

산성 전해질 기반의 전기 이중층 커패시터용 흑연 집전체의 전기화학적 안정성 평가

박시진¹ · 안진형^{1,2†}

¹경상국립대학교 에너지공학과, ²경상국립대학교 미래융복합기술연구소

Evaluation of Electrochemical Stability of Graphite Current Collector for Electric Double Layer Capacitor Based on Acid Electrolyte

Sijin Park¹ and Geon-Hyoung An^{1,2†}

¹Department of Energy Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea

²Future Convergence Technology Research Institute, Gyeongsang National University, Jinju, Republic of Korea

(Received April 1, 2021 : Revised April 15, 2021 : Accepted April 16, 2021)

Abstract Owing to its low cost, easy fabrication process, and good ionic properties, aqueous supercapacitors are under strong consideration as next-generation energy storage devices. However, the limitation of the current collector is its poor electrochemical stability, leading to low energy storage performance. Therefore, a reasonable design of the current collector and the acidic electrolyte is a necessary, as well as interfacial engineering to enhance the electrochemical performance. In the present study, graphite foil, with excellent electrochemical stability and good electrical properties, is suggested as a current collector of aqueous supercapacitors. This strategy results in excellent electrochemical performance, including a high specific capacitance of 215 F g⁻¹ at a current density of 0.1 A g⁻¹, a superior high-rate performance (104 F g⁻¹ at a current density of 20.0 A g⁻¹), and a remarkable cycling stability of 98 % at a current density of 10.0 A g⁻¹ after 9,000 cycles. The superior energy storage performance is mainly ascribed to the improved ionic diffusion ability during cycling.

Key words energy material, electric double layer capacitor, electrolyte, graphite current collector.

1. 서 론

최근 기후변화 및 환경오염에 대한 문제들이 전 세계적으로 부각됨에 따라 기존의 화석 연료를 대체할 수 있는 태양, 바람 및 지열 등과 같이 친환경 및 재생 등과 같은 매력적인 장점을 보유한 신재생에너지가 각광받고 있다.¹⁻³⁾ 하지만 신재생에너지는 자연 에너지를 원동력으로 하기 때문에 불규칙성이라는 단점을 보유하고 있으며 따라서 사용자가 일정하게 전력을 공급받기 위해서는 에너지를 저장 후 필요한 상황에 자유롭게 이용할 수 있는 에너지 저장장치가 필수적으로 요구된다.¹⁻³⁾

슈퍼커패시터는 다양한 에너지 저장소자 중 높은 출력

밀도, 쉬운 구성 및 작동 메커니즘, 낮은 작동온도, 빠른 충전속도 및 긴 수명성이라는 매력적인 장점으로 풍력 발전소, 전기자동차 및 휴대용 전자기기와 같은 첨단 산업분야에 널리 활용되고 있다.⁴⁻⁷⁾ 슈퍼커패시터는 전극의 재료 및 작동 원리에 따라서 분류가 될 수 있으며 그 중 전기 이중층 커패시터(electric double layer capacitors)는 충·방전 과정 중에 전극 재료 표면에서의 이온의 물리적인 흡착과 탈착을 이용해 에너지를 저장하여 높은 파워 밀도, 우수한 안전성, 빠른 충방전 속도, 긴 수명 유지 특성 등의 매력적인 장점을 가지고 있어 다른 종류의 슈퍼커패시터 대비 산업적으로 더 많이 이용되고 있다.⁸⁻¹¹⁾

[†]Corresponding author

E-Mail : ghan@gnu.ac.kr (G.-H. An, Gyeongsang Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

전기 이중층 커패시터는 전극 재료, 집전체 및 전해질로 구성되어 있으며 이 중에서 제조 가격과 주요하게 관련된 것은 유기계 기반의 전해질이다.¹²⁻¹⁴⁾ 유기 전해질을 이용하여 슈퍼커패시터를 제작하기 위해서는 공정 단계를 수분이 없는 상태로 유지해야하기 때문에 높은 공정비용을 수반한다. 이에 따라서 유기 전해질을 수계 전해질로 대체하기 위한 연구들이 진행되고 있다.¹⁵⁻¹⁷⁾

슈퍼커패시터의 전극에 사용되는 집전체는 전극 재료와 외부 단자 사이를 연결해주는 역할을 수행하므로 전기화학적 안정성 및 전기적 특성이 확보 필수적으로 되어야 한다.¹⁸⁻²²⁾ 기존 유기 전해질과 함께 주로 사용되던 알루미늄 집전체의 경우 황산 및 수산화 칼륨에 대한 내화학적 안정성이 낮아 전극 박리현상이 발생하여 수계 전해질과 함께 사용할 수가 없으므로 새로운 집전체 후보군에 대한 연구 및 개발이 필요되고 있다.

