

전기흡착용 다공성 탄소전극의 제조 및 특성 분석

박남수 · 최재환[†]

공주대학교 화학공학과

(2007년 12월 14일 접수, 2008년 3월 11일 채택)

Fabrication and Characterization of Porous Carbon Electrode for Electrosorption

Namsoo Park · Jae-Hwan Choi[†]

Department of Chemical Engineering, Kongju National University

ABSTRACT : Porous carbon electrode for electrosorption was prepared by a wet phase inversion method. Carbon slurry that was a mixture of activated carbon powder(ACP) and PVdF solution was cast directly upon a graphite sheet by means of a casting knife. Porous carbon electrodes were fabricated by immersing the cast film in pure water as a non solvent. Physical and electrochemical properties of carbon electrodes prepared with various ACP contents(50.0, 75.0, 83.3, 87.5, 90.0 wt %). From the SEM images we can verify that the electrode was porous. The average pore sizes determined for the electrodes fabricated with various ACP contents ranged from 72.7 to 86.4 nm and the size decreased as the ACP content increased. The electrochemical properties were characterized by cyclic voltammetry(CV) method. All of the voltammograms showed typical behavior of an electric double layer charging/discharging on the carbon surface. The capacitance increased with the ACP content and the values ranged from 2.18 F/cm² for 50 wt% ACP to 4.77 F/cm² for 90 wt% ACP.

Key Words : Desalination, Electrosorption, Phase Inversion Method, Porous Carbon Electrode, Capacitance

요약 : 상전이 방법을 이용하여 전기흡착용 다공성 탄소전극을 제조하였다. 활성탄소분말(ACP)과 Polyvinylidene fluoride(PVdF) 용액을 혼합한 전극슬러리를 제조한 후 나이프 캐스팅 방법으로 전극슬러리를 흑연박막 위에 코팅하였다. 코팅된 전극을 비용매인 증류수에 침지시켜 다공성 탄소전극을 제조하였다. ACP의 함량비(50.0, 75.0, 83.3, 87.5, 90.0 wt%)를 변화시켜 전극을 제조하여 ACP 함량에 따른 탄소전극의 물리적, 전기화학적 특성을 분석하였다. SEM 사진을 통해 제조된 탄소전극의 표면을 관찰한 결과 상전이에 의해 미세한 기공들이 전극 표면에 균일하게 형성됨을 확인할 수 있었다. 또한 전극의 평균 기공 크기는 72.7~86.4 nm로 나타났으며 ACP의 함량이 증가할수록 기공의 크기는 감소하였다. 제조된 전극들에 대해 cyclic voltammetry(CV) 분석법으로 전기화학적 특성을 분석하였다. 모든 전극에서 전형적인 전기이중층에서의 흡착 및 탈착반응을 나타내었다. 전극의 축전용량은 ACP의 함량비가 증가할수록 크게 증가하였으며 ACP 함량이 50.0 wt%일 때 2.18 F/cm², 90.0 wt%일 때 4.77 F/cm²의 축전용량을 나타내었다.

주제어 : 탈염, 전기흡착, 상전이법, 다공성 탄소전극, 축전용량

1. 서론

인구의 증가와 산업발전으로 환경오염이 심각해지면서 수자원 확보에 대한 관심이 점차 고조되고 있다. 지속적이고 안정적으로 수자원을 확보하기 위한 방안으로 전체 수자원의 97.2%를 차지하고 있는 해수를 담수화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)} 해수의 담수화 기술은 섬이나 해안지역 등과 같이 해마다 물 부족으로 어려움을 겪고 있는 지역에서 안정적으로 용수를 공급할 수 있는 대안이 되고 있고, 중동 지역과 같이 담수가 절대적으로 부족한 지역에서는 막대한 환경시장을 구축할 수 있기 때문에 국가적인 차원에서 연구 개발이 추진되고 있다.³⁾ 또 다른 수자원 확보 방안으로 기후나 계절적으로 수량의 변화

가 크지 않은 지하수를 활용하기 위해 지하수 중에 포함된 경도물질이나 질산성 질소, 그리고 오염된 지하수의 경우 중금속 성분을 제거하기 위한 많은 연구가 시도되고 있다.^{4,5)}

바닷물과 지하수는 지구상에서 절대적인 양을 차지하고 있지만 생활용수로 사용하기 위해서는 이온성 물질을 제거하는 것이 필수적이다. 현재 이온성 물질을 제거하기 위한 기술로는 이온교환법, 역삼투막법, 전기투석법, 증발법 등이 적용되고 있다.⁶⁾ 이들 공정들은 원수에 포함된 염의 농도와 처리하고자 하는 정도에 따라 적절한 공정들이 선택되어 적용되고 있으며 기술적으로도 안정성을 인정받고 있다. 그러나 이들 공정들은 기술의 특성상 여러 가지 문제점을 갖고 있다. 우선 이온교환법의 경우 이온성 물질을 제거하는데 탁월한 성능을 나타내지만 이온교환수지를 재생하는 과정에서 고농도의 많은 염 폐액이 발생하는 문제점을 안고 있다.⁷⁾ 또한 역삼투막법이나 전기투석법 등도

