

활성탄소섬유를 이용한 탄소전극의 제조 및 축전식 탈염공정에서의 성능평가

박철오·오주석·임지원[†]

한남대학교 화공신소재공학과
(2018년 8월 16일 접수, 2018년 8월 27일 수정, 2018년 8월 27일 채택)

Preparation of Carbon Electrodes Using Activated Carbon Fibers and Their Performance Characterization for Capacitive Deionization Process

Cheol Oh Park, Ju Seok Oh, and Ji Won Rhim[†]

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

(Received August 16, 2018, Revised August 27, 2018, Accepted August 27, 2018)

요약: 본 연구에서는 활성탄소섬유를 이용하여 축전식 탈염공정에 적용할 탄소전극을 제조하였다. polyvinylidene fluoride (PVDF)를 바인더로 사용했으며 적절한 용매에 활성탄소섬유를 배합한 후 상용의 그래파이트 시트에 캐스팅하여 탄소전극을 제조하였다. 이 때 활성탄소섬유의 입자 크기를 달리하였고, 용매, 고분자 바인더 그리고 활성탄소섬유를 80 : 2 : 18, 80 : 5 : 15의 배합비율로 전극을 제조하였다. 그런 다음 염 제거 효율을 흡착전압과 시간, 탈착전압과 시간, NaCl 공급액의 농도와 유속 등에 운전조건에 대하여 염 제거 효율을 측정하였다. 대표적으로 활성탄소섬유의 입자크기가 32 μm 이하이며 80 : 2 : 18의 배합비율에서 1.2 V, 3분의 흡착조건, -0.1 V, 1분의 탈착조건, NaCl 100 mg/L, 15 mL/min의 공급액 조건에서 53.6%의 염 제거 효율을 보였다.

Abstract: In this study, the carbon electrodes using activated carbon fibers (ACFs) were prepared for the capacitive deionization process. The Polyvinylidene fluoride (PVDF) was used as the binder and the mixed ACFs with proper solvent was cast on the commercial graphite sheets to prepare the carbon electrodes. At this moment, the different particle sizes of ACFs were applied and the mixing ratio of solvent, PVDF and ACFs, 80 : 2 : 18 and 80 : 5 : 15, were used for the electrode preparation. Then their salt removal efficiencies were characterized under the various operating conditions, adsorption potential and time, desorption potential and time, concentration of feed NaCl solution and flow rate as well. Typically, the salt removal efficiency of 53.6% were obtained at the particle size below 32 μm , mixing ratio 80 : 2 : 18, adsorption 1.2 V and 3 min, desorption -0.1V and 1 min, and 15 mL/min flow rate of NaCl 100 mg/L.

Keywords: Activated carbon fiber electrode, capacitive deionization (CDI), Polyvinylidene Fluoride (PVDF), desalination, salt removal efficiency

1. 서론

물의 재사용 혹은 담수화 기술 중 가장 널리 알려져 있고 간단하게 깨끗한 대량의 물을 생산할 수 있는 증발법은 막대한 화석에너지의 사용으로 우리가 사용할 수 있는 화석연료의 낭비와 환경오염이라는 큰 문제가 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 태양열을 이용한

증발법이 고안되었는데, 이는 일조량이 좋은 지역에 한해서만 사용이 가능하며 화석연료를 사용하는 것보다는 시간당 생산량이 부족하다[1]. 역삼투법은 막 사이에 두고 해수에 삼투압 이상의 압력을 가해 막을 통하여 순수한 물만 분리해내는 방법으로 증발법에 비해 에너지 소모가 낮으며 비교적 간단한 방법이지만 장시간 운전시 막 표면이 오염되는 파울링(fouling) 현상에 의

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

해 일정기간 운전 후 세정을 해주어야 한다. 이러한 파울링으로 인한 물리화학적 세정 때문에 막의 수명이 짧으며 높은 처리수 유량을 얻기 위해서는 에너지 소모가 크다는 단점이 있다[2-4]. 이러한 단점을 보완하기 위해 막 표면의 개질에 대한 연구와 막 소재에 대한 연구가 국내외로 진행되고 있다. 증발법과 함께 일찍이 고안된 기술 중 하나인 전기투석법과 원리가 동일한 축전식 탈염공정(capacitive deionization, CDI)은 반대되는 전위를 인가한 두 전극 사이로 물을 통과시켜 물 안에 있는 이온들을 그와 반대되는 전하를 띠는 전극에 흡착시키는 방식을 이용하며 전극이 이온에 의해 포화가 되면 반대인 전위를 가해주어 이온들을 탈착시켜 재사용이 가능하다[5-11].

