

두 가지 유로 형태에 따라 이온교환수지를 채운 축전식 탈염기술

이동주 · 박진수*

상명대학교 환경공학과

(2015년 1월 20일 접수 : 2015년 2월 5일 수정 : 2015년 2월 7일 채택)

Application of Capacitive Deionization Packed Ion Exchange Resins in Two Flow Channels

Dong-Ju Lee and Jin-Soo Park*

Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Sangmyung University, 31 Sangmyungdae-gil,
Dongnam-gu, Cheonan, Chungnam Province, 330-720, South Korea

(Received January 20, 2015 : Revised February 5, 2015 : Accepted February 7, 2015)

초 록

일반적으로 저농도의 염 용액에서 탈염성능이 우수한 축전식 탈염기술에 고농도의 염을 함유한 용액을 처리할 수 있는 가능성을 확인하기 위해 spacer와 spiral 형태의 두 가지 모양의 유로에 따라 이온교환수지를 채움으로써 탈염효율을 비교분석하고 기술의 적용가능성을 평가하였다. Spacer와 spiral 형태로 이온교환수지를 채운 축전식 탈염 셀의 탈염효율은 각각 77.21 및 99.94%로, 이는 spiral 형태의 유로에 채워진 이온교환수지가 유입수와 고르게 접촉할 수 있는 유로의 모양을 구성하기 때문에 많은 이온들이 제거될 수 있었다고 판단된다. 또한 pH와 축적 전하량의 변화량에서 탈염성능을 감소시킬 수 있는 페러데이 반응이 현저하게 줄어들었다. 따라서 본 연구를 통해 에너지효율적인 축전식 탈염 기술을 이용하여 고농도의 염 용액의 탈염에 대한 가능성을 제시해주었고, 이온교환수지의 혼합비율의 최적화와 연속식 전기탈이온 기술의 재생공정의 도입에 대한 추가적인 연구를 통해 이상적인 탈염기술을 개발하는 데 큰 기반이 될 것으로 기대된다.

Abstract : To desalinate the aqueous solutions with high salt concentration using the capacitive deionization technology, two resin/membrane capacitive deionization(RMCDI) cells were fabricated by filling mixed ion exchange resins in two different flow channels (spacer and spiral type). The salt removal efficiency of the spacer- and spiral-RMCDI was 77.21 and 99.94%, respectively. Many ions were significantly removed in a spiral RMCDI cell because the feed solution could be more evenly contacted with the ion exchange resins filled on the spiral type flow channel. As the result of the changes of pH and accumulative charges, it was observed that Faradaic reaction was diminished for a spiral RMCDI cell filled by the mixture of cation and anion exchange resins. Therefore, the desalination of the aqueous solutions with high salt concentration by the capacitive deionization technology was proven. In addition, further studies on the optimization of the mixing ratio with ion exchange resins and the introduction of the regeneration process generally occurred in the continuous electrodeionization (CEDI) technology are required to improve the RMCDI technology.

Keywords : Capacitive deionization, Ion exchange resin, Flow channel

*E-mail: energy@smu.ac.kr

1. 서 론

축전식 탈염 기술(capacitive deionization, CDI)은 기존의 탈염기술들의 문제점을 보완하는 대안이 될 수 있는 차세대 탈염기술이다. 축전식 탈염이란 전하를 저장할 수 있는 축전기에서 전기이중층의 원리를 기반으로 한다. 두 전극사이에 이온을 함유한 용액을 흘려주는 동안 전극에 전위를 공급하면 전극에서 전하는 전극과 용액 사이에서 이온들을 전극 표면으로 흡착시키고 전기이중층을 형성한다. 이러한 원리를 바탕으로 전위의 공급 및 중단으로 이온들의 흡착과 탈착 또는 탈염 및 재생과정이 가능하여 비교적 운전이 간편하고, 전기이중층을 형성할 수 있는 낮은 전압으로 탈염이 가능하여 에너지 소모가 다른 탈염기술에 비해 가장 낮다. 재생과정에서 별도의 화학약품을 사용하지 않아 친환경적인 기술이고, 대부분의 이온들이 전극으로부터 신속하게 탈착되기 때문에 높은 회수율을 보이고, 축전기의 원리를 기반으로 이온들을 흡착하는 과정은 에너지를 저장하는 과정과 같기 때문에 탈착하는 과정에서 이 에너지를 회수할 수 있는 기술이 개발된다면 가격적이고 이상적인 탈염기술이 될 수 있는 수많은 장점들을 갖고 있는 기술이다.^{1,6)} 하지만 축전식 탈염 기술은 안정성에 대한 문제로 인해 상업적으로 적용사례가 극히 적다는 단점이 있다. 또한 일반적으로 탈염기술은 에너지 비용을 고려하여 물속에 용해된 이온의 종류와 농도에 따른 적절한 탈염기술을 적용해야 하는데 축전식 탈염 기술은 상당히 낮은 염 농도의 용액에서 고효율을 나타내기 때문에 비교적 염 농도가 낮은 기수(brackish water)에 국한되어야 한다.^{1,4)}

