

인장강도가 뛰어난 직물집전체를 이용한 탄소전극의 축전식 탈염공정에서의 제염효과

성두리 · 김대수[†]

충북대학교 화학공학과
28644 충청북도 청주시 서원구 충대로 1
(2020년 3월 23일 접수, 2020년 5월 29일 수정본 접수, 2020년 6월 11일 채택)

The Salt Removal Efficiency Characteristics of Carbon Electrodes Using Fabric Current Collector with High Tensile Strength in a Capacitive Deionization Process

Du-Ri Seong and Dae Su Kim[†]

Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, 28644, Korea

(Received 23 March 2020; Received in revised form 29 May 2020; accepted 11 June 2020)

요 약

직물집전체는 에너지 효율이 높은 담수화 방식인 축전식탈염(Capacitive deionization: CDI)시스템에서 유망한 전극 재료가 될 수 있다. 직물집전체의 매력적인 특징 중 하나는 인장강도가 강하다는 것인데, 기계적 강도가 약한 그래파이트 호일 전극의 대안이 될 수 있다. 또한 섬유적 특성으로 인하여 쉽게 형상을 만들 수 있고, 다공성 물질이라는 점과 섬유 간 공간은 수용성 매질의 흐름을 원활하게 해 준다. 본 연구에 사용된 섬유는 도전성 LM fiber와 carbon fiber를 사용한 방적사를 이용하여 직조 구조로 만들어졌으며, 인장강도는 319 MPa로 그래파이트 호일에 비해서 약 60 배 정도 더 강하다. 전극슬러리의 점도, 흡착전압, 공급액의 유량, 공급액의 농도를 변화시켜 가면서 염 제거효율을 측정하여 결과를 분석하였다. NaCl 200 mg/L, 20 ml/min, 흡착전압 1.5 V 조건에서, 단위 셀에서 43.9%, 100개의 셀을 적층한 모듈에서는 59.8%의 염 제거 효율을 각각 보였다. 단위 셀에서는 흡착전압이 1.3, 1.4, 1.5 V로 증가함에 따라 염 제거효율이 증가하다가 1.6과 1.7 V로 증가하면서 염 제거 효율은 감소하였다. 그러나 100 셀 적층 모듈에서는 1.5 V 이상의 전압에서도 염 제거효율이 완만한 증가세를 나타내었다. 공급액의 유량을 증가시켰을 때 염 제거율은 감소하였고, 또한 공급액의 농도를 증가시켰을 때에도 염 제거율은 감소하였다.

Abstract – Fabric current collector can be a promising electrode material for Capacitive Deionization (CDI) system that can achieve energy-efficient desalination of water. The one of the most attractive feature of the fabric current collector is its high tensile strength, which can be an alternative to the low mechanical strength of the graphite foil electrode. Another advantage is that the textile properties can easily make shapes by simple cutting, and the porosity and inter-fiber space which can assist facile flow of the aqueous medium. The fibers used in this study were made of woven structures using a spinning yarn using conductive LM fiber and carbon fiber, with tensile strength of 319 MPa, about 60 times stronger than graphite foil. The results were analyzed by measuring the salt removal efficiency by changing the viscosity of electrode slurry, adsorption voltage, flow rate of the aqueous medium, and concentration of the aqueous medium. Under the conditions of NaCl 200 mg/L, 20ml/min and adsorption voltage 1.5 V, salt removal efficiency of 43.9% in unit cells and 59.8% in modules stacked with 100 cells were shown, respectively. In unit cells, salt removal efficiency increases as the adsorption voltage increase to 1.3, 1.4 and 1.5 V. However, increasing to 1.6 and 1.7 V reduced salt removal efficiency. However, the 100-cell-stacked module showed a moderate increase in salt removal efficiency even at voltages above 1.5 V. The salt removal rate decreased when the flow rate of the feed was increased, and the salt removal rate decreased when the concentration of the feed was increased. This work shows that fabric current collector can be an alternative of a graphite foil.

Key words: Capacitive deionization, CDI, Fabric current collector, Desalination

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dskim@chungbuk.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

심각해져가는 물 부족 현상과 수질오염으로 인해 깨끗한 물을 확보하기 위한 수처리 기술의 중요성이 확대되고 있다. 전 세계에서 오염된 물로 인한 사망자는 연간 500만 명으로 추정된다. 이로 인해 물에 대한 중요성이 커지고 있으며 사용된 물을 재사용 하고자 하는 연구 및 산업 활동이 중요시 되고 있다[1]. 지구 표면의 70%가 물로 구성되고 있고 그 중 인간이 이용할 수 있는 물은 2.5%에 해당된다. 물은 주로 농업용수, 가정용수, 산업용수로 사용되고 있고 인간 활동에 있어서 필수요소이다[2].

수처리 기술에는 상·하수처리와 해수의 담수화로 크게 2가지로 분류된다. 상수처리란 담수자원을 정화하여 각종 용수를 생산하는 기술이고 하수처리란 산업, 농업, 생활용 폐수를 정화하여 하천으로 방류시키거나 용수로 재활용하는 기술이다. 그리고 해수의 담수화란 해수로부터 염분을 제거하여 용수로 사용하는 기술이다[3-4].

수자원 확보를 위한 물 생산 기술 개발에 대한 관심이 높아지고 있으며 이중 탈염기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. 탈염기술에는 용액 중에 녹아있는 염류들은 분리하기 위한 기술로 증발법, 이온교환법, 역삼투법, 전기투석법 등과 같은 여러 기술들이 있으며, 최근 축전식 탈염(capacitive deionization, CDI) 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. CDI 기술은 이온교환법, 역삼투법, 전기투석법 등의 기존 탈염기술과 비교했을 때 에너지 비용을 크게 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 탈염과정에서 2차 오염물질을 배출하지 않기 때문에 환경 친화적인 탈염기술로 각광받고 있다[5-9]. CDI는 수 볼트 이하의 낮은 전압에서 사용하기 때문에 안전성에서 유리하고, 태양광에서 출력되는 전압으로 충분히 구동 가능하기 때문에 전력선이 닿지 않는 외딴 지역에서 운영이 가능하다[6]. 축전식 탈염기술이란 전극전위를 변화시킴으로써 흡착과 탈착을 반복적으로 수행하고 전위를 인가했을 때 전극표면에 전기 이중층을 형성하고 정전기적인 힘에 의해 반대전하를 갖는 이온들을 흡착하여 제거하는 원리를 말한다. 따라서 탈염 효율을 높이기 위해서는 탄소전극 자체의 흡착용량을 증가시키는 것이 중요하다. CDI장치는 전기이중층 원리를 이용하여 처리수에 포함되어 있는 특정 이온 물질들을 선택적으로 제거할 수 있는 장치로서 하수처리와 같은 수처리 공정에 적용된다[10-14].

