J. Korean Powder Metall. Inst., Vol. 22, No. 2, 116-121, 2015
DOI: 10.4150/KPMI.2015.22.2.116

슈퍼 커패시터를 위한 WS_2-W-WC가 내장된 탄소나노섬유 복합체의 제조

이유진 · 안효진*
서울과학기술대학교 신소재공학과

Fabrication of WS_2-W-WC Embedded Carbon Nanofiber Composites for Supercapacitors

Yu-Jin Lee and Hyo-Jin Ahn*
Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea
(Received April 10, 2015; Revised April 16, 2015; Accepted April 21, 2015)

Abstract WS_2-W-WC embedded carbon nanofiber composites were fabricated by using electrospinning method for use in high-performance supercapacitors. In order to obtain optimum electrochemical properties for supercapacitors, WS_2 nanoparticles were used as precursors and the amounts of WS_2 precursors were controlled to 4 wt% (sample A) and 8 wt% (sample B). The morphological, structural, and chemical properties of all samples were investigated by means of field emission photoelectron spectroscopy, transmission electron microscopy, X-ray diffraction, and X-ray photoelectron spectroscopy. These results demonstrated that the embedded phases of samples A and B were changed from WS_2 to WS_2-W-WC through carbothermal reaction during carbonization process. In particular, sample B presented high specific capacitance (~119.7 F/g at 5 mV/s), good high-rate capacitance (~60.5%), and superb cycleability. The enhanced electrochemical properties of sample B were explained by the synergistic effect of the using 1-D structure supports, increase of specific surface area, and improved conductivity from formation of W and WC phases.

Keywords: Supercapacitors, Electrospinning, Composites, Carbon nanofibers, Tungsten

1. 서 론

전 세계적으로 화석연료의 고갈과 전자 기기 분야의 발달로 인하여 에너지를 안전하게 저장할 수 있는 에너지 저장장치에 대한 관심이 점점 더 급증하고 있다. 이러한 다양한 에너지 저장장치들 중에는 슈퍼 커패시터, 이차전지, 태양전지 및 연료전지 등이 현재 활발히 개발되고 있으며 이 중에서 특히 슈퍼 커패시터는 높은 출력 밀도(2-5 kW/kg), 빠른 충·방전 속도 및 장수명 등의 장점을 바탕으로 하이브리드 전기 자동차, 휴대용 전자 기기, UPS와 같은 보조 전원 등의 다양한 응용에 현재 적용되고 있는 차세대 에너지 저장장치이다[1, 2]. 슈퍼 커패시터의 주된 구성은 전극(electrode), 전해액(electrolyte), 집전체(current collector), 격리막(separator)으로 구성되어 있으며, 구동 원리와 사용되는 전극재료에 따라 크게 의사 커패시터(pseudocapacitors, PCs)와 전기 이중층 커패시터(electric double layer capacitors, EDLCs)로 분류된다. 먼저 의사 커패시터는 전극과 전해액의 계면에서 faradaic 반응을 이용한 빠른 산화·환원 반응을 통해 에너지가 저장되며 전극 재료로는 주로 전위금속 산화물(RuO_2, MnO_2, Co_3O_4), conducting polymers(polyanilines, polypyrroles, polythiophenes) 및 금속 황화물(CuS, NiS, MoS) 등이 이용된다. 의사 커패시터의 경우 화학반응을 이용하여 구동되기 때문에 전기 이중층 커패시터에 비해 용량이 3~4배 정도 높은 장점이 있지만 사용되는 전극재료가 고가라는 단점이 있다. 반면에 전기 이중층 커패시터는 전극과 전해액의 계면에서 전해

*Corresponding Author: Hyo-Jin Ahn, **TEL:** +82-2-970-6622, **FAX:** +82-2-973-6657, **E-mail:** hjahn@seoultech.ac.kr