[†] Corresponding author
E-mail: jhchoi@kongju.ac.kr
Tel: 041-850-8643

Fax: 041-858-2575

탈염에 효과적인 공정으로 인식되어 점차 적용 대상이 확대되고 있는 추세를 보이고 있지만 주기적인 막의 교체, 막의 오염에 의한 처리수량의 감소, 막세척 과정에서 오염 물질을 발생하는 등의 문제점을 갖고 있다.⁸⁾ 이러한 기존의 탈염 공정들에서 나타나는 문제점들을 해결하기 위한 대안 기술로 전기화학적 원리를 이용한 전기흡착(electrosorption) 기술이 도입되었다.^{9~11)}

전기흡착 기술은 전극에 전위를 인가했을 때 전극 표면에 형성되는 전기이중층에서의 흡착반응을 이용하여 이온성 물질을 제거하는 기술이다. 전기흡착법은 전극에서 산화/환원 반응이 일어나지 않는 1~2 V 범위의 낮은 전위영역에서 운전하기 때문에 탈염에 소비되는 에너지 소비량을 획기적으로 줄일 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 또한 전극의 전위를 바꾸어 줌으로써 흡착된 이온을 탈착시키기 때문에 전극을 재생하는 과정에서 2차 오염물질을 발생시키지 않는 환경친화적인 공정이다.^{12,13)}

전기흡착은 전극 표면에 형성되는 전기이중층에서의 전기적 흡착반응을 이용한다. 따라서 전기흡착법으로 이온성 물질을 제거하기 위해서는 전극의 비표면적을 최대한 높여 전극의 충전용량을 증가시키는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 비표면적이 상대적으로 높은 것으로 알려진 활성탄소분말, 활성탄소섬유, 탄소나노튜브, 탄소 에어로겔 등의 물질을 이용해 전기흡착용 전극을 제조하기 위한 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다.^{11~13)}

활성탄소의 비표면적은 기공크기에 큰 영향을 받는다. 활성탄소입자의 기공을 수 nm 이하로 제조함으로써 비표면적을 2,000~3,000 m²/g까지 높일 수 있는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾ 하지만 전기흡착 공정에서 이러한 미세기공은 전기장의 중첩효과로 전기흡착용량을 증가시키는데 큰 효과가 없는 것으로 보고되고 있다.¹⁵⁾ 즉, 비표면적이 높은 활성탄소를 사용하여 전극의 충전용량을 증가시키는 데에는 한계가 있다. 따라서 고효율의 전기흡착용 전극을 개발하기 위해서는 전극의 구성 물질에 대한 연구와 함께 전극의 표면구조를 제어하여 흡착용량을 높일 수 있는 새로운 전극 제조 방법의 연구가 필요하다.

이러한 배경에서 본 연구에서는 전극 표면에 미세한 기공을 갖는 다공성 탄소 전극을 제조함으로써 전극의 충전용량을 향상시킬 수 있는 새로운 전극 제조 방법을 연구하였다. 활성탄소분말과 고분자바인더를 고온에서 롤 프레스 방법으로 제조하는 기존의 방식¹⁴⁾과 달리 활성탄소분말을 고분자용액에 녹여 전극슬러리를 만든 후 비용매(non-solvent)에서 상전이 과정을 통해 미세한 크기의 기공

을 포함하는 다공성 탄소전극을 제조하였다. 제조된 전극에 대해 SEM, porosity, 전기저항, cyclic voltammetry(CV), chrono-amperometry(CA) 등을 측정하여 제조된 전극의 물리적, 전기화학적 특성을 분석하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 다공성 탄소 전극 제조