축전식 탈염 기술의 성능을 크게 좌우할 수 있는 연구 분야는 전극, 모듈개발, 운전조건 등이 있다. 이들 중 가장 직접적으로 성능에 영향을 주는 부분은 전극이고 전극물질의 종류, 전극의 형태로 크게 구분할 수 있다. 전극물질의 종류로는 활성탄, 활성탄소섬유, 탄소나노튜브, 활성탄소펠트, 그래핀 등과 같은 다공성 탄소체와 수용성 및 비수용성 고분자 바인더에 대한 연구들이 있고, 전극의 형태로는 이온교환막을 결합한 MCDI(membrane capacitive deionization), 이온교환수지를 전극에 코팅한 복합탄소전극, 연속적인 운전을 위한 흐름식 전극을 이용한 축전식 탈염 기술 등이 있다.⁶⁻¹⁹⁾

본 연구에서는 일반적인 축전식 탈염 기술의 단점으로 낮은 염 농도 범위에 대한 한계를 극복하여 고농도의 염을 제거하기 위해 이온교환수지와 이온교환막을 이용하여 셀을 제작한 축전식 탈염기술을 개발하였다. 본 공정은 1 단계로 고농도 용액 내 다수의

염을 이온교환수지로 제거한 후 2 단계로 저농도의 용액을 축전식 탈염공정의 전극 흡착으로 수행하고 마지막 3 단계에서 셀에 외부 전위를 가하여 물분해를 유도하고 생성한 수소이온 및 수산화이온으로 이온교환수지를 재생하는 것이다. 본 연구는 이 중 고농도 용액 내 다수의 염을 제거하는 1 단계에서 이온교환수지로 제거 가능한 형태의 축전식 탈염 셀을 개발하고자 하는 것이다. 이를 위하여 축전식 탈염 셀 내 용액 유입 통로의 유로 모양을 최적화하고 이온교환수지를 채움으로써 고농도의 염 용액의 다수 염을 이온교환수지로 탈염시켜 이후 축전식 탈염 공정 및 재생 공정을 가능하게 하는 연속 탈염 공정의 상업적인 기술 도입의 가능성을 확인해보고 문제점들을 파악하여 이를 극복할 수 있는 방안을 제시하려고 한다.

2. 실험 및 방법

2.1. 탄소전극 제조

축전식 탈염용 다공성 탄소전극을 제조하기 위해 유기용매인 dimethylacetamide (Aldrich Co.)에 고분자 바인더인 poly(vinylidene fluoride) (Shanghai chemical Co., M.W. 1,800,000)를 녹인 후 탄소체인 활성탄소분말(P-60, Daedong AC Co.)을 넣어 균일한 전극슬러리를 얻을 때까지 교반하였다. 제조된 전극슬러리를 graphite sheet (Dongbang Carbon Co.) 위에 doctor blade(KIPAE E&T Co.)를 이용하여 도포하였고 건조오븐에 넣어 80°C로 유기용매를 건조시켜 일정한 두께의 탄소전극을 제작하였다. 탄소전극은 셀의 모양에 맞게 10×10 cm²의 면적으로 절단하여 준비하였다.

2.2. 이온교환체의 선정

본 연구에서 사용한 이온교환막은 상용화 제품 중 탈염공정에서 주로 사용되는 양이온교환막인 Neosepta[®] CMX(Astom Co., Japan)와 음이온교환막인 Neosepta[®] AMX(Astom Co., Japan)로 선정하였다. 유로에 채워진 이온교환수지는 국내에서 판매하는 상용화 제품 중 순수제조용 혼합수지로 양이온교환수지인 TRILITE SCR-B(Samyang Co., Korea)와 음이온교환수지인 TRILITE SAR10(Samyang Co., Korea)의 제품을 당량 비로 혼합하여 제작한 TRILITE SM210(Samyang Co., Korea)을 사용하였고 그 특성을 Table 1에 나타내었다.