액 내의 이온이 정전기적으로 흡착되어 전기적 이중층을 형성하고, 형성된 전기적 이중층에 전하를 축적함으로써 에너지가 저장되는 원리를 가지고 있다. 전기 이중층 커패시터의 전극재료로는 탄소기반재료(활성탄, 그래핀, 탄소나노튜브, 탄소나노섬유)등이 사용되고 있다[3-5]. 하지만 전기 이중층 커패시터는 의사 커패시터와 달리 이온의 물리적 흡·탈착을 통하여 구동되므로 용량과 에너지 밀도가 낮다는 치명적인 단점이 있다. 따라서 전기 이중층 커패시터의 이러한 단점을 극복하기 위하여 많은 연구자들이 탄소기반재료-산화물을 기반으로 하는 복합체 전략을 채택하고 있다. 예를 들면, Li등은 그래핀/SnO_2 나노 복합체를 합성하여 43.4 F/g의 용량을 얻었으며, high-rate에서의 우수한 용량 유지율(~79%, 34.6 F/g at 1,000 mV/s) 및 전기전도도(0.023 S/cm)를 보고하였다[6]. Park 등은 화학증착법과 공침법을 이용하여 Fe_3O_4 나노 입자가 내장된 탄소나노튜브를 제조하였으며, 0.2 A/g에서 높은 용량(165.0 F/g) 및 우수한 수명 특성(초기 용량 대비 ~70.9% after 1000 cycle)을 나타내었다[7]. 이처럼 탄소기반재료-산화물 복합체의 제조는 탄소기반재료의 단점을 극복함과 동시에 비싼 고가의 산화물 전극재료의 사용량을 감소시킬 수 있는 좋은 전략이다. 하지만 지금까지 이러한 여러 복합체와 관련된 많은 연구들이 보고되었음에도 불구하고 WS_2-W-WC가 내장된 탄소나노섬유 기반 복합체에 대한 연구는 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 슈퍼 커패시터의 성능을 향상시키기 위해 전기방사법을 이용하여 WS_2-W-WC가 내장된 탄소나노섬유 기반 복합체를 합성하였다. 다양한 탄소 소재들 중에 탄소나노섬유를 선택한 이유는 전기방사법을 이용하여 비교적 쉽게 제조가 가능하고 비표면적이 넓은 장점이 있기 때문이다[8]. 더욱이 WS_2는 최근 연구가 활발하게 진행 중인 chalcogenide 계열의 물질로써 아직까지 연구가 많이 진행되지 않았기 때문에 본 연구를 통하여 슈퍼 커패시터 전극 물질로서의 가능성을 제시하고자 한다[9]. 특히 탄화과정을 거치면서 WS_2의 상변화가 발생하여 탄소나노섬유 내에는 WS_2, W 및 WC로 이루어진 삼상이 존재하게 된다. 이들 중에 WC는 열적 안정성, 내산성 및 촉매 활성이 매우 우수하므로 백금을 대신하는 촉매로 태양전지 및 연료전지 분야에 많이 응용되고 있으며, W의 경우는 전기전도도가 높기 때문에 복합체를 형성하였을 때 슈퍼 커패시터의 전기화학적 특성 향상에 영향을 미칠 것으로 예상된다[10, 11].

2. 실험 방법

WS_2-W-WC가 내장된 탄소나노섬유 복합체는 전기방사법을 이용하여 제조되었다. 이를 위해 먼저 용매(100 wt%)에 대하여 10 wt%에 해당하는 polyacrylonitrile(PAN, Mw = 150,000 g/mol, Aldrich) 고분자를 용매인 N,N-Dimethylformamide(DMF, Aldrich)에 첨가하고 교반기를 이용하여 5 시간 동안 용해하였다. 그런 다음 균일하게 용해된 PAN 용액에 평균 입자 크기가 ~90 nm인 tungsten(IV) sulfide (WS_2, Aldrich) 나노 입자를 각각 4 wt% 및 8 wt% 첨가하고 7 시간 더 충분히 용해시킴으로써 전기방사를 위한 용액을 준비하였다. 이 용액을 18 gauge needle이 장착된 syringe로 옮기고 syringe needle의 끝과 Al foil 포집판 사이 거리를 15 cm로 고정시켰다. 그런 다음 DC power supply(Powertron. Co., Ltd, Korea)을 이용해 ~10 kV에 해당하는 고전압을 인가하여 전기방사를 실시하였다. 이 때 전기방사에 영향을 미치는 변수인 syringe pump의 유량은 0.02 mL/h, 온도 및 습도는 각각 ~25°C 및 ~20%로 유지하였다. 포집된 as-spun 상태의 복합체를 280°C의 air 분위기 하에서 안정화시킨 후, 800°C의 고순도 질소 분위기 하에서 탄화(carbonization)시켜 WS_2-W-WC이 내장된 탄소나노섬유 복합체를 제조하였다. 이와 같은 과정을 통해 얻어진 복합체는 WS_2 나노 입자의 첨가량에 따라 본 논문에서 sample A(WS_2 4 wt%) 및 sample B(WS_2 8 wt%)로 언급될 것이다. 또한 비교하기 위하여 WS_2 나노입자를 첨가하지 않은 순수한 탄소나노섬유의 특성을 함께 분석하였다.

