

Nafion과 Aminated Polyphenylene Oxide (APPO)를 적용한 막 축전식 탈염 공정의 성능 연구

김 지 수 · 임 지 원[†]

한남대학교 화공신소재공학과

(2020년 10월 16일 접수, 2020년 10월 21일 수정, 2020년 10월 24일 채택)

Performance Study of Membrane Capacitive Deionization (MCDI) Cell Constructed with Nafion and Aminated Polyphenylene Oxide (APPO)

Ji Su Kim and Ji Won Rhim[†]

Department of Advanced Materials and Chemical Engineering, Hannam University, 1646 Yuseongdae-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34054, Korea

(Received October 16, 2020, Revised October 21, 2020, Accepted October 24, 2020)

요 약: 본 연구에서는 다공성 탄소 전극의 음극과 양극 표면에 각각 양이온교환고분자(Nafion)와 음이온교환고분자(aminated polyphenylene oxide, APPO)를 코팅하여 막 결합형 축전식 탈염(membrane capacitive deionization, MCDI) 공정에 적용하였다. 또한 위 공정의 성능을 탄소 전극만으로 구성된 축전식 탈염(capacitive deionization, CDI) 공정과 비교 평가해 보고 염 제거 효율이 최대로 나타나는 MCDI 공정의 최적 운전 조건을 탐색하고자 하였다. 염 제거 효율은 MCDI 공정이 CDI 공정에 비해 높게 나타났으며 Nafion과 APPO를 적용한 MCDI 공정에서 흡착 조건이 1.2 V, 3 min이고 탈착 조건이 -1.0 V, 1 min 일 때의 염 제거 효율이 82.1%로 최댓값을 보임을 확인했다.

Abstract: A membrane capacitive deionization (MCDI) cell is constructed by applying thin layer of a cation exchange membrane (Nafion) on cathode and an anion exchange membrane (aminated polyphenylene oxide, APPO) on anode. Compared to CDI cell without CEM and AEM coating, MCDI exhibits enhanced salt removal efficiency. When Nafion and APPO are used as CEM and AEM, optimized salt removal performance as high as 82.1% is observed when 1.2 V is applied for 3 min during absorption process and -1.0 V is applied for 1 min during desorption.

Keywords: membrane capacitive deionization, capacitive deionization, ion-exchange membrane, salt removal efficiency

1. 서 론

현재 전 세계의 40%에 해당하는 인구가 식수난을 겪고 있으며 해마다 갈수 문제가 심각해지고 있는 추세이다[1]. 따라서 새로운 물 공급원을 개발하는 것이 하나의 주요 과제가 되었다. 현재 해결책으로는 댐 건설, 지하수 개발, 해수담수화 등이 거론되고 있으나 댐 개발의 경우 환경적 문제 등에 의해 어려움을 겪고 있으며 지하수 개발은 지반침하 및 오염 등의 부작용을 초래할 수

있다는 문제점이 제기되었다[1,2]. 따라서 해수담수화 기술에 대한 지속적인 연구 수행에 귀추가 주목되고 있다. 현재 해수담수화 기술 현황으로는 증발법(distillation), 역삼투법(reverse osmosis), 냉동법(freezing process), 전기투석법(electric energy) 등의 방법이 있으며[3], 그중에서도 축전식 탈염(capacitive deionization, CDI) 공정은 낮은 전력을 사용해 경제적이며 운전이 간단하고 화학 물질의 첨가 없이도 전극 재생을 가능케 해 2차 오염물을 발생시키지 않는 친환경적 공정으로 각광받고 있다[4-7].

[†]Corresponding author(e-mail: jwrhim@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-7803-2959>)

CDI 공정은 전극에 전위를 인가하여 물속의 양이온을 음전극에, 음이온은 양전극에 흡착시켜 제거하는 기술로 전극 계면에 형성되는 전기 이중층에서의 흡착 반응으로 이온성 물질을 제거한다. 이온성 물질이 전극 표면에 포화 흡착하게 되면 전극을 단락 시키거나 역 전위를 인가하여 표면에 있던 물질들이 탈착되어 재사용이 가능하다. 그러나 이때 이온성 물질들이 완전히 탈착되지 않을 경우 전극은 불완전 재생되어 흡착 기능이 감소하게 되는 문제점이 발생한다[8-11]. 따라서 이러한 문제점을 보완하기 위해 이온교환막을 전극에 결합시키는 막 결합형 축전식 탈염(membrane capacitive deionization, MCDI) 기술이 개발되었다[12,13].

