

## 다중벽 탄소나노튜브의 표면처리에 따른 전기이중층 커패시터의 특성

김지일 · 김익준<sup>†</sup> · 박수진\*

인하대학교 화학과

<sup>†</sup>한국전기연구원 전지연구그룹

(접수 2009. 8. 25; 수정 2009. 12. 13; 게재확정 2009. 12. 22)

### Surface Treatment of Multi-walled Carbon Nanotubes for Increasing Electric Double-layer Capacitance

Ji-Il Kim, Ick-Jun Kim<sup>†</sup>, and Soo-Jin Park\*

Department of Chemistry, Inha University, Incheon 402-751, Korea

<sup>†</sup>Battery Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute, Chang Won 641-120, Korea

(Received August 25, 2009; Revised December 13, 2009; Accepted December 22, 2009)

**요약.** 본 연구에서는 Urea와 산 처리로 질소 및 산소 관능기가 도입된 다중벽 탄소나노튜브를 각각 제조하였으며, 표면처리에 따른 전기이중층 커패시터 (EDLCs) 특성을 관찰하였다. XPS, zeta-potential, 및 BET 분석방법을 이용하여 구조특성을 확인하였으며, 전기화학적 특성은 1 M 황산용액의 전해질에서 각각 50 mVs<sup>-1</sup>과 100 mVs<sup>-1</sup>의 주사속도로 순환전류 전압곡선 특성 실험을 통해 고찰하였다. 실험 결과로부터 MWNTs의 질소 원소구성비가 늘어날수록 축전용량이 증가하는 것을 확인하였으며, Urea 처리된 MWNTs의 축전용량이 가장 높은 수치를 나타내었다. 이는 전극 표면과 전해질 사이의 젖음성이 증가하고, 표면 관능기의 밀도가 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

**주제어:** 전기이중층 커패시터, 다중벽 탄소나노튜브, 질소관능기, 전기화학적 특성

**ABSTRACT.** In this work, the electrochemical properties of surface treated multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) were studied. Nitrogen and oxygen functional groups of the MWNTs were introduced by urea and acidic treatment, respectively. The surface functional groups of the MWNTs were confirmed by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) measurements and zeta-potential method. The characteristics of N<sub>2</sub> adsorption isotherm at 77 K, specific surface area, and total pore volumes were investigated by BET equation, BJH method and *t*-plot method. Electrochemical properties of the functionalized MWNTs were accumulated by cyclic voltammetry at the scan rates of 50 mVs<sup>-1</sup> and 100 mVs<sup>-1</sup> in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> as electrolytes. As a result, the functionalized MWNTs led to an increase of capacitance as compared with pristine MWNTs. It was found that the increase of capacitance for urea treated MWNTs was attributed to the increase in density of surface functional groups, resulting in improving the wettability between electrode materials and charge species.

**Keywords:** Electric double-layer capacitors, Multi-walled carbon nanotubes, Nitrogen, Electrochemical properties

### 서론

전기이중층 커패시터(EDLCs)는 전기에너지를 저장 및 이용하는 장치로서 전극표면과 전해질의 활성물질 사이에서 단순한 이온들의 이동이나 표면화학 반응에 의한 전기화학적 가역흡착 과정으로 전하를 충전한다.<sup>1</sup> 이러한 메커니즘으로 인해 갖는 장점을 이용해 여러 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 기존 2차전지와 비교하여 충·방전속도가 빠르며, 높은 에너지밀도를 갖고, 상대적으로 경제적인 무독성의 물질을 전극소재로 사용한다. EDLCs의 전극소재는 경제성, 높은 비표면적, 기공구조의 제어, 효율성, 및 안정성을 갖는 물질을 사용해야 하며, 다양한 형태의 탄소재료(활성탄, 분

말, 섬유, 나노복합재료)는 높은 비표면적 및 기공구조가 발달한 EDLCs 전극용소재로 적합하다.<sup>2-8</sup> 그 중에서 탄소나노튜브(carbon nanotubes)는 높은 전도성, 기공구조의 제어용이 및 높은 화학적 안정성을 갖고 있는 물질로서, 에너지 저장장치 분야(이차전지, 연료전지, 전기화학축전지, 및 수소저장) 뿐만 아니라 다른 분야에서도 각광받고 있는 물질이다.<sup>4,6,7</sup> 탄소나노튜브를 이용한 커패시터의 경우 그 구조에 따라 다소 차이가 있지만 비교적 높은 축전용량을 보이는 것으로 보고되고 있다.<sup>6</sup>

