

## 금속유기골격체(Metal-organic Framework)의 함량에 따른 다공성 활성탄소 복합재료 기반 슈퍼커패시터의 전기화학적 거동 분석

정현택 · 김용렬<sup>†</sup>

대진대학교 에너지환경공학부, 교수  
대진대학교 에너지환경공학부, 교수<sup>†</sup>

(2020년 10월 5일 접수: 2020년 10월 28일 수정: 2020년 10월 29일 채택)

### Characterization of electrochemical behaviour for supercapacitor based on porous activated carbon composite with various contents of metal-organic framework(MOF)

Hyeon Taek Jeong · Yong Ryeol Kim<sup>†</sup>

*Division of Energy and Environmental Engineering, Daejin University,  
1007 Hoguk-Ro, Pocheon-Si, Gyeonggi-Do 11159, Korea*

*(Received October 5, 2020; Revised October 28, 2020; Accepted October 29, 2020)*

**요약** : 본 연구에서는 다공성 활성탄소와 금속유기골격체 복합재료 기반의 전극 재료와 “이온젤” 이라고 불리는 고분자 고체 전해질을 이용하여 슈퍼커패시터를 제작 하였으며, 금속유기골격체의 함량에 따른 전기화학적 거동을 관찰하여 보았다. 슈퍼커패시터의 전기화학적 특성은 순환전압전류법(CV), 전기화학적 임피던스 분광법(EIS) 및 전정류 충·방전법(GCD)으로 분석하였으며, 그 결과로, 다공성 활성탄소 대비 금속유기골격체를 0.5 wt% 첨가 하였을 때 가장 높은 전기용량값을 확인 할 수 있었으며, 0.5 wt% 이상의 금속유기골격체의 함량은 전기화학적 특성 감소에 영향을 주는 것으로 사료되며, 이러한 결과를 바탕으로 제조된 다공성 활성탄소/금속유기골격체 복합재료 기반의 슈퍼커패시터는 다양한 분야에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

**주제어** : 다공성 활성탄소, 금속유기골격체, 이온젤, 슈퍼커패시터, 고분자 고체 전해질

**Abstract** : We have fabricated the supercapacitor composed of porous activated carbon, metal-organic framework (MOF) with polymer based solid state electrolyte as a “ion gel” and characterized its electrochemical behaviour as a function of the MOF contents. The electrochemical properties of the supercapacitor were analyzed via cyclic voltammetry(CV), electrochemical impedance spectroscopy(EIS) and galvanostatic charge/discharge test. As a results, the supercapacitor based on

---

<sup>†</sup>Corresponding author  
(E-mail: yrkim@daejin.ac.kr)

porous activated carbon/MOF composite showed the highest capacitance value at 0.5 wt% of MOF contents and decreased capacitance with increase MOF contents over the 0.5 wt%. Consequently, the porous activated carbon/MOF composite based supercapacitor is applicable to various aspect for energy storage device.

*Keywords* : porous activated carbon, metal-organic framework(MOF), ion gel, supercapacitor, polymer based solid state electrolyte

## 1. 서론

다양한 기술의 발전으로 전자 제품의 디지털화, 소형화, 저전력화 등이 개발되고 화석연료의 한계성과 환경적인 문제로 인한 대체 에너지 문제가 지속적으로 거론되면서, 효율적 에너지 사용과 기후변화 대응을 위한 차세대 에너지 저장 매체의 중요성이 강조되고 있다 [1-3]. 대표적으로 전기화학적 에너지 저장 매체로는 리튬이온배터리, 슈퍼커패시터 및 연료전지로 나누어지며, 각각의 시스템에 따라 장·단점을 가지고 있다. 특히, 이차전지 종류 중 슈퍼커패시터는 다공성 탄소 소재를 전극으로 사용하는 에너지 저장 장치로써 현재 메모리 백업용으로 주로 사용되고 있다. 슈퍼커패시터는 반영구적인 수명과 고출력 특성으로 최근 각종 전자제품과 신재생에너지 분야, HEV 및 UPS 분야에 이르기까지 그 수요량이 지속적으로 확대되고 있다 [4].

