

# 하수처리수 재이용을 위한 저압분리막과 축전식 탈이온화 공정의 이온성 물질 제거

안재환\*, 오혜철, 오대민  
한국건설기술연구원 환경연구본부

## Removal of Ionic substance in the LPM-CDI Process

Jae-Hwan Ahn\*, Hyecheol Oh, Daemin Oh

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology Department of Environmental Research

**요약** 하수 처리수의 효율적인 재이용을 위해 저압분리막과 축전식 탈이온화(LPM-CDI) 공정으로 이온성 물질의 전기적 흡착과 탈착특성을 알아보았다. 저압분리막으로 MF(Micro-filtration)과 UF(Ultra-filtration)로 전처리 하였고, 실험실 규모 장치는 Flow-through electrode 흐름방식의 탄소전극(흡착면적 4,000  $\text{cm}^2$ ) 모듈을 이용하였다. 흡착면적을 증가시킨 파일럿 규모 장치(PCDI)는 Flow-between electrode 흐름방식의 탄소전극(흡착면적 154,000  $\text{cm}^2$ ) 모듈을 구축하여 공공하수처리시설 현장에서 일정기간 운전하여 흡착성능을 검토하였다. 유입 유량 100ml/min~300ml/min의 실험실 규모 실험결과, 1가 이온인 NaCl 흡착률(98.0%)이  $\text{MgSO}_4$  보다 높았고 탈착률도 1.8 이상으로 탈착이 잘 이루어졌다. 하수처리수를 이용하여 전처리 후 CDI 흡착실험에서는 용존성 인과 질산성 질소는 99.5% 이상의 제거율을 나타냈다. 이온성물질의 전기적 흡착능은 인산염 인은 3.3mg  $\text{PO}_4\text{-P/hr}\cdot\text{m}^2$ , 암모니아성 질소와 질산성 질소는 각각 216.0mg  $\text{NH}_3\text{-N/hr}\cdot\text{m}^2$ , 2.1mg  $\text{NO}_3\text{-N/hr}\cdot\text{m}^2$ 로 나타났다. 유입유량을 18.2 L/min 까지 증가시킨 파일럿 규모 실험(PCDI)에서는 유입 부하가 증가하여도 충분한 전기적 흡착면적을 확보할 경우 실험실 규모와 유사한 처리효율이 유지하였다. 하수처리수 재이용 공정은 경제적이면서 안정적인 유지관리가 요구되는데, 저압분리막의 전처리공정과 저전력 기반의 축전식 탈이온화 공정의 현장운전을 통하여 스케일 업에 따른 현장적용성도 우수한 것을 확인하였다.

**Abstract** The electrical adsorption and desorption characteristics of ionic materials were investigated for a low-pressure membrane and a capacitive deionization (LPM-CDI) process installed to reuse sewage-treated water. A low-pressure membrane was pretreatment with MF & UF, and a flow-through electrode (carbon electrode adsorption area 4,000  $\text{cm}^2$ ) module was used as a laboratory-scale device (LCDI). A pilot scale device (PCDI) with increased adsorption area and a flow-between flow-type carbon electrode (154,000  $\text{cm}^2$ ) module was operated at a public sewage treatment facility, and its adsorption performance was reviewed. Laboratory-scale experiments (inflow rate 100ml/min~300ml/min) showed the adsorption rate of NaCl (98.0%) was higher than that of  $\text{MgSO}_4$ , and its desorption rate was 1.8-fold higher. In the CDI adsorption experiment, pretreatment of sewage-treated water resulted in dissolved phosphorus and nitrogen (as nitrate) removal rates of more than 99.5%. Electro-sorption capacities (ESCs) of ionic substances were 3.3 mg  $\text{PO}_4\text{-P/hr}\cdot\text{m}^2$  for phosphorus, 216.0 mg  $\text{NH}_3\text{-N/hr}\cdot\text{m}^2$  for nitrogen (as ammonia), and 2.1 mg  $\text{NO}_3\text{-N/hr}\cdot\text{m}^2$  for nitrogen (as nitrate). In the pilot scale experiment (PCDI) setup, which increased the inflow flow rate to 18.2 L/min, the processing efficiency was similar to that observed in the laboratory, and this was maintained when a sufficient electrical adsorption area was secured, even when the inflow load was increased. In summary, processes used to reuse sewage-treated water require economical, stable maintenance. Field applicability after scale-up was excellent for the on-site operation of the low-pressure membrane and low-power capacitive deionization pretreatment process.

