

코코넛 껍질-전도성 고분자 복합소재로부터 탄소 소재의 제조 및 전기화학적 특성 분석

박정은 · 신수빈 · 윤예원* · 박지원 · 배준원[†]

동덕여자대학교 응용화학과, *동덕여자대학교 화장품학전공
(2023년 12월 16일 접수, 2024년 1월 12일 수정, 2024년 1월 15일 채택)

Preparation of Hybrid Carbon from Conducting Polymer-Coconut Shell Composites and Their Electrochemical Properties

Jeongeun Park, Subin Shin, Yewon Yoon*, Jiwon Park and Joonwon Bae[†]

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

*Department of Cosmetic Science, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea

(Received December 16, 2023; Revised January 12, 2024; Accepted January 15, 2024)

초 록

열대성 과일로 널리 재배되고 있는 코코넛(coconut)의 독특한 껍질(shell)은 과육 섭취 후 얻어지는 부산물로 활용 가치가 클 것으로 기대된다. 이 코코넛 껍질을 전도성 고분자와 혼합하여 복합소재를 간단한 방식으로 제조하고 섭씨 600도 정도의 상대적 저온에서 탄화하여 수득되는 소재의 전기화학적 특성 및 활용 가능성을 고찰하였다. 먼저, 외형적 요소를 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)으로 관찰하였다. 탄소의 미세구조를 라만(Raman) 분광 분석을 통하여 추론하였다. 전기전도 가능성을 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, 최대 충전 용량은 약 750 mAh로 높게 나타났으나, 충전이 진행됨에 따라 빠른 감소를 보였다. 본 연구는 향후 목질계 폐기물의 활용에 대한 중요한 정보를 제공할 것이다.

Abstract

The coconut shell, a by-product of popular tropical fruit, is a promising material due to its interesting properties. The preparation of the composite consisted of conducting polymer and coconut shell using a simple wet method, and subsequent carbonization produced a carbonized material under a controlled carbonization cycle. In addition, its electrochemical performance as an anode in lithium-ion batteries was also investigated. The appearance of the obtained materials was observed with a scanning electron microscope. The internal structure of the carbon derived from the coconut shell under a controlled heating profile was analyzed using a Raman spectroscopy. A simple electrical measurement based on the ohmic relationship showed that the carbonized product has a significant electrical conductivity. The application of the carbonized product as anode in a lithium-ion battery was tested using half-cell charge/discharge experiments. This article provides important information for future research regarding the recycling of fruit shells and food waste.

Keywords: Coconut shell, Conducting polymer, Carbonization, Lithium battery anode, Composite

1. 서 론

지구 온난화의 영향으로 기후 위기가 점점 다가옴에 따라 지속가능한 에너지원에 관한 관심이 커지고 있다. 특히, 자연계에 다양하게 존재하는 저독성 산물을 이용하고 버려지는 부산물을 활용하여 에너지를 확보할 수 있다면 매우 긍정적인 효과를 가져올 수 있다. 대규모로

사용하는 저독성 산물 중에서 과일의 껍질은 목질의 공통 성분인 셀룰로스(cellulose)와 리그닌(lignin) 등을 함유하고 있으며, 이 물질들 중 리그닌은 탄화를 통해서도 효율적인 소재로 전환이 가능하다[1]. 과일 중에서는 넓은 지역에서 재배되며 딱딱한 껍질을 가지고 있는 코코넛이 관심을 끌고 있다. 코코넛은 90개국 이상에서 널리 재배되고 있는 열매이며, 동시에 코코넛 껍질은 매우 흔한 바이오매스다[2]. 한편, 매년 2.5억 톤의 코코넛 껍질이 버려지고 있다. 이 코코넛 껍질을 기능성 원료로 사용하면 환경에 이로울 뿐만 아니라 경제적으로도 이득이다. 환경적, 경제적 특성을 제외하더라도 코코넛 껍질은 그 자체로 훌륭한 원재료이다. 코코넛 껍질은 셀룰로스(cellulose, 약 25~30%),

[†] 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

리그닌(lignin, 약30%), 헤미셀룰로스 또는 펜토스(hemicellulose or pentose, 약 25~30%) 및 수분 등으로 이루어져 있으며, 코코넛 껍질은 재(ash) 함량이 적고 H/C, O/C 비율이 낮다[3]. 또 풍부한 표면 결합과 기공을 가지고 있다. 풍부한 결합은 코코넛 껍질이 탄화되면 하드 카본의 결합 탄소 특성을 극대화할 수 있는 원재료임을 의미한다[4].

