

루테늄 산화물-수계 전해액 슈퍼캐패시터의 전위 특성

도칠훈[†] · 최상진* · 문성인 · 윤문수 · 육경창* · 김상길** · 이주원**

한국전기연구원, *기노리텍, **성남전자공업
(2002년 4월 8일 접수 : 2002년 12월 3일 채택)

Potential Characteristics of Supercapacitor Based on Ruthenium Oxide-Aqueous Electrolyte

Chil-Hoon Doh[†], Sang-Jin Choi*, Seong-In Moon, Mun-Su Yun, Gyeong-Chang Yug*, Sang-Gil Kim**, and Ju-won Lee**

Korea Electrotechnology Research Institute, *KNR Tech,
**Sunnam Electronic Co. Ltd

(Received April 8, 2002 : Accepted December 3, 2002)

초 록

RuCl₃·xH₂O로부터 제조한 비정질의 RuO₂·nH₂O을 사용하여 탄탈륨 집전체상의 슈퍼캐패시터 전극을 제조하였다. RuO₂·nH₂O 전극과 4.8 M 황산 전해액을 사용하여 RuO₂ 슈퍼캐패시터를 제조하였다. 탄탈륨 박막은 0.0~1.1 V(vs. SCE)에서 안정적임을 AC impedance로 확인하고 슈퍼캐패시터에 적용하였다. 루테늄 산화물 슈퍼캐패시터는 약 1.0 V (vs. SCE)이상에서 비가역 가수분해 반응이 진행되었다. 슈퍼캐패시터를 0.5 V(vs. SCE)의 protonation level을 조정하고, 전압범위를 1 V로 하여 충방전 시험할 경우 우수한 특성을 나타내었다. 이때 전극전위는 -0.004~0.995 V(vs. SCE)의 범위이고 positive 전극 및 negative 전극의 전위범위는 각각 -0.004~0.515 V(vs. SCE) 및 0.515~0.995 V (vs. SCE)이었다.

Abstract : The electrode for a supercapacitor was prepared using an amorphous ruthenium oxide, which was synthesized from ruthenium trichloride hydrate(RuCl₃·xH₂O). A supercapacitor was assembled with an electrode of ruthenium oxide material on a current collector of tantalum, and an electrolyte of 4.8 M sulfuric acid. The result of the AC impedance analyses on Ta/H₂SO₄(4.8 M)/Pt cell showed that tantalum was stable at the potential range of 0.0~1.1 V (vs. SCE). Therefore, Ta film could be used the supercapacitor as a current collector. The irreversible hydrolysis in the supercapacitor occurred over ca. 1.0 V(vs.SCE) when the supercapacitor was protonated to 0.5 V(vs. SCE). The supercapacitor protonated to 0.5 V(vs.SCE) showed good electrochemical properties when it was tested at the potential range of 1.0 V in the charge-discharge test. The potential range of the electrodes including the positive and the negative electrode was varied between -0.004 and 0.995 V(vs. SCE). The potential ranges of the positive and the negative electrode were -0.004~0.515 V(vs. SCE) and 0.515~0.995 V(vs. SCE), respectively.

Key words : Supercapacitor, Amorphous ruthenium oxide, Sulfuric acid, Tantalum

1. 서 론

금속산화물 전극을 이용한 전기화학 캐패시터(EC, electrochemical capacitor)^{1,2)}는 가역적인 금속산화물의 수소화(hydrogenation)를 주로 이용하며, 이는 pseudocapacitance³⁾로 나타낸다. Pseudocapacitance를 이용하는 캐패시터는 일반적으로 전기화학 이중층 캐패시터(EDLC, electrochemical double-layer capacitor)^{4,5)} 보다 높은 비정전용량을 갖는다.