이온교환막을 적용한 MCDI 공정에서는 음전극에 양이온교환막을 사용해 양이온을 선택적으로 통과시키고 양전극에 음이온교환막을 사용해 음이온을 선택적으로 통과시킬 수 있다. 또한 이온교환막이 전극 재생 시 탈착된 이온들이 반대 전극으로 흡착되는 것을 막아주어 완벽한 재생을 통한 전극 효율 향상을 가능하게 해 CDI 공정의 단점을 보완할 수 있다[8,11-18]. 이를 토대로 Kim은 PVA/PVAm과 SPEEK를 적용한 MCDI cell을 이용해 CDI 공정에 비해 약 40% 향상된 염 제거 효율을 얻었다[18]. 또한 Choi 등은 양이온교환막만을 이용한 MCDI 공정으로 CDI 공정에 비해 약 10.4% 높은 37.8%의 염 제거 효율을 얻었다[14]. 이러한 연구 결과를 토대로 MCDI 공정의 염 제거 효율이 CDI 공정에 비해 높게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 MCDI 공정의 운전에서 흡착 전압과 흡착 시간 및 탈착 전압과 탈착 시간을 공정변수로 하여 이들 변수와 염 제거 효율 사이의 관계를 규명한 연구결과는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 공정을 본격적으로 상업화하기 위해서는 현재의 공정 설계와 운전 기술에 대한 자료를 보완하는 것이 필수적으로 거쳐야 할 절차가 되었다.

공정의 효율을 결정하는 데 있어 전극의 불완전 재생을 방지하고 표면의 이온성 물질들을 탈착하는 능력이 매우 중요하게 작용하게 되며, 이는 흡착 및 탈착 조건에 영향을 받는 요인이다. 따라서 본 연구에서는 흡착 전압과 흡착 시간, 탈착 전압과 탈착 시간이라는 각각의 변수와 공정의 염 제거 효율 간의 상관관계를 해석하고 최적의 실험 조건을 제시하였다. 탄소 전극의 음극 표면에 양이온교환막을 결합한 MCDI 공정과 CDI 공정을 0.5~1.4 V의 흡착 전압을 변수로 비교했고 음극에 양이온교환막을 사용한 MCDI 공정과 음극과 양극에 각

각 양이온교환막과 음이온교환막을 모두 사용한 MCDI 공정을 비교하기 위해 0.5~1.4 V의 흡착 전압, -1.0~3.0 V의 탈착 전압 및 흡착 시간과 탈착 시간을 변수로 실험을 진행하였다. 양이온교환고분자와 음이온교환고분자로는 각각 Nafion과 aminated polyphenylene oxide (APPO)를 사용하여 이온교환막을 구성했으며 모든 실험의 공급액으로 100 mg/L 농도의 NaCl 수용액을 10 mL/min의 유속으로 사용하였다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

실험에 사용된 전극은 297 μm 두께의 다공성 탄소층을 포함한 Purechem (Korea) 사의 다공성 탄소 전극 제품을 사용하였으며 해당 전극 표면에 이온교환고분자를 코팅하여 이온교환막으로 사용했다. 양이온교환고분자로 Nafion D-521는 Chemours의 제품을 사용하였고, 음이온교환고분자로 Siontech (Korea)의 aminated polyphenylene oxide (APPO)를 사용하였으며 각 이온교환고분자의 이온교환용량(IEC)은 Nafion D-521이 0.95~1.03 meq/g, APPO는 0.75 meq/g이다.

Sodium chloride (NaCl)는 Samchun Chemicals (Korea)의 제품을 사용하였으며 초순수는 Younglin Instrument (Korea)의 Water Purification System aqua MAXTM로 생산해 사용했다.

2.2. 주사 전자 현미경(scanning electron microscope, SEM)

코팅되지 않은 다공성 탄소 전극과 그 위에 양이온 및 음이온교환고분자를 코팅한 이온교환막의 표면 및 단면 분석을 위해 주사 전자 현미경(FE-SEM, Carl Zeiss SigmaHD, Germany)을 사용했다. 시료를 액체 질소에 담가 적정 크기로 잘라낸 뒤 진공 오븐에서 수분을 제거해 백금 코팅 후 촬영하였다.

2.3. 막 결합형 축전식 탈염 실험

MCDI 셀의 구조와 실험 공정을 도식화하여 다음 Figs. 1과 2에 나타내었다. 한 변의 길이가 16 cm인 정사각형의 아크릴판과 실리콘 소재의 gasket으로 셀을 구성했으며 양 끝에는 유입구를, 중앙에는 배출구를 두어 공급액과 배출수가 이동할 수 있게 하였다. 탄소 전극과 이온교환막은 유효 면적이 100 cm^2 이 되도록 정육각형 모

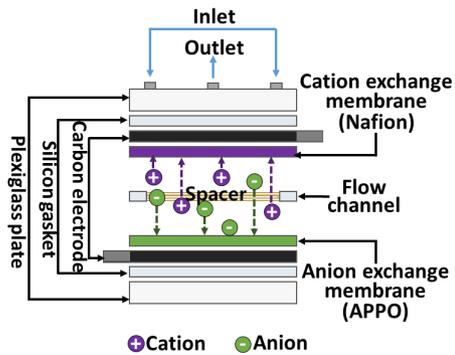


Fig. 1. Schematic diagram of MCDI cell configuration.