한편, 다양한 신재생에너지 중 전기화학적 에너지 저장/변환 장치가 가장 돋보인다. 전기화학 셀에는 배터리, 연료전지, 태양전지 등이 존재하는데, 이 중 이차 전지의 강세가 지속되고 있으며, 가장 눈에 띄는 전지는 단연 리튬 이온 배터리이다. 리튬 이온 배터리는 에너지 밀도가 높고, 주기 수명이 길며, 자기 방전율이 낮기 때문이다. 이러한 장점을 바탕으로 리튬 배터리의 성능이 개선되고 있으며, 개별 요소 소재들도 급속하게 발전하고 있다. 특히 본 연구에서 관심이 있는 음극재를 중심으로 살펴본다면 그래파이트는 리튬 이온 배터리에 통상적으로 사용되는 음극재이다. 다만, 가격이 싸지 않고 생산 과정에서 환경 오염도 발생하므로 그래파이트 대신 하드 카본을 음극재에 사용하는 연구도 현재 활발히 진행 중이다[5].

하드 카본은 소프트 카본과 달리 높은 온도로 가열시켜도 균일한 그래파이트가 되기 어려운 탄소 재료를 말한다[6]. 하드 카본은 주로 바이오매스나 유기물을 열분해해서 얻는데, 전구체가 산소를 많이 품고 있으며 불규칙한 구조이기 때문에 고온에서도 그래파이트가 될 수 없다[7]. 바이오매스에 기반한 하드 카본은 가격이 낮다는 장점이 있는데, 이는 원재료인 바이오매스가 저렴하기 때문이다. 버려지는 바이오매스를 재활용하는 것이기 때문에 환경친화적이라는 장점 또한 갖는다[8]. 하드 카본은 주로 소듐 이온 배터리의 음극재로 쓰인다[7]. 소듐이 그래파이트와 낮은 반응성을 가져서 소듐 이온 배터리의 음극재로 그래파이트를 쓸 수 없기 때문이다[7]. 리튬은 그래파이트 층 사이로 들어가는 것보다 결합이나 헤테로 아톰과 같은 active site에 더 쉽게 흡착하기 때문에 리튬 이온 배터리의 음극재로서도 하드 카본은 유망할 것이라 기대된다[9]. 결합이 많은 하드 카본을 음극재로 사용하면 빠르게 충전할 수 있는 전지를 만들 수 있을 것으로 예상된다[6].

따라서 본 연구에서는 코코넛 껍질을 출발 물질로 하여 전도성 고분자와 복합소재를 형성하고, 이를 비교적 저온인 섭씨 600도에서 탄화를 진행하여 하드 카본 소재를 생산하고 이를 리튬이온 배터리 음극재로 활용할 수 있는지에 대해서 고찰한다. 코코넛 껍질을 탄화하여 활성 탄소를 얻고 이를 이용하는 연구는 종종 보고되어 왔다[10-11]. 코코넛 껍질은 N, O 등의 이종원자가 적절히 존재하여 리튬 이온 흡착에 있어 활성 위치를 제공하며, 기공이 포함되어 전기화학적 활성이 우수할 것으로 기대된다[3]. 도입된 전도성 고분자인 폴리피롤은 화학적으로 안정하고 탄화 이후에도 전기전도도가 유지되어 충분한 전기화학적 경로를 제공할 수 있다. 나아가, 안정적인 전극 작동에 유리한 점이 많아 다양하게 활용되고 있다. 코코넛 껍질로부터 얻어진 탄소는 흑연에 비해 고분자와의 상호작용에도 적합할 것으로 예상된다. 얻어진 탄소 소재는 주사전자현미경과 라만 분광기를 통해 성질을 분석하였고, 표면 활성 증강을 위해 염기로 처리하였다. 반쪽 전지 반응을 통해서 리튬 이온 배터리 음극재로서의 가능성을 모색해 보았다. 본 연구는 과일 부산물의 재활용에 관한 향후 다양한 연구에 중요한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험