다공성 탄소전극을 제조하기 위하여 PVdF(Polyvinylidene-fluoride, Aldrich, Mw = 275,000)와 활성탄소분말(Kuraray Chemical Co., BP-15, 비표면적 = 1,765 m²/g, 평균입경 = 5.58 μm)을 유기 용매인 NMP(N-methyl-pyrrolidone, Aldrich, Cat. No. 328634)와 혼합한 후 밀봉한 상태에서 12시간 동안 충분히 교반하여 균일한 전극 슬러리를 제조하였다. Fig. 1은 상전이법을 이용해 다공성 탄소전극을 제조하는 과정을 도시한 것이다. 우선 10×10 cm²의 전도성 흑연 박막(동방카본(주), Cat. No. F02511C) 위에 300 μm 두께의 금형틀을 올려놓고 전극 슬러리를 도포한 후 나이프 캐스팅 방법으로 균일한 전극층을 만들었다. 코팅된 전극을 비용매인 증류수에 24 hr 동안 침지시켜 상전이 시킨 후 진공오븐에서 수분과 유기용매를 제거시켜 다공성 탄소전극을 제조하였다. 활성탄소분말의 함량비가 50.0, 75.0, 83.3, 87.5, 90.0 wt%인 전극을 제조하여 ACP의 함량비에 따른 탄소전극의 물리적, 전기화학적 특성을 관찰하였다.

2.2. 전극의 물리적, 전기화학적 특성 분석

2.2.1. 전극의 표면 구조 및 기공 크기 측정

제조한 탄소전극에 대해 주사전자현미경(SEM, JEOL, JSM-6335F)을 이용하여 전극 표면의 미세 구조를 관찰하였다. 또한 mercury porosimeter(Micromeritics, U.S.A, Autopore IV 9500 Series)를 이용하여 표면에 생성된 미세 기공의 크기를 측정하였다. Porosimeter의 압력을 40~30,000 psi로 변화시키면서 침투된 수은의 양으로부터 전극 표면에 형성된 기공의 크기 및 크기 분포를 측정하였다.

2.2.2. 전극의 비저항 측정

전극의 자체 전기저항은 전극의 특성분석에서 중요한 요소이다. 제조한 전극의 전기저항을 측정하기 위하여 직경이 1 cm인 두 개의 원판형 백금 전극 사이에 제조한 전극을 끼우고 100 mV의 전위를 1분 동안 인가하면서 평균 전류를 측정하여 전극의 비저항을 측정하였다.

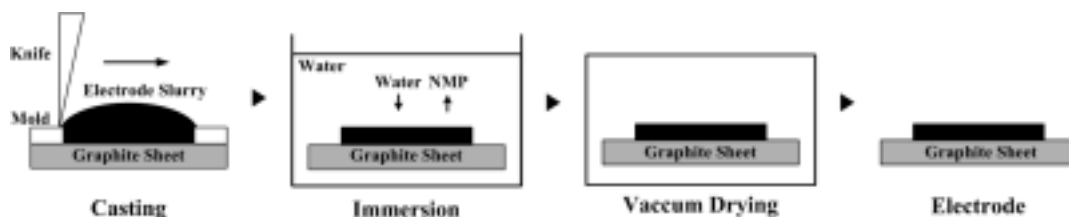


Fig. 1. Fabrication procedure of porous carbon electrode by wet phase inversion method.

2.2.3. 전극의 전기화학적 특성 분석

제조된 전극의 축전용량과 전기흡착 및 탈착 경향을 관찰하기 위해 3전극 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.

전극의 축전용량을 측정하기 위해 각각의 탄소전극에 대해서 CV를 측정하였다. 전극전위를 -0.6 V(vs. Ag/AgCl)에서 +0.2 V로 1 mV/s씩 증가시킨 후 다시 -0.6 V로 감소시켜가면서 전류를 측정하였다. 또한 탄소전극에서의 흡착 및 탈착반응을 관찰하기 위해 CA를 측정하였다. 흡착 경향을 관찰하기 위해 -0.6 V(vs. Ag/AgCl)의 일정한 전위를 600 sec 동안 공급하면서 전류의 변화량을 측정한 후 곧바로 -0.2 V로 전극전위를 변화시켜 탈착 과정에서의 전류 변화량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 다공성 탄소전극의 표면 구조 분석

