

유기용매의 함량비에 따른 다공성 탄소전극의 전기화학적 특성 연구

임정애 · 최재환[†]

공주대학교 화학공학과
(2007년 12월 19일 접수, 2008년 3월 3일 채택)

A Study on the Electrochemical Properties of Porous Carbon Electrode according to the Organic Solvent Contents

Jung-Ae Lim and Jae-Hwan Choi[†]

Department of Chemical Engineering, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea
(Received December 19, 2007; accepted March 3, 2008)

전기흡착용 전극의 비표면적을 증가시키기 위하여 상전이법을 이용한 다공성 탄소전극을 제조하였다. 활성탄소분말, polyvinylidene fluoride (PVdF)를 유기용매인 N-methyl-2-pyrrolidone (NMP)과 혼합한 전극슬러리를 전도성 흑연박막 위에 캐스팅한 후 비용매인 증류수에 침지시켜 상전이를 통해 다공성 탄소전극을 제조하였다. 제조된 전극에 대하여 SEM, porosimetry, cyclic voltammetry 분석을 통해 전극의 물리적, 전기화학적 특성을 분석하였다. SEM 측정 결과 다양한 크기의 미세한 기공이 전극 표면에 균일하게 형성된 것을 확인할 수 있었다. NMP 함량을 변화시켜 제조한 전극들의 평균 기공크기를 측정된 결과 64.2~82.4 nm 범위의 기공을 갖는 것으로 나타났으며 NMP 함량이 증가할수록 기공의 크기도 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 탄소전극에 대한 cyclic voltammogram을 측정된 결과 전형적인 전기이중층에서의 흡착 및 탈착 특성을 보였다. 전극의 축전용량은 NMP의 함량에 따라 3.88~5.87 F/cm² 범위의 값을 나타냈으며 NMP의 함량이 감소할수록 축전용량이 증가하는 것으로 나타났다. 이상의 연구결과로부터 상전이 방법으로 다공성 탄소전극을 제조할 때 유기용매의 함량은 전극의 기공 크기를 제어할 수 있는 중요한 인자이며 이를 통해 전극의 비표면적을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

In order to increase the surface area of electrodes for electrosorption, porous carbon electrodes were fabricated by a wet phase inversion method. A carbon slurry consisting of a mixture of activated carbon powder (ACP), polyvinylidene fluoride (PVdF), and N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) as a solvent was cast directly on a graphite sheet. The cast film was then immersed in pure water for phase inversion. The physical and electrochemical properties of the electrodes were investigated using scanning electron microscopy (SEM), porosimetry, and cyclic voltammetry. The SEM images verified that the pores of various sizes were formed uniformly on the electrode surface. The average pore sizes determined for the electrodes fabricated with various NMP contents ranged from 64.2 to 82.4 nm and the size increased as the NMP content increased. All of the voltammograms showed a typical behavior of charging and discharging characteristic at the electric double layer. The electrical capacitance ranged from 3.88 to 5.87 F/cm² depending on the NMP contents, and the electrical capacitance increased as the solvent content decreased. The experimental results showed that the solvent content is an important variable controlling pore size and ultimately the capacitance of the electrode.

Keywords: electrical double layer, electrosorption, organic solvent contents, porous carbon electrode, wet phase inversion

1. 서 론

일반적으로 중금속이나 질산성 질소와 같은 이온성 물질들은 사람의 건강이나 생태계에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다. 이들 오염물질들은 그 종류에 따라 건강에 피해를 주는 정도에 차이가 있지만 안전한 생태환경을 유지하기 위해서는 이들 물질들이 함유된 물을 효과적으로 처리할 수 있는 기술이 필요하다.

현재 수용액 중의 이온성 물질을 제거하는 방법으로 이온교환법이 널

리 사용되고 있다. 이 방법은 대부분의 이온성 물질들을 효과적이면서도 경제적으로 분리할 수 있다는 장점을 갖고 있지만 이온교환이 완료된 수지를 재생하는 과정에서 다량의 산, 염기, 또는 고농도의 염 폐액이 발생한다는 큰 단점을 갖고 있다[1]. 이온교환법 이외에도 역삼투막법[2,3], 전기투석법[4] 등의 분리막 기술이 적용되고 있지만 이들 공정들은 막의 주기적인 교체, 막 오염으로 인한 처리수의 급격한 감소, 운전과정에서 고압, 또는 많은 양의 전기를 인가해야 하는 공정의 특성상 경제적인 측면에서 극복해야 할 많은 문제점을 갖고 있다.