**Keywords** : Sewage Treated Water, Reuse, Ionic Substance, Low Pressure Membrane(LPM), Capacitive Deionization (CDI)

본 논문은 한국연구재단 연구비 지원으로 수행되었음(과제번호: 2021M3E8A2100648).

\*Corresponding Author : Jae-Hwan Ahn(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)  
email: jhahn@kict.re.kr

Received August 24, 2023

Revised October 11, 2023

Accepted November 3, 2023

Published November 30, 2023

## 1. 서론

도시화에 따른 인구 집중화와 삶의 질 향상으로 물의 수요는 증가하지만 이용 가능한 수자원은 매우 제한적이다. 기후변화의 영향으로 물 부족이 심화됨에 따라 물의 재이용은 선택이 아닌 필수적인 현실이 되고 있다. 국내의 공공하수처리시설의 최종 방류수는 안정적인 수량과 양질의 물을 확보할 수 있어서 부족한 수자원으로 활용이 가능하다. 그러나 하수처리수를 산업용수나 생활용수 수준으로 재이용하기 위해서는 처리수중에 잔류하는 미량의 용존성 물질의 제거가 필수적이다. 수처리 공정에 적용되고 있는 분리막 공정은 처리 효율은 우수하지만 유지관리에 고비용 소요되어 상용화에 제한적이다[1]. 하수처리수의 재이용 효율을 높이기 위해서는 재이용 목적에 따른 수질기준에 부합하고, 처리비용이 저렴해야 한다. 담수화를 목적으로 개발된 축전식 탈이온화(Capacitive deionization, CDI) 공정은 낮은 에너지 투입으로 용존성 물질을 전기적으로 흡착시킨다[2]. 최근에는 CDI 공정의 전기적 흡착능을 향상시키고 투입 에너지를 줄이기 위하여 탄소전극 모듈에 분리막을 결합한 MCDI 공정에 대한 연구가 수행되고 있다[3,4]. 또한, 전극 모듈의 구성 재료와 유체의 흐름 방식을 다변화 시키는 등 연구가 진행되고 있는데, TiO<sub>2</sub> 캡슐화 탄소나노섬유(TiO<sub>2</sub>@CNF) 전극모듈을 이용하여 1.4V의 인가전압으로 1.26mg/g·min의 우수한 담수효율을 갖으며[5], Fuming Chen(2020) 등은 redox flow desalination 공정에서 3,000ppm의 유입수 소금농도 대비 150 ppm 미만으로 연속적인 처리가 가능하였으며 2.14 kJ/mole salt의 낮은 에너지가 투입되었다고 보고하였다[6]. CuHCF 소재의 전극을 이용한 Battery electrode deionization(BEDI) 공정에서 흡착과 탈착의 2사이클 접근방식을 탈피하여 0.6V의 낮은 전압으로 운전이 가능한 것을 보여주었다[7]. Haibo Li(2010) 등은 탄소 전극의 비표면적을 높이기 위하여 GNFs (Graphene-like nanoflakes)를 적용하여 탈염 연구결과, 화학적으로 합성된 GNF가 담수화를 위한 탈염 공정에서 효과적인 전극 재료로 사용될 수 있음을 제안하였다[8]. Piotr D. (2013) 등은 정전류의 제어된 방식으로 전극을 충전 및 방전하여 투입에너지의 83% 정도를 재생단계에서 회수하여 전체 에너지 소비량을 줄였다고 하였다[4]. 이러한 에너지 소비량은 역삼투(RO) 공정 대비 경제성이 우수한 공정으로 처리규모의 증가에 따른 상용화 가능성을 높여준다.

전처리 공정으로 운전 압력이 낮은 저압분리막을 이용

하여 하수처리수중이 미처리된 고형물질을 제거하여 후속 공정인 축전식 탈이온화(CDI) 공정의 부하를 줄여주어서 안정적이고 경제적인 공정 개발에 대한 연구도 진행되고 있다[9,10].