기존 수계 전해질로는 높은 전도도와, 높은 K^+ 농도를 보유하는 수산화 칼륨 기반의 전해질이 주로 이용되었다. 그럼에도 불구하고 수계 전해질 기반의 전기 이중층 슈퍼커패시터의 낮은 에너지 저장성능은 여전히 극복해야할 과제이다. 다양한 수계 전해질 후보군 중에서 황산의 경우 수산화 칼륨 보다 높은 H^+ 농도, 작은 이온 반경, 높은 이온 이동도를 보유하고 있어 에너지 저장성능을 향상시키는데 적합한 특성을 보유하고 있다. 이러한 장점은 전극 재료표면과 전해질 사이에서 더 많은 전기 이중층을 형성할 수 있으며 이온 이동을 효율적으로 제공할 수 있지만, 황산의 높은 산화도로 인하여 집전체의 부식 및 이에 따른 전극 박리 현상 때문에 많은 연구가 진행되지 못하였다.²³⁻²⁵⁾

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 산성 전해질 기반의 전기 이중층 커패시터에 이용되는 집전체로 흑연 호일을 적용하였고, 더 나아가서 전해질의 최적 조건을 설계함으로써 이에 따른 전기화학적 거동을 분석하고 에너지 저장성능을 개선하는 연구를 진행하였다. 산성 전해질 기반의 전기 이중층 커패시터의 전극재료는 활성 탄소를 이용하였으며, 특히 산성 전해질의 최적화를 위하여 전기 이중층을 유도하는 황산의 농도를 단계별로 증가시키며 전기화학적 거동을 규명하였다.

2. 실험 방법

산성 전해질 기반의 전기 이중층 커패시터를 제작하기 위하여 $2,000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 비표면적을 지니는 활성 탄소를 양극 및 음극 전극소재로 이용하였다. 전기 이중층을 통해 얻어진 전자를 외부로 전달함과 동시에 산성 전해질에 대한 안정성 확보를 위하여 흑연 호일(삼정씨엔

지, 두께 0.1 mm)을 집전체로 이용하였다. 70 wt%의 활성탄소, 20 wt% 바인더(polyvinylidene difluoride, PVDF) 및 10 wt%의 도전재(acetylene black)를 용매(1-methyl-2pyrrolidinone, NMP)에 균일하게 혼합하여 흑연 집전체 표면에 캐스팅 후 12시간 동안 오븐에서 80°C 로 건조하여 전극을 제조하였다. 전극 재료의 무게는 1.75 mg cm^{-2} 로 얻어졌다. 전해질의 경우 황산을 증류수에 넣은 뒤 투명하게 될 때까지 교반 시켰다. 이때 본 연구에서는 황산의 농도를 2M, 4M 및 6M로 단계별로 제어한 전해질을 통해 제작된 전기 이중층 슈퍼커패시터를 2M-EDLC/G, 4M-EDLC/G 및 6M-EDLC/G로 언급될 것이다. 여기서 EDLC/G는 electric double layer capacitor based on graphite current collector의 약어 표현이다. 전자 현미경(scanning microscopy, SEM, the Core-Facility Center of Gyeongsang National University)을 이용하여 흑연 집전체의 구조 및 형태를 분석하였다. 흑연 집전체의 결정구조를 분석하기 위해서 X-선 회절 분석(X-ray diffraction, XRD, the Core-Facility Center of Gyeongsang National University)을 활용하였다. 또한, 공기 분위기하에서 200°C 에서 900°C 까지의 범위에서 진행한 열 중량 분석(thermogravimetric analysis, TGA, the Core-Facility Center of Gyeongsang National University)을 통하여 탄소 집전체의 내용물을 분석하였다. 제작된 산성 전해질 기반의 전기 이중층 커패시터의 전기화학적 저항 특성을 분석하기 위하여 10^{-2} 에서 10^5 Hz 의 주파수 범위에서 전기화학적 임피던스 분광법(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)을 수행하였다. 순환전압전류법(cyclic voltammetry, CV)을 10, 30, 50, 100 및 200 mV s^{-1} 의 scan rate 조건 하에서 실시하여 전기화학적 거동을 분석하였다. 제작된 산성 전해질 기반의 전기 이중층 커패시터의 에너지 저장 성능 평가는 0.0~1.0 V의 전압범위 및 $0.1 \sim 20.0 \text{ A g}^{-1}$ 의 전류밀도 범위에서 충·방전 실험을 통해 평가하였다. 또한, 고 전류에서의 수명 안정성 평가를 진행하기 위하여 10.0 A g^{-1} 의 전류밀도로 9,000회 충·방전 평가를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1는 산성 전해질 기반의 전기 이중층 커패시터의 구성도를 나타낸다. 흑연 호일은 음극과 양극의 집전체로 이용이 되었고, 활성 탄소는 활물질로 이용이 되었다. 활성 탄소를 구성된 전극재료는 흑연 집전체의 표면에 코팅되었다. 최적의 산성 기반 전해질의 조건을 확보하기 위하여 황산의 농도를 2M, 4M 및 6M로 제어하여 각각 전기 이중층 커패시터를 제작하였다.

