

흡착전압과 코팅된 이온교환막 두께가 막 결합형 축전식 탈염공정에서 흡착성능에 미치는 영향

윤원섭 · 임솔빈 · 임지원[†] 

한남대학교 화공신소재공학과

(2018년 5월 29일 접수, 2018년 6월 21일 수정, 2018년 6월 25일 채택)

Effects of Adsorption Voltages and Thickness of Coated Ion Exchange Membrane Layer on Adsorption Performance in Membrane Capacitive Deionization Process

Won Seob Yun, Sol Bin Lim, and Ji Won Rhim[†] 

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

(Received May 29, 2018; Revised June 21, 2018; Accepted June 25, 2018)

초록: 탄소 전극 위에 코팅된 이온교환막 층의 두께가 막 결합형 축전식 탈염 공정에서 흡착성능에 어떠한 영향을 끼치는지 최대흡착에 걸리는 시간과 탈착 시 배출수 농도에 관하여 연구하였다. 이온교환막의 두께는 8 wt% 이온교환고분자 용액의 코팅횟수를 1, 2, 3회로 달리하였을 때, 이온교환막의 두께가 증가됨에 따라 막을 통과하는 이온들의 움직임이 원활하지 않아 탄소전극에 충분히 흡착되지 못하여 배출수 농도의 최소점이 높아졌다. 최대 흡착 시까지 걸리는 시간이 1회 코팅에서 80분, 그리고 2, 3회 코팅에서 각각 174분, 242분으로 증가되었다. 코팅 두께에 따른 최대 흡착 시까지 걸리는 시간이 선형으로 나타났다.

Abstract: The effects of the thickness of the ion exchange layers on carbon electrodes have been studied on the adsorption performance through the operating time to the maximum adsorption and effluent concentrations at the desorption in the membrane capacitive deionized processes. The thicknesses of the ion exchange layers were adjusted with the number of times from 1, 2, and 3 times using 8 wt% of ion exchange polymer solutions. As the thickness of the ion exchange layers on carbon electrodes increased, the minimum concentrations of the effluents increased since the adsorption was not satisfactorily carried out due to the limited movements of ions in feed within the coating layers. The times to the maximum adsorptions were 80 min for one time coating and 174 and 242 min for two, three times coatings, respectively. It was interesting that the linear relationship was found between the thickness of the coating layers and the times to the maximum adsorption.

Keywords: membrane capacitive deionization (MCDI), aminated polysulfone (APSf), sulfonated poly(ether ether ketone), adsorption voltage, membrane thickness.

서 론

담수화 확보에 대한 기술은 중요한 기술 중 하나이며 해수 담수화 처리 기술에 대한 연구는 활발히 진행 중에 있다. 탈염 공정 중 하나인 축전식 탈염(membrane capacitive deionization, CDI) 기술은 전기흡착기술이며 에너지 저감 효과가 큰 기술로 많은 관심을 받고 있다. 축전식 탈염 기술이란 전기이중층의 원

리를 바탕으로 전위를 인가하여 정전기적인 힘에 의해 이온들을 흡착하는 기술로 90% 이상의 회수율을 얻을 수 있으며 환경 친화적인 기술이다.^{1,4} CDI 기술은 흡착 과정과 탈착 과정을 포함하며 다공성 전극의 구조 내에 이온들이 흡착되고 역 전위를 가해 탈착시킴으로써 전극을 재생시키는 반복되는 과정으로 진행된다. 이러한 과정 중에서 탈착 시 전기이중층에 흡착된 이온들이 완전히 탈착되지 않아 재 흡착 시에 흡착 가능한 이온의 양이 감소해 효율이 낮아지는 단점이 있다.⁵⁻⁸

이러한 문제를 해결하기 위해 양이온교환막(CEM)과 음이온교환막(AEM)을 도입하여 이온들을 선택적으로 분리할 수 있는 막 결합형 축전식 탈염(membrane capacitive deionization,

[†]To whom correspondence should be addressed.
jwrhim@gmail.com, ORCID[®] 0000-0001-7803-2959
©2018 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

MCDI)기술이 개발되었다. MCDI는 전해질과 전극이 직접적으로 접촉하는 것을 방지함으로써 전극 표면에 오염이 생기지 않도록 한다. MCDI 모듈은 음이온교환막과 양이온교환막을 겹쳐 결합시키고 두 교환막 사이에 스페이서를 도입하여 공급액이 사이로 지나갈 수 있는 구조로 설정한다. CDI 기술에서의 문제점을 해결하여 이온이 더욱 효율적으로 제거되는 결과를 보였다.⁹⁻¹¹

CDI 및 MCDI 기술의 담수화 성능은 작동 조건 및 전극의 특성과 같은 여러 변수들에 의해 영향을 받으며 전기 전도도, 활성탄의 기공구조 및 비 표면적과 같은 다양한 특성에 의해 영향을 받는 것으로 보고되어 있다.¹²⁻¹⁴ Zhao 등은 성능을 향상시키기 위해 여러 흡/탈착 시간, 공급액 농도, 전류 및 전압을 변수로 하여 염 흡착량 및 속도에 대한 실험적 및 이론적 결과를 보여주며 회수율에 미치는 영향을 제시하고 있다.¹⁵