전기적 충전과 방전에 따라 이온성 물질을 흡착과 탈착이 진행되는 축전식 탈이온화 공정은 전극 흡착소재 특성과 인가전압 세기 그리고 쇼트·탈착·정수시간 등의 운전모드에 따라 이온성물질의 처리에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 공공하수처리시설에서 방류되는 처리수의 효율적인 재이용을 위하여 저압분리막-CDI 공정의 다양한 운전조건에 따른 하수 처리수내 이온성 물질에 대한 흡착과 탈착 특성을 파악하고, 유입 유량 증가에 따른 파일럿 규모의 공정에 대한 처리성능 검증 등 현장적용성을 검토하였다.

## 2. 본론

### 2.1 CDI 반응조 설계

실험실 규모의 축전식 탈이온화 장치(Lab. CDI: LCDI)는 다양한 흡착재료가 코팅된 (+)와 (-) 전극의 탄소전극(100mm\*100mm\*40개) 모듈(모듈명: E40, (㈜이온텍))로 구성되며, 유체가 전극을 통과하여 흐르는 Flow-through electrode 흐름구조이다. 처리성능을 검

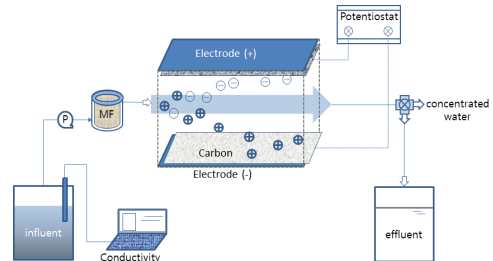


Fig. 1. Schematic diagram of LPM-CDI process(above) and Photograph of PCDI facility(below)

증하고 현장적용성을 검토를 위한 파일럿 규모 장치 (Pilot CDI)는 원통형 전극모듈(Ø200 mm\*240ea, 77,000 cm<sup>3</sup>) 2set로 구성되며, 전극 판의 사이를 흐르는 Flow-between electrode 흐름구조를 갖는다. Fig. 1은 저압분리막-PCDI 구성도를 나타낸 것으로, 전처리 공정으로 MF(Microfiltration, 평균입경:100µm, PP)와 전극모듈, 유입수질을 측정하는 센서 그리고 인가전압을 조절하는 Potentiostat 등으로 구성된다. 전기적 탈착 단계에서 발생된 농축수는 유입수조로 반송된다.

## 2.2 처리수 분석방법

CDI 공정의 이온성 물질 흡착능을 알아보기 위하여 실험실 연구에서는 0.01M NaCl과 0.01M MgSO<sub>4</sub> 수용액을 이용하였고, 현장연구에서는 공공하수처리시설의 처리수를 대상으로 현장 적용성 실험을 수행하였다. 축전식 탈이온화(CDI) 장치의 충전과 방전 운전모드에 따라 발생하는 처리수와 농축수의 전기전도도(Conductivity, LAQUA DS-71A-s, Horiba, Japan)를 분석하였다. 질소와 인은 흡광광도계(DR 5000, Hach corp. USA)를 이용하여 농도변화를 모니터링 하였다. 이온성 물질의 탄소전극 흡착능(Electro-Sorption Capacity, ESC)은 Eq. (1)과 같이 산정된다.

$$\text{Electro-Sorption Capacity, mg/hr} \cdot \text{m}^2 = \frac{[(\text{Co}-\text{Ce}) \times \text{Q}]}{\text{A}} \quad (1)$$

Co, Ce : the initial and the equilibrium conc., mg/L  
 Q : the flow rate of solution, L/min  
 A : the area of activated carbon electrode, m<sup>2</sup>

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 실험실 규모 LCDI 공정의 운전주기

실험에 이용된 실험실 규모의 CDI 장치는 탄소전극에 가해지는 인가전압(Applied voltage)에 따라 쇼트, 탈착 그리고 정수(deionization) 공정이 반복되어 운전된다. 인가전압과 시간에 따라 ①~⑧단계의 운전모드를 갖는데, 충전(Charging)시간 45초~180초, 방전(Discharging) 시간 15초~105초 그리고 쇼트시간 5초~10초 범위의 운전시간을 설정한다.