전기방사법을 통하여 제조된 WS_2-W-WC가 내장된 탄소나노섬유 복합체의 형태 및 구조 분석은 주사 전자 현미경(field-emission scanning electron microscopy, FESEM, Hitachi S-4800)과 투과 전자 현미경(transmission electron microscopy, TEM, JEOL 2100F)을 이용하였고, 결정구조 및 화학적 결합상태 분석은 X-선 회절분석(X-ray diffraction, XRD, Rigaku Rint 2500)과 X-선 광전자 주사법(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS, ESCALAB 250 equipped with an Al K_α X-ray source)을 통하여 수행되었다. 제조된 복합체의 전기화학적 특성은 potentiostat/galvanostat (PGST302N, Eco Chemie, the Netherlands)을 이용하여 규명하였다. 전기화학 평가는 작업전극(glassy carbon 전극), 기준전극(Ag/AgCl 전극), 및 상대전극(Pt wire)으로 구성된 three-electrode system을 통하여 0.0-1.0 V의 전압범위(Ag/AgCl(sat. KCl)) 에서 진행되었다. 슈퍼 캐패시터의 특성 평가를 위해 제조된 잉크는 활물질, acetylene black, polyvinylidene fluoride(PVDF)를 8:1:1의 무게비로 N-methyl-2-pyrrolidinone(NMP)안에 첨가하였다. 그런 다음 잉크 3 μL를 glassy carbon 전극 위에 코팅하고, 80°C의 drying oven 안에서 충분히 건조시킨 후 작업전극으로 이용하였다. 제조된 모든 전극은 5, 10, 30, 50 및 100 mV/s의

scan rate에서 전기화학 분석이 진행되었으며 전해질로는 1.0 M의 H_2SO_4 수용액을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1(a)-(d)은 탄소나노섬유, WS_2 나노입자, sample A 및 sample B의 FESEM 이미지를 보여준다. 그림 1(a)에서 탄소나노섬유는 약 141-207 nm의 평균 직경을 나타내며 그림 1(b)의 Aldrich 사에서 제조된 WS_2 나노입자는 평균 86-112 nm의 입자 크기를 보여주고 있다. 또한 용매(DMF) 대비 WS_2 나노입자가 각각 4 wt% 및 8 wt% 첨가된 sample A 및 sample B는 탄소나노섬유 내부에 내장되어 있는 형상을 하고 있으며 입자를 포함하는 나노섬유의 직경은 약 150-377 nm 및 약 152-566 nm 내에서 관찰되고 있다. 다시 말해, sample A 및 sample B는 나노섬유 내부에 존재하는 W 기반 나노입자로 인하여 기존의 탄소나노섬유와 비교하였을 때 평균 직경이 증가되었음을 알 수 있다. 또한 morphology 측면에서 보았을 때 탄소나노섬유, sample A 및 sample B는 모두 일차원 나노섬유 형상을 하고 있으나 전체적으로 매끈한 표면을 갖는 탄소나노섬유와 달리 sample A 및 sample B는 상대적으로 rough 한 표면이 보여진다. 이는 복합체 제조 시 첨가된 WS_2 나노입자에 기인하는 것으로 탄소나노섬유에 포함된 WS_2 나노입자의 무게비가 증가할수록 표면 roughness가 증가함을 알 수 있다. 따라서 그림 1(d)의 FESEM 이미지에서 보여지는 것처럼 sample B에서 가장 큰 응집체와 표면 roughness가 관찰되었다. 더욱이 슈퍼 커패시터의 경우 이러한 전극 재료의 표면 변화는 전기화학적 특성에도 영향을 끼칠 것이며 이것은 후에 토의 할 예정이다.