루테늄 산화물 캐패시터의 가역 전위범위는 전해액의 전위창과 함께 집전체의 안정 전위범위와 루테늄 산화물의 안정 전위 범위에 따라서 결정된다. 가역 전위범위에서는 전해액과 집전체

가 redox 반응을 일으키지 않는다. 동일한 2개의 전극을 사용하는 pseudocapacitor의 specific capacitance는 식 1에 나타낸 바와 같이 단위 전극 반전지의 specific capacitance의 1/4로 주어지며, 인가 전하에 따라 거의 직선적인 전압 변화를 나타낸다. 식 1의 도출에 대해서는 부록에 자세히 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{Specific Capacitance}_{\text{Half Cell}}(F/g) \\ = 4 \cdot \text{Specific Capacitance}_{\text{Full Capacitor}}(F/g) \end{aligned} \quad (1)$$

이에 따라서 최대의 전압과 용량을 얻기 위해서는 두 전극의 안정한 전위범위 중심에 루테늄 산화물 캐패시터의 O.C.V.(open circuit voltage)를 조정하여야 한다⁶⁾. RuCl₃·xH₂O로부터 sol-gel 법으로 합성⁷⁾한 RuO₂·nH₂O를 전극재료로 이용한 슈퍼캐패시

[†]E-mail: chdoh@keri.re.kr

터의 O.C.V.는 가역 전위범위의 oxidation 한계 전위에 가깝게 나타났다. 충전의 진행에 따라 산화반응 전극의 전위가 산화 가역 한계 전위에 도달할 때까지 환원반응 전극의 전위는 가역 환원 한계 전위에 이르지 못하므로, 전극의 고유 특성은 충분히 나타내지 못하게 된다. 루테늄 산화물 슈퍼커패시터의 O.C.V.를 redox 가역 전위 반응의 중심으로 이동시키므로써 전극의 고유 특성을 충분히 나타내게 할 수 있다. 본 기법은 상이한 specific capacitance를 가진 2개 전극으로 구성된 슈퍼커패시터의 최적 운용을 위한 capacity balancing에도 용이하게 적용할 수 있다.

본 논문에서는 비정질 루테늄산화물을 전극재료를 사용한 수계 전해액 슈퍼커패시터의 안정한 전위범위 특성을 분석하고, 전기화학적 protonation을 사용하여 캐패시터의 O.C.V.를 가역 전위범위의 중심으로 조정시켜 특성을 관찰하였다.

2. 실험

RuO_2 (ruthenium oxide; $\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 분말 재료는 $\text{RuCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 로부터 sol-gel법으로 합성하였다⁸⁾. 열처리는 공기분위기에서 130°C , 17 hrs의 조건으로 행하여 비정질 $\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 를 제조하였다.

루테늄 산화물 전극은 루테늄 산화물 재료를 PVDF(polyvinylidene fluoride)의 결합제, VGCF(vapor growth carbon fiber; Showa Denko, graphitized, $d_{002}=3.39 \text{ \AA}$, $L_c=400 \text{ \AA}$, 비표면적 = $13 \text{ m}^2/\text{g}$, 직경 = 0.15 \mu m , 길이 = $10\sim 20 \text{ \mu m}$) 및 SPB(super p black; MMM Carbon, Belgium) 도전재료를 사용하여 제조하였다. 전극 제조 과정은 N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) 용매에 PVDF를 용해시키고, PVDF 용액에 SPB를 넣고, 30분간 초음파분쇄기로 분산하고, VGCF 및 루테늄 산화물 ($\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)를 넣고, zirconia ball을 이용하여 분산한다. 재료의 혼합비인 $\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}:\text{SPB}:\text{VGCF}:\text{PVDF}$ 는 $84:3:3:10$ 의 중량비를 기준으로 하였다. 두께 25 \mu m 의 탄탈륨 (Ta) 집전체에 320 \mu m 의 slit 두께로 도포하고, 100°C 에서 2시간 동안 건조하여 전극을 제작하였다. 전극을 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 로 제단하고, 110°C 에서 가열·압착하여 루테늄 산화물 전극을 제조하였다.

