



정수처리 공정 적용을 위한 MCDI (Membrane Capacitive Deionization) Module의 수용액 내 TDS 제거 특성에 관한 연구

A study on the TDS removal characteristics in aqueous solution using MCDI module for application of water treatment process

오창석^{1,2}·안주석²·오현제^{1,2*}
Changseog Oh^{1,2}·Jusuk An²·Hyun-Je Oh^{1,2*}

¹과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과, ²한국건설기술연구원 국토보전연구본부
¹School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology, ²Department of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

pp. 259-275

pp. 277-284

pp. 285-292

pp. 293-300

pp. 301-309

ABSTRACT

Recently, various researches have been studied, such as water treatment, water reuse, and seawater desalination using CDI (Capacitive deionization) technology. Also, applications like MCDI (Membrane capacitive deionization), FCDI (Flow-capacitive deionization), and hybrid CDI have been actively studied. This study tried to investigate various factors by an experiment on the TDS (Total dissolved solids) removal characteristics using MCDI module in aqueous solution. As a result of the TDS concentration of feed water from 500 to 2,000 mg/L, the MCDI cell broke through faster when the higher TDS concentration. In the case of TDS concentration according to the various flow rate, 100 mL/min was stable. In addition, there was no significant difference in the desorption efficiency according to the TDS concentration and method of backwash water used for desorption. As a result of using concentrated water for desorption, stable adsorption efficiency was shown. In the case of the MCDI module, the ions of the bulk solution which is escaped from

Received 28 May 2021, revised 12 August 2021, accepted 15 August 2021.

*Corresponding author: Hyun-Je Oh (E-mail: hjoh@kict.re.kr)

- 오창석 (석사과정) / Changseog Oh (Master Student)
대전광역시 유성구 가경로 217, 34113
217, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea
- 안주석 (전임연구원) / Jusuk An (Researcher)
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea
- 오현제 (선임연구원) / Hyun-Je Oh (Senior Researcher)
대전광역시 유성구 가경로 217, 34113
217, Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

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.

the MCDI cell to the spacer during the desorption process are more important than the concentration of ions during desorption. Therefore, the MCDI process can get a larger amount of treated water than the CDI process. Also, prepare a plan that can be operated insensitive to the TDS concentration of backwash water for desorption.

Key words: Adsorption, Desorption, Desalination, MCDI, TDS

주제어: 흡착, 탈착, 탈염, 막 결합 축전식 탈염, 총 용존 고형물

1. 서 론

인구 증가와 수질 오염으로 인해 지구상에서 인간이 사용할 수 있는 깨끗한 물이 점차 감소하고 있다. 이에 따라 염지하수를 음용수로 사용하기 위한 노력과 해수보다 상대적으로 이온물질의 농도가 낮은 기수(brackish water)를 담수화하여 재이용하려는 시도가 계속되고 있다 (Ahmad et al., 2015). 물의 담수화와 재이용하는데 있어 가장 중요한 정수처리 공정 중 하나가 물속에 존재하는 이온 성분을 제거하는 것인데, 이를 탈이온화 또는 탈염이라고 한다. 탈염기술(desalination)이란 물에서 염을 제거하는 기술로 해수 담수화, 보일러 순환수 제조, 초순수 제조, 발전소의 냉각수, 지하수 중의 환경오염물질 제거 등 다양한 분야에서 광범위하게 사용되고 있는 기술이다 (Oren, 2008). 수 처리 기술에 대한 중요성은 시간이 흐를수록 더욱 중요해지고 있으며, 현재 탈염기술 중에서 가장 널리 사용되고 있는 기술은 증발법, 이온교환법, 역삼투막법, 전기투석법 등의 기술이 적용되고 있다. 하지만 이들 공정은 운전 과정에서 높은 에너지 소모, 이온교환수지의 재생 과정에서의 고농도의 염 폐액 발생, 막 오염에 의한 주기적인 교체 및 처리 수량 감소, 제거효율 등의 문제점을 갖고 있다 (Oren, 2008; Suss et al., 2015). 이러한 문제점을 해결할 수 있는 새로운 탈염기술로서 전기 화학적 방법을 이용한 축전식 탈염(CDI, capacitive deionization) 기술에 대한 연구가 1990년대 중반 이후 본격적으로 이루어지고 있다 (Suss et al., 2015; Zhao et al., 2020). 축전식 탈염 기술은 표면적이 넓고 전기전도성이 우수한 탄소물질 전극을 사용하여, 전위를 인가했을 때, 전극 표면에 생성되는 전기 이중층(EDL, electric double-layer)의 정전기적 인력을 이용하여 수용액상에 있는 이온을 흡착하여 제거하는 기술이다 (Zhao et al., 2020). 흡착 시, 음극에는 양이온이, 양극에는 음이온이 흡착되도록 하며, 전압을 단락하거나 역 전위를 가하여 이온을 탈

착하여 전극을 재생시킨다. 따라서 용액 중에서 전하를 띤 모든 이온들을 제거할 수 있다 (Porada et al., 2013).