슈퍼커패시터의 장점을 활용하기 위해 많은 전극 소재 개발과 관련한 연구가 진행 중이다. 전극 재료로 많이 쓰이는 물질 중 하나인 활성탄소(activated carbon, AC)는 다른 다공성 탄소소재에 비해 매우 큰 비표면적( $2,000 \sim 3,000 \text{ m}^2/\text{g}$ )을 가지고 있으며 활성화 공정에 의해 기공의 크기 및 분포를 조절할 수 있다. 또한, 높은 열적 전기전도성, 물리적/화학적 안정성 등 여러 가지 장점으로 인해 관심을 받고 있다. 이러한 활성탄소의 장점을 이용하여 활성탄소는 오래전부터 리튬이온배터리나 슈퍼커패시터와 같은 에너지 저장 매체의 전극 소재로 많은 응용이 되어 왔으며, 다른 소재와 함께 복합화로 두 가지 이상의 하이브리드 재료의 시너지효과를 통해서 복합재료 기반 전극의 전기화학적 특성을 향상시키려는 많은 연구가 활발하게 진행되고 있는 중이다 [5].

금속이온이나 유기 분자들이 유기적으로 연결된 다공성 물질인 금속유기골격체(metal-organic

framework, MOF)는 다공성 배위 고분자의 일종으로 최근 에너지 저장 소재로써 많은 관심을 받고 있다 [6]. 나노시트로 구성된 계층적 다공성 니켈 기반의 metal-organic framework (Ni-MOF)은 Trimesic acid 및 니켈 이온의 열수작용에 의해 제조된다[6-8]. Trimesic acid 및 니켈 이온의 몰 비를 조정함으로써 Ni-MOF의 다양한 구조를 얻을 수 있으며, 이렇게 얻어진 다공성 Ni-MOF는 최적의 계층적 다공성 구조를 나타냄으로써 큰 비표면적을 갖는다[9]. 나노시트로 구성된 계층적 다공성 구조는 더 많은 전기화학적 영역이 활성화 되어 전기 화학적 특성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다 [9]. 먼저 보고된 논문에 따르면 층상 계층적 다공성 Ni-MOF는 1 A/g의 전류 밀도에서 1057 F/g의 높은 전기용량 값을 나타내고 있으며, 30 A/g의 높은 전류 밀도에서도 649 F/g의 높은 전기용량 값을 보여준다, 이것은 최대 30 A/g까지 63.4 %의 우수한 속도 성능이 나타낸다는 것을 알 수 있으며, 다공성 Ni-MOF 소재는 10 A/g의 전류 밀도에서 1 A/g 대비 70 %를 최대 2,500회의 충·방전이 가능하다는 것을 보여주고 있다. 앞서 말한 계층적 다공성 Ni-MOF와 활성탄소(active carbon, AC)를 복합화 하여 만들어지는 비대칭 슈퍼 커패시터(asymmetric supercapacitor, ASC)는 0.5 A/g의 전류 밀도에서 87 F/g의 비정전 용량을 가지고 높은 에너지 밀도 수치가 보고되고 있으며, 21.05 Wh/kg 및 전력 밀도 6.03 kW/kg 값을 보여준다. 이는 계층적 다공성 Ni-MOF 소재가 고성능 슈퍼 커패시터의 전극 소재로써의 역할을 충분히 할 수 있다는 것을 보여주고 있다 [10-12].

슈퍼커패시터의 안전성 및 전기화학적 특성과 충·방전 효율을 증가시키는 것이 중요한데, 기존의 전해질을 이온성 액체를 이용하여 개질함으로써 그 특성을 향상시키려는 여러 연구가 진행 중

이다 [13,14]. 이온성 액체는 일반적인 이온성 염과는 다르게 양이온과 음이온의 크기가 상대적으로 커서 결정체를 이루지 못하고 액체 상태로 존재하는 물질을 말하며, 기존 염의 특성과 달리 100 °C 이하의 온도에서 액체로 존재한다. 특히 상온에서 액체로 존재하는 이온성 액체를 상온 이온성 액체라고 부르며, 주어진 이온성 액체의 양이온과 음이온을 적절히 선택하면 밀도, 점도, 친수성 및 소수성 특성이 조절 가능하여 designer solvent 라고도 부르고 있다 [14]. 유기 전해액의 경우 증기압이 높고 가연성을 나타내지만 이온성 액체는 낮은 휘발성과 유기물인데도 불구하고 불에 잘 타지 않아 우수한 안전성을 나타내고 이온의 밀도가 높아 이온 전도 특성도 우수하며, 넓은 전압 범위에서 안정한 특성을 가지고 있다. 이러한 이유로 유기합성, 촉매와 같은 정밀화학 분야부터 커패시터, 태양전지 등 전기화학 분야까지 많은 주목을 받게 되었다.

