

축전식 탈염 공정에서의 분할 전극을 통한 탈염 성능 향상

김 용 빈 · 임 지 원[†]

한남대학교 화공신소재공학과
(2019년 10월 28일 접수, 2019년 10월 30일 수정, 2019년 10월 30일 채택)

Improvement of The Desalination Performance through The Split Electrodes in The Capacitive Deionization Process

Yong Bin Kim and Ji Won Rhim[†]

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

(Received October 28, 2019, Revised October 30, 2019, Accepted October 30, 2019)

요 약: 본 연구에서는 축전식 탈염 공정에 분할 전극을 이용하여 탈염 성능을 향상하고자 하였다. 운전조건으로 NaCl 수용액에 대하여 20 mL/min의 유속과 1.2 V, 3분의 흡착 조건과 -1 V, 1분의 탈착 조건으로 전극의 분할 여부에 따른 탈염 효율을 측정함으로써 실험을 진행하였다. 분할되지 않은 전극에서는 유효면적이 146 cm²일 때 40%의 탈염 효율이 나타났고 분할 전극의 유효면적이 133 cm²일 때 57%의 탈염 효율을 보였다. 같은 분할된 전극에서 탈염 효율은 2 cm 간격을 두었을 때 49%, 1 cm의 간격을 두었을 때 57%로 확인되었다. 탈염 효율이 일반 CDI보다 분할 전극 CDI가 높았고 분할 전극 사이의 간격이 좁을수록 증가하였다.

Abstract: The purpose of this study was to improve the desalination performance by using split electrodes in the capacitive desalination process. The experiment was carried out by measuring the desalination efficiency of the NaCl aqueous solution according to the partitioning of the electrode at 20 mL/min flow rate, 1.2 V, 3 min adsorption conditions, and -1 V, 1 min desorption conditions. The desalination efficiency for the non-divided electrodes with a surface area of 146 cm² reached 40% while the divided electrode with a surface area of 133 cm² showed a desalination efficiency of 57%. The desalination efficiency of the same split electrode was 49% at 2 cm divided interval and 57% at 1cm divided interval. The desalination efficiency of the split electrode was higher than that of the normal CDI and narrower divided intervals increased the performance.

Keywords: capacitive deionization (CDI), desalination efficiency, flow rate, divided electrodes

1. 서 론

산업화와 기술이 날마다 발전함에 따라 전 세계적으로 물 부족 현상이 나타나고 있으며 물 부족 현상은 전 세계에서 심각한 문제를 발생시키고 있다[1]. 해수는 지구상에서 97%의 비율을 차지하고 있고 인간이 쓸 수 있는 물은 실제로 2%로 제한되어 있다. 이로 인해 선진국들은 해수를 이용해 실생활에 쓸 수 있는 담수로

전환하는 탈염 공정 기술을 연구에 힘을 쏟고 있는 추세이다[2,3]. 현재 알려진 탈염 공정 기술로는 증류 공정과 역삼투막 공정들이 있다. 탈염 공정 기술 중 하나인 축전식 탈염(capacitive deionization, CDI) 기술은 추가적인 화학물질에 대한 오염의 여지가 없고 친환경적인 기술로 떠오르고 있다[4].

축전식 탈염 공정의 기술의 기본적인 원리는 다공성 탄소 전극의 이중층을 사용해서 탈염하고자 하는 유체

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

를 사이에 흐르게 하여 정전기적 전위차를 가해주는 공정이다. 다른 기술보다 낮은 전위차를 인가하여 유체 속에 포함되어 있는 양이온과 음이온을 하전된 탄소전극을 이용하여 분리하는 흡착 공정을 이루게 하며 다시 역 전위를 가해주어 탄소전극에 흡착된 이온들을 표면으로부터 제거하는 탈착 공정이 이루어진다[5-7]. 이를 통해 축전식 탈염 공정 기술은 연속적으로 공정이 이루어지는 흐름성 공정을 유지할 수 있다. 기본적인 탄소전극의 구성요소는 다공성 탄소막, 스페이서로 구성되어 있는데 이 중 스페이서는 두 탄소전극 사이에 위치하여 전극이 접촉하지 않게 만들어준다[8,9].