이처럼 이온성 물질들을 처리하는 기존 기술들의 문제점을 해결할 수

[†] 교신저자 (e-mail: jhchoi@kongju.ac.kr)

있는 새로운 기술로서 전기흡착(electro-sorption) 기술에 관한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다[5-7]. 전기흡착 기술은 전극에 전위를 인가했을 때 전극 계면에 형성되는 전기이중층에서의 흡착반응을 이용하여 이온성 물질을 제거하는 기술이다. 전기흡착법은 분극성 전극에서 산화/환원 반응이 일어나지 않는 1~2 V 범위의 낮은 전위영역에서 운전되기 때문에 공정의 운전과정에서 에너지 소비량을 획기적으로 줄일 수 있는 큰 장점을 갖고 있다. 또한 전극의 전위를 바꾸어 줌으로써 흡착된 이온들을 쉽게 탈착할 수 있기 때문에 전극을 재생하는 과정에서 새로운 2차 오염물질을 발생시키지 않는 친환경적인 공정으로 알려져 있다[8].

전기흡착법에서 전극에 최대한 많은 이온들을 흡착시키기 위해서는 전극의 비표면적을 높이는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 활성탄소분말(activated carbon powder, ACP)[7-10], 카본섬유[11,12], 카본에어로겔[5,13] 등과 같이 비표면적이 높은 탄소 소재를 이용하여 전기흡착용 전극을 제조하기 위한 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되었다. 활성탄소분말을 이용하는 경우 탄소분말 및 고분자바인더 분말을 혼합한 후 고온에서 롤 프레싱하는 방법으로 전극을 제조하고 있다[7]. 이와 같은 방법으로 제조된 탄소전극은 표면에 노출된 탄소입자만이 전기흡착에 이용될 수 있기 때문에 전극의 축전용량(capacitance)은 사용된 탄소소재의 입자 크기, 비표면적, 그리고 기공크기 등과 같은 소재의 물리적 특성에 의해 결정된다. 따라서 탄소전극의 축전용량을 높이기 위해서는 전극소재의 성능 개선도 중요하지만 전극표면에 노출된 탄소입자를 증가시킬 수 있는 새로운 전극제조 방법이 필요하게 되었다.

이를 위해 본 연구에서는 상전이(phase inversion) 방법을 이용해 다공성 탄소전극을 제조하여 전극의 축전용량을 향상시킬 수 있는 연구를 수행하였다. 활성탄소분말과 고분자바인더를 유기용매에 녹인 전극 슬러리를 집전체에 코팅한 후 상전이 과정을 거쳐 다공성 탄소전극을 제조하였다. 고분자의 상전이 과정에서 용매의 첨가량은 기공 형성에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 유기용매의 함량을 변화시켜가면서 전극을 제조하여 유기용매의 첨가량이 전극의 기공 형성에 미치는 영향을 연구하였다. 제조된 전극에 대해서 SEM, porosity, cyclic voltammetry 등을 측정하여 제조한 전극의 물리적, 전기화학적 특성을 분석하였다.

2. 실험

2.1. 다공성 탄소전극의 제조

전극활성물질로 활성탄소분말을 이용하여 i) 전극슬러리의 제조, ii) 집전체에 전극슬러리 코팅, iii) 비용매에서 상전이를 통한 고형화 과정을 거쳐 다공성 탄소 전극을 제조하였다. 전극 슬러리는 ACP (Kuraray chemical Co., BP-15, 비표면적 = 1,765 m²/g, 평균입경 = 5.58 μm), PVdF (Polyvinylidene fluoride, Aldrich, Mw = 275,000)를 유기용매인 NMP (N-Methyl-2-Pyrrolidone, Aldrich, Cat. No. 328634)와 혼합하여 제조였다. 유기용매인 NMP 함량에 따른 전극의 특성변화를 관찰하기 위하여 Table 1과 같은 조성비로 5종류의 전극슬러리를 만들어 전극을 제조하였다. 고분자 바인더인 PVdF와 ACP가 충분히 혼합되고 knife casting하기 용이하도록 유기용매인 NMP의 함량비를 57.9~70.4 wt% 범위에서 전극슬러리를 제조하였다.

집전체로 10 × 10 cm²의 전도성 흑연박막(동방카본(주), Cat. No. F02511) 위에 스테인레스강으로 제작한 300 μm 두께의 금형틀을 올려 놓고 knife casting 방법으로 전극을 제작하였다. 전극슬러리가 도포된 전극을 비용매(non-solvent)인 증류수에 12 h 동안 침지시켜 상전이 과정을 통해 다공성 탄소전극을 제조하였다. 제조된 탄소전극은 60 °C의 진공오븐에서 약 1 h 동안 건조시킨 후 물리적, 전기화학적 특성분석을

Table 1. Compositions of Carbon Electrode Slurry

ACP (g)	PVdF (g)	NMP (g)	NMP (wt%)
7.0	1.0	11.0	57.9
7.0	1.0	13.0	61.9
7.0	1.0	15.0	65.2
7.0	1.0	17.0	68.0
7.0	1.0	19.0	70.4

실시하였다.