Fig. 2(a)는 흑연 집전체의 사진을 나타낸다. 흑연 호

Electric double layer capacitor based on the acidic electrolyte

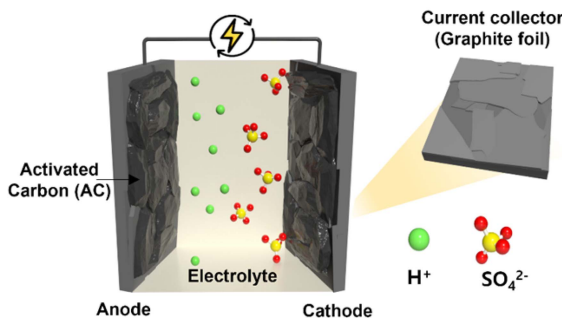


Fig. 1 Schematic illustration of electric double layer capacitor based on acid electrolyte with the graphite current collector.

일은 집전체로 사용에 적합한 대면적 및 유연성을 지니고 있어 플렉시블 및 웨어러블 에너지 저장소자를 위한 집전체로 유망하다. 흑연 집전체의 전자 현미경 이미지를 각각 저배율 Fig. 2(b) 및 고배율 Fig. 2(c)에 나타내었다. 무정형 판상구조의 흑연이 겹겹이 쌓여 있는 형태를 확인할 수 있었으며, 각 흑연 시트는 2~6 μm 의

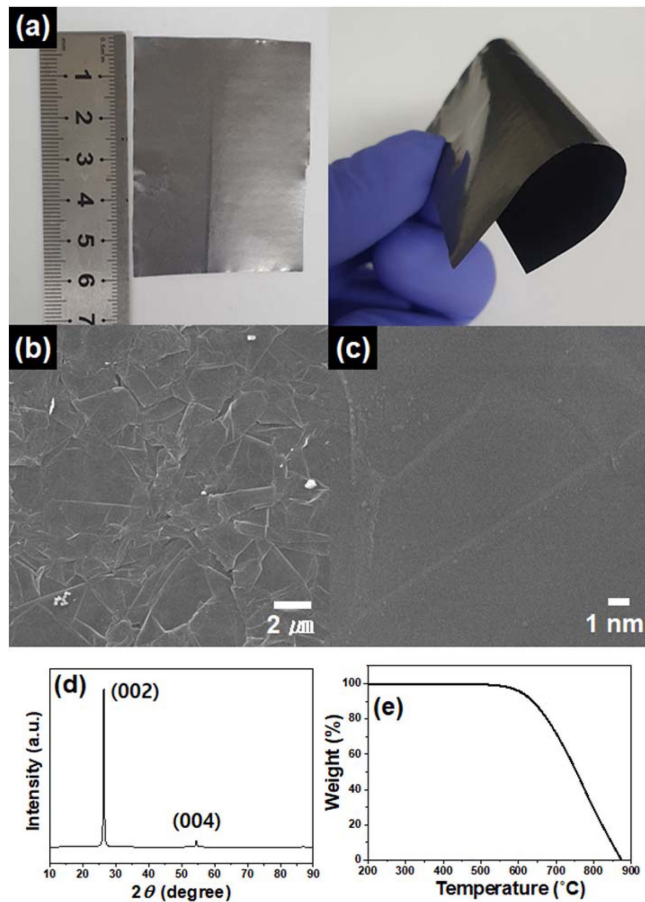


Fig. 2 (a) Photographic image of graphite foil as a current collector of aqueous supercapacitor. (b) Low-magnification and (c) high-magnification SEM of graphite foil as a current collector. (d) XRD pattern and (e) TGA curve of graphite foil.