Fig. 2는 제조된 탄소전극 표면의 SEM 사진 결과를 보

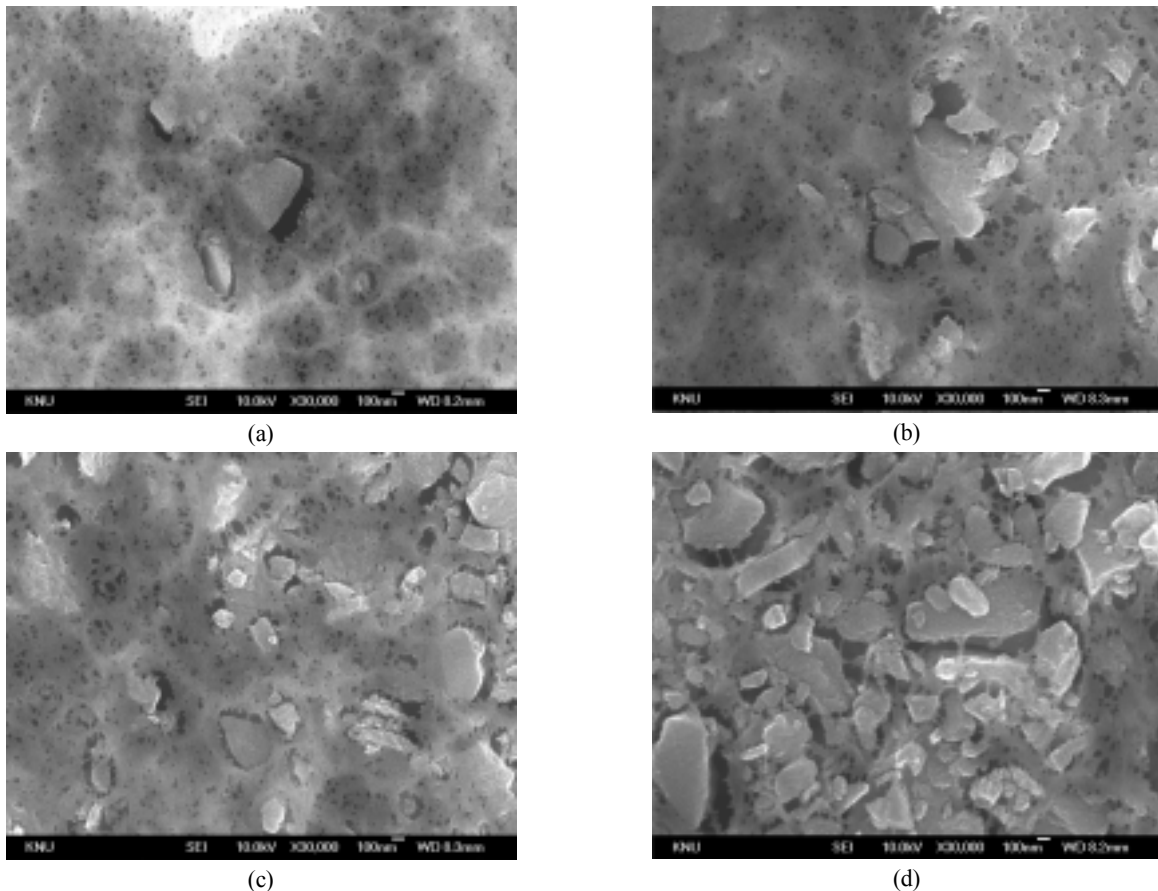


Fig. 2. SEM images of porous carbon electrode (a) ACP = 50.0 wt%, (b) ACP = 75.0 wt%, (c) ACP = 83.3 wt%, and (d) ACP = 90.0 wt%.

여주고 있다. 제조된 모든 전극에서 상전이 과정을 통해 표면에 미세한 기공이 형성되어 있음을 알 수 있다. 활성탄소분말의 함량비가 50.0 wt%인 전극의 경우 고분자바인더인 PVdF가 ACP 입자를 모두 감싸고 있는 모습을 보이고 있는 반면 ACP의 함량이 증가하면서 PVdF가 ACP 입자들을 결합하고 있는 구조를 나타내고 있다. 제조된 다공성 탄소전극이 높은 축전용량을 갖기 위해서는 전극 단위 면적 당 전극활성물질(활성탄소분말)의 표면적을 높여야 한다. 이를 위해서는 전극을 구성하는 ACP의 함량비가 높을수록 유리하다. 그러나 Fig. 2에서 볼 수 있는바와 같이 ACP의 함량비가 높을 경우 고분자바인더가 ACP 입자들을 충분히 고정시켜주지 못해 전극의 물리적 강도가 약해지는 문제점을 일으킬 수 있다. 실험결과 ACP 함량이 90 wt%인 전극의 경우 손으로 전극 표면을 문질렀을 때 ACP의 일부가 표면에서 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 전기흡착 공정에 적용이 가능한 전극을 제조하기 위해서는 ACP 함량비가 최대 90 wt%를 초과할 수 없음을 알 수 있었다.