CDI 기술에서 가장 중요한 요소 중 하나가 좋은 전극 재료를 개발하는 것에 있다. CDI 전극 재료로서 가져야 할 중요한 특징으로는 가능한 큰 전기 흡착이 가능하도록 단위 중량 당 표면적(specific surface area)과 전기전도도가 커야 하고, 전체 표면적의 전기 흡·탈착의 변화에 빠르게 반응 해야한다[6].

일반적인 CDI기술에서 그래파이트 호일(graphite foil)집전체가 많이 사용되고 있는 편이다. 그래파이트 호일은 도전성이 우수하고 내화학성이 우수한 장점이 있으나, 기계적 강도가 약하다는 단점을 가진다. 국내 상업용 CDI 기술은 모듈을 구성하는 과정에서 스택킹이 수작업으로 진행되기 때문에 기계적 강도가 약한 그래파이트 호일로 인해 전극이 손상되고 탈리된 탄소물질로 인해 쇼트가 발생하여 효율을 감소시킬 수 있고, 대량생산용 코팅 공정에서 약한 물리적 접촉만으로 전극이 쉽게 절단되어 공정상의 문제를 야기할 수 있어 기계적 강도가 강한 물질로 개선이 요구 된다. 그러므로 전극의 성능을 구현하는데 있어서 적합한 집전체의 개발은 중요하다[18].

이러한 그래파이트 호일의 대안으로 직물섬유인 도전성 섬유들은

일반적으로 구부러진 불규칙한 형태를 가지는데 길게 늘어선 분자 사슬로 이루어져 있어서 서로 엉키거나 휘어지면서 접촉 또는 결합하는 형태로 형성되어 있기 때문에 내부에 기공을 가지고 섬유적 유연성도 가지면서 기계적으로 견고하다[19]. 따라서 축전식 탈염 기술을 이용하여 직물집전체에 적용해 보려고 한다.

본연구에서는 일반적인 축전식탈염의 과정에서 집전체를 직물집전체로 하여 축전식탈염기술에 적용이 가능한지를 살펴보고 직물 집전체를 이용하였을 때의 탈염성능에 대해 평가하였다.

2. 연구방법

2-1. CDI 단위셀 실험장치 구성

본 연구에서는 직물집전체를 이용한 탄소전극에 Carbocymethyl Cellulose(CMC)를 전극활물질의 바인더로 사용하여 제작한 이온 교환막 결합형 CDI 전극을 사용하여 단위셀 CDI 장치를 구성하였다. Fig. 1에서 보여준 것처럼 직물전극(양극), 음이온교환막, 분리막(spacer), 양이온교환막, 직물전극(음극)을 순서대로 배열하고 양 쪽에 아크릴 판을 대고 볼트로 고정하여 단위 셀을 구성하였다.

전극의 유효면적이 10×10 cm²의 크기로 잘라서 만든 양극과 음극의 직물집전체 사이에 유입수의 흐름을 원활하게 해주면서 동시에 집전체 간의 접촉을 막아주는 역할을 하는 두께 100 μm의 나일론 스페이서(Nylon Spacer)를 삽입하였다. 양극 집전체에는 음이온 이온교환막을 음극 집전체에는 양이온 이온교환막으로 구성하였다. 전극의 중앙에는 지름 1 cm의 구멍을 뚫어 유체가 전극의 사면에서 중앙으로 빠져 나갈 수 있도록 유로를 형성하였다.

단위셀 CDI 장치를 이용한 실험 구성은 다음의 Fig. 2에 나타나 있다. 이온이 함유된 공급액은 펌프(400DM2, Watson-Marlow Corp.)를 통해 셀의 유입구로 이동시키고, 흡착과 탈착 전압의 조절과 전기 인가방식을 변경하기 위하여 Potentiostat를 설치하였고, TDS(Total Dissolved Solid) 측정기와 pH미터를 통해 CDI 단위셀 통과 전·후의 수치변화를 모니터링 할 수 있도록 하였다.

2-2. 직물전극 제조

본 연구에서 사용한 직물집전체는 도전성 LM fiber와 carbon fiber를 사용한 방직사로 300 μm 두께의 직조 구조로 만들어졌다.¹⁾

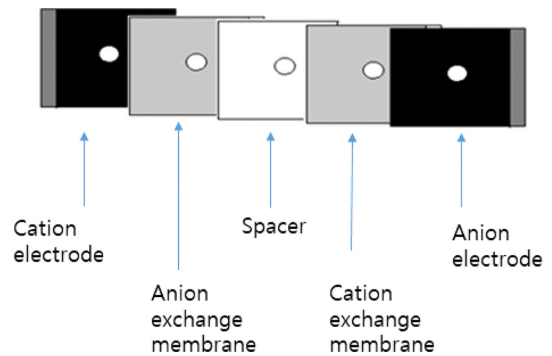


Fig. 1. Configuration schematic of the CDI unit cell.