전극재료의 순환전위전류곡선은 3전극의 반전지를 이용하여 순환전위전류시험법(CV; cyclic voltammetry, EG&G PAR M273A potentiostat/galvanostat and M273 s/w)으로 분석하였다. 3전극 반전지 구성은 4.8 M 황산 전해액에서 백금 상대전극($3 \times 3 \text{ cm}^2$) 및 SCE 기준전극을 사용하였다. 순환전위전류시험의 주사속도는 2 mV/sec 이다. CV에서 용량은 M273 s/w를 이용하여 $Q(i \times t)$ 를 얻고, $F/g = (Q/\Delta V)/g$ 로서 계산하였다.

슈퍼커패시터는 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 의 단위셀로 제조하였으며, 조립은 2개의 전극, Celgard 3501 격리막 및 4.8 M 황산 전해액을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Tantalum(Ta) 집전체의 4.8 M 황산에서의 전기화학적 특성

비정질 루테늄 산화물을 사용하는 슈퍼커패시터는 수계 전해액에서 proton에 의해 pseudo-capacitance를 나타내어 높은 비정전 용량을 나타내므로, 산성으로서 equivalent conductivity가 높은 황산 수용액 ($429.7 \text{ S} \cdot \text{cm}^2/\text{equi.}$)이 유리하다⁹⁾. 본 연구자들의 선행 연구에서 농도에 따른 비정전용량을 살펴본 결과 4.8 M 황산 전해액이 가장 우수하다는 것을 발표한 바 있으며⁸⁾, 본 연구에서 4.8 M 황산 전해액을 사용하였다.

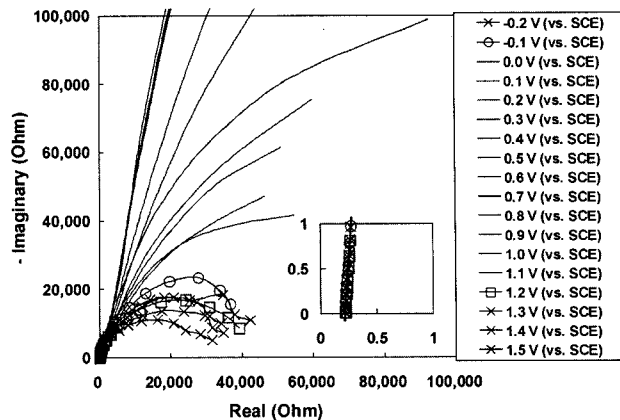


Fig. 1. The AC impedance plot of tantalum(Ta) foil. potential range : $-0.2\sim 1.5 \text{ V(vs. SCE)}$, potential step : 0.1 V/step .

집전체는 전극에서 생성/소비하는 전자를 모아서 외부 회로로 전달해 주는 기능을 한다. 따라서 집전체는 사용 전위 범위에서 화학 및 전기화학 반응이 없어야 하며, 전기전도성이 우수하고, 저밀도의 재료가 바람직하다. 본 연구에서는 tantalum(Ta) 박막에 대하여 부하 저항으로 전기화학적 안정성을 조사하였으며, 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1은 전위범위 $-0.2\sim 1.5 \text{ V}$, $\Delta V=0.1 \text{ V}$, 주파수 범위 $10 \text{ mHz}\sim 100 \text{ kHz}$ 로 하여 전위에 대한 교류저항을 측정하였다. Fig. 1에서 전위가 0 V(vs. SCE) 이하 및 1.1 V(vs. SCE) 이상에서 높은 저항을 나타내었다. 즉 $0\sim 1.1 \text{ V(vs. SCE)}$ 에서는 R_{ct} (전해액 저항)이 관찰되며 0 V(vs. SCE) 이하 부분과 1.1 V(vs. SCE) 이상 부분에서는 R_{ct} 과 함께 R_{ct} (전하이동(전달)저항)도 나타남을 확인하였다¹⁰⁾. 전위가 0 V(vs. SCE) 이하 및 1.1 V(vs. SCE) 이상에서 높은 저항을 나타내는 것은 황산전해액의 전기화학적 가수분해에 기인한다. 집전체인 tantalum의 가역 전위범위는 $0\sim 1.1 \text{ V(vs. SCE)}$ 가 안정적임을 확인하였다.