하지만 흡착하고 다음의 과정인 탈착을 할 때 이미 흡착된 이온들이 완전히 탈착되지 않아 모듈 내의 전극에 남아있게 되고 다시 흡착하면 남아있는 이온들로 인해 탈염 효율이 낮아지는 단점이 존재한다[10-13]. 흡착 효율을 높이기 위해 전극에 인가하는 전위차를 높이는 방법이 있지만 일정한 전압 이상에서는 물의 전기분해가 일어날 수 있으므로 전압을 높이는 것은 제약이 따른다[14].

축전식 탈염 공정의 단점을 보완하기 위해 최근에는 다양한 공정 모듈의 디자인을 통하여 축전식 탈염 공정의 탈염 제거효율을 향상하는 방향으로 연구가 진행되어 있다. 본 연구에서는 기존 축전식 탈염 공정에 분할전극의 개념을 도입하여 CDI의 성능을 향상하는 것을 목적으로 하는 분할전극 CDI를 개발하였다. 분할전극 CDI란 일반 CDI에서 사용하는 1개의 전극 site를 2개 이상으로 나눠 축전식 탈염을 하는 방법이다. 이에 따라 본 연구에서는 대면적을 지니는 축전식 탈염 공정에 적합한 모델을 찾기 위해 다공성 탄소전극의 가운데에 빈 공간을 뚫으로써 분리 횟수를 늘리는 방향으로 연구를 진행하였으며 육각형 모듈의 분할전극을 통해서 성능향상이 이루어지는지 확인하였고 이를 다시 면적이 더 큰 직사각형의 모듈에 적용하여 성능향상의 여부를 실험했다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

본 실험에서 사용된 sodium chloride는 삼전의 제품을 사용하였다. 초순수는 영린(한국)의 Water Purification System AquaMAX™를 이용하여 생산된 초순수를 사

용하였으며 전극은 퓨리캠(한국)에서 상용화된 다공성 탄소전극을 구매해 사용하였다. 공급수를 모듈에 주입하기 위해 연동펌프(Masterflex, model 7519-06)를 사용하였다.

2.2. 실험 공정과 분할전극의 제작

유로 모양에 따른 CDI 모듈 중 유체의 흐름이 가장 좋은 정육각형의 모양의 전극을 선택했다[14]. 실험의 공정도를 Fig. 1에 나타내었으며 (a)는 배출수 비커, (b)는 total dissolved solids 측정기, (c)는 컴퓨터, (d)는 공급수 비커, (e)는 펌프, (f)는 분할전극 모듈, (g)는 potentiostat를 나타낸다. 양 전극 사이에는 접촉을 막아줄 수 있는 약 100 μm의 두께의 Nylon spacer를 삽입하였다. Fig. 2와 3에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 탄소전극의 모양을 디자인하였다. 정육각형 형태의 cell에서 분할되지 않은 전극의 유효면적은 146 cm²이며 1 cm의 간격을 둔 분할전극은 133 cm²이고, 2 cm의 간격을 둔 분할전극은 120 cm²이 되도록 제작하였다. 또한 가로로 긴 육각형 형태의 cell에서 분할되지 않은 전극의 유효면적은 200 cm²이며 2 cm의 간격을 둔 분할전극은 180 cm²으로 제작하였다.

2.3. 분할전극 축전식 탈염 시험

공급액은 연동펌프를 이용하여 20 mL/min의 일정한 유속으로 공급하였다. Fig. 2와 3에서 확인할 수 있듯이 공급액은 셀의 왼쪽 구멍으로 들어간 후 오른쪽의 구멍으로 배출되도록 하였다. Potentiostat (WonATech co. WPG 100)를 이용하여 전압을 인가하였다. 오른쪽의 구멍으로 나온 용액을 TDS conductivity meter (Istek. EC-470L)을 이용하여 2초마다 측정하여 실시간으로 컴퓨터에 기록하였다. 탈염 효율은 다음 (1)식으로 계산하였다.

$$\eta = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

이때, C_0 는 공급액의 초기농도이며 C_e 는 배출된 용액의 탈착 시 배출된 평균농도이다.

