

이온교환막을 결합한 축전식 탈염 시스템을 이용한 염수의 탈염

김유진 · 최재환[†]

공주대학교 화학공학부
(2009년 10월 23일 접수, 2009년 11월 27일 채택)

Desalination of Brackish Water by Capacitive Deionization System Combined with Ion-exchange Membrane

Yu-Jin Kim and Jae-Hwan Choi[†]

Department of Chemical Engineering, Kongju National University, Cheonan, Chungnam 331-717, Korea
(Received October 23, 2009; Accepted November 27, 2009)

탄소전극으로만 구성된 단위 셀(CDI)과 음극 표면에 양이온교환막을 결합한 단위 셀(MCDI)을 제작하여 탈염실험을 수행하였다. 실험결과 탈염속도와 탈염량은 셀 전위가 증가할수록 선형적으로 증가하였다. 그러나 동일한 탄소전극을 사용했음에도 불구하고 MCDI 셀이 CDI 셀보다 높은 탈염효율을 보였다. 셀 전위를 0.8~1.2 V로 변화시키면서 실험한 결과 흡착량은 셀 전위에 따라 MCDI 셀이 CDI 셀보다 33.1~135% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 전류효율에서도 MCDI 셀은 80% 정도를 나타낸 반면 CDI 셀은 40% 이하의 전류효율을 나타내었다. MCDI 셀에서 탈염효율이 높은 원인은 흡착 및 탈착전위가 인가되었을 때 전극 표면의 전기이중층과 bulk 용액 사이에서 이온들이 선택적으로 이동하기 때문인 것으로 사료된다.

Desalination experiments were carried out with two types of cell configuration; a CDI cell constructed with carbon electrodes only and a membrane capacitive deionization (MCDI) cell having a cation-exchange membrane on the cathode surface. The salt removal rate and desalination efficiencies increased linearly with increasing the cell potential. Although the same carbon electrodes were used in the desalination experiments, the MCDI cell showed higher salt removal efficiency than that of the CDI cell. The amount of salt removal for the MCDI cell was enhanced by 33.1~135% compared to the CDI cell, depending on the applied cell potential in the range of 0.8~1.2 V. In addition, the current efficiency for the MCDI cell was about 80%, whereas the efficiency was under 40% for the CDI cell. The higher salt removal efficiency in the MCDI cell was attributed to the fact that ions were selectively transported between the electric double layer and the bulk solution in the MCDI cell configuration.

Keywords: capacitive deionization, ion-exchange membrane, carbon electrode, current efficiency, adsorption and desorption

1. 서 론

축전식 탈염(capacitive deionization, CDI) 기술은 전위가 인가된 전극표면에 수용액 중의 이온들이 정전기적인 힘에 의해 흡착하는 원리를 이용한다[1-4]. 전극에 전위를 인가하면 인가된 전위와 반대 전하를 갖는 이온들이 전극표면으로 이동하여 전기이중층을 형성하면서 흡착이 이루어진다. 전극의 흡착용량이 한계에 이르면 하전된 전극을 방전시켜 전기이중층에 흡착된 이온들을 탈착시켜 전극을 재생하게 된다. 이처럼 CDI 공정은 전극의 전위만을 변화시켜 이온들을 흡착시키거나 탈착시킬 수 있기 때문에 공정의 운전이 매우 간편하고 화학물질의 첨가 없이 전극의 재생이 이루어지기 때문에 공정을 운전하는 과정에서 2차 오염물질이 발생하지 않아 환경친화적인 공정으로 알려져 있다[3-5]. 또한 인가되는 전위가 전기분해가 일어나지 않는 낮은

영역으로 제한되기 때문에 공정의 운전과정에서의 에너지소모량도 기존의 탈염공정들에 비해 현저히 줄일 수 있는 특징을 갖고 있다. 이와 같은 CDI 기술의 장점들을 바탕으로 최근 새로운 탈염기술로서 CDI 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[6-10].

현재까지 CDI 기술과 관련된 대부분의 연구들은 전극의 전기용량(capacitance)을 향상시킬 수 있는 전극을 제조하는데 초점을 맞추어 진행되었다. 비표면적이 높고 전도성이 우수한 다양한 탄소체들이 전극을 제조하는 데 사용되었다. Carbon cloth[11], carbon nanotube[12], carbon aerogel[8,13] 등과 같이 비표면적이 높으면서 전기전도성이 우수한 전극재료를 사용하여 고성능의 탄소전극들이 개발되었다. 또한 탄소체 표면의 작용기와 탄소체의 기공크기 및 기공분포 등과 같은 탄소체의 화학적, 물리적 특성과 전기흡착 사이의 상관관계를 통해 탄소전극의 흡착 성능을 향상시키기 위한 연구가 진행되었다[14-17]. CDI 공정에서 탄소전극에 많은 이온들을 흡착하기 위해서는 전극 자체의 전기용량을 높이는 것이 중요하다. 하지만 일정한 전기용량을

[†] 교신저자(e-mail: jhchoi@kongju.ac.kr)

가진 전극이라 하더라도 전극 계면에서의 흡착 및 탈착메커니즘에 따라 염 제거율은 큰 차이를 나타낼 수 있다. 만일 탈착과정에서 전극에 흡착된 이온들이 모두 bulk 용액으로 이동하지 못하게 되면 전극계면에 염이 잔류하게 된다. 이 경우 다시 전위가 인가되면 전극계면에 잔류하는 이온들이 전극표면에 다시 흡착되어 염 제거율이 감소하는 결과를 초래하게 된다[18].