하지만, 축전식 탈염 기술은 방전 시, 이온들이 완전히 떨어지지 않아 염 제거 효율을 감소시키는 문제점이 발생하기도 한다. 이러한 문제점을 보완하고 성능 향상을 위해 전극에 이온교환막(IEM, ion exchange membrane)을 결합한 형태인 막 결합 축전식 탈염(MCDI, membrane capacitive deionization) 공정이 2000년대 중반 이후 현재까지 연구가 활발하게 이루어지고 있다 (Biesheuvel and Wal, 2010; Song et al., 2017). MCDI 공정은 음이온 및 양이온 교환막을 결합함으로써, 이온을 선택적으로 통과시켜 전극에 흡착과 탈착이 이루어지도록 하고 재생 및 유지 관리가 쉬운 특징을 가지고 있다. 또한, 염 제거율 감소를 보완하고 전해질과 전극이 직접적으로 접촉되는 것을 방지하여 전극의 오염을 줄일 수 있어 차세대 수 처리 기술로서 주목 받고 있다 (Biesheuvel et al., 2011; Zhao et al., 2012).

MCDI 공정에서 전원 공급 방식은 탈염 특성을 결정하는 매우 중요한 요인 중에 하나이다. 전원 공급 방식에 따라 정전류(CC, constant current)와 정전압(CV, constant voltage) 방식이 있다 (Choi, 2014; Choi and Kim, 2015). 정전류 방식은 정전압 방식보다 에너지 소비율이 적어 에너지 소비 관점에서 더 높은 효율을 보이는 장점이 있지만, 동일한 시간 대비 흡착량이 적은 단점을 가지고 있다. 이에 반해, 정전압 방식은 탈염 과정에서 정전류 방식보다 더 빠르고 높은 효율을 갖는 장점이 있지만, 흡착 속도가 일정하지 않는 단점이 있어 MCDI 공정 목적에 따라 정전류 및 정전압 방식을 선택적으로 운영한다 (Choi and Kim, 2015; Kang et al., 2014).

이에 따라 본 연구에서는 상수원의 염도가 높아 탈염 기술 등의 도입을 고려해야 하는 정수처리 공정 적용을 위한 MCDI module을 이용하여 수용액 내 TDS(total dissolved solid) 제거 특성에 관한 연구를 진



행하였다. 실험의 전원 인가 방식은 정전압 방식으로 하여 유출수의 TDS 농도변화를 측정하였고, 운전 변수는 유입수의 TDS 농도, 유속, 세척수 농도 및 탈착 방법 등을 조절하여 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 MCDI Module 구성 및 장치

본 연구에 사용된 다공성 탄소 전극은 P사(Purechem Co., Cheongwon, Chungbuk, Korea)의 Ecomite 20BI 제품을 사용하였다. 150 μm 의 두께와 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 면적으로 이루어진 양극과 음극이 각각 10장씩 총 20장이 하나의 module로 구성되어 있으며, Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1 양극(Cathode)의 상·하부에는 음이온 교환막(Anion Exchange Membrane)이 한 장씩 장착되어 있고, 음극(Anode)의 상·하부에는 양이온 교환막(Cation Exchange Membrane)이 각각 한 장씩 장착되어 있다. 이온교환막 사이에는 유체가 통과할 수 있도록 90 μm 의 spacer(나일론 넷)가 장착되어 있고, 중앙에 1 cm의 구멍을 통해 유체가 전극의 사면에서 중앙으로 빠져나갈 수 있도록 구성되어 있다. 탄소전극 양쪽에는 전극을 밀봉하기 위하여 두께 150 mm의 실리콘 판 두 개를 대고 볼트로 고정시켜 셀을 조립하였다. 실험에 필요한 sodium chloride(NaCl)는 SAMCHUN Chemical사(Seoul, Korea)의 제품을 사용하였다.