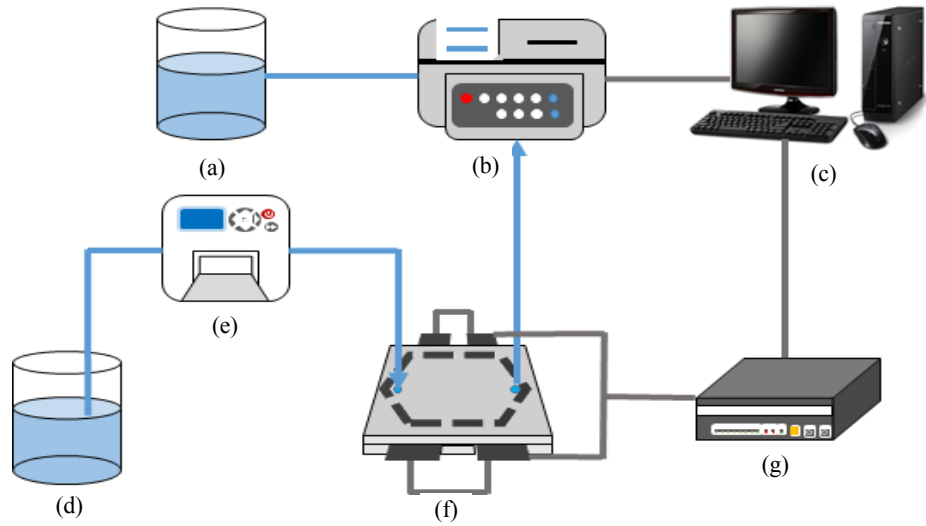


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

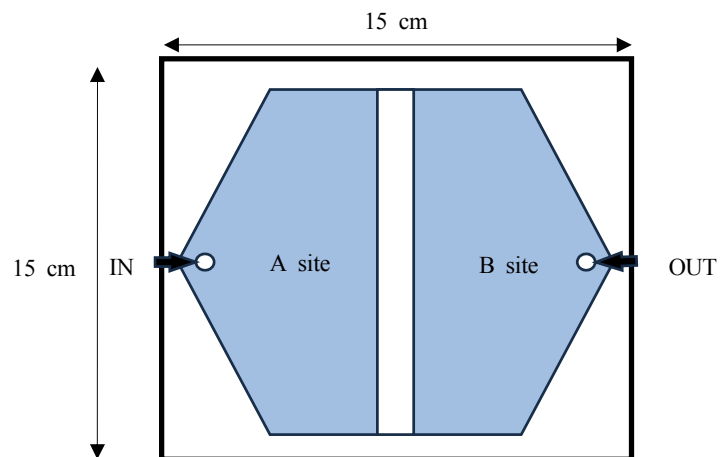


Fig. 2. Split electrode CDI schematic in hexagonal flow channel.

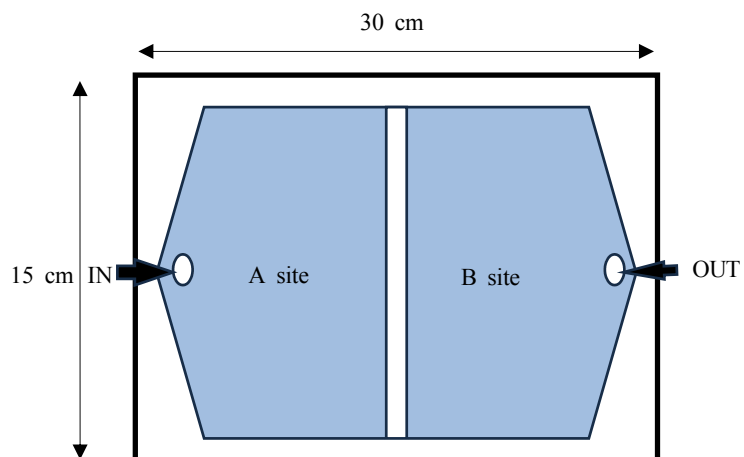


Fig. 3. Split electrode CDI schematic in a newly designed hexagonal flow channel.

3. 결과 및 토론

3.1. 정육각형 cell에서 분할되지 않은 전극과 분할간격이 조정된 전극과의 탈염 성능 비교

전류밀도는 전극의 단위면적당 전류의 크기로 정의되며 A/m^2 또는 mA/cm^2 등으로 표시된다[15]. 일정한 전류가 가해질 때 면적이 줄어들수록 전류밀도는 증가하여 탈염 효율이 향상될 것으로 판단된다. 따라서 본 실험에서는 흡착 조건을 1.2 V, 3분, 탈착 조건을 -1 V, 1분으로 설정하였으며 공급액은 평균 106 mg/L의 농도, 유량 20 mL/min으로 고정하여 실험을 진행하였다.

