

## 폴리비닐플루오라이드 불균질 이온교환막을 이용한 막 결합형 축전식 탈염공정의 탈염성능 Part II : 불균질 이온교환막의 탈염성능

박철오·임지원<sup>†</sup>

한남대학교 화공신소재공학과  
(2017년 6월 19일 접수, 2017년 6월 23일 수정, 2017년 6월 27일 채택)

### Performance of Membrane Capacitive Deionization Process Using Polyvinylidene Fluoride Heterogeneous Ion Exchange Membranes

#### Part II : Performance Study of Membrane Capacitive Deionization Process

Cheol Oh Park and Ji Won Rhim<sup>†</sup>

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

(Received June 19, 2017, Revised June 23, 2017, Accepted June 27, 2017)

**요약:** 본 연구에서는 막 결합형 축전식 탈염공정에 적용을 위해 폴리비닐플루오라이드를 고분자 지지체로 사용하여 양이온 및 음이온교환수지를 배합하여 제작된 불균질 이온교환막을 탄소전극에 결합하여 염 제거 효율을 알아보고자 하였다. 불균질 이온교환막의 배합 조건은 용매, 고분자 지지체, 이온교환수지를 7 : 2 : 1의 무게 비율로 하였으며 탄소전극에 직접 캐스팅하였다. 운전조건으로 공급액은 주로 NaCl 수용액에 대하여 흡착전압, 시간, 공급액의 농도, 유속, 탈착전압, 시간 등에 대하여 염 제거 효율을 측정하였으며 이 외에 CaCl<sub>2</sub>과 MgSO<sub>4</sub> 수용액에 대하여서도 측정하였다. 대표적으로 NaCl 100 mg/L 용액의 15 mL/min에서 1.5 V, 3분의 흡착조건, -0.1 V, 3분의 탈착조건에서 98%의 염 제거 효율을 보였으며, CaCl<sub>2</sub>과 MgSO<sub>4</sub>는 100 mg/L, 15 mL/min에서 1.2 V, 3분의 흡착조건, -0.5 V, 5분의 탈착조건에서 각각 70, 59%의 염 제거 효율을 보였다.

**Abstract:** In this study, the heterogeneous ion exchange membranes prepared by the combination of the carbon electrode and mixed the cation and anion exchange polymers and polyvinylidene fluoride as the basic polymer together were made to recognize the efficiency of the salt removal for the application of the membrane capacitive deionization process. The mixing weight ratio of the solvent, basic polymer and ion exchange resin was 7 : 2 : 1 and this mixed solution was directly cast on the electrode. As for the operating conditions of the adsorption voltage and time, feed flow rate, desorption voltage and time of the feed solution NaCl 100 mg/L, the salt removal efficiencies (SRE) were measured. Apart from this NaCl, the CaCl<sub>2</sub> and MgSO<sub>4</sub> solutions were investigated in terms of SRE as well. Typically, SRE for NaCl 100 mg/L solution under the conditions of adsorption voltage/time, 1.5 V/3 min, desorption voltage/time -0.1 V/3 min, was shown 98%. And for the CaCl<sub>2</sub> and MgSO<sub>4</sub> solutions, the SREs of 70 and 59% were measured under the conditions of adsorption voltage/time, 1.2 V/3 min, desorption voltage/time -0.5 V/5 min, respectively.

**Keywords:** heterogeneous membrane, ion exchange resin, polyvinylidene fluoride (PVDF), membrane preparation, membrane capacitive deionization (MCDI)

#### 1. 서론

신선한 물은 인간에게 산소만큼이나 중요하며 없어

서는 안 될 자원 중 하나이지만 이상기후로 인한 가뭄, 무분별하게 버려지는 많은 양의 쓰레기들로 인한 물의 오염, 신선한 물의 낭비로 인해 해가 거듭될수록 점점

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

사람과 멀어지고 있다. 건강한 물을 확보하기 위하여 수많은 학자들이 오염된 수자원을 효과적으로 처리하여 재사용하는 기술을 개발하는데 총력을 기울이고 있다. 그러한 수처리 기술 중 하나인 축전식 탈염공정 (capacitive deionization; CDI)은 전압을 전극에 인가하여 음극에는 양전하를 띠는 이온을 흡착시키고, 양극에는 음전하를 띠는 이온을 흡착시켜 수용액 상의 이온들을 제거하는 기술이다[1-2]. 인가했던 반대전위를 가해주거나, 가해주었던 전압을 제거해주면 전극에 흡착되었던 이온들이 손쉽게 탈착되기 때문에 재사용도 용이한 이점이 있다[2]. 대표적인 수처리 기술 중 하나이며 추진력을 압력차로 사용하는 역삼투막 공정과 열을 사용하는 증류공정과는 달리 낮은 전위만을 이용하여 운전하기 때문에 상당히 경제적인 공정이라고 할 수 있다. CDI 기술에서의 전극의 소재로는 비표면적이 높으며 전기전도도가 높은 탄소 소재가 가장 적합한 것으로 알려져 있으며 국내외로 탄소를 기반으로 한 전극의 개발이 이루어지고 있다[3-5]. 흡착효율을 높이기 위한 방법으로 탁월한 소재의 개발 또는 전극에 인가하는 전위차를 높이는 방법이 있지만 일정한 전압 이상에서는 물의 분해가 일어날 수 있기 때문에 운전 전압을 높이는 것에는 제약이 따르며 단순히 전극의 소재 개발만으로 낮은 효율을 극복하는 것 또한 힘들다[6].