최근 탄소재료의 축전용량 및 전기화학적 특성 개선 및, 응용분야의 증대를 위해 표면처리를 통하여 관능기를 도입하는 방법 및 화학적 활성화에 관한 연구가 활발히 진행되고

있다.<sup>9-11</sup> 화학적 활성화 방법은 비표면적을 비약적으로 증가시킬 수 있는 효과를 갖는 반면 기존 탄소나노튜브의 구조가 붕괴됨을 불러올 뿐만 아니라 전기전도도의 감소를 피할 수 없다. 이러한 문제를 보완하고자 표면처리 및 열처리를 통해 질소 관능기를 도입하여 탄소나노튜브의 구조를 최대한 손상시키지 않고 최종적으로 축전용량의 증가를 유도하는 방법도 시도되고 있다. 일반적으로 질소 관능기가 치환된 탄소 재료를 얻는 효율적인 방법으로는 질소 관능기를 포함하는 탄소전구체(Urea,<sup>12</sup> melamine,<sup>13</sup> ammonia<sup>14</sup>)를 고온에서 탄소 재료와 함께 탄화시키는 방법 등이 있다. 그러나 질소 관능기가 치환된 탄소재료의 경우 축전용량이 증가되는 효과를 가져오지만, 그 원인은 기존 문헌을 통하여 아직 확실히 밝혀지지 않은 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 Urea와 산처리를 통하여 제조된 탄소나노튜브의 표면구조특성을 관찰하고, 이에 따른 EDLCs 전극 특성을 확인해보고자 하였으며, 또한 탄소나노튜브 표면에 형성된 질소와 산소 관능기의 원소구성비에 따른 EDLCs 특성에 관하여 고찰하고자 하였다.

## 실험

**재료.** 본 연구에서 사용한 탄소나노튜브는 다중벽탄입(Multi-walled carbon nanotubes, MWNTs)으로서 나노솔루션(주)에서 구입하였으며 화학기상증착법(chemical vapor deposition method)으로 얻어졌다. 또한 약 95%의 순도, 직경 10~25 nm, 그리고 길이는 10~50 $\mu$ m이다. MWNTs는 사용하기 전 순도를 높이고자 5 M 질산용액에 실온에서 5시간 침지시킨 다음 증류수로 3회 세척하고, 진공오븐에서 120 $^{\circ}$ C의 온도로 24시간 건조시켜 사용하였다. 질소 관능기를 도입하기 위한 전구체로 Urea를 사용하였으며, 완충 용액으로 에탄올을 사용하였다.

**표면처리된 탄소나노튜브의 제조.** 질소 관능기를 도입하기 위해 MWNTs에 Urea를 1:1의 질량비로 에탄올에 넣고 실온에서 6시간 정도 교반시켜 잘 분산시킨 다음 에탄올을 증발시켜 진공오븐에서 120 $^{\circ}$ C 온도로 24시간 건조시켰다. 건조시킨 MWNTs를 질소 분위기 하에서 5 $^{\circ}$ C/min의 승온속도로 900 $^{\circ}$ C에서 1시간 유지하는 조건으로 탄화시켰다. 또한, 산소 관능기가 원소 구성비 특성과 전기화학적 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 정제된 MWNTs를 5 M 인산용액에서 교반시켜 산처리 한 다음 Urea 처리를 하였다. 이렇게 얻어진 각각에 대해 Urea처리 전 산처리를 한 시료를 UO-MWNTs, 산처리만 한 시료를 O-MWNTs, Urea 처리만 한 시료를 U-MWNTs, 기존 시료를 MWNTs라 각각 명명하였다.

**탄소나노튜브의 표면특성 및 기공구조.** 각각의 제조된 MWNTs의 원소 구성비는 X-선 광전자분석기(X-ray photo-

electron spectroscopy, VG Scientific Co., ESCA LAB MK-II)를 이용하여 시행하였으며, X-선 광원은 Al K $\alpha$  (hv = 1486.6 eV)를 사용하였다.

MWNTs 표면에 결합된 관능기와 이온에 의한 전하 흡착 특성을 전기영동 장치(Zeta-Potential Analyzer, Otsuka Electronics Co.)를 사용하여 측정하였다. 이 때 중성조건의 에탄올에 시료를 부유한 뒤 2분간 초음파 처리하여 제타전위를 측정하였다.

기공분석을 위해 Tristar 3000 (Micromeritics Co.)을 이용하여 77 K에서 상대압력(P/P<sub>0</sub>)에 따른 N<sub>2</sub> 기체 흡착량을 측정하였다. BET 식을 이용하여 등온 흡착곡선으로부터 비표면적을 계산하였고, BJH와 t-plot method를 이용하여 미세기공의 부피를 계산하였다.