3.2 루테늄 산화물 전극의 순환전위전류곡선

루테늄 산화물 전극에 사용한 집전체(Ta)의 안정 전위범위인 $0\sim 1.1 \text{ V(vs. SCE)}$ 이므로, 루테늄 산화물 전극은 $0\sim 1.1 \text{ V(vs. SCE)}$ 의 전위범위로 사용이 제한된다. 본 실험에서 루테늄 산화물 슈퍼커패시터의 전압은 1 V 로 하였다. 전압 1 V 로 할 경우 캐패시터 중의 루테늄 산화물 전극의 전위범위를 $0.1\sim 1.1$, $0\sim 1.0 \text{ V(vs. SCE)}$ 로 하여 순환전위전류시험을 하였고, 결과를 각각 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 순환전위전류시험의 주사속도는 2 mV/sec 이다. 순환전위전류시험 시 4회 순환시험을 행하였고, 전극표면에 흡착된 불순물 및 초기 비가역 전극표면 반응이 발생하므로 첫 회 순환의 결과를 배제한 3회 순환결과를 얻었다. 3회 순환 결과 중 임의의 1회 순환의 순환전위전류곡선과 3회 순환의 산화 및 환원의 평균 비정전용량을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었으며, 각각 $556 \text{ F/g-RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 와 $519 \text{ F/g-RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 를 나타내었다. $0.1\sim 1.1 \text{ V(vs. SCE)}$ 의 전위범위가 $0\sim 1.0 \text{ V(vs. SCE)}$ 의 전위범위보다 높은 비정전용량을 나타내었다. 슈퍼커패시터의 전극전위를 $0.6, 0.5 \text{ V(vs. SCE)}$ 로 protonation하여 충방전할 경우 Fig. 2와 Fig. 3에서 충전시 negative전극은 A'-C구간과 positive전극은 A-B구간, 방전시 negative전극은 C-A구간과 positive전극은 B-A'구간으로 대응된다. 슈퍼커패시터의 전극전위를 0.6 V(vs. SCE) 로 protonation한

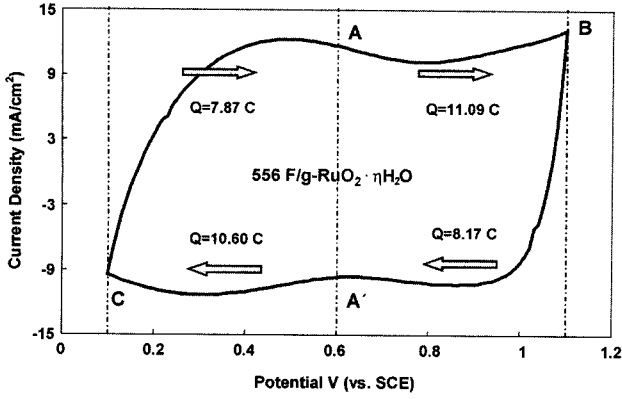


Fig. 2. Cyclic voltammogram of $\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ electrode. potential range : 0.1~1.1 V(vs. SCE), scan rate : 2 mV/sec.