2.2. 다공성 탄소전극의 특성 분석

2.2.1. 전극의 표면 구조 및 기공 크기 분석

제조된 다공성 탄소전극에 대해서 주사전자현미경(JEOL, JSM-6335F) 사진을 찍어 전극 표면의 기공 구조를 관찰하였다. 또한 mercury porosimeter (Micromeritics, U. S. A, Autopore IV 9500 Series)를 이용하여 전극에 생성된 미세 기공의 크기 및 크기 분포를 측정하였다. Porosimeter의 압력을 40~30000 psi로 변화시켜 가면서 침투된 수은의 양을 측정 후 Washburn 식[14]을 이용하여 각각의 압력에 해당되는 기공의 크기를 계산하였다.

2.2.2. 전극의 전기화학적 특성 분석

제조된 전극의 축전용량과 전기흡착 및 탈착 경향을 관찰하기 위해 3 전극 시스템을 이용하여 cyclic voltammetry (CV)와 chrono-amperometry (CA)를 측정하였다. 작업전극에 직경 4 mm의 제조한 탄소전극을 고정시키고, 기준전극으로 Ag/AgCl, 그리고 상대전극으로 백금 전극을 potentiostat (AutoLab, PGSTAT30)에 연결하였다. 전해질 용액으로 0.1 M Na₂SO₄를 사용하여 CV와 CA를 측정하였다.

전기화학적 분석법 중 CV는 전극반응의 메커니즘을 연구하는 데 많이 활용되고 있지만 전극 표면에 생성되는 전기이중층의 축전용량을 측정하는데도 유용하게 활용된다[15]. 전기흡착은 분극성 전극에서 산화/환원 반응이 일어나지 않는 범위에서 운전되기 때문에 CV 방법으로 전극의 축전용량을 측정하기 위해서는 non-Faradaic 전류가 흐르는 전압범위를 결정하는 것이 선행되어야 한다[16]. 제조된 전극에 대해서 전류-전압 관계를 측정한 결과 이들의 전극전압 범위는 -0.6~+0.2 V (vs. Ag/AgCl)가 되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 전극전위를 -0.6 V에서 +0.2 V로 1 mV/s씩 증가시킨 후 다시 -0.6 V로 감소시키면서 각각의 전위에서 흐르는 전류량을 측정하여 축전용량을 계산하였다.

한편 전극에서의 흡착과 탈착반응을 관찰하기 위해 CA를 측정하였다. CA 분석법은 전극에 일정한 전위를 인가하면서 시간에 따른 전류량을 관찰함으로써 전극에서의 흡착 및 탈착 과정을 분석하는데 유용하다. 제조된 다공성 탄소전극에서 이온들이 흡착되는 경향을 관찰하기 위해 -0.6 V (vs. Ag/AgCl)의 일정한 전위를 600 s 동안 공급하면서 전류의 변화량을 측정하였다. 전기흡착 후 곧바로 -0.2 V로 전극전위가 인가될 수 있도록 potentiostat의 환경을 설정하여 흡착된 이온들이 탈착되는 과정에서의 전류 변화량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 다공성 탄소전극의 표면 구조

