

막 축전식 탈염 공정의 다단 적층 모듈을 통한 처리 용량 증대 및 이의 성능 연구

송 예 진 · 윤 원 섭 · 임 지 원[†]

한남대학교 화공신소재공학과
(2017년 10월 26일 접수, 2017년 10월 28일 수정, 2017년 10월 29일 채택)

Studies of Performance and Enlarged Capacity through Multi-stages Stacked Module in Membrane Capacitive Deionization Process

Yye jin Song, Won Seob Yun, and Ji Won Rhim[†]

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

(Received October 26, 2017, Revised October 28, 2017, Accepted October 29, 2017)

요 약: 본 연구에서는 막 결합형 축전식 탈염공정의 단위셀의 단수를 늘려 적층된 10단 형태의 모듈을 설계하여 제작하였다. 아민기가 함유된 폴리설폰(APSf)과 술폰기가 함유된 폴리이서이서케톤(SPEEK)을 합성하였으며 캐스팅법으로 다공성 탄소전극에 코팅하여 제조하였다. 10단 모듈에 대하여 흡착전압 및 시간, 탈착전압 및 시간, 공급액의 유속과 농도 등의 운전 조건과 CaSO₄, MgCl₂ 등의 2가 이온 용액과 수도수에 대하여 염 제거효율을 측정하였다. 대표적으로 NaCl 100 mg/L의 공급액을 사용하였을 때, 유속 100 mL/min, 흡착조건 1.2 V/3 min, 탈착조건 -0.5 V/5 min에서 98.3%의 염 제거효율을 보였다.

Abstract: In this study, the 10 stages stacked module was designed by increasing the number of unit cells in the membrane capacitive deionization(MCDI) process. The aminated polysulfone and sulfonated poly(ether ether ketone) were synthesized and coated on porous carbon electrode by casting method. The salt removal efficiency was measured for the 10 stage stacked module under the operation conditions of adsorption voltage and time, desorption voltage and time, flow rate and concentration of feed water, and di-valent solutions including CaSO₄, MgCl₂ and tap water. Typically, when 100 mg/L of NaCl as the feed was used, the salt removal efficiency was 98.3% at a flow rate of 100 mL/min, the adsorption condition of 1.2 V/3 min and desorption condition of -0.5 V/5 min.

Keywords: Salt removal efficiency, Aminated polysulfone, Sulfonated poly(ether ether ketone), membrane capacitive deionization (MCDI), Multi-stage stacked

1. 서 론

우리에게 소중한 자원인 물은 한정적인 자원임에도 불구하고 계속해서 오염되고 낭비되어왔다. 전 세계적으로 물 부족 위기에 처해있으며 물을 확보하기 위한 연구는 꾸준히 진행 중에 있다. 물을 얻기 위해 오염된 수자원을 처리하고, 지구상에 존재하는 수자원 중 대부분을 차지하는 해수를 이용하여 담수화하는 기술은 현재 물 시장의 대부분을 차지하고 있다. 이러한 수처리

공정 중 하나인 축전식 탈염공정(capacitive deionization; CDI)은 정전기적 인력을 이용해 수용액상에 있는 이온을 제거하는 기술이다. 이 공정은 에너지 소모량이 적으며 2차 오염물을 만들지 않기 때문에 친환경 공정으로 각광받고 있다[1-4]. 전극은 전기전도성이 우수한 탄소물질이 사용되고 각 전극에 전압을 걸어서 흡착 시 음극에는 양이온이, 양극에는 음이온이 흡착되도록 한다. 전극 표면에 이온들이 포화흡착 되면 더 이상 이온을 흡착할 수 없고, 전압을 단락하거나 역전위를

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

가하여 전극을 재생시킨다. 탈착과정을 통해 흡착되었던 이온들이 탈락되면서 재사용도 용이하다[5-7]. 하지만 CDI 공정은 탈착 시 이온들이 완전히 떨어지지 않아 효율을 감소시키는 문제점이 발생한다.

이러한 단점을 보완한 것이 전극에 이온을 선택적으로 통과시킬 수 있는 이온교환막을 결합한 형태인 막 결합형 축전식 탈염공정(Membrane capacitive deionization; MCDI)이다. MCDI는 축전식 탈염 기술에서의 전기이중층의 발생으로 인한 염 제거율 감소를 보완하고 전해질과 전극이 직접적으로 접촉되는 것을 방지하여 전극의 오염을 줄일 수 있다. 이온교환막은 생태적 안정성이 높고 화학물질을 생성하지 않으며, 선택적 분리가 가능하다[8].

이온교환막은 선택적 분리를 통해 양이온과 음이온을 분리하며, 높은 투과성과 선택성, 물리적 강도와 화학적 안정성 등의 조건을 만족시켜야 한다[9-12]. 음이온교환막 작용기로는 $-NH_3^+$, $-NRH^+$, $-NRH_2H^+$, $-NR_3^+$, $-PR_3^+$ 가 있고, 양이온교환막 작용기로는 $-SO_3^-$, $-COO^-$, $-PO_3^{2-}$ 가 있다. 작용기에 따라 MCDI의 선택성이 큰 영향을 받는다[13,14].