축전식 탈염공정의 분리효율을 저하시키는 가장 큰 요인으로 전기이중층 효과(electric double layer effect)를 꼽을 수 있다. 전기이중층이란 전극의 표면에 전극과 반대되는 전하의 이온이 붙고, 그 이온의 전기적 인력으로 인해 전극과 동일한 전하의 이온이 붙어 이온들이 전극표면에서 두 겹의 막을 형성하는 것을 말한다[7-8]. 전기이중층이 형성이 되면 흡착된 이온들을 탈착하여도 완벽한 탈착이 되지 않아 재 흡착시에 흡착되는 이온의 양이 감소하여 전극의 염 제거 효율이 감소된다.

축전식 탈염공정의 단점인 전기이중층의 형성으로 인한 낮은 효율을 보완할 방법으로 전극에 이온교환막을 접목시킨 막 결합형 축전식 탈염공정(membrane capacitive deionization; MCDI) 기술이 고안되었다[9]. 이온교환막은 전하를 띠는 이온들을 선택적으로 분리하여 전극에 흡착되는 이온을 조절할 수 있다[10]. 이온교환막은 균질이온교환막과 불균질 이온교환막으로 구분된다[11]. 균질이온교환막은 좋은 전기화학적 특성을 지니지만 복잡한 제조과정이 단점이다. 불균질 이온교환막은 전기화학적 특성은 균질이온교환막보다 미약하

지만, 제조방법이 간단하다는 장점을 지니고 있다.

이온교환막과 탄소전극 사이에 생길 수 있는 저항을 최소화하기 위해서 전극 위에 직접 캐스팅하는 방식으로 전극을 제조하였다. 불균질 이온교환막은 용매인 n-methyl-2-pyrrolidone (NMP)와 고분자 지지체인 polyvinylidene fluoride (PVDF), 상용화된 양이온교환수지와 음이온교환수지인 Purolite C100MRNS, A430MR을 7 : 2 : 1의 무게 비율로 제작하였다[12]. NaCl, CaCl<sub>2</sub>과 MgSO<sub>4</sub> 수용액을 이용하여 흡착시간, 흡착전압, 탈착시간, 탈착전압, 유속, 농도 등의 운전조건을 변화하여 불균질 이온교환막을 결합한 탄소전극의 탈염효율을 관찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시약 및 재료

불균질 이온교환막을 제조하기 위하여 N-methyl-2-pyrrolidone (NMP, JUNSEI, Mw 99.13)를 용매로, poly(vinylidene fluoride)(PVDF, Alfa Aesar)를 고분자 지지체로 사용하였다. 이온교환수지는 양이온 교환수지 (Purolite C100MRNS, Purolite)와 음이온교환수지(Purolite A430MR, Purolite)를 사용하였다. 분쇄하여 체눈 크기 53  $\mu\text{m}$ 의 체로 걸러 사용하였고, 초 순수는 Younglin Pure Water System (Seoul, Korea)으로 직접 생산해 사용하였다. 전극은 Purechem에서 상용화된 다공성 탄소 전극을 구매해 사용하였다. 공급액은 sodium chloride (Samchun)와 calcium sulfate (Samchun), Magnesium chloride hexahydrate (Junsei)로 제조하였다.

### 2.2. 막 결합형 탄소전극 제조

고분자 지지체인 PVDF를 용매인 NMP에 80°C에서 400 rpm으로 상부 고정형 프로펠러 방식으로 교반하여 녹인다. 그 다음 분쇄하여 체눈 크기 53  $\mu\text{m}$ 의 체로 거른 이온교환수지를 NMP와 PVDF, 이온교환수지의 무게 비율을 7 : 2 : 1이 되도록 첨가하여 교반하였다. 이온교환수지가 고르게 분산될 수 있도록 Kinematica (Switzerland)사의 균질기인 POLYTRON PT-MR 2100을 이용하여 20,000 rpm으로 20분 동안 교반하였다 [12]. 불균질 이온교환막 용액을 제조한 후 Purechem, Co.의 다공성 탄소전극 위에 250  $\mu\text{m}$ 의 casting knife를 사용하여 전극 위에 직접 캐스팅 하여 120°C의 오븐에서 건조하고, 실험에 사용하기 전 증류수에 담가두었다.