MCDI 공정에서 이온교환막은 성능에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 먼저 보고된 연구에서는 이온교환고분자를 달리하여 폴리에틸렌(polyethylene), 폴리(테트라 플루오르 에틸렌) poly(tetrafluoroethylene), 폴리카보네이트(polycarbonate), 폴리프로필렌(polypropylene), 폴리(비닐리덴 플루오라이드) (poly(vinylidene fluoride))등과 같은 다양한 유형의 고분자를 이용하여 이온교환막이 적용된 MCDI 연구가 보고된 바가 있으며,¹⁶⁻²¹ 염제거의 효율과 안정성을 향상시키기 위한 연구는 진행되어 오고 있다. 이렇게 MCDI 공정에서 이온교환막에 대한 연구가 진행되는 동안 MCDI 공정과 이온교환막의 두께와 관련된 연구는 거의 없었다. 상업용 이온교환막은 기계적 강도를 위해 일반적으로 매우 두꺼워 높은 전기저항으로 인해 흡착성능을 감소시킨다고 소개되어있는데^{22,23} 이온교환막의 두께와 MCDI 공정에 대해 직접 비교한 연구는 없었다. 따라서 본 연구에서는 이온교환막의 두께에 따른 MCDI 공정에서의 흡착성을 측정함으로써 가장 최적화된 이온교환막의 두께를 알아보기 위해 비교 평가해보고자 한다.

막 결합형 축전식 탈염공정에서 흡착전압과 이온교환막 두께에 따른 흡착성능을 알아보기 위해 0.5, 1.0, 1.4 V의 흡착전압 하에 비교 실험을 진행하였고, 이온교환고분자 두께에 따른 흡착성능 비교 실험에서는 탄소전극에 이온교환고분자 용액을 1, 2, 3회로 코팅을 하여 막의 두께를 달리하였다.

실 험

실험재료. 막 결합형 축전식 탈염공정에서 이용된 양, 음이온교환고분자 제조를 위해 polyether ether ketone(PEEK)와 polysulfone(PSf)을 각각 Victrex®, Solvay plastic에서 구매하여 사용하였으며, 용매로 사용되는 1,2-dichloroethane(DCE), N-methyl-2-pyrrolidone(NMP) N,N-dimethylacetamide(DMAc)는 모두 Junsei(Japan)의 제품을 사용하였다. 촉매제 tin(II) chloride(SnCl₂)와 이민기 도입에 필요한 trimethylamine(TMA),

세척에 필요한 메탄올도 Junsei(Japan)의 제품을 사용하였다. 이 외에 클로로메틸화제로 사용된 chloro methyl ethyl ether(CMEE)는 TCI(Japan)의 제품을 이용하였으며, sulfuric acid(H₂SO₄)와 sodium nitrate(NaCl)는 Samchun(Korea)의 제품을 사용하였다. 다공성 탄소 전극은 Purechem Co.(Korea)의 제품을 이용하였고, 공급액 제조에 필요한 초순수는 영린 기기(한국)로 제조하여 사용하였다.

양이온교환고분자 합성. 양이온교환고분자 sulfonated poly(ether ether ketone)(SPEEK)는 PEEK 고분자를 술폰화하여 제조하였다. PEEK의 수분을 완전히 제거하기 위해 24시간 정도 진공오븐에서 충분히 건조시킨다. 건조된 PEEK 20 g를 35 °C의 항온조에서 빠르게 교반되고 있는 황산에 천천히 넣었다. 40시간 정도 충분히 교반하며 황산과 반응된 SPEEK를 얼음이 담긴 초순수에 부어 반응을 종결시킨 후에 고화된 SPEEK를 세척한 초순수의 pH가 6이 될 때까지 수차례 세척하였다. 세척한 SPEEK는 130 °C의 진공오븐에서 하루 이상 충분히 건조시킨 뒤 용매 NMP에 11 wt%의 양이온고분자 용액을 제조하였다.

음이온교환고분자 합성. 음이온교환고분자 aminated polysulfone(PSf)은 용매 DCE에 PSf 8 wt%의 용액을 제조하고 40 °C의 온도에서 촉매제인 SnCl₂를 첨가하였다. CMEE를 이용하여 클로로메틸화 반응을 4시간 동안 진행시키고 반응시킨 용액을 메탄올로 수차례 세척하여 반응을 종결시킨다. 고화된 고분자를 70 °C의 진공오븐에서 하루정도 충분히 건조시킨 뒤 DMAc에 8 wt%로 녹여 만든 용액에 CMEE와 같은 몰 비로 TMA를 첨가하여 음이온교환고분자 용액을 제조하였다.