본 연구에서는 기존의 단위셀 형태의 막 축전식 탈염 공정을 처리 용량 증대를 위한 목적으로 단수를 늘려 10단 모듈의 형태로 설계하였다. 사용된 이온교환고분자로는 Polysulfone (PSf)에 아민기를 도입하여 음이온교환고분자를 제조하였고, poly(ether ether ketone) (PEEK)에 술폰기를 도입하여 양이온교환고분자를 제조하였다. 이것을 탄소전극에 직접 코팅한 후 5단과 10단 모듈에 적용하여 성능을 알아보았다. 먼저 5단 모듈에서 흡착시간, 공급액의 유속과 농도에 따라 실험을 진행하여 적용가능성을 확인하였고, 10단 모듈 형태로 흡착전압 및 시간, 탈착전압 및 시간, 공급수의 유속과 농도, 다가이온인 $CaSO_4$, $MgCl_2$, 수도수를 공급액으로 하여 10단 모듈에서 실험하였다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

본 실험에서는 음이온교환고분자 제조를 위해 polysulfone (PSf, Udel[®], P-3500, M.W. 66100)을 사용하였고, trimethylamine (TMA, Junsei)를 이용해 아민화 반응을 진행했다. Tin(II) chloride ($SnCl_2$, Junsei)를 촉매로 사용하였다. 양이온교환고분자 합성에는 sulfuric

acid (95%, Samchun)를 이용해 poly(ether ether ketone) (PEEK, Victrex[®], 450PF)의 설폰화 반응을 진행시켰다. 1,2-dichloroethane (DCE, Samchun), chloromethyl ethyl ether (CMEE, Kanto chemical), N,N-dimethylacetamide (DMAc, Junsei) 그리고 N-methyl-2-pyrrolidone (NMP, Junsei)은 용매로 사용하였다. 모든 시약과 용매는 정제 과정 없이 사용하였다. 다공성 탄소 전극은 Purechem Co.에서 구매하여 사용했으며 초순수는 younglin pure water system (Seoul, Korea)으로 생산하여 사용하였다.

2.2. 음이온교환고분자 합성

음이온교환고분자를 합성하기 위해 PSf를 아민화 하였다. PSf 20 g을 DCE에 8 wt%로 녹인 후 클로로메틸 화를 위해 $SnCl_2$ 를 고분자 대비 10 wt%로 천천히 넣는다. 40°C 중탕비커에서 고분자 몰 비 4배의 CMEE를 한 방울씩 천천히 넣어 반응시켰다. 4 h 후 메탄올에 세척하고 고화된 고분자를 70°C 오븐에서 12 h 이상 건조시켰다. 건조된 고분자는 DMAc에 8% 농도로 녹이고 TMA를 CMEE와 같은 몰 비로 천천히 넣어준 후 12 h 이상 충분히 교반시켰다.

2.3. 양이온교환고분자 합성

양이온교환고분자를 합성하기 위해 PEEK를 120°C 오븐에서 24 h 이상 건조시켰다. 삼각플라스크에 황산 774.74 g을 칭량하고, 35°C의 water bath에서 건조된 PEEK 20 g을 수분에 노출되지 않도록 주의하며 넣고 40 h 격렬하게 교반시켰다. PEEK의 반응을 종결시키기 위해 얼음이 담긴 초순수에 플라스크를 담가 놓았다. SPEEK를 고화시킨 후 세척수의 pH가 6이 될 때까지 초순수로 세척했다. 물기를 제거하고 130°C의 오븐에서 24 h 건조했다. 건조된 SPEEK는 NMP에 11%로 녹여 12 h 이상 충분히 교반하고 부유물이 있을 경우 한번 걸러서 사용했다.

2.4. 복합 탄소 전극 제조

제조한 음이온고분자 APSf와 양이온고분자 SPEEK를 탄소 전극에 캐스팅하여 사용하였다. 음이온고분자인 경우 캐스팅 후 80°C의 진공오븐에서 건조시키고 양이온고분자의 경우 캐스팅 후 120°C에서 건조시켰다. 실험에 사용되기 전에 전극을 초순수에 담가 보관하였다.

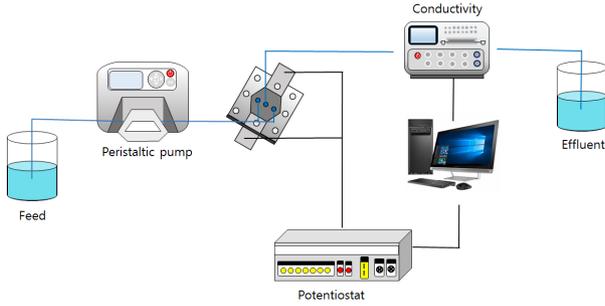


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

2.5. 이온 교환 용량(Ion Exchange capacity, IEC)
 이온교환막 특성 중에 이온 교환 용량은 적정방법을 통해 측정했다. 먼저 음이온교환막을 0.1 M NaCl 용액에 담가 Cl⁻기로 치환하고 막을 초순수로 세척했다. 그 후에 0.5 M Na₂CO₃에 담가 Cl⁻기를 CO₃²⁻로 치환하여 AgNO₃로 적정하였다. 음이온교환막의 이온교환용량은 다음 식 (1)로부터 계산하였다.

$$ICE = \frac{2 \times N_{AgNO_3} \times V_{AgNO_3}}{W_{dry}} \quad (1)$$

여기서 W_{dry}는 건조된 막의 무게, N은 AgNO₃의 농도이고, V는 AgNO₃의 적정 부피이다.