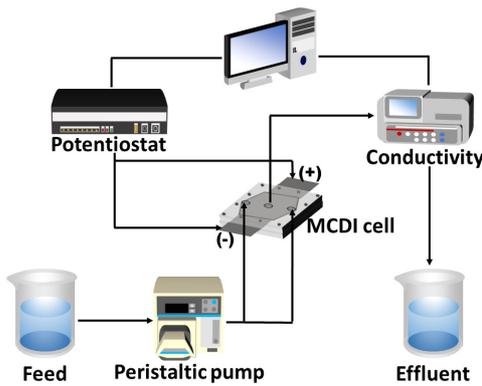


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

양으로 잘라 사용했으며 두 전극 사이에는 nylon 소재의 spacer를 두어 분리하였다. 전극에 전위를 인가해 주기 위해 Potentiostat (WPG 100, WonATech Co., Korea)을 사용하였으며 peristaltic pump (model 7519-05, Masterflex, German)를 이용해 공급액을 일정 유량으로 공급한 뒤 TDS meter를 사용해 배출수의 total dissolved solid (TDS)를 2초마다 측정된 데이터를 얻었다. 유속 10 mL/min의 100 mg/L NaCl 수용액을 공급액으로 흡착 전압 및 흡착 시간, 탈착 전압 및 탈착 시간을 달리해 가며 코팅되지 않은 다공성 탄소 전극과 이온교환막에서의 염 제거 효율(salt removal efficiency, η)을 다음의 식으로부터 계산하였다.

$$\eta(\%) = \left(1 - \frac{C_{eff}}{C_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서 C_{eff} 와 C_0 는 각각 배출수의 최저 농도와 공급액의 초기 농도를 나타낸다.

3. 결과 및 토의

3.1. SEM 분석

코팅되지 않은 다공성 탄소 전극과 이온교환고분자가 코팅된 탄소 전극의 표면 및 단면 분석을 위한 SEM 촬영 결과를 다음 Fig. 3에 나타내었다. 표면과 단면 모두 2.00 K 배율에서 관찰하였다. 코팅되지 않은 탄소 전극의 표면은 활성탄 입자로 인해 매끄럽지 못한 반면 이온교환고분자를 코팅한 탄소 전극은 고른 표면을 갖는 것을 볼 수 있으며 코팅된 양이온교환고분자와 음이온교환고분자의 두께는 각각 5.974와 11.39 μm 임을 확인할 수 있었다.

3.2. 흡착 전압 변경에 따른 CDI 공정과 양이온교환막을 결합한 MCDI 공정의 성능 비교

이온교환고분자의 유무가 염 제거 효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 코팅되지 않은 다공성 탄소 전극으로 구성된 CDI cell과 음전극 위에 양이온교환고분자를 코팅해 만든 양이온교환막으로 구성된 MCDI cell을 같은 조건 하에 실험하여 그 결과를 비교해보았다. 실험 조건으로는 NaCl 수용액의 유속을 10 mL/min, 농도를 100 mg/L로 하여 탈착 조건을 -1.0 V, 1 min으로, 흡착 시간을 3 min으로 고정했으며 흡착 전압을 0.5, 1.0, 1.4 V로 바꾸어 가며 3 h 동안 실험을 진행했다. 실험을 통해 얻은 배출수의 농도 그래프를 Fig. 4에 나타내었다. 또한 각 공정의 염 제거 효율을 Table 1에 나타내 비교하였다.

다공성 탄소 전극만을 사용한 CDI 공정에서 흡착 전압이 0.5, 1.0, 1.4 V로 점차 커질수록 탄소 전극의 염 제거 효율은 19.2, 43.2, 46.8%로 증가하였고, 탄소 전극의 음극 표면에 양이온교환막을 결합한 MCDI 공정 역시 21.7, 46.3, 51.8%로 흡착 전압이 커질수록 염 제거 효율 또한 증가하는 양상을 확인할 수 있었다. 또한 위 결과를 통해 같은 조건에서 양이온교환막을 사용한 MCDI 공정의 염 제거 효율이 코팅되지 않은 다공성 탄소 전극으로 구성된 CDI 공정에 비해 2.5~5.0% 가량 더 높은 것을 볼 수 있었다.

CDI 및 MCDI 공정의 구동력은 인가된 전위에 의한 전기적인 인력으로, 전극에 전위가 인가되면 전기 이중층에서 흡착 반응이 일어나게 된다. 이때 흡착 전압이 증가할수록 전극에 흡착되는 이온들의 양이 증가해 배