3.2. 다공성 탄소전극의 기공 크기 분석

Fig. 3은 mercury porosimeter로 제조된 탄소전극의 기공 분포도를 측정하여 나타낸 것이다. ACP의 함량이 증가

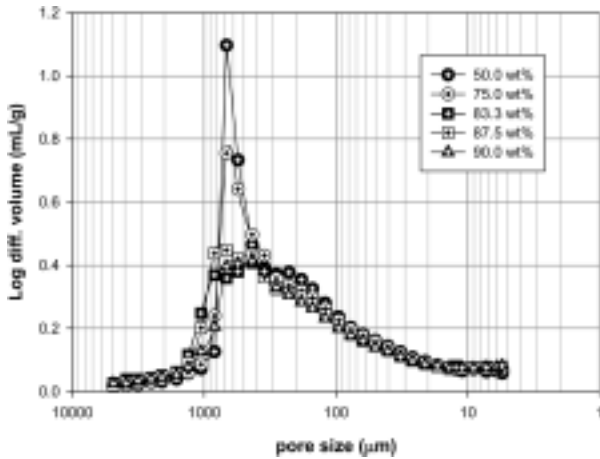


Fig. 3. Pore size distributions of carbon electrodes prepared with different ACP contents.

할수록 약 600~800 nm 크기의 기공들이 점점 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 모든 전극에서 10~100 nm 크기의 기공들이 균일하게 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 또한 ACP의 함량이 증가할수록 기공의 평균 크기는 86.4 nm에서 72.7 nm로 점차 감소하는 것으로 나타났다. 기존의 탄소전극의 제조방법에서는 활성탄소분말과 고분자바인더 분말을 혼합한 후 고온에서 물을 이용해 압착시켜 전극을 제조했기 때문에 표면에 노출된 탄소 입자만 전기 흡착에 사용되어 축전용량을 높이는 데 한계가 있었다. 하지만 상전이법을 이용해 전극을 제조한 결과 전극 표면에 미세한 기공을 형성시킴으로써 전기흡착에 활용될 수 있는 탄소입자를 크게 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 전극의 흡착 표면적이 증가되어 전극의 축전용량을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

3.3. 다공성 탄소전극의 비저항 측정

전극이 좋은 성능을 갖기 위해서는 전극 자체의 전기저항이 작을수록 좋다. 제조된 탄소전극에 대해서 전기저항을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 예상한 바와 같이 ACP의 함량이 증가할수록 전극의 비저항은 기하급수적으로 감소하여 90 wt%일 때 약 40 ohm·cm의 비저항 값을 나타내고 있다. 일반적으로 전기흡착 공정은 전극반응이 일어나지 않는 1~2 V 범위에서 운전되기 때문에 전극에 흐르는 전류밀도는 10 mA/cm² 이내로 낮은 전류영역에서 운전되는 경우가 많다. 만일 제조된 전극에 10 mA/cm²의 전류가 흐를 경우 300 μm의 다공성 전극층에서의 전압강하는 약 12 mV가 되는 것으로 계산된다. 따라서 외부에서 인가되는 전압이 큰 손실 없이 전극표면에 전달되어 전극의 자체저항이 전기흡착에 거의 영향을 미치지 않을 것으로 해석된다. 만일 전극에 흐르는 전류밀도가 높아 전압강하가 커질 경우에는 전극을 제조하는 과정에서 전극 슬러리에 전도성 카본블랙을 첨가하여 전극의 비저항을 줄일 수도 있다.

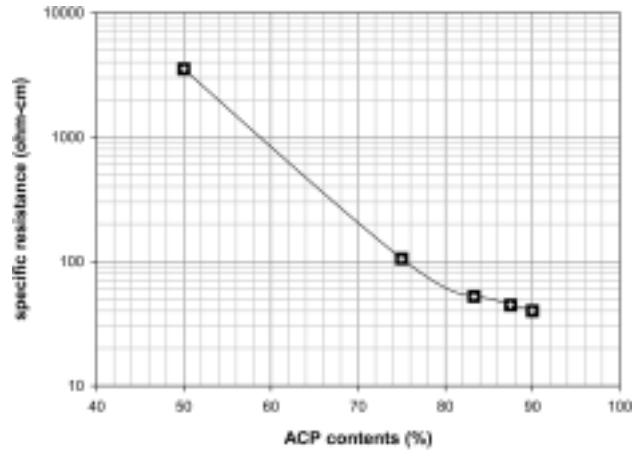


Fig. 4. Specific resistances of porous carbon electrode with ACP contents.

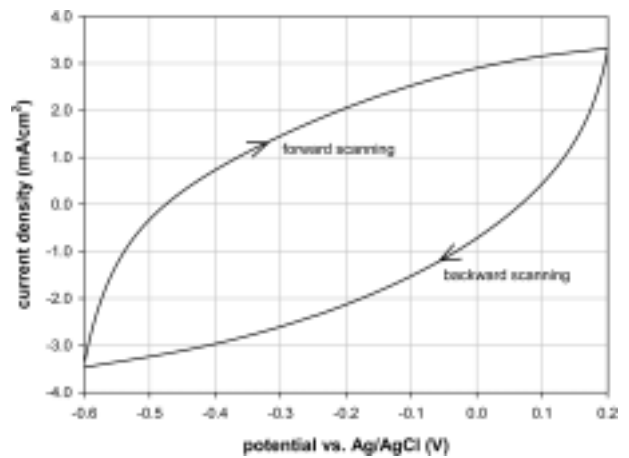


Fig. 5. Cyclic voltammogram for the electrode with ACP content of 75.0 wt%.