다음으로 양이온교환막을 0.1 mol/L HCl 용액에 24 h 이상 담가 H⁺형으로 바꾸고 초순수로 3회 이상 씻어 내어 남은 HCl을 제거한다. 다음으로 1 N NaOH 용액에 24 h 담가 H⁺형을 나트륨 양이온으로 치환한다. 이 용액을 지시약 페놀프탈레인과 0.1 mol NaCl 표준용액으로 적정했다. 양이온교환막의 이온교환용량은 다음 식 (2)로부터 계산하였다.

$$IEC = \frac{V_{NaOH} \times N_{NaOH} - V_{HCl} \times N_{HCl}}{W_{dry}} \quad (2)$$

여기서 W_{dry}는 건조된 막의 무게, V는 용액의 부피를 의미하고 N은 용액의 농도이다. 이와 같은 방법으로 5회 이상 반복하여 측정값을 평균으로 구하였다[15,16].

2.6. 막 결합형 축전식 탈염 실험

육각형 모양으로 각 단의 유효면적은 100 cm²이며, 5단 모듈의 경우 0.05 m²이고 10단은 0.1 m²의 유효면적을 갖는다. 실험 장치의 모식도와 모듈 내부의 구성도

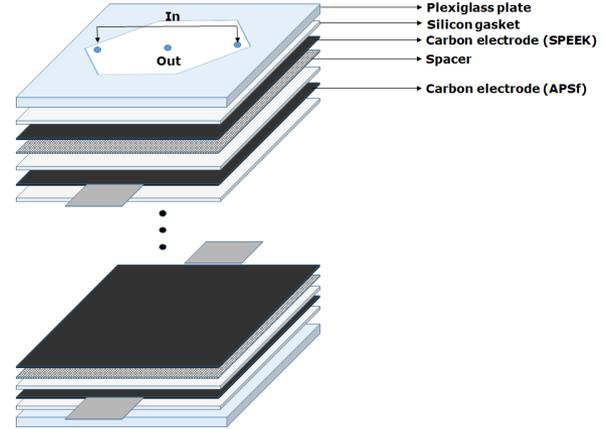


Fig. 2. MCDI cell configuration.

는 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 음이온교환고분자와 양이온교환고분자가 코팅된 두 개의 탄소전극 사이에 100 μm spacer를 넣고 실리콘을 이용해 유로를 만들어 plexiglass plate로 셀을 만들었다. 탄소전극의 정 중앙에 지름 1 cm의 구멍을 뚫어 물이 흐르게 하였고 육각형의 한 대각선 양 끝점에서 유입되어 정중앙의 배출구로 나가도록 하였다. Potentiostat (Wonatech, WPG-100)를 사용해 전압을 인가하여 흡착과 탈착을 진행했으며 L/S pump (Masterflex)를 이용해 일정한 유량의 공급액을 셀에 공급했다. 배출수는 TDS conductivity meter (iSTEK, EC-470L)를 배출구에 연결해 측정하였다. 염 제거율은 아래의 식 (3)을 이용하여 계산하였다.

$$\eta = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (3)$$

C₀는 유입수를 C_e는 배출수를 의미한다[17].

3. 결과 및 고찰

3.1. 이온교환용량

이온교환막 내부에 존재하는 작용기의 용량을 나타내는 것으로 막 결합형 축전식 탈염기술에서 염 제거효율의 영향을 끼치는 요인 중 하나이다. 실험에 사용된 이온교환고분자의 이온교환용량을 비교하였다. 음이온교환고분자 APSf의 이온교환용량은 2.01 meq/g이고, 양이온교환고분자 SPEEK의 이온교환용량은 2.64 meq/g으로 측정되었다.

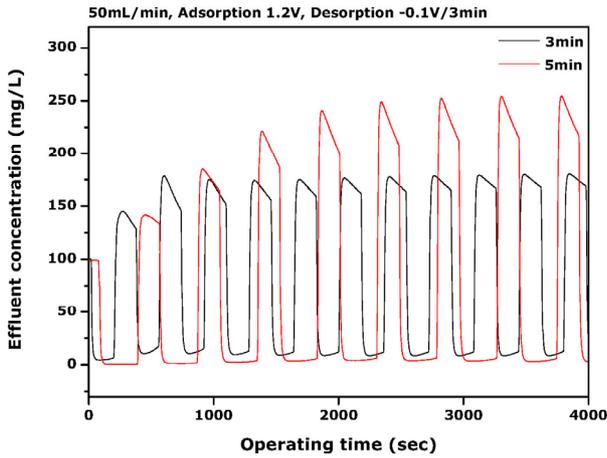


Fig. 3. Effluent concentration in accordance with adsorption time for 5 stage module.