2.1. 재료

코코넛 껍질은 시중에서 구매하여 물과 에틸 알코올로 세척하고 건

조한 후 그라인더로 갈아서 사용하였다. 피롤(pyrrole) 단량체와 개시제 염화철(FeCl₃, iron(III) chloride)는 알드리치(Aldrich, Wisconsin, USA)에서 구매하여 추가 정제 없이 사용하였다. 염기인 수산화칼륨(potassium hydroxide, KOH)와 용매인 에틸 알코올(ethyl alcohol)은 삼전화학(서울, 대한민국)에서 구매하여 그대로 사용하였다.

2.2. 폴리피롤-코코넛 껍질(PPy@coconut shell) 복합소재 제조

일정량의 코코넛 껍질 가루(1 g)을 증류수(100 mL)에 넣은 후 용액을 교반하면서 분산시킨다. 여기에 피롤 단량체(3 g)를 넣고 섞은 후 개시제인 염화철(4 g)을 넣고 교반시킨다. 반응은 약 1시간 정도 진행되고 얻어진 물질을 에틸 알코올로 3회 세척한 후 70 °C 오븐에서 24 시간 건조하여 복합소재를 얻었다.

2.3. 코코넛 껍질 및 폴리피롤-코코넛 껍질(PPy@coconut shell) 복합소재의 탄화

일정량(5 g)의 건조한 코코넛 껍질 또는 폴리피롤-코코넛 껍질(PPy@coconut shell) 복합소재를 질소 분위기 하에서 아래 공정을 통해 탄화하였다. 먼저, 상온에서 섭씨 300도까지는 분당 3 °C로 승온하였고, 이후 섭씨 600도까지는 분당 10 °C로 승온하였다[12].

2.4. 탄화된 코코넛 껍질 및 폴리피롤-코코넛 껍질(Carbonized PPy@coconut shell) 복합소재의 활성화

탄화과정을 통해 얻어진 폴리피롤-코코넛 껍질(PPy@coconut shell) 복합소재 일정량(1 g)을 KOH (4 g)가 녹아있는 수용액(50 mL)에 넣고 60 °C에서 2시간 교반한다. 이후 온도를 100 °C로 올려 추가로 15 시간 동안 두었다. 얻어진 생성물을 아스피레이터로 거른 후 에틸 알코올로 세척하고 건조하였다.

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. 전지 테스트는 충방전시스템(Wonatech, Seoul, Korea)을 이용하여 아래와 같이 수행되었다. 코코넛 껍질 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 15 μm 두께를 갖는 구리 포일(Cu foil) 위에 코팅되었고, 섭씨 120도 진공 오븐에서 2 시간 동안 건조되었다. 반쪽 전지 테스트를 위해, 이 전극물질은 직경 12 mm 원형으로 압축되었다. 이후 전극 물질은 동전형 셀(coin-type cell, CR2016)로 조립되었다. 이 때, 리튬 금속 상대 전극, polytetrafluoroethylene (PTFE) separator, 및 전해질이 함께 사용되었다(1.3 M LiPF₆ in EC/DEC 3:7 volume ratio, Cheil Industries Inc., Korea). 전기화학적 측정은 전압 0~1.5 V (vs. Li/Li⁺) 범위에서 0.1 C rate로 진행되었다.