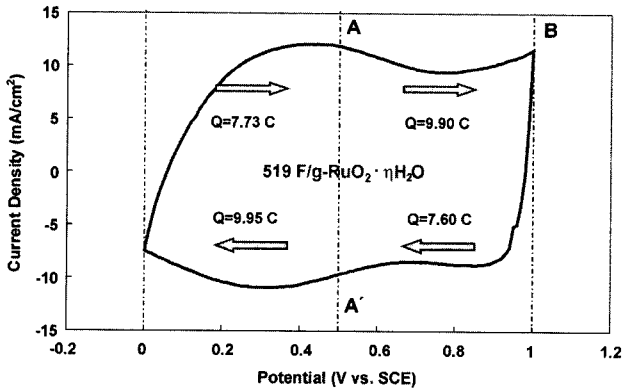


Fig. 3. Cyclic voltammogram of $\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ electrode. potential range : 0~1 V(vs. SCE), scan rate : 2 mV/sec.

경우인 Fig. 2에서 A'-C구간, A-B구간은 각각 $Q=10.60, 11.09 \text{ C}$ 이며 C-A구간, B-A'구간은 각각 $Q=7.87, 8.17 \text{ C}$ 을 보인다. 슈퍼캐패시터의 전극전위를 0.5 V(vs. SCE) 로 protonation 한 경우인 Fig. 3에서 A'-C구간, A-B구간은 각각 $Q=9.95, 9.90 \text{ C}$ 이며 C-A구간, B-A'구간은 각각 $Q=7.73, 7.60 \text{ C}$ 을 보인다. Fig. 3에서 충방전시 negative전극과 positive전극의 용량이 거의 비슷한 것을 알 수 있었다.

3.3 루테늄 산화물 슈퍼캐패시터의 Protonation 전위에 따른 충방전 전위변화

루테늄 산화물 슈퍼캐패시터는 루테늄 산화물 전극 2개, Celgard 3501 격리막 및 4.8 M 황산 전해액을 이용하여 조립 후 전기화학적 protonation을 실시하였다. Protonation은 전극재료의 O.C.V.를 사용하고자 하는 전위범위의 중심으로 화학적 또는 전기화학적 방법으로 전위를 이동시키는 것이다. Protonation은 3전극 시험 구성과 같은 SCE 기준전극과 Pt 박막의 상대전극을 사용하여 충방전시험기로 조정하였다. 비가역 반응을 제거시키기 위하여 1 cycle의 충방전시험을 행한 후 protonation을 하였다. 루테늄 산화물 슈퍼캐패시터의 전극이 $0.1\sim 1.1 \text{ V}$ 및 $0\sim 1.0 \text{ V(vs. SCE)}$ 의 전위범위에서 사용하기 위하여 각각 0.6 및 0.5 V(vs. SCE) 로 protonation하였다. Protonation을 각각 0.6 및 0.5 V(vs. SCE) 로 행한 루테늄 산화물 슈퍼캐패시터의 정전류 충방전 시험 결과를 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다.

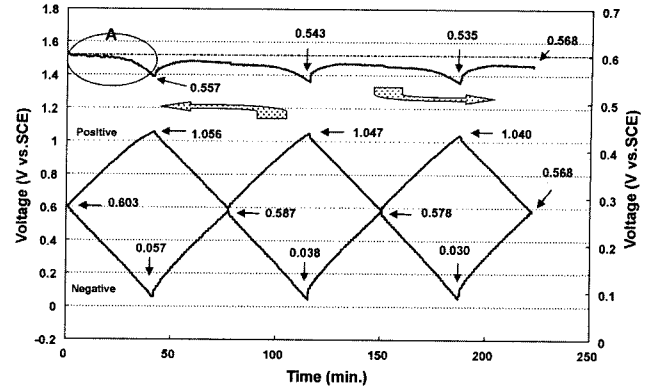


Fig. 4. Potential profiles of the positive and the negative electrodes (Y1 axis), and their average(Y2 axis) for a capacitor made with $\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. protonation potential : 0.6 V(vs. SCE) , potential range : $0.1\sim 1.1 \text{ V(vs. SCE)}$.