이러한 문제점을 보완하기 위해 전극과 이온교환막을 결합한 membrane capacitive deionization (MCDI) 공정이 소개되었다. Andelman [18]은 탄소전극을 구성하는 탄소체들 사이의 공극(pore volume)에 존재하는 이온들 때문에 CDI 공정의 탈염 효율이 감소한다고 해석하였다. 이러한 문제점은 유입수의 염 농도가 높아질수록 증가하며 이를 극복하기 위해 전극 표면에 이온교환막을 결합한 MCDI 개념을 처음으로 도입하였다. 이후 Lee 등은 MCDI 공정을 발전소에서 발생하는 폐수의 탈염에 적용한 결과 기존의 CDI 공정보다 염 제거율이 19% 향상되는 결과를 얻었다[19]. 또한 Li 등은 carbon nanotube와 nanofibres로 전극을 제조한 후 이온교환막과 결합하여 MCDI 공정을 운전한 결과 MCDI 공정이 CDI 공정에 비해 염 제거율이 49.2% 향상되는 결과를 얻었다[20]. 이들 연구들을 통해서 MCDI 공정은 기존 CDI 공정의 탈염 효율을 크게 향상시킬 수 있는 것으로 확인되었다. 하지만 MCDI 공정의 탈염효율이 증가되는 원인을 명확하게 설명한 연구결과는 아직까지 보고되지 않은 상황이다. 따라서 흡착 및 탈착 전위가 인가되었을 때 전극계면에서 이온들의 이동 메커니즘을 명확히 규명하는 것은 CDI 공정의 효율을 향상시키는 데 매우 중요하다.

본 연구에서는 탄소전극 표면에서 전극전위 변화에 따른 이온들의 흡착 및 탈착 메커니즘을 해석함으로써 CDI 공정의 탈염 효율을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 활성탄소분말을 이용해 탄소전극을 제조한 후 이들 전극들로만 구성된 CDI 셀과 이온교환막을 결합한 MCDI 셀을 제작하여 탈염실험을 수행하였다. 전극 전위를 변화시켜 탈염실험을 수행하면서 유출수의 전기전도도와 셀에 공급된 전류량을 실시간으로 정밀하게 측정하였다. 이들 결과로부터 이온교환막의 유무에 따른 탈염효율, 전류효율과 염제거율과 전류량과의 상관관계를 분석하여 전극표면에서의 흡착 및 탈착 메커니즘을 해석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 탄소전극의 제조

고분자바인더를 유기용매에 용해시킨 후 활성탄소분말과 혼합하여 탄소전극을 제조하였다. Polyvinylidene fluoride (PVdF, Aldrich, M.W. = 530000)를 di-methylacetamide (DMAc, Aldrich)에 용해시킨 후 활성탄소분말(P-60, Daedong AC Co.)과 혼합한 후 12 h 동안 교반하여 균일한 전극슬러리를 제조하였다. Doctor blade를 이용하여 전극슬러리를 graphite sheet (F02511, Dongbang Carbon Co.) 위에 캐스팅한 후 50 °C의 건조 오븐에서 1 h 동안 건조하였다. 전극에 잔류하는 DMAc를 모두 제거하기 위해 전극을 다시 50 °C의 진공 오븐에서 2 h 동안 건조하였다. 제조된 탄소전극에서 고분자 바인더의 함량비는 10 wt%였고 건조 후 전극층의 두께는 약 150 μm 이었다.

2.2. 축전식 탈염 장치의 구성 및 탈염 실험

이온교환막의 유무에 따른 CDI 운전 과정에서의 흡착 및 탈착 특성의 변화를 관찰하기 위해 두 가지 구조의 셀을 제작하였다. 하나는 기존의 CDI 공정과 동일하게 탄소전극으로만 구성된 셀(CDI cell)이고

다른 하나는 음극 탄소전극 표면에 양이온교환막(Neosepta CMX, Astom Co., Japan)을 결합하여 셀(MCDI cell)을 구성하였다.

Lee 등과 Li 등은 양이온교환막과 음이온교환막을 모두 결합하여 MCDI 셀을 구성하였다[19,20]. MCDI 셀에서 이온교환막은 이온들이 선택적으로 전극에 흡착되도록 하는 역할을 한다. 음극 표면에 양이온교환막을 결합하고 전위를 인가하면 음극에는 양이온만이 흡착할 수 있고 전기적 중성을 맞추기 위해 양극 표면에는 음이온교환막의 유무에 상관없이 음이온들만 흡착할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 양이온교환막만을 사용하여 MCDI 셀을 구성하였다.