이온교환용량(Ion Exchange Capacity, IEC). 막 결합형 축전식 탈염공정에서의 사용되는 이온교환고분자의 이온교환용량은 중요한 요소 중 하나이다. -RSO₃⁻ 작용기를 가진 양이온교환고분자와 -R₄N⁺의 작용기를 가진 음이온교환고분자는 NaCl이나 HCl 용액으로 적정이 가능하다. 이온교환고분자 용액을 막 형태로 만들어 측정하였다. 측정하고자 하는 양이온교환고분자 막을 NaOH 용액에 하루 이상 침적하여 -SO₃Na⁺의 형태로 존재하도록 한다. 침적한 막을 담가놓은 용액에 페놀프탈레인을 떨어뜨려 적색을 띠도록 한 후에 HCl 용액을 용액이 투명하게 변하는 종말점까지 적정을 한다. 이온교환용량은 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$IEC(\text{meq/g}) = \frac{2 \times (V_{\text{NaOH}} \times N_{\text{NaOH}} - V_{\text{HCl}} \times N_{\text{HCl}})}{W_{\text{dry}}} \quad (1)$$

음이온교환고분자의 이온교환용량은 다음과 같이 구하였다. 음이온교환고분자 막을 NaCl 용액에 12시간 정도 침적시키고 막을 증류수로 수차례 세척한다. 세척한 막을 NaNO₃ 용액에 충분히 침적하여 염화이온과 질산이온이 서로 치환되

도록 한다. 중크롬산칼륨을 지시약으로 사용하였으며 지시약을 떨어뜨려 노랗게 변한 용액에 AgNO₃ 용액을 이용하여 적정을 하고 종말점인 적갈색으로 변할 때까지 진행한다. 이온교환용량은 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$IEC(\text{meq/g}) = \frac{2 \times V_{\text{AgNO}_3} \times N_{\text{AgNO}_3}}{W_{\text{dry}}} \quad (2)$$

이 때, W_{dry}는 건조된 막의 무게, V는 적정용액의 부피, N은 적정에 사용된 용액의 농도를 나타낸다.

막 결합형 축전식 탈염 시험. 실험에 사용된 전극은 탄소 전극에 APSf 음이온교환고분자와 SPEEK 양이온교환고분자를 직접 casting knife를 이용하여 직접 코팅하였다. 코팅두께에 따른 실험에서는 각각 1, 2, 3회로 코팅횟수를 달리하였으며, 전극은 100 cm²의 유효면적을 가지고 육각형 형태의 유로를 사용하였다. 실험의 공정도와 내부 모식도는 Figure 1 (a), (b)에 나타내었으며 연동펌프를 통하여 일정한 유량으로 공급해주었고 potentioestat(WonATech Co. WPG 100)을 이용하여 전극에 전위를 인가해주었다. 양 쪽 두 개의 유입구로 공급액이 유입되며 가운데 배출구로 배출수가 나와 conductivity(istek, EC-470L)에서 TDS 값을 도출해내는 형태로 구성되어있다. 배출수로 나온 TDS 값을 이용하여 식 (3)을 이용하여 염 제거 효율을 구하였다.

$$\eta_d(\%) = \left(1 - \frac{C_{\text{eff}}}{C_0}\right) \times 100 \quad (3)$$

이때, C_{eff}는 배출수의 평균 농도를 나타내며 C₀는 공급액의 초기농도를 나타낸다. 공급액의 농도는 NaCl을 사용하여 100 mg/L로 진행하였으며 흡착전압과 이온교환고분자의 두께를 달리하여 각각의 조건에 따른 염 제거 효율을 비교하였다.

결과 및 토론

탄소전극의 표면 및 단면 분석. Casting knife를 이용하여 제조된 탄소전극의 코팅유무를 파악하고 이온교환고분자의 두께를 확인하고자 SEM 분석을 실시하였으며, Figure 2-5에 각각의 표면과 단면 결과를 나타내었다. 코팅하지 않은 탄소전극의 표면은 활성탄의 입자가 확인되며 다공성 형태를 확인할 수 있었고, 단면은 울퉁불퉁한 모습을 나타내었다. 음/양이온고분자로 코팅된 탄소전극의 표면은 모두 매끄러운 모습을 보였으며 단면은 울퉁불퉁한 활성탄 위로 이온교환고분자 용액이 얇게 코팅된 것을 확인할 수 있었다. APSf와 SPEEK 이온교환고분자로 1회 코팅한 경우 4.21, 3.49 μm, 2회 코팅한 경우 8.07, 10.6 μm, 3회 코팅한 경우는 14.4, 15.6 μm의 두께로 코팅이 된 모습을 나타내었다.