Figure 1은 제조된 다공성 탄소전극의 표면과 측면의 주사전자현미경 사진을 나타낸 것이다. 모든 전극에서 전극슬러리가 상전이 되는 과정에

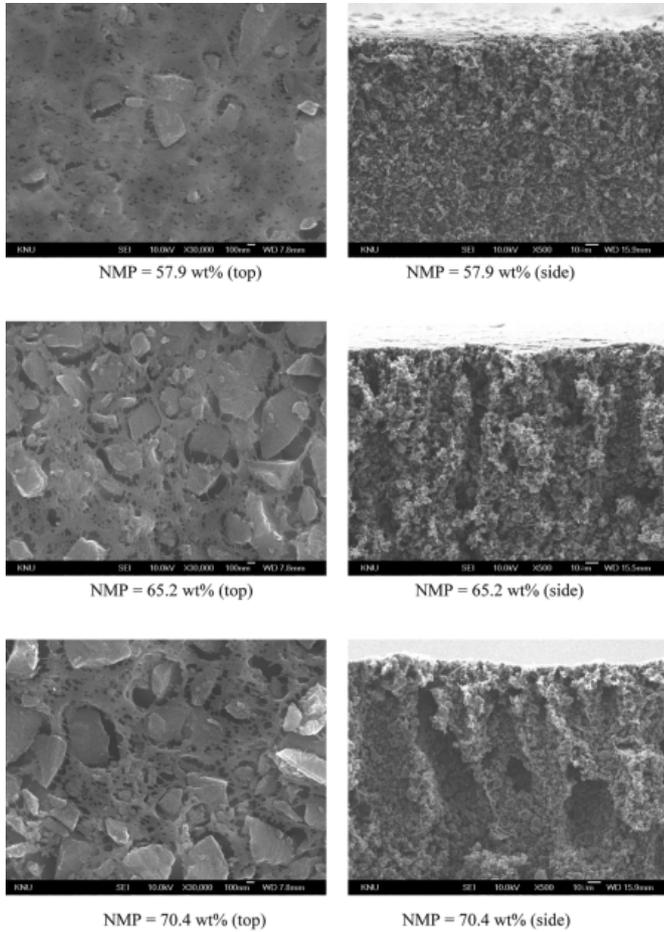


Figure 1. SEM images of porous carbon electrode prepared with various NMP contents.

서 미세한 기공이 균일하게 형성되는 것을 알 수 있다. 또한 상전이를 통해 PVdF가 고형화 되면서 전극활성물질인 ACP 분말들을 잘 결합해 주고 있는 것을 볼 수 있다. 한편 NMP의 함량비가 증가할수록 기공의 크기가 점차 증가되는 것을 알 수 있다. 전극의 측면을 관찰한 SEM 사진에서도 NMP의 함량이 증가할수록 전극 내부에 NMP가 빠져 나가면서 큰 기공들이 형성되는 것을 볼 수 있다. 다공성 탄소전극에서 기공의 크기와 분포는 전극의 비표면적을 변화시킬 수 있기 때문에 탄소전극의 축전용량을 결정하는데 큰 영향을 미칠 수 있다. SEM 사진을 통해 제조된 탄소전극의 물리적 구조를 관찰한 결과 상전이 방법으로 다공성 탄소전극을 제조할 때 유기용매의 함량은 기공의 크기를 조절하는데 매우 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

3.2. 다공성 탄소전극의 기공크기 및 분포

Figure 2는 mercury porosimeter를 이용하여 제조된 탄소전극의 기공 분포를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 다양한 크기의 기공들이 전극표면에 생성되었음을 알 수 있다. NMP의 함량에 따라 기공들의 크기가 변화되는 경향을 나타내고 있다. Figure 2에서 볼 수 있듯이 모든 전극에서 300~500 nm와 1~2 μm의 기공크기에서 기공의 분포가 변화되는 것을 관찰할 수 있다. NMP의 함량이 가장 적은 57.9 wt%인 전극의 경우 약 350 nm의 크기를 갖는 기공들이 많이 분포하고 있고 상대적으로 큰 기공들은 거의 없는 것을 알 수 있다. 하지만 NMP의 함량이 증가할수록 작은 크기의 기공들이 감소하면서 1~2 μm 크기의 기공들이 점차 증가

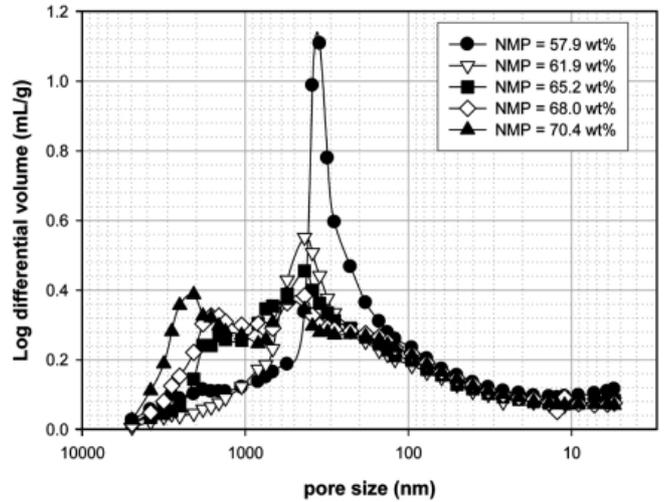


Figure 2. Pore size distribution of porous carbon electrodes with various NMP contents.

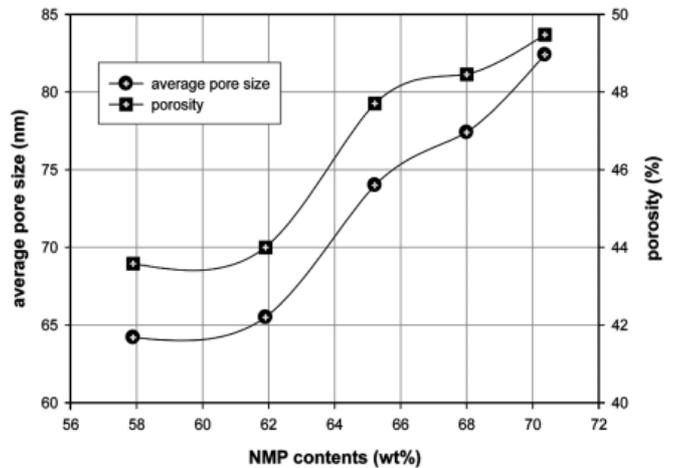


Figure 3. Changes in average pore size and porosity of carbon electrodes with various NMP contents.

