

## 에어로졸 공정을 이용한 오산화바나듐( $V_2O_5$ )-그래핀 복합체 제조 및 슈퍼커패시터 응용

이 총 민<sup>1)</sup> · 장 희 동<sup>1),2),\*</sup>

<sup>1)</sup>한국지질자원연구원 자원활용연구센터

<sup>2)</sup>과학기술연합대학원대학교 나노재료공학전공

(2020년 11월 30일 투고, 2020년 12월 10일 수정, 2020년 12월 14일 게재확정)

## Preparation of $V_2O_5$ -Graphene Composites using Aerosol Process for Supercapacitors Application

Chongmin Lee<sup>1)</sup> · Hee Dong Jang<sup>1),2),\*</sup>

<sup>1)</sup>*Resources Utilization Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources*

<sup>2)</sup>*Department of Nanomaterials Science and Engineering, University of Science and Technology*

(Received 30 Nov 2020; Revised 10 Dec 2020; Accepted 14 Dec 2020)

### Abstract

Vanadium Pentoxide ( $V_2O_5$ ) has been emerged as alternative electrode materials for supercapacitors due to their low cost, natural abundance, and environmental friendliness. Graphene (GR) loaded with  $V_2O_5$  can exhibit enhanced specific capacitance. In this study, we present three-dimensional (3D) crumpled graphene (CGR) decorated with  $V_2O_5$ . The  $V_2O_5$ -graphene composites were synthesized from a colloidal mixture of graphene oxide (GO) and Ammonium metavanadate ( $NH_4VO_3$ ), via aerosol spray drying and post heat treatment process. The average size of composite was ranged from 1.82 to 4.6  $\mu m$ . Morphology of the composite changed from a crumpled paper ball to spherical ball having relatively smooth surface as the content of  $V_2O_5$  increased in the composites. The electrochemical performance of the  $V_2O_5$ -graphene composites was examined. The  $V_2O_5$ -graphene composite electrode showed the specific capacitance of 312 F/g. In addition, the device possessed acceptable cyclic stability, with 84% after 2000 cycles at 2 A/g. These outstanding properties are expected to make the composites prepared in this study as promising electrode materials for supercapacitor applications.

**Keywords:** aerosol process,  $V_2O_5$ , crumpled graphene, composites, supercapacitor

---

\*Corresponding Author

Tel : +82-42-868-3612, Fax : +82-42-868-3415

E-mail : [hdjang@kigam.re.kr](mailto:hdjang@kigam.re.kr)

## 1. 서론

차세대 에너지저장장치(Energy Storage System, ESS)로 각광받는 슈퍼커패시터(super capacitor)는 전기화학커패시터(electrochemical capacitor) 또는 울트라커패시터(ultracapacitor)라고도 불리며, 빠른 충/방전 속도 및 긴 수명을 가지고 있어 전기자동차 및 일부 모바일 장치에 전력을 공급할 수 있는 잠재력을 가지고 있다(Simon and Gogotsi, 2008). 또한 슈퍼커패시터는 기존 커패시터(capacitor)에 비해 높은 에너지 밀도와 2차 배터리보다 높은 전력 밀도를 제공할 수 있다(Zhao et al., 2011). 슈퍼커패시터는 전극/전해질 계면에서 전자 및 이온 전하의 물리적인 흡탈착을 기반으로 하는 전기이중층커패시터(electric double-layer capacitor, EDLC)와 전극 재료에서 빠른 가역적 산화환원 반응으로 인한 의사커패시터(pseudocapacitor)로 크게 구분된다(Adhikari et al., 2017). 전기이중층커패시터의 경우 활성탄, 그래핀 및 탄소나노튜브를 포함하는 탄소 소재를 전극으로 하며 우수한 화학적 안정성, 우수한 전기전도성 및 큰 비표면적 때문에 가장 많이 사용되는 전극 재료이다(Wang et al., 2012). 의사커패시터의 경우 금속산화물(예:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{NiO}$  및  $\text{V}_2\text{O}_5$ )/수산화물 및 전도성 고분자(polythiophene, polypyrrole 및 polyaniline)가 최근 몇 년 동안 널리 연구되고 있다(Wang et al., 2014; Yuan et al., 2018).

탄소재료는 높은 전기전도성과 안정성의 이점이 있지만, 낮은 비정전용량으로 인해 에너지 밀도 향상에 제한이 있다. 대조적으로, 금속산화물/수산화물은 이론적으로 뛰어난 비정전용량을 제공할 수 있지만 낮은 화학적 안정성, 전기전도도 및 이온 확산 속도를 갖는다는 단점이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 연구자들은 수열합성법(Yilmaz et al., 2017), 침전법(Lian et al., 2018), 전기 방사(Jin et al., 2018) 및 졸-겔 방법(Yan et al., 2016)을 통해 전기이중층 커패시터와 의사커패시터 메커니즘 모두 포함하는 전극소재를 합성하는 연구를 진행하고 있다. Lee 등 (2017)은 에어로졸공정에 의해  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /그래핀 복합체를 제조하고 0.1 A/g에서 269 F/g의 정전 용량을 얻었다. 또한 253 F/g의 높은 비정전용량을 보이는 전극재료로서 그래핀 시트에

복합금속산화물인  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  나노입자가 균일하게 부착된 구겨진 종이공 형상의 그래핀 복합체를 합성하였다(Lee et al., 2017).

