

## Carbon Cloth을 이용한 이산화망간 슈퍼커패시터 특성 연구

이승진 · 김치훈 · 지택수\*

<sup>1</sup>전남대학교 전자컴퓨터공학부

## Characterization of manganese oxide supercapacitors using carbon cloth

Seung Jin Lee · Chihoon Kim · Taeksoo Ji\*

School of Electronics and Computer Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

### [요 약]

산업화의 급격한 진전으로 인한 에너지 소비가 세계적으로 증가되면서 새로운 에너지 저장 소자에 대한 개발의 필요성이 늘고 있으며, 이에 빠른 충·방전 시간과 반영구적으로 사용이 가능한 슈퍼커패시터에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구에서는 수열반응(Hydrothermal) 제조법을 이용하여 기판인 탄소섬유(carbon cloth)에 비정질의 이산화망간( $MnO_2$ )을 도포하여 슈퍼커패시터를 제작하였다. 탄소섬유에 Fe 이온이 도핑 된 이산화망간을 결합한 전극으로 이루어진 슈퍼커패시터의 특성 파악을 위해 전기주사현미경(SEM), X-ray 회절분석(XRD), 그리고 X-ray 분광 분석(EDX)을 실시하였다. 또한, 1 M의  $Na_2SO_4$  전해질에서 순환전압전류법(Cyclic Voltammetry)과 정전류충전법(Galvanostatic charge-discharge)을 통해 슈퍼커패시터의 전기화학적 특성을 조사하였으며, 이를 통해 전류밀도 1 A/g에서 정전용량이 163 F/g 임을, 그리고 1000 회의 충·방전 후 수명 측정 시에 안정적으로 87.34%가 유지됨을 확인하였다.

### [Abstract]

Global energy consumption is rapidly increasing yearly due to drastic industrial advances, requiring the development of new energy storage devices. For this reason, supercapacitors with fast charge-discharge, long life cycle and high power density is getting attention, and have been considered as one of the potential energy storage systems. In this research, we developed a supercapacitor that consists of amorphous manganese oxide( $MnO_2$ ) electrodes deposited onto carbon cloth substrates using the hydrothermal method. The Fe-doped amorphous  $MnO_2$  samples were characterized by X-ray diffraction(XRD), Energy Dispersive X-ray spectroscopy(EDX), as well as scanning electron microscopy(SEM). The electrochemical analysis of the prepared samples were performed using cyclic voltammetry and galvanostatic charge-discharge measurements in 1M  $Na_2SO_4$  electrolyte. The test results demonstrate that the supercapacitor based on the Fe-doped amorphous  $MnO_2$  electrodes has a specific capacitance as high as 163F/g at 1A/g current density, and good cycling stability of 87.34% capacitance retention up to 1000 cycles.

색인어 : 에너지 저장 소자, 슈퍼커패시터, 의사커패시터, 이산화망간, 카본섬유

Key word : Energy storage device, Supercapacitor, Pseudocapacitor, Manganese oxide, Carbon cloth

<http://dx.doi.org/10.9728/dcs.2017.18.6.1199>

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.

Received 21 September 2017; Revised 09 October 2017

Accepted 25 October 2017

\*Corresponding Author; Taeksoo Ji

Tel: +82-62-530-1807

E-mail: [tji@jnu.ac.kr](mailto:tji@jnu.ac.kr)

## I. 서론

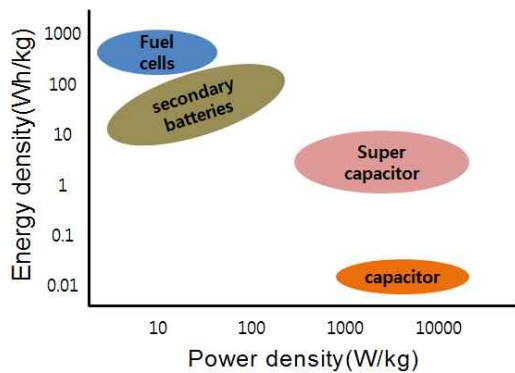


그림 1. 에너지 저장 소자의 파워 vs. 에너지 밀도 특성  
 Fig. 1. Power vs. Energy density characteristics of energy storage devices