**전기화학적 특성.** 표면처리된 MWNTs의 순환전류 전압곡선(cyclic voltammogram)을 측정하기 위해 Autolab PGSTAT 30을 사용하였다. 작업전극은 유리탄소(glassy carbon)전극에 carbon paste를 이용하여 시료를 일정량 부착시켜 사용하였다. 기준전극으로는 Ag/AgCl을, 상대전극으로는 Pt 전극을 각각 사용하였다. 모든 전기화학적 특성은 상온조건에서 1 M 황산용액의 전해질을 이용하여 측정하였으며, 전위 주사속도(scan rate)는 각각 50 mVs<sup>-1</sup>과 100 mVs<sup>-1</sup>에서 수행하였다. 또한 교류 임피던스 측정을 위해 open circuit potential (OCP)에서 1 Hz부터 1 MHz의 주파수 범위와 amplitude 20mV의 조건 하에서 측정하였다.

## 결과 및 고찰

**MWNTs의 기공구조.** 표면처리한 MWNTs의 기공구조를 고찰하기 위하여 N<sub>2</sub> 기체 흡착량을 통하여 등온 흡착곡선을 측정하였으며, Fig. 1에 이를 나타내었다. 모든 흡착등온선은 IUPAC 분류 중에서 Type IV임을 확인할 수 있었으며, 표면처리를 실시하였음에도 불구하고 여전히 메조기공물질의 구조를 유지하고 있음을 관찰하였다. 이러한 메조기공은 전해질 이온을 포획하거나 이온의 효과적인 거동에 적합한 기공 형태라 할 수 있을 것이다.<sup>6</sup> 그러나 UO-MWNTs의 경우, 흡착량이 감소한 것을 확인할 수 있는데, 이는 다른 시료에 비해 더 많은 질소와 산소 관능기가 결합되어 MWNTs의 기공을 폐쇄했기 때문으로 판단된다.

표면처리에 따른 효과로 인한 기공구조파라미터를 Table 1에 나타내었다. 산처리 및 Urea 처리 후의 열처리를 통해 기공구조의 붕괴가 일어나고, 그로 인해 비표면적과 기공부피가 감소하는 경향을 보였다. 특히 산소 관능기를 도입하기 위한 산처리는 Urea 처리에 비해 메조기공의 부피를 훨씬 더 감소시켰으며, 이는 산소 관능기의 이온반경이 질소 관능기에 비해 크기 때문으로 판단되며, 두 관능기가 모두 MWNTs의 기공을 폐쇄하여 기공부피가 감소한 것으로 판단된다.