Fig. 2는 10mM NaCl 용액을 200ml/min 유입시키고, 운전모드④에서의 충전시간(피크 부분)과 방전시간의

인가전압 주기를 나타낸 것이다. 흡착단계에서 인가전압은 1.65V~1.80V를 유지하고, 5초~10초 쇼트 후 방전 과정으로 전환되어 (-)전압으로 하강하는 반복적인 주기를 나타냈다.

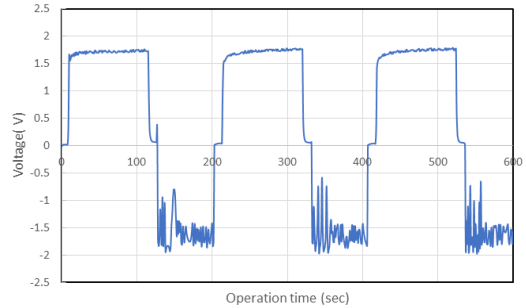


Fig. 2. Applied voltage in operation mode 4 of the CDI process

Changming Wang(2015) 등은 CDI 공정의 전극에 가해지는 전압은 1.2~2.0V 범위의 실험에서 1.8V, 전극간격은 2mm 조건에서 전기적 이중층의 빠른 형성으로 전기적 흡착능이 우수한 것으로 보고하였다[11].

### 3.2 LCDI 공정의 전기적 흡착능 평가

유입 유량 250 mL/min, 운전모드⑤(충전 120초, 방전 72초) 상태에서 전기적 흡착 후 처리수와 탈착에 따른 농축수의 전기전도도를 분석하여 흡착능을 알아보았다. 유입수는 실험실에서 인공적으로 조제된 10 mM NaCl과 10 mM MgSO<sub>4</sub>를 이용하였다. 10 mM NaCl의 전기전도도는 1,162µs/cm~1,203µs/cm(평균 1,182µs/cm)이며, 10 mM MgSO<sub>4</sub>은 1,638µs/cm~1,669µs/cm(평균 1,654µs/cm)이다.

Fig. 3은 이온성 물질의 전기적 흡착과 탈착에 따른 전기전도도 변화를 흡착율과 탈착율(Ce/Co ratio)로 나타낸 것이다. 흡착 후 NaCl과 MgSO<sub>4</sub>의 흡착율(Ca/Co ratio, Ca: adsorption)은 각각 0.02, 0.07로서 1가와 2가 이온성 물질 모두 우수한 흡착 특성을 나타냈다. 탈착 후 농축수의 탈착율(Cd/Co ratio, Cd: desorption)은 NaCl 1.82, MgSO<sub>4</sub> 1.02 로서 탈착에 따른 탄소전극의 재생이 원활이 진행되었다. Shuai Liang(2019) 등은 UF-CDI 공정에서 전처리에 따른 막힘 현상이 현저히 줄어들고 유기물질은 Ca<sup>2+</sup>와 Mg<sup>2+</sup> 기반의 이온 쌍(ion pairs) 형태로 제거된 것으로 보고하였다[9].

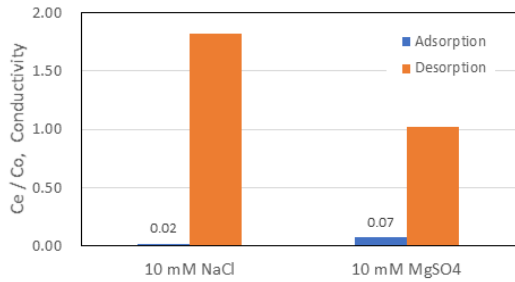


Fig. 3. Adsorption and desorption rate of 10mM NaCl and 10mM MgSO<sub>4</sub> in the LCDI process

### 3.3 LCDI 공정의 이온성 물질 흡착

본 실험에서는 실제 공공하수처리시설에서 방류되는 하수 처리수를 대상으로 유입 유량에 따른 인산염 인 (PO<sub>4</sub>-P), 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N) 그리고 질산성 질소 (NO<sub>3</sub>-N)의 전기적 흡착 특성을 알아보았다. 하수 처리수인 유입수를 마이크로필터(MF 100 μm)로 전 처리한 결과, 인산염 인 농도는 18.0%, 암모니아성 질소와 질산성 질소 농도는 각각 22.7%, 6.5% 저감되었다. 유입유량을 100mL/min에서 300mL/min로 증가시켜도 처리수의 인산염 인 농도는 0.01mg/L~ 0.02mg/L 범위로 처리되어 우수한 전기적 흡착효율을 보였다(Fig. 4). 암모니아성 질소와 질산성 질소 인산염 인농도와 유사하게 유입 유량 300mL/min에서 안정적인 흡착특성을 유지하였다. 인산염 인과 암모니아성 질소와 같은 양(+) 이온과 함께 질산성 질소와 같은 음(-) 이온성 물질도 모두 전기적 흡착공정을 이용한 처리에 효율적으로 분석된다.