본 연구에서는 슈퍼커패시터의 안전성 및 전기화학적 특성과 전기용량의 효율을 향상시키기 위해 기존 고체 전해질로 많이 사용되고 있는 polyvinyl alcohol (PVA)에 이온성 액체인 BMIMBF<sub>4</sub> (1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate)를 첨가하여 그 특성을 분석해보았다 [13-15]. 또한, 전극소재로는 다공성의 활성탄소와 금속유기골격체 복합소재를 도입하여 활성탄소 기반의 슈퍼커패시터와 비교하여 향상된 전기화학적 특성을 관찰 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시약 및 재료

본 연구에서는 전극물질로 활성탄(Activated Carbon, AC, 비표면적 2000~ m<sup>2</sup>/g)과 Ni 기반 금속유기골격체를 (Ni-MOF) Sigma-Aldrich 사에서 구매하였으며, 별도의 전처리 과정 없이 사용하였다. 전극 소재로 슬러리 제조는 바인더로 CMC(Carboxymethyl-cellulose)와 BM-400B를 사용하였으며, 도전재로는 Super-P를 Imerys Graphite & Carbon 사에서 구매하여 별도의 전처리 과정 없이 건조 후 사용하였다. PVA (Polyvinyl alcohol, (-CH<sub>2</sub>CHOH-)<sub>n</sub>)는 고체 전해질 제조를 위해 Sigma-Aldrich 사에서 구매하였으며, 용매로는 증류수(D.I.water)를 사용하였다. 요오드화 칼륨(Potassium iodide, KI,

Mw=166.00)은 대정화금 사에서 구매하였으며 별도의 정제과정 없이 사용하였다. EC (Ethylene carbonate, EC, C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub>, Mw = 88.06)와 이온성 액체 BMIMBF<sub>4</sub>(1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate, C<sub>8</sub>H<sub>15</sub>BF<sub>4</sub>N<sub>2</sub>, Mw= 226.02)는 Sigma-Aldrich 사에서 구매하였으며 별도의 정제과정 없이 전해질 제조를 위하여 사용하였다.

### 2.2. 다공성의 전극 개발을 위한 탄소재료기반의 슬러리 제조

다공성 탄소나노재료 기반의 전극 슬러리를 제조하기 위해 활성탄소를 전극 활물질로 이용하였다. 먼저 증류수 (D.I.water) 1.5 g에 바인더인 CMC (Carboxymethyl-cellulose) 0.0013 g을 첨가한 후 도전재(Super-p) 0.03g을 넣어 thinky mixer를 이용하여 혼합시켜준다. 그 후, 활성탄소 0.8 g 와 Ni-MOF 소재를 활성탄소 대비 각각 0~1.5 wt%를 넣고 충분히 혼합시킨 후 바인더로 BM-400B 0.2 ml를 추가로 넣어 thinky mixer를 이용하여 혼합시킨다. 모든 재료를 혼합한 후 혼합물을 Planetary Vacuum Mixer에 넣고 10분 동안 진공상태에서 2000 rpm의 속도로 교반하여 전극제조용 슬러리를 제조한다.

### 2.3. 고분자와 이온성 액체 기반의 고체 전해질 제조

먼저 PVA 1.8 g를 증류수 20 ml에 넣고 80 °C에서 1시간 가열 교반 후 KI 3.78 g 추가로 첨가하여 80 °C에서 1 시간동안 가열 교반한다. 이후 EC 6.37 g를 첨가하여 80 °C에서 1 시간동안 추가로 가열 교반한다. 이후 이온성 액체인 BMIMBF<sub>4</sub> 0.5 ml 를 80 °C에서 1 시간동안 가열 교반하여 젤 형태의 전해질을 제조한다[16].