하고 있다. 이러한 결과는 SEM 분석 결과와 일치하는 것으로 많은 양의 용매(NMP)가 상전이 과정에서 용출되기 때문인 것으로 판단된다.

Figure 3은 NMP의 함량비에 따른 전극의 평균기공의 크기와 기공율 (porosity)을 나타낸 것이다. NMP의 함량비가 57.9 wt%인 전극의 경우 평균기공의 크기는 64.2 nm이었지만 NMP가 70.4 wt%인 경우 82.4 nm로 증가해 NMP의 함량이 증가할수록 평균기공의 크기도 점차 증가하였다. 또한 기공율도 43.6~49.5%의 범위에서 기공크기와 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

활성탄소분말을 이용하여 전기흡착용 탄소전극을 제조하는 기존의 방법에서는 활성탄소분말과 고분자바인더 분말을 혼합한 후 고온에서 물을 이용해 압착시키는 방법을 주로 사용하고 있다. 이와 같은 방법으로 전극을 제조할 경우 고분자 바인더가 압착되면서 탄소분말을 결합하게 된다. 따라서 전극표면에 노출된 탄소입자들만 전기흡착에 사용되어 전극의 축전용량을 높이는데 한계가 있다. 그러나 전극슬러리를 상전이시켜 전극을 제조한 결과 전극 표면에 64.2~82.4 nm 크기의 미세한 나노 기공을 형성시킬 수 있었으며 이를 통해 전해질에 노출된 전극의 표면적을 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한 유기용매의 양을 조절함으로써 기공의 크기를 제어하여 전극의 비표면적을 조절할 수 있을 것으로 판

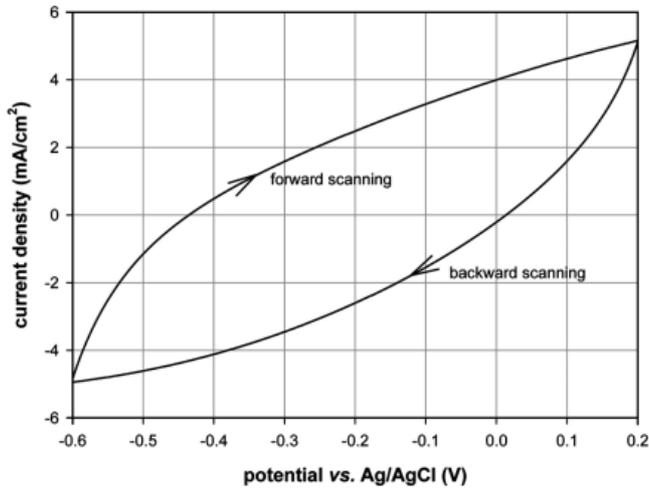


Figure 4. Cyclic voltammogram of porous carbon electrode fabricated with 68.0 wt% NMP at a potential scan rate of 1.0 mV/s.

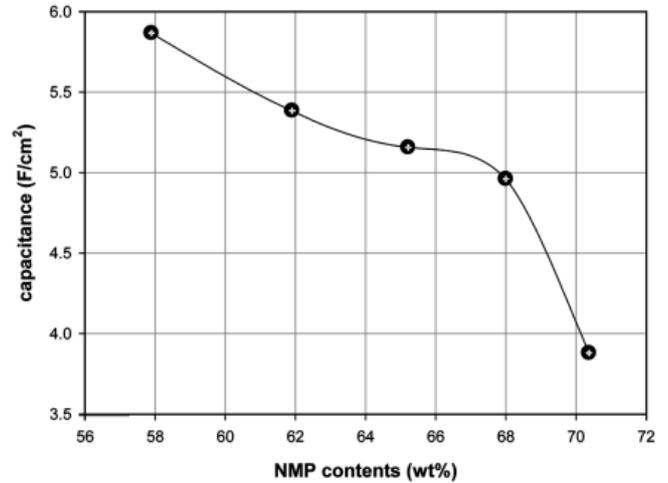


Figure 6. Electrical capacitance of carbon electrodes with various NMP contents at 0.2 V (vs. Ag/AgCl).