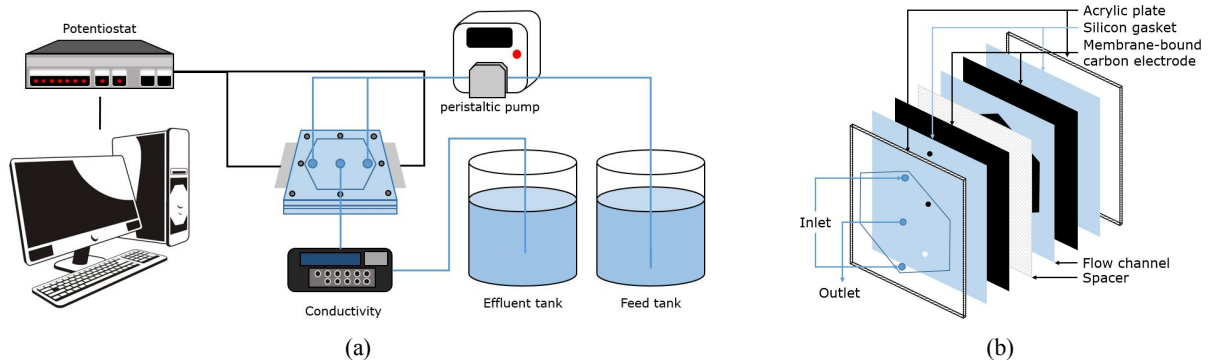


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus (a) and MCDI cell (b).

### 2.3. 막 결합형 축전식 탈염 실험

실험에 사용된 공정의 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 전극은 유효면적이  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 인 육각형 모양으로 양극의 탄소전극에는 음이온 불균질 이온교환막을, 음극의 탄소전극에는 양이온 불균질 이온교환막을 캐스팅하여 제조하였다. 두 양이온, 음이온 전극사이에 유입수의 흐름을 원활하게 해주며, 전극끼리의 접촉을 막아주는 역할을 하는 두께가 약  $100 \mu\text{m}$ 인 Nylon spacer를 삽입하였다. 공급액은 Masterflex (German)사의 L/S pump를 사용하여 원하는 유속으로 공급을 하였다. 공급액은 cell의 가장자리에 위치한 두 개의 구멍으로 들어간 후 두 전극 사이에서 흡착 시에는 이온을 잃고, 탈착 시에는 이온을 얻은 다음 중앙의 구멍으로 배출되도록 하였다. WonATech (Korea)사의 potentiostat인 WPG 100을 이용하여 전극에 전위를 인가하였으며, cell에서 배출되어 나오는 용액은 iSTEK (Korea)사의 TDS conductivity meter인 EC-470L을 이용하여 2초마다 측정한 데이터를 컴퓨터에 전송하여 기록하였다. 실험은 100, 200, 300, 400, 500 mg/L인 NaCl 수용액과 100 mg/L인  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$  수용액을 사용하였고 공급액의 공급유속은 15, 25, 35 mL/min으로 하였다. 흡착 전압은 0.5, 1.0, 1.2, 1.5 V로, 흡착시간은 3, 5, 7분으로 전극에 직접 인가하였으며 탈착 시에는 -0.1, -0.5 V의 전압과 1, 3, 5, 7분의 시간을 주어 실험을 하였다. 염 제거 효율은 다음 식 (1)로부터 계산하였다[13].

$$\text{Salt removal efficiency (SRE)} = \frac{C_0 - C_f}{C_0} \times 100 (\%) \quad (1)$$

이때,  $C_0$ 는 공급액의 초기 TDS 수치이며  $C_f$ 는 배출된 용액의 최저 TDS 수치이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 흡착 전압 및 시간에 따른 염 제거 효과 비교

흡착 전압과 흡착시간에 따른 염 제거 효율을 알아보기 위해 공급액은 100 mg/L의 NaCl을 15 mL/min의 일정한 유속으로 공급하였고, 탈착 전압은 -0.1 V, 탈착시간은 3분으로 고정하였으며, 흡착 전압을 0.5, 1.0, 1.2, 1.5 V로, 시간은 3, 5, 7분으로 변화하여 탈염실험을 하였다. 그 결과는 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

동일한 흡착시간일 때, 흡착전압을 0.5, 1.0, 1.2, 1.5 V로 증가시키면 염 제거 효율이 증가함을 볼 수 있었고 흡착전압이 동일할 때 흡착시간을 증가시키면 염 제거 효율은 감소함을 볼 수 있다. 흡착전압을 0.5~1.5 V까지 증가시킬 때 흡착시간 3분에서는 36~98%, 5분에서는 32~91%, 7분에서는 27~73%의 염 제거 효율을 보였으며 흡착시간을 3~7분으로 증가시킬 때 흡착전압 0.5 V에서는 36~27%, 1.0 V에서는 76~40%, 1.2 V에서는 81~52%, 1.5 V에서는 98~73%의 염 제거 효율을 보였다. 동일한 흡착시간에서 흡착전압을 증가시키면 더 강한 인력이 작용하여 같은 시간에 많은 이온을 전극에 흡착시켜 염 제거 효율이 증가한 것으로 보인다. 이는 축전식 탈염공정의 구동력이 전위차임을 명확히 보여주는 결과이다. 동일한 흡착전압에서 흡착시간을 증가시켰을 때 오히려 효율이 감소하였음을 알 수 있는데, 이는 고정한 탈착시간인 3분에 비해 변화시켜준 흡착시간 5, 7분으로 길기 때문에 완전히 탈착되지 않아 여전히 전극에 이온들이 존재한 상태로 흡착을 진행하여 이온교환사이트의 수가 감소했기 때문에 효율이 떨어지는 결과를 보인 것으로 사료된다.