¹⁾The fabric for the electrodes was supplied by Sima Co. Yeong Cheon Factory.
²⁾Tested and reported (03AA1600008926) by Korea Apparel Testing and Research Institute.
³⁾Nuclear Grade = 5.2 MPa, High Purity Grade = 4.5 MPa, Industrial Grade = 4.5 MPa

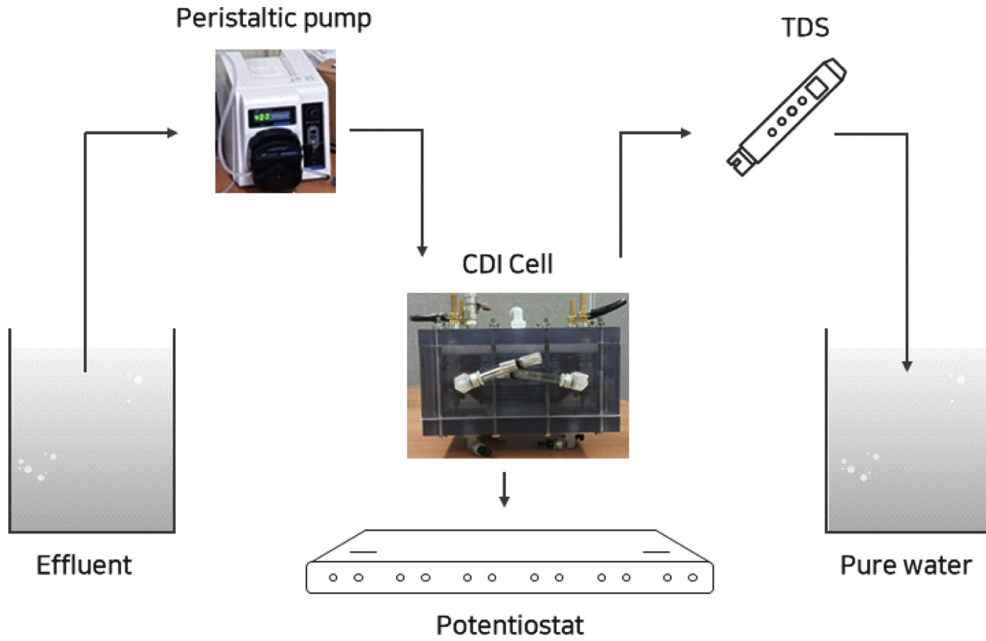


Fig. 2. Schematic Diagram of CDI process test system.

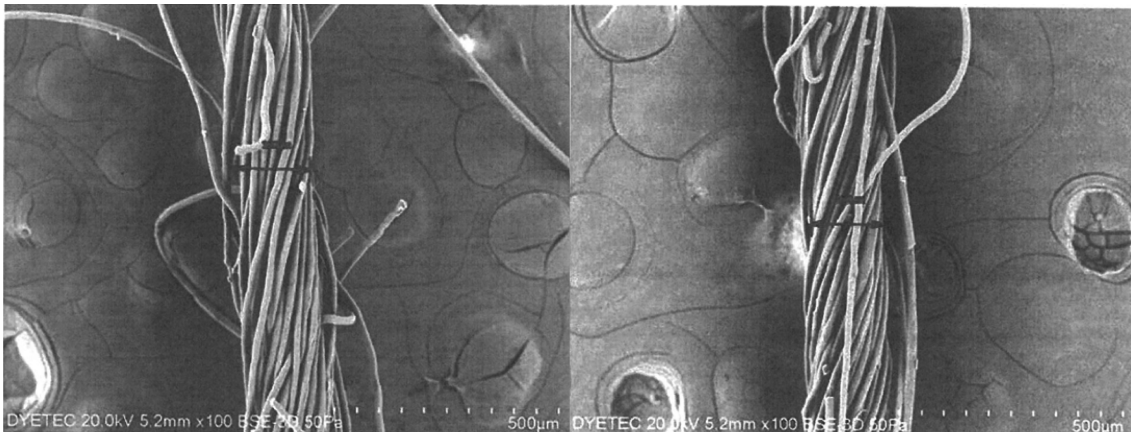


Fig. 3. Scanning electron micrographs of fiber. Acceleration voltage was 20 kV and the magnification scale was 100 times.

실험에 사용된 식물집전체의 인장강도는 319 MPa²⁾로 측정되었으며, 이는 인장강도가 4.5-5.2 MPa³⁾인 그래파이트 호일에 비해서 인장강도가 약60 배 정도 더 강한 것이다. 식물집전체의 기공 사이즈는 0.7~1.3 nm이며, 신도는 20~25% 범위 내이고, 항복 강도는 10~100 kgf/cm 범위 내이다. 다음의 Fig. 3은 직물을 전자현미경(SEM)으로 20 kV에 100배 배율로 찍은 사진이다. Doctor blade를 이용하여 전극슬러리를 식물집전체 위에 캐스팅하였다. 전극 압연공정을 거쳐 전극의 압력을 조절하고 전극 크기에 맞게 재단하였다.

전극슬러리 믹싱과정은 초순수에 바인더(Carbocymethyl Cellulose; CMC)를 투입하고 60분 교반하고 도전재인 활성탄을 투입하고 30분 동안 교반한 후 SBR(Styrene Butadiene Rubber)투입하고 60분 교반하였다. 진공펌프를 작동시켜 저압에서 탈포하고 점도를 체크하여 전극슬러리를 제조하였다. 전극 슬러리 제조에 있어서 활물질과 바인더의 조합비는 92대 8, 94대 6, 그리고 96대 4로 각각 제작하여 기초 실험을 진행하여 96대 4에서 염착거 효율이 가장 높은 것을 확인하였다. 본 연구의 결과는 활물질과 바인더의 비율을 96

대 4를 기준으로 제작하여 실험하였다.

식물집전체에 전극슬러리를 코팅한 결과 집전체와 활물질의 접촉성과 균일성은 대체로 우수하였다. 직물의 비저항은 0.37~1.3 Ω·cm로 측정되었는데, 이는 일반적인 폴리머결합 활성탄 분말전극인 복합전극(composite electrode)의 비저항 값인 11.5-25 Ω·cm 보다는 상당히 작은 값이다[15]. 전극밀도는 0.77 g/cm³로 나타났다.

2-3. 식물전극을 이용한 100 stack 모듈

개발된 식물 집전체를 이용하여 100개의 셀을 적층한 장방형 모듈을 제작하여 성능 테스트를 진행하였다. 두께 300 µm 직물에 슬러리를 약 150 µm로 코팅하였다. 단면코팅 했을 때 450 µm 양면코팅 했을 때는 600 µm 두께로 측정되었다. 전극압연공정을 한 후 두께는 550 µm이다. 셀의 형태는 식물전극(양극)/음이온교환막/분리막/ 양이온교환막/식물전극(음극)으로 각각의 두께는 550 µm/100 µm/100 µm/100 µm/550 µm으로 총 두께는 약 1,400 µm이다.