2.3. CDI 셀의 구조

본 연구에서는 세 가지 유형의 셀을 준비하였다. Fig. 1에서 보이는 것과 같이 일반적인 MCDI 탈염 셀의 구조와 유사하게 셀의 모양을 고정시켜 주는 아

Table 1. Characterizations of commercial TRILITE SM210 resin

Properties	SM210	SCR-B	SAR10
Polymer matrix structure		Polystyrene + DVB	
Type	-	Strongly acidic gel type	Strongly basic gel type
Functional group	-	Sulfonate	Trimethylammonium
Ionic form	H ⁺ /OH ⁻	Na ⁺	Cl ⁻
Total capacity in volume(eq/L)	> 0.45	> 2.0	> 1.3
specific gravity	-	1.29	1.11
Effective size (mm)		> 0.40	

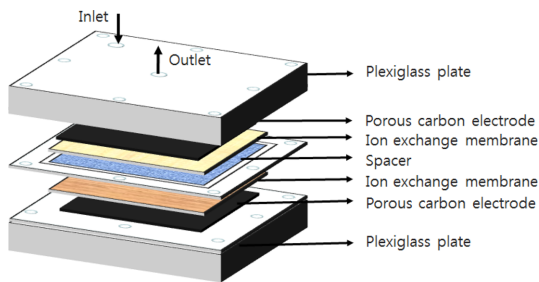


Fig. 1. Schematic diagram of a typical MCDI unit cell.

크릴판을 기준으로 누수가 발생하지 않도록 비전도체인 실리콘 가스켓을 두고 그 사이에 탄소전극, 음이온교환막, 스페이서, 양이온교환막, 탄소전극의 순으로 배치하였다. 다음으로 사용한 두 셀은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 실리콘 가스켓을 이용하여 spacer 형태와 spiral 형태의 두 가지 유로 모양을 제작하였고 MCDI 셀 구성에서 이온교환수지를 스페이서가 들어갈 위치에 추가 실리콘 가스켓을 이용하여 배치하였다. 유로 모양에 맞게 이온교환수지를 각각 9g씩 채워 셀을 조립하였고 이 셀을 RMCDI(resin + membrane CDI)라고 명명하였다. 특별히 spacer RMCDI 셀은 유로에 채워진 이온교환수지로 인해 물이 고르게 분포하지 못함으로써 사영역(dead zone)이 발생하였고 탈염 성능을 저하시킬 수 있기 때문에 두 개의 유입구와 격자모양의 스페이서를 별도로 추가하여 구성하였다.

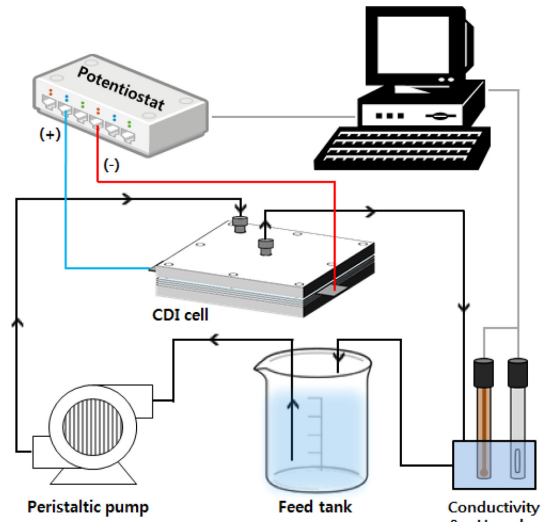


Fig. 3. Schematic diagram of a CDI process used in this study.

2.4. 탈염 실험

위에서 언급한 것과 같이 조립한 세 가지의 단위 셀을 이용하여 Fig. 3과 같은 축전식 탈염 실험을 준비하였다. 시료는 고농도의 염을 함유한 3,500 ppm NaCl의 유입수 탱크에서 정량펌프를 이용하여 20 mL/min의 유량으로 셀의 가장자리에 유입구를 통해 유입되어 셀 내부의 유로를 거쳐 셀의 정중앙에 유출구를

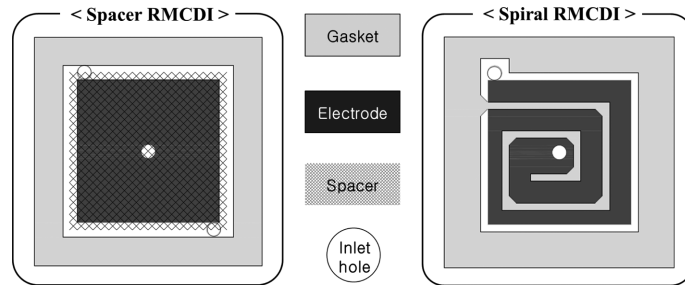


Fig. 2. Schematic diagram of two different flow channels of the RMCDI cells (spacer and spiral RMCDI).