탄소전극은 앞서 제조한 전극을 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 로 절단하여 사용하였다. 전극과 전극 사이에 약 90 μm 의 스페이서(나일론 네트)를 삽입하여 탄소전극들이 접촉하는 것을 방지하면서 유입수가 흘러갈 수 있는 유로를 형성하였다. 탄소전극의 양쪽에는 Plexiglas를 대고 볼트로 고정시켜 셀을 조립하였다.

제작된 셀을 대상으로 축전식 탈염실험을 수행하였다. Figure 1은 탈염실험 장치의 구성도를 나타낸 것이다. 정량펌프로 유입수를 50 mL/min의 일정한 속도로 셀에 공급하였다. 탄소전극의 중앙에 1 cm의 구멍을 뚫어 유입수가 전극의 가장자리에서 유입되어 스페이서를 통과한 후 전극의 중앙으로 유출될 수 있도록 유로를 형성하였다. 유입수는 200 mg/L Na_2SO_4 를 사용하였고 250 mL에 대해서 탈염실험을 실시하였다. Potentiostat (WPG100, WonA Tech Co.)을 이용해 미리 설정된 전위를 인가하면서 셀에 흐른 전류를 1 s 간격으로 자동 측정하였다. 유입수 용액의 전기전도도 변화는 전기전도도 미터를 데이터 수집기(midi Logger GL200, Graph Tech Co.)에 연결하여 1 s 간격으로 자동 측정하였다.

탈염실험은 셀 전위를 0.8, 1.0, 1.2 V로 변화시켜 가면서 수행하였다. 각각의 셀 전위를 300 s 동안 인가하면서 흡착시킨 후 곧바로 셀 전위를 0.0 V로 변화시켜 150 s 동안 탈착실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 축전식 탈염 시스템의 흡착 및 탈착 성능

CDI와 MCDI 셀에 대해서 셀 전위를 1.2 V로 인가하면서 흡착시킨 후 곧바로 0.0 V로 변화시켜 탈착시키는 동안 용액의 전기전도도 변화를 Figure 2에 도시하였다. 초기 유입수의 전기전도도가 368 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이었지만 흡착전위가 인가되면서 약 60 s 동안 선형적으로 감소하다가 이후 전극의 흡착용량이 한계에 이르면서 일정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 전위가 인가된 후 300 s가 지난 후 전기전도도는 CDI와 MCDI 셀에서 각각 267, 229 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 를 나타내었다. 흡착과정에서의 전기전도도 변화에서도 알 수 있듯이 CDI와 MCDI 셀에서의 탈염효율은 각각 27.4, 37.8%로 MCDI 셀에서 훨씬 높은 탈염효율을 나타내고 있다.

전기전도도 변화에서 주목할 점은 셀 구조에 따른 전기전도도의 차이가 전위가 인가된 초기에 발생한다는 점이다. 비록 동일한 탄소전극을 사용했음에도 불구하고 이온교환막의 유무에 따라 탈염효율의 차이를 보이는 것은 흡착 및 탈착과정에서 이온의 이동 메커니즘이 차이를 나타낸다는 것을 의미한다. 전위가 인가되어 이온들을 흡착시킨 후 갑자기 셀 전위를 0 V로 변경하면 흡착된 이온들은 전기적 중성을 맞추기 위해 bulk 용액으로 탈착이 이루어진다. 그러나 흡착된 이온들의 탈착뿐만 아니라 bulk 용액으로부터 반대 전하를 가진 이온들이 전극표면으로 이동하여 전기적 중성을 맞출 수도 있다. 따라서 전극계면에는 초기에 흡착되었던 이온들이 모두 탈착되지 못하고 일