다양한 전이금속 중에서 바나듐은 고유한 원자가 전자 구조로 인해 서로 다른 원자가 상태(+5, +4, +3, +2)를 가지며 높은 비정전용량을 제공할 수 있다(Rehder, 2013). 예를 들어, 바나듐은 산소 원자와 결합하여  $\text{VO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_3$  및  $\text{V}_2\text{O}_5$ 와 같은 다양한 결정상을 형성할 수 있다(Wu et al., 2013). 이러한 바나듐산화물 중 5가 바나듐 이온이 다른 이온보다 더 안정적이므로 오산화바나듐(Vanadium pentoxide,  $\text{V}_2\text{O}_5$ )이 전극재료로서 많은 관심을 받고 있다(Rehder, 2013). 가장 매력적인 전이금속산화물인  $\text{V}_2\text{O}_5$ 는 풍부한 매장량, 경제적 이점 및 높은 이론적 비정전용량을 기반으로 슈퍼커패시터 전극 재료 분야에서 중요한 역할을 할 수 있다(Sahu et al., 2017). 또한  $\text{V}_2\text{O}_5$ 는 나노리본, 나노시트, 나노 와이어와 같은 다양한 나노 구조를 형성할 수 있다(Nagaraju et al., 2014). 예를 들어, Saravanakumar 등 (2012)은 간단한 보호제(capping agent)를 활용한 침전기술을 통해  $\text{V}_2\text{O}_5$  나노 다공성 네트워크를 합성했다. Wei 등 (2012)은 전기변색(electrochromic) 슈퍼커패시터에 정렬된 이중 자이로이드(gyroid) 구조의  $\text{V}_2\text{O}_5$  네트워크의 첫 번째 성공적인 적용을 보고했다. 그러나 다른 금속 산화물과 마찬가지로  $\text{V}_2\text{O}_5$ 는 낮은 전기전도도와 사이클링 안정성으로 인해 슈퍼커패시터 전극소재로 응용이 제한된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는  $\text{V}_2\text{O}_5$ 와 탄소재료를 혼합하여 제조한 복합체 전극재료가 제안되었다(Kudo et al., 2002).

탄소재료의 큰 비표면적이 금속산화물의 응집을 마이크로 및 나노 크기로 줄이고 전기전도도를 증가시킬 수 있어 가장 적합한 전도성 구조체로 알려져 있다(Wei et al., 2017). 새로운 탄소소재인 그래핀은 전 세계 연구자들의 관심을 끌었으며 최근 몇 년 동안 큰 발전을 이루었다(Huang et al., 2017). 실제로 그래핀은 이론적인 비표면적( $2630 \text{ m}^2/\text{g}$ ), 높은 기계적 강도, 높은 화학적 안정성 및 높은 전기 전도도( $26,000 \text{ S/cm}$ )를 가지고 있다(Wu et al., 2012). 그래핀 시트에  $\text{V}_2\text{O}_5$ 가 코팅된 복합체는 전극의 전기전도도를 향상시키고 전해질과 접촉하는 활성 부위의 수를 증가시켜 전극재료의 비

정전용량에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 에어로졸 분무건조 공정 및 후 열처리 공정을 이용하여  $V_2O_5$ 가 구겨진 입자 형상의 그래핀 표면에 코팅된 복합체를 제조하였다.  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 제조를 위한 공정 변수로써 바나듐 원료물질로 사용된  $NH_4VO_3$ 와 그래핀 산화물 전구체의 비율을 조절하였다. 전구체 비율에 따른  $V_2O_5$ -그래핀 복합체의 형상 및 결정상을 FE-SEM, XRD 분석을 통하여 관찰하였으며, 슈퍼커패시터 전극소재로 적용 가능성을 확인하기 위한 전기화학 특성을 순환전압전류법(Cyclic Voltammetry; CV), 정전압 충/방전법(Galvanostatic Charge/Discharge; GCD), 전기화학적 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS)을 통하여 관찰하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 $V_2O_5$ -그래핀 복합체 제조

그래핀 산화물(GO)은 흑연으로부터 개선된 Hummers 방법에 따라 제조한 후 증류수에 분산시

켜 준비하였다(Hummers and Offeman, 1958).  $V_2O_5$ -그래핀 복합체를 제조하기 위한 출발용액으로서 상기 GO 콜로이드 용액과  $NH_4VO_3$ 를 혼합하여 준비하였다. 이때 GO의 농도는 0.5wt%로 고정하고, 혼합콜로이드 용액에서  $NH_4VO_3$ 의 농도를 20, 40, 60, 80%가 되도록 준비하였다. 이 혼합 전구체 콜로이드 용액을 반응기 온도 200 °C, 운반 공기 유량 10 l/min의 조건하에 분무건조 공정으로 혼합 전구체 분말을 제조하였다. 그 후 350 °C 공기분위기 조건에서 2시간 후 열처리 공정을 진행하여 최종적으로  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 분말을 제조했다. 본 연구에서  $V_2O_5$ -그래핀 복합체의 제조를 위한 공정의 흐름도를 그림 1에 나타내었다.  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 분말 제조를 위한 에어로졸 분무건조 실험장치는 액적 발생기, 액적 건조 챔버, 시료 포집부로 구성되어 있으며 액적 발생기는 원료 현탁액 혹은 원료 용액을 미세한 액적으로 분무시키는 장치로서 1.4 mm 이류체 노즐을 사용하였다. 분무된 원료 액적을 액적 건조 챔버에서 건조시킨 뒤 사이클론에서 회수하였다. 회수된 전구체 분말을 후 열처리를 하기 위해 가스 분위기 조절이 가능한 전기로를 사용하였다.