3. 실험 결과

3-1. 점도에 따른 전극의 염 제거 효과 비교

직물 집전체 특성상 전극활물질 슬러리를 이용하여 전극을 제작하게 되므로, 용매가 투과하는 현상 및 접촉성 등을 고려하기 위하여 점도에 대한 평가를 진행하였다. 점도에 따른 전극 특성 평가를 위해 전극슬러리의 점도(cP)는 800, 1,000, 1150, 1,300, 1500, 1700으로 달리하여 실험하였다.⁴⁾ 염 제거효율은 다음의 식 (1)을 이용하여 계산하였다[16].

$$\text{염제거효율(\%)} = \frac{\text{초기전도도} - \text{최종전도도}}{\text{초기전도도}} \quad (1)$$

전극슬러리는 활물질 함량 96%, 점도 1,150 cP에서 가장 좋은 성질을 보였으며, 직물집전체 사용시 가장 적합하다고 판정되었다. 전극

슬러리의 점도가 1,500 cP가 되면서 염 제거효율은 급격히 감소하였고, 1700 cP의 경우에는 전극 제조 시에 금이 가는 이유로 접촉성이 떨어지는 현상이 발생하여 염 제거효율을 평가할 수 없었다. 이 실험을 통하여 직물 집전체를 이용하여 전극을 제작할 경우에는 적정 전극슬러리의 점도는 800~1,150 cP로 파악되었다.

3-2. 흡착전압에 따른 염 제거 효과 비교

개발된 직물 집전체의 성능평가 및 조건 확립을 위하여 단위 셀 평가를 진행하였다. 공급액은 200 mg/L의 NaCl을 사용하였다. 흡착전압에 따른 염 제거 효과를 살펴보기 위하여 흡착시간은 5분으로 탈착전압과 시간은 -0.1 V, 5분으로 고정된 후 흡착전압을 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 V로 변화를 주어 실험을 하였다. 실험 결과는 Fig. 4에서 보여주는 것과 같이, 흡착전압이 1.3, 1.4, 1.5 V로 증가함에 따라 염 제거효율은 34.1, 38.5, 43.9%로 증가하였다. 여기에서 흡착

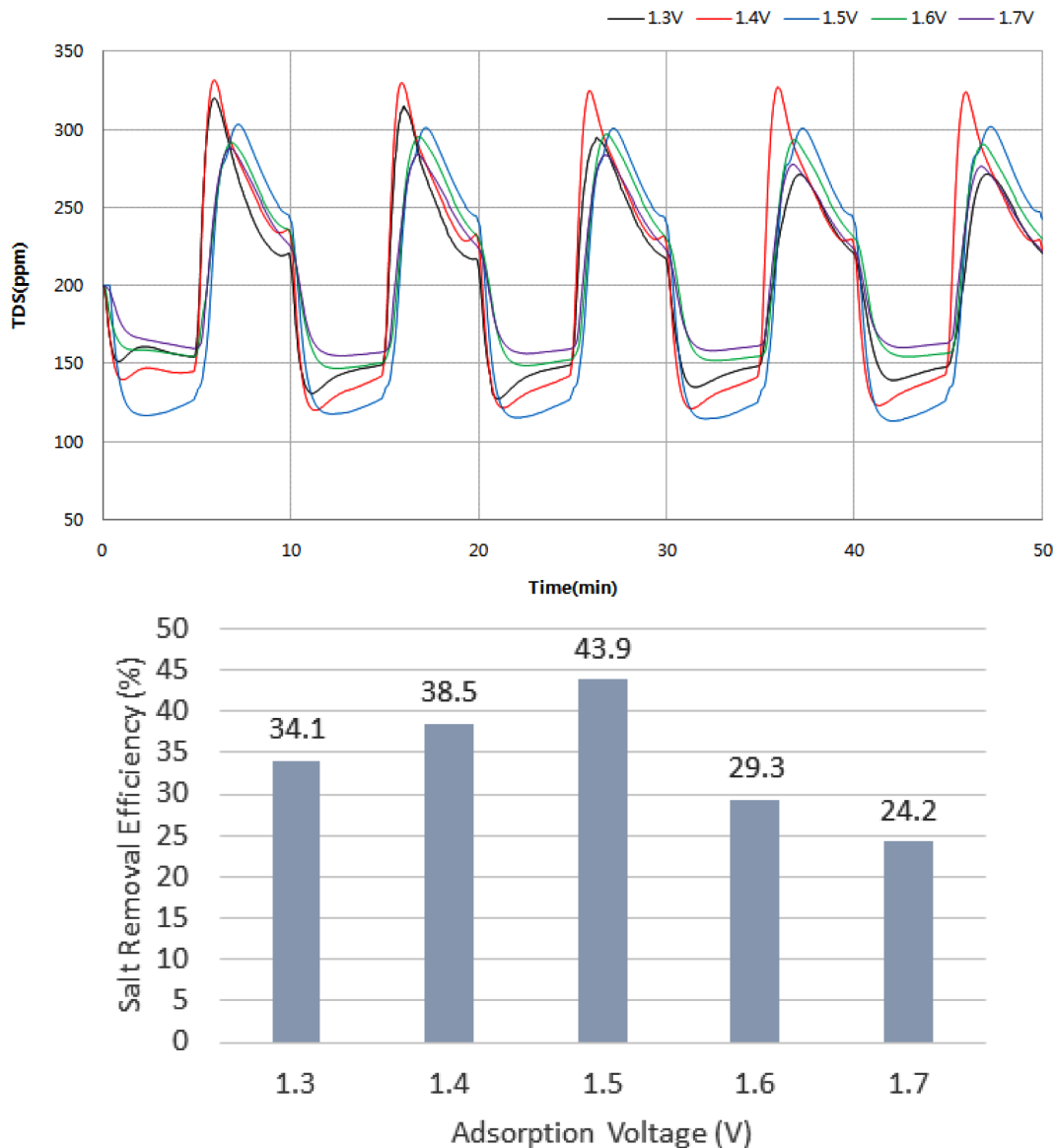


Fig. 4. Comparison of salt removal efficiency according to the adsorption voltage of CDI single cell with fabric electrode (flow rate: 20 ml/min).

⁴⁾The viscosity of the slurry for commercial electrodes is about 800 cP.