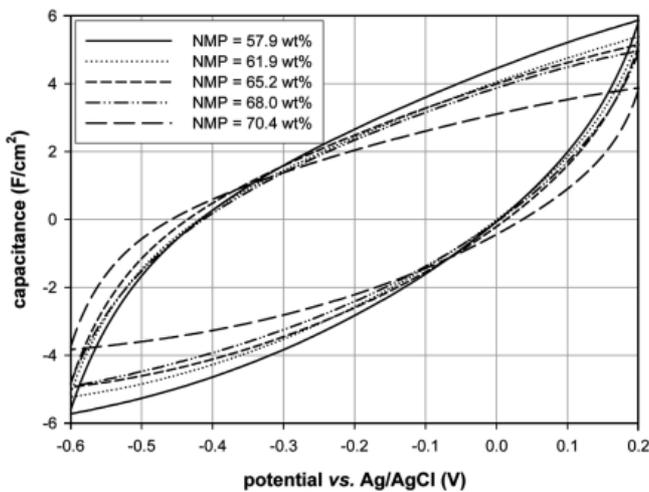


Figure 5. Electrical capacitances of carbon electrodes fabricated with various NMP contents.

단되었다.

3.3. 다공성 탄소전극의 축전용량 측정

NMP의 함량을 변화시켜 제조한 전극들에 대해서 -0.6~0.2 V (vs. Ag/AgCl)의 전극전위 범위에서 1.0 mV/s의 전위주사속도로 cyclic voltammogram을 측정하였다. Figure 4는 NMP 함량이 68.0 wt%인 전극에 대해서 측정한 CV 결과를 나타낸 것이다. 이상적인 축전지(capacitor)에서는 초기에 전위를 인가함에 따라 전류가 급격히 증가하다가 일정한 전위 이상에서는 전류의 변화가 거의 일어나지 않는다. 하지만 Figure 4에서 볼 수 있듯이 -0.6 V에서부터 전위를 증가시켰을 때 초기에는 전류가 급격히 증가하다가 점점 증가폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 0.2 V에서 다시 전위를 감소시켰을 때도 초기의 전류는 급격한 변화량을 보이다가 변화폭이 점점 감소하고 있다. 이러한 CV 결과는 일반적인 축전지에서 나타나는 전형적인 cyclic voltammogram과 유사한 경향을 보이고는 있지만 완전히 일치하지는 않는다. 이러한 원인은 다공성 탄소전극의 전기이중층에서 이온들의 흡착 및 탈착 메커니즘으로 설명할 수 있다 [16]. 다공성 탄소전극에 전위를 인가하게 되면 전극과 접촉하고 있는 전해질의 이온들이 전극 표면에 형성된 전기이중층에 흡착하게 된다. 따라

서 인가되는 전위주사속도가 이온들이 전기이중층에 흡착하는데 필요한 시간보다 빠를 경우 충분한 흡착이 이루어지지 않아 계속해서 전류가 증가하는 경향을 나타내게 되는 것이다. 이러한 CV 결과는 미세한 기공 구조를 갖고 있는 탄소전극에서 나타나는 일반적인 경향으로 Figure 4를 통해 제조된 탄소전극의 표면에서 이온들의 전기흡착 및 탈착이 원활하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

한편 전극의 축전용량은 전극 사이에 흐르는 전류량을 전위주사속도로 나누어 줌으로써 구할 수 있다[17]. 제조된 전극들에 대한 CV 결과들을 전위주사속도로 나누어 축전용량을 구하여 Figure 5에 나타내었다. 모든 전극들에서 전기흡착과 탈착반응이 원활하게 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그러나 NMP의 함량이 변함에 따라 흡착량과 축전용량이 다소 차이를 나타내고 있다. NMP 함량이 70.4 wt%인 전극의 경우 축전용량은 3.88 F/cm²로 가장 낮았지만 CV의 경향이 이상적인 축전지와 가장 유사한 개형을 나타내고 있다. 또한 NMP 함량이 감소하면서 축전용량은 점차 증가하였지만 CV 그래프의 경향은 약간 기울어진 곡선을 보이고 있다. 이러한 결과는 앞서 설명한 바와 같이 전극의 기공크기와 연관지어 설명할 수 있다. 즉, NMP 함량이 증가할수록 탄소전극의 평균기공 크기는 커지는데 그 결과 전극 표면의 표면적들은 감소하게 되어 축전용량이 감소한 것으로 판단된다. 그러나 기공이 커짐에 따라 전기이중층에서의 흡탈착이 용이하여 축전지와 유사한 CV 개형을 나타내게 된 것으로 해석된다.

각각의 전극에서 최대 축전용량을 알아보기 위하여 전극전위가 0.2 V 일 때의 축전용량을 구하여 Figure 6에 도시하였다. 전극의 축전용량은 NMP 함량이 증가함에 따라 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 NMP 함량이 70.4 wt%인 전극에서 축전용량이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Figure 5의 CV 결과와도 잘 일치함을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 다공성 탄소전극에서 기공의 크기는 전극의 축전용량 및 전극에서의 흡·탈착 반응에 영향을 미치는 중요한 인자임을 확인할 수 있었다.