직경을 지니고 있다. Fig. 2(d)는 흑연 집전체의 X-선 회절 분석 결과를 나타내며, 샘플은 26.5°와 54.6°에서 피크를 나타내는데, 이는 각각 흑연의 (002)면과 (004)면에 대한 회절 피크를 의미한다.²⁶⁻²⁸⁾ Fig. 2(e)는 흑연 집전체의 무기 내용물을 분석하기 위해 200-900 °C에서 분당 10°C의 승온 속도에서 실시한 열 중량 분석 결과를 나타낸다. 흑연 집전체는 100 %의 중량손실을 나타냈었으며 이는 집전체를 구성하고 있는 탄소 외에 불순물이 포함 되어있지 않음을 의미한다.²⁹⁾

Fig. 3는 전기 이중층 커패시터의 산성 기반의 전해질 설계에 따른 전기화학적 거동 분석 결과를 나타낸다. Fig. 3(a)는 2M-EDLC/G, 4M-EDLC/G 및 6M-EDLC/G에 대하여 전기화학적 임피던스 분광법을 $10^{-2} \sim 10^5$ Hz의 주파수 범위와 함께 5 mV 교류 진폭으로 측정하여 확보한 나이퀴스트 선도(Nyquist plot)이다. 해당 선도는 전기화학 시스템에서 분석된 전하이동 저항(charge transfer resistance)과 와버그 저항(Warburg impedance)을 나타내며, 이는 각각 전극과 전해질 사이의 계면의 전하이동 및 전극 내에서 이온의 확산에 영향을 받는다.^{29,30)} 제작된 모든 전기 이중층 슈퍼커패시터는 선도의 시작 점이 일치함을 나타내고 이는 동일한 전하이동 능력을 나타내며 동일한 집전체 및 전극재료를 사용하였기 때문이다. 또한, 직선구간에서 6M-EDLC/G의 기울기가 2M-EDLC/G 및 4M-EDLC/G 보다 y축으로 가까워지는데, 이는 낮은 와버그 저항을 나타내며 향상된 아연 이온 확산능력을 의미한다.^{29,30)} 즉, 전기화학적 임피던스 분광법을 통하여 6M-EDLC/G는 2M-EDLC/G 및 4M-EDLC/G 보다 낮은 와버그 저항을 나타냈으며, 이는 전해질내 높은 이온 농도로 인하여 향상된 수소 및 황산염의 이온 확산능력을 의미한다. 이렇게 향상된 이온 확산능력은 빠른 속도에서의 충·방전 과정 중에 효율적인 이온 이동을 제공할 수 있기에 에너지 저장용량을 향상시킬 수 있다. Fig. 3(b-d)는 제작된 2M-EDLC/G, 4M-EDLC/G 및 6M-EDLC/G를 0.0~1.0 V의 전압범위에서 10, 30, 50, 100 및 200 mV s^{-1} 의 scan rate으로 측정된 순환전압전류 곡선이다. 측정된 곡선의 x축인 전류밀도는 전극재료로 이용된 활성탄소의 무게를 이용하여 계산되었다. 이들은 직사각형과 유사한 모양을 나타내는데 이는 전기 이중층을 기반으로 에너지를 저장하는 것을 의미한다. 또한 측정 전류속도가 증가함에도 불구하고 직사각형 모양을 유지하는 것을 나타냈었으며, 이는 빠른 속도의 전기화학 측정 환경하에서도 전극재료 표면에서의 안정한 전기 이중층 형성을 의미한다.¹⁰⁾

Fig. 4(a)는 0.1~20.0 A g^{-1} 의 전류밀도 범위에서 충·방전 평가 후 계산된 2M-EDLC/G, 4M-EDLC/G 및 6M-EDLC/G의 커패시턴스를 나타냈으며, 0.1 A g^{-1} 전