축전식 탈염공정은 표면적이 넓은 전극을 사용하는 데, 표면적이 넓으면서 전기전도도 또한 준수한 탄소소재를 주로 사용한다. 전극의 대표적인 소재로는 활성탄, 카본 에어로젤, 규칙된 중형 다공성 탄소, 카본 나노 튜브나 그래핀, 활성탄소섬유 등을 사용할 수 있다. 활성탄은 산업 분야에서 가장 널리 쓰이는 흡착제로 나무를 원료로 사용하여 제조한다. 800°C 이하의 낮은 온도에서 탄화된 후 950~1000°C 사이에서 활성화 시키거나, 화학적으로 활성화된 다음 저온에서 탄화될 수 있다. 제조가 간단하기 때문에 가격이 저렴한 것이 장점이다. 카본 에어로젤은 1990년대부터 Farmer[12] 등에 의해 축전식 탈염공정에 적용할 전극으로 연구되었다. 레조르시놀과 포름 알데히드의 졸-겔 중합으로 시작되며 RF 에어로젤이라 불리는 전구체를 형성하게 된다. 불활성 분위기 하에서 600-1100°C의 온도로 열분해 하면 카본 에어로젤이 생성된다. 표면적이 400-1000 m²/g, 전기 전도도는 10-100 S/cm로 상당히 뛰어나다[13]. 규칙된 중형 다공성 탄소(Ordered mesoporous carbons : OMCs)는 Ryoo[14] 등이 처음으로 제조한 것으로 알려져 있으며, 매우 규칙적인 50 nm 이하의 기공을 가진다. 그래핀은 한 원자 두께로 탄소가 정육각형 패턴으로 배열된 구조로 전자이동도가 200,000 cm²/V·s에 달하여 전기 전도성이 매우 우수하며 구조가 단일 원자층이기 때문에 이론적인 표면적이 2,360 m²/g이며 그래핀 시트의 개방 구조는 이온의 흡착 및 탈착을 용이하게 한다. 그래핀을 원통형으로 만든 것이 탄소나노튜브이다[15]. 활성탄소섬유는 섬유상에 존재하는 미세기공이 10 Å 이하로 비표면적이 크고 흡착 용량과 성능이 우수하다. 섬유의 특징을 그대로 가지고 있으며, 기상흡

착 혹은 수처리 분야에 적용이 가능하다[16,17].

본 연구에서는 활성탄소섬유를 이용하여 축전식 탈염공정에 적용할 탄소전극의 제조법을 연구하였다. 고분자 바인더를 용매에 녹인 후 활성탄소섬유를 분쇄하여 첨가하는 방법으로 슬러리를 만든 후 카본 그라파이트에 캐스팅한다. 그 다음 상전이 과정을 거쳐 기공을 가지는 다공성 탄소전극을 제조하였다. 제조된 전극은 실제 축전식 탈염공정에 적용하여 제조 조건, 실험 조건에 따른 염 제거율을 분석하였다.

2. 실험

2.1. 시약 및 재료

탄소전극을 제조하기 위해 poly(vinylidene fluoride) (PVdF, Alfa Aesar)를 고분자 바인더로, N,N-dimethylacetamide (DMAc, JUNSEI, Mw 87.12)를 용매로 사용하였다. 활성탄소섬유(활성탄소섬유, Fitch계 BET 1200)는 GS사에서 제공받았으며 분쇄하여 사용하였다. 초 순수는 Younglin Pure Water System (Seoul, Korea)으로 직접 생산하였다. 카본 그라파이트는 Purechem사의 제품을 사용하였으며, 공급액은 sodium chloride (Samchun)를 Younglin instrument사의 Aquamax basic 360으로 직접 생산한 초 순수에 용해시켜 제조하였다.

2.2. 활성탄소섬유 전극 제조

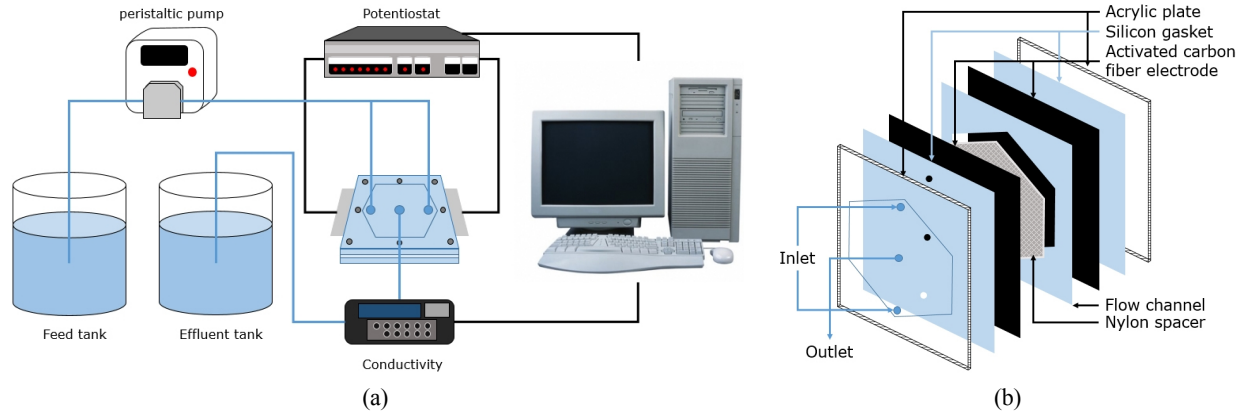
PVdF를 용매인 DMAc에 넣어 상온에서 충분히 교반하여 녹인다. 그 다음 분쇄한 활성탄소섬유를 체로 걸러주어 원하는 비율에 맞게 첨가하여 교반하였다. 활성탄소섬유 슬러리를 카본 그라파이트에 100 μm 두께로 캐스팅한 후 증류수에 침지시켰다. 그 다음 80°C의 진공오븐에서 유기용매와 수분을 제거하여 다공성 활성탄소섬유 전극을 제조하였다. 분쇄한 활성탄소섬유의 크기와 전극 제조 시 배합 비율은 Table 1에 표기하였다.