산업의 발달로 인한 전기 소비량의 급격한 증가로 에너지 공급에 큰 차질이 발생하고 있고, 많은 화석연료 사용으로 인한 환경 문제가 이슈화 되고 있어서, 점차 신재생 에너지 분야로 이목이 몰리고 있는 실정이다[1], [2]. 이에 더불어, 이러한 신재생 에너지를 안정적으로 저장할 수 있는 소자에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데[3], 대표적인 예로 리튬이온, 니켈-카드뮴과 같은 이차전지와 슈퍼커패시터가 있다. 그림 1은 이차전지와 슈퍼커패시터를 비롯한 에너지 저장 소자의 에너지 밀도와 전력 밀도간의 비교 그래프이다[4]. 기존에 많이 사용되었던 이차전지의 경우 높은 에너지 밀도와 낮은 자가 방전, 그리고 다양한 범위의 온도에서 동작하는 장점이 있는 반면, 낮은 효율과 짧은 수명으로 인한 교체비용 증가, 느린 충전 속도로 인하여 에너지 사용변화에 따른 실시간 공급에 어려움이 따른다[5]. 한편, 다른 저장장치인 슈퍼커패시터의 경우 빠른 충·방전속도와 긴 수명, 높은 효율과 고출력 밀도 성능을 보이는데 비해, 낮은 에너지 밀도라는 단점이 있어, 그 부분을 보완하고자 많은 연구가 진행되고 있는 중이다[6], [7]. 최근 연구에 따르면 배터리 수준의 에너지 밀도를 갖는 슈퍼커패시터 제작이 보고되고 있으며, 이로써 에너지 저장장치분야에서 슈퍼커패시터의 그 활용 범위가 점차 확대되고 가고 있는 실정이다[8]-[10].

슈퍼커패시터(Supercapacitor)는 정전용량이 큰 커패시터로 울트라커패시터(Ultracapacitor) 또는 전기화학식 커패시터(Electrochemical capacitor)라 불리우며, 에너지를 저장할 수 있는 소자로서 화학반응을 이용하는 기존의 이차전지와는 다르게 전극과 전해질 계면에서 이온의 이동이나 표면화학반응에 의한 충전현상을 이용한다. 수초 단위의 급속 충·방전 시간과 높은 충·방전 효율, 그리고 반영구적인 수명 특성으로 인해 배터리 대체용으로 많은 주목을 받고 있다. 슈퍼커패시터는 음극과 양극으로 구성되는 전극

(Electrode), 전해질(Electrolyte), 집전체(Current collector), 분리막(Separator)의 기본 구조로 이루어져 있다. 단위 셀 전극의 양단에 수 V의 전압을 인가시켜 전해액 내의 이온들이 전기장을 따라 이동하며 전극표면에 흡착되어 발생하는 전기화학적 매커니즘으로 작동하게 된다[4]. 슈퍼커패시터는 전극 및 작동 원리에 따라 전기 이중층 커패시터(EDLC, Electric Double Layer Capacitor), 유사 커패시터(Pseudocapacitor), 하이브리드 커패시터(Hybrid capacitor)로 구분된다. 유사 커패시터는 전기 이중층 커패시터와는 달리 전극 산화환원(Redox) 반응에서 오는 화학반응을 전기에너지로 저장하는 커패시터이다. 의사 커패시터 또는 Redox 커패시터라고도 불리며, 전극 표면에 형성된 전기 이중층에만 전하를 저장하는 EDLC에 비해 전하를 전극 표면 근처까지 전하를 저장할 수 있으므로 상대적으로 저장 용량이 크다. 전기 이중층 커패시터에 비해 충전 용량이 3~5배 정도로 크지만 재료 대부분이 고가의 금속 산화물이고, 산화 환원 방식의 동작으로 인해 내부 저항이 높아져 출력 밀도의 저하가 발생하는 단점을 보인다[11]. 주로 쓰이는 물질은 금속 산화물로 이산화망간, 루테튬 산화물, 산화코발트 및 산화니켈 등이 있으며, 전도성 고분자 역시 유사커패시터의 전극 재료로 쓰인다.

본 연구에서는 수열합성 방법을 이용하여 비정질의 이산화망간 유사 커패시터(PseudoCapacitor)의 전극을 제작하였는데, Fe 이온을 첨가하여 그 정전용량을 향상시키는 연구를 진행하였다[12], [13]. 이산화망간은 루테튬보다 가격이 저렴하고 유해 성분이 없어 슈퍼커패시터의 전극 물질로 많이 사용되고 있지만, 다른 금속 산화물보다 낮은 전도성으로 인해 정전 용량의 손실이 커 탄소 물질 첨가 등을 통한 효율 향상의 연구가 활발히 진행되고 있다[14], [15].

실험에서는 높은 전도성 및 유연성을 지니어 전기, 전자, 재료 소자에 많이 쓰이고 있는 복합 소재인 탄소섬유를 기관으로 사용하고, 과망간산 칼륨(KMnO<sub>4</sub>)과 염화철 4수화물(FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O)을 이용, 수열합성을 통해 비정질의 Fe-MnO<sub>2</sub>를 기관 위에 도포하였다. 비정질의 이산화망간은 이온 이동저항을 낮추어 가장 좋은 유사 커패시터의 효과를 보이는 것으로 알려져 있다 [16]-[18]. 제조된 비정질의 이산화망간 전극은, 이후 3 전극셀을 이용하여 슈퍼커패시터로서의 전기적 특성을 확인하였다.