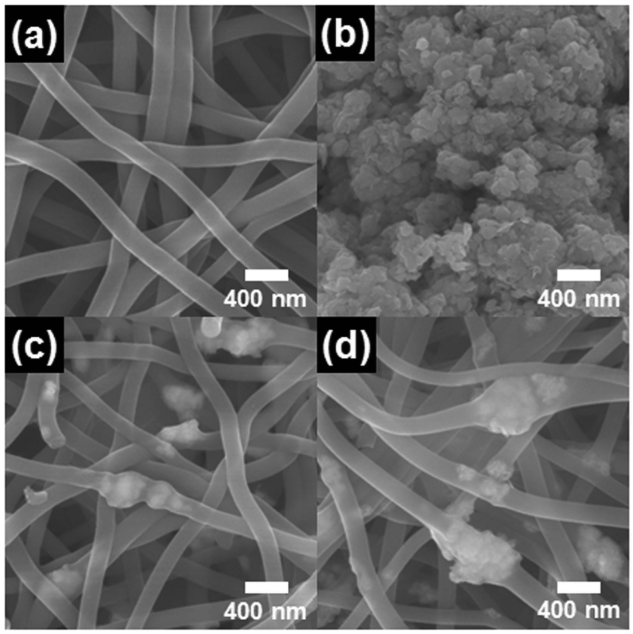

Fig. 1. FESEM images obtained from (a) conventional CNFs, (b) WS_2 nanoparticles, (c) sample A, and (d) sample B.

그림 2(a)-(c)는 800°C에서 탄화 과정 이후의 탄소나노섬유, sample A 및 sample B의 고배율 TEM 이미지들을 나타내고 있으며, 각 이미지의 좌측 하단에는 저배율 TEM 이미지들을 보여주고 있다. 그림 2(a)의 저배율 TEM을 통해서는 탄소나노섬유가 전체적으로 밝은 회색의 contrast가 균일하게 존재함을 알 수 있고, 고배율 TEM에서는 탄소나노섬유의 불규칙한 격자구조로 관찰되고 있다. 이것은 탄소나노섬유가 비정질 상으로 이루어져 있음을 의미한다. 반면에 그림 2(b)와 (c)의 저배율 TEM에서 보여지듯이 sample A와 sample B는 상대적으로 밝은 contrast를 갖는 탄소나노섬유와 상대적으로 어두운 contrast를 갖는 나노입자들이 함께 존재하고 있다. 이를 통해 sample A 및 sample B의 나노입자가 각각 약 93-384 nm 및 131-459 nm의 범위 내에서 다양한 크기와 모양으로 응집(agglomeration)되었음을 알 수있다. 더욱이 고배율 TEM 이미지에서는 탄소나노섬유가 각각의 W 기반 나노입자를 3-6 nm의 두께로 감싸는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들은 FESEM 분석 결과와도 잘 일치한다. 그러므로 우리는 제조된 복합체들의 결정 구조 및 화학적 결합 특성들을 규명하기 위하여 XRD 및 XPS 분석을 수행하였다.

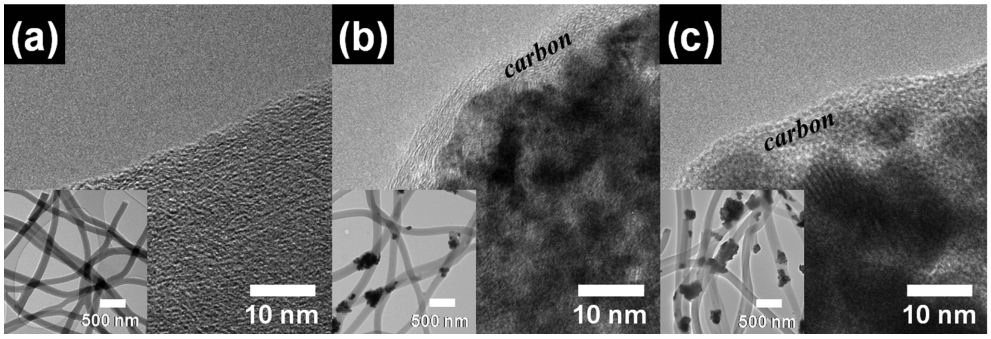

Fig. 2. TEM images obtained from (a) conventional CNFs, (b) sample A, and (c) sample B. Insert of Fig. 2 shows low-magnification TEM images obtained from conventional CNFs, sample A, and sample B.