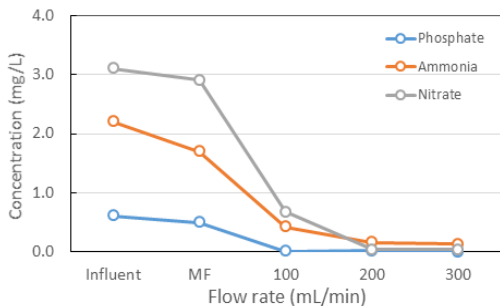


Fig. 4. Changes in the concentration of dissolved phosphorus, ammonia nitrogen, and nitrate nitrogen according to the flow rate in the MF-LCDI process

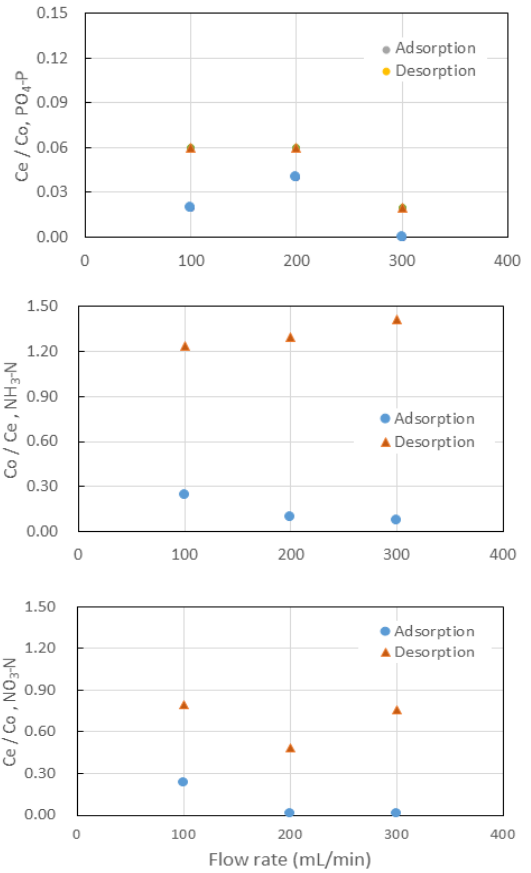


Fig. 5. The ratio of adsorption/desorption dissolved phosphorus, ammonia nitrogen, and nitrate nitrogen in the MF-LCDI process according to the flow rate

Flow-through electrode 흐름구조를 갖는 축전식 탈이온화 공정(LCDI)을 통한 이온성 물질의 전기적 흡착능(Electro- Sorption Capacity: ESC)은 용존성 인은 3.3mg PO<sub>4</sub>-P/hr·m<sup>2</sup>, 암모니아성 질소와 질산성 질소는 각각 216.0mg NH<sub>3</sub>-N/hr·m<sup>2</sup>, 2.1mg NO<sub>3</sub>-N/hr·m<sup>2</sup>로 산정되었다.

Fig. 5는 MF-CDI 공정에서 흡착 후 처리수의 흡착율과 탈착 후 농축수의 탈착율을 비교한 것이다. 유입 유량 200 mL/min~300 mL/min에서의 인산염 인의 흡착율 (Ce/Co)은 0.0~0.04 범위를, 암모니아상 질소는 0.08~0.09 그리고 질산성 질소는 0.01이다. 이러한 수치는 Fig. 3의 인공시료(유입 유량 250mL/min) NaCl(0.02)과 MgSO<sub>4</sub> (0.07)의 흡착율과 매우 근접한 범위를 나타냈다. 또한, 탈착율도 유입수 농도가 낮은 인산염 인을

제외하고는 암모니아성 질소의 탈착율(1.29~1.41)과 질산성 질소의 탈착율(0.48~0.76)과도 유사한 결과(NaCl 1.82, MgSO<sub>4</sub> 1.02)를 나타냄에 따라 실제 하수 처리수와 같이 다양한 이온성 물질이 혼합된 물질(Mixed compounds)에 대해서도 전기적 흡착과 탄소전극의 재생효과가 유효한 것으로 분석된다.