이온교환용량. 막 결합형 축전식 탈염공정에서 사용되는 이온교환고분자의 물성이나 특성은 이온교환능력에 큰 영향을 끼치며 작용기의 함유량을 나타낸다. APSf 음이온교환막은 TMA와 PSf 고분자 대비 2:1의 몰 비로 제조한 용액을 이용

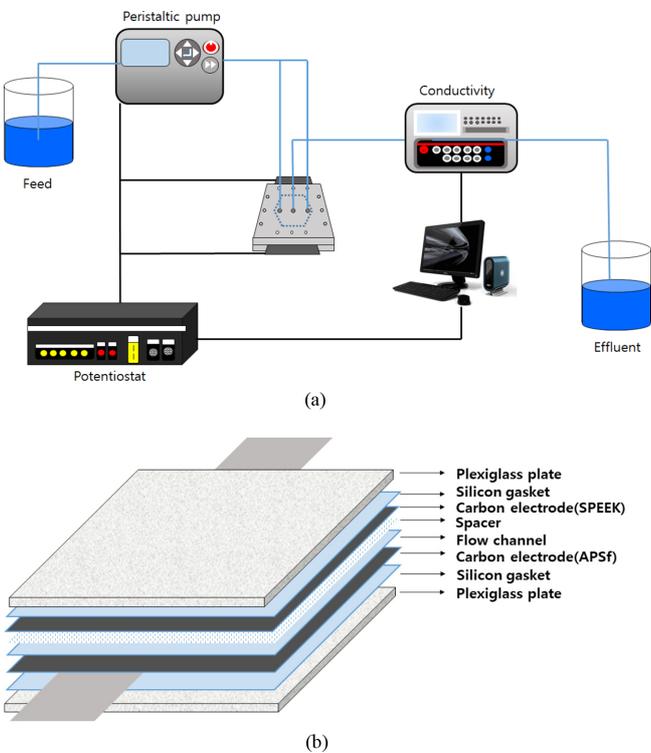


Figure 1. Schematic diagram of (a) experimental apparatus; (b) MCDI cell configuration.

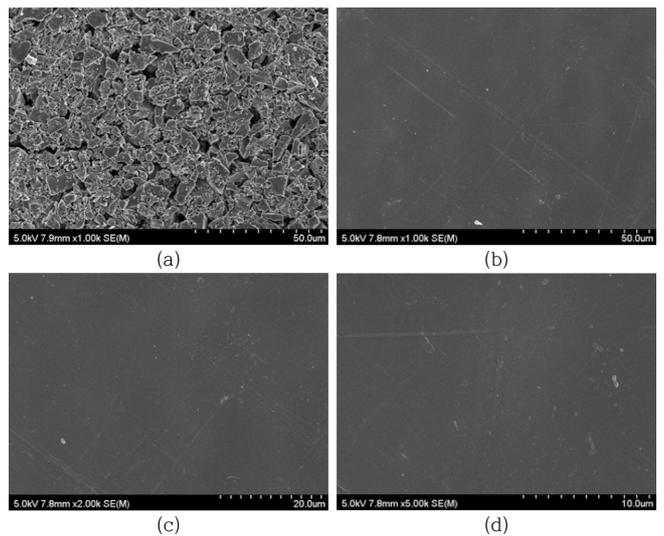


Figure 2. SEM images of surfaces of (a) plain carbon electrode; (b) one time APSf coated on the carbon electrode; (c) APSf coated two times on the electrode; (d) APSf coated three times on the carbon electrode.

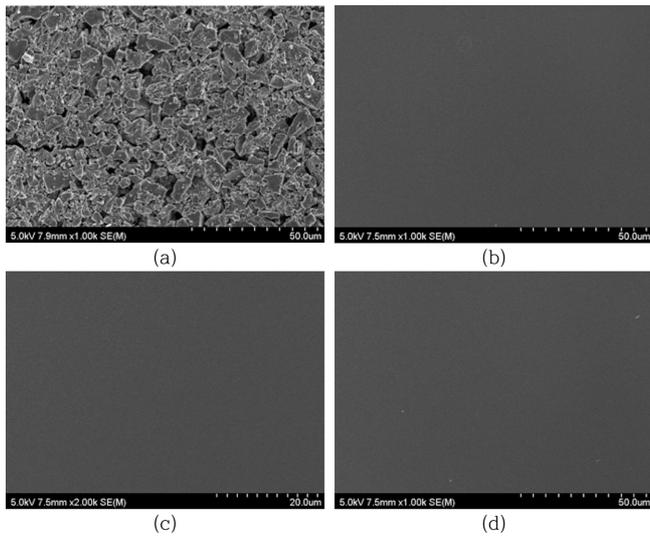


Figure 3. SEM images of surfaces of (a) plain carbon electrode; (b) one time SPEEK coated on the carbon electrode; (c) SPEEK coated two times on the carbon electrode; (d) SPEEK coated three times on the carbon electrode.