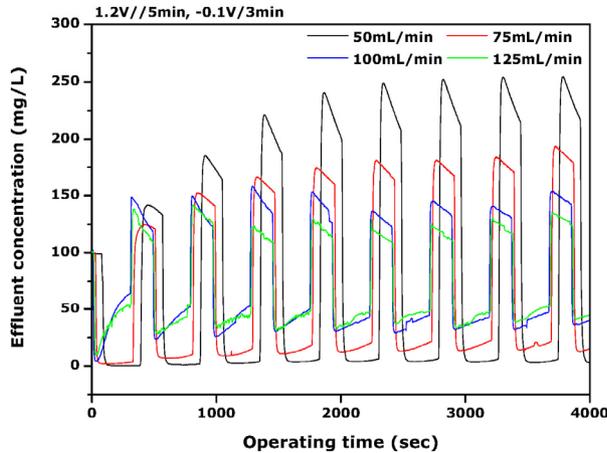


Fig. 4. Effluent concentration in accordance with flow rate of influent for 5 stage module.

3.2. 5단 모듈의 성능 비교

5단 모듈은 흡착시간, 공급액의 유속과 농도변화에 따라 관찰하였다. 흡착전압은 1.2 V로 하고 탈착전압은 -0.1 V 탈착시간은 3 min으로 실험하였다. 유속은 50 mL/min, 공급액의 농도는 NaCl 100 mg/L의 조건에서 흡착시간을 3, 5min으로 달리하여 실험을 진행하였다. 이에 대한 결과를 Fig. 3의 배출수 농도에 그래프로 나타내었으며 배출수의 최소점이 3분의 경우 10, 5분의 경우 2 mg/L로 각각 염 제거효율이 90, 98%를 나타내었다. 다음은 흡착시간을 5분으로 고정하고 공급액의 유속에 대한 염 제거효율을 비교하기 위해 공급액의 농도 100 mg/L, 흡착조건 1.2 V/5 min, 탈착조건 -0.1 V/3 min의 조건에서 유속을 50, 75, 100, 125 mL/min

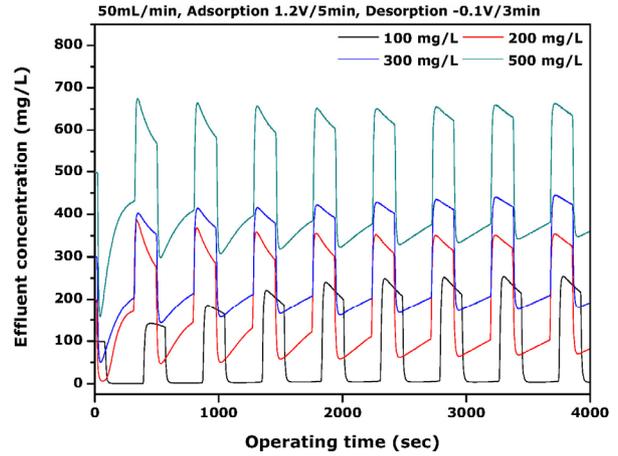


Fig. 5. Effluent concentration in accordance with influent concentration for 5 stage module.

로 달리하여 실험을 진행하였다. 이의 결과를 Fig. 4의 배출수 농도에 대한 그래프로 나타내었고 각각 98, 84, 68, 54%의 염 제거효율을 보였다. 마지막으로 공급액 농도에 따른 실험은 유속 50 mL/min, 흡착조건 1.2 V/5 min, 탈착조건 -0.1 V/3 min의 조건에서 100, 200, 300, 500 mg/L으로 공급액 농도를 달리하여 진행하였고 결과를 Fig. 5에 나타냈으며 100 mg/L일 때 98%의 염 제거효율을 보였다.

3.3. 흡착전압 및 흡착시간에 따른 성능 비교

앞서 5단 모듈에서의 성능 평가를 통해 10단 모듈의 적용 가능성을 확인하였다. 흡착전압과 흡착시간에 따른 염 제거효율을 알아보기 위하여 공급액 NaCl 100 mg/L, 100 mL/min의 유속으로 일정하게 공급하였고, 흡착시간 3 min, 탈착조건 -0.1 V/3 min을 고정하였으며, 흡착전압을 1, 1.2, 1.5 V로 달리하여 탈염실험을 진행하였다. Fig. 6은 배출수의 농도를 나타낸 그래프로 전압이 높을수록 배출수의 최저점이 낮은 것을 볼 수 있다. 흡착전압이 높을수록 염 제거효율이 증가함을 확인할 수 있었다. 흡착전압 1.5 V 조건에서 가장 높은 94%의 염 제거율을 확인하였으며 Table 1에 흡착전압에 따른 염 제거효율을 나타내었다. 염 제거효율은 흡착전압에 의존성을 갖게 된다. 인가해주는 전압의 크기가 증가될수록 많은 양의 이온들이 전극에 흡착되어 이러한 이유로 염 제거효율이 증가된 것으로 사료된다. 하지만 전압이 1.5 V 이상의 상태에서는 물분해 현상이 일어나게 되어 흡착전압을 1.2 V로 고정하여 다음