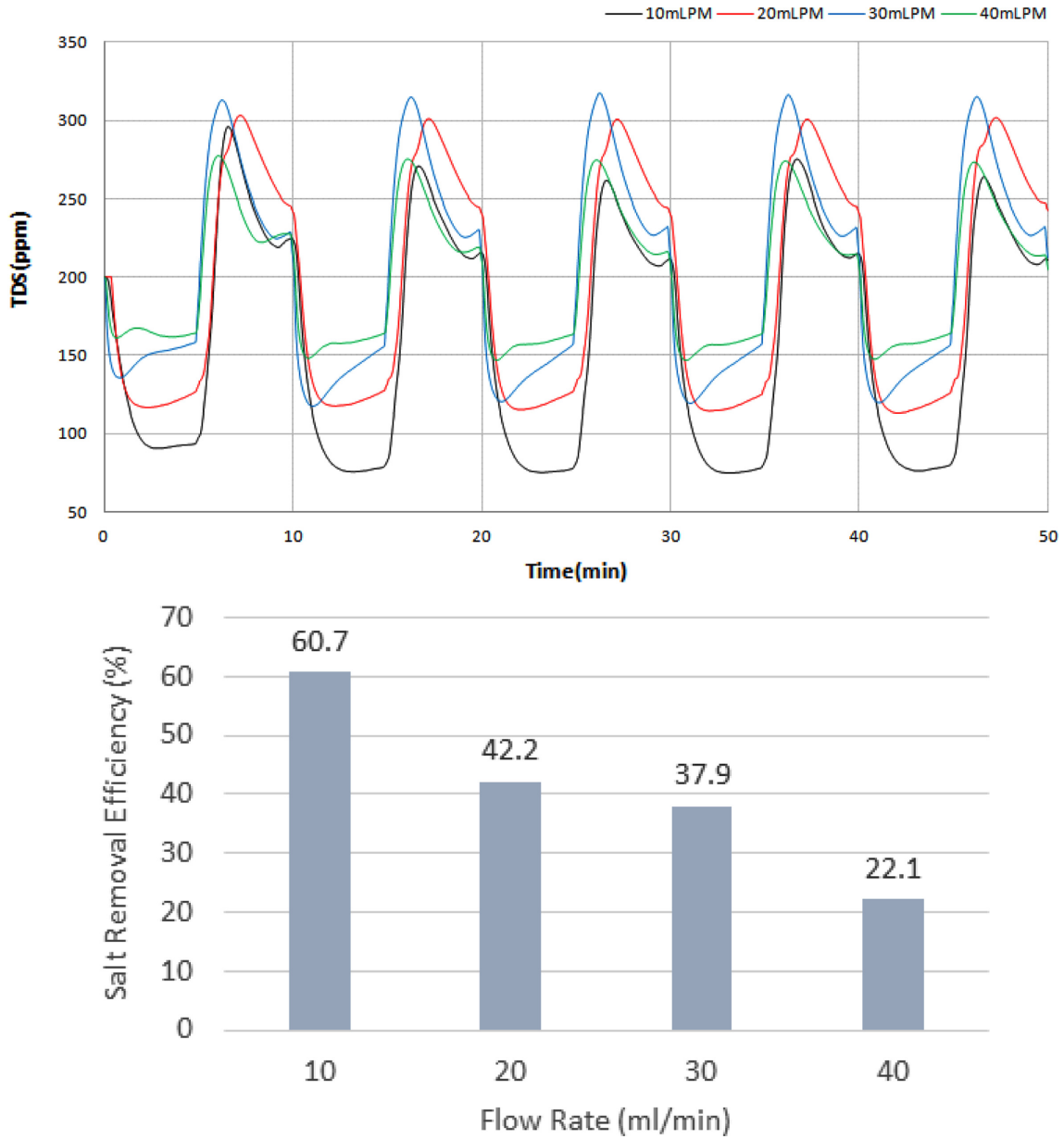


Fig. 5. Comparison of salt removal efficiency in accordance with feed flow rate.

전압을 증가시켰다는 것은 정전기 인력이 증가하여 동일한 시간에 더 강한 인력이 작용하여 상대적으로 더 많은 이온을 끌어당겨 흡착시킬 수 있다는 것으로 해석할 수 있다[17]. 흡착전압이 1.6, 1.7 V로 증가함에 따라 이번에는 29.3, 24.2%로 감소하였다. 이는 1.5 V 이상의 전압에서 물의 전기분해반응이 일어나 흡착전압을 1.5 V 보다 높게 하는 것은 오히려 염 제거 효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

3-3. 공급액의 유량에 따른 염 제거 효과 비교

공급액의 유량에 따른 염 제거 효과를 알아보기 위하여 흡착조건은 1.5 V, 5분으로 하고, 탈착조건은 -0.1 V, 5분으로 설정하고, 공급액은 NaCl 100 mg/L의 수용액을 사용하고, 유량을 10, 20, 30, 40 ml/min으로 변화를 주면서 CDI 탈염 효율을 측정하였다. Fig. 5에서 보여주는 바와 같이, 공급액의 유량을 10, 20, 30, 40 ml/min으로 증가시켰을

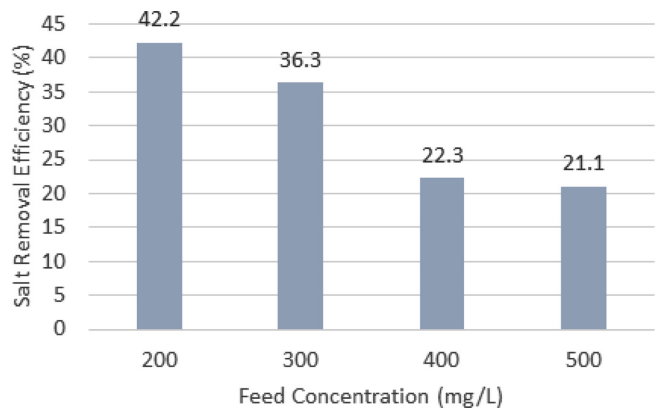


Fig. 6. Comparison of salt removal efficiency in accordance with feed concentration.