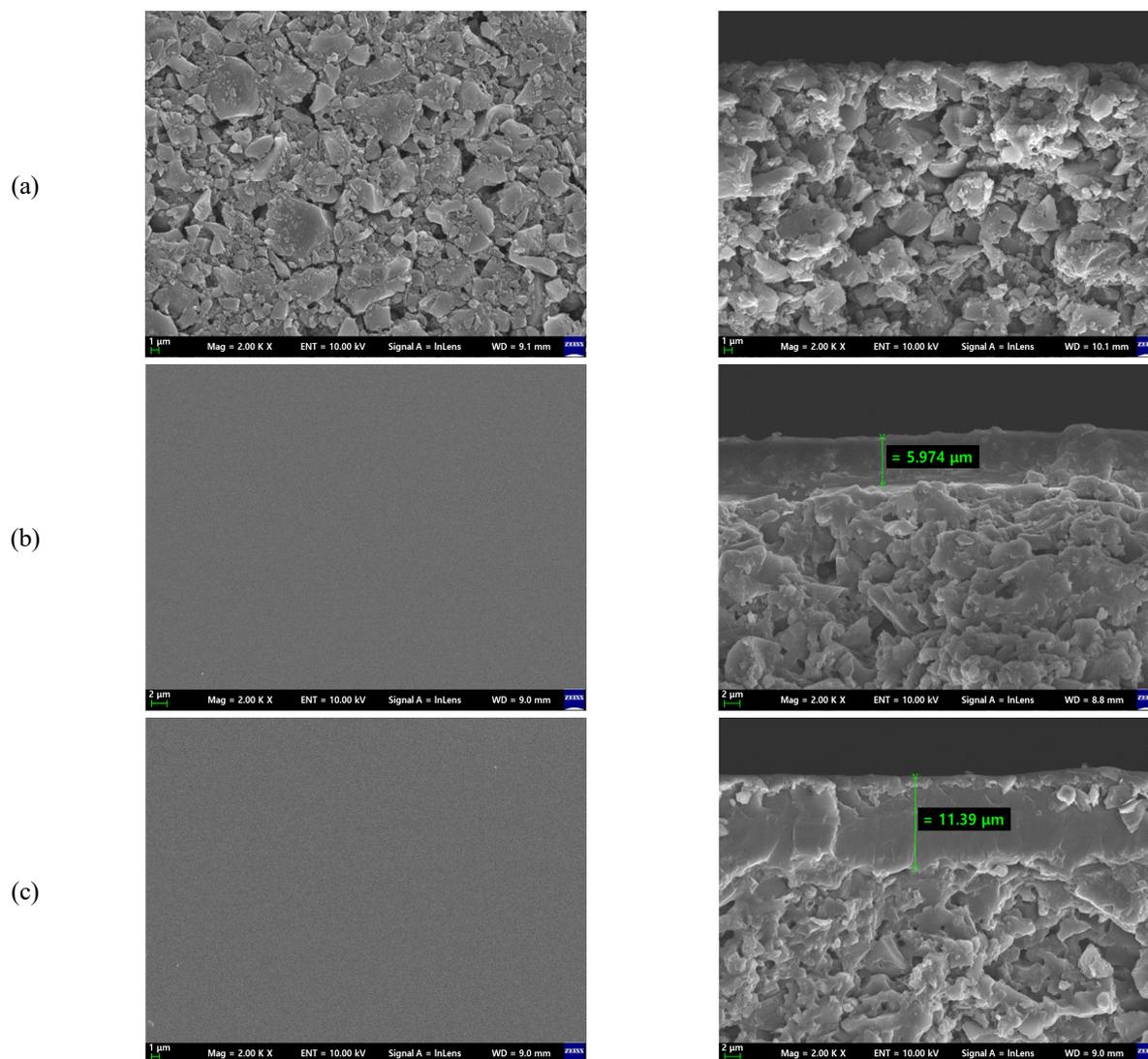


Fig. 3. SEM images of surface (left) and cross-section (right) of (a) carbon electrode, (b) Nafion coated electrode, (c) APPO coated electrode.

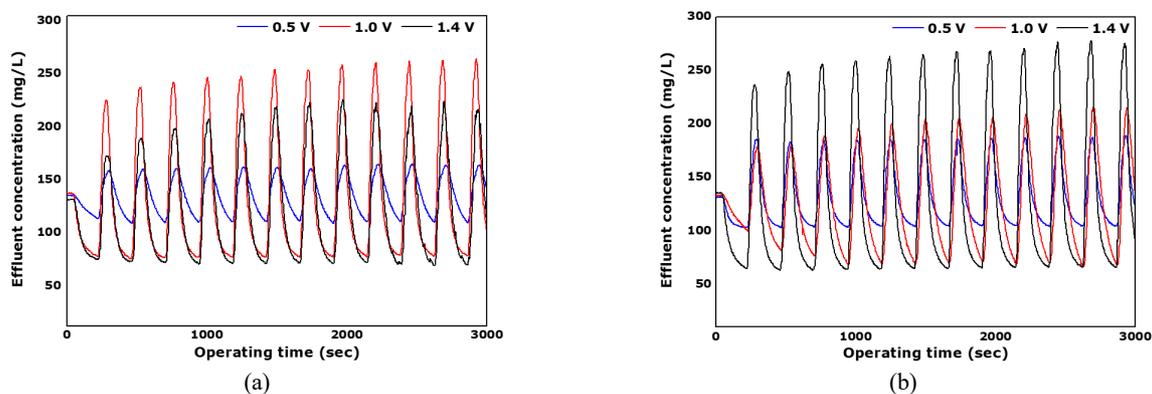


Fig. 4. Effect of adsorption voltages on effluent concentration at the adsorption 0.5, 1.0, 1.4 V/3 min and desorption -1.0 V/1 min; (a) CDI, (b) MCDI with cation exchange membrane.