통해 유입수 탱크로 다시 배출되는 회분식으로 구성하였다. 이때 배출되는 통로에 pH & 이온전도도 측정기(Orion Star A215, Thermo Scientific, USA)에 연결된 pH와 이온전도도 센서를 두어 유출수의 pH와 이온전도도를 3초 간격으로 측정하였고 컴퓨터와 연결하여 데이터를 수집하였다. 시료를 셀에 흘려주는 동안 전극을 potentiostat (SP-150 & VMP3B-20, Bio-Logic SA, France)과 연결하여 흡착 전위 1.5 V를 10분 동안 인가함으로써 탈염 운전을 진행하였고, 탈착 전위 0 V를 10분 동안 인가하여 재생 운전을 진행하였다. 이온전도도 변화가 일정해질 때까지 탈염 및 재생 운전을 반복적으로 수행하였다. 전극에 전위를 인가하는 동안 전극에서 측정되는 전류 및 전하량을 potentiostat에서 실시간으로 측정하여 컴퓨터에 데이터를 수집하였다.

3. 결과 및 고찰

고농도의 담수인 3500 ppm NaCl 용액을 시료로 하여 spacer RMCDI와 spiral RMCDI의 셀로 탈염 실험을 수행하였고 탈염성능을 비교하기 위해 MCDI 셀의 탈염 실험도 추가 진행하였다. 일반적으로 MCDI 셀은 유출수의 이온전도도 변화를 살펴보았을 때 3 사이클 내에 동적평형상태에 도달하기 때문에 사이클에 따른 이온전도도 변화의 패턴이 일정하게 유지된다. 하지만 본 연구에서 RMCDI 셀로 운전하였을 때 유로에 채워진 이온교환수지에 이온들이 흡착하여 평형상태에 도달하는 과정으로 인해 이온전도도의 변화가 안정하게 유지될 때까지 오랜 시간이 소요되었다. 따라서 RMCDI 셀은 이온전도도의 변화가 일정해질 때까지 장기적으로 탈염 및 재생 운전을 반복하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Spacer RMCDI 셀은 약 1 시간 내에 이온전도도 변화의 패턴이 일정하게 유지되었고, spiral RMCDI 셀은 4 시간 후에 일정하게 유지되었다. 게다가 spiral RMCDI 셀에서 이온전도도 변화의 패턴은 계속해서 0 mS/cm에 가깝게 감소하였고, spacer RMCDI 셀에서는 빠른 시간 안에 상당히 적게 감소하였다. 이는 spacer보다 spiral 유로 형태가 유입수의 흐름에 있어서 채워진 이온교환수지와 더 많이 접촉되었기 때문에 더 많은 이온전도도가 감소하였다고 판단된다.

이온전도도의 변화를 더 정확하게 분석하기 위하여 이온전도도의 변화가 일정해지는 구간을 확대하여 MCDI 셀과 함께 Fig. 5에 나타내었다. MCDI, spacer RMCDI 셀의 이온전도도는 흡착구간에서 1.5 V를 전극에 공급하자마자 각각 4.275, 0.831 mS/cm까지 급격하게 감소한 후 완만하게 증가하다가 각각 6.156,

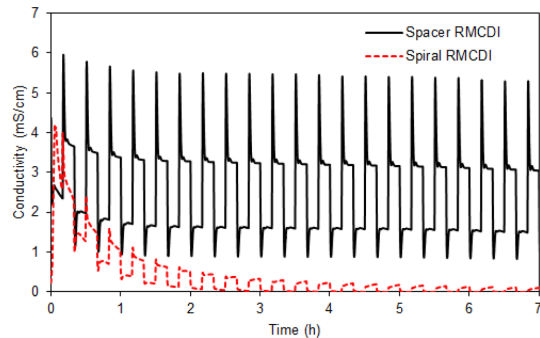


Fig. 4. Change of effluent conductivity in the long-term operation of the RMCDI cell.