### 3.4 LPM-PCDI 공정의 이온성 물질 처리

탄소전극의 흡착면적이 증가된 파일럿 규모의 PCDI 장치의 운전을 통하여 스케일 업에 따른 처리성을 검토하였다. Fig. 6은 유입 유량 변화에 따른 흡착 후 처리수와 탈착단계에서 농축수의 전기전도도의 변화를 나타낸 것이다. 유입유량은 평균 7.1 L/min, 압력은 0.6bar로, 그리고 흡착과 탈착의 운전주기는 탈착 40초, 정수 90초 등 총 3min/cycle로 설정하여 약 1시간 이상 연속 운전하였다.

저압분리막(LPM)은 MF(100 $\mu$ m)를 이용하였으며, 전처리 후의 전기전도도는 평균 542.2 uS/cm이다. PCDI 공정의 흡착 후 처리수의 전기전도도는 평균 11.9 uS/cm로서 흡착율(Ce/Co)은 0.02이고, 방전단계에서 농축수의 전기전도도는 평균 1,690.2 uS/cm로 탈착율은 3.06(2nd peak 부분)으로 나타났다. 처리효율은 5회 반복 주기에도 일정한 처리성을 유지하였다.

동일한 조건에서 유입유량을 평균 10 L/min으로 증가시켜 운전한 상태에서도 유사한 처리성을 나타냈다. Fig. 7은 실험실 규모(LCDI, Q: 0.2L/min) 장치와 파일럿 규모(PCDI, Q: 7.0L/min, 10L/min)의 이온성 물질에 대한 처리효율을 비교한 것이다. 유입 농도가 높았던 PCDI(10 L/min)의 처리효율을 제외하고는 인산염 인 농도는 0.01mg/L 이하로 흡착 처리되었고(Fig. 7(a)), 암모니아성 질소와 질산성 질소도 유입 유량 증가(35~50배 증가)에 따른 유입 부하가 증가해도 충분한 흡착면적(38.5배 증가)을 유지할 경우 실험실 규모(LCDI)와 유사한 처리효율을 나타내었다.

MF-PCDI 공정의 전기적 흡착능(ESC)은 22.5mg PO<sub>4</sub>-P /hr·m<sup>2</sup>, 72.9mg NH<sub>3</sub>-N/hr·m<sup>2</sup>, 130.1mg NO<sub>3</sub>-N/hr·m<sup>2</sup>로 분석되었다. Yu-Yi Shen(2020) 등은 산업폐수의 재사용을 위하여 대형 탄소전극 모듈(20cm\*20cm\*40개)을 갖춘 MCDI 공정에서 처리용량을 증가시킨 경우에서도 칼슘 이온 94%, 질산성 질소 이온 84% 이상 제거되었다고 보고하였다[11]. 또한, Julio J. Lado (2017) 등도 대형 전극모듈(전극면적 1,864 cm<sup>2</sup>)을 이용한 플로우 타입의 CDI 공정을 이용하여 복합성

분(Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 수용액에서의 이온성 물질의 제거가 가능성을 보여주었다[12].

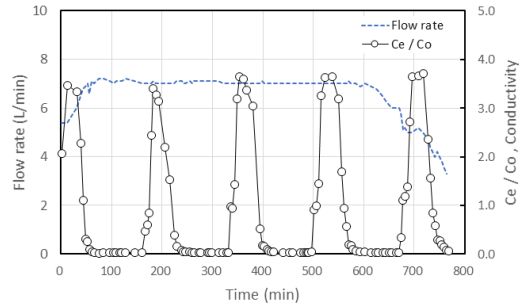


Fig. 6. Change of conductivity in the MF-PCDI process (CDI Operation condition: short circuit 15 sec, rinsing 20 sec, deionization 90 sec, detachment 40sec)