Table 1. Salt Removal Efficiency in Accordance with Adsorption Voltage

Adsorption Voltage (V)	Salt removal efficiency (%)
1 V	79%
1.2 V	85%
1.5 V	94%

Table 2. Salt Removal Efficiency in Accordance with Adsorption Time

Adsorption time (min)	Salt removal efficiency (%)
3 min	85%
5 min	75%

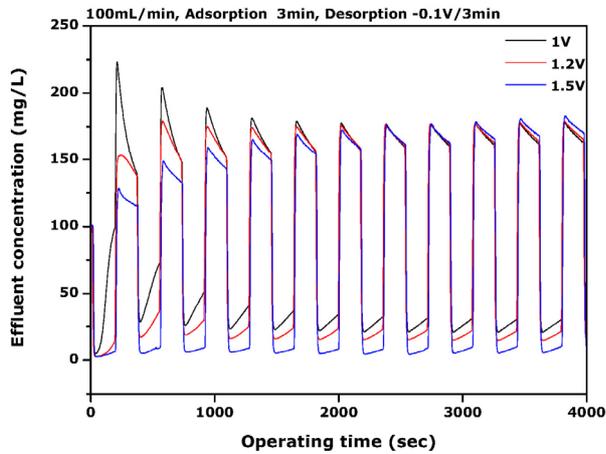


Fig. 6. Effluent concentration in accordance with adsorption voltage for 10 stage module.

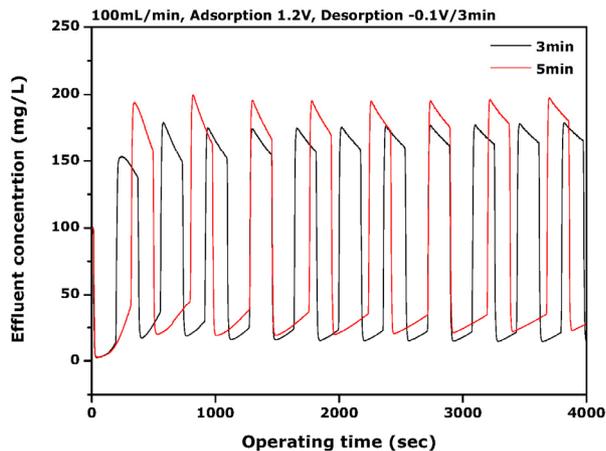


Fig. 7. Effluent concentration in accordance with adsorption time for 10 stage module.

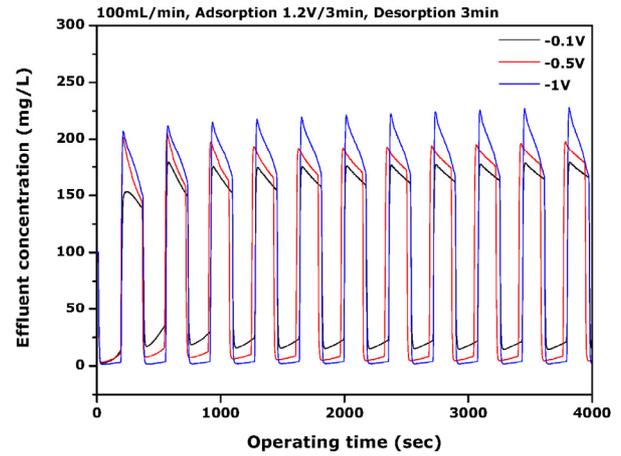


Fig. 8. Effluent concentration in accordance with desorption voltage for 10 stage module.

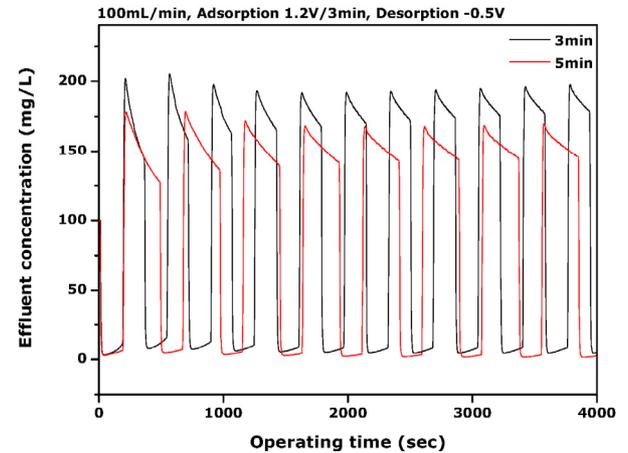


Fig. 9. Effluent concentration in accordance with desorption time for 10 stage module.