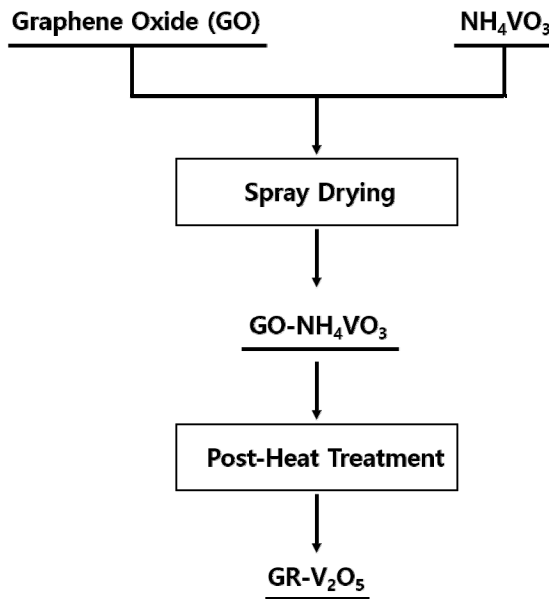


Figure 1. Process flow for the preparation of  $V_2O_5$ -GR composites.

2.2. 슈퍼커패시터 전극제작

슈퍼커패시터의 전기화학 특성평가를 위하여 합성된 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-그래핀 복합체를 전극 활물질로 하고 바인더로서 0.5wt% 산화그래핀 용액을 사용하였으며, 복합체와 산화그래핀을 9:1 무게비율로 혼합하고 20분 동안 교반하여 슬러리를 제조하였다. 제조된 슬러리를 Doctor Blade법으로 carbon paper에 코팅하였으며, 250 °C에서 2시간 동안 열처리 후 직경 14 mm의 크기로 천공하여 전극으로 사용하였다. 같은 종류의 두 전극을 맞대고 사이에 분리막 (Waterman, GF/C)을 넣어 2전극 시스템인 HS FLAT CELL (HOHSEN Corp., Japan)이용하여 슈퍼커패시터 셀을 조립하였다.

2.3. 분석

본 연구에서 제조한 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-그래핀 복합체의 형상을 관찰하기 위해 Field-Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM; Sirion, FEI)을 이용하였으며,

X-ray Diffractometer (XRD; RTP 300 RC, Rigaku)를 이용하여 복합체의 결정상을 확인하였다. V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-그래핀 복합체 분말로 구성된 슈퍼커패시터 전극의 전기화학 특성평가를 위해 Potentiostat (VSP, Biologics)을 이용한 순환전압전류(Cyclic Voltammetry; CV), 정전압 충/방전(Galvanostatic Charge/Discharge; GCD), 전기화학적 임피던스(Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS)를 측정하였다. 전기화학특성은 5 M KOH 전해질 하에서 2전극 시스템을 이용하여 0에서 1.0 V의 전위범위를 스캔함으로써 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

분무건조공정을 이용하여 제조된 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-그래핀 복합체의 형상과 크기를 확인하기 위해 FE-SEM 분석을 진행하였으며, 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 제조된 복합체의 FE-SEM 분석 사진을 통해

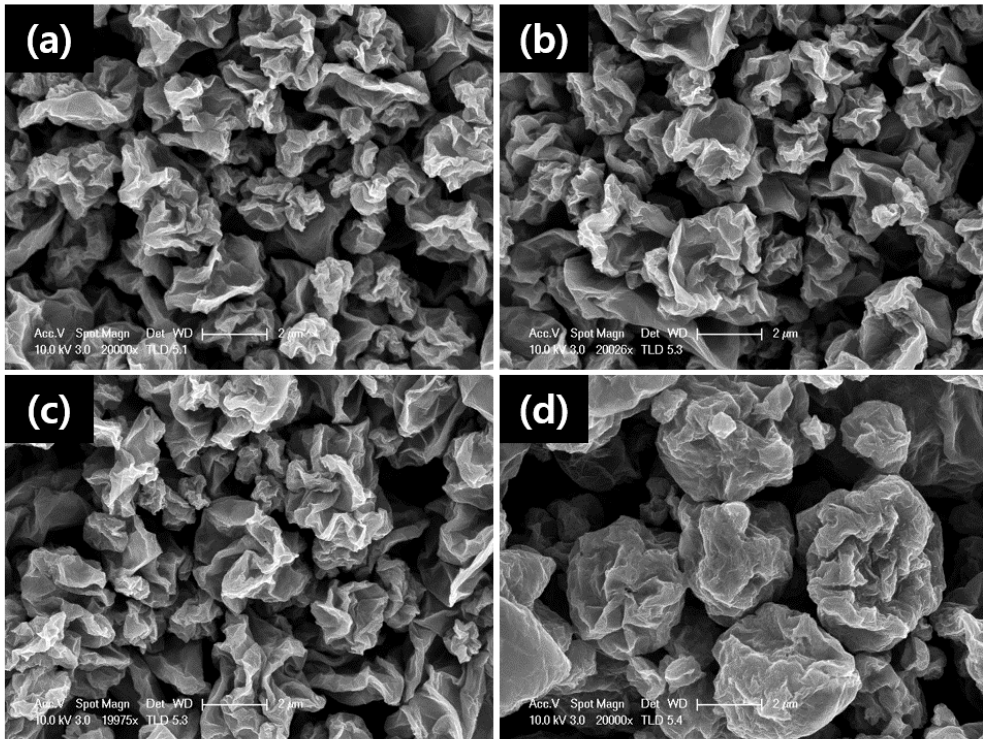


Figure 2. FE-SEM images of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-graphene composites prepared at different concentration of NH<sub>4</sub>VO<sub>3</sub> in the colloidal precursor ((a) 20 wt%, (b) 40 wt%, (c) 60 wt%, (d) 80 wt%).

