

전기투석 시스템에서 고농도 수용액의 한계 농축에 대한 연구

장준수* · 김범주*,**,†

*공주대학교 미래융합공학과, **공주대학교 기계자동차공학부
(2022년 12월 28일 접수, 2023년 1월 20일 수정, 2023년 1월 25일 채택)

Experimental Studies on Limiting Concentration of High Saline Feed Solution in Electrodialysis

Junsu Jang* and Bumjoo Kim*,**,†

*Department of Future Convergence Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea
**Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea
(Received December 28, 2022; Revised January 20, 2023; Accepted January 25, 2023)

초 록

전기투석에서 농축 공정은 전기 에너지를 이용하여 전해질 수용액 상의 이온의 농도를 증가시키는 기술로, 이온교환막에서 일어나는 이온과 물 분자의 전달 현상에 대해 많은 연구들이 진행되고 있다. 본 연구에서는 전기투석 시스템에서 고농도 전해질 수용액의 전기 삼투에 의한 농축 현상에 대한 실험을 통해 한계 농축 현상에 대한 변수를 분석한다. 두 가지 전해질 수용액(NaCl 2M / 4M)에 대해 이온과 물 분자의 투과량을 측정해 전기 삼투 현상을 분석하였고, 농축조 대비 탈염조의 부피 비에 따른 한계 농축 현상을 관찰하였다. 실험 결과, 전해질 수용액의 농도가 높을수록 전기 삼투가 감소하였고, 부피 비가 클수록 탈염수의 농도가 높게 유지되기 때문에 한계 농축 농도가 증가하고 비에너지 소모가 감소됨을 확인하였다.

Abstract

The salt concentration process in electrodialysis, which uses electrical energy to enhance ion concentrations in an aqueous electrolyte solution, has been studied on the transfer phenomenon of ions and water molecules over the ion exchange membrane. In this paper, we investigated various parameters for limiting concentration of electrolyte solution and the electroosmosis phenomenon in an electrodialysis system by varying salt concentration of electrolyte solution. The electroosmotic water transport was analyzed by measuring the ions and water fluxes in electrolyte solutions having two different NaCl concentrations (NaCl 2M/4M), and concentration change was observed for various volume ratios of the diluted reservoir to the concentration one. As a result, it was found that the higher concentration of the aqueous electrolyte solution, the lower electroosmosis, and the higher volume ratio led to a higher concentration in the dilute reservoir, so the limiting concentration was enhanced and the specific energy consumption decreased.

Keywords: Electrodialysis, High saline solution, Limiting concentration, Electroosmosis

1. 서 론

농축은 수용액 상의 이온이나 염의 농도를 증가시키는 공정으로 열 에너지를 이용한 증발법[1], 분리막을 활용한 여과법[2], 전기에너지를 이용한 전기막(electromembrane) 공정[3] 등의 탈염 공정 기반의 담수화 기술을 활용할 수 있다. 이 중 전기막 공정의 대표 기술인 전기투석(electrodialysis)은 시스템 설계 및 제작의 자유도가 높아 장치의 확장성이 높고, 전기에너지로 구동되는 지속 가능한 친환경 에너지

기술로 많은 장점을 가진다[4]. 전기투석의 기본적인 구동 방식은 전기장 하에서 전해질 수용액에 존재하는 이온들을 분리하는 것으로 양이온 교환막(cation exchange membrane, CEM)과 음이온 교환막(anion exchange membrane, AEM)에 의해 탈염 채널과 농축 채널이 순차적으로 분리되어 있다.