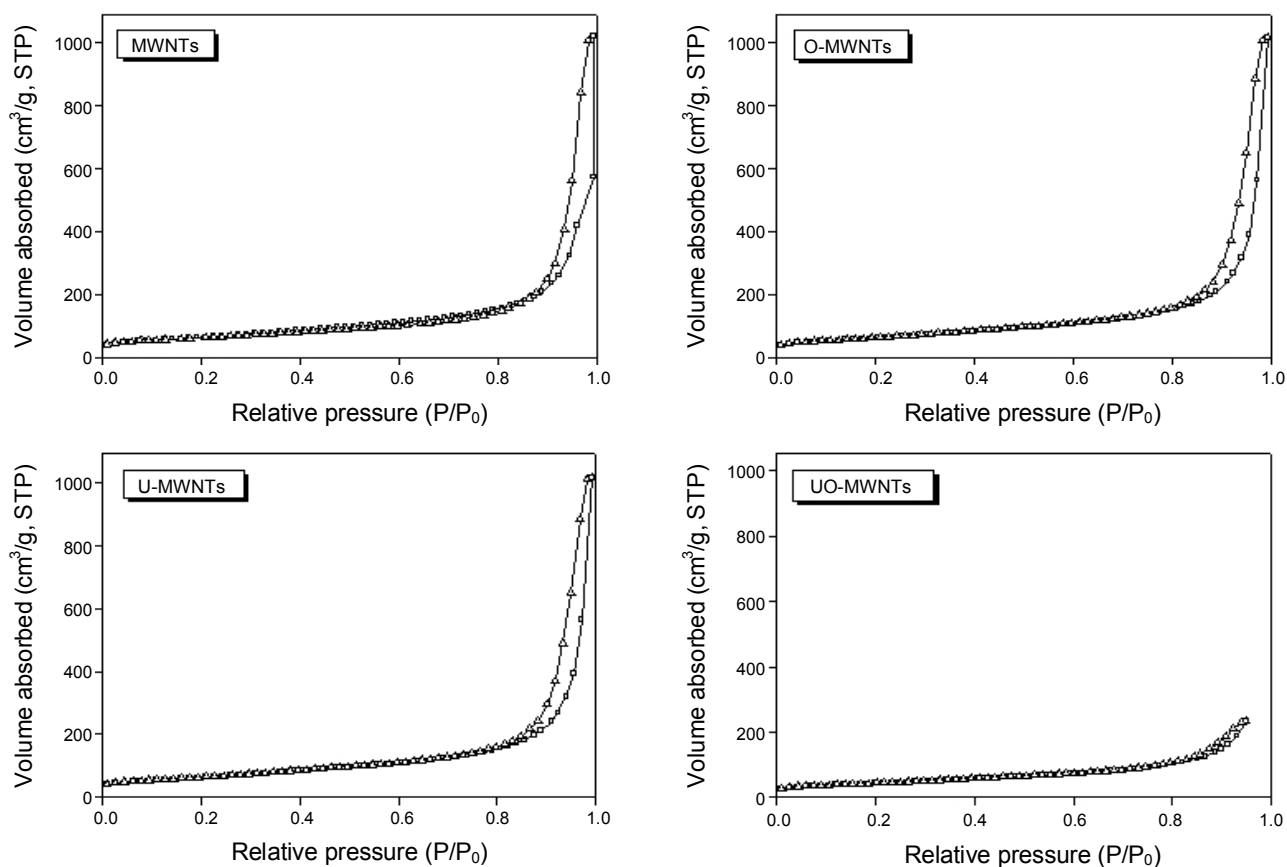


Fig. 1. N<sub>2</sub> adsorption/desorption isotherms at 77 K as a function of surface treatment.

Table 1. Porosity parameters of the MWNTs as a function of surface treatment

Specimens	S <sub>BET</sub> <sup>a</sup>	V <sub>mic</sub> <sup>b</sup>	V <sub>me</sub> <sup>c</sup>	V <sub>t</sub> <sup>d</sup>	V <sub>me</sub> /V <sub>t</sub>
MWNTs	240.83	0.0037	1.5733	1.5770	0.9977
O-MWNTs	207.06	0.0030	0.7657	0.7687	0.9961
U-MWNTs	216.51	0.0035	1.0418	1.0453	0.9967
UO-MWNTs	155.37	0.0023	0.3570	0.3593	0.9936

<sup>a</sup>specific surface area (m<sup>2</sup>g<sup>-1</sup>). <sup>b</sup>micropore volume (cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>). <sup>c</sup>mesopore volume (cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>). <sup>d</sup>total pore volume (cm<sup>3</sup>g<sup>-1</sup>).

**MWNTs의 이온흡착 특성.** Table 2에 표면처리에 따른 MWNTs의 제타전위 (ζ)를 측정된 값을 나타내었다. 전기이동도 (U)에서 표면 전위인 제타전위 (ζ)를 Smoluchowski식 (1)을 이용하여 계산하였다.<sup>15</sup>

$$\zeta = \frac{4\pi\eta U}{\epsilon} \quad (1)$$

여기서, η는 용매의 점도, ε는 용매 유전율, 그리고 U는 전기이동도 (U = 영동속도/전장)로 각각 나타낸다.

모든 시편의 제타전위 값은 음의 전위값을 가졌으며, 이는

Table 2. Zeta potential value of the MWNTs as a function of surface treatment

Specimens	MWNTs	O-MWNTs	U-MWNTs	UO-MWNTs
Zeta potential (mV)	-28.68	-44.32	-17.26	-24.53

기존 문헌에 위배되지 않는 범위에 위치하였다.<sup>16,17</sup> Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO) theory에 따르면 MWNTs의 입자는 정전기적 반발력에 의해 분산되며, 동등한 전하를 띠는 환경에서 반데르발스 상호작용(van der Waals' interaction)에 의한 인력을 극복하려는 경향을 보인다.<sup>18</sup> O-MWNTs의 제타전위는 다른 시료에 비해 상대적으로 높은 값을 나타내는 것으로 보아 안정된 분산력을 갖는 것으로 판단되며, 이는 산소 관능기로 인하여 에너지장벽(energy barrier)이 높아졌기 때문으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여, Urea 처리 전의 산 처리를 통하여 탄소나노튜브의 안정된 분산력을 이끌어냄으로써, Urea와 탄소나노튜브 간의 수월한 반응을 유도하고, 더 높은 질소관능기의 도입을 이끌어 낼 수 있음을 확인하였다.