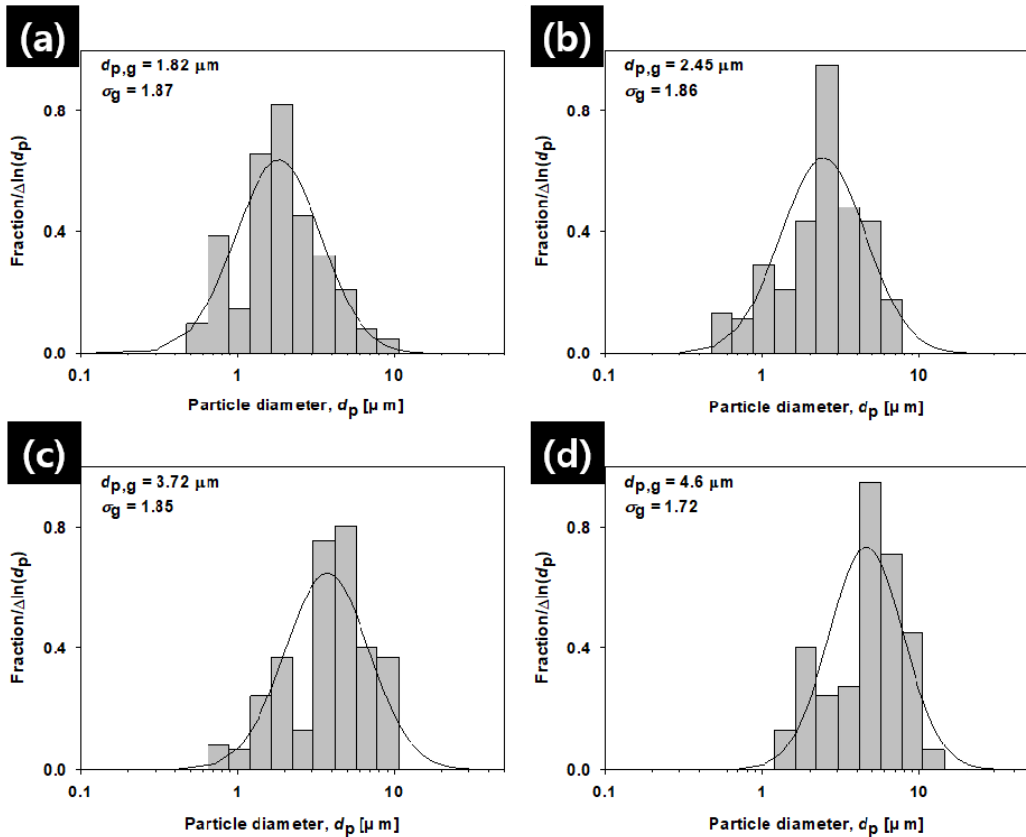


Figure 3. Size distributions of  $V_2O_5$ -graphene composites prepared at different concentration of  $NH_4VO_3$  in the colloidal precursor ((a) 20 wt%, (b) 40 wt%, (c) 60 wt%, (d) 80 wt%).

형상을 관찰한 결과, 제조된  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 입자의 형상은 전체적으로 3차원 구겨진(crumpled) 입자 형상으로 나타났으며,  $V_2O_5$  전구체로 사용된  $NH_4VO_3$ 의 주입량이 증가할수록 복합체의 평균입자 크기가 증가하는 것을 확인하였다. 또한  $NH_4VO_3$ 의 주입량이 증가함에 따라 구겨진 입자 형상의 복합체의 주름이 퍼지면서 둥근 구형의 입자 형상으로 확인되었다.

SEM 사진으로부터  $V_2O_5$ -그래핀 복합체의 크기 분포를 측정하여 그림 3에 나타내었다.  $NH_4VO_3$ 의 주입량이 증가할수록  $V_2O_5$ -그래핀 복합체의 평균 크기가  $1.82 \mu m$ 에서  $4.6 \mu m$ 로 증가하는 것을 확인하였다. 분무된 액적 내에서  $V_2O_5$  전구체로 사용된  $NH_4VO_3$ 가 그래핀 표면에서 성장 및 코팅과 동시에 모세관 압력으로 인해 구겨진 입자의 형태가 형성되었다(Luo et al., 2011).  $NH_4VO_3$  농도가 증가

할수록 그래핀 표면에 성장되는  $V_2O_5$ 의 코팅층이 증가하며 그에 따라 분무건조 과정에서 액적내에서 용매가 증발할 때 나타나는 모세관 압력이 감소하게 된다. 따라서  $NH_4VO_3$  농도가 증가할수록  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 입자의 크기가 증가하고 복합체 입자의 주름이 퍼지는 것으로 판단되었다.

그림 4는 분무건조공정 및 후 열처리를 통해 제조된  $V_2O_5$ -그래핀 복합체의 XRD 분석결과를 나타내었다. 복합체의 XRD 분석결과로부터  $V_2O_5$  결정상이 나타났으며,  $NH_4VO_3$  농도가 증가함에 따라  $V_2O_5$  결정상에 해당하는 피크의 세기가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 약  $23.5^\circ$  와  $42.9^\circ$  부근에서 넓게 나타난 피크는 Graphite 피크가 왼쪽으로 이동된 전형적인 그래핀 결정형에 해당하는 피크로 판단되었다.