전기투석에서 농축은 이론적으로 인가해주는 전류에 비례해야 하지만, 이온이나 물 분자의 이동이 역방향으로 일어나는 원하지 않는 현상에 의해 오히려 농축이 방해되어 농축수의 농도 증가가 한계에 부딪힐 수 있다[5-7]. 이와 관련해, 초기에는 이온의 종류[6]나 전류 밀도[8]에 따른 물 분자 전달과 관련된 기초적인 연구들이 진행되었으나 실제 전기투석 작동 환경과는 거리가 먼 조건에서 실험이 진행되었다. 이 후에 실제 전기투석 시스템에서 수화 된 이온의 이동에 의한 전기삼투(electroosmosis)와 농도 차로 야기되는 삼투(osmosis)에 의한 농

† Corresponding Author: Kongju National University
Department of Mechanical & Automotive Engineering, Cheonan 31080, Korea
Tel: +82-41-521-9267 e-mail: bumjoo@kongju.ac.kr

축 효율 저하에 대한 다양한 실험[9-11]과 이론적인 해석이 진행되었고[12,13], 이온교환막의 표면 처리 및 막 자체의 화학적 구조를 변형[14,15]하거나 다단계 공정[16]을 도입해 한계 농축 농도를 향상시키는 응용 연구도 진행되었다. 하지만, 이 같은 연구들은 대부분 초기 전해질 수용액의 농도가 저농도 (< 3.5 wt%) 영역에서 수행되었고 한계 농축 농도에 대한 연구가 필요한 고농도 영역에서는 충분한 연구가 보고되지 않았다. 최근에는 고농도 전해질 수용액의 한계 농축 농도에 대한 연구가 많이 보고되고 있는데 염화리튬(LiCl)/브로민화리튬(LiBr)/염화칼슘(CaCl₂)[17] 혹은 염화리튬(LiCl)/염화나트륨(NaCl)[18, 19] 고농도 수용액의 다양한 구동 조건(e.g. 초기 수용액 농도, 전류 밀도, 유속 등)에 따른 한계 농도에 대한 연구들이 진행되었는데, 공통적인 결론으로 초기 전해질 수용액의 농도가 한계 농축 농도에 지배적인 영향을 미친다고 보고되었다. 하지만 한계 농축 농도에 영향을 주는 전기 삼투나 삼투에 대해 구체적인 명칭이나 구별이 없고, 인가해 준 전류 밀도 또한 광범위한 영역이 아닌 상대적으로 저 전류에서만만 진행되었다는 한계가 있다.

따라서 본 연구는 전기 삼투에 의한 고농도 용액의 한계 농축 현상에 대해 알아보기 위해 전기투석 시스템에서 고 전류 밀도($J > 125 \text{ mA/cm}^2$)를 인가하여 한계 농축 현상을 관찰하였다. 전해질 수용액의 초기 농도에 따른 전기 삼투를 비교하기 위해 고농도의 염화나트륨(NaCl) 수용액 2M과 4M을 사용하여 염 전달량(salt transport)과 전기 삼투 효과를 상대적으로 비교하였다. 또한 한계 농축 농도를 향상시키기 위해 탈염조의 부피를 증가시켜 부피 비에 따른 농축 농도 증가량과 비에너지와의 관계를 분석하였다.

2. 실험

2.1. 이론 및 정의

이온교환막을 통한 전달 현상에서 이온의 경우, 인가된 전기장에 의한 전기 이동(electromigration)과 농도 차(concentration gradient, ΔC)에 의한 역 확산(back diffusion)이 있고, 물의 경우, 이온 표면에 수화 된 상태로 전기 이동과 커플링에 의한 전기 삼투(electroosmosis)와 농도 차에 의한 삼투(osmosis)가 있다[3](Figure 1). 이들 중 이온이 이동하는 역 확산과 물 분자가 이동하는 전기 삼투 및 삼투 현상은 농축 채널의 농도 증가를 저해하는 것으로 한계 농축 현상을 야기시킨다

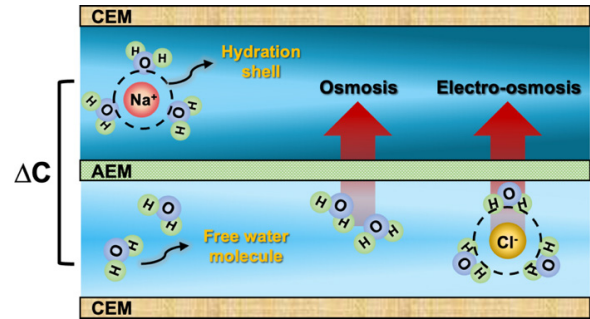


Figure 1. Schematic illustration of the water transport through the ion exchange membrane in electrodesis.