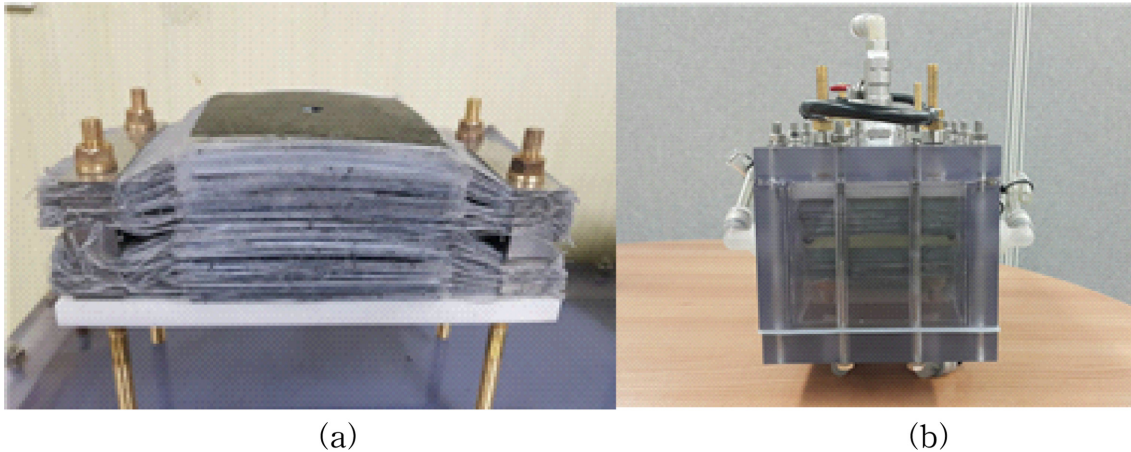


Fig. 7. Module manufactured using one hundred fabric electrode cells (a) Module stacked with fabric electrode/membrane/spacer/membrane/fabric electrode in order (b) Assembled rectangle module with 100 stacked cells.

때 염 제거율은 60.7, 42.2, 37.9, 22.1%로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 공급액의 유량 변수 이외의 다른 조건들을 동일하게 하였을 때, 공급액의 유량을 증가시키면 공급액 속의 염 이온들이 전극의 표면에서 전극과 상호인력이 작용하는 시간이 줄어들어 탈염 효율이 떨어지고, 이와는 반대로 공급액의 유량을 감소되면 전극 표면에서 공급액의 체류시간이 상대적으로 길어지기 때문에 이온 교환이 훨씬 수월하게 되어 탈염효율이 증가하게 되는 것이다[17]. 또한 전극의 유효면적이 일정하기 때문에 상대적으로 유량이 더 클 경우에는 시간당 처리할 공급액의 양이 상대적으로 많아져 탈염 효율은 감소하는 것으로 판단된다. 10 ml/min은 60.72%로 TDS제거율이 가장 높게 나타났지만 심하게 낮은 유속으로 대량으로 수행할 때 어려움이 있기에 유속을 20 ml/min으로 고정하여 실험을 진행하였다.

3-4. 공급액의 농도에 따른 염 제거 효과 비교

공급액 NaCl의 농도의 변화에 따른 염 제거 효과를 비교하는 실험을 진행하였다. 흡착은 1.5 V로, 탈착은 -1.5 V로 각각 5분씩, 공급액의 유속은 20 ml/min으로 고정하고 NaCl의 농도를 200, 300, 400, 500 mg/L로 변화시켜 염 제거 효율을 측정하는 실험을 하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 공급액의 농도를 200부터 500 mg/L까지 변화시켰을 때 염 제거율은 42.4, 36.3, 22.3, 21.1%로 감소하였다. 이는 전극의 유효면적 내 흡착용량 즉 이온처리 능력이 한정되어 있기 때문에 공급액의 농도가 높을수록 염 제거 효율은 감소하는 것으로 사료된다.

3-5. 직물전극을 이용한 100 stack 모듈 효과

다음의 Fig. 7(a)에서는 100개의 단위 셀들을 stacking한 모듈을 보여주고 있다. Fig. 7(b)는 실험을 위하여 제작한 장방형 모듈의 조립된 형태이다.

개발된 직물 집전체를 이용하여 100개의 셀을 적층한 모듈의 성능평가를 위하여 흡착전압에 따른 염 제거 효과를 살펴보았다. 흡착시간은 5분으로 탈착전압과 시간은 -0.1 V, 5분으로 고정된 후 흡착전압을 1.3, 1.5, 1.7V로 변화를 주어 실험을 하였다. 공급액은 200 mg/L의 NaCl을 사용하였으며 그 결과는 Fig. 8에서 확인할 수 있다. 단위 셀에서는 흡착전압이 1.3, 1.4, 1.5 V로 증가함에 따라

염 제거효율이 증가하다가 1.6, 1.7 V에서는 오히려 감소하였다. 그러나 100 셀 적층 모듈에서는 1.5 V 이상의 전압에서도 염 제거효율이 수렴하는 형태의 값으로 나타났다.

모듈 실험 결과는 다르게 나타났다. 흡착전압 1.3 V가 주어졌을 때, 단위 셀에서는 염 제거 효율은 34.1%가 나타났다. 이웃하는 셀 사이에 상호 작용이 없다고 가정하면, 그리고 계속해서 염의 농도는 낮아지겠지만 이의 영향 역시 없다고 가정한다면, 첫 번째 셀을 통과한 65.9%의 염은 두 번째 셀을 통과하면서 다시 염 제거효율이 34.1%가 되고, 3개의 셀을 통과하면 71.4%의 염이 제거 될 것이다. 그러므로 100개의 셀을 통과한 후에는 총 염 제거 효율은 상당히 높을 것으로 예상되어진다. 그러나 실험 결과는 59.1%로 단위 셀 보다는 높게 나왔지만 예상보다는 낮았다. 한 가지 특징은 전압 변화에 크게 변화가 없었다. 즉 흡착전압 증가에 조금씩 증가하면서 61% 근처로 수렴하는 경향을 보였다.