전극 활물질인  $V_2O_5$ -그래핀 복합체와 전해질의

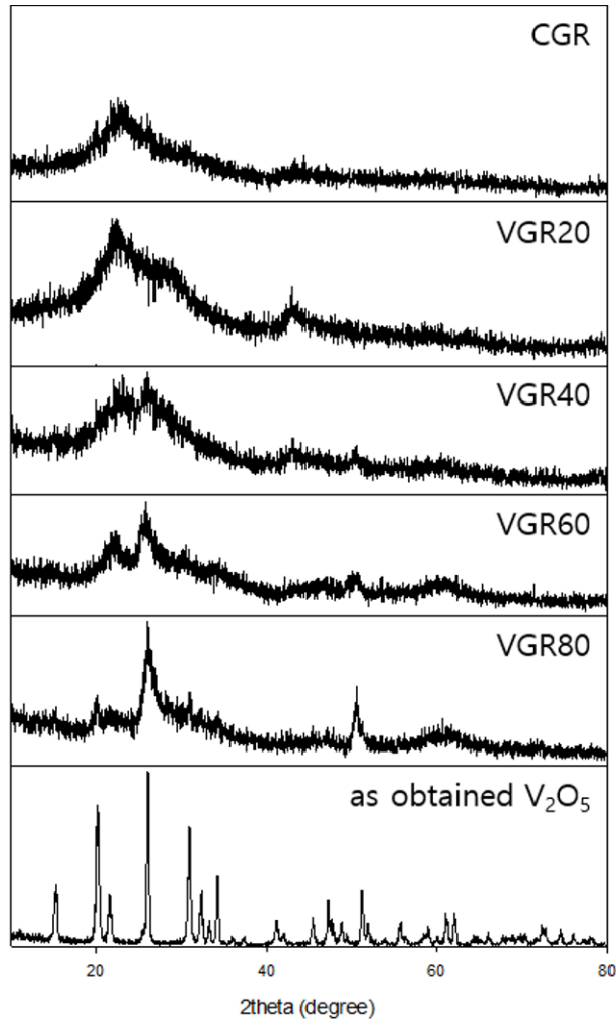


Figure 4. X-ray diffraction patterns of the  $V_2O_5$ -graphene composites prepared at different concentration of  $NH_4VO_3$  ((a) 20 wt% (VGR20), (b) 40 wt% (VGR40), (c) 60 wt% (VGR60), (d) 80 wt% (VGR80)).

계면에서의 반응 및 전기화학적 특성을 알아보기 위해,  $NH_4VO_3$  농도를 20, 40, 60, 80%로 조절해서 각각 제조된  $V_2O_5$ -그래핀 복합체를 이용하여 전극을 제작하고 5M KOH 전해액에 함침 후 2전극 시스템을 이용한 순환전압전류(Cyclic voltammogram; CV) 시험 결과를 그림 5에 나타냈다. 이때 전위주사속도(Scan rate)는 10 mV/s, 전압범위는 0 - 1 V에서 측정하였다.  $V_2O_5$ -그래핀 복합체를 도입한 전극은 0.4 V 부근에서 넓은 폭의 피크가 약하게 나타났으며, 이는 그래핀 표면에 부착된  $V_2O_5$ 의 산화

-환원 반응에 의해 나타난 것으로 판단되었다. CV 시험 결과로부터  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 전극은 의사커패시터의 전기화학적 거동을 나타내었다.

그림 6은 0~1 V의 전위 범위에서 5 M KOH 전해질에서 측정된  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 전극의 충·방전 테스트(galvanostatic charge/discharge; GCD)를 측정하여 각전류밀도에 대한 GCD로부터  $NH_4VO_3$  농도를 20, 40, 60, 80%로 조절해서 제조한  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 전극의 비정전용량을 계산된 결과이다. 전류밀도 0.1 A/g에서  $V_2O_5$ -그래핀 복합체의

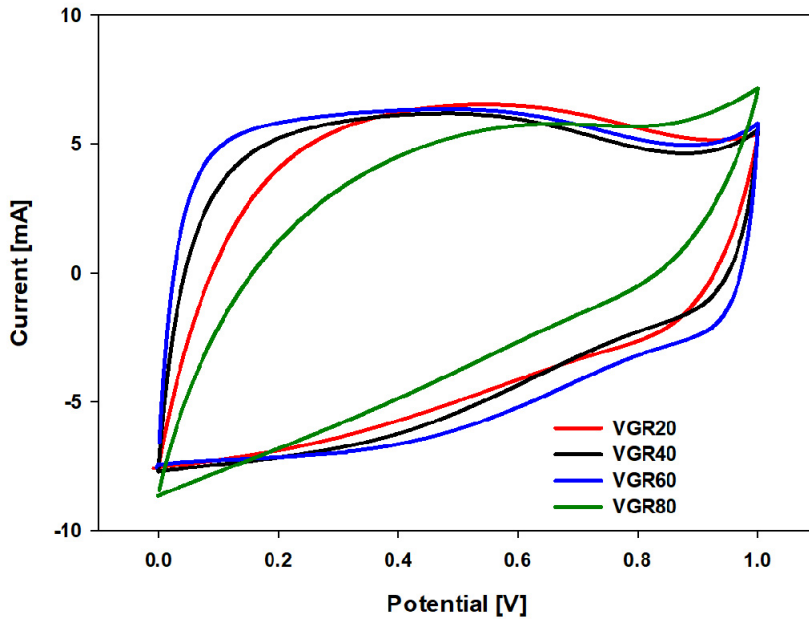


Figure 5. Cyclic Voltammetry curves of the  $V_2O_5$ -graphene composites prepared at different concentration of  $NH_4VO_3$  ((a) 20 wt% (VGR20), (b) 40 wt% (VGR40), (c) 60 wt% (VGR60), (d) 80 wt% (VGR80)).