분할 전극은 탄소 전극의 가운데에 간격을 둠으로써 공정을 1회 통과할 때 분리횟수를 두 번으로 늘려 탈염 효율을 증가시키는 방법이다. Fig. 4에 배출수의 농도 그래프를 나타내었다. Fig. 4(a)~(c)는 간격이 각각 0~2 cm 일 때 그래프이며 탈염 효율은 각각 40, 57, 49%로 분할된 전극의 탈염 효율 더 좋았고 그 중 유효면적이 증가할수록 탈염 효율이 증가한 것으로 나타났다.

분할되지 않은 전극과 2 cm의 간격을 둔 분할 전극에서의 효율을 비교했을 때 유체가 흐르는 유효면적이 146 cm^2 에서 120 cm^2 로 26 cm^2 줄어들었지만 탈염 효율은 40%에서 49%로 향상되었다. 이는 2번의 분리와 일정한 전류 하에 유효면적이 줄어들어 각 구간의 전류 밀도가 증가하여 탈염 효율이 증가한 것으로 사료된다.

분할 전극에서 유효면적의 증가에 따른 탈염 효율의 경향성을 확인해 보기 위해 1, 2 cm의 간격을 둔 분할 전극의 효율성을 비교하였다. 분할 전극에서 유효 면적이 120 cm^2 에서 133 cm^2 로 증가하면서 49%에서 57%로 탈염 효율이 증가한 것으로 확인되었다.

3.2. 정육각형 cell에서 분할된 양편의 탈염제거 성능과 분할된 전체 전극의 탈염성능 비교

분할 전극의 A와 B site에서 비슷한 탈염 효율을 보이는지 분할된 전체구간과 비교하여 탈염 효율을 확인해보고자 한다. Site의 탈염 효율을 확인하기 위해 A, B site, 분할된 전체 구간으로 3가지 실험을 진행하였으며 1 cm의 간격을 둔 cell로 실험을 진행하였다. A site에서 처리된 용액을 B site에서 한 번 더 처리하고 나온 효율을 알아보기 위해 B site에 들어오는 농도를 다음과 같은 (2)식을 사용하여 알아내었다.