## II. 실험 방법

### 2-1 비정질의 Fe-doped MnO<sub>2</sub> 합성

본 연구에서의 비정질 이산화망간 슈퍼커패시터 전극은 하기에 기술되어 있는 수열합성 방법을 통해 제작되었다. 먼저, KMnO<sub>4</sub> 0.608 g을 DI Water 40 ml에 넣은 후 상온에서 350 rpm으로 30 분 교반시킨다. 비정질의 이산화망간이 우수한 전기 전도성을 가지고 있지만 물질의 특성상 큰 효과의 전도성을 기대하기 힘들기 때문에 일반적으로 Fe를 도핑하여 전도성을 향상

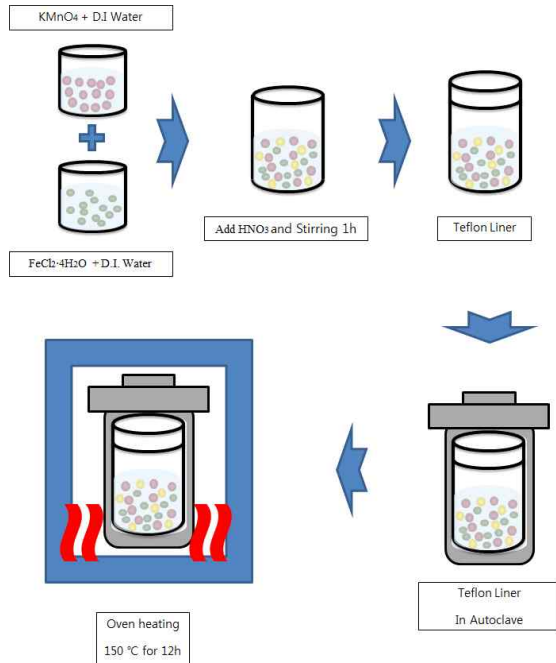


그림 2. 수열합성을 이용한 비정질의 Fe-doped 이산화망간 제조 방법

Fig. 2. Schematic diagram of Fe-doped Amorphous  $MnO_2$  Fabrication using hydrothermal method

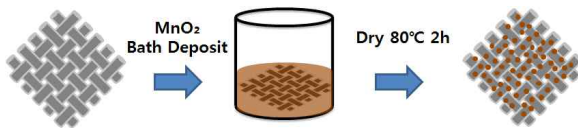


그림 3. 탄소섬유 기반에 이산화망간 혼합 슬러리 도포  
Fig. 3. Bath deposition of  $MnO_2$  slurry on carbon cloth

시켜 주는데[12], [13], 이를 위해  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$  0.994 g을 DI Water 40 ml에 섞고 마찬가지로 상온에서 350 rpm으로 30분 교반하여 용액을 마련한다. 준비된 두 용액을 서로 섞어 다시 교반기에 300 rpm으로 60분정도 교반시켜주고, 이때 질산 용액 5 ml를 천천히 떨어뜨려 용액에 잘 혼합 되도록 한다. 이렇게 교반시킨 용액을 Teflon Liner에 넣고 Autoclave에 봉인 후 전기오븐에 넣고 150 °C에서 12시간 동안 열을 가해 비정질 이산화망간 파우더를 합성한다.

그림 2는 Fe 이온이 도핑된 비정질 이산화망간의 제조 과정을 보여주고 있다.  $KMnO_4$ 는 수열합성과정에서 비정질의  $MnO_2$ 로 전환되며  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ 에서는  $Fe^{2+}$  이온이 생성되어  $MnO_2$ 에 도핑 되어진다. 이렇게 만들어진 결과물은 이후 원심분리기와 DI Water를 이용하여, 수차례 세척 후 건조를 통해 이산화망간 파우더 형태로 만든다. 도핑된 이산화망간 파우더를 전도성 물질인 Carbon Black(US Research Nanomaterials Inc.)과 바인더 역할인 PVDF(Polyvinylidene fluoride, Alfa Aesar)와 70: 25: 5의 비율로 섞고, 이 혼합물을 1-Methyl-2-pyrrolidone(NMP, Alfa Aesar) 용매제 5ml를 사용하

여 슬러리로 만든 후 그림 3과 같이 기판이 되는 탄소섬유(CeTech)에 도포한다. 이후 기판을 80 °C에서 2 시간 동안 건조시킨다.