**MWNTs의 XPS 분석.** XPS로 분석한 표면처리에 따른 MWNTs의 원소구성비를 Table 3에 나타내었다. 결과로부터 모든 시료 중 UO-MWNTs의 질소 관능기의 구성비가 가장 높

Table 3. Elemental composition of the MWNTs as a function of surface treatment

Specimens	Atomic conc. (%)		
	C	O	N
MWNTs	98.08	1.92	-
O-MWNTs	93.17	6.83	-
U-MWNTs	97.67	1.21	1.12
UO-MWNTs	95.55	1.98	2.47

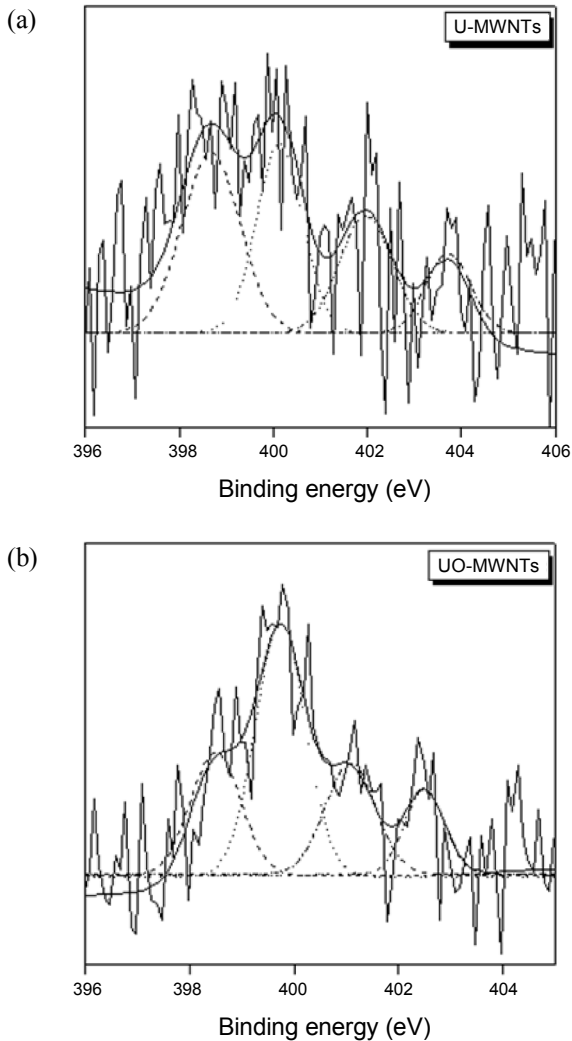


Fig. 2.  $N_{1s}$  XPS spectra of U-MWNTs (a) and UO-MWNTs (b).

으며, 산소 관능기의 구성비는 감소함을 확인하였다. 이를 통하여 산소원자는  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 의 열처리 과정에서 안정하지 못한 것을 알 수 있었다.

상세한 MWNTs의 표면 작용기를 분석하고자 Fig. 2에 표면처리된 MWNTs 중에서 U-MWNTs와 UO-MWNTs의  $N_{1s}$  피크를 나타내었다. 이전 문헌과 비교해 보면,<sup>19-24</sup> MWNTs 표면의 질소 관능기의 결합 에너지는  $400\text{ eV}$  부근에서 관찰된