### 2.4. 다공성 탄소나노재료 복합재료 기반 슈퍼커패시터의 제조

제조된 활성탄소/Ni-MOF 복합재료 기반의 전극 슬러리와 고분자와 이온성 액체 기반의 고체 전해질을 이용하여 슈퍼커패시터를 제조하기 위해 가로 1 cm, 세로 5 cm의 알루미늄 기판을 준비한다. 각각의 알루미늄 기판의 무게를 측정한 후 활성탄소/Ni-MOF 복합재료 기반의 전극 슬러리를 닥터블레이드 방법으로 알루미늄 기판 위에 1cm x 1cm 의 크기로 얇게 코팅한 후 건조기에서 100 °C로 24 시간동안 건조하여 남아있는 용매 및 수분을 제거한다. 건조 후, 고체 전해

질을 전극 위에 도포하고 상온에서 1시간 동안 전극으로 흡수시키며 건조를 진행한다. 건조 후 제조된 두 개의 전극을 샌드위치 형태로 결합하여 슈퍼커패시터를 제조하고 추가적으로 1시간 동안 상온 건조하여 수분을 추가로 제거한다. 제조된 슈퍼커패시터는 ZIVE SP2 Workstation (원아테크)를 이용하여 EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy), CV(Cyclic Voltammetry) 및 GCD(Galvanostatic Charge Discharge)의 분석방법으로 전기화학적 특성을 관찰하였다.

### 3. 분석방법

#### 3.1. 전자주사현미경을 이용한 전극의 표면분석

활성탄소/Ni-MOF 복합재료 기반 전극의 표면을 분석하기 위하여 전자주사현미경을 (SEM, Philips XL30SFEG SEM) 사용하였으며, 가속전압은 5 kV 방출전류는 210  $\mu$ A를 적용하여 관찰하였다.

#### 3.2. 전기화학적 특성 분석

슈퍼커패시터의 내부에 존재하는 두 개의 전극과 전해질 사이에서 일어나는 전기화학반응을 등가 전기 회로의 형태로 모형화하고, 주파수가 다른 미소한 교류신호를 셀에 부여하여 임피던스를 측정하기 위해서 전기화학 임피던스 분광법(electrochemical impedance spectroscopy, EIS) 분석법을 이용하였으며, 주파수 범위를 0.1 Hz ~ 100 KHz로, open circuit에서 10 mV (rms)의 진폭하에서 측정하였다. 또한, 전극과 전해액의 계면에 주기적으로 전압을 가하여 이때 발생하는 전류 변화를 관찰하기 위해서 순환전압 전류법(cyclic voltammetry, CV)을 사용하였으며, 본 실험에서는 구동전압을 -0.5~1.0 V로 하고, 각각 50, 100, 200 mv/sec 의 scan rate를 변화 시켜 측정하였다. 정전류 충·방전(Galvanic charge/discharge, GCD)은 0~1 V까지 1 A/g의 일정한 전류밀도를 인가하여 충·방전 특성을 관찰하였으며, 모든 전기 화학적 분석은 2전극 시스템을 사용하였다. 또한, 슈퍼커패시터의 전기용량 값을 충·방전 결과를 이용하여 아래의 식에 의해서 계산 하였다.[16]

$$C = \frac{I \times \Delta t}{\Delta V \times m}$$

여기서, C 는 전기 용량 값, I 는 전류,  $\Delta t$  는 방전시간,  $\Delta V$  는 방전시간 동안의 전압변화를 나타내며, m 은 전극물질의 무게를 나타낸다. 이때  $\Delta V$ 는  $iR$  drop 수치를 제외하여 계산하였다.[28-30]

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 순환전압전류법 분석

활성탄/Ni-MOF 복합소재 기반으로 제작된 슈퍼커패시터에서 Ni-MOF 소재의 함유량에 따른 전기화학적 특성을 비교 분석하기 위해서 순환 전압전류법을 사용하여 관찰해 보았으며, Fig. 1 에 나타냈다. 그 결과로 Ni-MOF가 활성탄소 대비 0.5 wt%가 첨가된 활성탄/Ni-MOF 복합 소재를 이용하여 제조한 슈퍼 커패시터의 current 값이 가장 크게 나타난 것을 확인할 수 있었으며, Ni-MOF 소재의 함유량을 0.5 wt% 이상으로 첨가 하였을 때는 전기화학적 특성이 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 Ni-MOF 소재의 함유량이 0.5 wt% 이상이 되면 Ni-MOF 소재에 의해 전자의 이동을 방해하여 저항이 증가되고 current 값이 감소하는 원인을 야기했다고 판단된다[16].