## 2-2 비정질의 Fe-doped $MnO_2$ 특성 확인

제작된 이산화망간의 결정구조는 X-ray diffraction(XRD, Ultima III, Rigaku)를 이용하여 비정질 구조로 제작이 되었는지 확인하였다. Scan range 10~90 degree, axis는 2 theta로, 측정 전압과 전류는 40 kV와 40 mA의 분석 조건으로 진행하였다. 또한, 고분해능 전기 주사 현미경(HR-SEM, High Resolution Scanning Electron Microscopy, SU-70, Hitachi)을 통해 표면 형상을 확인하였으며, 전기 화학 특성 파악을 위한 순환전압 전류법(Cyclic Voltammetry)과 정전류 충전법(Galvanostatic charge-discharge)은 Potentiostat (WMPG 1000S, WonAtech)을 이용하여 확인하였다. 측정 시 1 M의 황산나트륨( $Na_2SO_4$ ) 전해질을 사용하였으며, 3 전극셀을 이용하여 -0.2~0.8 V의 전위범위에서 5, 10, 20, 50, 100 mV/s의 주사속도를 통해 측정하였다. 또한 1, 2, 5 A/g의 전류밀도에서의 충전전 분석을 통해 슈퍼커패시터로서의 특성을 조사하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 3-1 XRD 분석

이산화망간 제조 시 온도, pH 상태, 혼합 물질에 따라  $MnO_2$  결정구조가 변경되거나 다른 화학식을 갖는 망간산화물이 생성될 수 있으며[19], 비정질의 이산화망간의 결정구조가 성공적으로 합성되었는지 확인하기 위해 XRD 분석을 진행 하였다. X-ray 조사 시 결정 구조에 부딪히게 되면 그 중 일부는 회절을 일으키게 되고, 입사하는 X-ray의 입사각도를 연속적으로 변화시키면 강도가 다른 복수의 회절된 peak를 관찰할 수 있는데,

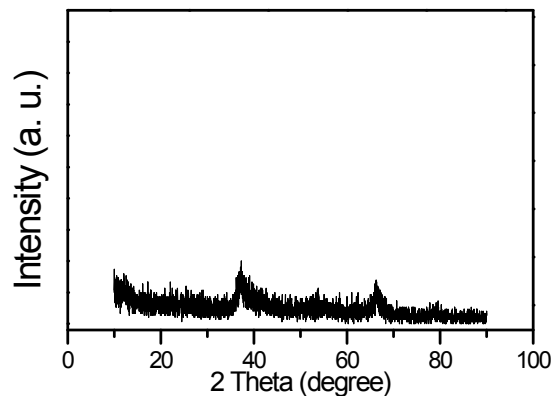


그림 4. 비정질의 이산화망간의 XRD 패턴 분석  
Fig. 4. XRD pattern of amorphous phase  $MnO_2$

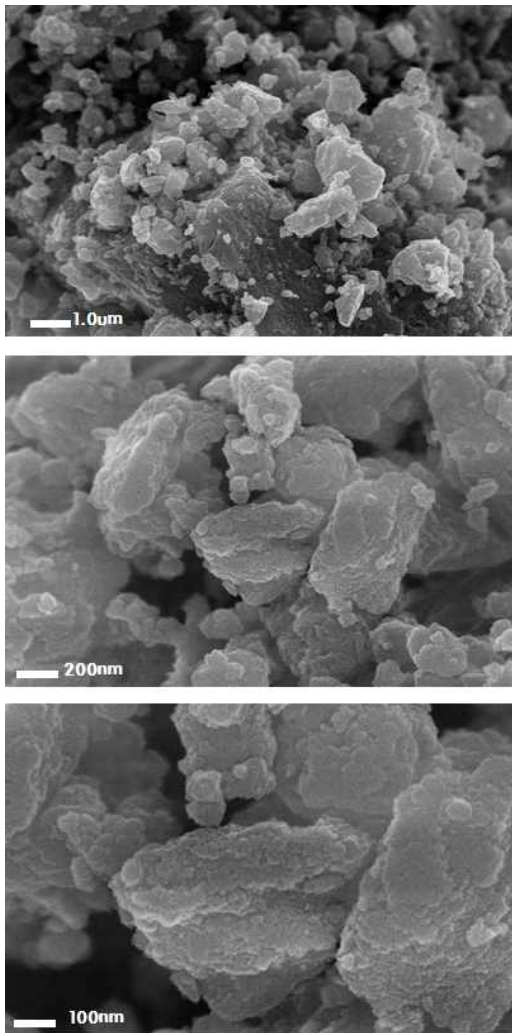


그림 5. 비정질의 이산화망간의 전기주사현미경 표면  
 Fig. 5. SEM image of Amorphous phase MnO<sub>2</sub> powder

결정 구조를 갖는 물질의 경우 그 구조에 따라 peak 위치가 상이하게 형성된다[20]. 그림 4는 본 실험에서 합성된 이산화망간의 XRD 패턴 결과를 보여주는데 특정한 peak이 관찰되지 않으며, 따라서 제조된 이산화망간은 비정질의 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

**3-2 전기주사 현미경 표면 및 EDX 분석**

제작한 Fe 이온이 도핑 된 이산화망간의 경우 입자가 수십~수백 nm 크기이기 때문에 일반적인 현미경으로 관찰하기엔 어려움이 있어 분해능이 우수한 전기주사 현미경을 이용하여 표면을 관찰하였다. 그림 5는 제작된 이산화망간을 파우더 형태로 만든 후 전기주사 현미경을 통해 관찰해 얻은 이미지 결과인데 결정 구조가 비정질이기때 일정한 패턴이 관찰되지 않음을 알 수 있다.