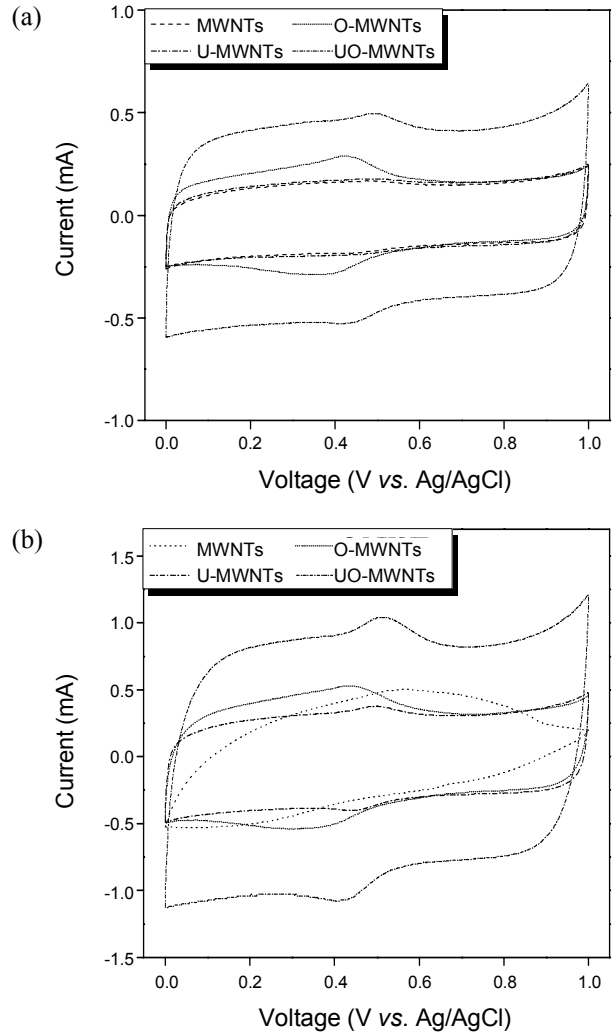


Fig. 3. Cyclic voltammograms of MWNTs-based on EDLCs electrode at the scan rate of 50 (a) and 100 (b)  $\text{mVs}^{-1}$  in 1 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

다. N-6 (pyridinic nitrogen) 결합은  $398.7 \pm 0.3\text{ eV}$ , N-5 (pyrrolic nitrogen and pyridinic nitrogen related to oxygen functionalities) 결합은  $400.3\text{ eV} \pm 0.3\text{ eV}$ , N-Q (quaternary nitrogen) 결합은  $401.4 \pm 0.5\text{ eV}$ , 또한 pyridine-N-oxide 결합은  $402 \sim 405\text{ eV}$ 에서 나타남을 확인할 수 있었다. 그리고 질소 관능기의 원소구성비가 증가함에 따라 스펙트럼의 질소피크 세기 또한 증가함을 관찰하였으며, 산소의 경우도 마찬가지로 원소구성비가 증가할수록 세기 또한 증가하는 경향을 보였고, 각각  $531\text{ eV}$  (C=O)과  $532\text{ eV}$  (C-OH), 그리고  $535\text{ eV}$  (C-O-C)에서 나타났다.<sup>25-28</sup>

**MWNTs의 전기화학적 특성.** Fig. 3은 표면처리한 MWNTs에 1 M 황산용액의 전해질을 사용하여 주사속도  $50\text{ mVs}^{-1}$ 과  $100\text{ mVs}^{-1}$ 에서 0 V부터 1.0 V의 범위로 측정된 순환전류전압곡선(CV)을 나타낸 그래프이다. Fig. 3(a)의  $50\text{ mVs}^{-1}$ 의 주사속도로 측정된 CV 곡선에서 보이는 바와 같이, 모든 시료 중