선행연구에서 이와 유사한 결과를 찾아보려고 노력하였으나, 찾지 못하였다. 이러한 수렴 값의 원인으로 생각해 볼 수 있는 것 가운데 하나는 적층되어 있는 전극의 단자 간의 전류이동이 활발하지 않은 문제와 단자와 직접 이어진 일부 섬유에서만 전하이동이 발생하여 전체 용량 중 일부분만이 전극반응을 일으킬 가능성이 있을 수 있다고 판단하였다. Fig. 9(a)에 보여주는 것과 같이 초기 단위 셀 실험을 위하여 제작된 전극 형태는 100개의 셀을 스택킹하면서 조립의 문제점들을 해결하기 위하여 (b)의 형태로 개선하였다. 이 과정에서 고른 전류의 인가의 중요성도 알게 되었다. 그러므로 적층된 모듈에서의 탈염 효율 값의 수렴의 원인 규명의 한 방향으로 전극과 리드의 형태에 따른 전류의 분포 등의 영향과 직물전극 모듈 셀 전극 하나하나에 직접 전류를 인가할 수 있도록 개별터미널을 제작하여 실험을 해 볼 필요성을 있다. 이는 다음 연구에서 진행하는 계획을 가지고 있다.

4. 고찰 및 결론

이 연구에서 사용한 직물집전체는 도전성 LM fiber와 carbon fiber를 사용한 방직사로 300 μm 두께의 직조 구조이다. 전극슬러리를 직물집전체 위에 캐스팅하였고, 전극 압연공정을 거쳐 전극의

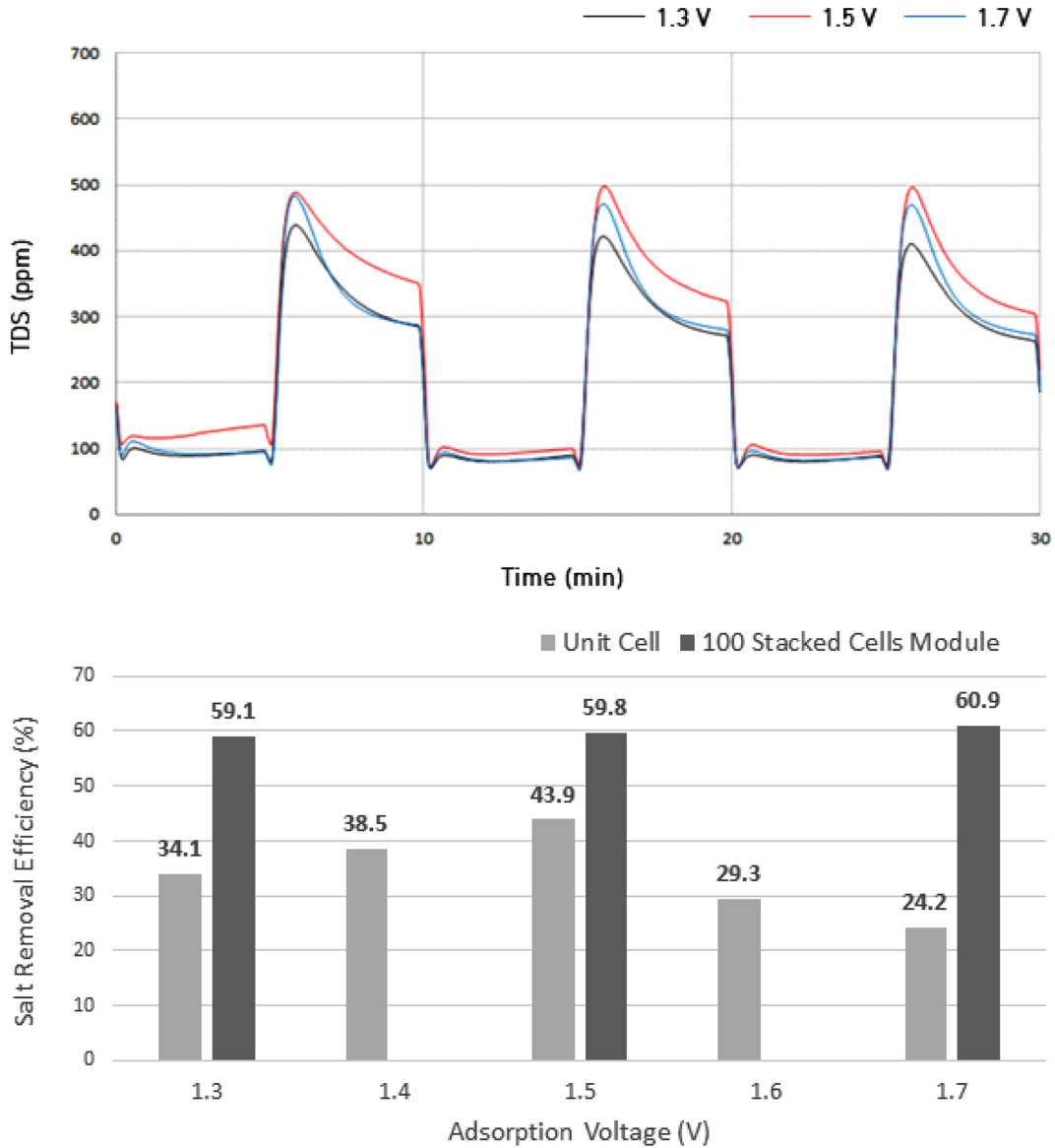


Fig. 8. Comparison of salt removal efficiency in accordance with feed concentration.

압력을 조절하고 전극 크기에 맞게 재단하였다. 전극의 유효면적은 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 이고 양극과 음극의 직물집전체 사이에 유입수의 흐름을 원활하게 해주면서 동시에 집전체 간의 접촉을 막아주는 역할을 하는 두께 $100 \mu\text{m}$ 의 나일론 스페이서를 삽입하였다. 전극의 중앙에는 지름 1 cm의 구멍을 뚫어 유체가 전극의 사면에서 중앙으로 빠져 나갈 수 있도록 유로를 형성하였다.

흡착전압을 1.3, 1.4, 1.5 V로 증가시켰을 때 염 제거효율은 34.1, 38.5, 43.9%로 증가하였고, 흡착전압이 1.6, 1.7 V로 증가시켰을 때에는 29.3, 24.2%로 감소하였다. 이는 1.5 V의 전압에서는 물의 전기분해반응이 일어나므로 흡착전압을 1.5 V 보다 높아질 때 오히려 염 제거 효율이 떨어지는 것으로 조사되었다.