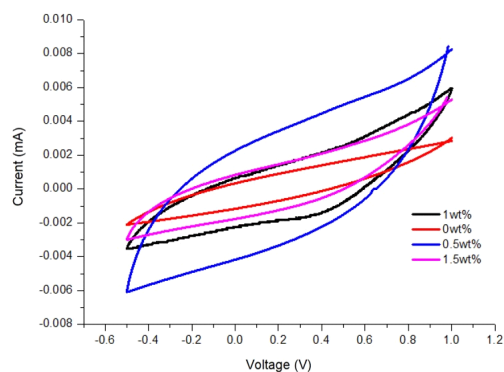


Fig. 1. Cyclic voltammetry(CV) of the supercapacitor as a function of Ni-MOF contents.

#### 4.2. 전기화학적 임피던스 분광법

전기화학적 임피던스 분광법을 사용하여 활성탄/Ni-MOF 복합소재 기반 슈퍼커패시터의 전극과 전해질 계면 사이의 전기화학적 특성을 분석하여 Fig. 2 에 나타내었다. 그 결과로, Ni-MOF 소재를 0.5 wt%를 첨가하였을 때 초기내부저항은  $3.0 \Omega$  으로 확인 할 수 있었으며, 이 값은 Ni-MOF 소재의 함유량을 높임에 따라 점차 증가하여 Ni-MOF를 1.5 wt% 로 첨가하여 전극 소재를 제조 하였을때는  $8.1 \Omega$ 으로 높아지는 경향을 나타내었다. 또한, 고주파수 영역에서 나타나는 반원의 크기를 보면 초기 저항값과 마찬가지로 Ni-MOF 소재의 함유량을 높일수록 크기가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 앞에서 설명한 순환 전류법에서 나타난 결과와 부합하는 내용을 보여주며 Ni-MOF 소재의 함유량이 0.5 wt% 이상에서 높아질수록 내부저항을 증가시키는 요소로 작용이 되었으며, 전극과 전해질 계면에서의 전하이동과 관련된 저항이 증가함에 따라서 나타나는 현상으로 관측된다[17].

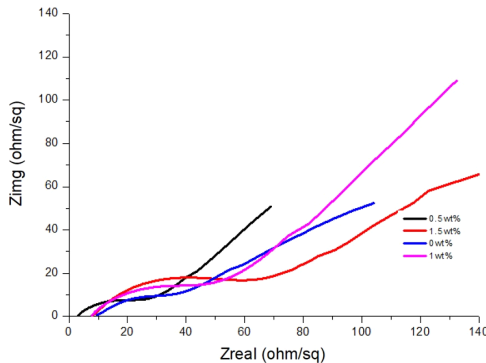


Fig. 2. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of the supercapacitor as a function of Ni-MOF contents.

#### 3.3. 정전류 충·방전 분석법

활성탄/Ni-MOF 복합소재 기반 슈퍼커패시터의 충·방전 특성을 분석하기 위해서 정전류 충·방전 분석법을 이용하였으며 Fig. 3에 나타냈다. 그 결과 Ni-MOF 소재를 활성탄소 대비 0.5 wt% 첨가하여 전극을 제조하였을 때 충·방전 시간이

가장 길게 나타나는 것을 확인 할 수 있었으며, Ni-MOF 소재 함유량 0.5 wt% 이상에서는 충·방전 특성이 점차 감소하는 경향을 보였다. 이러한 Ni-MOF 소재의 함유량 증가에 따른 충·방전 특성의 감소 현상은 앞에서 확인하였던 순환 전압전류법과 임피던스 분광법에서와 마찬가지로 Ni-MOF 소재가 전극과 전해질 계면에서의 내부저항을 증가시키고 전극 활물질 및 바인더와의 호환성 및 분산성 감소로 인한 결과로 판단되며, 그 결과 슈퍼커패시터의 전기화학적 특성 감소를 나타낸 것으로 사료된다[17].