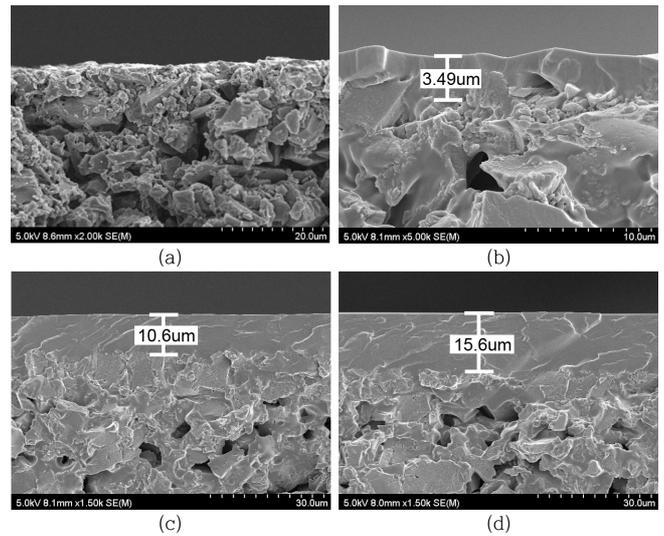


Figure 5. SEM images of the cross-section of (a) plain carbon electrode; (b) one time SPEEK coated on the carbon electrode; (c) SPEEK coated two times on the carbon electrode; (d) SPEEK coated three times on the carbon electrode.

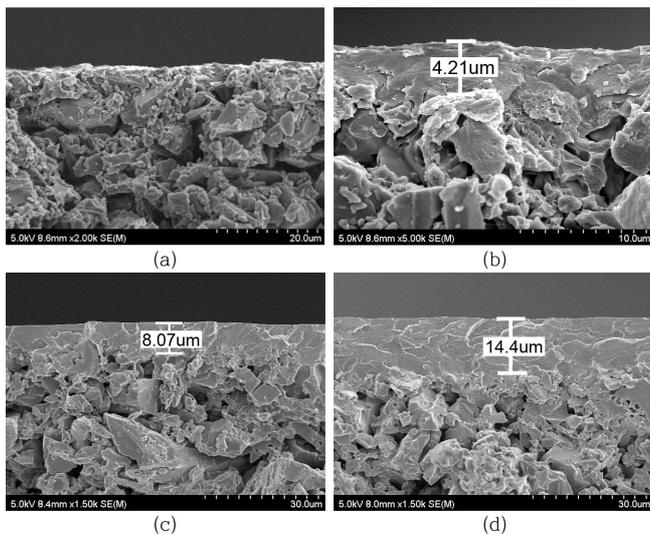


Figure 4. SEM images of the cross-section of (a) plain carbon electrode; (b) one time APSf coated on the carbon electrode; (c) APSf coated two times on the electrode; (d) APSf coated three times on the carbon electrode.

하여 이온교환용량을 측정하였다. 아민기의 비율이 증가되면 이온교환용량은 증가하지만 막의 물성이 약해져 염 제거 효율에 영향을 끼친다. 합성된 APSf 음이온교환막의 이온교환용량은 2.01, SPEEK 양이온교환막의 이온교환용량은 2.64 meq/g으로 측정되었다.

흡착전압에 따른 MCDI 실험. 흡착전압은 막 결합형 축전식 탈염공정에 있어서 탈염효율에 영향을 끼치는 중요한 요

소 중 하나이다. 흡착전압이 높을수록 탈염효율이 증가하는 것은 일반적이지만 일정 이상의 전압이 가해지게 되면 물의 전기분해로 인해 MCDI 시스템에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다. 물의 산화반응으로 인해 부분적으로 CO₂로 변해 탄소 기공이 손실되어 탈염효율에 저하를 초래하며, 최근에는 장기간의 CDI 공정은 산화반응이 기공 구조를 변화시켜 기공 부피가 감소되어 전극의 노화를 발생시키고, 원하지 않는 부산물의 생성으로 인해 탈염의 성능 저하를 가져온다.²⁴⁻²⁸ 이러한 부분은 계속된 연구가 필요한 상황이다. 물 분해 전압은 1.2~1.5 V의 범위에서 발생된다고 보고되고 있으며, 흡착전압에 따른 MCDI 실험에서 0.5, 1, 1.4 V의 흡착전압에 따른 실험을 진행하였다. APSf 음이온교환고분자와 SPEEK 양이온교환고분자를 1회 코팅한 탄소전극으로 제작하여 진행하였다. 실험조건으로는 공급액 NaCl 100 mg/L, 유속 15 mL/min으로 고정하였고, 각각 0.5, 1, 1.4 V의 흡착전압으로 계속 인가해주었다. Figure 6은 흡착전압 0.5, 1.0, 1.4 V에 따른 배출수 농도를 나타낸 그래프이다. 0.5 V의 흡착전압에서는 흡착이 진행되고 빠르게 배출수 농도가 감소되며 50초 부근에서 15 mg/L의 배출수 농도를 나타내고 서서히 증가하였다. 그리고 흡착이 계속 진행되어 전극이 더 이상 이온들을 흡착할 수 없는 최대 흡착 시까지 걸리는 시간을 측정하였으며, 시간은 약 52분이 소요되었다. 다음 흡착전압 1 V로 인가하며 실험을 진행하였을 때의 배출수 농도는 0 mg/L의 최소점을 나타내었고 약 4분 정도 최소점에서 머물다가 서서히 증가하였다. 흡착전압 1 V의 조건에서 전극이 포화되어 최대 흡착 시까지 걸리는 시간은 약 80분이 소요되었다. 흡착전압 1.4 V의 조건에서도 마찬가지로 앞서 진행한 실험 흡착전압 1 V와