실험 장치는 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 유입수는 정량 펌프(MK-07528-30, Masterflex, Germany)를 이용해 일정한 유량을 MCDI module에 공급하여 주었다. Fig. 2 동시에 전위가변기(potentiostat, Keysight E36313A, USA)를

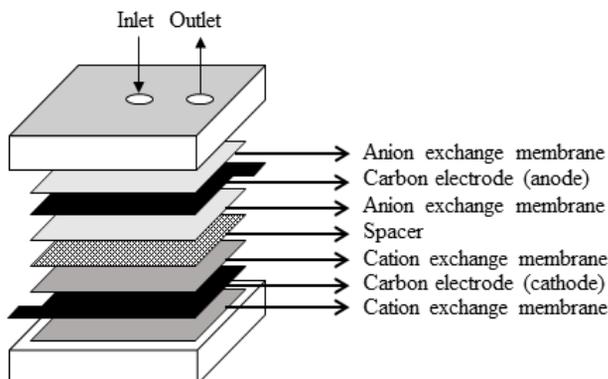


Fig. 1. Configuration schematic of the membrane capacitive deionization (MCDI) module.

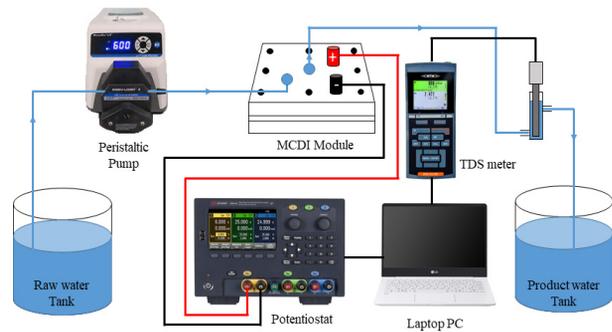


Fig. 2. Schematic diagram of equipment for the membrane capacitive deionization (MCDI) experiment.

사용하여 일정한 전압과 전류를 MCDI module에 인가시켰다. 본 연구에서는 모든 실험의 전원 인가 방식을 정전압 방식으로 1.2 V의 일정한 전압을 공급하였고, 최대 10 A를 초과하지 않도록 설정해 주었으며, 실제 MCDI cell에 인가된 전류는 유입수의 농도에 따라 계속 변화했다 (Kang et al., 2014). MCDI module을 통과한 처리수의 TDS 농도는 TDS Meter(Multi 3620 IDS, WTW, Germany)를 이용하여 10초 간격으로 측정하였으며, 데이터는 PC를 연결하여 수집하였다.

2.2 운전조건

MCDI module을 이용하여 수용액 내 TDS 제거 특성을 평가하기 위해서 유입수 농도, 유속, 세척수 농도 및 탈착 방법 등의 운전조건을 달리하여 실험을 수행하였으며, 이를 Table 1에 나타내었다 (Table 1).

첫 번째는 유입수 농도에 따른 MCDI module의 TDS 제거 특성을 파악하기 위해 NaCl을 이용하여 유입수 TDS 농도 500, 1,000, 2,000 mg/L로 조제한 후 처리수의 TDS 농도 변화 실험을 수행하였다. 유속은 30 mL/min으로 설정하였고, 총 90분간 정전압으로 흡착하였다.

두 번째는 15, 30, 100 mL/min의 유속에 따른 TDS 농도 변화 실험을 수행하였다. 유입수의 TDS 농도는 NaCl을 이용하여 500 mg/L로 조제하였고, 흡착 및 탈착 주기를 각각 5분씩 적용하였으며 유입수를 이용하여 탈착하였다.

세 번째는 탈착 시 세척수를 유입수, 처리수, 30분간 방치한 후 처리수 등 세 가지 유형에 따른 TDS 제거 특성을 파악하는 실험을 수행하였다. 유입수의 농도는 NaCl을 이용하여 조제된 TDS 500 mg/L를 MCDI cell이 충분히 흡착한 상태에서 유속 30 mL/min으로 하는 실험과 유속을 100 mL/min 증가하여 유입수로 5

Table 1. Experimental conditions

Experiment conditions	Reagents	Feed water TDS (mg/L)	Apply voltage (V)	Flow rate (mL/min)	Adsorption time (min)	Desorption time (min)	Desorption method
Feed water TDS	NaCl	500	1.2	30	90	-	-
		1,000					
		2,000					
Flow rate	NaCl	500	1.2	15	5	5	Feed water
				30			
				100			
Desorption method	NaCl	500	1.2	30	160	60	Feed water Product water Product water (30 min pause)
Desorption method	NaCl	500	1.2	100	5	5	Concentrated water

Table 2. Experimental conditions of concentrated water desorption process

Experiment Process	From	To	Apply voltage (V)	Flow rate (mL/min)	Adsorption time (min)	Desorption time (min)
1) Ready	Raw water tank	Concentrated water tank	1.2	100	5	-
	Concentrated water tank	Concentrated water tank	1.2	100	-	5
2) Produce	Raw water tank	Product water tank	1.2	100	5	-
3) Wash	Concentrated water tank	Concentrated water tank	1.2	100	-	5

분씩 흡·탈착하는 6 사이클 실험을 수행하였다.