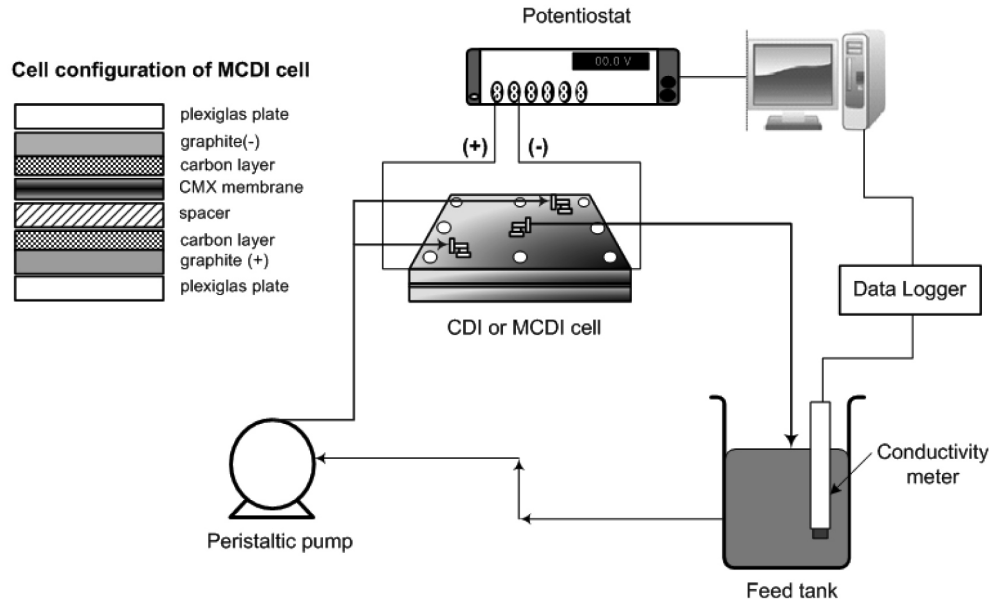


Figure 1. Schematic diagram of capacitive deionization experiment setup and cell configuration of the MCDI cell.

부가 잔류하는 현상이 발생할 수 있다. 이와 같은 상황에서 다시 흡착 전위를 인가하게 되면 전극표면에 잔류하던 이온들이 다시 흡착하게 되어 전극의 탈염효율을 저하시키는 것으로 사료된다.

반면 이온교환막을 결합한 MCDI 셀에서는 이온교환막의 선택성에 의해 탈염과정에서 이온들이 bulk 용액으로부터 전극표면으로 이동하는 것을 막을 수 있다. 따라서 셀 전위가 인가되었을 때 bulk 용액으로부터 이동한 이온들이 전극표면에 흡착되어 탈염효율이 향상되는 것으로 판단된다.

한편 흡착 후 곧바로 0.0 V의 전위를 150 s 동안 인가한 결과 흡착된 이온들이 모두 탈착되어 초기 농도로 되돌아가는 것을 확인할 수 있다. 그러나 CDI 셀의 경우 탈착 전위가 인가된 후 약 50 s 이내에 거의 모든 이온들의 탈착이 이루어진 반면 MCDI 셀에서는 탈착시간이 약 100 s 정도가 소요되는 것을 알 수 있다. 이처럼 MCDI 셀에서 탈착속도가 떨어지는 이유는 전극표면에 흡착된 이온들이 이온교환막을 통과하는 과정에서 전기저항을 받기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이온교환막이 결합되었다 하더라도 흡착과정에 비해 탈착이 매우 빠르게 진행되는 것을 알 수 있다. CDI 공정에서 탈착속도가 빠르게 진행된다는 것은 탈착과정에서 농축되는 염의 농도를 높일 수 있고 탈염수의 회수율을 높일 수 있다는 장점이 있다.

3.2. 인가전위에 따른 이온의 흡착속도

셀 전위를 0.8, 1.0, 1.2 V로 변화시키면서 흡착실험을 실시한 후 각각의 셀 구조에 대한 용액의 농도(c/c_0) 변화를 Figure 3에 도시하였다. 셀 전위가 증가할수록 전극의 흡착용량이 증가하여 용액의 농도가 점차 감소하고 있다. 전위가 0.8, 1.0, 1.2 V일 때 최종 농도는 CDI 셀에서는 각각 0.91, 0.83, 0.73을 나타내었고, MCDI 셀에서는 0.78, 0.70, 0.62로 감소하여 전위가 증가할수록 농도가 선형적으로 감소하였다.

각각의 셀 전위에서 흡착속도를 계산하여 CDI와 MCDI 셀의 흡착능력을 비교하였다. 전위가 인가된 후 50 s 동안 농도가 거의 선형적으로 감소하는 구간에 대해서 다음의 식을 이용해 흡착속도 상수(k)를 구하여 Figure 4에 도시하였다.

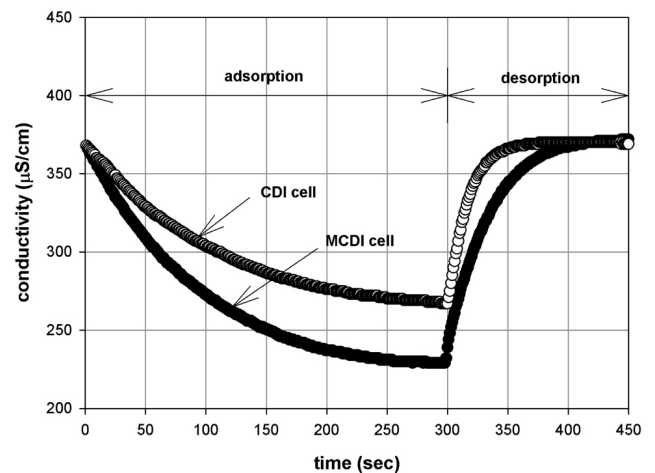


Figure 2. The conductivity transient of solution measured at a cell potential of 1.2 V for the CDI and MCDI cells.

$$\frac{dc}{dt} = -kt \quad (1)$$

셀 구조에 상관없이 전위와 흡착속도는 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다. 이는 전위가 증가할수록 전극표면에서 전기장의 세기가 증가하여 흡착하는 이온들에 대한 정전기적인 인력이 증가했기 때문인 것으로 해석된다. 한편 MCDI 셀이 CDI 셀에 비해 훨씬 높은 흡착속도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 셀 전위가 1.2 V인 경우 CDI와 MCDI 셀의 흡착속도 상수는 각각 0.42, 0.65 $\text{mg/L} \cdot \text{s}^2$ 였으며 CDI 셀에 비해서 약 55% 정도 흡착속도가 증가하는 것으로 나타났다.