2.3. 축전식 탈염 실험

Fig. 1과 같은 방식으로 실험 공정을 설치하였다. 제조한 전극을 유효면적이 100 cm²인 정육각형 모양으로 잘라 사용하였다. 양 전극 사이의 격벽 역할을 하며 공급수의 흐름을 원활하게 해주기 위한 약 90 μm의 두께인 nylon spacer를 삽입하였고 공급수는 Masterflex (German)사의 L/S pump를 이용하여 일정한 유량으로 공급해주었다. 공급액은 펌프를 통해 셀의 유입구로 들

Table 1. Preparation Conditions of Activated Carbon Fiber Electrodes

Sample name	DMAc : PVdF : ACF (wt%)	ACF particle size
B1	80 : 2 : 18	32~53 μm
B2	80 : 5 : 15	
C1	80 : 2 : 18	< 32 μm
C2	80 : 5 : 15	

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

어가 전극과의 상호작용을 통해 흡착, 탈착을 하며 중앙의 배출구로 나오게 하였다[18]. Potentiostat WPG 100 (WonATech, Korea)를 이용하여 일정한 시간동안 전위를 인가하였으며, 배출구로 나오는 처리수와 배출수는 TDS conductivity meter (iSTEK, Korea)를 사용하여 2초마다 데이터를 측정해 컴퓨터에 기록하였다. 실험은 0.5, 1.0, 1.2 V의 흡착전압과 1, 3, 5, 7분의 흡착 시간, -0.1, -0.3, -0.5, -1 V의 탈착전압과 1, 3, 5, 7분의 탈착시간, 15, 25, 35 mL/min의 공급액의 유량과 100, 200, 300, 500 mg/L의 공급액의 농도를 변수로 진행하였다.

다음 식 (1)로부터 염 제거 효율을 계산하였다[16,19].

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

이때, C_o 는 공급액의 초기 TDS, C_f 는 배출된 용액의 최저 TDS 수치이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 활성탄소섬유의 입자크기, 배합비율에 따른 염 제거 효과 비교

전극을 제조하는데 사용한 활성탄소섬유의 입자크기와 소재의 배합 비율은 Table 1에 표시하였다. 공정조건은 흡착전압 1 V, 시간 3분, 탈착전압 -0.1 V, 시간 1분으로, NaCl 100 mg/L의 공급액을 분당 15 mL로 공급해주었다. 결과는 Fig. 2에서 확인할 수 있다.

바인더고분자와 활성탄소섬유의 합과 용매의 비는 2 : 8로 고정하였고 바인더고분자와 활성탄소섬유의 비율을 1 : 9, 1 : 3로 달리하였으며 활성탄소섬유의 입자크기가 32~53 μm 인 것과 32 μm 이하인 것으로 구분하여 총 4가지의 전극을 제조하여 테스트하였다.

활성탄소섬유의 입자 크기가 동일할 때, C1은 52.5%, C2는 34.7%로 활성탄소섬유의 비율이 더 높은 전극의 염 제거 효율이 좋았으며, 소재의 배합 비율이 동일할 때, C1은 52.5%, B1은 22.1%로 활성탄소섬유의 입자의 크기가 작은 전극의 염 제거 성능이 좋은 것을 확인하였다. 이는 흡착제인 활성탄소섬유의 함유량이 증가할수록 흡착할 공간이 늘어났으며 활성탄소섬유의 크기가 작을수록 비표면적이 늘어나 염 제거효율