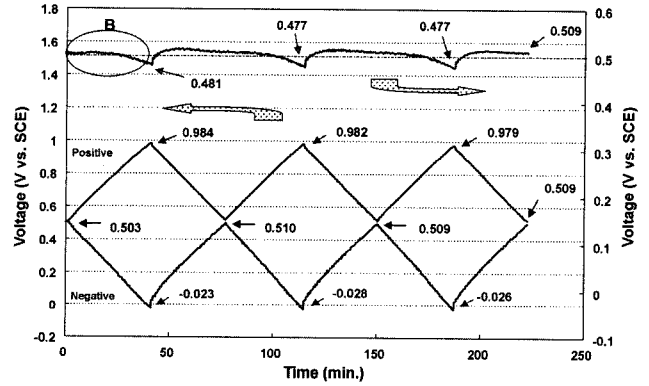


Fig. 5. Potential profiles of the positive and the negative electrodes (Y1 axis), and their average(Y2 axis) for a capacitor made with $\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. protonation potential : 0.5 V(vs. SCE) , potential range : $0\sim 1 \text{ V(vs. SCE)}$

Fig. 4과 Fig. 5의 정전류 충방전 시험 조건은 전류밀도 1 mA/cm^2 및 전압범위 $0\sim 1 \text{ V}$ 로 하였다. Fig. 4과 Fig. 5에서 아래 곡선은 정전류 충방전 시험 시 각각 전극(positive 전극, negative 전극)의 SCE 기준전극에 대한 전위를 정전류 충방전 시간에 따라서 plot한 것이고(Y1축), 위 곡선은 각각 전극(positive 전극, negative 전극)의 SCE 기준전극에 대한 전위를 평균한 값을 정전류 충방전 시간에 따라서 plot한 것이다(Y2 축). Fig. 4에서 0.60 V(vs. SCE) 로 protonation한 루테늄 산화물 슈퍼캐패시터의 경우 초기 0.603 V(vs. SCE) 에서 3 cycle 후 0.568 V(vs. SCE) 로 0.033 V 가 감소하였다. Fig. 5에서 0.50 V(vs. SCE) 로 protonation한 루테늄 산화물 슈퍼캐패시터의 경우 초기 0.503 V(vs. SCE) 에서 3 cycle 후 0.509 V(vs. SCE) 로 거의 일정하였다. 각 cycle의 충전시 positive 전극과 negative 전극의 평균 전위가 감소하고, 방전시 평균 전위가 증가하는 것이 관찰되었다. 두 전극의 평균 전위 감소와 증가가 cycle 주기로 반복되며, Fig. 2와 Fig. 3에서 전위범위 구간에 따라 쿨롱값이 변하는 것과 같은 현상으로 사료된다. 전위 범위 $0.1\sim 1.1 \text{ V(vs. SCE)}$ 의 경우(Fig. 4) 충방전의 진행에 따라 두 전극의 평균 전위가 전반적으로 감소하는 경향을 나타내

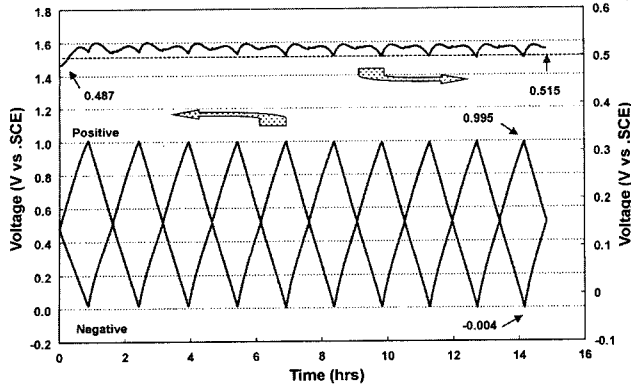


Fig. 6. Potential profiles of the positive and the negative electrodes (Y1 axis), and their average (Y2 axis) for a capacitor made with $\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. protonation potential : 0.5 V(vs. SCE), potential range : 0~1 V(vs. SCE)