마지막으로 농축수 탱크를 따로 설치하여, 탈착 시 농축수를 이용하여 100 mL/min의 유속으로 탈착하는 실험을 수행하였다. 실험 장치는 Fig. 3과 같이 구성하였다. Fig. 3 공정을 1) 준비 공정 2) 생산 공정 3) 세척 공정, 총 3단계의 공정으로 구분하여 실험을 수행하였으며, 이를 Table 2에 나타내었다. Table 2 1) 준비 공정은 첫 번째 사이클만 해당하는 공정으로 탈착에 사용할 농축수 탱크에 물을 채우는 단계로 설정하였다. 정전압으로 5분간 흡착하면서 농축수 탱크에 물을 채운 후 5분간 역전압을 가해 농축수 탱크에 있는 물로 MCDI cell에 흡착된 이온을 탈착하여 세척하였다. 두 번째 사이클부터는 2) 생산 공정과 3) 세척 공정의 반복으로, 2) 생산 공정에서 정전압을 가해 물을 생산하였고, 3) 세척 공정에서 농축수 탱크에 있는 물을 사용하여 셀을 세척하였다.

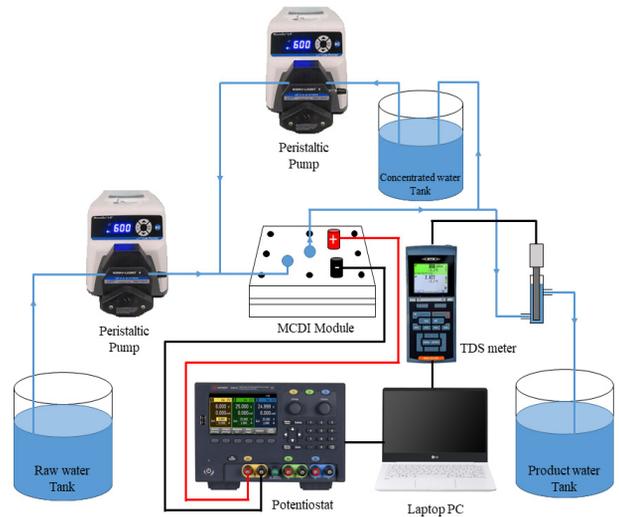


Fig. 3. Schematic diagram of equipment for the membrane capacitive deionization (MCDI) experiment by concentrated water desorption process.

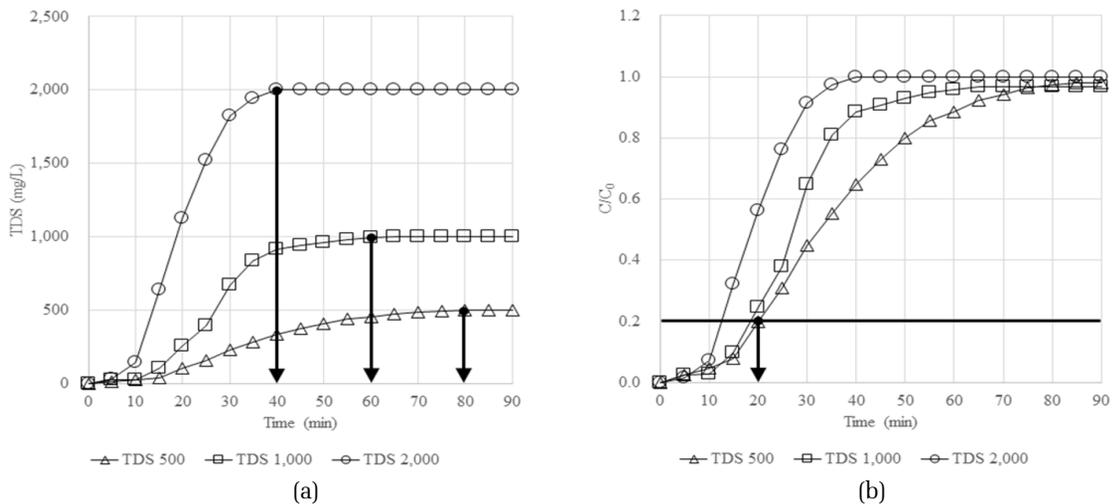


Fig. 4. Treated water (a) TDS concentration and (b) C/C_0 according to various Feed water TDS concentration.