[12,13,20]. 본 연구에서는 전기 삼투만의 효과를 고려하기 위해 고 전류 밀도($J > 125 \text{ mA/cm}^2$)를 인가하여 역 확산과 삼투 현상을 최소화 하였다[11,21,22]. 또한 전해질 수용액의 농도에 따라 염 수화 수(salt hydration number)가 달라지고, 이는 전기 삼투 현상에 영향을 미칠 수 있으므로, 유입수의 전해질 농도를 NaCl 2M (11.03 wt%)과 4M (20.81 wt%)의 두가지로 준비하였다[6,9,10].

이온교환막을 통과하는 이온과, 물 투과량(flux)을 다음과 같이 정의하였다[16].

$$J_s = \frac{C_{c,t}V_{c,t} - C_{c,0}V_{c,0}}{2NA t} [\text{mmol/m}^2 \cdot \text{s}] \quad (1)$$

$$J_w = \frac{V_{c,t} - V_{c,0}}{36NA t} [\text{mmol/m}^2 \cdot \text{s}] \quad (2)$$

J_s 와 J_w 는 이온교환막을 통과하는 염과 물 투과량; C 는 몰 농도; V 는 부피; N 는 셀의 개수; A 는 단위 이온교환막의 유효 면적; t 는 작동 시간이다. 하 첨자 c 는 농축조, 0은 초기값을 지칭한다.

2.2. 실험 장비 및 방법

Figure 2a는 본 실험에 사용한 전기투석 스택 구성을 보여준다. 양이온 교환막과 음이온 교환막(Neocepta ASE/CSE; Tokuyama CO.,

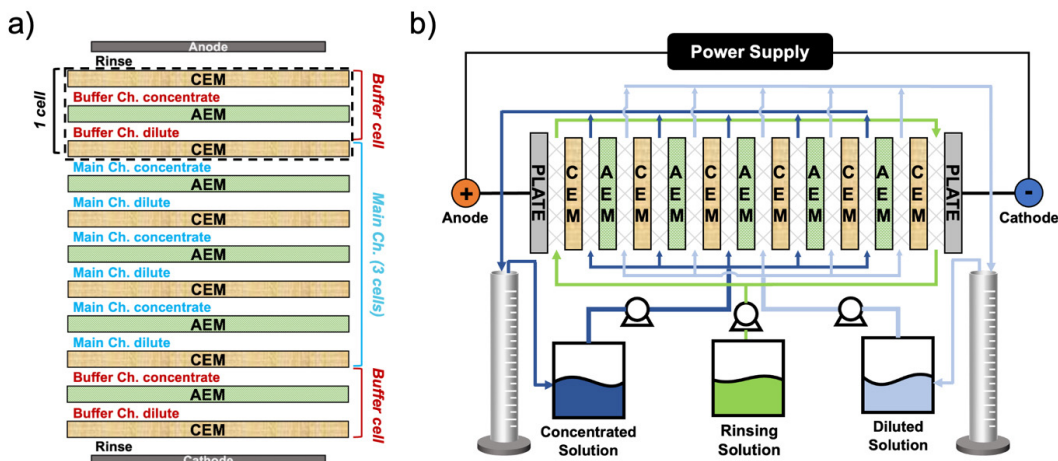


Figure 2. Schematics of (a) the ion exchange membranes arrangement for a five-compartment cells (two buffer cells, three main cells) and (b) the experimental setup.