3. 결과 및 고찰

코코넛 껍질은 셀룰로스나 리그닌을 포함하고 있으므로 탄화가 가능한 전구체의 일종이다. 코코넛 껍질의 표면에는 다양한 극성 관능

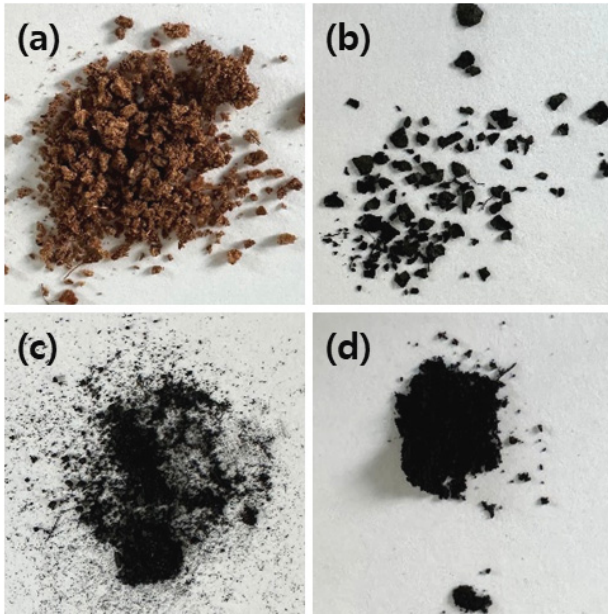


Figure 1. Digital images of materials (a) coconut shell, (b) carbonized coconut shell, carbonized PPy@coconut shell (c) before and (d) after KOH activation.

기가 존재하므로 입자 상태에서는 다소간의 응집 현상을 보여주고 있다(Figure 1a). 이를 탄화하면 리그닌의 영향으로 탄소 재료가 생성되고 이 때 상당한 수준의 부피 및 질량 감소가 일어난다(Figure 1b). 한편, 코코넛 껍질에 존재하는 수소 및 산소의 수는 상대적으로 적으나, 셀룰로스의 하이드록실(hydroxyl) 그룹과 리그닌의 페놀(phenol)계 극성 관능기가 상당량 존재하고 있다. 따라서, 약하게 극성인 피롤 단량체와의 상호작용이 가능하고 전도성 고분자인 폴리피롤이 도입되었을 때 복합소재를 구성할 수 있다[13]. 얻어진 폴리피롤-코코넛 껍질 (PPy@coconut shell) 복합소재를 탄화한 소재에서도 입자형 외형을 나타내고 있다(Figure 1c). 코코넛 껍질 분말과 유사하게 약간 응집된 형태를 보여주고 있다. 탄화된 폴리피롤-코코넛 껍질 소재를 염기로 활성화하였을 때 탄화물의 형태는 활성화 이전과 비교하여 두드러지게 변화하지는 않는다. 다만, 극성 관능기의 밀도가 다소 증가하여 응집체 형성이 촉진되는 것을 추론할 수 있다(Figure 1d).

코코넛 껍질과 PPy@coconut shell 복합재료의 탄화 전후 미세 형태를 관찰하기 위해 주사전자현미경 분석법을 이용하였다(Figure 2). 주사전자현미경을 사진을 관찰해 보면, 코코넛 껍질의 경우 성분으로 포함되어 있는 셀룰로스의 강한 수소결합에 의한 선형 적층 구조가 반영된 형태적 특성이 드러나고 있다. 이러한 적층 구조를 바탕으로 리그닌 및 기타 성분에 의한 무정형 구조가 섞여 있는 특징을 고찰할 수 있다(Figure 2a). 탄화 과정을 거치게 되면 셀룰로스, 헤미셀룰로스 등 성분은 열분해가 되고, 리그닌 성분은 느슨한 탄소 구조로 남게 된다[14]. 코코넛 껍질은 셀룰로스 및 헤미셀룰로스로 거의 구성되어 있으므로 탄화를 거쳤을 때 조밀한 구조를 보여주기는 어렵다. 그리고 셀룰로스가 우세한 영역과 리그닌이 우세한 영역의 구분도 이루어지게 되는데, 이러한 요인으로 인해 Figure 2b의 왼쪽 영역과 오른쪽 영역의 텍스처(texture)가 상이하게 나타난다. 해당 그림에서 엠보싱 구조로 보이는 영역은 리그닌 우세 영역으로 판단할 수 있는데, 이러한 특징이 PPy@coconut shell의 탄화 전후에도 공통적으로 관찰되고 있다.