3.4. 전극에서의 전기흡착 및 탈착 특성

제조된 전극에 일정한 전위를 인가했을 때 전기이중층에서 흡착 및 탈착되는 경향을 관찰하기 위하여 chrono-amperometry (CA)를 측정하였다. 탄소전극에 -0.6 V (vs. Ag/AgCl)의 일정한 전극전위를 600 s 동안 인가한 후 곧바로 전극 전위를 -0.2 V로 변화시키면서 시간에 따른 전류

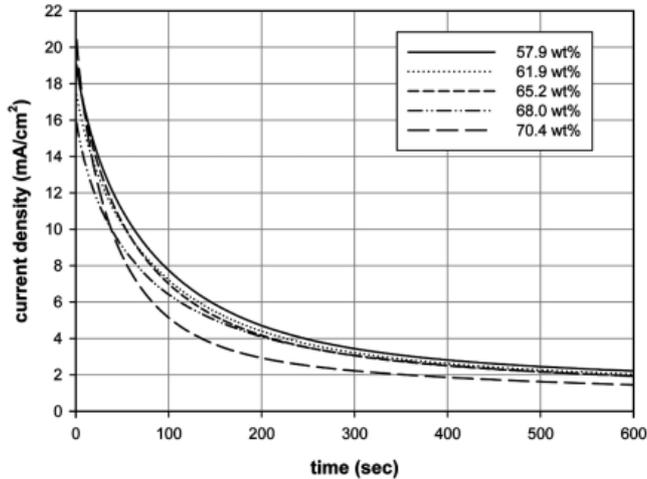


Figure 7. Changes in current density with time (electrosorption process) at the constant potential of -0.6 V (vs. Ag/AgCl).

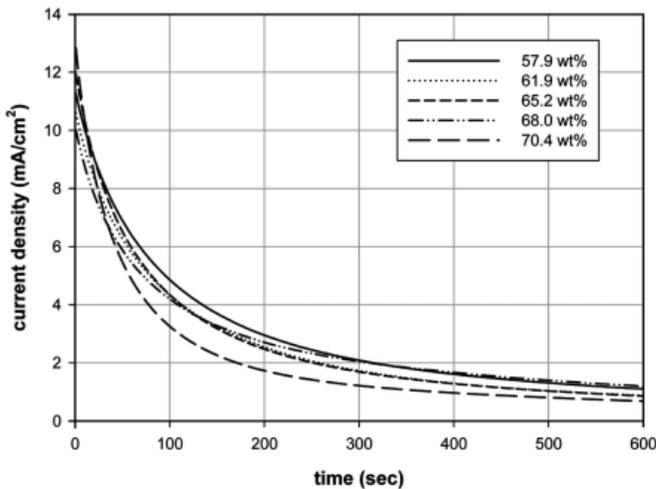


Figure 8. Changes in current density with time (desorption process) at the constant potential of -0.2 V (vs. Ag/AgCl).

를 측정하여 흡착 및 탈착반응의 특성을 관찰하였다.

Figure 7은 전극전위를 -0.6 V로 일정하게 유지하면서 시간에 따른 전류량을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 모든 전극들에서 전류는 시간에 따라 급격히 감소하여 약 200 s가 경과했을 때 초기 전류량의 약 10~20%만이 흐르는 것을 알 수 있다. 이처럼 전류가 급격히 감소하는 것은 전극 표면에 전기이중층이 형성되면서 축전기와 유사한 구조를 나타내기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 전기흡착은 전극에서의 산화/환원반응이 일어나지 않는 전위에서 운전되기 때문에 전극에 흐르는 전류량은 전극표면에 흡착된 이온의 양을 나타낸다. Figure 7에서도 알 수 있듯이 NMP의 함량이 감소할수록 전류량은 높게 나타나 많은 양의 이온들이 흡착되었음을 알 수 있다. 특히 NMP 함량이 70.4 wt%인 전극의 경우 시간에 따른 전류의 변화량이 다른 전극들에 비해 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 전위를 인가했을 때 흡착평형이 빨리 도달했음을 의미하는 것으로 다른 전극들에 비해 큰 기공을 갖고 있어 흡착이 용이하게 진행되었기 때문인 것으로 판단된다.