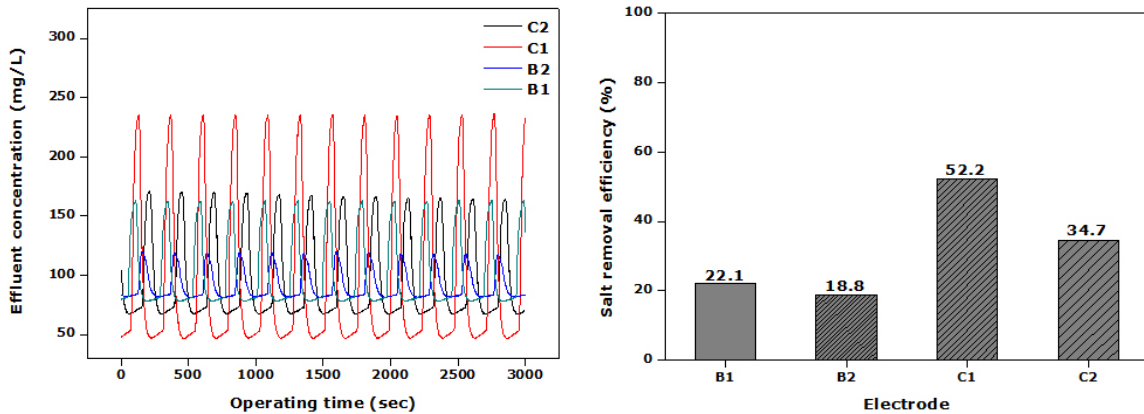


Fig. 2. Comparison of effluent concentration in accordance with electrode preparation conditions.

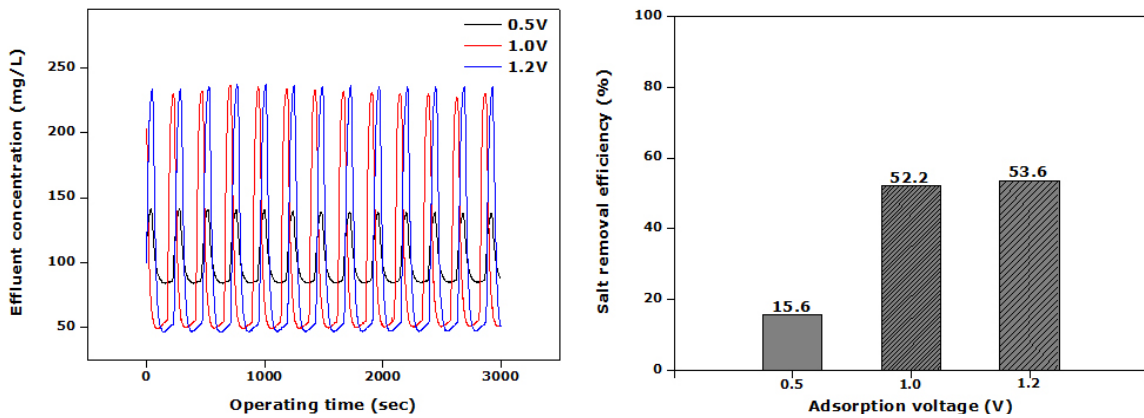


Fig. 3. Comparison of effluent concentration in accordance with adsorption potential.

이 상승한 것으로 사료된다. 염 제거 효율이 가장 좋은 C1 전극을 선정하여 실험을 진행하였다.

3.2. 흡착전압 및 시간에 따른 염 제거 효과 비교

우선 흡착전압에 따른 염 제거 효과를 살펴보기 위하여 흡착시간은 3분으로 탈착전압과 시간은 -0.1 V, 1분으로 고정한 후 흡착전압을 0.5, 1.0, 1.2V로 변화를 주어 실험을 하였다. 공급액은 100 mg/L의 NaCl을 사용하였으며 그 결과는 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

흡착전압이 0.5, 1.0, 1.2 V로 증가함에 따라 염 제거 효율은 15.6, 52.2, 53.6%로 증가하였다. 전위의 절댓값이 증가한다는 것은 정전기적 인력이 증가한다는 것이므로 동일한 시간에 강한 인력이 작용할수록 많은 양의 이온을 끌어당겨 흡착시킬 수 있다는 것을 의미한다. 1.0 V와 1.2 V에서는 염 제거효율이 크게 상승하지 않은 것을 확인할 수 있는데 이는 일정 전압 이상에서는 이미 전극의 흡착성능을 다 소진하여 더 높은 전압을 가

해주는 것이 큰 의미가 없다는 것으로 사료된다. 1.5 V의 전압에서는 물의 전기분해반응이 일어나므로 흡착전압은 1.2 V로 고정하고 탈착전압과 시간은 -0.1V, 1분, 공급액 역시 100 mg/L의 NaCl 수용액을 사용하며 흡착시간을 1, 3, 5, 7분으로 변화를 주어 실험을 하였다.