3. 결 과

3.1 유입수 농도에 따른 MCDI 처리수의 TDS 농도변화

MCDI 공정에서 유입수 농도에 따른 처리수의 TDS 농도 변화를 파악하고자 하였다. 유입수의 TDS 농도는 증류수에 각각 NaCl을 첨가하여 조제된 500, 1,000, 2,000 mg/L을 MCDI module에 공급하면서 실험을 실시하였다. Fig. 4(a)는 시간에 따른 처리수의 TDS 농도 변화를 나타내었고, Fig. 4(b)는 시간에 따른 처리 효과(C/C_0)를 나타내었다.

Fig. 4(a)에 나타난 실험 결과, 10분 이전에는 완만한 흡착 특성을 보이다가 이후부터는 유입수의 TDS 농도가 클수록 빠르게 파과 되어가는 특성을 나타내었다. 유입수 TDS 농도가 2,000, 1,000, 500 mg/L 순으로 흡착 지속시간이 약 40, 60, 80 분으로 길어지면서, 파과 곡선의 형태가 뚜렷한 차이를 보였다. 또한, Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 유입수질 대비 80%의 처리 효과를 보이는 C/C_0 값이 0.2가 되는 시간, 즉 파과 지수 0.2에서의 흡착 시간인 10~20분이 MCDI module의 연속 실험에 필요한 조건으로 적합한 것으로 알 수 있었다.

3.2 유속에 따른 MCDI 처리수의 TDS 농도 변화

유입수의 유속을 15, 30, 100 mL/min으로 달리하여 MCDI module에 의한 처리수의 TDS 농도 변화를 실험하였다. 조제된 유입수의 TDS 농도는 앞선 실험과

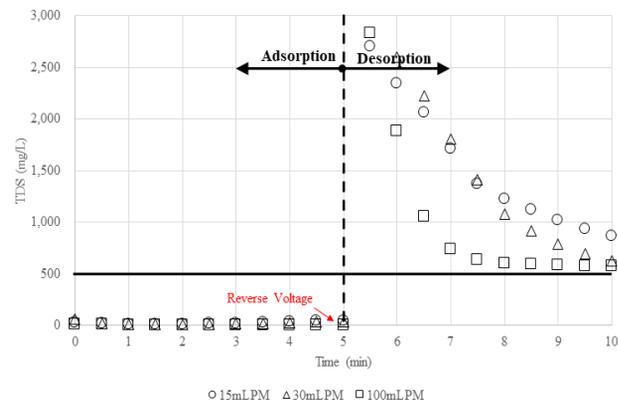


Fig. 5. Treated water TDS concentration according to various flow rate.

같이 500 mg/L로 하였고, 흡착 및 탈착 주기는 5분씩 적용하였다. 각각의 결과는 여섯 번의 사이클 실험의 평균값을 나타냈으며, 이를 Fig. 5에 나타내었다. 그 결과 유속이 가장 높은 100 mL/min일 때, 탈착이 가장 빠르고 안정적으로 진행되는 것으로 나타났다. 유속이 높을수록 cell 내부에서의 용액 체류 시간이 짧아지는데, 이는 벌크 용액에서 반대 방향으로 이온이 이동하는 시간을 줄여준다 (Yao and Tang, 2017). 따라서 재흡수 효과가 최소화되고 재생되는 시간이 감소하여 나타나는 것으로 판단된다.

3.3 탈착 시 세척수 농도와 탈착 방법에 따른 MCDI 처리수의 TDS 농도 변화

MCDI module의 탈착 특성을 파악하기 위해 조제된

TDS 500 mg/L인 유입수를 30 mL/min의 유속으로 실험을 수행하였다. Fig. 6(a)에 나타낸 것과 같이 우선 MCDI Cell 을 정전압으로 160분간 흡착하여 TDS 가 500 mg/L 된 것을 확인하였다. 그 후 유입수와 처리수로 탈착한 경우에는 각각 60분 동안 역전압을 가해 탈착하면 MCDI Cell에서 이온이 제거되는 것을 알 수 있었다. 30분간 방치한 처리수로 탈착한 경우 역시 약 60분 동안 역전압을 가해 탈착하면, MCDI cell에서 이

온이 제거되는 것으로 나타났다. 탈착 시 TDS 농도 변화를 좀 더 자세히 분석하기 위해 유입수로 탈착한 실험 데이터와 30분간 방치한 후 처리수로 탈착한 실험 데이터를 유입수 및 방치 시간에 대한 농도를 고려하여 수정한 후 Fig. 6(b)와 같이 나타내었다. 그 결과 유입수로 탈착한 수정된 일부 데이터의 TDS 농도가 170분부터 200분까지 처리수로 탈착한 데이터보다 높게 나타나기는 하였으나, 세 가지 방법 모두 유사한