흡착속도는 용액의 농도변화로부터 계산되었기 때문에 실제 공정의 탈염속도와 동일한 의미를 갖는다. 그러나 여기서 계산된 흡착속도가 전극표면에서 일어나는 실제 이온의 흡착속도를 의미한다고 판단할 수는 없다. 실제 전극표면에서 일어나는 이온의 이동 메커니즘은 용액의 농도변화와 셀에 공급된 전류변화량 사이의 상관관계를 통해서 간접적으로 해석할 수 있다.

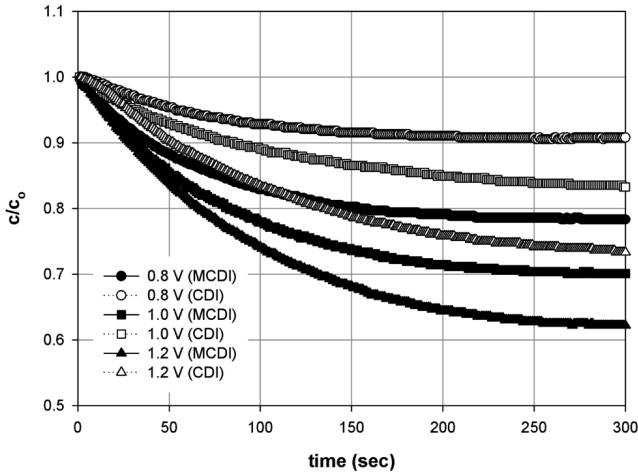


Figure 3. The changes in normalized concentration during the adsorption period at various cell potentials for the CDI and MCDI cells.

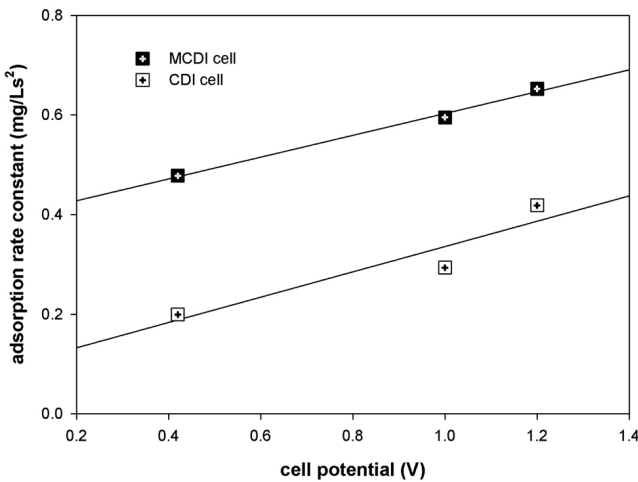


Figure 4. The adsorption rate constant for the CDI and MCDI cells as a function of cell potential.

3.3. 흡착 및 탈착 과정에서의 전류 변화

CDI 공정은 전극에서의 산화/환원 반응이 일어나지 않는 낮은 전위 영역에서 운전되기 때문에 셀에 흐른 전류는 전극표면에서 이온의 흡착 및 탈착량과 밀접한 상관관계를 나타낸다. 셀 전위를 1.2 V로 인가하면서 흡착실험을 진행하는 동안 셀에 흐른 전류를 측정하여 Figure 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 CDI와 MCDI 셀에서 공급된 전류가 큰 차이를 나타내고 있다. CDI 셀에서는 전위가 인가된 후 30 s가 경과하는 동안 전류가 0.6 A에서 0.12 A로 급격히 감소한 후 서서히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 반면 MCDI 셀에서는 전위가 인가된 직후 약 0.2 A의 전류가 흐르기 시작하여 급격한 감소 없이 서서히 줄어들다가 300 s 후에는 전류가 거의 흐르지 않았다.