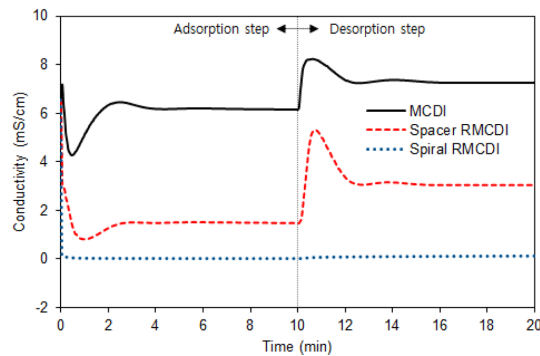


Fig. 5. Change of effluent conductivity in the operation of the three CDI cells.

1.493 mS/cm로 일정하게 유지되었다. 이렇게 흡착단계에서 이온전도도가 감소하였다가 증가하는 증감 현상에 대한 이유는 전압의 공급으로 초기 유출수 내에 존재하는 이온들이 전극에 흡착하였고 전극의 흡착용량이 포화상태에 도달하자마자 아직 제거되지 못한 이온들이 유입수에 많이 존재하기 때문에 유입수의 순환으로 이온전도도가 서서히 증가하다가 일정하게 유지되었다고 설명할 수 있다. Spiral RMCDI 셀의 경우 이온들이 비교적 많이 제거되어 명확하게 관찰할 수 없어 일정 구간을 확대하여 Fig. 6에 나타내었다. Spiral RMCDI 셀에서 이온전도도는 전압이 공급되자마자 약 15 μ S/cm까지 급격하게 감소한 후 약 4 μ S/cm까지 완만하게 계속 감소하였고 MCDI와 spacer RMCDI 셀과 다르게 이온전도도의 증감 현상은 관찰되지 않았다. 하지만 Fig. 4에 나타난 spiral RMCDI 셀의 경우 초기 5 사이클까지 이온전도도의 증감 현상이 관찰되었고 사이클이 반복됨에 따라 그 현상이 사라졌다. 또한 spacer RMCDI 셀의 이온전도도 변화에서는 사이클이 반복됨에 따라 이온전도도의 증감 현상이 미미하게 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 따라

서 유로에 채워진 이온교환수지로 인해 용액 내 존재하는 이온들이 제거되었고 제거된 염의 양이 많을수록 이온전도도가 증감 현상을 감소시켰다고 판단되었다. 탈착단계가 진행되기 직전에 측정되는 유출수의 이온전도도는 유입수 탱크에서 측정된 염 농도와 유사하다. 따라서 MCDI, spacer RMCDI와 spiral RMCDI 셀의 유입수 탱크에서 측정된 용액의 염 농도는 각각 3289, 798, 2 ppm으로 산출되었다. Spiral RMCDI 셀을 이용하여 탈염 시 가장 많은 염이 제거되었다. 축전식 탈염기술에서 고농도의 염 용액을 처리하기 위해 적용이 가능한 기술이 될 것으로 판단된다.

Fig. 7은 Fig. 5의 결과를 이용하여 시간에 따른 염 제거효율을 나타낸 결과이다. Fig. 5에서 언급했던 것과 같이 이온전도도의 증감 현상을 제외하고 일정해지는 구간에서 MCDI, spacer RMCDI와 spiral RMCDI의 최대 염 제거효율은 각각 6.04, 77.21, 99.94%였다. Spiral RMCDI 셀로 운전하였을 때 거의 모든 염이 제거되었고 이온교환수지가 채워진 spiral 형태의 유로가 spacer 형태의 유로보다 많은 이온들을 제거하는데 기인한 것으로 판단된다. 하지만 RMCDI 기술을 이용함

으로써 많은 양의 이온들이 탈염되었지만 이는 유로에 채워진 이온교환수지에 탈염된 것으로 별도의 이온교환수지의 재생이 요구되며 이 기술을 상업적으로 도입할 경우 재생과정에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