3.4. 다공성 탄소전극의 축전용량 측정

ACP의 함량을 변화시켜 제조한 전극에 대해서 -0.6~0.2 V(vs. Ag/AgCl)의 전위 범위에서 1.0 mV/s의 전위주사속도로 CV를 측정하였다. Fig. 5는 ACP 함량이 75.0 wt%인 전극에 대해서 측정된 CV 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 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 때 초기의 전류는 급격한 변화량을 보이다가 변화폭이 점점 감소하고 있다. 이러한 CV 결과는 일반적인 축전지에서 나타나는 전형적인 전압-전류와의 관계로 제조된 다공성 탄소전극의 표면에서 이온들의 전기흡착 및 탈착이 원활하게 이루어지고 있음을 보여준다.¹⁶⁾

한편 전극의 축전용량은 전극 사이에 흐르는 전류량을 전위주사속도로 나누어 줌으로써 구할 수 있다.¹²⁾ 제조된 전극들에 대한 CV 결과들을 전위주사속도로 나누어 축전용량을 구하여 Fig. 6에 나타내었다. 모든 전극들에서 전기흡착 반응은 이상적으로 진행됨을 알 수 있다. 또한 ACP의 함량이 증가함에 따라 축전용량이 크게 증가하는 것을

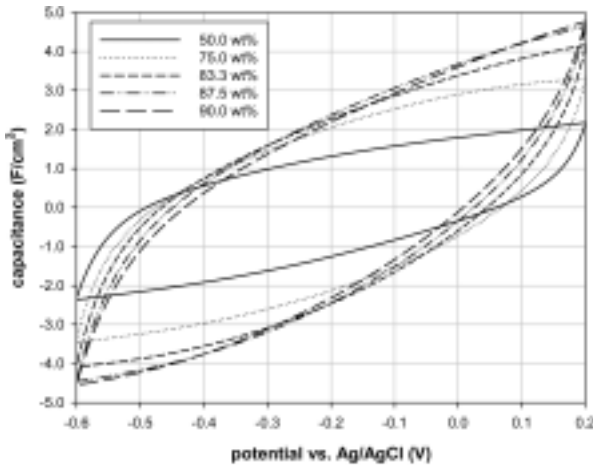


Fig. 6. Capacitances of carbon electrodes prepared with various ACP contents.

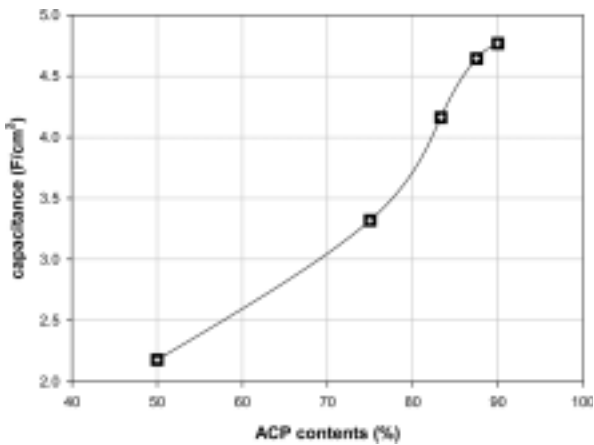


Fig. 7. Capacitances of electrodes with various ACP contents at 0.2 V(vs. Ag/AgCl).

볼 수 있다. 특히 ACP 함량이 50 wt%에서 83.3 wt%로 증가될 때 축전용량은 큰 폭으로 증가하였다. 각각의 전극에서 최대 축전용량을 알아보기 위하여 전극전위가 0.2 V일 때의 축전용량을 구하여 Fig. 7에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 전극의 축전용량은 ACP 함량이 증가함에 따라 급속히 증가하다가 ACP 함량비가 87.5 wt%에서 4.64 F/cm²를 나타내면서 증가폭이 감소하고 있다. 이러한 결과는 ACP의 함량이 증가할수록 탄소분말의 비표면적이 증가하여 전극의 축전용량 또한 증가하게 된 것으로 해석할 수 있다.

3.5. 다공성 탄소전극의 전기흡착 및 탈착 특성 분석

제조된 전극에서의 흡착 및 탈착반응의 특성을 관찰하기 위하여 chrono-amperometry(CA)를 측정하였다.¹⁷⁾ 탄소 전극에 -0.6 V(vs. Ag/AgCl)의 일정한 전극전위를 600 sec 동안 인가하면서 시간에 따른 전류를 측정하여 전기흡착 특성을 관찰하였다. 전기흡착 후 곧바로 전극전위를 -0.2 V(vs. Ag/AgCl)로 변화시켜 흡착된 이온이 탈착되는 경향을 측정하였다.