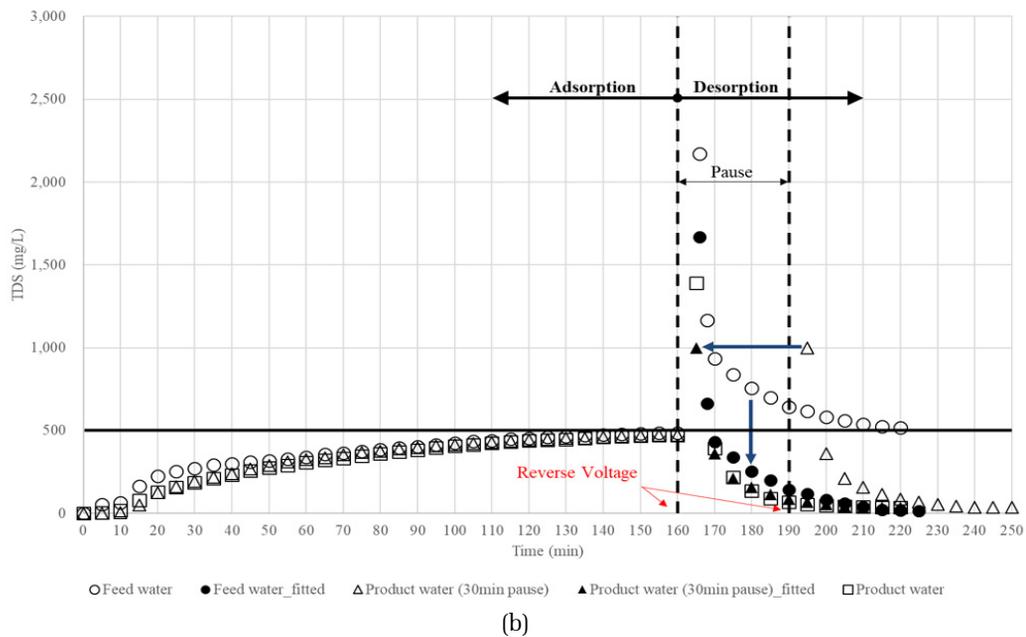
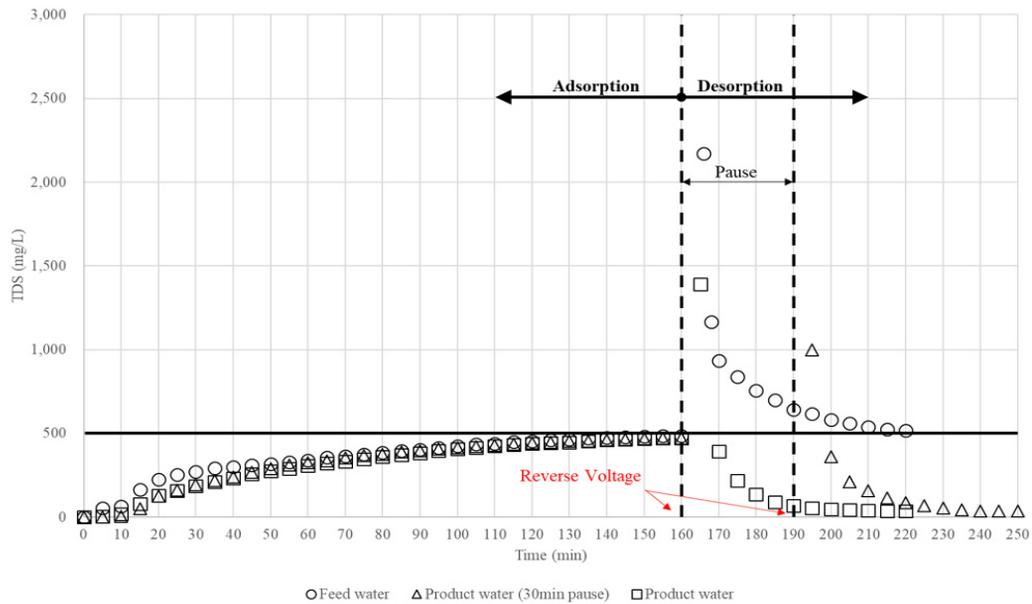


Fig. 6. Treated water TDS concentration (a) raw data and (b) fitted data according to various desorption method.



농도변화를 나타냈다.