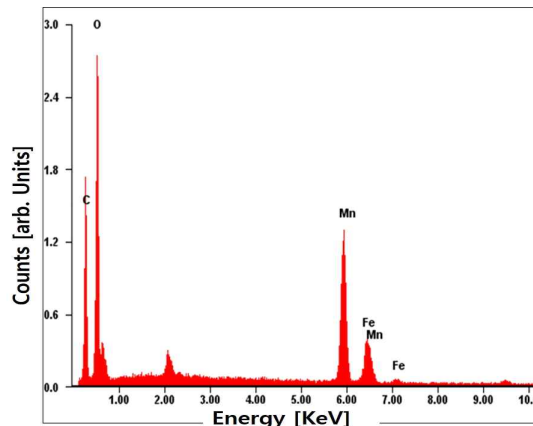


그림 6. 비정질의 이산화망간의 EDX 분석  
 Fig. 6. EDX analysis of amorphous MnO<sub>2</sub>

Fe 도핑을 확인하기 위해 원소분석이 가능한 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy(EDX)을 이용하여 시료의 원자 종류를 확인하였다. EDX 분석에서 전류를 인가시켜 생성된 전자를 가속화시켜 시료와 충돌하게 하면, 시료 내부로부터 전자가 입사전자에 의해 외부로 튀어나오게 된다. 이때 생성되는 빈자리로 상위 궤도에 있는 전자가 천이되어 원자를 안정화시키는 과정이 발생하며, 이러한 과정에서 두 에너지 궤도의 차이만큼 X-ray 형태로 발산되는 에너지를 측정함으로써 시료의 원소 종류 분석이 가능하게 된다. 그림 6은 이러한 측정을 통해 제작된 샘플의 원소 구성을 파악한 것이다. 시료에 망간 성분과 옥사이드 성분이 포함된 것을 알 수 있으며, 카본 성분이 검출된 것은, EDX 분석 시 시료를 부착하기 위해 사용한 카본 테이프 때문인 것으로 유추된다. Fe 이온 역시 검출되었는데, 이를 통해 Fe이 도핑된 상태의 이산화망간이 조성되었다는 것을 확인할 수 있다.

**3-3 전기화학적 특성 분석**

수열합성을 통해 제조된 전극 샘플들의 전기적 특성 분석을 실시하였다. 주사 속도를 변화시켜가며 Cyclic voltammetry 분석을 실시하였으며, Galvanostatic charge-discharge를 통해 슈퍼커패시터스의 용량을 확인하였다. 마지막으로 제작된 전극의 신뢰성 확보를 위해 1000 Cycle의 충-방전을 통해 내구성을 확인하였다.

**1) Cyclic voltammetry**

Cyclic Voltammetry(CV), 순환 전압전류법으로 작업 전극의 전위를 일정한 속도로 순환시켜 전류를 측정하는 방법이다. 이 분석 방법으로 최종적으로 만들어진 샘플을 3 전극셀을 이용하여 측정하였다. 전극셀의 전해질은 1M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액을 사용하였으며 측정은 상온에서 진행되었다. 측정은 주사속도를 5, 10, 20, 50, 100 mV/s로 변화시켜가며 실시하였으며, 그림 7이 전극 샘플의 그 CV 곡선 결과를 나타낸 것이다. 가장 이상적인