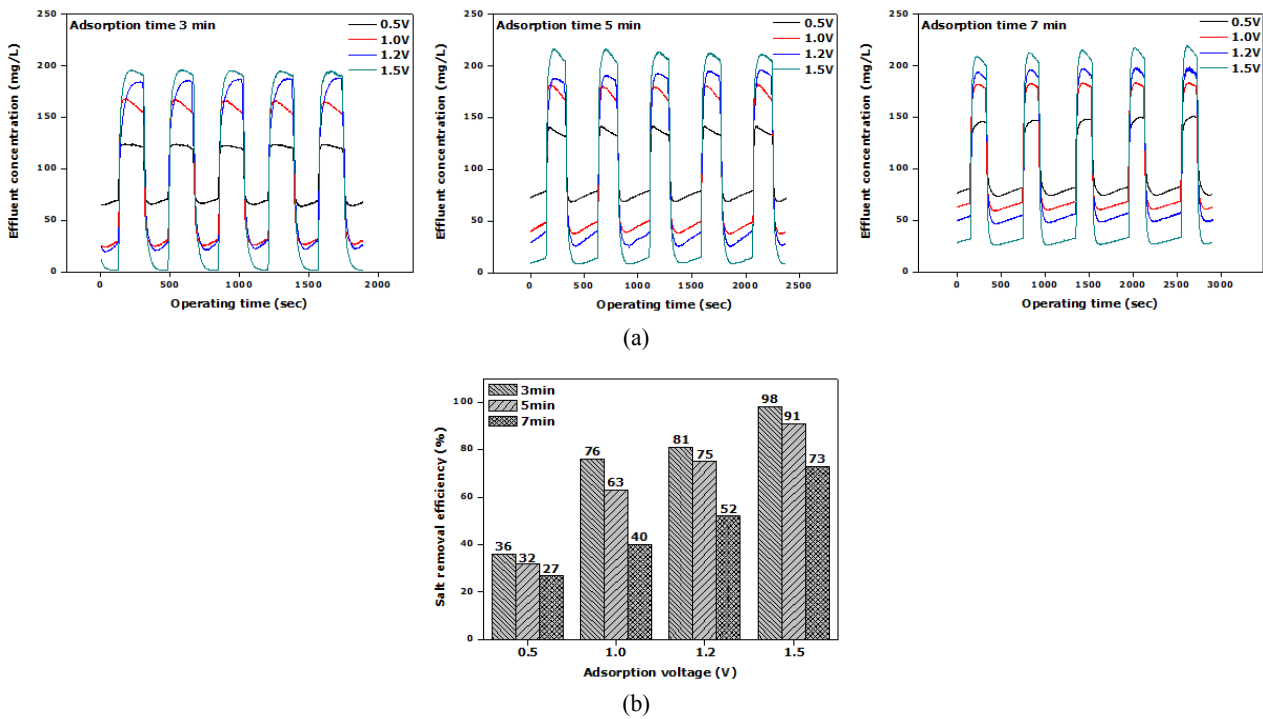


Fig. 2. Comparison of the effluent concentration (a) and salt removal efficiency (b) in accordance with adsorption potential and time of NaCl.