본 연구에서 사용한 TRILITE SM210 혼합수지는 H⁺와 OH⁻ form으로 구성되어 있어 이온들의 흡착과정에서 나타난 유출수의 pH 변화를 관찰하기 위해 시간에 따른 pH 변화를 Fig. 8에 나타내었다. Spacer RMCDI와 spiral RMCDI 셀에서 나온 유출수의 pH는 주로 산성 영역에 해당되고 각각 pH 4~5, pH 2~3으로 ±0.5의 편차를 나타내었다. 일반적으로 전극에 전압을 공급하였을 때 전극과 용액사이의 계면에서 전하의 이동은 페러데이 반응과 비페러데이 반응으로 구분된다. 축전식 탈염기술에서는 이온들을 전극 표면에 흡착시키기 위해 전하가 이동하는 비페러데이 반응이 지배적이지만 일부 전하는 용액에 녹아있는 화학종의 산화, 환원반응에 기여를 하는 페러데이 반응도 발생한다. 이러한 화학종의 산화, 환원 반응은 주로 용존산소와 탄소전극과 같은 요소에 의해 물과 반응하여 발생하고 이 과정에서 H⁺ 및 OH⁻ 이온들을 생성한다. 비페러데이 반응을 기반으로 하는 축전식 탈염기술에서 페러데이 반응에 의한 에너지 소모는 탈염성능을 저하시킨다.^{6,19-21)} 따라서 pH는 축전식 탈염 공정에서 성능을 저하시키는 페러데이 반응의 여부를 확인할 수 있는 중요한 지표로 활용된다.⁴⁾ 하지만 일반적으로 MCDI 셀은 이온교환막을 전극 앞부분에 배치함으로써 유입수의 용존산소에 의한 영향은 차단되어 pH 변화의 폭이 감소한다. 결론적으로 두 셀에서 유출수의 pH 변화의 폭이 작게 나타났기 때문에 페러데이 반응에 의한 탈염성능이 크게 감소되지 않았을 것으로 판단되었다. 또한 두 셀에서 유출수의 pH가 산성으로 나타난 것은 혼합수지의 혼합비율에 대한 영향에 의한 것으로 판단되었고 pH가 중성으로 나타나는 혼합비율에 대한 추가적인 연구를 진행하여 안정

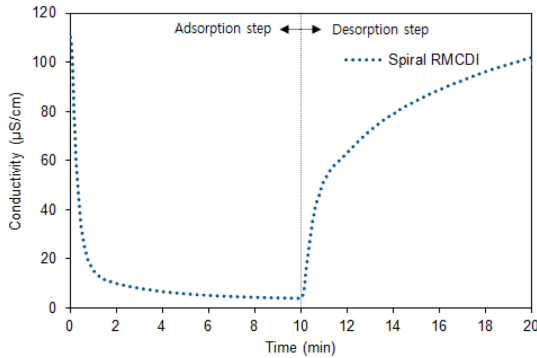


Fig. 6. Change of effluent conductivity in the operation of the spiral RMCDI cell.

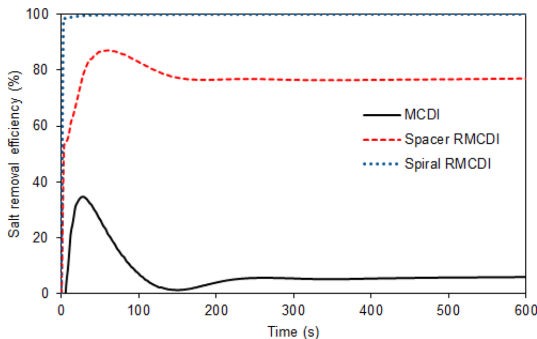


Fig. 7. Change of the salt removal efficiency in the adsorption process of the three CDI cells.

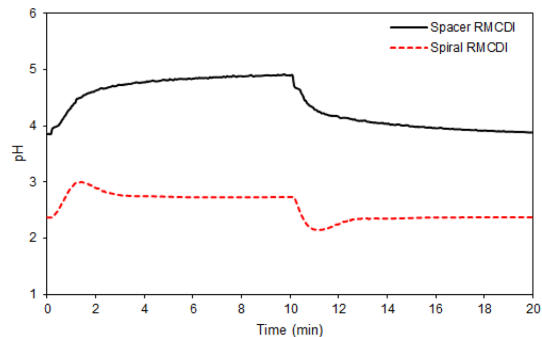


Fig. 8. Change of effluent pH in the operation of the RMCDI cell.

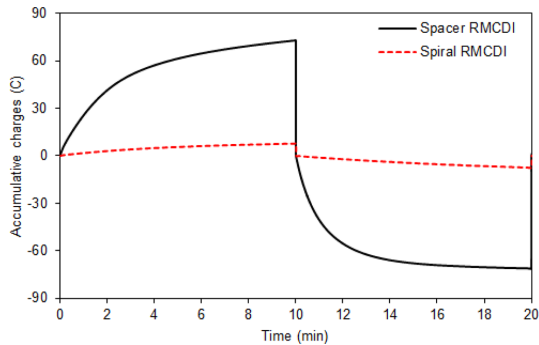


Fig. 9. Change of accumulative charges in the operation of the RMCDI cell.

적인 유출수로 확보해야 할 것으로 판단하였다.