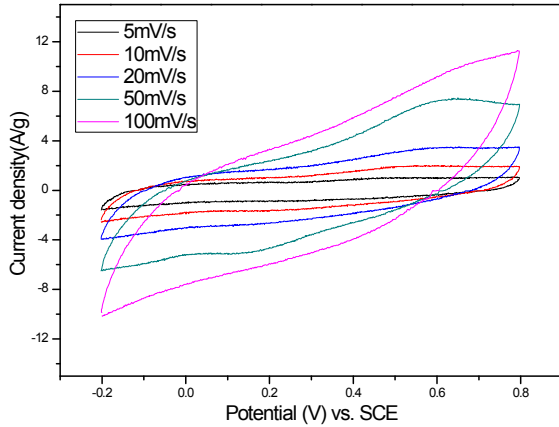


그림 7. 전극샘플의 CV 곡선  
Fig. 7. CV curves of electrode sample

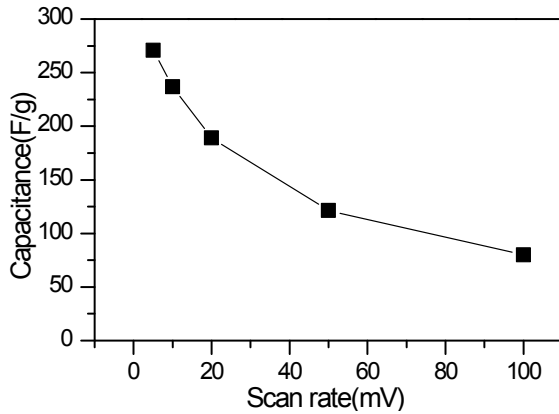


그림 8. CV 곡선을 이용한 전극샘플의 정전용량 그래프  
Fig. 8. Capacitance graph of electrode sample using CV curves

충방전 곡선은 직사각형의 형태이지만 샘플 제작에 이용된 물질과 저항 특성에 따라 곡선의 모양은 변하게 된다. 사용된 수용액  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  전해질에서는  $\text{Na}^+$  이온이  $\text{MnO}_2$  표면에서의 흡탈착 작용에 의해 CV 곡선 형태가 만들어진다. 이 충방전 곡선을 이용하여 비정전용량(Specific capacitance)을 계산할 수 있으며, 구하는 식은 다음과 같다.

$$C_s = \frac{1}{mv\Delta V} \int I(V)dt \quad (1)$$

여기서,  $C_s$ 는 비정전용량(F/g)이며  $m$ 은 증착된 물질의 질량(g),  $v$ 는 주사속도(Scan rate, V/s),  $\Delta V$ 는 전위범위(V),  $\int I(V)dt$ 는 CV곡선의 적분을 통해 얻은 전하량을 나타낸 것이다. 이 식을 이용해 구한 전극 정전용량이 그림 8에 나타나 있는데, 주사속도 5, 10, 20, 50, 100 mV/s에서 각각 270, 236, 188, 121, 79 F/g의 값을 가지는 것을 알 수 있다.

## 2) Galvanostatic charge-discharge

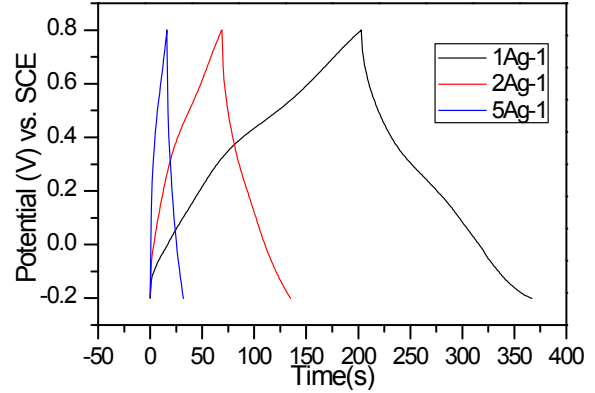


그림 9. 전극샘플의 Galvanostatic charge-discharge 그래프  
Fig. 9. Galvanostatic charge-discharge graph of electrode sample

Galvanostatic charge-discharge은 일정한 전압을 통해 순환시켜 전류를 측정하는 분석법과 달리 일정 전류를 인가하여 시간에 따른 전압의 변화를 측정하는 방법이다. 변화하는 전압의 범위를 제어하여 충·방전이 연속적으로 발생하게 된다. 본 측정에서는 각각의 샘플에 1, 2, 5 A/g의 전류밀도를 주어 그 충전과 방전 시간을 확인하였다. 그림 9는 전류밀도에 따른 충방전-시간 그래프를 보여주는데 그 결과로부터 다음 식을 통해 정전용량을 계산할 수 있다.

$$C_s = \frac{i\Delta t}{m\Delta V} \quad (2)$$

여기서  $i$ 는 인가된 전류(A),  $\Delta t$ 는 방전될 때 소요되는 시간(s),  $m$ 는 질량(g),  $\Delta V$ 는 전위범위(V)이며, 이 식을 통해 전류밀도 1, 2, 5A/g에서 163.79, 132, 80 F/g의 정전용량 값을 얻을 수 있었다.

## 3) 수명특성 분석

제작된 전극 샘플의 수명 안정성을 측정하기 위해 Cycle 테스트를 진행하였으며, 충방전의 주사속도를 100 mV/s로 1,000회 반복하여 그 결과를 확인하였다. 그림 10(a)는 전극 샘플들의 1회째와 마지막 1,000회째의 순환전압전류 곡선을 나타낸 것이고, 그림 10(b)는 각 샘플들을 100회 단위로 변화량을 백분율로 표시한 그래프이다. 전극샘플은 1,000회까지 일정하게 감소하여 87.34%의 용량 유지율을 보임을 확인하였다.