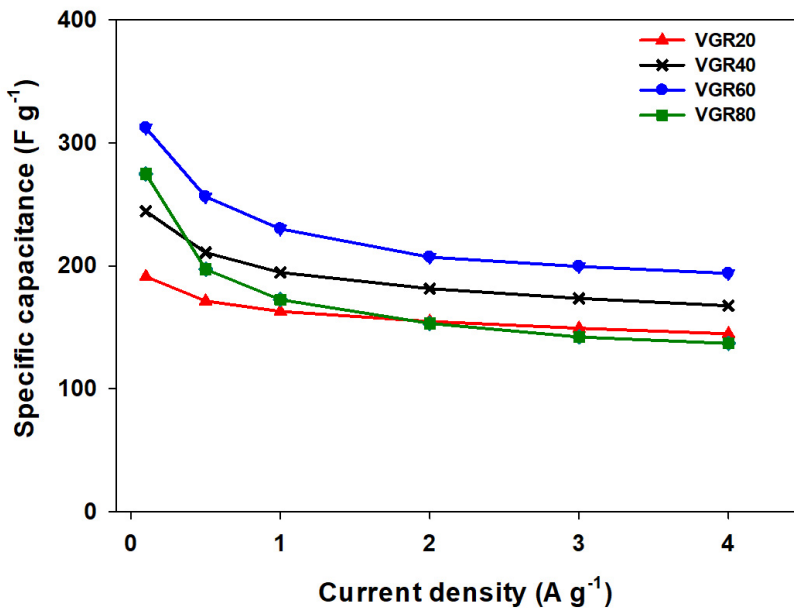


Figure 6. Galvanostatic charge/discharge curves of the  $V_2O_5$ -graphene composites prepared at different concentration of  $NH_4VO_3$  ((a) 20 wt% (VGR20), (b) 40 wt% (VGR40), (c) 60 wt% (VGR60), (d) 80 wt% (VGR80)).

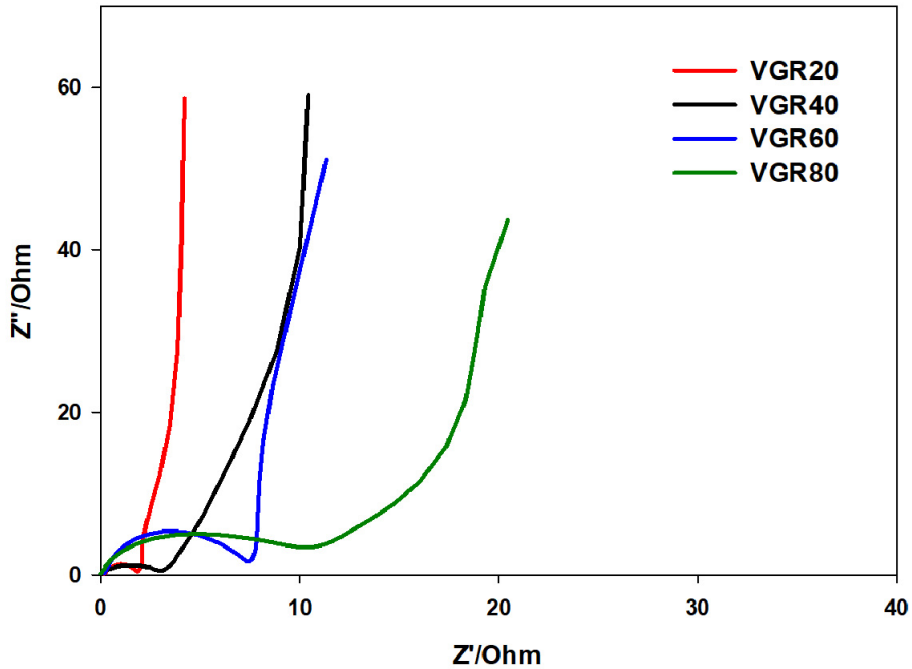


Figure 7. Nyquist plot of the  $V_2O_5$ -graphene composites prepared at different concentration of  $NH_4VO_3$  ((a) 20 wt% (VGR20), (b) 40 wt% (VGR40), (c) 60 wt% (VGR60), (d) 80 wt% (VGR80)).

비정전용량은  $NH_4VO_3$  농도 60%에서 312 F/g으로 가장 높은 특성을 나타냈다.  $NH_4VO_3$  농도가 20%에서 60%까지 증가함에 따라 193 F/g에서 312 F/g으로 증가하다가  $NH_4VO_3$  농도 80%에서 287 F/g로 다시 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는  $NH_4VO_3$  농도가 증가함에 따라 그래핀 표면에 코팅되는  $V_2O_5$  층의 두께가 증가하여  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 전극과 전해액 계면에서 전하 이동 저항이 증가해서 나타난 결과이다.

그림 7는 전기화학적 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS)를 이용하여 임피던스를 측정된 Nyquist plot이다. 일반적으로 EIS 분석은 고주파수에서 고-중 주파수 영역으로 넘어갈 때 반원을 그리다가 저주파수 영역에서는 세로로 뻗은 직선을 그리며 측정된다. 이 때, 고주파수 영역에서 x축과 접하는 지점은 등가 직렬 저항( $R_{ct}$ )이며, 고-중주파수 영역에서 반원의 직경은 전극/

전해액 계면의 전하 이동 저항( $R_{ct}$ )이다. 특히,  $R_{ct}$ 는  $V_2O_5$ 와 전해액 이온과의 산화/환원 반응으로 인한 전기화학적 성능에 직접적인 영향을 준다 (Park et al., 2020).  $V_2O_5$ -그래핀 복합체에서  $V_2O_5$  전구체인  $NH_4VO_3$ 의 농도가 20% (VGR20)에서 80% (VGR80)로 증가함에 따라 복합체 전극의 저항이 증가하는 것으로 나타났는데 VGR20의  $R_{ct}$ 값이 가장 낮았으며, VGR80이 가장 높았다. VGR80의 높은  $R_{ct}$ 값은 두꺼운  $V_2O_5$  층이 전자의 이동을 방해하는 과정에서 기인한 것으로 판단되었다. 따라서  $V_2O_5$ 의 농도가 증가할 때는  $V_2O_5$ 로 인한 산화환원 반응으로 인해 비정전용량이 증가하다가  $NH_4VO_3$ 의 농도가 80%에서는 두꺼운  $V_2O_5$  층의 전하이동 방해로 인해 반대로 정전용량이 감소한 것으로 판단되었다.