Table 1. Effect of Adsorption Voltages on Salt Removal Efficiency at the Adsorption 3 min and Desorption -1.0 V/1 min for CDI and MCDI with Cation Exchange Membrane

Adsorption voltage (V)	Salt removal efficiency (%)	
	CDI	MCDI
0.5	19.2	21.7
1.0	43.2	46.3
1.4	46.8	51.8

출수의 농도가 낮아져 염 제거 효율을 향상시키게 된다. 또한 CDI 공정에서는 전극 표면에 이온성 물질을 포화 흡착시킨 뒤 역 전위가 가해지면 전극에 흡착된 이온이 탈착되어 벌크 용액으로 이동하는 동시에 반대 이온이 용액에서 전극으로 이동하게 된다. 이러한 현상은 이온성 물질들이 완전히 탈착되는 것을 방해하고 전극의 불완전 재생을 야기하여 공정이 반복됨에 따라 흡착 기능을 저하시킴으로써 에너지 소비량을 증가시키고 작동 효율을 저하하는 원인이 된다. 반면 MCDI 공정은 이온교환막이 전극 재생 시 탈착된 이온들이 반대 전극으로 흡착되는 것을 방지하여 염 제거 효율을 높인다.

따라서 MCDI 공정과 CDI 공정을 운전함에 있어 물 분해가 일어나지 않는 1.5 V 미만의 전압 조건 하에 흡착 전압이 증가할수록 전극에 더 많은 양의 이온을 흡착시켜 염 제거 효율이 높게 나타날 것이며 MCDI 공정에서의 염 제거 효율이 CDI 공정에 비해 높게 나타날 것으로 예측하였고, 결과 또한 이와 같이 나타났다.

3.3. 탈착 전압 변경에 따른 양이온교환막을 결합한 MCDI 공정의 성능 평가

음전극 위에 양이온교환고분자를 코팅해 만든 양이온교환막으로 MCDI cell을 구성하여 NaCl 수용액의 유속을 10 mL/min, 농도를 100 mg/L로, 탈착 시간을 1 min로 고정 후 탈착 전압을 -1.0, -2.0, -3.0 V로 바꾸어 가며 3 h 동안 실험을 진행했다. 이때 흡착 조건은 앞선 실험에서 가장 높은 51.8%의 효율을 보여주었던 1.4 V, 3 min로 고정하였다. 실험을 통해 얻은 배출수의 농도 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. 또한 공정의 염 제거 효율을 Table 2에 나타내었다. 전극 표면의 이온성 물질들이 제대로 탈착되지 않을 경우 전극의 불완전 재생이 야기되고 공정의 작동 효율이 저하된다. 따라서 탈착 전압이 증가할수록 전극에 포화 흡착된 이온들을 효과

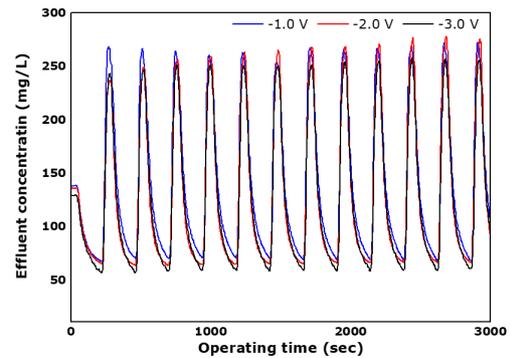


Fig. 5. Effect of desorption voltages on effluent concentration at the desorption 1 min and adsorption 1.4 V/3 min for MCDI with cation exchange membrane; -1.0, -2.0, -3.0 V.

Table 2. Effect of Desorption Voltages on Salt Removal Efficiency at the Desorption 1 min and Adsorption 1.4 V/3 min for MCDI with Cation Exchange Membrane

Desorption voltage (V)	Salt removal efficiency (%)
-1.0	51.8
-2.0	52.6
-3.0	54.0

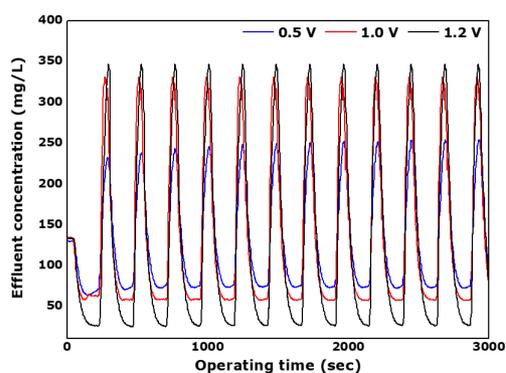
적으로 제거할 수 있게 되어 전극의 불완전 재생을 방지해 염 제거 효율을 높일 수 있을 것으로 예상하였고 실험 결과 탈착 전압이 -1.0 V에서 -3.0 V로 증가될수록 염 제거 효율이 51.8%에서 52.6%를 거쳐 54.0%로 소폭 증가함을 확인하였다. 탈착 전압 -3.0 V에서 탈착 시간의 변경에 대해서는 염 제거 효율의 큰 변화를 관찰할 수 없었고, 탈착 시간의 증가는 염 제거 효율에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단하였다. 따라서 다음 실험에 대해서는 -3.0 V의 탈착 전압에 대하여 시간을 1 min으로 고정하여 진행하였다.