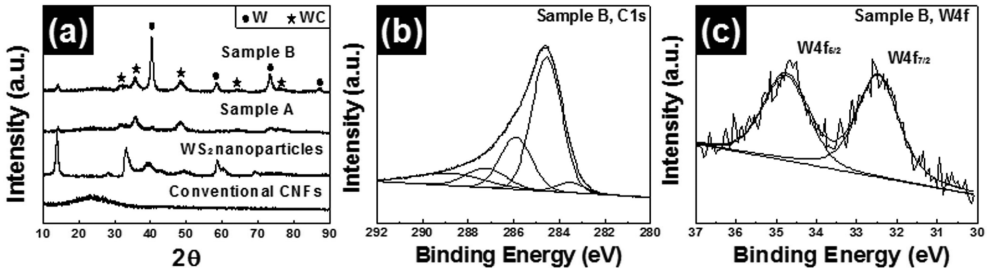

Fig. 3. (a) XRD data of conventional CNFs, WS_2 nanoparticles, sample A, and sample B. XPS spectra of (b) C1*s* and (c) W4*f* core levels obtained from sample B.

그림 3(a)은 모든 샘플의 XRD 회절 패턴을 나타낸다. 탄소나노섬유는 25° 부근에서 넓고 완만한 회절 패턴이 관찰되었는데 이것은 (002) plane과 관련된 graphite 특성을 가지고 있음을 의미한다. 또한, WS_2 나노입자의 경우 14.3°, 33.6°, 39.5°, 49.7°, 58.5° 및 60.5°에서 각각 (002), (101), (103), (105), (110) 및 (112) planes에 해당하는 회절 패턴들이 보여지고 있으며 이 패턴들은 $P6_3/mmc$ [194]의 공간군을 갖는 hexagonal 구조(JCPDS card No. 82-2417)와 일치한다. 하지만 탄화 과정 이후에 sample A와 sample B는 14.3° 및 33.6°에서 WS_2 나노입자와 관련된 회절 패턴들이 관찰되며 동시에 WC와 W상의 회절패턴들이 나타나고 있다. 다시 말하면, WC는 31.5°, 35.6°, 48.3°, 64.0° 및 73.1°에서 각각 (001), (100), (101), (110) 및 (111) planes에 해당하는 회절 패턴들이 관찰되므로 P6m2 [187]의 공간군을 갖는 hexagonal 구조(JCPDS card No. 73-0471)이고, W는 40.2°, 58.3°, 73.2° 및 87.1°에서 각각 (110), (200), (211) 및 (220) planes에 해당하는 회절 패턴들이 나타나므로 Im3m [229]의 공간군을 갖는 cubic 구조임을 확인하였다. 이것은 sample A와 sample B에 존재하는 WS_2일부가 탄화과정을 거치면서 WC와 W 로 상변화가 진행되었으며 결국 탄소나노섬유 내부에 WS_2-W-WC이 함께 존재하고 있음을 의미한다. 이러한 WS_2 의 상변화 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 280°C의 air 분위기에서 진행되는 안정화 단계에서 탄소나노섬유 내에 존재하는 WS_2 나노입자는 표면에서부터 O_2와의 반응이 시작되어 일부가 WO_3와 SO_x로 분리되며 SO_x는 기화된다[12]. 이후 진행되는 800°C 탄화과정에 WO_3에 의해 carbothermal 반응이 일어나기 때문에 WO_3에서 W로의 환원이 발생한다. 여기서 carbothermal 반응이란 고온에서 금속산화물과 탄소의 산화반응 엔트로피 차이로 인해 탄소의 일부가 CO gas로 변하면서 동시에 금속산화물의 환원이 일어나는 반응을 의미하며 이 경우의 반응식은 다음과 같다.