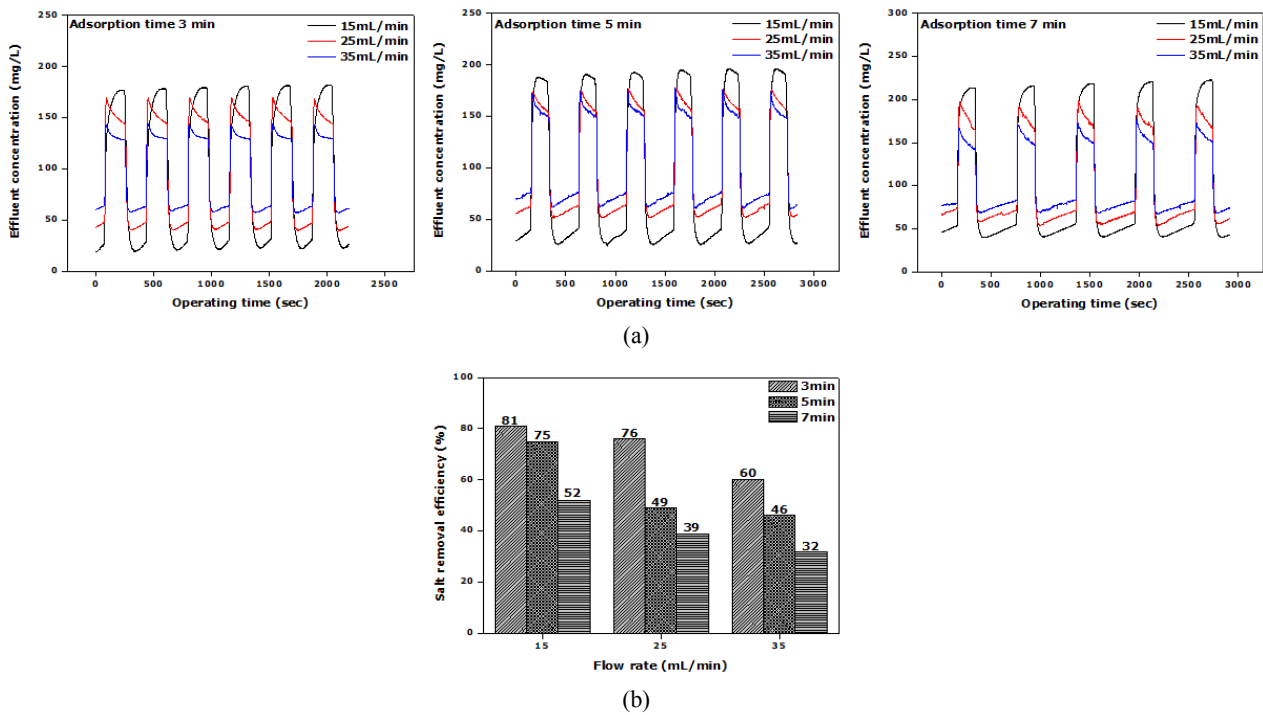


Fig. 3. Comparison of the effluent concentration (a) and salt removal efficiency (b) in accordance with feed flow rate of NaCl.

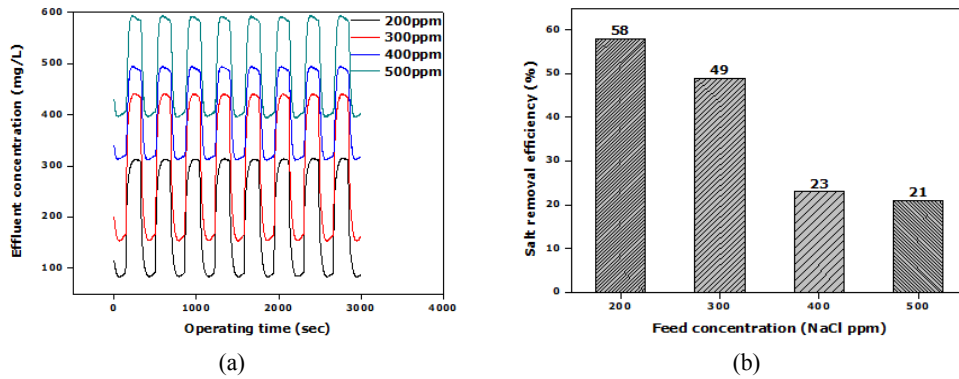


Fig. 4. Comparison of the effluent concentration (a) and salt removal efficiency (b) in accordance with feed concentration of NaCl.

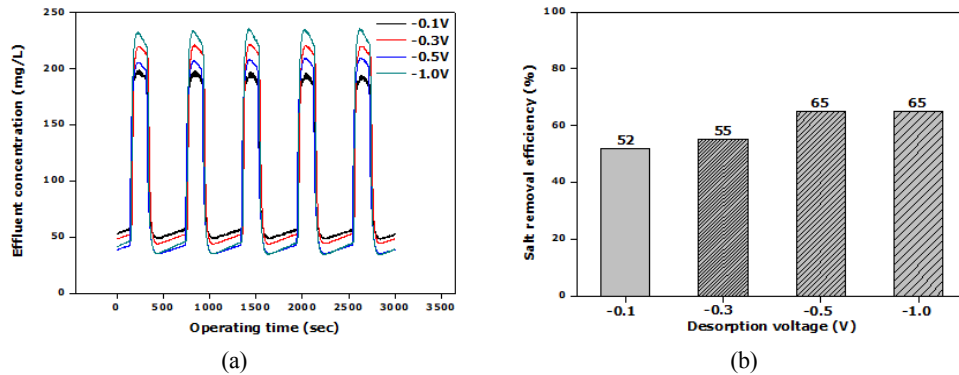


Fig. 5. Comparison of the effluent concentration (a) and salt removal efficiency (b) in accordance with desorption potential of NaCl.

3.2. 공급액의 유속에 따른 염 제거 효과 비교

모든 탈염공정에서 시간당 처리용량은 중요한 지표 중 하나이다. 흡착전압은 1.2 V, 탈착전압 -0.1 V, 시간 3분으로 고정하고 공급액은 100 mg/L의 NaCl을 사용하였으며 흡착 시간을 3, 5, 7분, 공급액의 유속을 15, 25, 35 mL/min으로 변화하여 탈염실험을 하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 동일한 흡착시간에서 공급액의 유속이 증가할수록 염 제거 효율은 감소하였고, 동일한 공급액의 유속에서 흡착시간이 증가할수록 염 제거 효율은 감소하였다. 흡착시간을 3~7분까지 증가시키수록 공급액의 유속 15 mL/min일 때 81~52%, 25 mL/min일 때 76~39%, 35 mL/min일 때 60~32%의 염 제거 효율을 보였으며 공급액의 유속을 15~35 mL/min 까지 증가시켰을 때 흡착시간 3분에서는 81~60%, 5분에서는 75~46%, 7분에서는 52~32%의 염 제거 효율을 보였다. 동일한 흡착시간에서 공급액의 유속을 증가시키면, 공급액이 전극의 표면에 머무르는 시간이 상대적

으로 줄어들고 동시에 전극의 단위면적당 처리할 수 있는 용액의 양은 한정되어 있기 때문에 동일한 시간에 더 많은 양의 공급액을 처리하고자 할 때 염 제거 효율은 감소할 수밖에 없다.