Japan)을 각각 여섯 개, 다섯 개를 사용하여 다섯 개의 셀(cell-pair)로 구성된 전기투석 디바이스를 사용하였다. 종단의 두개의 셀은 버퍼 셀로써, 전극 반응이 메인 채널에 영향을 주는 것을 최소화하기 위해 구성하였고, 가운데 세 개의 셀에서 농축 실험을 진행하였다. Figure 2b는 전체적인 실험 구성을 나타냈다. 단일 배치 모드(single stage batch mode)를 이용하여 농축조와 탈염조를 분리하여 재순환시키는 방법을 채택하였다. 맥동 펌프(WT600-2J, Longer Precision Pump CO., LTD., Baoding, China)를 이용하여 농축 및 탈염 채널에 각각 100 mL/min 의 유량으로 NaCl 수용액 2M과 4M을 주입하였고, 버퍼 채널(NaCl 2M/4M)과 린싱 채널(K₄Fe(CN)₆, 0.5M)에 각각 400 mL/min의 유량을 공급하였다. 전원 공급장치(Model 382276, Extech Instruments, Nashua, NH)를 이용하여 전압 및 전류를 인가하였으며 전기 삼투에 의해 이온교환막을 통과하는 물의 양을 실시간으로 측정하기 위해 매스 실린더로 농축조와 탈염조의 부피 변화를 측정하였다. 전해질 수용액의 농도를 실시간으로 측정하기 위해 농축조와 탈염조에 전도도 미터(Orion Star A215 pH/conductivity meter; Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 한계 농축 현상과 전기 삼투

전기 삼투에 의한 한계 농축 현상을 관찰하기 위해 NaCl 수용액 2M과 4M에 대해 전류 밀도를 각각 125, 250 mA/cm²을 인가한 후 농축과 탈염수의 농도 변화를 관찰하였다(Figure 3a). 점선으로 표기된 C_{cth}는 물 분자 전달이 없는 이상적인 조건에서의 전해질 수용액의 농축 농도를 나타내고, 여기서 C_{th,lim} (분홍색 점선)은 NaCl의 용해도를 기준으로 계산한 이론적인 최대 농도이다[23]. 탈염 채널의 농도 변화만큼 농축 채널의 농도가 증가해야 하지만, 실제 농축 농도(C_c)는 이론 농축 농도(C_{cth})에 비해 현저히 낮은 것을 관찰 할 수 있다. 다시 말해, 한계 농축 농도가 형성 되는 것을 확인할 수 있는데 이를 더 자세히 살펴보기 위해 농축조의 부피 변화(water transport, mL)와 이온 교환막을 통해 전달된 염의 양(salt transport, mmol)을 각각 알아보았다(Figure 3b). NaCl 2M과 4M의 염의 전달량은 각각 117과 231 mmol로 인가한 전류 밀도의 차이만큼 두 배 정도 차이가 남을 확인할 수 있다. 이에 반해 농축조의 부피 변화는 NaCl 2M과 4M에서 각각 100, 175 mL로 증가하였는데, 이는 인가한 전류 밀도의 차이인 2배에 미치지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이는 전해질 수용액의 농도가 높을 수록 이온과 결합한 물 분자의 수인 염 수화 수가 작기 때문에[17,18] NaCl 4M에서 상대적으로 전기 삼투 현상이 덜 나타난 것으로 추정된다.

3.2. 염 대비 수 투과율 비교

Figure 3b에서 관찰한 농축조의 부피 변화가 인가한 전류 밀도의 비율과 일치하지 않는 이유를 더 자세히 알아보기 위해 물과 염의 투과 비율을 농도 변화에 따라 추적 관찰하였다(Figure 4). 가로축의 정규 농도 차(normalized concentration difference)는 전해질 수용액의 초기 농도 대비 농축과 탈염 채널의 농도 차로 정의되는데, 이상적으로 탈염 채널의 염이 물 전달 없이 농축 채널로 모두 이동했을 때 1의 값을 갖지만, 실제 실험에서는 전기 삼투에 의해 정규 농도 차가 1보다 작은 값을 갖게 된다. 해당 그래프에서, 정 전류를 인가했기 때문에 NaCl 2M과 4M의 염 투과량(J_s)은 예상대로 일정한 것을 확인할 수 있고, NaCl 2M일 때 염 대비 수 투과율(J_w / J_s)은 정 전류에 의해 전기 삼투 또한 거의 일정함을 확인할 수 있다. 하지만 NaCl 4M의 염