$$WO_3 + 3C \rightarrow W + 3CO(g)$$

이 때 탄소와 맞닿아 있는 일부 W은 탄소나노섬유의 탄소와 결합하여 WC 상을 갖게 된다[13]. 탄화과정에서의 일부 반응 온도 및 유지 시간이 완전한 반응을 하기에 충분하지 않았기 때문에 결과적으로 탄소나노섬유 내에 삼상(WS_2-W-WC)이 함께 존재하는 복합체 형성이 가능하였던 것으로 판단된다. 그림 3(b)와 (c)는 sample B의 XPS 스펙트럼을 나타내고 있다. 모든 스펙트럼의 peaks은 C 1*s* line(284.5 eV)을 기준으로 보정하였다. 이전 연구에 의하면 전기방사에 의해 제조된 탄소나노섬유의 C1*s* photoelectrons은 ~284.5 eV, ~286.0 eV, ~287.3 eV 및 ~288.9 eV에서 네 개의 작은 peaks로 나뉘어지며 이것은 탄소나노섬유의 표면에 C-C, C-O, C=O 및 COO^- 결합이 존재함을 의미한다[3]. Sample B의 경우 기존의 탄소나노섬유가 가지고 있는 작용기를 모두 가지고 있으면서 ~283.5 eV에서 peak가 추가적으로 관찰되고 있으며, W $4f_{5/2}$ 및 W $4f_{7/2}$ photoelectrons에 대한 XPS peaks는 ~34.7 eV 및 ~32.5 eV에서 나타나고 있는데 이것은 모두 W 및 C 원소가 WC로 존재하고 있음을 의미한다[14, 15]. 게다가 XPS 분석에서는 metallic W 및 sulfur(S)와 관련된 결합이 감지되지 않는데 이는 X-ray의 침투 깊이가 매우 작아 내부의 결합이 감지되지 않기 때문으로 판단된다. 따라서 FESEM, TEM, XRD 및 XPS를 토대로 WS_2-W-WC가 내장된 탄소나노섬유 복합체가 성공적으로 제조되었음을 확인하였다.

슈퍼 커패시터를 위한 WS_2-W-WC 나노입자가 내장된 탄소나노섬유 복합체의 전기화학적 특성은 순환 전압-전류법을(cyclic voltammetry, CV) 이용하여 수행하였다. 각 전극들의 전기화학적 특성평가는 삼극셀을 이용하여 전압범위 0.0-1.0 V(vs. Ag/AgCl)에서 scan rate 5, 10, 30, 50 및 100 mV/s로 진행되었다. 모든 전극들의 용량은 다음 식을 통하여 계산되었다[16]:

$$C = (q_a+q_c) / (2\ mV)$$

위 식에서 q_a와 q_c는 anodic 영역과 cathodic영역의 전하량을 나타내었고, m과 V는 각각 질량과 전압범위를 의미한다. 그림 4(a)-(d)는 탄소나노섬유, WS_2 나노입자, sample A 및 sample B의 순환 전환-전류법 커브를 나타낸다. 그림 4(a)

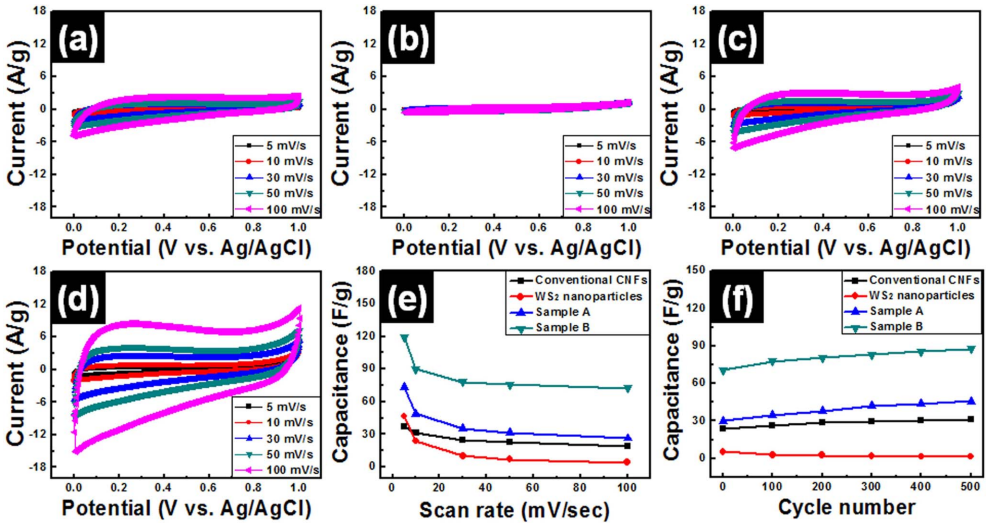

Fig. 4. Cyclic voltammetry of (a) conventional CNFs, (b) WS_2 nanoparticles, (c) sample A, and (d) sample B characterized at scan rate from 2 mV/s to 100 mV/s in the potential range 0.0-1.0 V. (e) Capacitances of all samples derived from their CVs. (f) Cycleability of conventional CNFs, WS_2 nanoparticles, sample A, and sample B measured up to 500 cycles.