3.3. 공급액의 농도에 따른 염 제거 효과 비교

100 mg/L 이상인 고농도의 공급액에서의 운전 특성을 알아보기 위하여 200, 300, 400, 500 mg/L의 NaCl 용액을 공급액으로, 흡착전압, 시간은 1.2 V, 3분, 탈착전압, 시간을 -0.1 V, 3분, 공급액의 유속은 15 mL/min으로 실험을 하였다.

Fig. 4에서 공급액의 농도가 200~500 mg/L로 증가함에 따라 염 제거 효율은 58~21%로 감소하였다. 이는 전극과 이온교환막의 단위 면적당 공급액 중의 이온 처리 능력은 일정하기 때문에 공급액 속의 이온의 농도가 증가할수록 염 제거 효율이 감소한 것으로 사료된다.

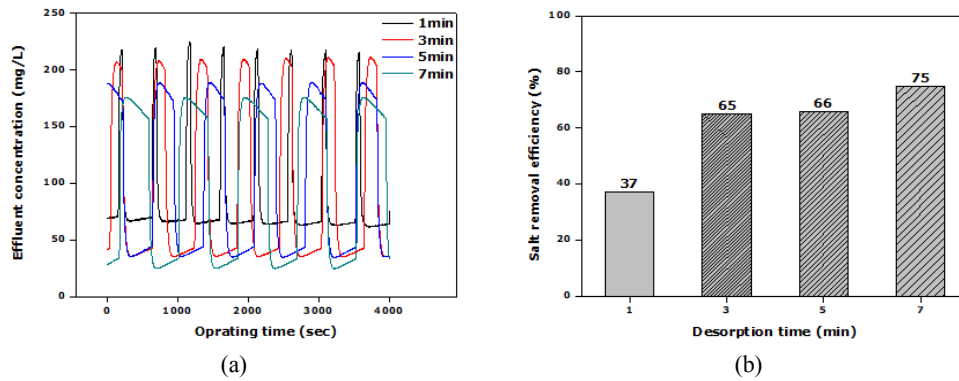


Fig. 6. Comparison of the effluent concentration (a) and salt removal efficiency (b) in accordance with desorption time of NaCl.

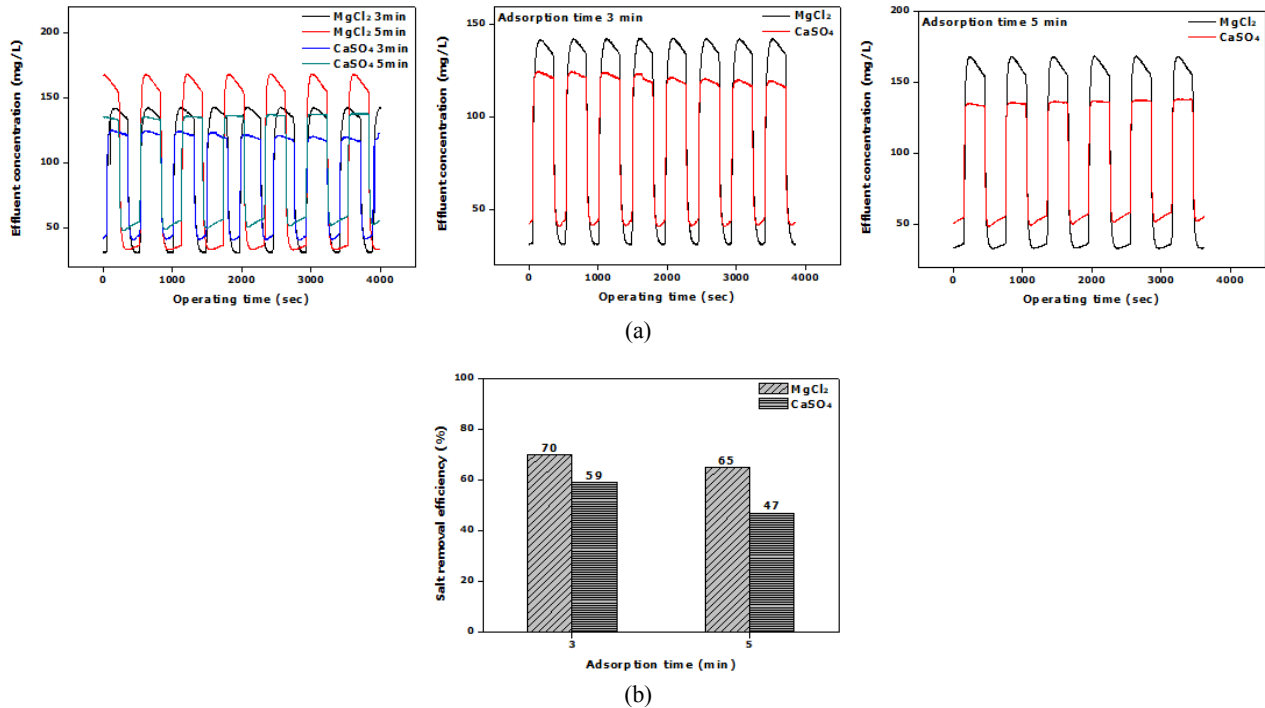


Fig. 7. Comparison of the effluent concentration (a) and salt removal efficiency (b) in accordance with adsorption time of MgCl<sub>2</sub> and CaSO<sub>4</sub>.