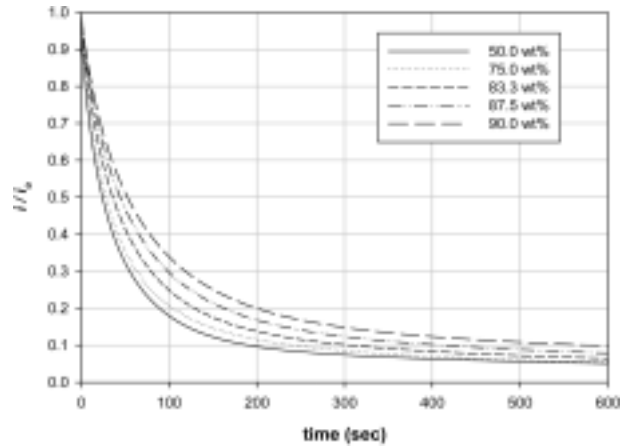


Fig. 8. Changes in current ratio with time(electrosorption process) at the constant potential of -0.6 V vs. Ag/AgCl.

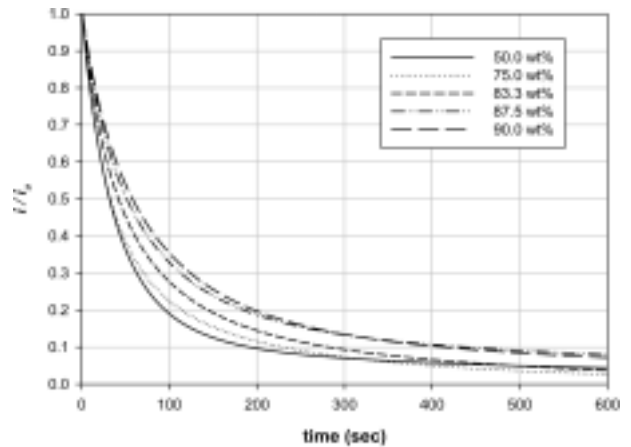


Fig. 9. Changes in current ratio with time(desorption process) at the constant potential of -0.2 V vs. Ag/AgCl.

Fig. 8은 전기흡착 과정에서 흐른 전류량을 초기전류량으로 나누어 나타낸 것이다. 모든 전극에서 전류는 시간에 따라 급격히 감소하여 200 sec에서 초기 전류량의 약 10~20%만이 흐르는 것을 알 수 있다. 이러한 전류의 변화는 축전기에서의 전형적인 전류변화와 동일한 양상으로 전극 계면에 이온들이 전기적으로 흡착하면서 전기이중층을 형성하기 때문이다. 전기흡착은 전극표면에서 전극반응이 일어나지 않는 전위에서 운전되기 때문에 전극에 흐른 전류의 양은 전극표면에 흡착된 이온의 양에 비례한다. Fig. 8에서 ACP 함량이 증가할수록 전극을 통해 흐른 전류의 양이 증가함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 7의 결과에서 알 수 있었듯이 ACP 함량이 증가하면서 전극의 축전용량이 증가했기 때문인 것으로 판단할 수 있다.

한편 전극전위를 -0.2 V로 변화시킨 후 전극을 통해 흐른 전류량의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 시간에 따른 전류의 변화가 전기흡착 때와 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 다만 이때 흐르는 전류는 전극표면의 전기이중층에 흡착된 이온들이 탈착되면서 흐르는 전류를 나타낸다. ACP의 함량이 높은 전극에서 흡착된 이온이 많았기 때문에 탈착과정에서도 많은 전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 또한 흡

착과 탈착 과정에서 시간에 따른 전류의 변화량이 유사한 것을 통해 전기이중층에 흡착된 이온들을 전극전위를 조절함으로써 쉽게 탈착시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

4. 결론

상전이법을 이용하여 전극의 표면적을 높일 수 있는 다공성 탄소전극의 제조에 관한 연구를 수행하였다. 고분자 바인더(PVdF)를 NMP에 녹여 활성탄소분말과 혼합하여 전극슬러리를 제조한 후 증류수에서 상전이 과정을 거쳐 다공성 탄소전극을 제조하였다. 제조된 전극에 대하여 물리적, 전기화학적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 주사전자현미경으로 제조된 탄소전극의 표면을 관찰한 결과 상전이에 의해 미세한 기공들이 전극 표면에 균일하게 형성됨을 확인할 수 있었다. 또한 전극의 물리적 강도를 고려할 때 전기흡착 공정에 적용이 가능한 전극을 제조하기 위해서는 ACP 함량비가 최대 90 wt%를 초과할 수 없음을 알 수 있었다.