$$C_B = C_A \times (100\% - \eta_A) \quad (2)$$

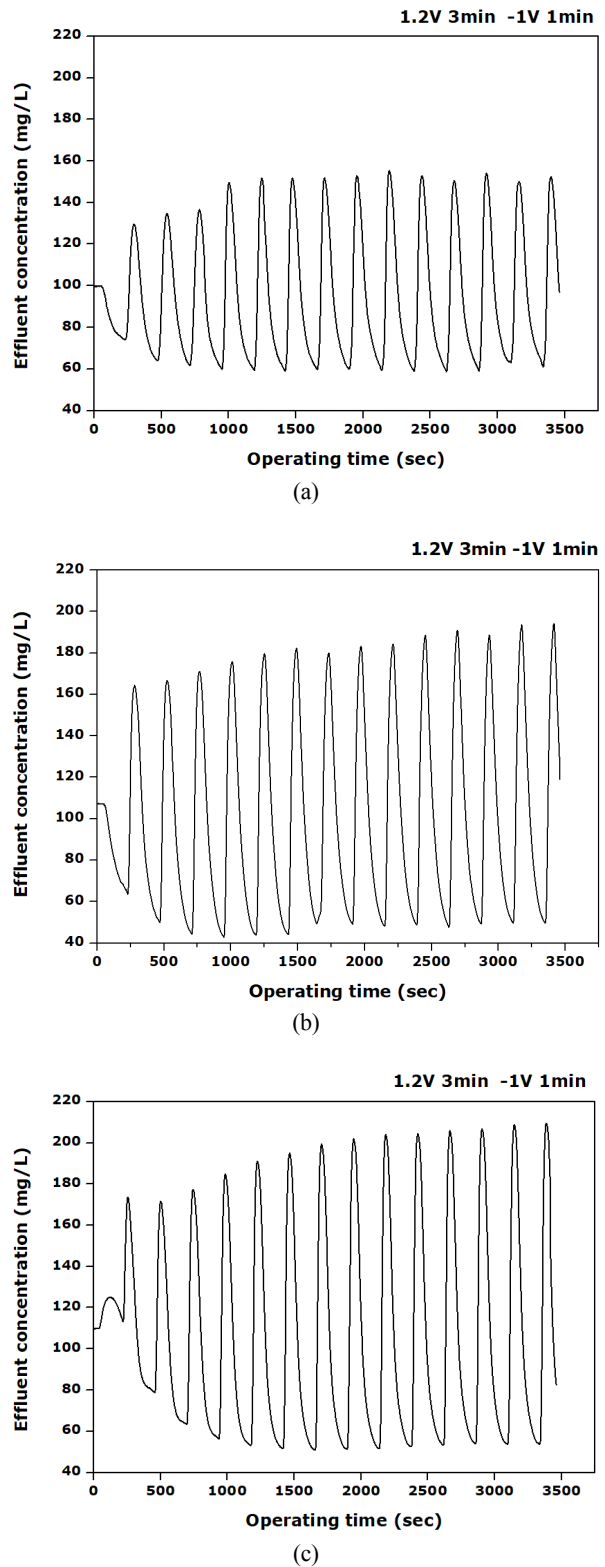


Fig. 4. Effluent concentration according to the operating time at the divided interval : (a) 0 cm, (b) 1 cm, (c) 2 cm using hexagonal flow channel.

여기서 C_B 는 B site에 들어가는 용액의 초기농도, C_A 는 A site에 들어가는 용액의 초기농도, η_A 은 A site에서 나타난 효율(%)이다. 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다. A site의 탈염 효율은 26.7%이고 B site는 27.4%로 각 구간 비슷한 탈염 효율을 보였다. 또한 분할된 전체 전극인 A와 B site에 전압을 동시에 걸었을 때 탈염 효율은 56.0%로 확인되었으며 독립적인 A와 B site의 효율을 각각 더한 것 값인 54.1%와 비교하여 비슷한 탈염 효율을 나타내었다.

3.3. 유효면적이 증가된 가로로 긴 육각형 cell에서 성능 비교

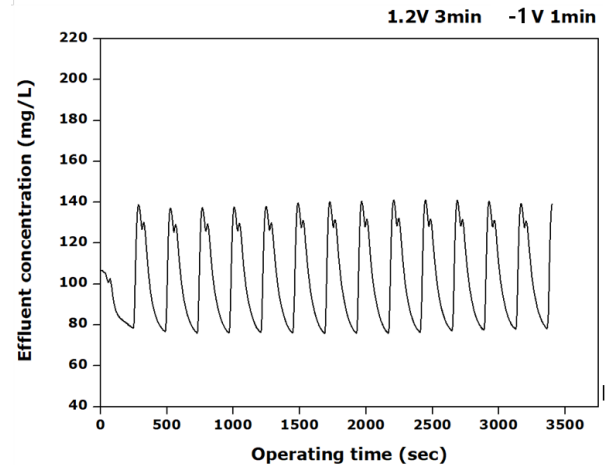
유로의 세로 길이는 유지한 채 유로의 가로 길이만 늘여 유효면적이 더 넓어진 가로로 긴 육각형 cell에서 탈염 효율을 비교 분석하였다. Fig. 6에 배출수의 농도 그래프를 나타내었다. Fig. 6(a), (b)는 각각 간격이 0, 2 cm일 때 그래프이며 유효면적은 각각 200 cm², 180 cm²이고 탈염 효율은 각각 29, 47%로 나타났다. 면적이 증가된 가로로 긴 육각형 cell에서 분할 전극을 사용한 모듈이 상대적으로 탈염 효율이 더 높게 나왔다.

2 cm의 간격을 둔 유효면적 180 cm²의 분할전극과 2 cm의 간격을 둔 유효면적 120 cm²인 분할 전극을 비교했을 때 탈염 효율이 각각 47, 49%이며 전류밀도는 각각 0.31, 0.49 mA/cm²로 나타났다. 이러한 결과는 일정한 전류 하에서 면적이 감소함에 따라 전류밀도가 높아져 탈염효율이 증가된 것으로 사료된다.