실험을 진행하였다. 다음으로 유속 100 mL/min, 흡착 전압 1.2 V, 탈착조건은 -0.1 V/3 min으로 고정하였고, 흡착시간을 3, 5 min으로 달리하여 실험을 진행하였다. 흡착시간이 3분에서 5분으로 증가했을 때 염 제거효율이 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 5단 적층 모듈에서의 결과와 다른 경향을 나타내었으며 Table 2에 염 제거효율을 나타내었다. 흡착시간이 증가할수록 염 제거효율이 증가하는 것이 일반적인 경향이나 10단 적층 모듈의 경우 흡착시간이 증가했지만 적층 단수가 증가함에 따라 탈착 시 흡착되었던 이온들이 전극에 비교적 많이 남아있는 상태로 다음 사이클이 진행되고 탈착된 배출수가 다음 흡착 사이클에 다시 흡착되어 염 제거효율이 감소됨으로 사료된다. 그 결과를 Fig. 7에 배

Table 3. Salt Removal Efficiency in Accordance with Desorption Voltage

Desorption Voltage (V)	Salt removal efficiency (%)
-0.1 V	85%
-0.5 V	95.5%
-1 V	98%

Table 4. Salt Removal Efficiency in Accordance with Desorption Time

Desorption time (min)	Salt removal efficiency (%)
3 min	95.5%
5 min	98.3%

Table 5. Salt Removal Efficiency in Accordance with Flow Rate

Flow rate (mL/min)	Salt removal efficiency (%)
100 mL/min	98.3%
150 mL/min	86%
200 mL/min	74%
250 mL/min	54.2%
300 mL/min	49%

출수 농도 그래프에 나타내었다.

3.3.1. 탈착전압 및 탈착시간에 따른 성능 비교

탈착전압과 탈착시간을 달리하여 실험을 진행하였고 이에 대한 배출수 농도에 대한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 먼저 유속 100 mL/min, 흡착조건 1.2 V/3 min 탈착시간 3 min으로 고정하고 탈착전압은 -0.1, -0.5, -1 V의 조건으로 실험하였다. 실험 결과 탈착전압이 증가할수록 염 제거효율이 85, 95.5, 98%로 증가함을 확인할 수 있었으며 Table 3에 정리하였다. 탈착전압이 -1 V일 때 염 제거효율이 98%로, 이는 인가해주는 전압의 전위가 높을수록 탈착시 더 원활하게 이온들이 탈착된 것으로 보인다. 이의 결과로 탈착전압 -0.5 V를 고정으로 하여 탈착시간별 실험을 진행하였다. 유속 100 mL/min, 흡착조건 1.2 V/3min, 탈착전압 -0.5 V로 고정하고 탈착시간을 3, 5 min으로 달리하여 진행하였다. 탈착시간이 3분에서 5분으로 증가함에 따라 염 제거효율이 95.5%에서 98.3%로 증가함을 확인하였고 Table 4에 정리하였다. 이 결과도 마찬가지로 탈착시간이 길수록 이온들의 원활한 탈착으로 인하여

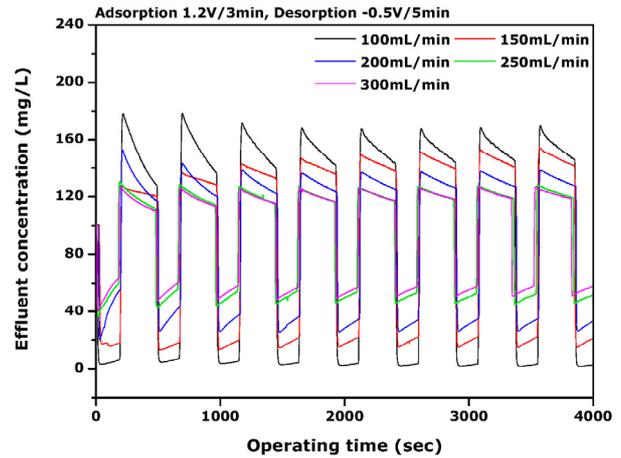


Fig. 10. Effluent concentration in accordance with flow rate of influent for 10 stage module.

흡착 사이클에 더 많은 이온들의 흡착되어 염 제거효율이 증가된 것으로 사료된다. 이온들이 충분히 제거되어 전극에 잔류하는 이온의 수가 탈착시간이 짧을 때 보다 적어 이온들의 원활한 흡착이 가능하기 때문에 염 제거효율이 높은 것으로 사료된다.

3.3.2. 공급액의 유속 및 농도에 따른 성능 비교

나머지 실험은 앞서 실험한 결과에서 가장 효율적인 조건을 선택하여 흡착전압 1.2 V, 흡착시간 3 min, 탈착전압 -0.5 V, 탈착시간 5 min으로 고정하고 진행하였다. 탈염공정에서 처리용량은 중요한 요소로 유속을 100, 150, 200, 250, 300 mL/min으로 증가시켜 실험을 진행하였다. 유속이 빨라질수록 효율이 떨어지는 것을 Fig. 10의 배출수 그래프에서 볼 수 있으며, 이는 유속이 증가함에 따라 이온들이 전극에 체류 가능한 시간이 줄어 충분히 흡착되지 못하기 때문에 배출수 농도의 최저점이 높아짐으로 사료된다. 유속 100, 150, 200, 250, 300 mL/min에서 98.3, 86, 74, 54.2, 49% 염 제거효율을 보였고 이의 결과를 Table 5에 나타내었다. 다음으로 공급액의 농도에 따른 염 제거효율을 알아보기 위하여 공급액의 농도를 100, 200, 300, 500 mg/L로 달리하여 실험을 진행하였다. 이의 결과는 Fig. 11과 Table 6에 나타내었다. 유속 100 mL/min, 흡착조건 1.2 V/3 min, 탈착조건 -0.5 V/5 min에서 공급액 농도 100, 200, 300, 500 mg/L로 실험하였을 때 각각 98.3, 69.5, 58, 28%의 염 제거효율을 나타내었다. 농도가 높을수록 용액 속에 녹아있는 이온의 수가 많다는 것으로 전극에 흡착 가능한 이온의 수는 한정 되어있기 때문에 공급액의 농도가