있으며, 충전 종료시 두 전극의 평균 전위는 1, 2 및 3 cycle의 경우 각각 0.557, 0.543, 0.535 V(vs. SCE)로 감소하였다. 전위범위 0~1 V(vs. SCE)의 경우(Fig. 5) 충전전의 진행에 따른 두 전극 평균 전위의 변화가 일정하였으며, 1, 2 및 3 cycle의 충전 종료시 두 전극의 평균 전위는 각각 0.481, 0.477, 0.477 V(vs. SCE)로 거의 일정하였다. 첫 cycle 충전시 두 전극의 평균 전위 감소 폭은 전위범위 0.1~1.1 V(vs. SCE)인 경우(Fig. 4에서 a부분)가 0.047 V로 전위범위 0~1 V(vs. SCE)인 경우(Fig. 5에서 b부분)의 0.023 V에 비해 크다. 이러한 결과는 전극 전위 1.0 V(vs. SCE)이상에서 발생하는 비가역 반응에 기인된 것으로 사료된다.

Fig. 6은 조립한 슈퍼커패시터(O.C.V.=0.76 V(vs. SCE))를 바로 0.5 V(vs. SCE)로 protonation하여 시험한 결과로서 Fig. 5와 같은 형태로 지속적인 충전전이 이루어진다. Fig. 6의 시험에서 초기 전극 전위는 0.487 V(vs. SCE)였으며, 10회 충전전 후 완전방전상태에서는 0.515 V(vs. SCE)로서 1회 이후부터는 일정한 값을 유지하였다. 초기 1회 충전전 후 완전 방전상태는 0.514 V(vs. SCE)로 상승하였으며 1회 충전전의 Ah 효율은 84.8%로 초기 충전의 비가역 과정에 기인한 결과이다.

4. 결 론

1. AC impedance시험에서 탄탈륨 집전체는 0~1.1 V(vs. SCE) 범위에서 황산전해액의 전기화학적 가수분해가 없어 안정적인 것을 확인하였다.
2. 순환전위전류시험에서 전극의 전위범위 0.1~1.1 V 및 0.0~1.0 V(vs. SCE)에 대하여 각각 556 F/g- $\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 및 519 F/g- $\text{RuO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 의 specific capacitance를 얻었다.
3. 전극 전위범위 0.0~1.0 V(vs. SCE)로 순환전위전류시험한 결과에서 0.0~0.5, 0.5~1.0 V(vs. SCE)전위 구간에 대하여 거의 비슷한 용량을 갖는 것을 확인하였다.
4. Positive 전극의 전위는 가수분해의 부반응으로 인하여 1.1 V(vs. SCE)에 도달하지 않는 것을 0.6 V(vs. SCE)로 protonation 한 루테튬 산화물 슈퍼커패시터의 정전류 충전전 시험 결과에서 확인하였다.
5. 루테튬 산화물-수계전해액 슈퍼커패시터의 전극전위를 0.5 V(vs. SCE)로 전기화학적 protonation하여 안정적인 충전전 특성을 얻을 수 있었다.

5. 부 록

Half cell과 full capacitor의 specific capacitance의 관계를 정리하였다. Capacitance는 F(Farad)로 나타내며, $(\text{A} \cdot \text{sec} \cdot \text{V}^{-1})$ 의 차원으로 나타낸다. 캐패시터의 정전용량은 충전전 전위범위(V)에서 나타내는 용량($\text{A} \cdot \text{sec}$)으로부터 얻을 수 있다. 반전지로 구성된 캐패시터에서 비정전용량은 구한 정전용량을 전극의 중량 또는 전극층의 재료의 중량으로 나누어 구하며 $(\text{A} \cdot \text{sec})/(\text{V} \cdot \text{g})$ 의 차원으로 나타낸다.