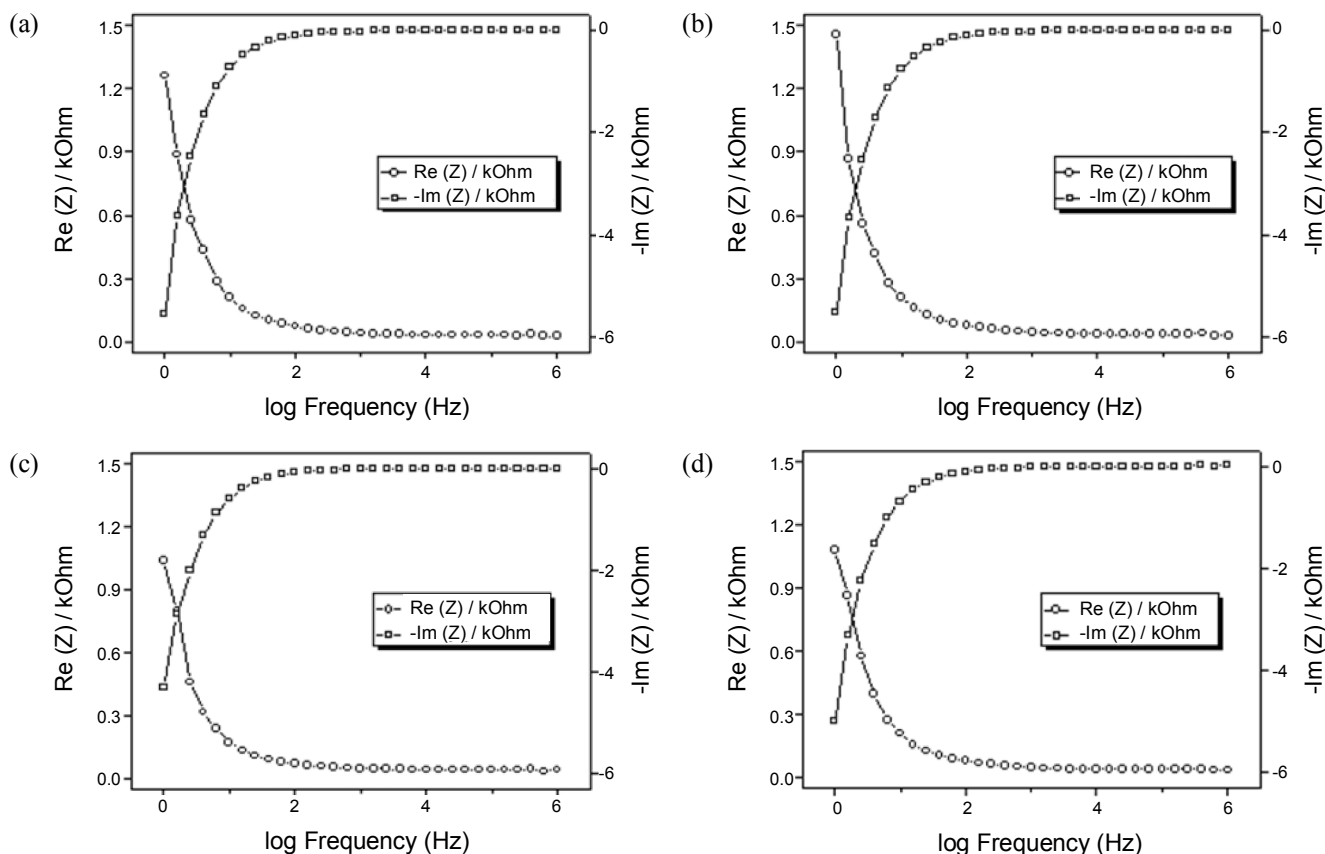


Fig. 4. Impedance spectra of surface treated MWNTs using MWNTs (a), O-MWNTs (b), U-MWNTs (c), and UO-MWNTs.

에서 U-MWNTs와 UO-MWNTs는 매끄러운 형태를 나타내었으며, 산화·환원 봉우리가 거의 나타나지 않는 전형적인 EDLCs 탄소전극 재료의 CV 곡선을 나타내고 있다. 질소 관능기의 도입량에 따라 전류 밀도가 증가하고, 곡선 모양이 정방형에 가깝게 나타나는 것을 관찰하였으며, 주사속도를 증가시킬 경우 전극표면의 극성으로 인해 정방형에서 어긋나는 곡선을 나타내었다. 그러나 O-MWNTs의 경우에는, 주사속도와는 무관하게 질소 관능기가 치환된 MWNTs에 비해 정방형으로부터 왜곡된 CV 곡선을 나타내었다.

표면처리에 따른 MWNTs의 저항변화를 관찰하기 위해 임피던스를 측정하였으며, 그에 따른 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 약 100 Hz 이상의 범위에서 임피던스가 진동수에 비례하는 knee frequency가 나타나는 것을 확인하였으며, 원소구성비에 따라 초기 저항값이 변화함을 관찰하였다. 산처리 후에는 기존 MWNTs보다 저항값이 증가하였지만, 질소관능기의 원소구성비가 증가할수록 저항값이 감소하는 것을 관찰하였다. 또한 UO-MWNTs의 경우 질소관능기의 구성비가 높음에도 불구하고, U-MWNTs에 비해 저항값이 높은 것을 확인하였는데, 이는 친수성 관능기의 제거를 통한 전극표면의 젖음성 개선 때문으로 판단된다.

본 연구에서는 산처리 및 Urea 처리 후 열처리를 통하여 제

조된 질소 및 산소 관능기가 화학적으로 결합된 탄소나노튜브를 제조하여 표면특성을 살펴보고 이에 따른 EDLCs 전극 특성을 고찰하였다. 산소 관능기의 반데르발스 결합력을 극복하는 힘은 탄소나노튜브에 안정된 분산력을 갖게 하고, 최종적으로 직접 Urea 처리한 탄소나노튜브에 비해 Urea 처리 전 산처리를 실시한 탄소나노튜브가 더 많은 질소 관능기를 포함하는 결과를 나타내었다. 비록 모든 시료 중에서 UO-MWNTs는 가장 낮은 표면 구조적 파라미터를 갖는 반면 U-MWNTs에 비해 더 많은 질소 관능기를 포함하였으며, 순환전류 전압 곡선에 있어 산화·환원 봉우리가 발견되지 않는 우수한 전기화학적 커패시터 특성을 나타내었다. 반면 U-MWNTs는 UO-MWNTs와 마찬가지로 우수한 커패시터 특성을 나타낼 뿐만 아니라 UO-MWNTs에 비해 기공구조가 덜 붕괴되는 것을 관찰하였다. 이는 표면에 남아있는 헤테로 원자들과 산소원자 같은 친수성 관능기들이 열처리를 통해 제거되고, 그를 통해 전극물질 표면과 전하활성종 간의 젖음성이 개선되기 때문으로 판단된다. 또한, N-6와 N-5 결합에 있어 비공유 전자쌍이 탄소나노튜브의  $\pi$ -ring 계에 비편재화되면서 전기화학적 활성을 촉진시키는 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다. 이를 통하여 Urea 처리를 통한 질소 관능기의 도입은 표면기공구조의 손상을 최소화하며 축전용량을 증가시킬

수 있는 효과적인 방법 중 하나임을 알 수 있었다.