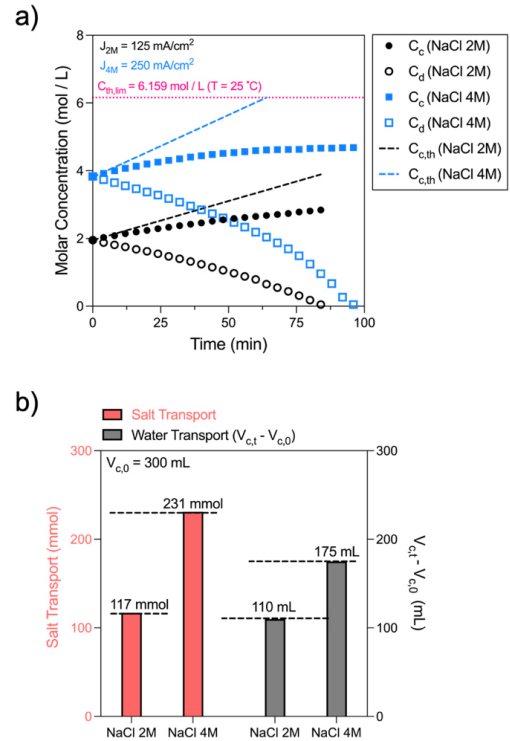


Figure 3. (a) Concentration changes of NaCl 2M and 4M solution. (b) Salt and water transport through the ion exchange membranes in NaCl 2M and 4M.

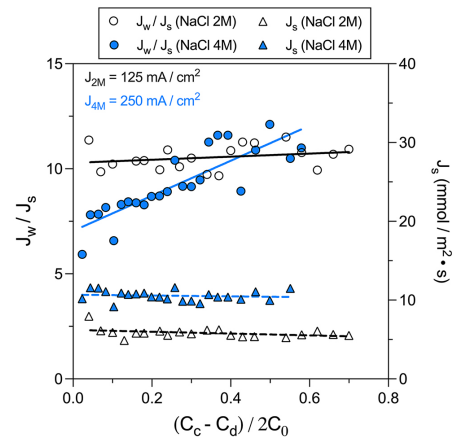


Figure 4. Water to salt flux ratio (J_w / J_s) and salt flux (J_s) in NaCl 2M/4M solution.

대비 수 투과율은 초기에는 2M에 비해 낮은 값을 갖다가 정규 농도 차가 증가할수록 2M과 비슷한 경향을 보인다. 이는 앞서 언급한대로 전해질 수용액의 초기 농도가 높을수록 더 작은 염 수화 수를 가져 [18], 전기 삼투의 양이 크지 않다. 하지만 정규 농도 차가 증가함에 따라 탈염수의 농도가 감소하고, 염 수화 수가 증가하여 전기 삼투가 증가했기 때문이다. 다만, NaCl 2M에 비해 4M일 때 염 대비 수 투과율의 증가가 더 두드러지게 보이는 이유는 구동 초기인 4M일 때 염 대비 수 투과율 자체가 훨씬 낮고 Figure 4의 가로축이 절대 농도 차가 아닌 정규 농도 차로 표시했기 때문이다. 따라서 고농도 전해질 수용액에서 염 수화에 의한 전기 삼투 현상을 최대한 막기 위해서는 탈

염수의 급격한 농도 감소를 막고 고농도로 지속적으로 유지시키는 것이 필요하다.

3.3. 부피 비에 따른 한계 농축 농도와 비에너지 소모

앞서 논의했던 탈염수의 농도와 전기 삼투와의 상관관계를 실험으로 증명하기 위해 NaCl 4M에 대해 다양한 농축조 대비 탈염조의 부피(용량) 비에 따른 농축수의 농도 변화를 관찰하였다(Figure 5). 여기서 부피 비(Volume Ratio, VR)는 농축조의 부피를 탈염조의 부피로 나눈 값으로 정의되며($VR = V_d / V_c$), 본 실험에서는 농축조의 부피를 300 mL로 고정하였고, 탈염조의 부피를 각각 150 mL ($VR = 0.5$), 300 mL ($VR = 1$), 600 mL ($VR = 2$)로 설정하였다. 부피 비가 클수록 더 높은 한계 농축 농도를 가지는데(Figure 5a), 삼투 효과가 작다고 가정하면, 부피 비가 클수록 전기 삼투에 의한 농축 한계 현상이 완화되는 것으로 판단할 수 있다. 이는 앞서 논의한, 탈염수의 농도가 높게 유지될수록, 염 수화 수가 낮아지면서 전기 삼투를 감소시켜 전해질 수용액의 농축 농도를 증가시킬 수 있다는 결과와 일치하는 경향을 나타냈다. 본 실험을 통해 한계 농축 농도는 부피 비가 0.5, 1, 2 일 때 각각 4.32, 4.68, 5.39 mol/L로 측정되었다(Figure 5b). 부피 비와 한계 농축 농도와의 관계를 바탕으로, 부피 비가 0.5인($VR = 0.5$) 조건의 한계 농축 농도($C_{c,lim,VR=0.5} = 4.23 \text{ mol/L}$)를 기준으로 소모되는 비에너지(specific energy, kW/kg)를 계산하였고(Figure 5c), 다음과 같이 정의된다.