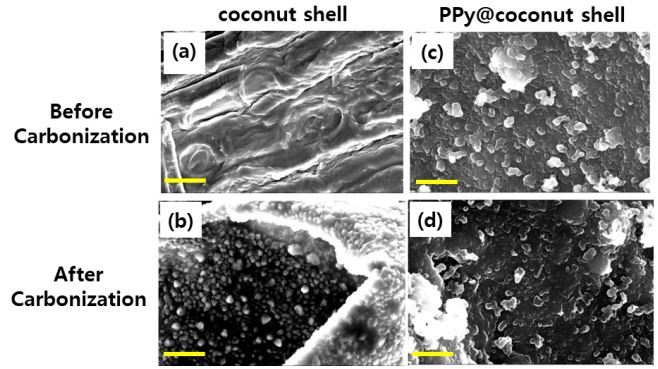


Figure 2. SEM images of coconut shell (a, b) and PPy@coconut shell (c, d) before and after carbonization (scale bar 1 μ m).

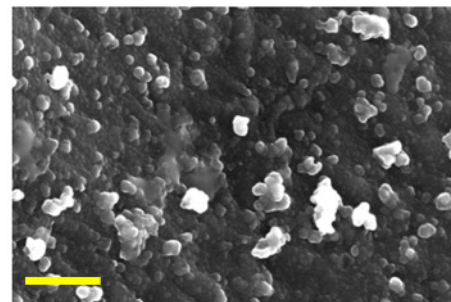


Figure 3. SEM image of carbonized PPy@coconut shell after KOH activation (scale bar 1 μ m).

한편, PPy@coconut shell 복합소재의 형태적 특성은 약간 상이하다. 코코넛 껍질 위에서 폴리피롤이 형성될 때 과립형으로 형성되는 사례가 많으므로 입자가 모여서 경계가 허물어진 형태로 나타나고 있다(Figure 2c). 일부 영역에서는 입자형 폴리피롤이 엉겨 국지적으로 커진 형태를 보이기도 하는데, 이 영역은 탄화가 되었을 때, 높은 전도도를 나타내는 영역으로 전환될 가능성이 있다. 폴리피롤의 중합은 빠른 시간에 전체적으로 급속하게 진행되므로 표면의 조도(roughness)가 비교적 작다. 탄화된 PPy@coconut shell의 형태는 다소 흥미롭다. 우선, 대체적인 PPy@coconut shell의 특성이 그대로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 코코넛 껍질의 리그닌 성분이 탄화가 되며, 동시에 폴리피롤도 탄화가 되어 구조적 특성이 유지됨을 의미한다(Figure 2d). 과립형 폴리피롤은 탄화 후에도 그 형태적 요소가 유지되고 있으며 표면의 조도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 코코넛 껍질의 탄화에서 발생하는 것과 같이 셀룰로스 및 헤미셀룰로스 성분이 분해되면서 공간이 형성되어 표면이 꺼진 것처럼 재배치된 것으로 추론할 수 있다.

탄화 소재의 전기화학적 특성을 개선하기 위해 다양한 방법론들을 고려해 볼 수 있는데, 그 중 용이한 방법은 염기에 의한 표면 활성화를 통해 표면적을 증가시키고 관능기를 강화하는 것이다. 이를 위해 본 연구에서는 KOH 활성화 처리를 시도하였고[15-17], 처리 전후 얻어진 전자현미경 사진을 통해 KOH 활성화 처리가 탄화된 PPy@coconut shell의 형태에 미치는 영향을 고찰하였다. Figure 3에서 보듯 표면활성화가 형태에 미치는 영향은 예상보다 크지 않다는 것을 확인할 수 있었다. KOH는 이온결합 물질로 활성화 과정에서 포타슘 이온과 하이드록시 이온이 작동하는데, 이온의 도입으로 인한 표면 구조 및 형태 변화를 전자현미경으로 관찰하기는 어렵다. 다만, 이온 도입으로

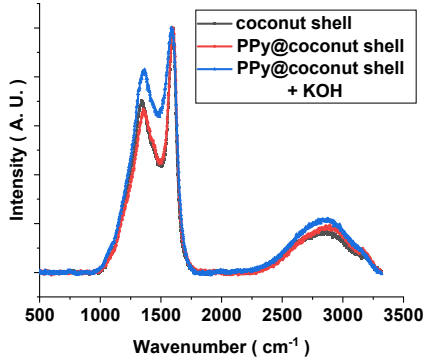


Figure 4. Raman spectra of carbonized (a) coconut shell (black) and PPy@coconut shell before (b) and after (c) KOH activation.