3.4. 흡착 전압 및 흡착 시간 변경에 따른 MCDI 공정의 성능 평가

이번에는 탄소 전극의 음극과 양극 표면에 각각 양이온교환고분자와 음이온교환고분자를 코팅해 양이온교환막과 음이온교환막을 모두 사용한 MCDI cell을 구성하여 NaCl 수용액의 유속을 10 mL/min, 농도를 100 mg/L로 하여 탈착 조건을 -1.0 V, 1 min로 고정해 흡착 전압과 시간만을 변경하여 염 제거 효율을 산정하고자 하였다. 흡착 조건은 3 min의 흡착 시간에서 0.5, 1.0, 1.2

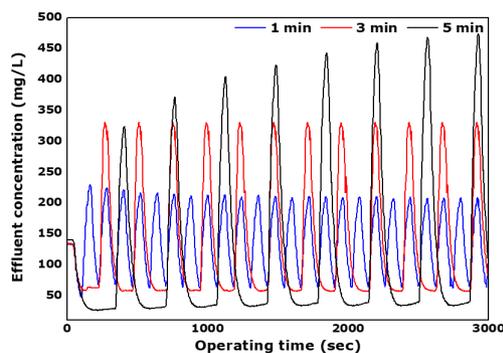
Table 3. Effect of Adsorption Voltages and Adsorption Time on Salt Removal Efficiency at the Desorption -1.0 V/1 min for MCDI with Cation and Anion Exchange Membrane

Adsorption voltage (V)	Adsorption time (min)	Salt removal efficiency (%)
0.5	3	44.4
	1	50.5
1.0	3	57.1
	5	75.5
1.2	3	82.1

**Fig. 6.** Effect of adsorption voltages on effluent concentration at the adsorption 3 min and desorption -1.0 V/1 min for MCDI with cation and anion exchange membrane; 0.5, 1.0, 1.2 V.

V로 흡착 전압을 바꾸어 가며 흡착 전압이 결과에 미치는 영향을 알아보려고 하였고, 흡착 전압 1.0 V에서 흡착 시간을 1, 3, 5 min으로 바꾸어 가며 흡착 시간이 결과에 미치는 영향을 알아보려고 했다. 흡착 전압 변경과 흡착 시간 변경에 따른 배출수의 농도 그래프를 Figs. 6과 7에 각각 나타내었다. 또한 공정의 염 제거 효율을 Table 3에 나타내었다.

실험 결과 흡착 전압이 0.5 V에서 1.2 V로 증가됨에 따라 염 제거 효율도 44.4, 57.1, 82.1%로 점차 증가함을 확인할 수 있었으며 특히 1.2 V에서는 82.1%라는 높은 효율을 얻을 수 있었다. 1.0 V의 흡착 전압에서 흡착 시간을 증가시킬수록 효율이 50.5, 57.1, 75.5%로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 흡착 전압이 증가하게 되면 전극에 흡착되는 이온들의 양이 증가하게 되어 배출수의 농도가 낮아지게 되며 흡착 시간이 증가함에 따라 이온들을 보다 오랜 시간 동안 전극에 흡착시킬 수 있게 된다. 따라서 흡착 전압과 시간이 증가

**Fig. 7.** Effect of adsorption times on effluent concentration at the adsorption 1.0 V and desorption -1.0 V/1 min for MCDI with cation and anion exchange membrane; 1, 3, 5 min.

할수록 전극에 많은 양의 이온을 흡착시킨 뒤 오랫동안 붙잡을 수 있게 되어 염 제거 효율이 증가하게 되는 것이다. 실험을 통해 1.2 V의 흡착 전압에서 82.1%로 가장 높은 염 제거 효율을 확인하였으나 1.0 V, 5 min의 조건에서 75.5%의 비교적 높은 효율을 얻은 점으로 미루어 볼 때 1.2 V에 비해 낮은 전압인 1.0 V 조건에서 실험을 진행하는 것도 공정을 보다 경제적으로 운전하는 하나의 방법이 될 것이다. 따라서 다음 실험에서는 공정의 경제성을 고려하여 흡착 전압을 1.0 V로 고정하였다.

3.5. 탈착 전압 변경에 따른 MCDI 공정의 성능 평가

탄소 전극의 음극과 양극 표면에 각각 양이온교환고분자와 음이온교환고분자를 코팅해 양이온교환막과 음이온교환막을 모두 사용한 MCDI cell을 구성하여 NaCl 수용액의 유속을 10 mL/min, 농도를 100 mg/L로 하였다. 앞선 실험에서 1.2 V의 흡착 전압에서 가장 높은 효율을 보여주었지만 이번에는 공정 운전의 경제성을 고려해 조금 더 낮은 전압으로 보다 경제적 운전이 가능한 조건을 탐색했다. 따라서 1.0 V, 3 min으로 흡착 조건을 고정한 뒤 1 min의 탈착 시간 하에 탈착 전압을 -1.0, -2.0, -3.0 V로 바꾸어 가며 탈착 전압이 염 제거 효율에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 결과에 따른 배출수의 농도 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 또한 공정의 염 제거 효율을 Table 4에 나타내었다.