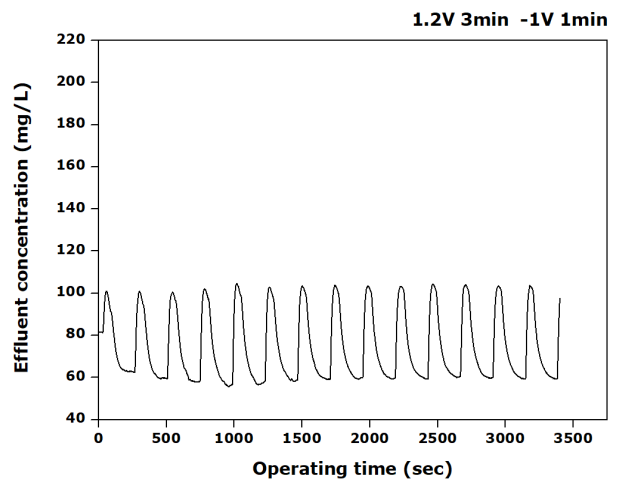
4. 결 론

본 연구에서는 축전식 탈염 공정에 분할 전극을 적용하여 탈염 효율을 증가시키고자 하였다. 설계된 모듈의 성능 분석하기 위해 유효면적을 다르게 하고 공급액으로 100~120 mg/L의 NaCl 수용액을 사용했으며, 흡착 조건 1.2 V, 3분, 탈착조건 -1 V, 1분, 유량 20 mL/min으로 고정하여 실험을 진행하였다. 정육각형 cell과 가로로 긴 육각형 cell에서 탈염 효율을 비교했을 때 분할된 전극의 탈염 효율이 분할되지 않은 전극보다 높았다. 또한 분할 전극 모듈에서 간격이 좁아질수록 탈염 효율이 증가하였다.

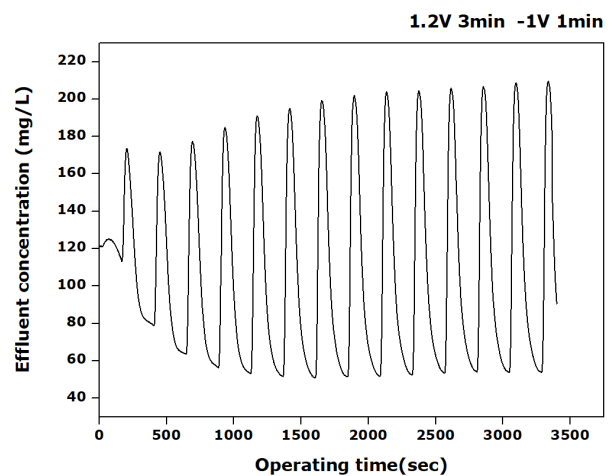
2 cm 간격의 분할 전극을 도입한 정육각형 cell과 가로로 긴 육각형 cell에서 유효면적이 넓은 것의 탈염 효율이 더 낮은 것을 확인할 수 있었다. 이는 일정한 전



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. Effluent concentration according to the operating time in each (a) A site, (b) B site, (c) both sites using hexagonal flow channel