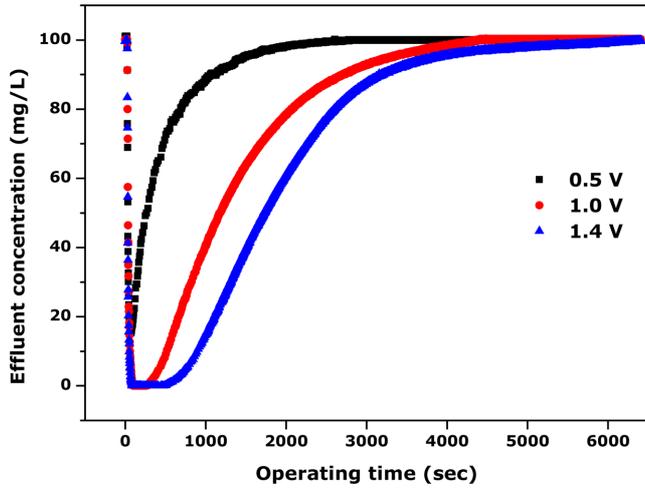


Figure 6. Effluent concentration in accordance with the adsorption voltage.

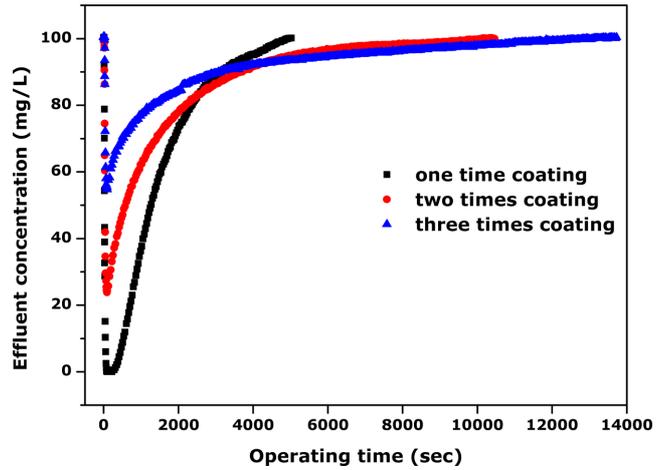


Figure 7. Effluent concentration in accordance with the thickness of the ion exchange polymer layer.

동일하게 0 mg/L의 최소점을 보였으며 약 8분 정도 최소점을 유지하고 서서히 증가하였다. 흡착전압 1.4 V의 실험조건에서 전극이 포화되어 최대 흡착 시까지의 시간은 약 100분이 소요되었다. 흡착전압에 따라 최대 흡착까지의 시간이 달라졌으며, 흡착전압이 높을수록 운전시간이 증가함을 보였다. 흡착전압이 높을수록 강한 인력이 작용하여 이온들을 보다 오랫동안 많은 양을 전극에 흡착시킬 수 있는 것으로 사료된다.

이온교환고분자 두께에 따른 MCDI 실험. 앞서 언급한 CDI는 탈염의 성능 저하를 나타낸 것과는 달리 MCDI는 장시간 운전에서도 안정된 운전 성능을 보였다. 막 증류공정에서도 막 두께는 중요한 요소 중 하나이며 얇은 막은 저농도에서, 두꺼운 막은 고농도에서 사용해야 적절하다고 소개되어 있다.²⁹⁻³¹ Figure 7은 MCDI 공정에서 이온교환고분자의 두께와의 관계를 나타낸 그림이며 이를 알아보기 위해 탄소전극에 이온교환고분자 용액 코팅횟수를 1, 2, 3회로 달리하여 실험을 진행하였다. 이온교환막의 두께는 코팅횟수가 1회일 때 평균 3.85 μm , 2회일 때 9.3 μm , 3회일 때 15 μm 의 이온교환막 두께를 나타내었다. 실험조건으로는 공급액 NaCl 100 mg/L, 유속 15 mL/min, 흡착전압 1 V로 고정하였다. 이온교환고분자 용액 1회 코팅한 경우 배출수 농도의 최소점이 0 mg/L을 나타내었으며 2회 코팅의 경우 24.1 mg/L, 3회 코팅에서는 55.1 mg/L의 배출수 농도를 보였다. 다음 전극이 포화되어 최대 흡착 시까지 걸리는 시간을 비교하면 1회 코팅의 경우 4 분가량 최소점을 유지하고 최대 흡착 시까지 약 80분 소요되었으며 2, 3회 코팅횟수의 경우에는 각각 174분, 242분의 운전시간을 보였다. Figure 8은 코팅횟수에 따른 최대 흡착 시까지 걸리는 시간을 나타낸 그림으로 그래프의 모습이 선형으로 나타났다. 그래프로 보아 코팅 두께에 따른 최대 흡착 시까지 걸리는 시간을 예측할 수 있을 것이고 추후에 관련된