전극 표면의 이온성 물질들이 제대로 탈착되지 않을 경우 전극의 불완전 재생으로 이어져 공정의 작동 효율이 저하되는 문제가 발생한다. 이는 탈착 전압을 증가시

Table 4. Effect of Desorption Voltages on Salt Removal Efficiency at the Desorption 1 min and Adsorption 1.0 V/3 min for MCDI with Cation and Anion Exchange Membrane

Desorption voltage (V)	Salt removal efficiency (%)
-1.0	57.1
-2.0	63.5
-3.0	70.1

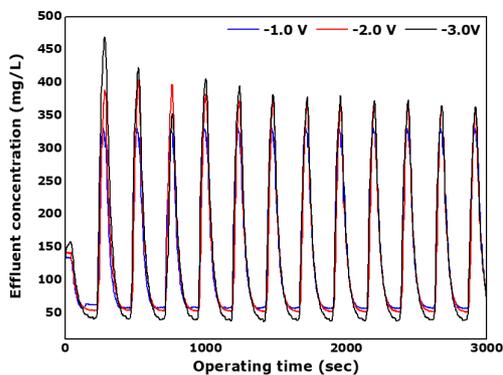


Fig. 8. Effect of desorption voltages on effluent concentration at the desorption 1 min and adsorption 1.0 V/3 min for MCDI with cation and anion exchange membrane; -1.0, -2.0, -3.0 V.

킬수록 전극에 포화 흡착된 이온들을 더욱 효과적으로 제거할 수 있게 되어 결과적으로 전극의 불완전 재생을 방지하는 방법으로 해결할 수 있다. 탈착 전압이 -1.0 V에서 -3.0 V로 증가할수록 전극에 포화 흡착된 이온들을 효과적으로 제거할 수 있게 된다. 탈착 전압이 -1.0 V에서 -3.0 V로 증가함에 따라 염 제거 효율 역시 57.1, 63.5, 70.1%로 점차 증가함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

코팅되지 않은 다공성 탄소 전극만으로 구성된 CDI cell과 표면에 이온교환고분자를 코팅한 탄소 전극, 즉 이온교환막으로 구성된 MCDI cell로 각 공정을 비교 분석하여 그 차이를 알아보고 MCDI 공정에 있어서 최적의 염 제거 조건에 대해 알아보았다. 유속 10 mL/min의 100 mg/L NaCl 수용액을 공급액으로 하였으며 Nafion과 APPO를 탄소전극 표면에 코팅하여 각각 MCDI의 양이온교환막과 음이온교환막으로 사용하였다.

흡착 전압을 공정변수로 하여 CDI와 양이온교환막을

결합한 MCDI 공정에서 염 제거 효율을 비교한 결과 각 공정의 최대 염 제거 효율은 CDI의 경우 46.8%, MCDI의 경우 51.8%로 MCDI 공정에서의 효율이 좀 더 높은 것을 확인할 수 있었다. CDI와 MCDI 공정은 전극에 전위가 인가됨에 따라 전기 이중층에서 일어나는 흡착 반응에 의해 이온성 물질을 전극 표면에 붙잡을 수 있게 되며 물 분해가 일어나지 않는 1.5 V 미만의 흡착 전압에서 전압이 증가할수록 전극에 더 많은 양의 이온을 흡착시켜 배출수의 농도를 낮춰 염 제거 효율을 향상시킬 수 있다. CDI 공정에서는 전극 표면에 이온성 물질을 포화 흡착시킨 뒤 역 전위를 인가해 표면에 있던 물질들을 탈착하게 되는데 이 과정에서 탈착된 이온이 벌크 용액으로 이동하는 동시에 반대 이온은 전극 쪽으로 이동해 이온성 물질들이 완전히 탈착되지 않아 전극이 불완전 재생되는 반면 MCDI 공정은 이온교환막이 전극 재생 시 탈착된 이온들이 반대 전극으로 흡착되는 것을 방지하여 염 제거 효율을 높인다. 또한 두 공정 모두 흡착 전압이 증가함에 따라 염 제거 효율 역시 증가하는 경향으로 보아 흡착 전압이 증가될수록 NaCl feed 내의 이온들이 더 많이 흡착됨을 확인할 수 있었다.

양이온교환막으로 구성된 MCDI 공정에서 흡착 조건을 1.4 V, 3 min으로, 탈착 시간을 1 min으로 고정하고 탈착 전압을 공정변수로 하여 -1.0, -2.0, -3.0 V에서 실험을 진행했다. 전극 표면의 이온성 물질들이 제대로 탈착되지 않아 전극이 불완전 재생될 경우 공정의 작동 효율이 저하된다. 탈착 전압이 증가할수록 전극에 포화 흡착된 이온들을 효과적으로 제거할 수 있게 되어 결과적으로 탈착 전압이 증가함에 따라 염 제거 효율은 51.8%에서 52.6, 54%로 증가하였다. 탈착 전압 -3.0 V에서 탈착 시간의 변경에 대해서는 염 제거 효율에 큰 차이를 관찰할 수 없었다.