전하 이동 및 전기 전도에 미치는 영향은 두드러질 것으로 예상된다. 활성화 처리를 거친 탄화된 PPy@coconut shell의 형태는 Figure 2d가 보여주는 특성과 매우 유사하다.

탄화된 소재들의 미세 구조 특성은 라만 스펙트럼을 통해서 파악할 수 있다. Figure 4는 탄화된 코코넛 껍질, 활성화 전후의 PPy@coconut shell 재료들의 라만 스펙트럼을 보여주고 있다. 모든 재료들에서 graphitic (G)와 disordered (D) 탄소 구조를 나타내는 2개의 피크들이 나타나고 있다. 이 피크들이 나타나는 위치도 매우 인접하다. 이러한 스펙트럼 특성을 고려해 볼 때, 탄화된 물질들의 미세 구조도 주요한 공통점을 갖고 있는 것으로 판단할 수 있다. 다만, D/G 비율은 다소 차이가 난다. 코코넛 껍질 탄화물의 D/G 비율은 0.71, 폴리피롤이 도입된 PPy@coconut shell 탄화물의 비율은 0.66이다. 즉, 폴리피롤의 도입으로 탄화 후 형태적 규칙성이 다소 증가한 것으로 볼 수 있다. 반면, KOH 활성화를 시도하였을 때 탄화 생성물의 D/G 비율은 0.82로 증가하였는데, 이는 KOH 활성화를 하게 되면 표면의 결함을 증가시켜 표면적을 증가시킬 수는 있으나 구조적 결정성 혹은 규칙성을 증가시키지는 않는 것으로 판단할 수 있다. 따라서, 전기화학 테스트를 통해 KOH 활성화 효과를 파악할 수 있을 것으로 예측된다.

이어서 얻어진 탄화 생성물들의 전기적 특성에 대해 고찰하였다 (Figure 5). 리그닌 탄화 생성물의 전기전도도 보유에 대해서는 이전에도 보고된 바가 있다[13]. 코코넛 껍질의 경우 커피 찌꺼기 등 유사한 형태를 지니는 물질에 비해서 리그닌 함량이 비슷하기 때문에 탄화 후 상대적으로 느슨한 탄소 구조를 이룰 가능성이 높고 이로 인해 전기전도 성능이 다소 약해질 것으로 예상되었다. 코코넛 껍질 탄화물의 전류 수준은 10^{-4} A 이하인 데 비하여 전도성 고분자를 도입하면 다소 증가하고, 염기 활성화를 거치게 되면 다시 상당수준 상승하는 것을 볼 수 있다. 이는 일반적으로 예상되었던 결과와 일치한다. 특히 코코넛 껍질 탄화물에서 얻어지는 전류값은 커피 찌꺼기 탄화물과 비교해서도 낮은 값이다. 이는 낮은 리그닌 함량으로 인해 덜 조밀한 탄소 구조가 형성되었기 때문이다[18]. 그림에 포함된 면저항 값은 일반적인 전도성 첨가제와 비교할만한 수준의 값을 지니고 있다. 면저항은 중요한 지표이나, 본 실험에서 얻어진 값을 전기전도도로 변환하기에는 어려움이 따른다. 왜냐하면 입자 형태의 생성물을 압착하여 필름 형태로 제조하였으며 제조 과정에서 접촉저항 및 void 등을 정량적으로 완전히 파악하기는 무리이기 때문이다.

Figure 6는 탄화된 coconut shell을 리튬 2차 전지 음극으로 도입하여 반쪽 전지 충방전 테스트한 결과를 나타내고 있다. 탄화된 coconut shell의 충방전 거동을 파악하면 PPy@coconut shell 탄화물의 충방전

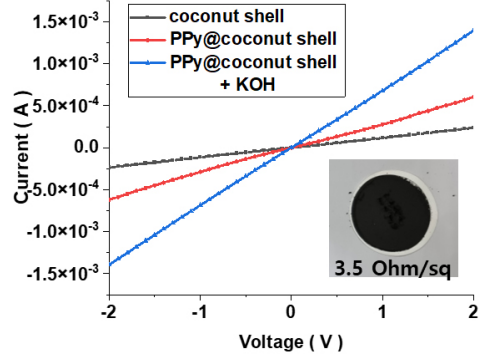


Figure 5. I-V relation obtained with carbonized coconut shell and composites. Inset is the digital image of carbonized coconut shell with a sheet resistance value.