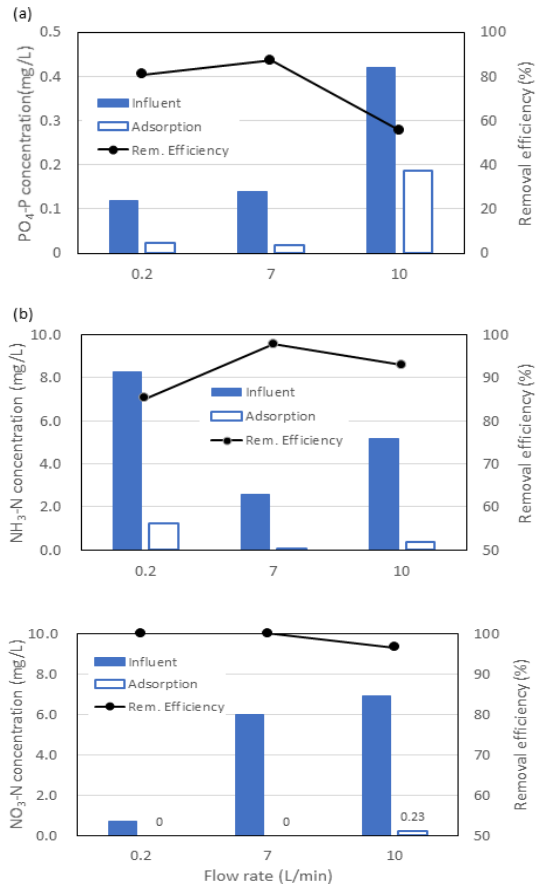


Fig. 7. Comparison of (a) dissolved phosphorus, (b) ammonium nitrogen and (c) nitrate nitrogen removal efficiency according to the flow rate in the UF-PCDI process

## 4. 결론

본 연구에서는 하수 처리수의 효율적인 재이용을 위하여 저압분리막과 축전식 탈이온화(CDI) 공정을 이용하여 수중의 이온성 물질에 대한 처리 성능을 알아보았다. 실험실 규모의 축전식 탈이온화 장치(LCDI)를 이용하여 이온성 물질에 대한 기초적인 전기적 흡착과 탈착 특성을 파악하고, 파일럿 규모의 PCDI 장치로 유입 유량 증가에 따른 처리성을 검증한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

### 4.1 LCDI 공정의 이온성 물질 흡착

MF 공정으로 전처리 후 LCDI 공정에서 인공시료(10mM NaCl과 MgSO<sub>4</sub>)중의 이온성 물질은 98% 이상의 흡착되었고, 탈착 공정을 통한 전극의 재생도 원활하게 이루어졌다. 실제 하수 처리수중의 용존성 인과 질산성 질소도 99.5% 이상의 높은 흡착능을 보였다.

인산염 인의 흡착율(Ce/Co)은 0.0~0.04 범위를, 암모니아상 질소는 0.08~0.09 그리고 질산성 질소는 0.01로 분석되었다. 실제 하수 처리수와 같이 다양한 이온성 물질이 혼합된 물질(Mixed compounds)에 대해서도 전기적 흡착과 탄소전극의 재생효과가 우수하게 나타났다.

### 4.2 파일럿 규모의 MF-PCDI 공정 성능 평가

저압분리막(MF)-PCDI 공정의 유입 유량은 7.1 L/min ~ 10.0 L/min, 압력은 0.6 bar 운전조건에서, 저압분리막으로 전처리 후의 처리수의 전기전도도 기준 흡착율(Ce/Co ratio)은 0.02이고, 농축수의 탈착율은 3.06(2nd peak 부분)으로 나타났다. 처리효율은 5회 반복 주기에도 일정한 흡착과 탈착 성능을 유지하였다.

이온성 물질에 대한 처리효율 비교에서도 유입 농도가 높았던 PCDI(10 L/min)의 처리효율을 제외하고는 인산염 인 농도는 0.01mg/L 이하로 흡착 처리되었고, 암모니아성 질소와 질산성 질소도 유입 부하(35~50배 증가) 대비 충분한 흡착면적(LCDI/PCD 흡착 모듈 면적 [38.5 배 증가)을 유지할 경우 처리장치의 스케일 업에 따른 효과적인 처리효율을 나타내었다. 이와 같이 실험실 규모의 제한된 조건에서의 연구결과에 국한하지 않고, 하수 처리수와 같은 복합물질을 대상으로 한 실증 규모의 처리 성능 재현은 현장 적용 가능성과 함께 실용화를 위한 기반 연구가 될 수 있을 것이다.