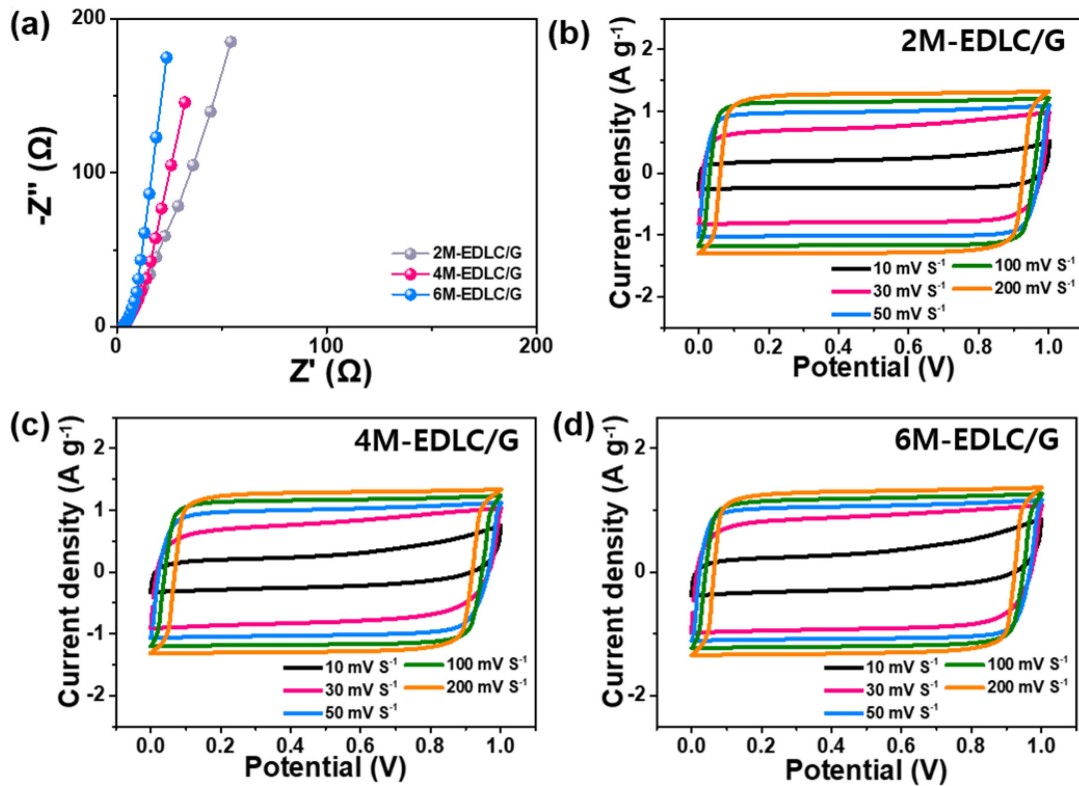


Fig. 3 (a) The electrochemical impedance spectra (EIS) of the 2M-EDLC/G, 4M-EDLC/G and 6M-EDLC/G. Cyclic voltammetry (CV) curves of (b) 2M-EDLC/G, (c) 4M-EDLC/G and (d) 6M-EDLC/G at scan rates of 10, 30, 50, 100, and 200 mV s^{-1} .