Fig. 4를 보면 흡착시간이 1, 3, 5, 7분으로 늘어남에 따라 염 제거효율은 52.86, 53.6, 47.3, 43.47%로 증가하다가 감소하는 모습을 보이는데 이는 -0.1 V, 1분의 탈착조건에서는 3분의 흡착시간동안에 흡착한 이온들을 충분히 탈착할 수 있지만 5, 7분의 흡착시간동안 흡착된 이온들은 탈착을 하여도 전극에 흡착되어있는 이온들이 아직 남아있기 때문에 다음 흡착 사이클에서 이온들이 흡착할 공간이 충분하지 않아 염 제거효율이 떨어진 것으로 사료된다.

3.3. 탈착전압 및 시간에 따른 염 제거 효과 비교

이번에는 탈착전압과 염 제거효율간의 상관관계를

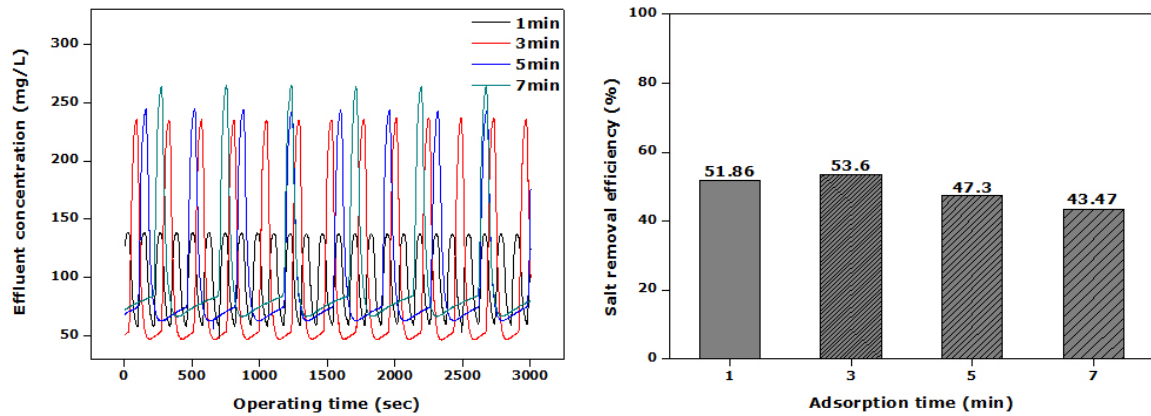


Fig. 4. Comparison of effluent concentration in accordance with adsorption time.

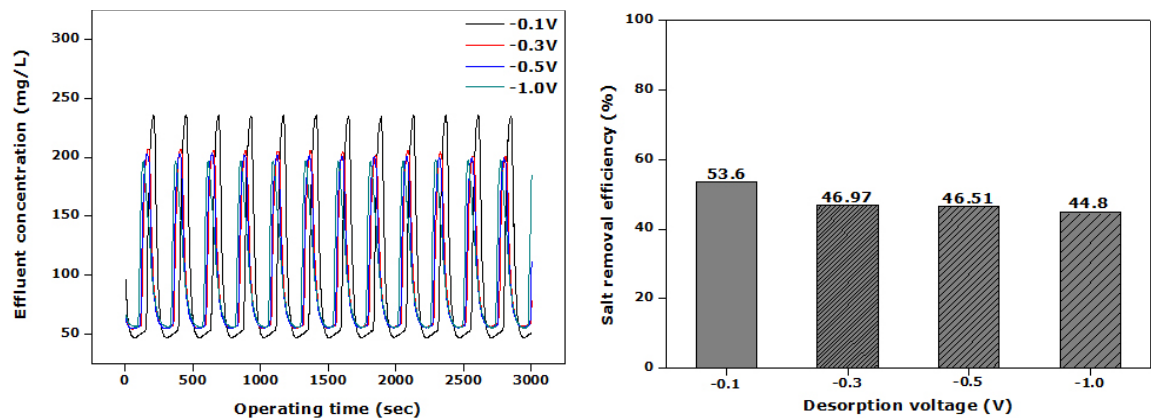


Fig. 5. Comparison of effluent concentration in accordance with desorption potential.