## IV. 결론

본 연구에서는 슈퍼커패시터 중 축전용량이 큰 유사커패시터의 전극 물질로써 이산화망간을 합성 제조하였다. 전기 전도성이 가장 좋은 비정질의 형태의 결정구조를 갖는 이산화망간 전극 물질을 수열합성법을 통해 제조하였으며, 또한 정전용량

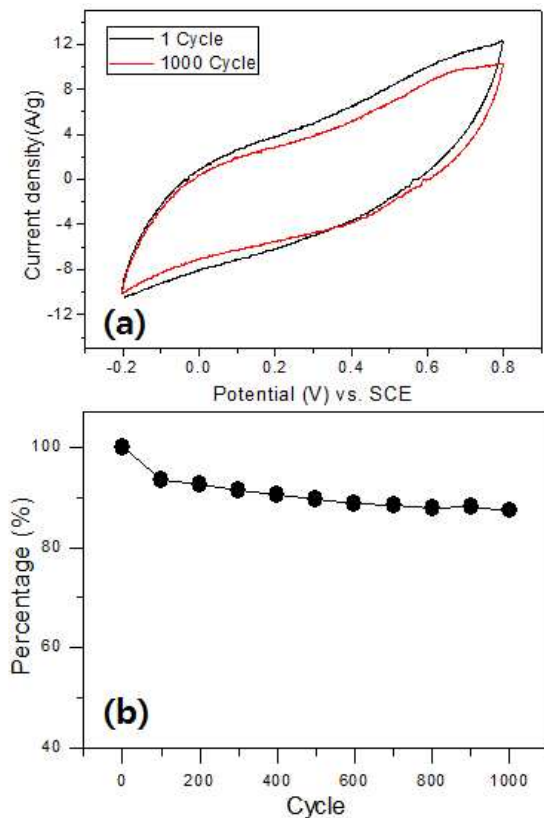


그림 10. (a) 전극샘플의 수명 측정, (b) 수명 측정 시 유지율  
**Fig. 10.** (a) Life cycle test of electrode sample, (b) cycle performance of sample

을 향상시키기 위해 Fe 이온을 도핑 하였다. 전극 기판은 금속과 같은 특성을 가지면서도 가볍고 유연성이 큰 복합물질인 탄소섬유를 이용하였다. 활성 물질인 비정질 이산화망간, 전도성 물질인 Carbon black, 바인더인 PVDF를 비율 70:25:5로 전극물질을 기판 위에 코팅하였으며 전류밀도 1, 2, 5 A/g에서 163.79, 132, 80 F/g의 정전용량을 확인하였다. 충·방전을 통한 내구성 테스트에선 1000 회의 충·방전이 끝난 후 처음에 비해 87.34%의 안정적인 용량 유지율을 보여 주었다. 이러한 결과를 통해, 제조된 이산화망간 전극의 슈퍼커패시터로서의 높은 동작 성능을 확인하였으며, 향후 상업화로의 높은 활용도를 충분히 기대할 수 있다.

### 감사의 글

이 논문은 2016년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

- [1] C. Xu, F. Kang, B. Li, and H. Du, "Recent progress on manganese dioxide based supercapacitors," *Journal of materials research*, Vol. 25, No. 08, pp. 1421-1432, Aug 2010.
- [2] Y. Wang, J. Guo, T. wang, J. Shao, D. Wang, and Y. W. Yang, "Mesoporous transition metal oxides for supercapacitors" *Nanomaterials*, Vol. 5, No. 4, pp. 1667-1689, Oct 2015.
- [3] M. Beidaghi, and Y. Gogotsi, "Capacitive energy storage in micro-scale devices : recent advances in design and fabrication of microsupercapacitors," *Energy & Environmental Science*, Vol. 7, No. 3, pp. 867-884, Jan 2014.
- [4] V. S. Bagotsky, A. M. Skundin, and Y. M. Volfkovich, *Electrochemical power sources: batteries, fuel cells, and supercapacitors*, New York, John Wiley & Sons, 2015.
- [5] J. Shim, R. Kosteki, T. Richardson, X. Song, and K. A. Striebel, "Electrochemical analysis for cycle performance and capacity fading of a lithium-ion battery cycled at elevated temperature," *Journal of power sources*, Vol. 112, No. 1, pp. 222-230, Oct 2002.
- [6] Z. Tang, C. H. Tang, and H. Gong, "A High Energy Density Asymmetric Supercapacitor from Nano-architected Ni(OH)<sub>2</sub>/Carbon Nanotube Electrodes," *Advanced Functional Materials*, Vol. 22, No. 6, pp. 1272-1278, Mar 2012.
- [7] C. Liu, Z. Yu, D. Neff, A. Zhamu, and B. Z. Jang, "Graphene-based supercapacitor with an ultrahigh energy density," *Nano letters*, Vol. 10, No. 12, pp. 4863-4868, Nov 2010.
- [8] J. Yan, Q. Wang, T. Wei, and Z. Fan, "Recent advances in design and fabrication of electrochemical supercapacitors with high energy densities," *Advanced Energy Materials*, Vol. 4, No. 4, pp. 1300816, Mar 2014.
- [9] H. Jiang, C. Li, T. Sun, and J. Ma, "A green and high energy density asymmetric supercapacitor based on ultrathin MnO<sub>2</sub> nanostructures and functional mesoporous carbon nanotube electrodes", *Nanoscale*, Vol. 4, No. 12, pp.807-812, Feb. 2012.
- [10] J. Kim, B. Kim, and S. Choi, "2D LiDAR based 3D Pothole Detection System," *The Journal of Digital Contents Society*, Vol. 18, No. 5, pp. 989-994, Aug. 2017.
- [11] X. Dong, W. W. Shen, J. Gu, L. Xiong, Y. Zhu, H. Li, and J. Shi, "MnO<sub>2</sub> embedded in mesoporous carbon wall structure for use as electrochemical capacitors," *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 110, No. 12, pp. 6015-6019 Jan 2006.
- [12] S. Wang, Q. Li, M. Chen, W. Pu, Y. Wu, and M. Yang,