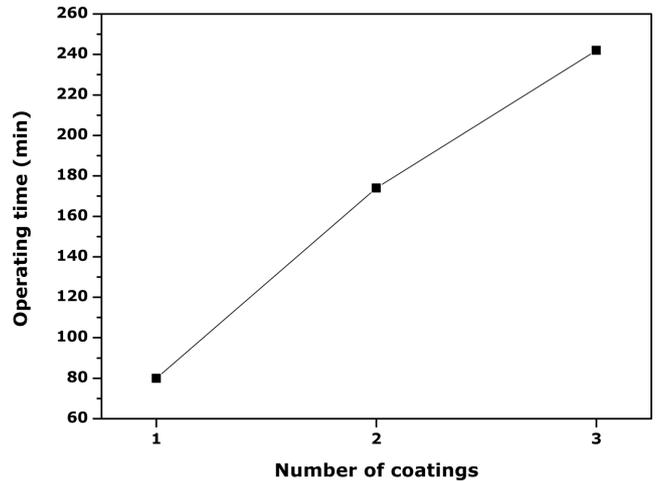


Figure 8. Relationship between the operating time and the number of coating.

어 실험을 진행할 예정이다. 이온교환막 두께에 따른 실험결과로 보아 막의 두께가 증가할수록 배출수 농도의 최소점이 올라가고 최대 흡착 시까지의 시간이 증가하였다. 이온교환막의 두께가 두꺼워지면 이온들의 움직임이 원활하지 않아 흡착 시 이온교환막을 통과한 이온들이 탄소전극에 충분히 흡착되지 못하기 때문에 배출수 농도의 최소점이 높아지고 이온들의 움직임에 영향을 끼쳐 전극이 최대로 흡착되기까지의 시간이 증가된 것으로 사료된다.

결론

논문에서는 흡착전압과 코팅된 이온교환막의 두께가 막 결합형 축전식 탈염공정에서 흡착성능에 미치는 영향을 알아보 고자하였다. 이를 진행하기 위하여 흡착전압을 0.5, 1, 1.4 V

로 달리하였고 이온교환고분자 용액을 1, 2, 3회의 코팅횟수로 이온교환막 층의 두께를 달리하여 흡착성능을 알아보았다. 카본 전극 위의 APS와 SPEEK의 이온교환막 층 두께는 1회 코팅한 경우 4.21, 3.49 μm , 2회 코팅은 8.07, 10.6 μm , 3회 코팅은 14.4, 15.6 μm 의 두께를 SEM 분석을 통해 확인하였다.

흡착전압을 달리하여 실험한 결과 흡착전압 0.5 V 조건에서 배출수 농도의 최소점은 13~15 mg/L이었으며 1, 1.4 V의 흡착전압에서는 배출수 농도의 최소점이 0 mg/L을 나타내었다. 전극이 더 이상 이온들을 흡착할 수 없는 최대 흡착 시까지의 시간은 0.5 V의 흡착전압에서 52분, 1과 1.4 V의 조건에서는 각각 80분, 100분의 시간을 보였다. 이러한 결과는 흡착전압이 높을수록 강한 인력이 작용하여 보다 많은 이온들을 전극에 흡착시켜 배출수 농도의 최소점이 낮아지고 전극에 이온들을 오랫동안 흡착시킬 수 있어 최대 흡착 시까지의 시간이 증가된 것으로 사료된다.

다음 이온교환막 두께에 따른 흡착성능 비교 실험에서는 이온교환고분자 용액의 코팅횟수를 1, 2, 3회로 하여 이온교환막의 두께를 달리하였다. 1회 코팅한 경우 배출수 농도의 최소점은 0 mg/L을 나타내었으며 코팅횟수 2, 3회의 경우 각각 24.1 55.1 mg/L의 배출수 농도를 보였다. 이온교환막의 두께가 증가될수록 배출수 농도의 최소점이 높아졌다. 다음 전극의 최대 흡착 시까지 걸리는 시간은 1회 코팅에서 80분, 2, 3회 코팅에서 각각 174분, 242분을 나타내었다. 코팅횟수와 운전시간의 상관관계는 선형으로 나타났으며 그래프로 보아 이온교환막 두께에 따른 운전시간의 예측이 가능할 것으로 보이며 추후에 관련되어 실험을 진행할 예정이다. 이온교환막의 두께가 두꺼울수록 막을 통과하는 이온들의 움직임이 원활하지 않아 탄소전극에 충분히 흡착되지 못하여 배출수 농도의 최소점이 높아지고 전극이 최대로 흡착되기까지의 시간이 증가된 것으로 사료된다. 막 결합형 축전식 탈염공정에서 이온교환막의 두께와 흡착성능의 관계를 관찰할 수 있었으며 얇은 이온교환막에서 더 좋은 흡착성능을 나타낸다.