2개의 동일한 캐패시터 전극을 사용하여 full capacitor를 구성할 경우, 사용한 전극은 사용 전위 범위에서 동일한 정전용량을 나타내는 것으로 기준 할 때, full cell 중의 각각의 전극은 반전지 작동 전위범위의 절반(50%)의 전위범위를 최대 사용 전위범위(maximum potential span)로 사용하게 된다(식 2 및 식 3). 따라서 full cell의 안정한 충전전 전위범위는 식 4에 나타낸 바와 같이 반전지에서 안정한 충전전 전위범위와 동일하다.

$$\begin{aligned} \Delta V_{\max, \text{Positive electrode of Full Capacitor}} &= \frac{\Delta V_{\max, \text{an electrode}}}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_{\max, \text{Negative electrode of Full Capacitor}} &= \frac{\Delta V_{\max, \text{an electrode}}}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Delta V_{\max, \text{Full Capacitor}} = \Delta V_{\max, \text{an electrode}} \quad (4)$$

전극재료를 기준하여 비정전용량을 구할 때, full cell에 적용하는 재료의 중량은 half cell에 적용하는 재료 중량의 2배(200%)이다. 이러한 기본조건을 적용하여 full cell 시험을 한 결과를 바탕으로 full capacitor 기준과 반전지 기준으로 비정전용량을 나타내면 각각 식 5 및 식 6과 같다. 여기에서 식 5의 전압과 중량은 각각 full capacitor의 전위범위(V)와 양쪽 전극에 사용한 전극재료의 총량을 나타낸다. 따라서 한쪽 전극 기준으로 볼 때 전위 변화 범위는 V/2이고, 단위 전극층의 재료의 중량은 전극재료 총량의 1/2이 된다.

결과적으로 full capacitor에서 측정된 비정전용량을 half cell에서 측정된 결과와 비교하기 위해서는 식 6에서 나타낸 바와 같이 4배의 환산 팩터를 적용하여야 함을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Specific Capacitance}_{\text{Full Capacitor}}(\text{F/g}) &= \frac{\text{Capacity}}{\text{Potential Range} \cdot \text{Wt. of Material}} \left(\frac{\text{A} \cdot \text{sec}}{\text{V} \cdot \text{g}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Specific Capacitance}_{\text{Half Cell}}(\text{F/g}) &= \frac{\text{Capacity}}{(\text{Potential Range} \cdot \text{Wt. of Material})_{\text{Single electrode}}} \\ &= \frac{\text{Capacity}}{\frac{\text{Potential Range}_{\text{Full Capacitor}}}{2} \cdot \frac{\text{Wt. of Material}_{\text{Full Capacitor}}}{2}} \\ &= 4 \cdot \text{Specific Capacitance}_{\text{Full Capacitor}}(\text{F/g}) \end{aligned} \quad (6)$$

참고문헌

1. C. Lin, J. A. Ritter, and B. N. Popov, *J. Electrochem. Soc.*, **146**, 3155 (1999).

2. B. E. Conway, "Electrochemical Supercapacitors", 22, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York (1999).
3. B. E. Conway, "Electrochemical Supercapacitors", 221, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York (1999).
4. S. Arai, M. Inagawa, M. Ogawa, Y. Inoue, T. Saito, and Y. Kibi, *J. NEC Technical*, **52**, 63 (1999).
5. B. E. Conway, "Electrochemical Supercapacitors", 203, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York (1999).
6. T. R. Jow and J. P. Zheng, *J. Electrochem. Soc.*, **145**, 49, (1998).
7. J. P. Zheng and T. R. Jow, *J. Electrochem. Soc.*, **142**, L6, (1995).
8. S. J. Choi, C. H. Doh, S. I. Moon, M. S. Yun, G. C. Yug and S. G. Kim, *J. of Korean Electrochem. Soc.*, **5**, 21, (2002).
9. E. A. M. F. Dahmen, "Electroanalysis", **7**, 16, Elsevier, Oxford (1986).
10. Su-II Pyun, "Outlines of Electrochemistry of Materials", 371, Sigma-press, Seoul (2001).