에서 보여지듯이 탄소나노섬유는 redox peak이 존재 하지 않는 평평한 커브를 나타나는 전형적인 전기 이중층 커패시터의 특성을 보여주고 있다. Sample A 및 sample B의 경우도 탄소나노섬유와 마찬가지로 전기 이중층 커패시터 특성을 갖는 커브가 관찰되고 있다. 이는 WS_2-W-WC의 표면이 탄소나노섬유에 완전히 감싸진 채로 존재하기 때문에 이들이 직접적인 산화·환원 반응에는 참여하지 못하여 탄소나노섬유와 유사한 순환 전압-전류법 커브가 나타나는 것으로 판단된다. 게다가 그림 4(a)-(d)의 결과를 위 식에 적용하여 계산하면 탄소나노섬유, WS_2 나노입자, sample A 및 sample B의 용량은 5 mV/s의 scan rate 에서 각각 ~37.0 F/g, ~46.5 F/g, ~73.0 F/g 및 ~119.7 F/g로 나타났다. 특히 모든 전극들 중에서 sample B가 가장 높은 용량을 보였다. 다시 말하면 sample B는 탄소나노섬유에 비해 약 3.2 배, WS_2 나노입자에 비해 약 2.5배 높은 용량을 가지고 있음을 의미한다. 그림 4(e)는 그림 4(a)-(d)을 통하여 얻어진 모든 전극들의 scan rate에 대한 용량 유지율을 나타내고 있다. 탄소나노섬유, WS_2 나노입자, sample A 및 sample B의 100 mV/s에서의 용량은 각각 ~19.4 F/g, ~4.1 F/g, ~26.4 F/g 및 ~72.5 F/g이므로 각 샘플의 100 mV/s의 high-rate에서의 초기 용량 유지율이 각각 ~52.4%, ~8.8%, ~36.1% 및 ~60.5%임을 알 수 있다. 일반적으로 scan rate이 증가할수록 전극과 전해액 간의 이온 접근성이 저하되므로 용량도 함께 저하 된다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 sample B는 우수한 용량 유지율을 보여주고 있는데 이는 sample B 안에 존재하는 metallic W상의 존재 때문으로 판단된다. 이러한 W상은 카본나노섬유의 전기전도도 향상에 영향을 미치게 되고 이것은 결국 향상된 용량 유지율에 영향을 끼치게 된다. 그림 4(f)는 모든 전극들의 수명 성능 데이터를 보여준다. WS_2 나노입자의 경우 500 cycle까지 초기 용량 대비 ~24%에 해당하는 급격한 용량 감소를 보인다. 하지만 탄소나노섬유, sample A 및 sample B는 그림 4(f)에서 보여지듯이 cycle 수의 증가에 따라 점진적인 용량 증가 현상이 발생한다. 이러한 현상은 높은 비표면적과 다공성의 탄소나노섬유 특성 때문이다. 따라서 전기화학적 평가 결과를 종합하면 sample B의 경우, 높은 용량(~119.7 F/g), high-rate에서의 우수한 초기 용량 유지율 및 우수한 수명 특성으로 인하여 4가지의 전극들 중에 가장 우수한 전기화학적 특성을 보여주고 있다. 이러한 전기화학적 특성 향상은 크게 3가지 요인으로 설명할 수 있다. (I) 첫번째는 일차원 구조의 탄소나노섬유를 사용한 것이다. 일차원 탄소나노섬유는 네트워크 구조를 형성하여 유기적으로 연결되어 있으므로 전하 및 전자 전달에 매우 용이하다[17]. (II) 두번째는 비표면적의 향상이다. 탄소나노섬유 내부에 내장된 나노입자들로 인하여 탄소나노섬유의 표면 roughness가 증가하게 되고, 이는 결과적으로 전기화학 반응 면적을 증가시켜주기 때문에 슈퍼캐패시터의 용량 증가를 일으키게 된다. (III) 세번째는 WC와 W상의 존재로 인하여 향상된 전기전도도 때문이다. 이전 연구 결과들에 의하면 복합체를 구성하고 있는 WC과 W의 전기 전도도는 각각 10^5 S/cm, 1.810^5 S/cm 이며 이것은 탄소나노섬유의 전기전도도(10^2 S/cm)보다 훨씬 높다[18-20]. 전기 전도도는 회로 내 전자의 이동저항을 감소시키므로 전기화학 성능을 향상 시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발된 WS_2-W-WC가 내장된 탄소나노섬유 복합체는 고성능 슈퍼 커패시터용 전극으로 유용

하게 사용될 수 있다.