$$E = \frac{NVI}{(C_{c,t}V_{c,t} - C_{c,0}V_{c,0})M} [\text{kW/kg}] \quad (3)$$

E 는 비에너지; V 는 전압; I 는 전류; M 은 NaCl의 몰 질량(58.5 g/mol)이다[16]. 부피 비가 클수록 특정 농도까지 농축시키는 데 필요한 비에너지가 작은 것을 알 수 있는데, 이는 부피 비가 클수록 탈염수의 농도가 상대적으로 느리게 감소하기 때문이다. 이 같은 이유로 상대적으로 전기 삼투가 덜 일어나 농축이 더 잘 되고, 특정 농도에 도달하는데 소요되는 시간이 짧아져 비에너지가 적게 소모되는 것으로 판단된다. 따라서 고농도 농축 시, 부피 비를 증가시켜 탈염수의 농도를 유지시키는 것이 한계 농축 농도 증가와 비에너지 소모 관점에서 유리한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 전기투석 시스템에서 고농도 전해질 수용액의 전기 삼투에 의한 한계 농축 현상에 대한 실험을 수행하였다. 이를 위해 고 전류 밀도를 인가하여, 삼투와 역확산을 최소화하여 전기 삼투에 의한 영향을 알아보았고, 전해질 수용액의 농도에 따른 전기 삼투 현상을 비교하기 위해 NaCl 2M과 4M의 고농도 전해질 수용액을 사용하여 실험을 수행하였다. 실제 저농도 전해질 수용액의 농축은 용매인 물의 양에 비해 전달되는 이온의 양이 극히 작아 이온의 전달로 인해 추가로 발생하는 물 분자의 이동 자체가 농축 한계 현상을 일으키기 힘든 수준이지만[24], 고농도 전해질 수용액의 농축에서는 전달되는 이온의 양이 상대적으로 많아 이에 대한 정량적인 분석이 필요하다. 본 연구를 통해 우리는 다음과 같은 세 가지 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 고 전류 밀도를 인가하는 고농도 수용액(~NaCl 4M)의 농축 공정에서 전기 삼투로 인한 전해질 수용액의 한계 농축 현상이 크게 일어난다. 둘째, 탈염 채널 수용액의 농도가 낮아 염 수화 수가 커지면