#### 3.4. 탈착 전압에 따른 염 제거 효과 비교

실험을 진행하면서 탈착 전압에 따른 염 제거 효율의 경향에 대해서도 실험할 필요성을 느껴 흡착전압은 1.2 V, 시간은 7분, 탈착시간은 3분, 공급액은 농도 100 mg/L의 NaCl을 15 mL/min의 유속으로 공급하며 탈착 전압은 -0.1, -0.3, -0.5, -1.0 V로 변화하여 실험을 진행하였다.

Fig. 5를 보면 탈착 전압 -0.1~1.0 V에서 염 제거 효율은 52~65%로 증가하였다. -0.1~0.5 V에서는 전위차가 증가할수록 7분 동안 흡착된 이온을 충분히 탈착시

킨 것으로 보이며 -0.5 V 이상에서는 더 증가하지 않은 것으로 본 연구에서 설정한 조건에서 -0.5 V 이상의 탈착전압에서는 더 좋은 염 제거 효과를 기대하지 못할 것으로 사료된다.

#### 3.5. 탈착 시간에 따른 염 제거 효과 비교

앞서 실험한 대로 탈착전압은 -0.5 V, 흡착전압은 1.2 V, 시간은 7분, 공급액의 농도와 유속은 각각 100 mg/L, 15 mL/min으로 고정한 다음 탈착시간을 1, 3, 5,

7분으로 변화하여 염 제거 효율을 알아보았다.

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 탈착시간이 1~7분으로 증가할수록 염 제거 효율은 37~75%까지 증가하였다. 탈착전압을 크게 인가하는 것보다 탈착시간을 증가시키면 전극에 흡착되었던 이온들을 충분히 탈착시킬 수 있음을 알 수 있다. 하지만 탈착시간을 증가시키면 동일한 시간 내에 공급액에서 염을 제거한 탈염수를 얻을 수 있는 횟수가 줄어들기 때문에 일정시간 이상 증가시키는 것은 바람직하지 않다고 사료된다.

### 3.6. 공급액의 종류와 흡착시간에 따른 염 제거 효과 비교

NaCl에 대한 충분한 실험이 진행된 것으로 판단되어 MgCl<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub> 100 mg/mL 수용액을 공급액으로 하여 15 mL/min의 유속으로, 흡착전압은 1.2 V, 탈착전압은 -0.5 V, 시간은 5분, 탈착시간은 3, 5분으로 실험을 진행하였다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 MgCl<sub>2</sub> 100 mg/L 공급액에서 3, 5분의 흡착시간인 경우 70, 65%의 염 제거 효율을 보였으며, CaSO<sub>4</sub> 100 mg/L 공급액에서는 3, 5분의 흡착시간인 경우 각각 59, 47%의 염 제거 효율을 보였다.

이는 NaCl의 염 제거 효율보다 현저히 떨어지는 결과로 이는 electro-static crosslinking에 기인한 것으로 판단하였다. 1가 이온만을 가지는 NaCl의 경우에는 이온교환고분자의 이온교환사이트와 1 : 1로 반응하여 많은 분자수가 제거되었으며, CaSO<sub>4</sub>는 양이온과 음이온이 모두 2가이기 때문에 1 : 2로 반응하여 1가이온보다 이온교환사이트의 두 곳을 사용하기 때문에 탈염효율이 현저히 감소된 것으로 사료된다. MgCl<sub>2</sub>는 2가 이온과 1가이온이 혼재되어 있어 NaCl과 CaSO<sub>4</sub>의 중간단계에 위치한 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 불균질 이온교환막을 축전식 탈염공정에 적용하여 염 제거 효율을 측정하였다. 용매와 고분자 지지체, 상용화된 양이온교환수지와 음이온교환수지의 무게 비율을 7 : 2 : 1로 하여 제조한 후 상용화된 탄소전극에 직접 캐스팅하였다[12]. 운전 조건으로는 NaCl, CaCl<sub>2</sub>과 MgSO<sub>4</sub> 수용액을 공급액으로 사용하고 흡착시간, 흡착전압, 탈착시간, 탈착전압, 유속, 농도 등을 변화하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 우선 흡착전압과 시간에 따른 염 제거 성능을 알아보았다. NaCl 수용액을 100 mg/L의 농도와 15 mL/min의 유속으로 공급하였고 흡착전압을 0.5~1.5V로 변화시킬수록 흡착시간 3분에서 46~98%, 5분에서 32~91%, 7분에서 27~73%의 염 제거 효율을 보였다. 흡착전압이 커질수록 염 제거 효율은 증가하였고 흡착시간이 길어질수록 염 제거 효율은 감소하였다. 이는 고정된 탈착시간인 3분에 비해 변화시켜준 흡착시간이 길기 때문에 장시간 동안 흡착된 이온들이 완전히 탈착되지 않았기 때문으로 사료된다.