한편 전극전위를 -0.2 V로 변화시킨 후 전극을 통해 흐른 전류량의 변화를 Figure 8에 나타내었다. 이때 흐르는 전류는 전극표면의 전기이중층에 흡착된 이온들이 탈착되면서 흐르는 전류를 나타낸다. 시간에 따른 전

류의 변화가 전기흡착 때와 거의 유사한 경향을 보이고 있다. NMP 함량이 70.4 wt%인 전극의 경우 흡착과정과 마찬가지로 탈착도 쉽게 이루어짐을 알 수 있다.

전기흡착법은 전극전위를 주기적으로 바꾸어 줌으로써 전기이중층에서의 흡착과 탈착반응을 이용해 이온성 물질을 분리하는 공정이다. 따라서 전기흡착 공정의 효율을 높이기 위해서는 전극 자체의 축전용량을 높이는 것도 중요하지만 흡착 및 탈착이 빨리 진행되는 것도 중요하다. 본 연구결과 상전이법을 이용하여 다공성 전극을 제조하는데 있어서 유기용매의 함량은 이러한 전극의 특성을 조절할 수 있는 중요한 인자임을 알 수 있었다.

4. 결 론

활성탄소분말과 PVdF를 유기용매인 NMP와 혼합하여 전극슬러리를 제조한 후 상전이 과정을 거쳐 다공성 탄소전극을 제조하였다. 유기용매의 함량비를 변화시켜 전극을 제조한 후 제조된 전극들의 물리적, 전기화학적 특성을 분석하였다.

SEM 분석 결과 PVdF의 상전이와 NMP의 용출에 의해 미세한 기공을 갖는 다공성 탄소전극을 얻을 수 있었으며 이를 통해 고비표면적의 전기흡착용 탄소전극을 제조할 수 있었다. NMP의 함량을 57.9~70.4 wt%로 변화시켜 전극을 제조한 결과 평균기공의 크기는 64.2~82.4 nm 범위를 나타냈으며 NMP의 함량이 적을수록 기공은 작고 고르게 형성되는 것을 알 수 있었다.

제조된 전극들에 대해서 축전용량을 측정된 결과 NMP의 함량이 57.9, 70.4 wt%일 때 축전용량은 각각 5.87, 3.88 F/cm²로 나타났으며 NMP 함량이 적을수록 축전용량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 NMP의 함량이 적어짐에 따라 기공이 작고 균일하게 형성되어 전극의 비표면적이 증가했기 때문인 것으로 판단되었다. 본 연구를 통해 상전이를 이용한 다공성 전극의 제조에서 유기용매의 함량을 조절함으로써 전극 표면의 기공을 효과적으로 제어할 수 있고 전극의 비표면적을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

감 사

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-331-D00093).

참 고 문 헌

1. F. Helfferich, Ion Exchange, Dover Publications, Inc., New York (1992).
2. T. Younos and K. E. Tulou, *J. Contemp. Water Res. Edu.*, **132**, 3 (2005).
3. M. Mulder, Basic Principles of Membrane Technology, Kluwer Academic Publishers, Boston (1996).
4. H. Strathmann, Ion-Exchange Membrane Separation Processes, Elsevier, Amsterdam (2004).
5. T. Y. Ying, K. L. Yang, S. Yiaccoumi, and C. Tsouris, *J. Colloid Interface Sci.*, **250**, 18 (2002).
6. S. T. Mayer, R. W. Pekala, and J. L. Kaschmitter, *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 446 (1993).
7. Korea patent 10-0442773 (2004).
8. Y. Han, X. Quan, S. Chen, S. Wang, and Y. Zhang, *Electrochim.*

- Acta*, **52**, 3075 (2007).
9. J. Koresh and A. Soffer, *J. Electrochem. Soc.*, **124**, 1379 (1977).
 10. S. Mitani, S. I. Lee, S. H. Yoon, Y. Korai, and I. Mochida, *J. Power Sources*, **13**, 298 (2004).
 11. S. Shiraisgi, H. Kurihara, L. Shi, T. Nakayama, and A. Oya, *J. Electrochem. Soc.*, **149**, 855 (2002).
 12. Y. J. Kim, Y. Horie, Y. Matsuzawa, S. Ozaki, M. Endo, and S. D. Mildred, *Carbon*, **42**, 2423 (2004).
 13. C. H. Hou, C. Liang, S. Yiacoumi, S. Dai, and C. Tsouris, *J. Colloid Interface Sci.*, **302**, 54 (2006).
 14. P. A. Webb, *Volume and Density for Particle Technologist*, Micromeritics Instrument Co., (2002).
 15. A. J. Bard and L. R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 2nd ed., John Wiley & Sons (2001).
 16. K. L. Yang, S. Yiacoumi, and C. Tsouris, *J. Electroanal. Chem.*, **540**, 159 (2003).
 17. B. Xu, F. Wu, S. Chen, C. Zhang, G. Cao, and Y. Yang, *Electrochim. Acta*, **52**, 4595 (2007).