2) Mercury porosimeter를 이용하여 전극의 기공 크기를 분석한 결과 평균 기공 크기는 72.7~86.4 nm이었으며 ACP의 함량비가 높을수록 기공의 크기는 감소하였다.

3) 전극의 비저항은 ACP의 함량이 증가할수록 급격히 감소하여 ACP 함량이 90 wt%일 때 약 40 ohm·cm를 보였다. 전기흡착 공정이 낮은 전류밀도 영역에서 운전되는 것을 고려했을 때 이러한 전극의 비저항은 전기흡착에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다.

4) Cyclic voltammetry 방법으로 제조한 탄소전극들에 대해 축전용량을 측정된 결과 ACP의 조성이 50.0, 75.0, 83.3, 87.5, 90.0 wt%일 때 축전용량은 각각 2.18, 3.32, 4.16, 4.64, 4.77 F/cm²로 ACP 함량이 증가할수록 축전용량이 크게 증가하였다.

5) 일정한 전극전위를 인가하면서 시간에 따른 전류의 변화량을 측정하여 전극에서의 흡착 및 탈착 경향을 분석한 결과 전형적인 축전기에서와 유사한 결과를 보였다. 이러한 결과로부터 제조된 다공성 탄소전극이 전기흡착 공정에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단되었다.

사 사

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

참 고 문 헌

1. Masters, G. M., Introduction to Environmental Engineering and Science, 2nd ed., Prentice-Hill, New Jersey(1998).
2. Oren, Y., "R&D in desalination at the Ben-Curion

- university," in *proceedings of the International Desalination Workshop*, Center for Seawater Desalination Plant, Gwangju, pp. 15~16(2007).
3. Kim, I. S., "Introduction to SEAHERO R&D program," in *proceedings of the International Desalination Workshop*, Center for Seawater Desalination Plant, Gwangju(2007).
4. Tchobanoglous, G., Wastewater Engineering, Metcalf and Eddy, Inc., McGraw-Hill, New York(1991).
5. Szpyrkowicz, L., Daniele, S., Radaelli, M., and Specchia, S., "Removal of NO₃⁻ from water by electrochemical reduction in different reactor configurations," *Appl. Catal., A*, **66**, 40~50(2006).
6. Younos, T., Tulou, K. E., "Overview of desalination technologies," *J. Contemp. Water Res. Edu.*, **132**, 3~10(2005).
7. Helfferich, F., Ion Exchange, Dover Publications, Inc., New York(1992).
8. Strathmann, H., Ion-Exchange Membrane Separation Processes, Elsevier, Amsterdam(2004).
9. Yang, C. M., Chio, W. H., Cho, B. W., Han, H. S., Yun, K. S., and Cho, W. I., "Porous carbon aerogel-silica gel composite electrodes for capacitive deionization process," *J. of the Korean Electrochemical Society*, **7**(1), 38~43(2004).
10. Lee, G. T., Cho, W. I., and Cho, B. W., "Characteristics of capacitive deionization process using carbon aerogel composite electrodes," *J. of the Korean Electrochemical Society*, **8**(2), 77~81(2005).
11. Hou, C. H., Liang, C., Yiacomini, S., Dai, S., and Tsouris, C., "Electrosorption capacitance of nanostructured carbon-based materials," *J. Colloid Interface Sci.*, **302**, 54~61(2006).
12. Park, K. K., Lee, J. B., Park, P. Y., Yoon, S. W., Eum, M., and Lee, C. W., "Development of a carbon sheet electrode for electrosorption desalination," *Desalination*, **206**, 86~91(2007).
13. Xu, B., Wu, F., Chen, S., Zhang, C., Cao, G., Yang, Y., "Activated carbon fiber cloths as electrodes for high performance electric double layer capacitors," *Electrochimica Acta*, **52**, 4595~4598(2007).
14. 김동국, 김종휘, 임장순, 김진호, "전기흡착 방식의 담수화방법 및 장치," 대한민국특허 제 10-0442773호(2004).
15. Yang, K. L., Ying, T. Y., Yiacomini, S., Tsouris, C., and Yitoratos, E. S., "Electrosorption of ions from aqueous solutions by carbon aerogel: An electrical double layer model," *Langmuir*, **17**, 1961~1969(2001).
16. Conway, B. E., Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications, Kluwer Academic, New York(1999).
17. Bard, A. J., Faulkner, L. R., Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, 2nd ed., John Wiley & Sons(1980).