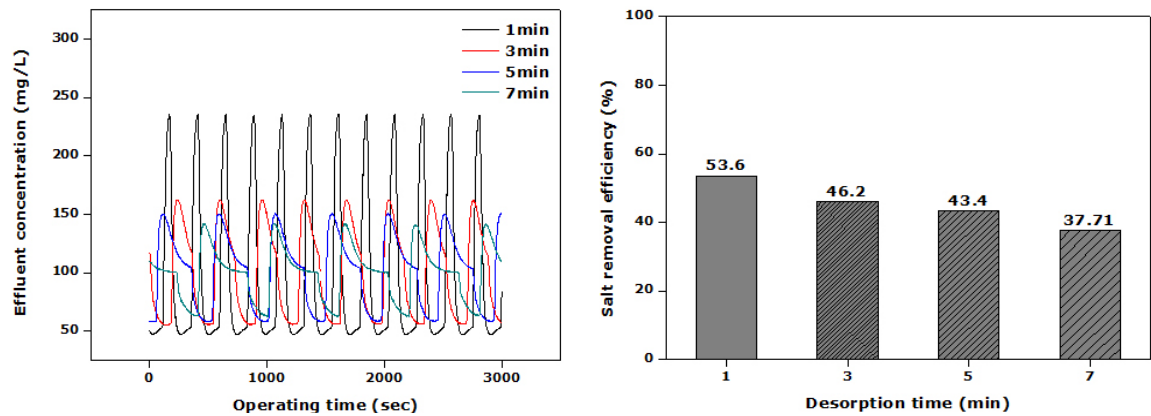


Fig. 6. Comparison of effluent concentration in accordance with desorption time.

알아보고자 하였다. 흡착조건은 1.2 V, 3분, 탈착시간은 1분으로 100 mg/L 농도의 NaCl 수용액을 분당 15 mL로 공급하였으며 탈착전압을 -0.1, -0.3, -0.5, -1.0 V로 변화를 주어 실험을 진행 하였다.

Fig. 5를 보면 -0.1, -0.3, -0.5, -0.7 V에서의 염 제거율은 53.6, 46.97, 46.51, 44.8%로 감소하는 경향을 보였다. 이는 -0.1 V의 탈착전압만으로도 충분한 탈착이 이루어지는 것으로 사료된다.

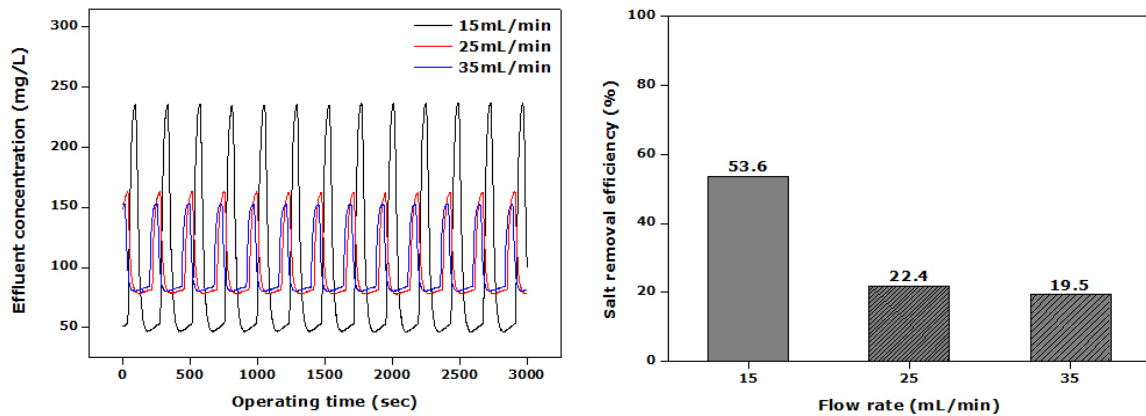


Fig. 7. Comparison of effluent concentration in accordance with feed flow rate.

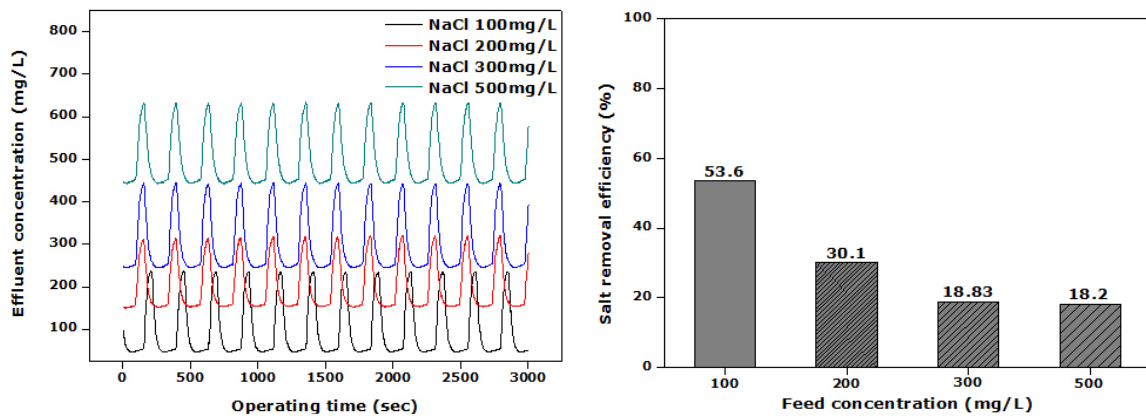


Fig. 8. Comparison of effluent concentration in accordance with feed concentration.