페레데이 반응에 대한 추가적인 확인을 위하여 전극에서 측정된 축적 전하량을 Fig. 9에 나타내었다. Spacer RMCDI와 spiral RMCDI의 셀에서 시간에 따른 축적 전하량을 살펴보았을 때 spacer RMCDI 셀의 축적 전하량이 spiral RMCDI 셀보다 더 높게 나왔다. 이는 Fig. 5에서 언급했던 것과 같이 spiral RMCDI 셀로 탈염실험을 진행하였을 때 대부분의 이온들이 유로 안에 채워진 이온교환수지에 의해 제거되었고, 전극에 흡착된 이온들이 극히 적기 때문에 축적된 전하량이 spacer RMCDI보다 더 적게 나타난 것이다. 또한 흡착구간과 탈착구간에서 나타난 최대 축적 전하량을 이용하여 페레데이 반응의 여부를 관찰하였다. 이를 더 정량적으로 비교하기 위해 흡착구간에서의 최대 축적 전하량과 탈착구간에서의 최대 축적 전하량을 이용하여 전하효율을 산출하였고 spacer RMCDI과 spiral RMCDI 셀에서 각각 16.3, 1.3%의 전하효율을 나타내었다. 따라서 spacer와 spiral 형태의 유로모양에 이온교환수지를 채운 RMCDI 셀은 MCDI 셀보다 대다수의 염이 이온교환수지를 통해 제거되어 고농도의 염 용액을 탈염하기 위해 높은 탈염성능을 나타내며 이중 spiral RMCDI 셀이 가장 우수한 탈염성능을 나타내었다. 이러한 연구결과는 고농도의 염 용액을 처리하는데 단점이 있던 축전식 탈염기술의 한계를 극복하는 가능성을 제시하였고, 이온교환수지에 흡착된 염을 탈염할 수 있는 추가적인 연구를 진행함으로써 연속식 전기탈이온 기술^{22,23)}을 기반으로 이온교환수지의 재생 과정이 별도로 요구되지 않는 연속적인 축전식 탈염 기술을 개발하는데 중요한 기초가 될 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 축전식 탈염 기술에서 스페이서가 위치하는 자리에 이온교환수지를 채운 두 가지 모양의

유로를 배치함으로써 고농도의 염을 함유한 용액을 처리할 수 있는 가능성을 평가하였고 유로 모양에 따른 탈염성능을 비교분석하였다. Spacer와 spiral 형태의 두 가지 유로 모양에 이온교환수지를 채움으로써 RMCDI 셀을 구성하였고 3500 ppm의 고농도 염 용액을 시료로 하여 MCDI 셀과 탈염성능을 비교분석하였다. RMCDI 셀 중 spiral 형태의 유로 모양을 갖춘 RMCDI 셀에서 유입수의 농도가 3500 ppm에서 2 ppm으로 감소하였고 탈염성능을 감소시키는 페레데이 반응 없이 99.94%의 제거효율로 가장 많은 이온들이 제거되었다. 하지만 대부분의 이온들은 이온교환수지에 의해 제거되었고 이온교환수지의 재생이 별도로 요구되었다. 기존의 탈염기술인 연속식 전기탈이온 기술을 기반으로 추가적인 연구가 진행된다면 별도의 이온교환수지의 재생과정 없이 연속적인 축전식 탈염 공정이 가능할 것으로 판단되었다. 결론적으로 본 연구에서는 유로에 이온교환수지를 채워 축전식 탈염 셀을 구성함으로써 고농도의 염 용액의 탈염에 대한 가능성을 제시해주었고 적용 가능한 염 농도의 한계점을 극복하고 추가적인 연구를 통해 미래에 이상적인 탈염 기술로 도입하는데 기인할 것으로 보인다.

감사의 글

본 논문은 상명대학교 2013학년도 교내연구비에 의하여 수행되었습니다.

Reference

1. Y. Oren, "Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment - past, present and future (a review)", *Desalination*, **228**, 10 (2008).
2. M. A. Anderson, A. L. Cudero, J. Palma, "Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: will it compete?", *Electrochim. Acta*, **55**, 3845 (2010).
3. B.-R. Lee, I.-J. Jeong, S.-G. Park, "Effects of N & P Treatment Based on Liquid Organic Materials for Capacitive Deionization(CDI)", *J. Korean Electrochem. Soc.*, **16**, 124 (2013).
4. J.-H. Choi, "Determination of the electrode potential causing Faradaic reactions in membrane capacitive deionization", *Desalination*, **347**, 224 (2014).
5. J.-W. Lee, H.-I. Kim, H.-J. Kim, H.-S. Shin, J.-S. Kim, B.-I. Jeong, S.-G. Park, "Desalination Effects of Capacitive Deionization Process Using Activated Carbon Composite Electrodes", *J. Korean Electrochem. Soc.*, **12**, 287 (2009).
6. S. Porada, R. Zhao, A. van der Wal, V. presser, P. M. Biesheuvel, "Review on the science and technology of