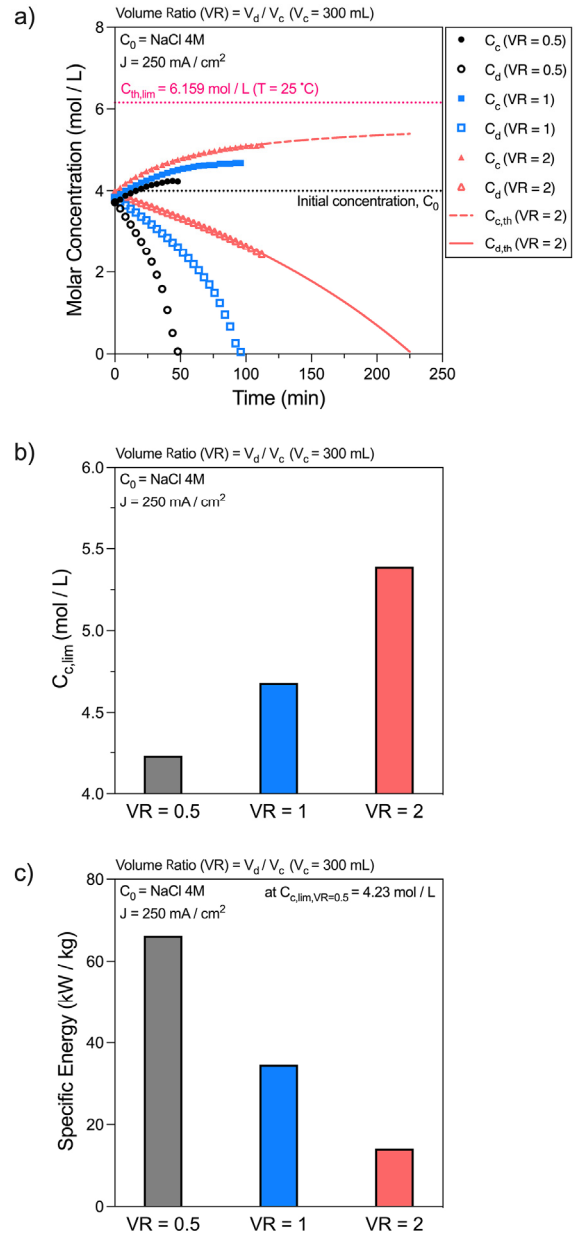


Figure 5. (a) Concentration changes and (b) limiting concentration ($C_{c,lim}$) and (c) Specific energy of NaCl 4M solution with different volume ratios ($VR = 0.5, 1, 2$) Specific energy is calculated for final salt concentration ($C_{c,lim,VR=0.5} = 4.23 \text{ mol/L}$).

전기 삼투에 의한 물 분자의 전달이 많아지기 때문에 탈염수의 농도를 일정하게 유지시키는 것이 농축에 유리하다. 다시 말해, 탈염수의 농도를 높게 유지할 수 있다면 전기 삼투에 의한 농축 농도 한계 현상을 완화할 수 있다는 것이다. 마지막으로, 부피 비의 증가는 한계 농축 농도를 증가시키고 그에 수반하는 비에너지 소모량도 감소시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서 수행한 고농도 전해질 수용액의 전기 삼투에 의한 한계 농축 실험 결과를 기반으로, 전기투석을 이용한 고농도 농축 공정은 다양한 분야에 적용될 것을 기대할 수 있다.

감 사

본 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 개인기초연구(No.2022R1F1A10 64531)와 지자체-대학협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-004)의 결과임.