감사의 글: 본 연구는 환경부 “글로벌탈 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임(과제번호: 2016002200001).

참 고 문 헌

1. M. A. Anderson, A. L. Cudero, and J. Palma, *Electrochim. Acta*, **55**, 3845 (2010).
2. T. J. Welgemoed and C. F. Schutte, *Desalination*, **183**, 327 (2005).
3. Y. J. Kim and J. H. Choi, *Appl. Chem. Eng.*, **23**, 474 (2012).
4. T. J. Welgemoed and C. F. Schutte, *Desalination*, **183**, 1 (2005).
5. K. W. Kang and T. S. Hwang, *Membr. J.*, **25**, 406 (2015).
6. J. H. Ryu, T. J. Kim, T. Y. Lee, and I. B. Lee, *J. Taiwan Inst. Chem. E.*, **41**, 506 (2010).
7. Y. J. Kim and J. H. Choi, *Water Res.*, **44**, 990 (2010).
8. J. W. Lee, H. I. Kim, H. J. Kim, H. S. Shin, J. S. Kim, B. I. Jeong, and S. G. Park, *J. Korean Electrochem. Soc.*, **12**, 287 (2009).
9. J. B. Lee, K. K. Park, H. M. Eum, and G. W. Lee, *Desalination*, **196**, 125 (2006).
10. Y. J. Kim and J. H. Choi, *Water. Res.*, **44**, 990 (2010).
11. H. Li and L. Zou, *Desalination*, **275**, 62 (2011).
12. S. Nadakatti, M. Tendulkar, and M. Kadam, *Desalination*, **268**, 182 (2011).
13. S. Porada, L. Weinstein, R. Dash, A. Van Der Wal, M. Bryjak, Y. Gogotsi, and P. Biesheuvel, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **4**, 1194 (2012).
14. J. Lim, N.-S. Park, J.-S. Park, and J.-H. Choi, *Desalination*, **238**, 37 (2009).
15. R. Zhao, O. Satpradit, H. H. M. Rijnaarts, P. M. Biesheuvel, and A. van der Wal, *Water Res.*, **47**, 1941 (2013).
16. N. Kang, J. Shin, T. S. Hwang, and Y.-S. Lee, *React. Funct. Polym.*, **99**, 42 (2016).
17. H. Kang, M. S. Lee, W. J. Shin, T. H. Yang, K. H. Shin, Y. G. Shul, and Y. W. Choi, *J. Membr. Sci.*, **460**, 178 (2014).
18. J. Y. Shon, B. H. Park, J. M. Song, Y. M. Lee, and J. Shin, *Polym. Korea*, **37**, 649 (2013).
19. T. Yamaguchi, F. Miyata, and S. Nakao, *J. Membr. Sci.*, **214**, 283 (2003).
20. T. Y. Son, J. S. Yun, S. I. Han, and S. Y. Nam, *Membr. J.*, **27**, 399 (2017).
21. T. Y. Son, J. H. Kim, C. H. Park, and S. Y. Nam, *Membr. J.*, **27**, 336 (2017).
22. T. Xu, *J. Membr. Sci.*, **263**, 1 (2005).
23. Q. Qiu, J. H. Cha, Y. W. Choi, J. H. Choi, J. Shin, and Y. S. Lee, *Desalination*, **417**, 87 (2017).
24. X. Gao, A. Omosebi, J. Landon, and K. Liu, *J. Electrochem. Soc.*, **161**, 159 (2014).
25. S. Porada, L. Borchardt, M. Oschatz, M. Bryjak, J. S. Atchison, K. J. Keesman, S. Kaskel, P. M. Biesheuvel, and V. Presser, *Energy Environ. Sci.*, **6**, 3700 (2013).
26. E. Bayram and E. Ayranci, *Electrochim. Acta*, **56**, 2184 (2011).
27. I. Cohen, E. Avraham, Y. Bouhadana, A. Soffer, and D. Aurbach, *Electrochim. Acta*, **153**, 106 (2015).
28. J. J. Wouters, J. J. Lado, M. I. Tejedor-Tejedor, R. Perez-Roa, and M. A. Anderson, *Electrochim. Acta*, **112**, 763 (2013).
29. A. Omosebi, X. Gao, J. Landon, and K. Liu, *ACS Appl. Mat. Interfac.*, **6**, 12640 (2014).
30. F. Laganà, G. Barbieri, and E. Drioli, *J. Membr. Sci.*, **166**, 1 (2000).
31. L. Eykens, I. Hitsov, K. De Sitter, C. Dotremont, L. Pinoy, I. Nopens, and B. Van der Bruggen, *J. Membr. Sci.*, **498**, 353 (2016).