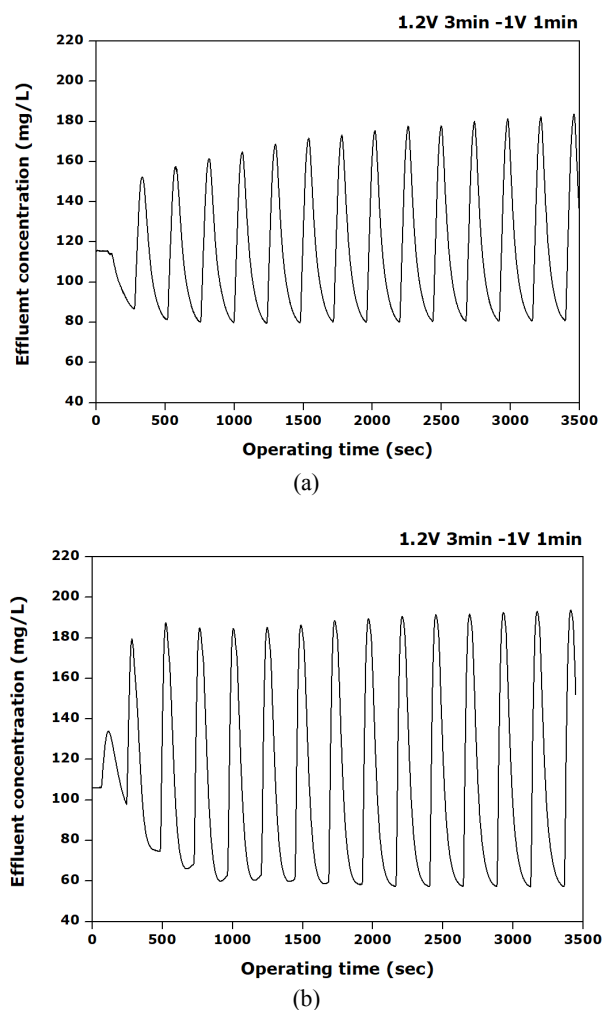


Fig. 6. Effluent concentration according to the operating time at the divided interval : (a) 0 cm, (b) 2 cm in a newly designed hexagonal flow channel.

류 하에 유효면적이 늘어남에 따라 전류 밀도가 감소하여 탈염 효율에 영향을 미친 것으로 판단된다. 위의 결과를 토대로 직사각형의 모델에서 site의 수가 많아질수록 각 면적에 전류밀도가 증가함과 동시에 분리 횟수가 늘어나서 탈염 효율이 높아질 것이라고 사료된다.

Reference

1. Y. Li, Z. Ding, J. Li, J. Li, T. Lu, and L. Pan, "Highly efficient and stable desalination via novel hybrid capacitive deionization with redox-active polyimide cathode", *Desalination*, **469**, 1 (2019).
2. C. O. Park, J. S. Oh, and J. W. Rhim, "Preparation of carbon electrodes using activated carbon fibers and their performance characterization for capacitive deionization process", *Membr. J.*, **28**, 272 (2018).
3. R. Zhao, S. Porada, P. M. Biesheuvel, and A. van der Wal, "Energy consumption in membrane capacitive deionization for different water recoveries and flow rates, and comparison with reverse osmosis", *Desalination*, **330**, 35 (2013).
4. Y. Oren, "Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment past, present and future (a review)", *Desalination*, **228**, 10 (2008).
5. 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).
6. C. Bales, P. Kovalsky, J. Fletecher, and T. D. Waite, "Low cost desalination of brackish groundwaters by capacitive deionization (CDI) - Implications for irrigated agriculture", *Desalination*, **453**, 37 (2019).
7. Z. Chen, H. Zhang, C. Wu, L. Luo, and H. Xu, "A study of the effect of carbon characteristics on capacitive deionization (CDI) performance", *Desalination*, **433**, 68 (2018).
8. Y. J. Song, W. S. Yun, and J. W. Rhim, "Studies of performance and enlarged capacity through multi-stages stacked module in membrane capacitive deionization process", *Membr. J.*, **27**, 449 (2017).
9. A. D. Khawaji, I. K. Kutubkhanah, and J. M. Wie, "Advances in seawater", *Desalination*, **221**, 47 (2008).
10. M. W. Ryoo and G. Seo, "Improvement in capacitive deionization function of activated carbon cloth by titania modification", *Water Res.*, **37**, 1527 (2003).
11. S. M. Jung, J. H. Choi, and J. H. Kim, "Application of capacitive deionization (CDI) technology to insulin purification process", *Sep. Purif. Technol.*, **98**, 31 (2012).
12. B. Jia and W. Zhang, "Preparation and application of electrodes in capacitive deionization (CDI): A state-of-art review", *Nanoscale. Res. Lett.*, **11**, 64 (2016).
13. C. Wang, L. Chen, S. Liu, and L. Zhu, "Nitrite

- desorption from activated carbon fiber during capacitive deionization (CDI) and membrane capacitive deionization (MCDI)", *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, **599**, 392 (2018).
14. Y. S. Jeon, S. I. Cheong, and J. W. Rhim, "Design shape of CDI cell applied with APSf and SPEEK and performance in MCDI", *Macromol. Res.*, **25**, 712 (2017).
 15. N. Ge, R. Banerjee, D. Muirhead, J. Lee, H. Liu, P. Shrestha, A. K. C. Wong, J. Jankovic, M. Tam, D. Susac, J. Stumper, and A. Bazylak, "Membrane dehydration with increasing current density at high inlet gas relative humidity in polymer electrolyte membrane fuel cells", *J. Power Sources*, **422**, 163 (2019).