슈퍼커패시터의 산업적 응용을 위해서는 높은 충/방전 cycle 수명이 중요하다.  $V_2O_5$ -그래핀 복합



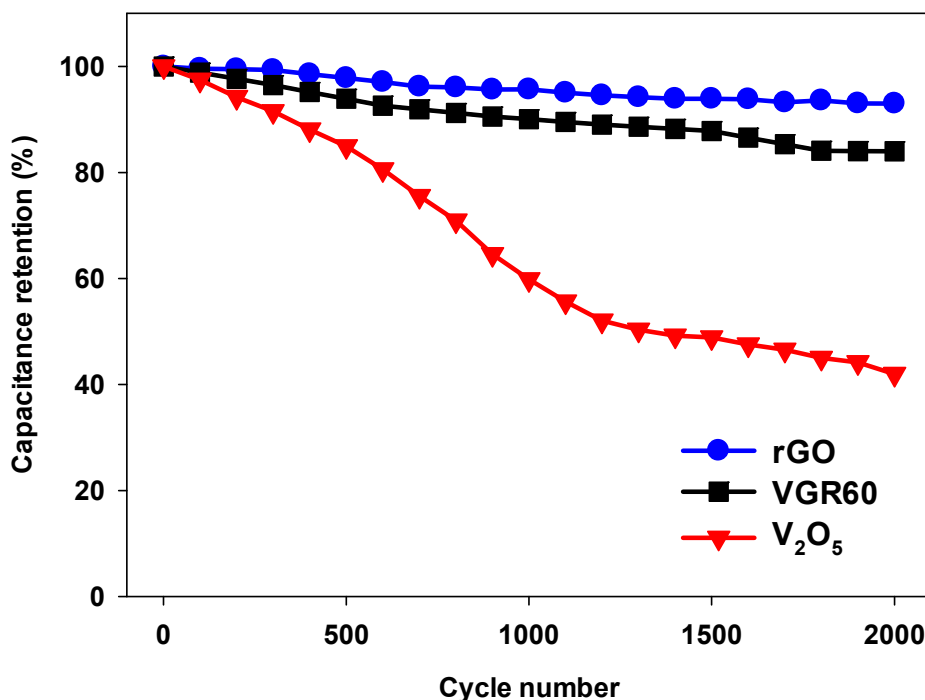


Figure 8. Cycle performance of the rGO,  $V_2O_5$  and VGR60.

체 전극을 2 A/g 전류밀도에서 2000회의 충/방전 특성을 측정하였으며, 그래핀(rGO)과  $V_2O_5$ 의 사이클 특성과 비교하였다.  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 전극의 용량유지율은 84%이며, 순수한  $V_2O_5$  경우의 42% 보다 높은 용량유지율을 보여주었다(그림 8). rGO의 경우 용량유지율이 92%로 나타났으나,  $V_2O_5$ -그래핀 복합체의 정전용량(312 F/g)과 비교 시 낮은 정전용량(150 F/g)을 나타내었다. 일반적으로 금속 산화물 전극은 산화/환원 반응을 통하여 전하를 저장한다. 충/방전이 반복됨에 따라 산화/환원반응으로 인한 금속산화물의 유실이 발생하게 되며 이는 전기화학적 특성의 감소로 연결된다(Park et al., 2020). 그러나, 본 연구에서 제조한  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 전극은 에어로졸 공정처리시 그래핀의 표면에 존재하는 기능기가  $V_2O_5$ 를 정착(anchoring) 시키기 때문에  $V_2O_5$ 의 유실을 완화시키므로 비교적 높은 용적용량을 유지할 수 있었다.

#### 4. 결론

에어로졸 분무건조 및 후열처리공정을 이용하여  $V_2O_5$ -그래핀 복합체를 성공적으로 제조하였다. FE-SEM 분석결과  $V_2O_5$ -그래핀 복합체는 3차원의 구겨진(Crumpled) 입자 형상으로 나타났으며,  $V_2O_5$  전구체인  $NH_4VO_3$  농도가 증가함에 따라  $V_2O_5$ /그래핀 복합체의 구겨짐 정도가 감소하고 평균입자 크기가 증가하는 것을 확인하였다. 그래핀 표면에 부착된 바나듐의 결정상은  $V_2O_5$ 로 확인되었으며,  $NH_4VO_3$  농도가 증가했을 때 결정성도 증가하였다.  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 분말을 슈퍼커패시터의 전극 활물질로 사용하여 전기화학 특성을 분석한 결과  $V_2O_5$  전구체인  $NH_4VO_3$  농도가 60%에서 제조된  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 전극은 0.1 A/g의 전류 밀도에서 가장 높은 312 F/g의 정전용량을 얻었으며 2 A/g의 전류 밀도 2000회 충방전시에도 84%의 용량 유지율을 나타내었다.  $V_2O_5$ 와 그래핀의 나노복

합체를 사용하여 제조한 전극을 슈퍼커패시터로 응용한 결과 이온 확산속도 및 전기전도도를 향상 시킴으로써 비정전용량, 충방전 효율의 전기화학적 특성이 향상됨을 알 수 있었다. 이로부터  $V_2O_5$ -그래핀 복합체 분말은 슈퍼커패시터 전극소재로 기대되는 소재임을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본연구사업인 “국내 부존 바나듐(V) 광물자원 선광/제련/활용 기술 개발”로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## Reference