## References

- [1] M. Elimelech, W. A. Phillip, "The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment", *Science*, 333, pp. 712-717, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1200488>
- [2] Y. Oren, "Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment - past, present and future (a review)", *Desalination*, 228, pp. 10-29, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.08.005>
- [3] P.M. Biesheuvel, A. van der Wal, "Membrane capacitive deionization", *Journal of Membrane Science*, 346, pp. 256-262, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.09.043>
- [4] Piotr D. and Albert van der Wal, "Energy recovery in membrane capacitive deionization", *Environmental Science & Technology*, 47, 9, pp. 4904-4910, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/es3053202>
- [5] Lu Guo, Meng Ding, Dong Yan, Mei Er Pam, Sareh Vafakhah, Chengding Gu, Wang Zhang, Pablo Valdivia y Alvarado, Yumeng Shi, Hui Ying Yang, "High speed capacitive deionization system with flow-through electrodes Highlights", *desalination*, 496, 114750, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114750>
- [6] Fuming Chen, Jian Wang, "Low energy consumption and mechanism study of redox flow desalination", *Chemical Engineering Journal*, 401, 126111, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126111>
- [7] Taeyoung Kim, Christopher A. Gorski, and Bruce E. Logan, "Low Energy Desalination Using Battery Electrode Deionization(BEDI)", *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2017, 4, 10, pp. 444-449, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00392>
- [8] Haibo Li, Linda Zou, Likun Pan, and Zhuo Sun, "Novel Graphene-Like Electrodes for Capacitive Deionization", *Environmental Science & Technology*, 44, pp. 8692-8697, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/es101888j>
- [9] Shuai Liang, Min Li, Jun Cao, Kuichang Zuo, Yanhong Bian, Kang Xiao, Xia Huang, "Integrated ultrafiltration-capacitive deionization(UCDI) for enhanced antifouling performance and synchronous removal of organic matter and salts", *Separation and Purification Technology*, 226, pp. 146-153, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.085>
- [10] Yu-Yi Shen, Shih-Han Sun, Shao-Wei Tsai, Tsai-Hsuan Chen, Chia-Hung Hou, "Development of a membrane capacitive deionization stack for domestic wastewater reclamation: A pilot-scale feasibility study", *Desalination*, 114851, 9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114851>
- [11] Changming Wang, Haiou Song, Quanxing Zhang, Baijun Wang, Aimin Li, "Parameter optimization based on capacitive deionization for highly efficient desalination of domestic wastewater biotreated

effluent and the fouled electrode regeneration”, *Desalination*, 365, pp. 407-415, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.03.025>

- [12] Julio J. Lado, Rodolfo E. Pérez-Roa, Jesse J. Wouters, M. Isabel Tejedor, Cade Federspill, Juan M. Ortiz, Marc A. Anderson, “Removal of nitrate by asymmetric capacitive deionization”, *Separation and Purification Technology*, 183, pp.145-152, 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.03.071>

안 재 환(Jae-Hwan Ahn)

[정회원]



- 1993년 2월 : 아주대학교 환경공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 한양대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 1993년 10월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구본부 연구위원

<관심분야>

하수처리, 물 재이용, 비점오염원

오 혜 철(Hyecheol Oh)

[정회원]



- 2005년 2월 : 강원대학교 환경공학과 (공학석사)
- 2016년 11월 : Kyoto University Environmental engineering (공학박사)
- 2018년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 환경연구본부 수석연구원

<관심분야>

유역수질관리, 수처리, 방사능제염

오 대 민(Daemin Oh)

[정회원]



- 2009년 8월 : 한서대학교 대학원 환경공학과 (공학박사)
- 2016년 3월 ~ 2020년 12월 : 한국건설기술연구원 수석연구원
- 2021년 1월 ~ 2022년 4월 : ㈜피에스글로벌 ICT융합연구소 연구소장
- 2022년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 위원

<관심분야>

미량유해물질, 수처리