2. 공급액의 유속을 15, 25, 35 mL/min로 변화하였더니 흡착시간 3분에서 81~60%, 5분에서 75~46%, 7분에서 52~32%의 염 제거 효율을 보였다. 공급액의 유속이 증가되면 셀 내부 전극사이의 유로에 유입수의 잔류 시간이 감소되어 충분한 흡착이 되지 않아 나타난 결과로 사료된다.

3. NaCl 수용액의 농도를 200~500 mg/L으로 변화하여 공급하였을 때 염 제거 효율은 58~21%로 점차 감소하였다. 이는 전극의 이온처리능력은 한계가 있기 때문에 이온농도가 증가할수록 염 제거 효율은 감소한 것으로 보인다.

4. 탈착 전압과 시간을 변화하였을 때 탈착 전압 -0.1~1.0 V에서 52~65%로 증가하였다. 탈착시간을 1~7분으로 증가하였을 때 37~75%까지 증가하였다. 전위차가 증가할수록, 탈착시간을 늘릴수록 흡착되었던 이온을 충분히 탈착시켜준 것으로 사료된다.

5. 공급액의 종류를 MgCl<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>로 하여 100 mg/L, 15 mL/min으로 공급하였더니 각각 3분의 흡착시간에서 70, 59%, 5분의 흡착시간에서 65, 47%의 염 제거 효율을 보였다. 이는 이온교환막 내의 작용기의 양이 한정되어있어 2가 이온의 염이 1가 이온의 염보다 흡탈착에 어려움이 있는 것으로 사료된다.

축전식 탈염공정에 불균질 이온교환막을 결합하여 염 제거 효율을 알아보았다. purechem. co의 탄소전극 자체의 탈염 성능은 1 V, 3분의 흡착, -0.1 V, 1분의 탈착, NaCl 100 mg/L, 15 mL/min의 공급액 조건에서 38%의 염 제거 효율을 보이며, purechem. co의 탄소전극에 APSf/SPEEK 균질이온교환막을 결합한 축전식 탈염공정에서의 탈염성능은 1.2 V, 3분의 흡착, -0.1 V, 3분의 탈착, NaCl 100 mg/L, 15 mL/min의 공급액 조건에서 100%의 염 제거 효율을 보였다[14]. 특정한 조건에서 90% 이상의 염 제거 효율이 나타난 것으로 보아 본

연구에서 제조한 불균질 이온교환막은 충분히 막 결합형 축전식 탈염공정에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 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**, 1 (2005).
2. H. H. Jung and S. W. Hwang, “Capacitive deionization characteristics of nanostructured carbon aerogel electrodes synthesized via ambient drying”, *Desalination*, **216**, 377 (2007).
3. M. W. Ryoo and G. Seo, “Improvement in capacitive deionization function of activated carbon by titania modification”, *Water Res.*, **37**, 1527 (2003).
4. C. H. Hou, C. Liang, S. Yiacoumi, S. Dai, and C. Tsouris, “Electrosorption of ions from aqueous solutions by nanostructured carbon aerogel”, *J. Colloid Interface Sci.*, **250**, 18 (2002).
5. Y. Cai, Y. Wang, X. Han, L. Zhang, S. Xu, and J. Wang, “Optimization on electrode assemblies based on ion-doped polypyrrole/carbon nanotube composite in capacitive deionization process”, *J. Electroanal. Chem.*, **768**, 72 (2016).
6. J. H. Choi, “Fabrication of a carbon electrode using activated carbon powder and application to the capacitive deionization process”, *Water Res.*, **70**, 362 (2010).
7. P. M. Biesheuvel and A. van der Wal, “Membrane capacitive deionization”, *J. Membr. Sci.*, **346**, 256 (2010).
8. K. Bohinc, V. Kralj-Iglic, and A. Iglic, “Thickness of electrical double layer. Effect of ion size”, *Electrochim Acta.*, **46**, 3033 (2001).
9. Y. J. Kim and 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).
10. H. Li and L. Zou, “Ion-exchange membrane capacitive deionization: A new strategy for brackish water desalination”, *Desalination*, **275**, 62 (2011).
11. J. Schauer and L. Brožová, “Heterogeneous ion-exchange membranes based on sulfonated poly(1,4-phenylene sulfide) and linear polyethylene: preparation, oxidation stability, methanol permeability and electrochemical properties”, *J. Membr. Sci.*, **250**, 151 (2005).
12. C. O. Park and J. W. Rhim “Performance of membrane capacitive deionization process using polyvinylidene fluoride heterogeneous ion exchange membranes part I : Preparation and characterization of heterogeneous ion exchange membranes”, *Membr. J.*, **27**, 84 (2017).
13. H. Li, L. Pan, Y. Zhang, L. Zou, C. Sun, Y. Zhan and Z. Sun, “Kinetics and thermodynamics study for electrosorption of NaCl onto carbon nanotubes and carbon nanofibers electrodes”, *Chem. Phys. Lett.*, **485**, 161 (2010).
14. Y. S. Jeon, “Design of various cell types and their performance evaluation in MCDI process” MS Dissertation, Univ of Hannam, Daejeon, Korea (2017).