앞서 실험한 결과로 1.2 V, 3분의 흡착전압과 시간, -0.1 V의 탈착전압, 공급액은 NaCl로 100 mg/L의 농도와 15 mL/min의 유량을 기준으로 탈착시간을 1, 3, 5, 7분으로 변화를 주어 실험을 진행하였다.

Fig. 6에서 탈착시간을 1, 3, 5, 7분으로 증가시키수록 염 제거율은 53.6, 46.2, 43.4, 37.71%로 감소하였으며 이는 탈착전압을 변화시켰을 때와 비슷한 결과임을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 제작한 카본전극은 -0.1 V의 낮은 전위의 전압과 1분의 짧은 시간만으로도 충분한 탈착이 되어 원활하게 염 제거를 수행할 수 있는 것으로 판단된다.

3.4. 공급액의 유량에 따른 염 제거 효과 비교

흡착조건은 1.2 V, 3분으로 탈착조건은 -0.1 V, 1분으로 설정하고 공급액은 역시 NaCl 100 mg/L의 수용액을 사용하며 유량을 15, 25, 35 mL/min으로 변화를 주어 탈염실험을 진행하였다.

Fig. 7에서 공급액의 유량을 15, 25, 35 mL/min으로 증가시켰을 때 염 제거율은 53.6, 22.4, 19.5%로 감소함을 확인할 수 있다. 이는 유량을 제외한 다른 조건이 모두 동일할 때 공급액의 유량을 증가시키면 공급액 속의 이온들이 전극의 표면에서 전극과 상호인력이 작용하는 시간이 줄어들고 반대로 유량을 감소시키면 공급액의 전극 표면에서의 체류시간이 길어지기 때문에 이온교환이 훨씬 수월할 것으로 사료된다. 또한 전극의 유효면적이 한정적이기 때문에 높은 유량에서는 시간당 처리할 공급액의 양이 많아져 염 제거 효율은 당연히 감소한 것으로 판단된다.

3.5. 공급액의 농도에 따른 염 제거 효과 비교

마지막으로 공급액의 NaCl의 농도를 변수로 하여 실험을 진행하였다. 흡착은 1.2 V, 3분, 탈착은 -0.1 V, 1분, 공급액의 유량은 15 mL/min으로 고정한 다음 공급액의 NaCl 농도를 100, 200, 300, 500 mg/L으로 변화

하여 실험을 진행하였다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 공급액의 농도를 100에서부터 500 mg/L까지 변화시켰을 때 염 제거율은 53.6, 30.1, 18.83, 18.2%로 감소하였다. 이는 전극의 유효면적 내 흡착용량은 한정되어있기 때문에 이온의 농도가 짙은 공급액을 탈염할 때에 염 제거 효율이 감소한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 축전식 탈염공정에 적용할 탄소전극을 활성탄소섬유를 이용하여 제조한 후 공정에 적용하여 염 제거 효과를 관찰하였다. 용매와 고분자 바인더 그리고 활성탄소섬유를 80 : 2 : 18, 80 : 5 : 15의 배합 비율로 활성탄소섬유의 입자크기를 달리하여 용액을 제조한 후 상용화된 그래파이트 시트에 직접 캐스팅 하여 염 제거 성능을 평가하였다. 공정 조건은 흡착전압, 흡착시간, 탈착전압, 탈착시간, 공급액의 유량 그리고 공급액의 농도를 변화하여 실험하였다. 그 결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1. Table 1의 활성탄소섬유의 입자크기와 소재의 배합비율을 토대로 B1, B2, C1, C2의 전극을 제조하였다. 흡착조건으로는 1 V의 흡착전압과 3분의 흡착시간, 탈착조건으로는 -0.1 V의 탈착전압과 1분의 탈착시간으로, NaCl 100 mg/L의 공급액을 분당 15 mL로 공급해 주었다. B1은 22.1%, B2는 18.8%, C1은 52.2%, C2는 34.7%의 염 제거율을 확인하였으며 활성탄소섬유의 함유량이 많을수록 흡착이 가능한 공간이 늘어났고 입자의 크기가 작을수록 비표면적이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

2. 흡착전압을 0.5~1.2 V로 증가시켰을 때 15.6~53.6%의 염 제거 효율을 보였고 흡착시간을 1~7분으로 증가시켰을 때 염 제거효율은 52.86, 53.6%로 증가하였다가 43.47%까지 감소하는 경향을 보였는데 이는 해당 탈착조건에서 3분의 흡착시간동안 흡착한 이온들은 충분한 탈착이 가능하지만 그 이상의 흡착시간에서 흡착된 이온들은 충분히 탈착시키지 못하기 때문에 전극에 잔존하는 이온들에 의해 전극의 흡착능이 떨어진 것으로 사료된다.

