C. Wongsiridetchai, W. Chiangkham, N. Khlahiran, T. Sawangwan, P. Wongwathanarat, T. Charoenrat, and S. Chantorn, Alkaline pretreatment of spent coffee grounds for oligosaccharides production by mannanase from *Bacillus* sp. GA2(1), *Agric. Nat. Resour.*, **52**, 222-227 (2018).
2. S. Tajik, P. Ziarati, and L. Cruz-Rodriguez, Coffee waste as novel bio-adsorbent: Detoxification of nickel from contaminated soil and *Coriandrum Sativum*, *Methods*, **38**, 2693-2504 (2020).
3. J. McNutt and Q. (Sophia) He, Spent coffee grounds: A review on current utilization, *J. Ind. Eng. Chem.*, **71**, 78-88 (2019).
4. V. K. Thakur, M. K. Thakur, P. Raghavan, and M. R. Kessler, Progress in green polymer composites from lignin for multifunctional applications: A review, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2**, 1072-1092 (2014).
5. F. Taleb, M. Ammar, and M. Mosbah, Chemical modification of lignin derived from spent coffee grounds for methylene blue adsorption, *Sci. Rep.*, **10**, 11048 (2020).
6. J. Y. Jeong, D. J. Lee, J. Heo, D. H. Lim, Y. G. Seo, J. H. Ahn, and C. H. Choi, Development of biomass-driven anode material for lithium-ion battery, *Clean Technol.*, **26**, 131-136 (2020).
7. M.-J. Kim, J. H. Choi, T. R. Choi, S. S. Choi, J. H. Ha, and Y.-S. Lee, Enhancement of manganese removal ability from water phase using biochar of *Prinus densiflora* bark, *Appl. Chem. Eng.*, **31**, 526-531 (2020).

8. Y.-J. Shin, D.-Y. Song, E.-J. Lee, and J.-W. Lee, Characteristics of biochar derived from lignocellulosic biomass and effect of adsorption of methylene blue, *Appl. Chem. Eng.*, **34**, 153-160 (2023).
9. H.-J. Choi, Applicability of composite beads, spent coffee grounds/chitosan, for the adsorptive removal of Pb(II) from aqueous solutions, *Appl. Chem. Eng.*, **30**, 536-545 (2019).
10. T. Sangprasert, V. Sattayarat, C. Rajruthong, P. Khanchaitit, P. Khemthong, C. Chanthad, and N. Grisdanurak, Making use of the inherent nitrogen content of spent coffee grounds to create nanostructured activated carbon for supercapacitor and lithium-ion battery applications, *Diam. Relat. Mater.*, **127**, 109164 (2022).
11. Q. Xie, S. Qu, Y. Zhang, and P. Zhao, Nitrogen-enriched graphene-like carbon architecture with tunable porosity derived from coffee ground as high performance anodes for lithium ion batteries, *Appl. Surf. Sci.*, **537**, 148092 (2021).
12. Y. J. Hwang, S. K. Jeong, K. S. Nahm, J. S. Shin, and A. M. Stephan, Pyrolytic carbon derived from coffee shells as anode materials for lithium batteries, *J. Phys. Chem. Solids*, **68**, 182-188 (2007).
13. 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).
14. Z. Wen, C. Xu, X. Qian, Y. Zhang, X. Wang, S. Song, M. Dai, and C. Zhang, A two-step carbon fiber surface treatment and its effect on the interfacial properties of CF/EP composites: The electrochemical oxidation followed by grafting of silane coupling agent, *Appl. Surf. Sci.*, **486**, 546-554 (2019).

Authors

- Jin Ju Yoo; Undergraduate Student, Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea; 20200894@dongduk.ac.kr
- Nayeon Ko; Undergraduate Student, Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea; 20190873@dongduk.ac.kr
- Su Hyun Oh; Undergraduate Student, Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea; 20190889@dongduk.ac.kr
- Mijung Kim; Ph.D., Lecturer, Major of Health and Beauty, Graduate School of Public Health, Changwon University, Changwon-si 51140, Republic of Korea; pinkpeacherb@naver.com
- Jeongyeon Oh; Graduate Student, Department of Chemical Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Republic of Korea
- Jaeun Lee; Assistant Professor, Department of Beauty Cosmetics, Osan University, Osan-si 18119, Republic of Korea; dhwjddsd@naver.com
- Taeshik Earmme; Ph.D., Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Hongik University, Seoul 04066, Republic of Korea; earmme@hongik.ac.kr
- Joonwon Bae; Ph.D., Associate Professor, Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748 Republic of Korea; redsox7@dongduk.ac.kr, joonwonbae@gmail.com