공급액의 유량을 10, 20, 30, 40 ml/min으로 증가시켰을 때 염 제거율은 60.7, 42.2, 37.9, 22.1%로 감소하였다. 이는 공급액의 유량이 증가하면 공급액 속의 염 이온들이 전극의 표면에서 전극과 상호 작용하는 시간이 줄어들고 탈염 효율이 떨어지고, 역으로 공급액의 유량이 감소하면 전극 표면에서의 공급액의 이온들의 체류시

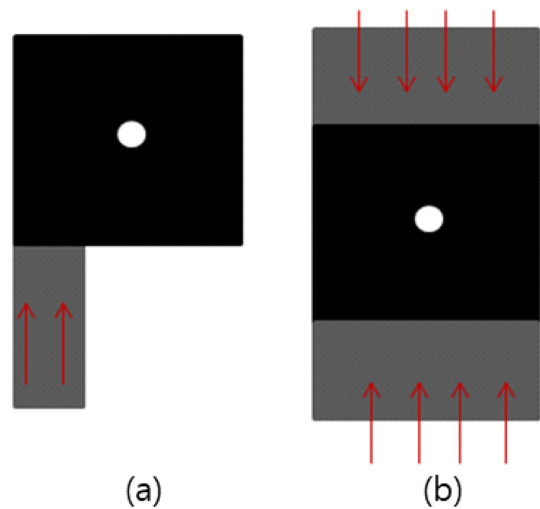


Fig. 9. Electrode lead types (a) lead attachment for unit cell test (b) shape of lead for 100 cell stacking for module assembly.

간이 상대적으로 길어지기 때문에 상호 작용이 더 많이 일어나는 것으로 여겨진다. 또한 전극의 유효면적이 일정하기 때문에 상대적으로 유량이 더 클 경우에는 시간당 처리할 공급액의 양이 상대적으로 많아져 탈염 효율은 감소하는 것을 관찰 할 수 있었다. 또한 공급액의 농도를 200부터 500 mg/L까지 변화시켰을 때 염 제거율은 42.4, 36.3, 22.3, 21.1%로 감소하였다. 이는 전극의 유효면적 내 흡착용량 즉 이온처리 능력이 일정하기 때문에 이온의 농도가 짙은 공급액을 탈염할 때에는 염 제거 효율은 감소하는 것으로 판단된다.

본 연구에서의 결론은 기존에 사용되는 기계적 강도가 약한 그라파이트 호일 전극의 대안으로 직물집전체의 가능성이 높다고 판단하였다.

References

1. Trainham, J. A. and Newman, J., "A Flow-Through Porous Electrode Model: Application to Metal-Ion Removal from Dilute Streams," *J. Electrochem. Soc.*, **124**, 1528(1997).
2. Postel, S. L., Daily, G. C. and Ehrlich, P. R., "Human Appropriation of Renewable Fresh Water," *Science*, **271**, 785-788(1996).
3. Blaedel, W. J. and Wang, J. C., "Flow Electrolysis on a Reticulated Vitreous Carbon Electrode," *Anal. Chem.*, **51**, 799-802(1979).
4. Matlosz, M. and Newman, J., *J. Electrochem. Soc.*, **133**, 1850-1886(1986).
5. Welgemoed, T. J. and Schutte, C. F., "Capacitive Deionization TechnologyTM: An Alternative Desalination Solution," *Desalination*, **183**, 327-340(2005).
6. Oren, Y., "Capacitive Deionization (CDI) for Desalination and Water Treatment — Past, Present and Future (a review)," *Desalination*, **228**, 10-29(2008).
7. Anderson, M. A., Cudero, A. L. and Palma, "Capacitive Deionization as an Electrochemical Means of Saving Energy and Delivering Clean Water. Comparison to present desalination practices: Will it compete?," *Electrochimica Acta*, **55**, 3845-3856(2010).
8. Zou, L. Morris, G. and Qi, D., "Using Activated Carbon Electrode in Electrosorptive Deionisation of Brackish Water," *Desalination*, **225**, 329-340(2008).
9. Biesheuvel, P. M., "J. Colloid Thermodynamic Cycle Analysis for Capacitive Deionization," *Interface Sci.*, **332**, 258-264(2009).
10. Park, B. H., Kim, Y. J., Park, J. S. and Choi, J. H., J. Ind. "Facile Synthesis of Carbon-Coated Silicon/Graphite Spherical Composites for High-Performance Lithium-Ion Batteries," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **17**, 717-722(2011).
11. Gabelich, C. J., Tran, T. D. and Suffet, I. H., "MEL Environ. Electrosorption of Inorganic Salts from Aqueous Solution Using Carbon Aerogels," *Sci. Technol.*, **36**, 3010-3019(2002).
12. Li, H., Zou, L., Pan, L. and Sun, Z., "Environ Novel Graphene-Like Electrodes for Capacitive Deionization," *Sci. Technol.*, **44**, 8692-8697(2010).
13. Lee, B. R., Jeong, I. J. and Park, S. G., "J. Effects of N & P Treatment Based on Liquid Organic Materials for Capacitive Deionization (CDI)," *Korean Electrochem. Soc.*, **16**, 123-128(2013).
14. Li, H., Pan, L., Lu, T., Zhan, Y., Nie, C. and Sun, Z., "A Comparative Study on Electrosorptive Behavior of Carbon Nanotubes and Graphene for Capacitive Deionization," *J. Electroanal. Chem.*, **653**, 40-44(2011).
15. Kim, C., Srimuk, P., Lee, J., Fleischmann, S., Aslan, M. and Presser, V., *Carbon*, **122**, 329-335(2017).
16. Moon, D. C., Lee, K. H., Kim, C. S., Kim, D. H., Kim, M. R., Shin, C. H., Park, I. Y., Nam, S. Y. and Lee, C. G., "J. Micropore Analysis and Adsorption Characteristics of Activated Carbon Fibers," *Anal. Sci. Technol.*, **13**, 89-95(2000).
17. Park, C. O., Oh, J. S. and Lim, J. W., "Anti-fouling Graphene-based Membranes for Effective Water Desalination," *Membrane Journal*, **28**, 271-283(2018).
18. Youngmee, B., "A Study on the Characteristics of Natural Preservative Agent-treated Fabrics for Textile Cultural Properties Preservation," *Science Journal*, **25**, 197-206(2009).
19. Young, J. J., Myoung, H. L., Hae, W. C. and Kee, H. L., "Thermal Characteristics of a Wet Clutch," *Dept of Textile Eng.*, **121**(3), 610-617(1999).