3. 탈착전압을 -0.1~-1.0 V로 변화시켰을 때 53.6~44.8%의 염 제거 효율을 보였고 탈착시간을 1~7분으로

로 증가시켰을 때 염 제거효율은 53.6~37.71%의 염 제거 효율을 보였다. 제조한 활성탄소섬유 전극의 최적의 흡착조건은 앞선 실험에서 1.2 V, 3분임을 확인하였다. 해당 조건에서 흡착된 이온들은 -0.1 V, 1분의 탈착조건에서도 충분한 탈착이 이루어져 원활한 흡탈착이 가능하기 때문에 1.2 V, 3분의 흡착조건과 -0.1V, 1분의 탈착조건에서 가장 높은 염 제거효율이 나타났다고 사료된다.

4. 공급액의 유량을 15~35 mL/min으로 변화를 주었을 때 염 제거 효율은 53.6~19.5%로 급격히 감소하였다. 이는 전극 위에서 공급액이 충분히 머무르지 못하여 전극과 공급액의 충분한 상호작용이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 보인다. 공급액의 농도를 100~500 mg/L로 변화를 주었을 때 53.6~18.2%의 염 제거 효율을 보였다. 전극의 유효면적 내의 흡착 능은 일정하기 때문에 많은 이온이 녹아있는 공급액을 처리할 때 염 제거효율이 감소한 것으로 사료된다.

감 사

이 논문은 2018학년도 한남대학교 학술연구비조성 지원에 의하여 연구되었음.

Reference

1. H. M. Qiblawey and F. Banat, "Solar thermal desalination technologies", *Desalination*, **220**, 633 (2008).
2. F. Meng, S. R. Chaeb, A. Drewsc, M. Kraumec, H. S. Shind, and F. Yang, "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material", *Water. Res.*, **43**, 1489 (2009).
3. P. Xu, J. E. Drewes, T. U. Kim, C. Bellona, and G. Amy, "Effect of membrane fouling on transport of organic contaminants in NF/RO membrane applications", *J. Membr. Sci.*, **279**, 165 (2006).
4. K. P. Lee, T. C. Arnot, and D. Mattia, "A review of reverse osmosis membrane materials for desalination-Development to date and future potential", *J. Membr. Sci.*, **370**, 1 (2011).

5. 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).
6. Y. J. Kim and J. H. Choi, "Enhanced desalination efficiency in capacitive deionization with an ion-selective membrane", *Sep. Purif. Technol.*, **71**, 70 (2010).
7. 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. Interface. Sci.*, **264**, 414 (2003).
8. S. Proda, L. Weinstein, R. Dash, A. van der Wal, M. Bryjak, Y. Gogotsi, and P. M. Biesheuvel, "Water desalination using capacitive deionization with microporous carbon electrodes", *ACS. Appl. Mater. Interfaces.*, **4**, 1194 (2012).
9. H. Li, L. Zou, L. Pan, and Z. Sun, "Novel graphene-like electrodes for capacitive deionization", *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 8692 (2010).
10. J. S. Kim, J. H. Jung, and J. W. Rhim, "Performance study of membrane capacitive deionization process applied by perfluoropolymer and aminated poly(ether imide) ion exchange membranes", *Membr. J.*, **25**, 60 (2015).
11. 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).
12. J. C. Farmer, D. V. Fix, G. V. Mack, R. W. Pekala, and J. F. Poco, "Capacitive deionization of NH₄ClO₄ solutions with carbon aerogel electrodes", *J. Appl. Electrochem.*, **26**, 1007 (1996).
13. R. W. Pekala, J. C. Farmer, C. T. Alviso, T. D. Tran, S. T. Mayer, J. M. Miller, and B. Dunn, "Carbon aerogels for electrochemical applications", *J. Non. Cryst. Solids.*, **225**, 74 (1998).
14. R. Ryoo, S. H. Joo, and S. Jun, "Synthesis of highly ordered carbon molecular sieves via template-mediated structural transformation", *J. Phys. Chem. B*, **103**, 7743 (1999).
15. P. Avouris and C. Dimitrakopoulos, "Graphene: Synthesis and applications", *Mater. Today. (Kidlington)*, **15**, 86 (2012).
16. D. C. Moon, K. H. Lee, C. S. Kim, D. H. Kim, M. R. Kim, C. H. Shin, I. Y. Park, S. Y. Nam, and C. G. Lee, "Micropore analysis and adsorption characteristics of activated carbon fibers", *J. Anal. Sci. Technol.*, **13**, 89 (2000).
17. 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).
18. C. O. Park and J. W. Rhim, "Performance of membrane capacitive deionization process using polyvinylidene fluoride heterogeneous ion exchange membranes Part II: Performance study of membrane capacitive deionization process", *Membr. J.*, **27**, 240 (2017).
19. G. Y. Kim and J. W. Rhim, "Performance study of membrane capacitive deionization installed with sulfonated poly(ether ether ketone) and poly(vinyl amine)/poly(vinyl alcohol) membranes", *Membr. J.*, **26**, 62 (2016).