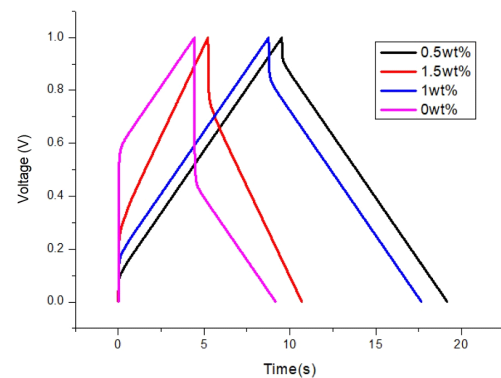


Fig. 3. Galvanostatic charge-discharge (GCD) tests of the supercapacitor as a function of Ni-MOF contents.

#### 4.4. 전기용량값 분석

충·방전 그래프를 이용하여 슈퍼커패시터의 전기용량 값을 계산하였으며 이를 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과로 Ni-MOF 소재를 활성탄소 대비 0.5 wt% 첨가하였을 때 슈퍼 커패시터의 전기용량 값은 522 F/g 으로 확인할 수 있었으며, 이 값은 Ni-MOF 소재의 함유량을 1.0, 1.5 wt% 로 증가시키었을 때 각각 406, 331 F/g 으로 감소된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 순환 전류법, 전기화학적 임피던스법 및 충·방전 특성과 부합되는 것을 확인할 수 있었으며, 최적화된 Ni-MOF 소재의 함유량은 활성탄/Ni-MOF 복합소재 기반 슈퍼커패시터의 미래 에너지 저장 장치로서 적용 가능성을 나타낸다고 사료된다.

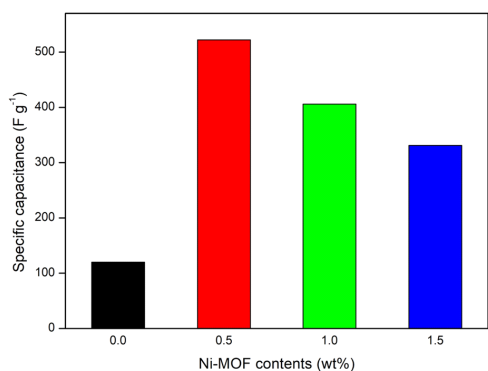


Fig. 4. Specific capacitance, energy and power density of the supercapacitor.

#### 4.5. 전극의 표면 분석

Ni-MOF 소재, 활성탄소 및 활성탄소/Ni-MOF 복합소재의 표면 특성을 전자주사 현미경(SEM)을 통하여 관찰해 보았으며 Fig. 5에

나타내었다. 먼저 Fig. 5 (a)에서 나타난 것과 같이 Ni-MOF 소재 자체의 표면 특성은 작은 사각형 형태의 모습을 관찰 할 수 있었으며, Fig. 5 (b) 에서는 다공성 도전재(super-p)의 표면을 보여주고 있다. 또한, Fig 5의 (c)와 (d)에서 볼 수 있듯이 활성탄소와 활성탄소/Ni-MOF 복합소재의 거친 표면형상을 관찰 할 수 있었다. 이러한 표면은 전극의 비표면적을 향상시킬 수 있는 구조로 판단되며, 비표면적의 향상은 활성탄소/Ni-MOF 복합소재 기반 슈퍼커패시터의 전기화학적 특성을 증가시킬 수 있었다고 사료된다. 결과적으로 최적화된 Ni-MOF 소재의 함유량은 활성탄소/Ni-MOF 복합소재 기반 슈퍼커패시터의 전기화학적 특성을 증가시키는 요인으로 작용하였다고 사료된다. 또한 이러한 활성탄소/Ni-MOF 복합소재 기반 슈퍼커패시터는 차세대 에너지 저장 시스템에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