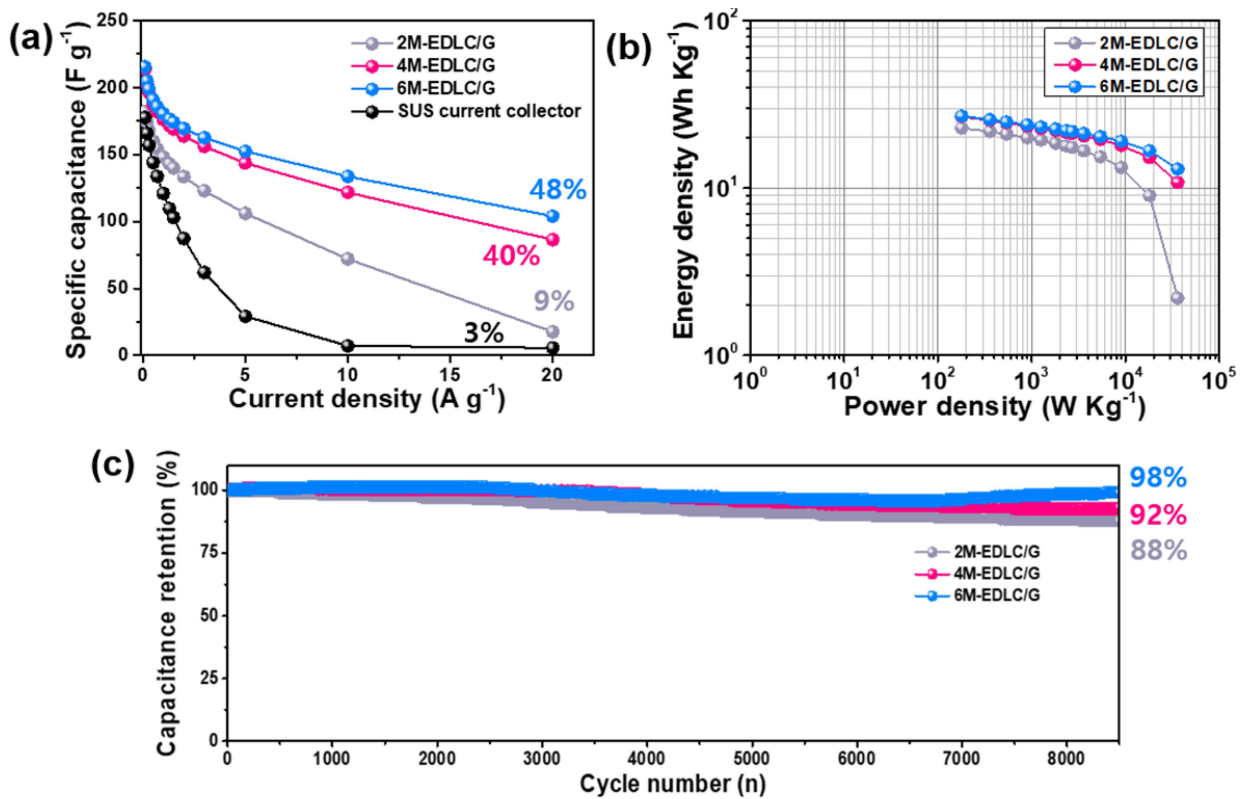


Fig. 4 (a) Calculated specific capacities. (b) Ragone plots related to energy and power densities. (c) Cyclic testing at a current density of 10.0 A g^{-1} for over 9,000 cycles.

류밀도에서 각각 182 F g^{-1} , 213 F g^{-1} 및 215 F g^{-1} 의 커패시턴스를 보인다. 또한, 20.0 A g^{-1} 의 높은 전류밀도에서 각각 17 F g^{-1} , 86 F g^{-1} 및 104 F g^{-1} 의 방전 용량을 나타냈다. 일반적으로 전기화학 반응기반의 에너지 저장소자에서 전류밀도가 증가할수록 커패시턴스가 줄어들게 되는데, 이는 전극과 전해질 계면에서 이온 확산을 위한 시간이 부족하기 때문이다.³¹⁾ 그럼에도 불구하고, 6M-EDLC/G은 48%의 높은 커패시턴스 유지율을 보였으며, 2M-EDLC/G (17%) 및 4M-EDLC/G (40%)를 보인 다른 샘플과 비교하여 가장 우수하였다. 이러한 6M-EDLC/G의 우수한 에너지 저장성능은 산성 기반 전해질 이용에 따른 높은 이온 활동도 및 최적화된 전해질 농도에 기반한 향상된 이온 확산 능력 때문으로 판단된다. 또한, 기존 염기성 전해질 기반의 전기 이중층 커패시터에 주로 이용되던 SUS 호일을 집전체로 이용하여 커패시터를 제작 후 2M의 황산 전해질을 이용하여 평가하였다. 그 결과 0.1 A g^{-1} 전류밀도에서 177 F g^{-1} 의 커패시턴스를 보였지만, 20.0 A g^{-1} 의 높은 전류밀도에서 5 F g^{-1} 의 낮은 방전 용량을 나타냈으며 이는 빠른 충·방전 조건에서 SUS 호일의 부식에 의한 것으로 여겨진다. Fig. 4(b)는 커패시턴스를 이용하여 계산된 에너지 밀도 및 파워밀도를 나타낸 라곤 도표이다. 제작된 2M-EDLC/G, 4M-EDLC/G 및 6M-EDLC/G

는 180 W kg^{-1} 의 파워밀도에서 22.7, 26.7 및 26.9 Wh kg^{-1} 의 에너지 밀도를 나타냈으며, 특히, $36,000 \text{ W kg}^{-1}$ 의 높은 파워밀도에서 2.2, 10.8 및 13 Wh kg^{-1} 의 에너지 밀도 유지율을 보유하였다. Fig. 4(c)는 실제 슈퍼커패시터 산업에서 요구하는 중요한 성능인 빠른 충·방전 측정 조건 하에서의 긴 사이클 안정성을 나타낸다. 2M-EDLC/G, 4M-EDLC/G 및 6M-EDLC/G는 10 A g^{-1} 의 높은 전류밀도에서 9,000회 충·방전 후의 유지율은 각각 88%, 92%, 및 98%로 확인되었다. 특히, 6M-EDLC/G의 경우 가장 우수한 유지율을 보이는데, 이는 최적화된 전해질 설계를 통해 충·방전 과정 중 이온 확산 능력이 효율적으로 향상되었기 때문으로 판단된다.

2M-EDLC/G, 4M-EDLC/G 및 6M-EDLC/G의 전기화학적 안정성을 평가하기 위하여 10.0 A g^{-1} 의 높은 전류밀도에서 9,000회의 충·방전 측정이 끝난 후에 전기화학적 임피던스 분광법을 통하여 나이퀴스트 선도 (Nyquist plot)를 확보하여 Fig. 5(a)-(c)에 나타내었다. 2M-EDLC/G 및 4M-EDLC/G과 비교하여 6M-EDLC/G의 경우 초기 값과 거의 유사한 와버그 저항 특성을 나타내었다. 이는 흑연 집전체의 우수한 전기화학적 안정성에 기반하여 최적화된 산성 기반 전해질이 효율적인 이온 확산 거동을 제공하였기 때문으로 판단된다.