이러한 전류의 변화는 앞서 전기전도도 결과에서 설명한 것처럼 전극계면에서 이온의 이동 메커니즘으로 설명할 수 있다. 즉, CDI 셀의 경우 탈착과정에서 탈착되지 못하고 잔류한 이온들이 흡착전위가 인가되면서 다시 흡착이 진행된다. 전극에서의 산화/환원 반응이 없는 조건에서 셀에 흐르는 전류는 이온의 이동량에 직접 비례하는데 CDI 셀에서 초기에 많은 전류가 흐르는 것은 이러한 전극계면에 잔류하는 이온들이 흡착하는 과정에서 기인된 것으로 해석된다. 따라서 셀을

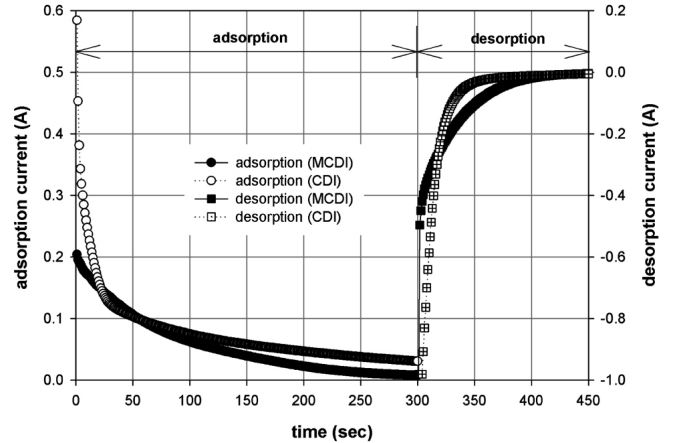


Figure 5. The changes in current at a cell potential of 1.2 V for the CDI and MCDI cells.

통해 많은 전류가 흘렀음에도 불구하고 용액의 전기전도도는 MCDI 셀보다 높게 나타나는 것으로 판단된다.

한편 MCDI 셀의 경우 흡착이 진행되면서 전류가 감소하여 300 s 후에 전류가 거의 흐르지 않는 반면 CDI 셀에서는 약 30 mA의 전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 이러한 전류의 차이는 전기이중층의 확산층 영역에 존재하는 이온들이 전극표면을 흐르는 용액의 전단력에 의해 bulk 용액으로 이동하기 때문인 것으로 판단된다[20]. 즉, 전기장에 의해 흡착된 이온들의 일부가 용액의 전단력을 이기지 못하고 떨어져 나간 후 다시 흡착되는 과정이 반복적으로 일어나고 있는 것으로 사료된다. 반면 MCDI 셀에서는 이온교환막의 영향으로 흡착된 이온들이 용액의 전단력을 받지 않기 때문에 전기이중층의 확산층 영역에서 흡착/탈착이 진행되지 않아 전류가 0으로 수렴하는 것으로 판단된다. 한편 탈착전위가 인가되자마자 전류는 급속히 감소하여 거의 흐르지 않는 것을 볼 수 있다. 이러한 전류변화는 앞에서 전기전도도 변화에서도 설명한 것처럼 전극에서 이온들이 매우 빠른 속도로 탈착된다는 것을 의미한다. 그러나 CDI와 MCDI 셀에서 전류변화를 자세히 살펴보면 MCDI 셀에서 전류가 감소하는 속도가 조금 느리게 진행되는 것을 볼 수 있다. 이러한 원인은 이온교환막을 통해 흡착된 이온들이 막을 통과하면서 전기저항을 받고 있기 때문인 것으로 사료된다.

Figure 6은 셀에 흐른 전류로부터 시간에 따른 누적 전하량을 계산하여 그래프로 나타낸 것이다. 전류변화 결과로부터도 예상할 수 있었던 것처럼 MCDI 셀보다 CDI 셀에서 더 많은 양의 전하가 흘렀다는 것을 확인할 수 있다. CDI와 MCDI 셀에서 흡착이 이루어진 300 s 동안 흐른 총 전하량은 각각 46.7, 33.6 coulomb으로 나타났다. 또한 탈착과정에서의 총 전하량은 CDI와 MCDI 셀에서 각각 34.1, 32.5 coulomb을 나타냈다. MCDI 셀의 경우 흡착과 탈착과정에서 총 전하량은 비슷한 값을 보이고 있는데 이는 전극표면에서 흡착과 탈착이 이상적으로 일어나고 있다는 것을 의미한다.

3.4. 인가전위에 따른 탈염량 및 전류효율 변화

셀 전위를 변화시키면서 흡착실험을 진행하는 동안 용액의 농도변화로부터 흡착된 염의 양을 계산하여 Figure 7에 도시하였다. 셀 전위가 증가할수록 탈염량은 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 모든 전위에서 이온교환막을 결합한 MCDI 셀이 CDI 셀보다 높은 탈염량을 나타내었다. 셀 전위를 0.8~1.2 V로 변화시키면서 실험한 결과 탈염량은 CDI 셀에서는 0.046~0.133 mg/cm²였지만 MCDI 셀에서

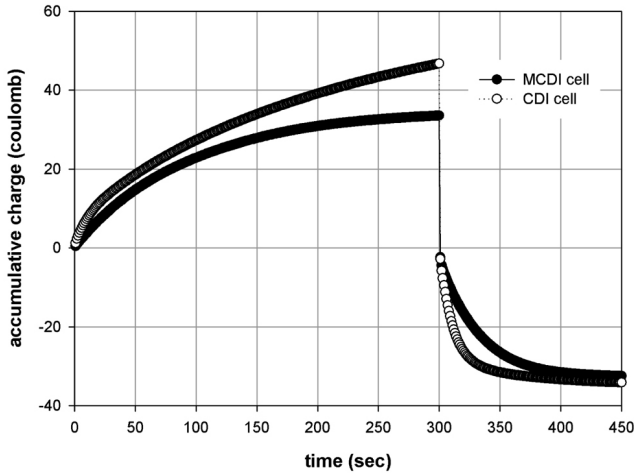


Figure 6. The cumulative charges passed through the cell at a cell potential of 1.2 V for the CDI and MCDI cells.