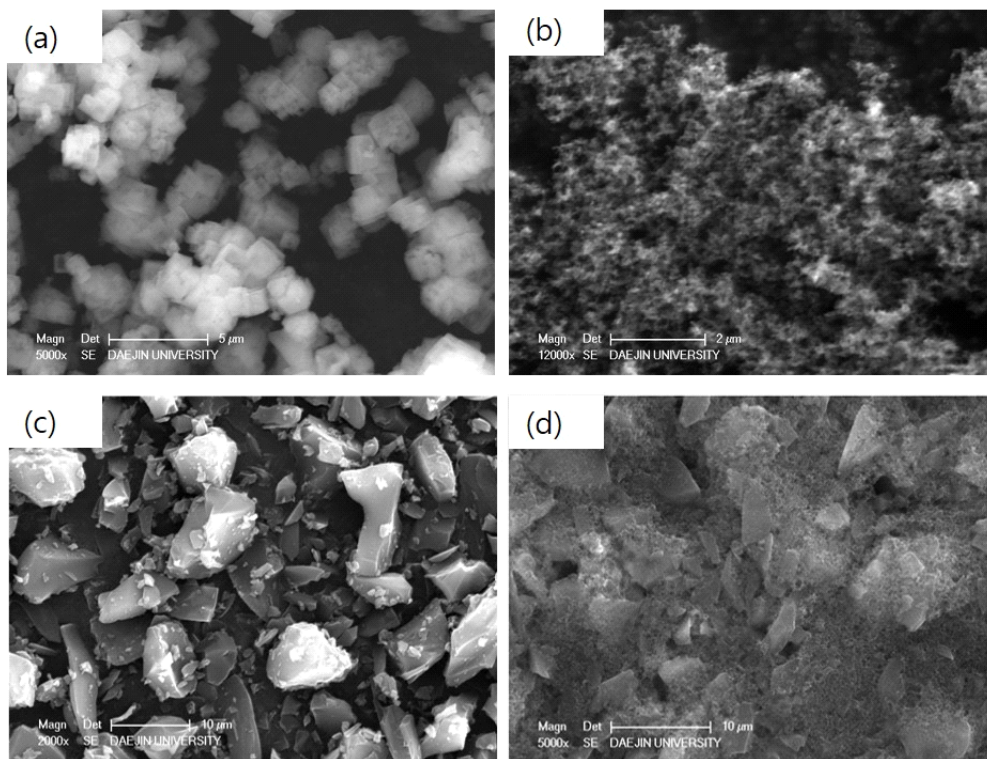


Fig. 5. SEM images of the AC/Ni-MOF composite based electrode surface; (A)Ni-MOF, (b) super-p, (c) AC (d) AC/Ni-MOF composite.

#### 4. 결론

본 연구는 다공성의 활성탄소/Ni-MOF 복합소재 기반 슈퍼커패시터의 Ni-MOF 소재의 함유량에 따른 전기화학적 특성 및 효과를 분석 하고자 하였으며, 순환전압전류법(Cyclic Voltammetry), 전기화학적 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy) 및 정전류 충·방전법(Galvanostatic Charge/Discharge) 등과 같은 전기화학적 분석 기법을 이용하여 그 특성을 비교 분석 하였다. 결과적으로, 전기화학적 임피던스 분광법으로 활성탄소/Ni-MOF 복합소재 기반 슈퍼커패시터내부저항을 측정한 결과 Ni-MOF 소재의 함유량이 0.5 wt% 일때 3.0 Ω으로 확인할 수 있었으며, Ni-MOF 소재의 함유량을 1.5 wt%로 증가 시켰을 때는 8.1 Ω으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 전극 소재에 Ni-MOF 소재의 함유량이 0.5 wt% 이상이 되면 내부 저항을 증가 시키는 요인으로 작용하고, 또한 순환전류곡선의 current 의 감소에 기인한다고 사료된다. 정전류 충·방전 법으로 활성탄소/Ni-MOF 복합소재 기반 슈퍼커패시터의 전기용량 값을 확인하였으며, Ni-MOF 소재를 활성탄소 대비 0.5 wt% 첨가하였을 때 활성탄소/Ni-MOF 복합소재 기반 슈퍼커패시터의 전기용량 값은 522 F/g에서 Ni-MOF 소재를 1.5 wt% 까지 증가 시켰을 때는 전기용량 값이 331 F/g으로 감소된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 최적화된 Ni-MOF 소재는 활성탄소의 단점을 보완하여 슈퍼커패시터의 전기화학적 특성을 향상시킬수 있다고 판단되며, 이러한 슈퍼커패시터는 효율적 에너지 사용과 기후변화 대응을 위한 소형화된 고성능에너지 장치에 적용이 가능한 에너지 저장매체로서의 응용이 가능하다고 판단된다.