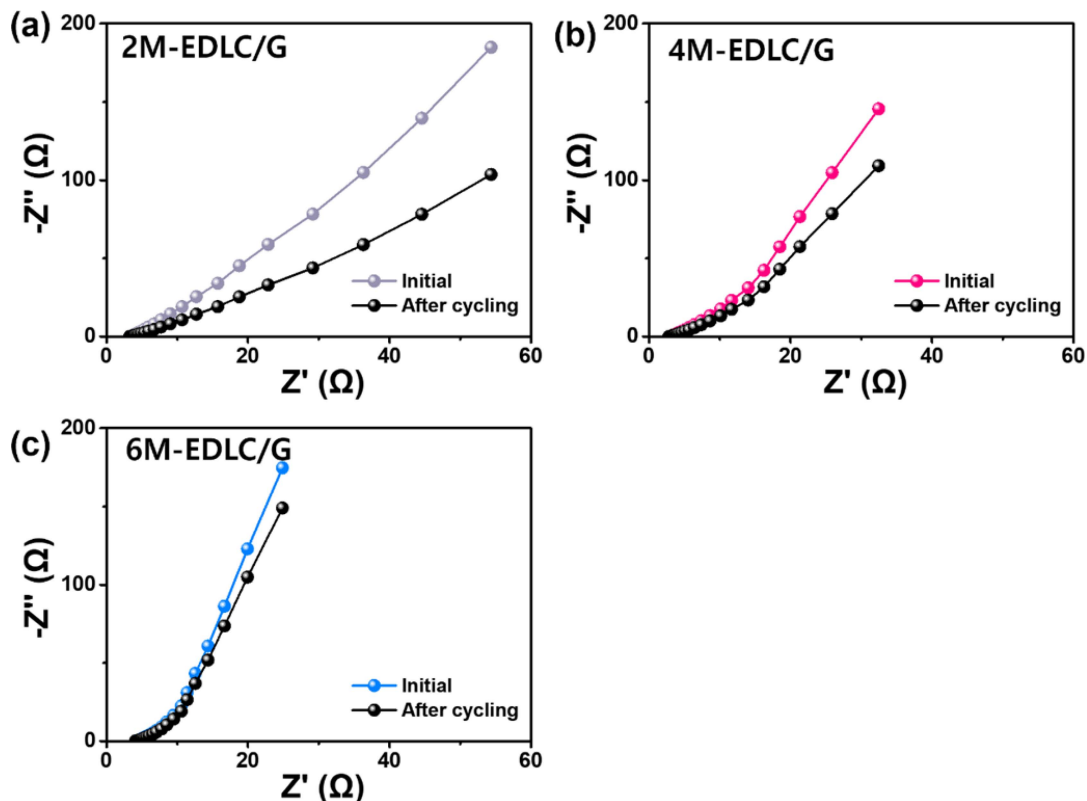


Fig. 5 The EIS spectra of the (a) 2M-EDLC/G, (b) 4M-EDLC/G and (c) 6M-EDLC/G after cyclic testing.

4. 결 론

본 연구에서는 전기 이중층 커패시터의 산성 기반 전해질 설계에 따른 전기화학적 거동 및 에너지 저장 성능을 분석하기 위하여 흑연 호일을 음극 및 양극 집전체로 사용하였고 황산으로 구성된 전해질을 이용하여 제작하였다. 특히, 황산의 농도를 조절하여 전해질과 전극 소재 계면을 최적화하는 연구를 수행하였다. 최적화된 6M-EDLC/G는 0.1 A g^{-1} 의 전류밀도에서 215 F g^{-1} 의 커패시턴스를 나타내었다. 더 나아가서, 20.0 A g^{-1} 의 높은 전류밀도에서 104 F g^{-1} 의 커패시턴스를 나타내었다. 커패시터의 수명 측정을 위하여 10.0 A g^{-1} 의 높은 전류밀도 하에서 9,000회 충·방전 후의 유지율은 98%로 확인되었다. 또한 충·방전 평가 이후에 전기화학적 임피던스 분광법을 이용하여 우수한 전기화학적 안정성을 입증하였다. 이렇게 에너지 저장 성능 및 전기화학적 안정성이 우수한 이유는 전기화학적으로 안정한 흑연 호일을 집전체로 사용하고 전해질 내의 황산의 농도를 최적화하여 이온 확산 능력을 효율적으로 향상시켰기 때문으로 판단된다. 따라서, 산성 전해질 기반의 전기 이중층 커패시터는 미래 에너지 저장소자 중 하나로 유망할 것으로 여겨진다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2020R1C1C1010611)