- water desalination by capacitive deionization”, *Prog. Mater. Sci.*, **58**, 1388 (2013).
7. J.-Y. Lee, S.-J. Seo, J.-W. Park, S.-H. Moon, “A Study on the Cell Structure for Capacitive Deionization System”, *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**, 791 (2010).
 8. R. Zhao, O. Satpradit, H. H. M. Rijnaarts, P. M. Biesheuvel, A. van der Wal, “Optimization of salt adsorption rate in membrane capacitive deionization”, *Water Res.*, **47**, 1941 (2013).
 9. H. Li, Y. Gao, L. Pan, Y. Zhang, Y. Chen, Z. Sun, “Electrosorptive desalination by carbon nanotubes and nanofibres electrodes and ion-exchange membranes”, *Water Res.*, **42**, 4923 (2008).
 10. B. Jia, L. Zou, “Graphene nanosheets reduced by a multistep process as high-performance electrode material for capacitive deionisation”, *Carbon*, **50**, 2315 (2012).
 11. J. C. Farmer, D. V. Fix, G. C. Mack, R. W. Pekala, J. F. Poco, “Capacitive Deionization of NaCl and NaNO₃ Solutions with Carbon Aerogel Electrodes”, *J. Electrochem. Soc.*, **143**, 159 (1996).
 12. Y.-J. Kim, J.-H. Kim, J.-H. Choi, “Selective removal of nitrate ions by controlling the applied current in membrane capacitive deionization (MCDI)” *J. Memb. Sci.*, **429**, 52 (2013).
 13. P. M. Biesheuvel, A. van der Wal, “Membrane capacitive deionization”, *J. Colloid Interface Sci.*, **360**, 239 (2011).
 14. Y.-J. Kim, J.-H. Choi, “Improvement of desalination efficiency in capacitive deionization using a carbon electrode coated with an ion-exchange polymer”, *Water Res.*, **44**, 990 (2010).
 15. K.-S. Kang, W.-K. Son, J.-H. Choi, N.-S. Park, T.-I. Kim, “Ion-Selective Capacitive Deionization Composite Electrode, and Method for Manufacturing a Module”, U.S. Patent No. EP 2487278, 1 (2012).
 16. D.-J. Lee, M.-S. Kang, S.-H. Lee, J.-S. Park, “Application of Capacitive Deionization for Desalination of Mining Water”, *J. Korean Electrochem. Soc.*, **17**, 37 (2014).
 17. J.-H. Yeo, J.-H. Choi, “Enhancement of nitrate removal from a solution of mixed nitrate, chloride and sulfate ions using a nitrate-selective carbon electrode”, *Desalination*, **320**, 10 (2013).
 18. S.-I. Jeon, H.-R. Park, J.-G. Yeo, S.-C. Yang, C.-H. Cho, M.-H. Han, D.-K. Kim, “Desalination via a new membrane capacitive deionization process utilizing flow-electrodes.” *Energy Environ. Sci.*, **6**, 1471 (2013).
 19. D. R. Merrill, M. Bikson, J. G. R. Jefferys, “Electrical stimulation of excitable tissue: design of efficacious and safe protocols”, *J. Neurosci. Methods*, **141**, 171 (2005).
 20. D.-J. Lee, J.-S. Park, “Mesoporous Carbon Electrodes for Capacitive Deionization”, *J. Korean Electrochem. Soc.*, **17**, 57 (2014).
 21. J.-Y. Choi, J.-H. Choi, “A carbon electrode fabricated using a poly(vinylidene fluoride) binder controlled the Faradaic reaction of carbon powder”, *J. Ind. Eng. Chem.*, **16**, 401 (2010).
 22. J.-W. Lee, K.-H. Yeon, J.-H. Song, S.-H. Moon, “Characterization of electroregeneration and determination of optimal current density in continuous electrodeionization”, *Desalination*, **207**, 276 (2007).
 23. J.-H. Song, K.-H. Yeon, S.-H. Moon, “Effect of current density on ionic transport and water dissociation phenomena in a continuous electrodeionization (CEDI)”, *J. Memb. Sci.*, **291**, 165 (2007).