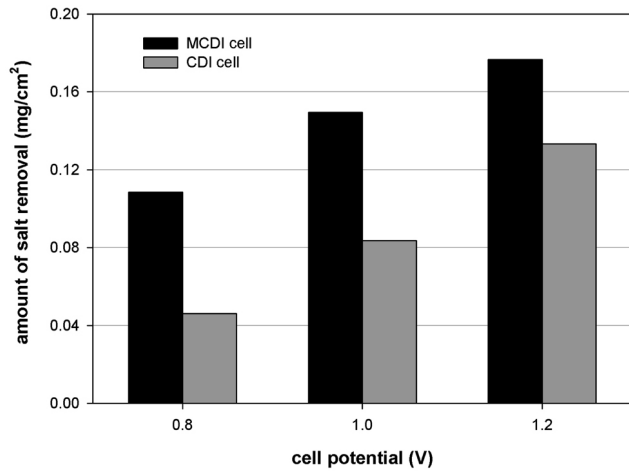


Figure 7. The amount of salt removed for the CDI and MCDI cells at various cell potentials.

는 0.108~0.177 mg/cm²를 나타내어 셀 전위에 따라 MCDI 셀이 CDI 셀에 보다 탈염량이 33.1~135% 정도 증가하였다.

한편 셀에 흐른 전류가 이온을 흡착하는데 얼마나 효율적으로 이용되는지를 알아보기 위해 전류효율(current efficiency, η)을 분석하였다. 전류효율은 셀에 흐른 전류에 대한 실제 흡착된 이온들의 양으로 정의되며 다음 식을 통해 계산할 수 있다[21].

$$\eta(\%) = \left(\frac{(c_o - c_f) VF}{\int Idt} \right) \times 100 \quad (2)$$

여기서 c_f 는 용액의 최종 농도, V 는 용액의 부피, I 는 셀에 흐른 전류, F 는 Faraday 상수를 의미한다.

Figure 8은 CDI와 MCDI 셀에서 셀 전위에 따른 전류효율을 계산하여 정리한 것이다. CDI 셀의 경우 셀 전위가 증가함에 따라 전류효율이 22.3~38.8%로 서서히 증가하는 경향을 보였다. 그러나 전류효율은 40% 이하를 나타내어 실제로 셀에 공급된 전류가 탈염에 효과적으로 활용되지 못하는 것을 알 수 있다.

Figure 5에서 살펴 본 것처럼 비록 CDI 셀에서 많은 전류가 흘렀지

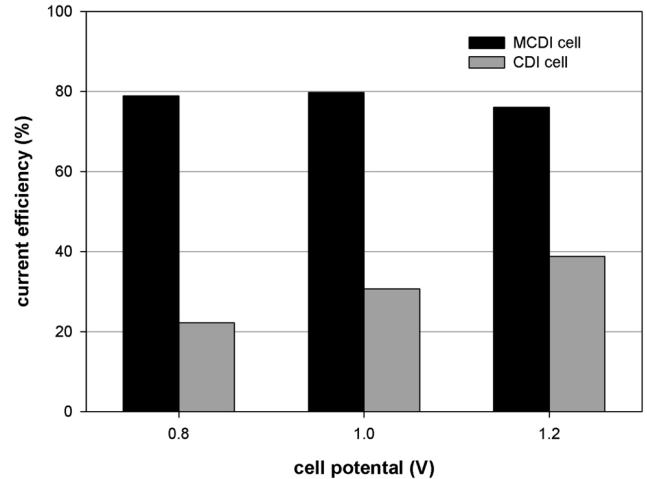


Figure 8. Comparison of current efficiency for the CDI and MCDI cells at various cell potentials.

만 대부분의 전류들은 bulk 용액의 이온들을 전극표면에 흡착하는데 활용되지 못하고 전극표면에 잔류된 이온들을 재 흡착하거나 용액의 전단력에 의해 전기이중층의 확산층 영역에서 이온들이 흡착과 탈착을 반복하는 과정에서 전류가 사용되어 낮은 전류효율을 보이는 것으로 해석된다. 반면 MCDI 셀에서는 셀 전위에 관계없이 전류밀도가 약 80% 정도를 나타내고 있다. 이처럼 MCDI 셀에서 높은 전류밀도를 보이는 것은 이온교환막에 의해 흡착 및 탈착과정에서 이온들이 전극표면으로 선택적으로 이동할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 실험결과로부터 동일한 전기용량을 갖는 탄소전극을 사용하더라도 흡착 및 탈착과정에서 전극표면에서 이온의 이동 메커니즘에 따라 탈염효율이 큰 차이를 나타낼 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 비록 CDI 공정이 환경친화적이고 에너지 소모량을 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있는 새로운 탈염기술로 인식되고 있지만 실제 공정에 적용되기 위해서는 이온교환막을 결합한 MCDI 공정과 같이 전극표면에서 이온의 이동을 선택적으로 제어하는 것이 매우 중요한 것으로 사료된다.