#### References

1. A. Balducci, R. Dugas, P.L. Taberna, P. Simon, D. Plee, M. Mastragostino, S. Passerini, "High temperature carbon-carbon supercapacitor using ionic liquid as electrolyte", *Journal of Power Sources*, Vol. 165, pp. 922-927 (2007)
2. X. Liu, M. N. Marlow, Samuel J. Cooper, Bowen Song, Xiaolong Chen, Nigel P. Brandon, Billy Wu, "Flexible all-fiber electrospun supercapacitor", *Journal of Power Sources*, Vol. 384, pp. 264-269 (2018)
3. Y. Zhou, X. Zou, Z. Zhao, B. Xiang, Y. Zhang, "CoO/rGO composite prepared by a facile direct-flame approach for highpower supercapacitors", *Ceramics International*, Vol. 44, pp.16900-16907 (2018)
4. M. J. Kim, Y. S. Kim, K. M. Lee, S. Y. Jeong, E. S. Lee, S. H. Baeck, S. E. Shim, "Electrochemical improvement due to alignment of carbon nanofibers fabricated by electrospinning as an electrode for supercapacitor", *Carbon*, Vol. 99, pp. 607-618 (2016)
5. N. Chen, Y. Ren, P. Kong, L. Tan, H. Feng, Y. C. Luo, "In situ one-pot preparation of reduced graphene oxide/polyaniline composite for high-performance electrochemical capacitors", *Applied Surface Science*, Vol. 392, pp. 71-79 (2017)
6. K. Zin Htut, M. J. kim, E. s. Lee, S. H. Baeck, S. E. Shim, "Biodegradable polymer-modified graphene/polyaniline electrodes for supercapacitors", *Synthetic Metals*, Vol. 227, pp. 61-70 (2017)
7. S. Korkmaz, F. Meydaneri Tezel, İ.A. Kariper, "Synthesis and Characterization of GO/V2O5 Thin Film Supercapacitor", *Synthetic Metals*, Vol. 242, pp. 37-48 (2018)
8. P. Sivakumar, M. L. Jana, M. Kota, M. G. Jung, A. Gedanken, H. S. Park, "Controllable synthesis of nanohorn-like architected cobalt oxide for hybrid supercapacitor application", *Journal of Power Sources*, Vol. 402, pp. 147-156 (2018)
9. W. Wu, Y. Li, L. Yang, Y. Ma, D. Pan, Y. Li, "A Facile One-pot Preparation of Dialdehyde Starch Reduced Graphene Oxide/Polyaniline Composite for Supercapacitors", *Electrochimica acta*, Vol.

- 139, pp. 117–126 (2014)
10. S. J. Bao, C. M. Li, C. X. Guo, Y. Qiao, “Biomolecule-assisted synthesis of cobalt sulfide nanowires for application in supercapacitors”, *Journal of Power Sources*, Vol. 180, pp. 676–681 (2008)
  11. Y. Uchida, E. Kätelhön, Richard G. Compton, “Cyclic voltammetry with non-triangular waveforms: Electrochemically reversible systems”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Vol. 801, pp. 381–387 (2017)
  12. A. Tahri, H. El Fadil, F.Z. Belhaj, K. Gaouzi, A. Rachid, F. Giri, F.Z. Chaoui, “Management of fuel cell power and supercapacitor state-of-charge forelectric vehicles”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 160, pp. 89–98 (2018)
  13. J. Chen, K. Fang, Q. Chen, J. Xu, Ching-Ping Wong, “Integrated paper electrodes derived from cotton stalks for high-performanceflexible supercapacitors”, *Nano Energy*, Vol. 53, pp. 337–344 (2018)
  14. Graeme A. Snook, P. K, Adam S. Best, “Conducting-polymer-based supercapacitor devices and electrodes”, *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp. 1–12 (2011)
  15. J. S. Park, Y. S. Cho, S. J. Sung, M. Byeon, S. J. Yang, “Characteristics tuning of graphene-oxide-based-graphene to various end-uses”, *Energy Storage Materials*, Vol. 14, pp. 8–21 (2018)
  16. F. Zheng, Y. Li, X. Wang, “Study on effects of applied current and voltage on the ageing of supercapacitors”, *Electrochimica Acta*, Vol. 276, pp. 343–351 (2018)