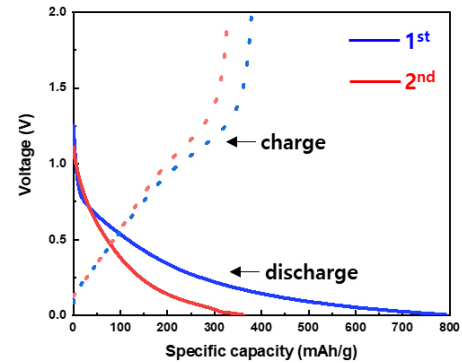


Figure 6. Voltage profiles of carbonized coconut shell measured at 0.1 C rate between 0 and 1.5 V in coin-type half-cell.

거동 및 KOH 활성화 효과를 추론할 수 있을 것으로 판단하였다. 즉, PPy 도입 및 KOH 활성화는 음극 성능을 향상시키는 요인이 확실하다[15,19]. 그림에서 보듯이 안정적인 충방전 거동을 보여주고 있으나, 두드러진 점은 첫 번째 방전 용량과 두 번째 방전 용량 값 차이가 상당히 크다. 반대로, 충전용량 값에는 큰 차이가 없다. 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, 커피 찌꺼기에 비해서도 초기 충방전 효율이 상대적으로 낮다[20]. 이는 탄화 생성물 자체의 구조적 규칙성 결여와 리튬 이온을 수용할 규칙적인 공간 구조 정렬이 완전하게 이루어지지 않았음을 의미한다. 이는 향후 추가 연구를 통해 개선이 가능하리라 확신한다.

4. 결 론

본 연구에서는, 자원 재활용 및 청정에너지 개발 흐름에 맞추어 세계적으로 널리 재배되고 있는 코코넛의 껍질을 화학적으로 처리하여 리튬 이온 2차 전지 음극으로 도입을 시도하였다. 셀룰로스 및 리그닌을 포함하고 있는 코코넛 껍질은 탄화 생성물을 형성함을 확인하였고, 전도성 고분자와 코코넛 껍질을 혼합하여 이루어진 복합소재를 탄화할 경우 물성의 향상을 도모할 수 있었다. 얻어진 탄소의 표면 활성화 및 전기화학적 성능 증가를 위해 염기 처리를 하면 전기전도 성능이 개선됨을 역시 확인하였다. 다양하게 얻어진 탄화 생성물들의 미세

구조는 공통적인 요소가 많음을 라만 분광법으로 확인하였다. 코코넛 껍질 탄화물을 리튬 이온 전지 음극으로 도입하여 측정된 결과 초기 방전 용량(790 mAh), 초기 쿨롱 효율 약 50%가 얻어졌다. 2차 충방전 시 용량 감소가 크게 일어났는데 이는 향후 연구에서 개선되어야 할 점이다. 본 연구는 향후 다양한 과일 껍질 부산물, 음식물 폐기물의 재활용을 통한 청정 에너지원 개발 연구에 필요한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

감 사

이 연구는 동덕여자대학교 지원으로 수행되었습니다. (2023년)