4. 결 론

탄소전극으로만 구성된 축전식 탈염 셀과 이온교환막을 결합한 셀을 대상으로 탈염 실험을 수행하면서 전기전도도와 전류의 변화량으로부터 전극표면에서 이온들의 이동현상을 해석하였다. 실험결과 탈염속도와 탈염율은 셀 구조에 관계없이 셀 전위에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 그러나 전극에 흡착된 염의 양은 인가전위에 따라 MCDI 셀이 CDI 셀보다 33.1~135% 증가하였다. 전류효율에서도 MCDI 셀은 80% 정도를 나타낸 반면 CDI 셀은 40% 이하를 나타내었다.

CDI 셀에서 탈염효율과 전류효율이 크게 감소하는 이유는 흡착이 완료된 후 탈착전위가 인가되었을 때 흡착된 이온들의 탈착과 동시에 bulk 용액으로부터 반대전하의 이온들이 전극표면으로 이동하기 때문인 것으로 분석되었다. 또한 CDI 셀에서는 전기이중층의 확산층 영역이 용액의 전단력에 영향을 받아 흡착과정에서 이온들의 흡착 및 탈착이 반복되는 것도 탈염효율을 저하시키는 요인으로 판단되었다. 이상의 실험결과로부터 축전식 탈염공정의 효율을 향상시키기 위해서는 인가되는 전위에 따라 전극표면에서 이온의 이동을 제어할 수 있

는 이온선택성 전극을 사용하는 것이 매우 중요한 것으로 사료되었다.

참고 문헌

1. B. E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York (1999).
2. J. C. Farmer, D. V. Fix, G. C. Mack, R. W. Pekala, and J. F. Poco, *J. Electrochem. Soc.*, **143**, 159 (1996).
3. J. A. Lim, N. S. Park, J. S. Park, and J. H. Choi, *Desalination*, **238**, 37 (2009).
4. C. M. Yang, W. H. Choi, B. W. Cho, W. I. Cho, K. S. Yun, and H. S. Han, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **15**, 294 (2004).
5. J. C. Farmer, D. V. Fix, G. C. Mack, R. W. Pekala, and J. F. Poco, *J. Electrochem. Soc.*, **143**, 159 (1996).
6. L. Zou, L. Li, H. Song, and G. Morris, *Water Res.*, **42**, 2340 (2008).
7. L. Zou, G. Morris, and D. Qi, *Desalination*, **225**, 329 (2008).
8. P. Xu, J. E. Drewes, D. Heil, and G. Wang, *Water Res.*, **42**, 2605 (2008).
9. Y. Gao, L. Pank, Y. P. Zhang, Y. W. Chen, and Z. Sun, *Surf. Rev. Lett.*, **14**, 1033 (2007).
10. L. Li, L. Zou, H. Song, and G. Morris, *Carbon*, **47**, 775 (2009).
11. H. J. Oh, J. H. Lee, H. J. Ahn, Y. Jeong, Y. J. Kim, and C. S. Chi, *Thin Solid Films*, **515**, 220 (2006).
12. Y. Gao, L. Pan, H. Li, Y. Zhang, Z. Zhang, Y. Chen, and Z. Sun, *Thin Solid Films*, **517**, 1616 (2009).
13. K. L. Yang, S. Yiacoumi, and C. Tsouris, *J. Electroanal. Chem.*, **540**, 159 (2003).
14. C. T. Hsieh and H. Teng, *Carbon*, **40**, 667 (2002).
15. T. Y. Ying, K. L. Yang, S. Yiacoumi, and C. Tsouris, *J. Colloid Interf. Sci.*, **250**, 18 (2002).
16. C. T. Hou, C. Liang, S. Yiacoumi, S. Dai, and G. Tsouris, *J. Colloid Interf. Sci.*, **302**, 54 (2006).
17. K. L. Yang, T. Y. Ying, S. Yiacoumi, C. Tsouris, and E. S. Vittoratos, *Langmuir*, **17**, 1964 (2001).
18. Can. Patent 2,444,390 (2002).
19. J. B. Lee, K. K. Park, H. M. Eum, and C. W. Lee, *Desalination*, **196**, 125 (2006).
20. H. Li, Y. Gao, L. Pan, Y. Zhang, Y. Chen, and Z. Sun, *Water Res.*, **42**, 4923 (2008).
21. H. Strathmann, *Ion-Exchange Membrane Separation Processes*, Elsevier, Amsterdam (2004).