- Adhikari, A.D., Oraon, R., Tiwari, S.K., Lee, J.H., Kim, N.H., and Nayak, G.C. (2017). A  $V_2O_5$  nanorod decorated graphene/polypyrrole hybrid electrode: a potential candidate for supercapacitors, *New Journal of Chemistry*, 41(4), 1704-1713.
- Huang, H., Zhang, J., Jiang, L., and Zang, Z. (2017). Preparation of cubic  $Cu_2O$  nanoparticles wrapped by reduced graphene oxide for the efficient removal of rhodamine B, *Journal of Alloys and Compounds*, 718, 112-115.
- Hummers Jr, W.S., and Offeman, R.E. (1958). Preparation of graphitic oxide, *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339-1339.
- Jin, H., Yuan, D., Zhu, S., Zhu, X., and Zhu, J. (2018). Ni-Co layered double hydroxide on carbon nanorods and graphene nanoribbons derived from MOFs for supercapacitors, *Dalton Transactions*, 47(26), 8706-8715.
- Kudo, T., Ikeda, Y., Watanabe, T., Hibino, M., Miyayama, M., Abe, H., and Kajita, K. (2002). Amorphous  $V_2O_5$ /carbon composites as electrochemical supercapacitor electrodes, *Solid State Ionics*, 152, 833-841.
- Lee, C., Chang, H., and Jang, H.D. (2017). Preparation of  $CoFe_2O_4$ -Graphene Composites using Aerosol Spray Pyrolysis for Supercapacitors Application, *Particle and Aerosol Research*, 13(1), 33-40.
- Lee, C., Jo, E.H., Kim, S.K., Choi, J.H., Chang, H., and Jang, H.D. (2017). Electrochemical performance of crumpled graphene loaded with magnetite and hematite nanoparticles for supercapacitors, *Carbon*, 115, 331-337.
- Lian, Y.M., Ni, M., Zhou, L., Chen, R.J., and Yang, W. (2018). Synthesis of Biomass-Derived Carbon Induced by Cellular Respiration in Yeast for Supercapacitor Applications, *Chemistry-A European Journal*, 24(68), 18068-18074.
- Luo, J., Jang, H.D., Sun, T., Xiao, L., He, Z., Katsoulidis, A.P., and Huang, J. (2011). Compression and aggregation-resistant particles of crumpled soft sheets, *ACS Nano*, 5(11), 8943-8949.
- Nagaraju, D.H., Wang, Q., Beaujuge, P., and Alshareef, H.N. (2014). Two-dimensional heterostructures of  $V_2O_5$  and reduced graphene oxide as electrodes for high energy density asymmetric supercapacitors, *Journal of Materials Chemistry A*, 2(40), 17146-17152.
- Park, Y.J., Kim, J.H., Lee, K., and Lee, S.M. (2020). Fabrication of  $VO_x$ /Graphene Composite Using  $CO_2$  Laser Reduction and Atomic Layer Deposition and Its Electrochemical Performance, *Korean Chemical Engineering Research*, 58(1), 135-141.
- Rehder, D. (2013). The future of/for vanadium, *Dalton Transactions*, 42(33), 11749-11761.
- Sahu, V., Goel, S., Tomar, A.K., Singh, G., and Sharma, R.K. (2017). Graphene nanoribbons@vanadium oxide nanostrips for supercapacitive energy storage, *Electrochimica Acta*, 230, 255-264.
- Saravanakumar, B., Purushothaman, K.K., and Muralidharan, G. (2012). Interconnected  $V_2O_5$  nanoporous network for high-performance supercapacitors, *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4(9), 4484-4490.
- Simon, P., and Gogotsi, Y. (2008). Materials for electrochemical capacitors, *Nature Materials*, 7, 845-854.

- Wang, C.C., Chen, H.C., and Lu, S.Y. (2014). Manganese oxide/graphene aerogel composites as an outstanding supercapacitor electrode material, *Chemistry-A European Journal*, 20(2), 517-523.
- Wang, G., Zhang, L., and Zhang, J. (2012). A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors, *Chemical Society Reviews*, 41(2), 797-828.
- Wei, D., Scherer, M.R., Bower, C., Andrew, P., Ryhanen, T., and Steiner, U. (2012). A nanostructured electrochromic supercapacitor, *Nano Letters*, 12(4), 1857-1862.
- Wei, J., Zang, Z., Zhang, Y., Wang, M., Du, J., and Tang, X. (2017). Enhanced performance of light-controlled conductive switching in hybrid cuprous oxide/reduced graphene oxide ( $Cu_2O/rGO$ ) nanocomposites, *Optics Letters*, 42(5), 911-914.
- Wu, C., Feng, F., and Xie, Y. (2013). Design of vanadium oxide structures with controllable electrical properties for energy applications, *Chemical Society Reviews*, 42(12), 5157-5183.
- Wu, Z.S., Zhou, G., Yin, L.C., Ren, W., Li, F., and Cheng, H.M. (2012). Graphene/metal oxide composite electrode materials for energy storage, *Nano Energy*, 1(1), 107-131.
- Yan, Y., Li, B., Guo, W., Pang, H., and Xue, H. (2016). Vanadium based materials as electrode materials for high performance supercapacitors, *Journal of Power Sources*, 329, 148-169.
- Yilmaz, G., Lu, X., and Ho, G.W. (2017). Cross-linker mediated formation of sulfur-functionalized  $V_2O_5$ /graphene aerogels and their enhanced pseudocapacitive performance, *Nanoscale*, 9(2), 802-811.
- Yuan, Y., Zhu, W., Du, G., Wang, D., Zhu, J., Zhu, X., and Pezzotti, G. (2018). Two-step method for synthesizing polyaniline with bimodal nanostructures for high performance supercapacitors, *Electrochimica Acta*, 282, 286-294.
- Zhao, X., Sánchez, B.M., Dobson, P.J., and Grant, P.S. (2011). The role of nanomaterials in redox-based supercapacitors for next generation energy storage devices, *Nanoscale*, 3(3), 839-855.