Table 6. Salt Removal Efficiency in Accordance with Feed Concentration

Feed concentration (mg/L)	Salt removal efficiency (%)
100 mg/L	98.3%
200 mg/L	69.5%
300 mg/L	58%
500 mg/L	28%

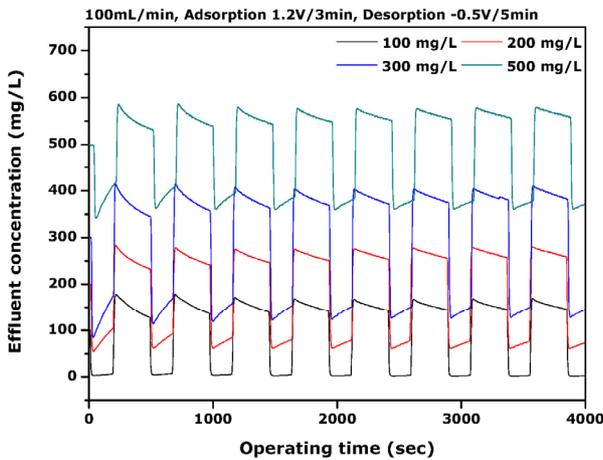


Fig. 11. Effluent concentration in accordance with influent concentration for 10 stage module.

높을수록 염 제거효율이 감소된 것으로 사료된다.

3.3.3. 공급액 종류에 따른 성능 비교

공급액의 종류에 따른 염 제거효율을 비교해보고자 CaSO₄, MgCl₂의 다가이온을 사용하여 염 제거효율을 알아보았다. 유속 100 mL/min, 흡착조건 1.2 V / 3 min, 탈착조건 -0.5 V/5 min에서 각각의 공급수의 농도를 100 mg/L로 설정하고 공급액을 NaCl, CaSO₄, MgCl₂로 달리하여 실험을 진행하였다. 각각 98.3, 90, 92%의 염 제거효율을 보였다. CaSO₄의 경우 2가 이온으로 이루어져 있기 때문에 전극에 흡착 시 NaCl에 비하여 2배의 이온교환작용기가 필요하다. 그렇기 때문에 낮은 염 제거효율을 보이며 MgCl₂ 경우 1가 이온과 2가 이온으로 이루어진 형태로 염 제거효율이 CaSO₄와 NaCl의 사이에 위치한 것으로 보인다. 마지막으로 공급액을 수도수로 하여 실험을 진행했으며 수도수의 공급액 농도는 80 mg/L로 측정되었으며 수도수의 염 제거효율은 90.8%를 나타내었으며 다가이온과 수도수에 대한 결과를 Table 7에 정리하고 배출수 농도에 대한 그래프를

Table 7. Salt Removal Efficiency in Accordance with Various Salt Types

Feed type	Salt removal efficiency (%)
NaCl	98.3%
CaSO ₄	90%
MgCl ₂	92%
Tap water	90.8%

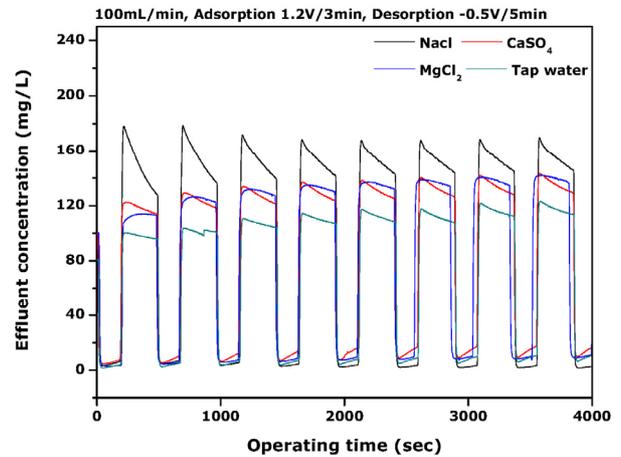


Fig. 12. Effluent concentration in accordance with various salts and Tap water for 10 stage module.

Fig. 12에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 막 결합형 축전식 탈염공정인 MCDI에 모듈을 적용하여 같은 시간동안 더 많은 용량의 물을 처리하고자 하였다. 설계된 모듈의 성능을 확인하기 위해 5단 모듈에 NaCl을 공급액으로 하여 흡착시간, 유속, 농도에 따라 흡/탈착 실험을 진행하였고 더 많은 처리 용량을 위해 10단 모듈의 성능을 알아보았다.