다음으로는 양이온교환막과 음이온교환막으로 구성된 MCDI 공정에서 탈착 조건을 -1.0 V, 1 min으로 고정하고 흡착 전압과 흡착 시간을 공정변수로 하여 실험을 진행한 결과 흡착 전압이 0.5, 1.0, 1.2 V로 증가함에 따라 염 제거 효율이 44.4, 57.1, 82.1%로 증가함을 확인했다. 흡착 시간 역시 1, 3, 5 min으로 증가할수록 염 제거 효율이 50.5, 57.1, 75.5%로 증가하였다. 흡착 전압과 시간이 증가할수록 보다 많은 양의 이온을 오랜 시간 동안 전극에 붙잡을 수 있어 염 제거 효율을 상승시키는 것이다.

흡착 조건을 1.0 V, 3 min으로, 탈착 시간을 1 min으

로 고정하고 탈착 전압을 공정변수로 하여 진행한 실험에서도 탈착 전압이 -1.0, -2.0, -3.0 V로 증가할수록 염 제거 효율이 57.1, 63.5, 70.1%로 증가하는 것을 볼 수 있었다.

또한 단일 이온교환막(양이온교환막) 만으로 구성된 MCDI 공정과 비교해 보았을 때, 양이온교환막과 음이온교환막을 같이 쓰는 편이 높은 염 제거 효율을 얻을 수 있었으며 흡착 조건 1.2 V, 3 min, 탈착 조건 -1.0 V, 1 min에서 82.1%라는 가장 높은 염 제거 효율을 얻을 수 있었다. 보다 경제적 조건에서 공정을 운전하고자 한다면 1.0 V의 흡착 전압에서 흡착 시간을 5 min 이상으로 운영하는 것도 하나의 방법이 될 것이다.

감 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임(과제번호: 2016002200001).

Reference

1. H. K. Park, “Seawater desalination: Possibility as an alternative water resource”, *KSCE J. Civ. Eng.*, **46**, 28 (1998).
2. M. P. Shim, “Water for future-conditions for survival in the 21st century”, *Water for Future*, **39**, 61 (2006).
3. E. O. Ko, J. D. Moon, and J. M. Park, “Status-of-arts of desalination technology”, *Membr. J.*, **20**, 185 (2010).
4. S. Porada, R. Zhao, A. van der Wal, V. Presser, and P. M. Biesheuvel, “Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization”, *Prog. Mater. Sci.*, **58**, 1388 (2013).
5. J. W. Lee, H. I. Kim, H. J. Kim, H. S. Shin, J. S. Kim, B. I. Jeong, and S. G. Park, “Desalination effects of capacitive deionization process using activated carbon composite electrodes”, *J. Korean Electrochem. Soc.*, **12**, 287 (2009).
6. J. A. Lim, N. S. Park, J. S. Park, and J. H. Choi, “Fabrication and characterization of a porous carbon electrode for desalination of brackish water”, *Desalination*, **238**, 37 (2009).
7. J. C. Farmer, D. V. Fix, G. V. Mack, R. W. Pekala, and J. F. Poco, “Capacitive deionization of NaCl and NaNO₃ solutions with carbon aerogel electrodes”, *J. Electrochem. Soc.*, **143**, 159 (1996).
8. W. K. Son, T. I. Kim, H. J. Han, and K. S. Kang, “The study of capacitive deionization technology by the analysis of patents and papers”, *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**, 697 (2011).
9. M. A. Anderson, A. L. Cudero, and J. Palma, “Effective modified carbon nanofibers as electrodes for capacitive deionization process”, *Electrochim. Acta*, **55**, 3845 (2010).
10. Y. S. Jeon and J. W. Rhim, “Performance study on application of higher adsorption voltages than water dissociation voltage in membrane capacitive deionization (MCDI) process”, *Polymer(Korea)*, **42**, 446 (2018).
11. J. S. Kim, C. S. Kim, H. S. Shin, and J. W. Rhim, “Application of synthesized anion and cation exchange polymers to membrane capacitive deionization (MCDI)”, *Macromol. Res.*, **23**, 360 (2015).
12. D. D. Caudle, J. H. Tucker, J. L. Cooper, B. B. Arnold, and A. Papastamataki, “Electrochemical demineralization of water with carbon electrodes”, Research Report, Oklahoma Univ. Research Institute (1966).
13. J. B. Lee, K. K. Park, H. M. Eum, and C. W. Lee, “Desalination of a thermal power plant wastewater by membrane capacitive deionization”, *Desalination*, **196**, 125 (2006).
14. Y. J. Kim and J. H. Choi, “Desalination of brackish water by capacitive deionization system combined with ion-exchange membrane”, *Appl. Chem. Eng.*, **21**, 87 (2010).
15. P. M. Biesheuvel and A. van der Wal, “Membrane capacitive deionization”, *J. Membr. Sci.*, **346**, 256 (2010).
16. W. S. Yun, S. I. Cheong, and J. W. Rhim, “Effect of ion exchange capacity on salt removal rate in membrane capacitive deionization process”, *Membr. J.*, **28**, 332 (2018).
17. H. Li and L. Zou, “Ion-exchange membrane ca-

- capacitive deionization: A new strategy for brackish water desalination”, *Desalination*, **275**, 62 (2011).
18. K. Y. Kim, “Study of membrane capacitive deionization process applied by ion exchange membrane”, Master’s thesis, Hannam Univ., Daejeon, Korea (2016).