추가적으로 유입수로 탈착하는 실험을 유속 100 mL/min으로 증가하여 6사이클 연속 실험을 수행하였다. 흡착 및 탈착 주기를 각각 5분씩 적용하였고, 이를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7 사이클이 반복되어도 흡착 성능은 안정한 상태를 유지하였다. 탈착 성능 또한 5분이면 C/C_0 가 1까지 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

이상의 실험결과를 통해서 유입수, 처리수, 30분간 방치한 후 처리수로 하는 등의 세척수 농도나 탈착 방법을 달리하여 탈착하였지만, 큰 영향을 미치지 않았다. 이러한 결과는 추후 공정을 운영하는 데 있어 민감하지 않게 운영할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 탈착 시 농축수 사용에 따른 MCDI 처리수의 TDS 농도 변화

앞선 실험을 바탕으로 탈착 시 사용되는 세척수의 농도나 탈착 방법은 탈착 효율에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이에 탈착 시 농축수를 사용하여 앞서 실험한 유입수로 탈착한 결과와 비교하고자 하였다. 총 6 사이클 연속 실험을 진행하였으며, 이를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8 그 결과 Fig. 7의 실험과 비교하였을 때, 흡착 효율은 두 실험 모두 안정적으로 나타났지만 농축수로 탈착한 경우 실험이 진행될수록 탈착 구간의 C/C_0 값이 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이를 통해 이온이 탈착되는 과정을 1) MCDI cell에서 spacer로의 이온 이동, 2) Spacer의 bulk solution에서 MCDI module 외부로의 이온 이동으로

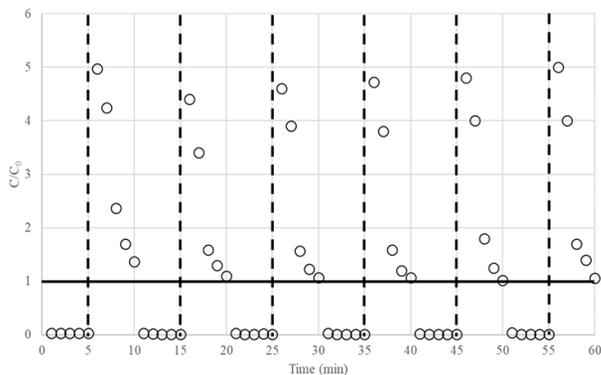


Fig. 7. Treated water TDS concentration according to continuous experiment by feed water desorption.

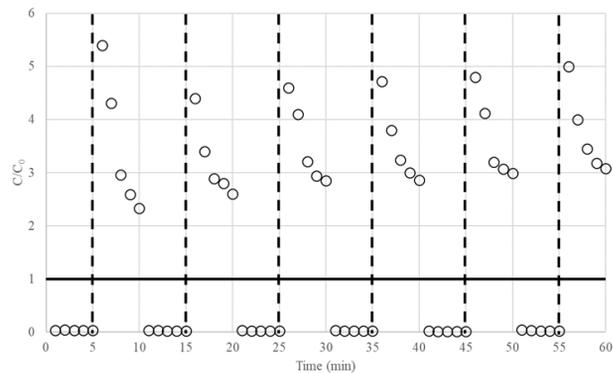


Fig. 8. Treated water TDS concentration according to continuous experiment by concentrated water desorption process.

구분할 때, 재생에 사용되는 수용액 내의 이온 농도보다 역전압을 인가함에 따라 MCDI cell에서 spacer로 이탈한 이온이 MCDI module 외부로 빠져나가는 것이 탈착에 관련되는 더 중요한 인자인 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 정수처리 공정 적용을 위한 MCDI module의 수용액 내 TDS 제거 특성에 대해 알아보하고자 하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유입수 농도에 따른 TDS 농도변화 실험을 한 경우 유입수의 농도가 클수록 MCDI cell이 빠르게 파괴 되는 것을 알 수 있었고, 2,000, 1,000, 500 mg/L 유입수의 농도 순으로 흡착 지속시간은 약 40, 60, 80분으로 나타났으며, C/C_0 가 0.2의 값을 보이는 순간인 20분 이내가 MCDI module의 연속 실험에 적절한 흡착 시간으로 분석되었다.

(2) 15, 30, 100 mL/min의 유속에 따른 TDS 농도 변화의 실험 결과 본 실험에 사용한 MCDI module은 100 mL/min의 유속일 때, 탈착이 가장 빠르고 안정적으로 나타났다. 유속이 높을수록 cell 내부의 용액 체류 시간이 짧아져 벌크 용액에서 반대 방향으로 이온이 이동하는 시간을 줄여준다. 따라서 재흡수 효과가 최소화되고 이에 따른 재생되는 시간이 감소하는 것으로 판단된다.