“Electrochemical capacitance performance of Fe-doped  $\text{Co}_3\text{O}_4$ /graphene nanocomposite: investigation on the effect of iron,” *Electrochimica Acta*, Vol. 215, pp. 473-482, Oct 2016.

- [13] Z. Li, A. Gu, Z. Lou, J. Sun, Q. Zhou, and K. Y. Chan, “Facile synthesis of iron-doped hollow urchin-like  $\text{MnO}_2$  for supercapacitors,” *Journal of Materials Science*, Vol. 52, No. 9, pp. 4852-4865, May 2017.
- [14] M. Vangari, T. Pryor, and L. Jiang, “Supercapacitors: review of materials and fabrication methods,” *Journal of Energy Engineering*, Vol. 139, No. 2, pp. 72-79, Jun 2013.
- [15] L. Li, Z. A. Hu, N. An, Y. Y. Yang, Z. M. Li, and H. Y. Wu, “Facile synthesis of  $\text{MnO}_2$ /CNTs composite for supercapacitor electrodes with long cycle stability,” *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 118, No. 40, pp. 22865-22872, Sep 2014.
- [16] J. G. Wang, F. Kang, and B. Wei, “Engineering of  $\text{MnO}_2$ -based nanocomposites for high-performance supercapacitors,” *Progress in Materials Science*, Vol. 74, pp. 51-124, Oct 2015.
- [17] J. Zhi, O. Reiser, and F. Huang, “Hierarchical  $\text{MnO}_2$  Spheres Decorated by Carbon-Coated Cobalt Nanobeads: Low-Cost and High-Performance Electrode Materials for Supercapacitors,” *ACS applied materials & interfaces*, Vol. 8, No.13, pp. 8452-8459, Mar 2016.
- [18] M. Huang, F. Li, F. Dong, Y. X. Zhang, and L. L. Zhang, “ $\text{MnO}_2$ -based nanostructures for high-performance supercapacitors,” *Journal of Materials Chemistry A*, Vol. 3, No. 43, pp. 21380-21423, Jul 2015.
- [19] S. Devaraj, and N. Munichandraiah, “Effect of crystallographic structure of  $\text{MnO}_2$  on its electrochemical capacitance properties,” *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 112, No. 11, pp. 4406-4417, Feb 2008.
- [20] A. Taylor, *An introduction to X-Ray Metallograph*, New York, NY: John Wiley and Sons. Inc., 1945.



**김치훈(Chihoon Kim)**

2007년 : 전남대학교 수학과계학부 학사  
 2015년 : 전남대학교 대학원 전자컴퓨터 공학과 석사

※관심분야 : 반도체, 에너지 저장장치, 슈퍼커패시터, 센서 시스템



**지택수(Taeksoo Ji)**

1995년 : 연세대학교 물리학과 학사  
 1997년 : 연세대학교 물리학과 석사  
 2004년 : 펜실베이니아 주립대 공학 박사

2008년~2011년: 미국 아칸소 대학교 전기공학 조교수  
 2012년~현재: 전남대학교 전자컴퓨터공학과 교수  
 ※관심분야 : 반도체 광소자, 센서 시스템, 에너지 저장 시스템



**이승진(Seung Jin Lee)**

2014년 : 조선대학교 광기술공학과 학사  
 2017년 : 전남대학교 대학원 전자컴퓨터 공학과 석사

※관심분야 : 반도체, 레이저, 통신용 모듈, 에너지 저장장치, 슈퍼커패시터