References

1. S. Packialakshmi, B. Anuradha, K. Nagamani, D. J. Sarala, and S. Sujatha, Treatment of industrial wastewater using coconut shell based activated carbon, *Mater. Today*, **81**, 1167-1171 (2023).
2. J. O. Ighalo, J. Conradie, C. R. Ohoro, J. F. Amaku, K. O. Oyedotun, N. W. Maxakato, K. G. Akpomie, E. S. Okeke, C. Olisah, A. Malloum, and K. A. Adegoke, Biochar from coconut residues: An overview of production, properties, and applications, *Ind. Crops Products*, **204**, 117300 (2023).
3. K. Promdeea, J. Chanvidhwatanakita, S. Satitkunec, C. Boonmeec, T. Kawichaid, S. Jarempraserte, and T. Vitidsant, Characterization of carbon materials and differences from activated carbon particle (ACP) and coal briquettes product (CBP) derived from coconut shell via rotary kiln, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **75**, 1175-1186 (2017).
4. T. Huang, D. Peng, Z. Chen, X. Xia, Y. Chen, and H. Liu, Microstructures and electrochemical properties of coconut shell-based hard carbons as anode materials for potassium ion batteries, *New Carbon Mater.*, **37**, 1125-1134 (2022).
5. D. Hou, Z. Guo, Y. Wang, X. Hou, S. Yi, Z. Zhang, S. Hao, and D. Chen, Microwave-assisted reconstruction of spent graphite and its enhanced energy-storage performance as LIB anodes, *Surf. Interfaces*, **24**, 101098 (2021).
6. M. Arnaiz, M. Canal-Rodríguez, D. Carriazo, A. Villaverde, and J. Ajuria, Enabling versatile, custom-made lithium-ion capacitor prototypes: Benefits and drawbacks of using hard carbon instead of graphite, *Electrochim. Acta*, **437**, 141456 (2023).
7. D. Alvira, D. Antoran, and J. J. Manya, Plant-derived hard carbon as anode for sodium-ion batteries: A comprehensive review to guide interdisciplinary research, *Chem. Eng. J.*, **447**, 137468 (2022).
8. S. Jayaraman, A. Jain, M. Ulaganathan, E. Edison, M. P. Srinivasan, R. Balasubramanian, V. Aravindan, and S. Madhavi, Li-ion vs. Na-ion capacitors: A performance evaluation with coconut shell derived mesoporous carbon and natural plant based hard carbon, *Chem. Eng. J.*, **316**, 506-513 (2017).
9. Y. Huang, Y. Wang, P. Bai, and Y. Xu, Storage mechanism of alkali metal ions in the hard carbon anode: An electrochemical viewpoint, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 38441-38449 (2021).
10. S. G. Jeong, S. Ha, and Y. -S. Lee, Manufacturing and application of activated carbon and carbon molecular sieves in gas adsorption and separation processes, *Appl. Chem. Eng.*, **33**, 488-495 (2022).
11. K. Song, J. -H. Lim, C. -G. Kim, C. -S. Park, and Y. -H. Kim,

Enhancement of ammonia adsorption performance by impregnation of metal chlorides on surface-modified activated carbon, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 671-678 (2021).

12. J. J. Yoo, N. Ko, S. H. Oh, J. Oh, M. Kim, J. Lee, T. Earmme, and J. Bae, Electrochemical properties and adsorption performance of carbon materials derived from coffee grounds, *Appl. Chem. Eng.*, **34**, 529-533 (2023).
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. 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).
15. J. Y. Jeong, D. J. Lee, J. Heo, D. -H. Lim, Y. -G. Seo, J. -H. Ahn, and C. -H. Choi, Development of biomass-derived anode material for lithium-ion battery, *Clean Technol.*, **26**, 131-136 (2020).
16. R. Nandi, M. K. Jha, S. K. Guchhait, D. Sutradhar, and S. Yadav, Impact of KOH activation on rice husk derived porous activated carbon for carbon capture at flue gas alike temperatures with high CO₂/N₂ selectivity, *ACS Omega*, **5**, 4802-4812 (2023).
17. K. S. Kim, C. Gi Min, and Y. -S. Lee, Preparation of coffee grounds activated carbon-based supercapacitors with enhanced properties by oil extraction and their electrochemical properties, *Appl. Chem. Eng.*, **34**, 426-433 (2023).
18. 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).
19. 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).
20. 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).

Authors

Jeongeun Park; Undergraduate Student, Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea; 20190881@dongduk.ac.kr

Subin Shin; Undergraduate Student, Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea; ssky0917@naver.com

Yewon Yoon; Undergraduate Student, Department of Cosmetic Science, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea; y_oni0823@naver.com

Jiwon Park; Undergraduate Student, Department of Applied Chemistry, Dongduk Women's University, Seoul 02748, Republic of Korea; 20191758@dongduk.ac.kr

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