(3) 탈착 시 세척수의 농도와 탈착 방법에 따른 TDS 제거 특성을 실험한 결과, 유입수, 처리수, 30분

pp. 259-275

pp. 277-284

pp. 285-292

pp. 293-300

pp. 301-309

간 방치한 처리수로 탈착하는 방법 모두 유사한 탈착 효과를 나타내었다. 또한 유입수로 6 사이클 연속 실험한 결과 역시 안정적인 흡착 및 탈착을 나타내어 큰 변화가 없었다. 이는 세척수의 농도나 탈착 방법은 MCDI cell에 부착된 이온을 제거하는데 중요한 인자가 아닌 것으로 판단된다.

(4) 앞선 실험을 바탕으로 탈착 시 농축수를 사용하여 실험한 결과 안정적인 흡착 효과를 나타내었다. 탈착 시 cell에 부착된 이온이 완전히 제거되지 않았지만, 흡착 과정에 영향을 주지 않아 안정적으로 생산수를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 MCDI 공정에서 탈착을 위해 사용되는 유입수의 TDS 농도보다 역전압을 인가함에 따라 전극에서 spacer로 이탈한 이온을 MCDI module 외부로 방출시키는 것이 더 중요한 인자인 것으로 판단된다.

따라서 이를 바탕으로 염도가 높은 상수원을 대상으로 탈염 기술 등이 고려되는 정수 처리에 적용하기 위한 MCDI 공정은 CDI 공정에 비해 빠른 유속으로 많은 생산수량을 확보할 수 있으며, 탈착 시 cell의 탈착을 위한 세척수 농도나 방법에 민감하지 않게 운영할 수 있는 방안을 마련할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 탈착 시 농축수를 연속적으로 사용하여 cell의 파과점을 도출해 낸다면 회수율을 높여 향후 MCDI를 정수처리 공정에 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 보인다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 상하수도 혁신 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(2020002700003)

References

- Ahmad, F., Khan, S.J., Jamal, Y., Kamran, H., Ahsan, A., Ahmad, M. and Khan, A. (2015). Desalination of brackish water using capacitive deionization (CDI) technology, *Desalination, Water Treat.*, 57, 17.
- Biesheuvel, P.M. and van der Wal, A. (2010). Membrane capacitive deionization, *J. Membr. Sci.*, 346, 256-262.
- Biesheuvel, P.M., Zhao, R., Porada, S. and van der Wal, A. (2011). Theory of membrane capacitive deionization including the effect of the electrode pore space, *J. Colloid Interface Sci.*, 360, 239-248.
- Choi, J.H. and Kim, H.K. (2015). Comparison of Selective Removal of Nitrate Ion in Constant Voltage and Constant Current Operation in Capacitive Deionization, *Korean Chem. Eng. Res.*, 53(3), 269-275.
- Choi, J.H. (2014). Comparison of constant voltage(CV) and constant current(CC) operation in the membrane capacitive deionisation process., *Desalin. Water Treat.*, 56, 921-928.
- Jande, Y.A.C. and Kim, W.S. (2013). Desalination Using Capacitive Deionization at Constant Current, *Desalination*, 329, 29-34.
- Kang, J.I., Kim, T.Y., Jo, K.S. and Yoon, J.Y., (2014). Comparison of salt adsorption capacity and energy consumption between constant current and constant voltage operation in capacitive deionization, *Desalination*, 352, 52-57.
- Oren, Y. (2008). Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment-past, present and future (a review), *Desalination*, 228, 10-29.
- Porada, S., Zhao, R., van der Wal, A., Presser, V. and Biesheuvel, P.M. (2013). Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization, *Prog. Mater. Sci.*, 58, 1388-1442.
- Song, Y.J., Yun, W.S. and Rhim, J.W. (2017). Studies of performance and enlarged capacity through multi-stages stacked module in membrane capacitive deionization process, *Memb. J.*, 27(5), 449-457.
- Suss, M.E., Porada, S., Biesheuvel, P.M., Yoon, J. and Presser, V. (2015). Water desalination via capacitive deionization: what is it and what can we expect from it?, *Energy Environ. Sci.*, 8, 2296.
- Yao, Q. and Tang, H. (2017). Effect of Desorption Methods on Electrode Regeneration Performance of Capacitive Deionization, *J. Environ. Eng.*, 143(9), 04017047.
- Yun, W.S., Cheong, S.I. and Rhim, J.W. (2018). Effect of ion exchange capacity on salt removal rate in membrane capacitive deionization process., *Memb. J.*, 28(5), 332-339.
- Zhao, R., Biesheuvel, P.M. and van der Wal, A. (2012). Energy consumption and constant current operation in membrane capacitive deionization., *Energy Environ. Sci.*, 5, 9520-9527.
- Zhao, X., Wei, H., Zhao, H., Wang, Y., and Tang, N. (2020). Electrode materials for capacitive deionization: A review, *J. Electroanal. Chem.*, 873, 114416.