References

- M. A. Mustapa, O. B. Yaakob, Y. M. Ahmed, C.-K. Rheem, K. K. Koh and F. A. Adnan, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **77**, 43 (2017).
- A. Subramani, M. Badruzzaman, J. Oppenheimer and J. G. Jacangelo, *Water Res.*, **45**, 1907 (2011).
- N. L. Panwar, S. C. Kaushik and S. Kothari, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **15**, 1513 (2011).
- Y. Cho, S. Pak, Y.-G. Lee, J. S. Hwang, P. Giraud, G.-H. An and S. Cha, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1908479 (2020).
- G.-H. An, J. Hong, S. Pak, Y. Cho, S. Lee, B. Hou and S. Cha, *Adv. Energy Mater.*, **10**, 1902981 (2020).
- Y.-G. Lee and G.-H. An, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 41342 (2020).
- G.-H. An, *Appl. Surf. Sci.*, **530**, 147220 (2020).
- P. Sharma and T. S. Bhatti, *Energy Convers. Manag.*, **51**, 2901-2912 (2010).
- Y. Zhang, H. Feng, X. Wu, L. Wang, A. Zhang, T. Xia, H. Dong, X. Li and L. Zhang, *Int. J. Hydrogen Energy*, **34**, 4889 (2009).
- J. Park and G.-H. An, *Appl. Surf. Sci.*, **549**, 149326 (2021).
- J. Lee and G.-H. An, *Appl. Surf. Sci.*, **539**, 148290 (2021).
- B. Pal, S. Yang, S. Ramesh, V. Thangadurai and R. Jose, *Nanoscale Adv.*, **1**, 3807 (2019).
- L. Zhang, S. Yang, J. Chang, D. Zhao, J. Wang, C. Yang and B. Cao, *Front. Chem.*, **8**, 413 (2020).
- W. Ye, H. Wang, J. Ning, Y. Zhong and Y. Hu, *J. Energy Chem.*, **57**, 219 (2021).
- W. Qin, N. Zhou, C. Wu, M. Xie, H. Sun, Y. Guo and L. Pan, *ACS Omega*, **5**, 3801 (2020).
- X. Zang, C. Shen, M. Sanghadasa and L. Lin, *ChemElectroChem*, **6**, 976 (2018).
- N. Blomquist, T. Wells, B. Andres, J. Backstrom, S. Forsberg and H. Olin, *Sci. Rep.*, **7**, 39836 (2017).
- G.-H. An, S. Cha and H.-J. Ahn, *Appl. Surf. Sci.*, **478**, 435 (2019).
- M. Arvani, J. Keskinen, D. Lupo and M. Honkanen, *J. Energy Storage*, **29**, 101384 (2020).
- L. Liu, H. Zhao and Y. Lei, *Small Methods*, **3**, 1800341 (2018).
- G.-H. An and H.-J. Ahn, *Appl. Surf. Sci.*, **473**, 77 (2019).
- B.-G. Lee, S.-I. Shin, M.-W. Ha and G.-H. An, *Curr. Appl. Phys.*, **20**, 419 (2020).
- M. F. Y. M. Hanappi, M. Deraman, M. Suleman, N. S. M. Nor, N. E. S. Sazali, E. Hamdan, N. S. M. Tajuddin, N. H. Basri, M. R. M. Jasni and M. A. R. Othman, *Funct. Mater. Lett.*, **10**, 1750013 (2017).
- O. Ibukun and H. K. Jeong, *New Phys.: Sae Mulli*, **69**, 154 (2019).
- W. Zhang, D. Liu, H. Lin, H. Lu, J. Xu and D. Liu, *Colloid. Surfece. Physicochem. Eng. Aspect.*, **511**, 294 (2016).
- Y.-G. Lee, H. Jang and G.-H. An, *Korean J. Mater. Res.*, **30**, 458 (2020).
- Y.-G. Lee, J. Lee and G.-H. An, *Chem. Eng. J.*, **414**, 128916 (2021).
- G.-H. An, *Curr. Appl. Phys.*, **20**, 605 (2020).
- Y.-G. Lee and G.-H. An, *Korean J. Mater. Res.*, **31**, 68 (2021).
- G.-H. An, *Korean J. Mater. Res.*, **29**, 505 (2019).
- S.-I. Shin, B.-G. Lee, M.-W. Ha and G.-H. An, *Korean J. Mater. Res.*, **29**, 774 (2019).

<저자소개>

박시진

경상국립대학교 에너지공학과 학생

안건형

경상국립대학교 에너지공학과 조교수