References

- M. N. Soliman, F. Z. Guen, S. A. Ahmed, H. Saleem, M. J. Khalil, and S. J. Zaidi, Energy consumption and environmental impact assessment of desalination plants and brine disposal strategies, *Process Saf. Environ. Prot.*, **147**, 589-608 (2021).
- A. W. Mohammad, Y. H. Teow, W. L. Ang, Y. T. Chung, D. L. Oatley-Radcliffe, and N. Hilal, Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects, *Desalination*, **356**, 226-254 (2015).
- H. Strathmann, *Ion-Exchange Membrane Separation Processes*, 1st ed., 12-15, Elsevier, Amsterdam, Netherlands (2004).
- H. Strathmann, Electrodesalination, a mature technology with a multitude of new applications, *Desalination*, **264**, 268-288 (2010).
- L. Giorno, E. Drioli, and H. Strathmann, Water Transport in Ion-Exchange Membranes In E. Drioli, L. Giorno (eds.), *Encyclopedia of Membranes*, 2011-2015, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2016).
- V. K. Indusekhar and N. Krishnaswamy, Water transport studies on interpolymer ion-exchange membranes, *Desalination*, **52**, 309-316 (1985).
- T. Rottiers, K. Ghyselbrecht, B. Meesschaert, B. Van der Bruggen, and L. Pinoy, Influence of the type of anion membrane on solvent flux and back diffusion in electrodesalination of concentrated NaCl solutions, *Chem. Eng. Sci.*, **113**, 95-100 (2014).
- T. G. Brydges and J. W. Lorimer, The dependence of electro-osmotic flow on current density and time, *J. Membr. Sci.*, **13**, 291-305 (1983).
- C. Larchet, B. Auclair, and V. Nikonenko, Approximate evaluation of water transport number in ion-exchange membranes, *Electrochim. Acta.*, **49**, 1711-1717 (2004).
- C. E. Evans, R. D. Noble, S. Nazeri-Thompson, B. Nazeri, and C. A. Koval, Role of conditioning on water uptake and hydraulic permeability of Nafion[®] membranes., *J. Membr. Sci.*, **279**, 521-528 (2006).
- A. H. Galama, M. Saakes, H. Bruning, H. H. M. Rijnaarts, and J. W. Post, Seawater predesalination with electrodesalination, *Desalination*, **342**, 61-69 (2014).
- M. Tedesco, H. V. M. Hamelers, and P. M. Biesheuvel, Nernst-Planck transport theory for (reverse) electrodesalination: I. Effect of co-ion transport through the membranes, *J. Membr. Sci.*, **510**, 370-381 (2016).
- M. Tedesco, H. V. M. Hamelers, and P. M. Biesheuvel, Nernst-Planck transport theory for (reverse) electrodesalination: II. Effect of water transport through ion-exchange membranes, *J. Membr. Sci.*, **531**, 172-182 (2017).
- S. Porada, W. J. van Egmond, J. W. Post, M. Saakes, and H. V. M. Hamelers, Tailoring ion exchange membranes to enable low osmotic water transport and energy efficient electrodesalination, *J. Membr. Sci.*, **552**, 22-30 (2018).
- N. Kim, S. Jeong, W. Go, and Y. Kim, A Na⁺ ion-selective desalination system utilizing a NASICON ceramic membrane, *Water Res.*, **215**, 118250 (2022).
- H. Yan, Y. Wang, L. Wu, M. A. Shehzad, C. Jiang, R. Fu, Z. Liu, and T. Xu, Multistage-batch electrodesalination to concentrate high-salinity solutions: Process optimisation, water transport, and energy consumption, *J. Membr. Sci.*, **570-571**, 245-257 (2019).
- B. Sun, M. Zhang, S. Huang, W. Su, J. Zhou, and X. Zhang, Performance evaluation on regeneration of high-salt solutions used in air conditioning systems by electrodesalination, *J. Membr. Sci.*, **582**, 224-235 (2019).
- B. Sun, M. Zhang, S. Huang, J. Wang, and X. Zhang, Limiting concentration during batch electrodesalination process for concentrating high salinity solutions: A theoretical and experimental study, *Desalination*, **498**, 114793 (2021).
- B. Sun, M. Zhang, S. Huang, Z. Cao, L. Lu, and X. Zhang, Study on mass transfer performance and membrane resistance in concentration of high salinity solutions by electrodesalination, *Sep. Purif. Technol.*, **281**, 119907 (2022).
- Ponomarev and Lokota-Fabulyak, Concentration des électrolytes par électrodesalination, *Zhurnal Prikl. Him.*, **56**, 2601-2603 (1983).
- M. Bailly, H. Roux-de Balman, P. Aimar, F. Lutin, and M. Cheryan, Production processes of fermented organic acids targeted around membrane operations: design of the concentration step by conventional electrodesalination, *J. Membr. Sci.*, **191**, 129-142 (2001).
- F. J. Borges, H. Roux-de Balman, and R. Guardani, Investigation of the mass transfer processes during the desalination of water containing phenol and sodium chloride by electrodesalination, *J. Membr. Sci.*, **325**, 130-138 (2008).
- S. P. Pinho and E. A. Macedo, Solubility of NaCl, NaBr, and KCl in water, methanol, ethanol, and their mixed solvents., *J. Chem. Eng. Data.*, **50**, 29-32 (2005).
- W. S. Walker, Y. Kim, and D. F. Lawler, Treatment of model inland brackish groundwater reverse osmosis concentrate with electrodesalination—Part I: sensitivity to superficial velocity, *Desalination*, **344**, 152-162 (2014).

Authors

Junsu Jang; M.Sc., Graduate student, Department of Future Convergence Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea; vpvvkrfur@gmail.com

Bumjoo Kim; Ph.D., Associate Professor, Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea; bumjoo@kongju.ac.kr