**감사의 글.** 본 연구는 지식경제부의 IT산업원천기술개발 사업의 일환으로 수행하였음.

## REFERENCES

- Simon, P.; Gogotsi, Y. *Nature Materials* **2008**, *7*, 846.
- Li, H. Q.; Liu, R. L.; Zhao, D. Y.; Xia, Y. Y. *Carbon* **2007**, *45*, 2628.
- Park, S. J.; Im, S. H.; Rhee, J. M.; Park, S. Y.; Kim, H. J. *J. Korean Ind. Eng. Chem.* **2007**, *18*, 205.
- Frackowiak, E.; Béguin, F. *Carbon* **2004**, *39*, 937.
- Kim, I. J.; Yang, S. H.; Jeon, M. J.; Moon, S. I.; Kim, H. S.; An, K. H. *J. Korean Ind. Eng. Chem.* **2007**, *18*, 522.
- Park, S. J.; Kim, B. J. *Carbon Sci.* **2005**, *6*, 264.
- Lee, J. Y.; Liang, K.; An, K. H.; Lee, Y. H. *Synthetic Met.* **2005**, *150*, 153.
- Park, S. J.; Im, S. H. *Bull. Korean Chem. Soc.* **2008**, *29*, 777.
- Béguin, F.; Szostak, K.; Lota, G.; Frackowiak *Adv. Mater.* **2005**, *17*, 2380.
- Kim, Y. J.; Abe, Y.; Yanagiura, T.; Park, K. C.; Shimizu, M. T.; Iwazaki, S.; Nakagawa, Endo, M.; Dresselhaus, M. S. *Carbon* **2007**, *45*, 2116.
- Seo, M. K.; Park, S. J. *Curr. Appl. Phys.* **2010**, *10*, 241.
- Abe, M.; Kawashima, K.; Kozawa, K.; Sakai, H.; Kaneko, K. *Langmuir* **2006**, *16*, 5059.
- Adib, F.; Agreev, A.; Bandosz, T. *Langmuir* **2000**, *16*, 1980.
- Bashkova, S.; Bagreev, A.; Bandosz, T. *Langmuir* **2003**, *19*, 6115.
- Xu, R. C.; Wu, Xu, H. *Carbon* **2007**, *45*, 2806.
- Liu, Y.; Gao, L.; Zheng, S.; Wang, Y.; Sun, J.; Kajiura, H.; Li, Y.; Noda, K. *Nanotechnology* **2007**, *18*, 365.
- Vaisman, L.; Marom, G.; Wagner, H. D. *Adv. Funct. Mater.* **2006**, *16*, 357.
- Rosen, M. J. *Surfactants and Interfacial Phenomena*; Hoboken; John Wiley and Sons: New Jersey, U. S. A., **2004**.
- Machnikowski, J.; Grzyb, B.; Weber, J. V.; Frackowiak, E.; Rouzaud, J. N.; Béguin, F. *Electrochim. Acta* **2004**, *49*, 423.
- Begreev, A.; Menendez, J. A.; Dukhno, I.; Tarasenko, Y.; Bandosz, T. *Carbon* **2004**, *42*, 469.
- Lahaye, J.; Nanse, G.; Bagreev, A.; Strelko, V. *Carbon* **1999**, *37*, 585.
- Jurewicz, K.; Babel, K.; Ziolkowski, A.; Wachowska, H. *Electrochim. Acta* **2003**, *48*, 1491.
- Jurewicz, K.; Babel, K.; Ziolkowski, A.; Wachowska, H. *J. Phys. Chem. Solids* **2004**, *65*, 269.
- Kaptein, F.; Moulijn, J. A.; Matzner, S.; Boehm, H. P.; *Carbon* **1999**, *37*, 1143.
- Bansal, R. C.; Goyal, M. *Activated Carbon Adsorption*; Taylor, Francis; Boca Raton, Florida, U. S. A., **2005**.
- Park, S. J.; Jin, S. Y. *J. Colloid Interface Sci.* **2005**, *286*, 417.
- Park, S. J.; Kim, Y. M. *J. Colloid Interface Sci.* **2004**, *278*, 276.
- Le Leuch, L. M.; Bandosz, T. *Carbon* **2007**, *45*, 568.