4. 결 론

전기방사법을 이용하여 슈퍼 커패시터용 WS_2-W-WC가 내장된 탄소나노섬유 복합체를 전기방사법을 이용하여 성공적으로 제조하였다. 탄소기반재료를 주로 사용하는 전기 이중층 커패시터는 용량과 에너지 밀도가 낮다는 치명적인 단점이 있으며 우리는 이러한 단점을 극복하기 위하여 chalcogenide 계열의 WS_2 나노입자를 전구체로 이용하여 4 wt% (sample A) 및 8 wt% (sample B)을 준비하였다. As-spun 상태의 복합체는 탄화과정을 거치면서 carbothermal 반응에 의해 WS_2에서 WS_2-W-WC로의 상변화가 진행되었다. 특히 슈퍼 커패시터 적용을 위한 전기화학 분석에서는 sample B가 가장 좋은 용량(~119.7 F/g), high-rate에서의 높은 용량 유지율 및 500 cycle 동안의 가장 우수한 수명 특성을 보였다. 따라서 본 연구에서 개발된 전기방사법을 통하여 제조된 WS_2-W-WC가 내장된 탄소나노섬유 복합체는 고성능 슈퍼 커패시터를 위한 전극재료로써 가치가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

This study was financially supported by the Research Program funded by the Seoul National University of Science and Technology.

References

[1] D. H. Lee, K. M. Lee and J. R. Yoona: J. KIEEME, **23** (2010) 843 (*Korean*).
[2] G. Wang, L. Zhang and J. Zhang: Chem. Soc. Rev., **41** (2012) 797.
[3] Y. J. Lee, D. G. Kim and H. J. Ahn: ECS Solid State Lett., **4** (2015) M1.
[4] S. M. Chen, R. Ramachandran, V. Mani and R. Saraswathi: Int. J. Electrochem. Sci., **9** (2014) 4072.
[5] R. Kotz and M. Carlen: Electrochim. Acta, **45** (2000) 2483.
[6] F. Li, J. Song, H. Yang, S. Gan, Q. Zhang, D. Han, A. Ivaska and L. Niu: Nanotechnology, **20** (2009) 455602.
[7] Y. H. Kim and S. J. Park: Curr. Appl. Phys., **11** (2011) 462.
[8] Y. J. Lee, G. H. An and H. J. Ahn: Kor. J. Mater. Res., **24** (2014) 37 (*Korean*).
[9] B. Hu, X. Qin, A. M. Asiri, K. A. Alamry, A. O. Al-Youbi and X. Sun: Electrochem. Commun., **28** (2013) 75.
[10] W. Liu, Y. Soneda, M. Kodama, J. Yamashita and H. Hatori: Carbon, **45** (2007) 2759.
[11] R. Koc and S. K. Kodambaka: J. Eur. Ceram. Soc., **20** (2000) 1859.
[12] A. D. Paola, L. Palmisano, A. M. Venezia and V. Augugliaro: J. Phys. Chem. B, **103** (1999) 8236.
[13] G. A. Swift and R. Koc: J. Mater. Sci., **36** (2001) 803.
[14] J. C. Sánchez-López, D. Martínez-Martínez, M. D. Abad and A. Fernández: Surf. Coat. Technol., **204** (2009) 947.
[15] G. Lim, J. H. Lee, J. Kim, H. W. Lee and S. H. Hyun: Wear, **257** (2004) 863.
[16] G. H. An and H. J. Ahn: ECS Solid State Lett., **2** (2013) M33.
[17] M. S. Park, G. X. Wang, Y. M. Kang, D. Wexler, S. X. Dou and H. K. Liu: Angew. Chem., **119** (2007) 764.
[18] G. H. An and H. J. Ahn: J. Power Sources, **272** (2014) 828.
[19] J. Martin: Meas. Sci. Technol., **24** (2013) 085601.
[20] H. Chhina, S. Campbell and O. Kesler: J. Power Sources, **164** (2007) 431.