흡착전압은 높을수록 높은 염 제거효율을 나타내었으며, 이는 인가해주는 전압의 크기가 증가될수록 많은 양의 이온들이 전극에 흡착되어 이러한 이유로 염 제거효율이 증가된 것으로 사료된다. 흡착시간은 5분보다 3분일 때 더 높은 염 제거효율을 나타내었는데 흡착시간은 증가했지만 적층 단수가 증가함에 따라 탈착 시 흡착되었던 이온들이 전극이 비교적 많이 남아있는 상태로 다음 사이클이 진행되고 탈착된 배출수가 다음 흡착 사이클에 다시 흡착되어 염 제거효율이 감소됨으로 사

료된다.

탈착전압을 -0.1, -0.5, -1 V로 달리하여 실험한 결과 85, 95.5, 98%의 염 제거효율로 탈착전압이 증가할수록 염 제거효율로 증가함을 확인하였고, 탈착시간은 3, 5 min일 때 비교한 결과 95.5, 98.3%로 탈착시간이 5분으로 증가했을 때 높은 염 제거 효율을 보였다. 이와 같은 결과는 탈착 시 이온들이 충분히 탈착되어 다음 흡착구간에 이온들이 원활하게 흡착이 가능하기 때문에 염 제거효율이 증가된 것으로 사료된다.

유속에 따른 실험을 100~300 mL/min로 달리하여 실험을 진행하였으며, 98.3, 86, 74, 54.2, 49%의 염 제거효율을 보였다. 유속이 빠를수록 염 제거효율이 감소함을 보였고 이는 유속이 증가함에 따라 이온들이 전극에 체류 가능한 시간이 줄어 충분히 흡착되지 못하기 때문에 염 제거효율이 낮아짐으로 사료된다. 공급액의 농도는 높을수록 용액 속에 존재하는 이온의 수가 증가하여 흡착되지 못한 이온들도 증가하여 염 제거효율이 감소하게 된다.

공급액의 종류를 달리하여 실험한 결과 NaCl, MgCl₂, CaSO₄ 순으로 염 제거효율이 높았으며, 이는 2가이온이 흡착될 때 더 많은 전위가 사용되어 낮은 염 제거효율이 나타난 것으로 사료된다. 수도수를 공급액으로 한 실험에서는 90%의 염 제거효율을 보였다.

감 사

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

Reference

1. T. J. Welgemoed and C. F. Schutte, “Capacitive deionization technology: An alternative desalination solution”, *Desalination*, **183**, 327 (2005).
2. 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).
3. M. W. Ryoo, J. H. Kim, and G. Seo, “Role of titania incorporated on activated carbon cloth for capacitive deionization of NaCl solution”, *J Colloid and interface Sci.*, **264**(2), 414 (2003).
4. C. M. Yang, W. H. Choi, B. W. Cho, W. I. Cho, K. S. Yun, and H. S. Han, “Desalination effect of capacitive deionization process with porous carbon-nano materials”, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **15**, 294 (2004).
5. M. W. Ryoo and G. Seo, “Improvement in capacitive deionization function of activated carbon by titania modification”, *Water Res.*, **37**, 1527 (2003).
6. 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).
7. K. W. Kang and T. S. Hwang, “Synthesis and characteristics of partially fluorinated poly(vinylidene fluoride)(PVDF) cation exchange membrane via direct sulfonation”, *Membr. J.*, **25**, 406 (2015).
8. D. D. Caudle, J. H. Tucker, J. L. Cooper, B. B. Arnold, and A. Papastamatakis, “Electrochemical demineralization of water with carbon Electrodes”, Research Report, Oklahoma Univ. Research Institute (1966).
9. D. H. Kim, J. S. Park, and M. S. Kang, “Controlling water splitting characteristics of anion-exchange membranes by coating imidazolium polymer”, *Membr. J.*, **25**, 152 (2015).
10. J. S. Koo, N. S. Kwak, and T. S. Hwang, “Synthesis and properties of nonfluoro aminated poly(vinylbenzyl chloride-co-ethyl methacrylate-co-styrene) anion exchange membranes for MCDI process”, *Polymer(Korea)*, **36**, 564 (2012).
11. D. J. Kim and S. Y. Nam, “Development and application trend of bipolar membrane for electro-dialysis”, *Membr. J.*, **23**(5), 319 (2013).
12. S. W. Chen, J. H. Jun, J. W. Rhim, and S. Y. Nam, “Studies on the preparation of the poly(vinyl alcohol) ion exchange membranes for direct methanol fuel cell”, *Membr. J.*, **13**(3), 199 (2003).
13. J. H. Yeo and J. H. Choi, “Enhancement of selective removal of nitrate ions from a mixture of anions using a carbon electrode coated with ion-exchange resin powder”, *Appl. Chem. Eng.*, **24**,

- 49 (2013).
14. H. Strathmann, *Ion-exchange Membrane Separation Processes*, Elsevier, Amsterdam (2004).
 15. C. J. Park, I. H. Kim, S. P. Kim, H. M. Lee, S. I. Cheong, H. S. Choi, and J. W. Rhim, "Preparation of poly(ethylenimine) anionic exchange membrane impregnated in porous polyethylene membranes", *Membr. J.*, **21**, 94 (2011).
 16. 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**, 362 (2015).
 17. P. M. Biesheuvel, B. van Limpt, and A. van der Wal, "Dynamic adsorption/desorption process model for capacitive deionization", *J. Phys. Chem. C*, **113**, 5636 (2009).