

광산수의 탈염을 위한 축전식 탈염기술의 적용

이동주 · 강문성 · 이상호 · 박진수*

상명대학교 환경공학과

(2014년 1월 27일 접수 : 2014년 2월 13일 채택)

Application of Capacitive Deionization for Desalination of Mining Water

Dong-Ju Lee, Moon-Sung Kang, Sang-Ho Lee, and Jin-Soo Park*

Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Sangmyung University, 31 Sangmyungdae-gil,
Dongnam-gu, Cheonan, Chungnam Province 330-720, South Korea

(Received January 27, 2014 : Accepted February 13, 2014)

초 록

본 연구에서 광산수의 재활용을 위해 축전식 탈염공정을 적용하였다. 이를 위해 이온교환폴리머를 코팅한 탄소 전극을 활용하였는데 본 성능을 관찰하기 위해 이온교환폴리머를 코팅하지 않은 탄소 전극으로 광산수의 탈염 운전을 수행하고 비교분석하였다. 또한, 광산수의 높은 농도가 축전식 탈염공정에 미치는 영향을 조사하기 위해 저농도의 기수(NaCl 200 ppm)를 활용한 운전 성능 비교 역시 수행하였다. 연구 결과 이온교환폴리머를 코팅한 탄소 전극을 활용한 광산수 탈염 효율 및 제거량 모두 그렇지 않은 전극에 비해 높았고 에너지 소모량은 더 적게 나타났다. 이는 높은 비패러데이 전류, 높은 염농도에 따른 낮은 용액 저항, 전극 기공 내에서의 이중층 중첩효과에 기인하는 것으로 판단되었다. 또한, 이온교환폴리머를 코팅한 전극을 활용한 기수 탈염 운전 결과 낮은 염농도에 따라 용액의 저항이 높아지고, 제거 대상의 염의 양이 낮아 광산수에 비해 매우 높은 효율을 보였으나, 제거량은 매우 낮음을 알 수 있었다.

Abstract : In this study, capacitive deionization (CDI) was introduced for desalination of mining water. Ion-exchange polymer coated carbon electrodes (IEE) were used in CDI to desalt mining water. The CDI performance using the IEE for desalination of mining water was carried out and then was compared with that using general carbon electrodes without ion-exchange polymer coating (GE). Moreover, to investigate the effect of the concentration of influent solutions on CDI performance, the CDI performance using the IEE for desalination of brackish water (NaCl 200 ppm) was also performed and analyzed. As a result, the higher salt removal efficiency, rate and the lower energy consumption in the CDI process using the IEE and mining water were obtained compared with those using the GE and mining water. It is mainly due to higher non-Faradaic current, low ohmic resistance of the influent, overlapping effect of electric double layers in micropore of the electrode. In addition, the CDI process using the IEE and brackish water shows much higher salt removal efficiency and lower salt removal rate than that using the IEE and mining water. This results from the lower concentration (i.e., higher ohmic resistance) and salt amount of the influent.

Keywords : Capacitive deionization, Activated carbon, Mining water, Brackish water, Faraday reaction

*E-mail: energy@smu.ac.kr

1. 서 론

지구 표면의 70%가 물로 구성되어 있고 그 중 인간이 이용할 수 있는 물은 2.5%에 해당된다. 물은 주로 농업용수, 가정용수, 도시용수, 산업용수로 사용하고 있고 인간 활동에 있어서 필수요소이다.¹⁾ 하지만 물자원의 불균형적인 분포와 지속되는 인류 활동의 증가는 물 공급에 대한 신뢰에 영향을 미쳤고 결국 사람들은 물이 유한한 자원이라는 것을 깨닫기 시작했다. 그리하여 인간이 이용가능한 물에 대한 대중의 관심이 증가하였고 산업 활동에 이용되는 물 공급에 대한 문제가 이슈화되고 있다. 이중 광산산업은 광물 채굴 및 세척 후 배출되는 물의 양과 질에 대해 큰 환경적 문제로 여기는 산업들 중 하나이다. 비록 광산산업에서 이용되는 물이 전 세계 물 소비량에 비해 매우 적은 양에 해당되지만 이 문제의 원인은 과거 광산 활동에서 발생한 물 오염이 축적되어 다양한 환경 문제를 야기한다는 것이었다. 채광 활동에 있어서 물은 필수적이고, 공급할 물의 확보는 석탄 생산에 있어 상당히 중요하다.²⁻⁴⁾ 일반적으로 물의 공급이 원활한 광산지역에서는 생산과정에서 배출된 광산수(mining water)를 새로 공급된 물에 희석하여 재활용하지만 호주의 일부 탄광지역에서는 가뭄으로 인한 물 부족으로 기존에 사용된 물을 재활용한다고 알려져 있다. 그러나 별도의 처리 없이 재사용된 물의 지속적인 재활용은 수용액 안에 존재하는 염의 축적으로 염의 농도를 증가시킴으로써 석탄 생산의 질과 유지비용에 악영향을 미칠 수 있다.⁵⁻⁷⁾ 이에 염의 제거를 목적으로 하는 탈염기술인 역삼투막 여과를 널리 사용하게 되었고 이에 따라 석탄 생산 비용이 증가하였다. 이 기술은 이온들을 회수하여 제거하는 대신 반투과막을 통해 염수에 압력을 가함으로써 물을 얻기 때문에 에너지 소모량이 높다.⁸⁾ 또한 광산폐수의 양과 질의 변동이 심하다는 것을 고려하였을 때 처리시스템이 복잡해지고, 이로 인해 운전 및 유지비용 상승을 초래하게 되었다.^{9,10)}

탈염기술에는 용액 중에 녹아있는 있는 염류들을 분리하기 위한 기술로 최근에 증발법, 이온교환법, 역삼투막법, 전기투석법 등과 같은 여러 기술들이 사용되고 있다. 이 기술들은 각각의 기술적인 특징에 따른 문제점으로 에너지 효율이 좋지 않다는 단점들이 있다.^{11,12)} 그러나 기존의 탈염기술의 문제점을 상당히 보완하고 에너지 효율이 우수한 차세대 기술인 축전식 탈염(capacitive deionization, CDI) 기술이 등장하였고 최근에 많은 연구가 진행되고 있다. 축전식 탈염이란 전극전위를 변화시킴으로써 흡착과 탈착을 가역적으로 수행할 수 있는 탈염기술이다. 축전식 탈염기술은 전위를 인가했을 때 전극표면에 전기이중층을 형성하고 정전기적인 힘에 의해 반대전하를 갖는 이온들을 흡착하여

제거하는 원리를 바탕으로 한다. 전기이중층을 형성할 수 있는 낮은 전위(약 1~2 V)에서 이온을 흡착하고 전위차를 제거하거나 역으로 전위를 인가하여 이온을 탈착하는데 이로 인한 에너지 소비량이 기존의 분리공정에 비해 월등히 낮아 저에너지 소모형 탈염기술로 평가되고 있다. 또한 공급하는 전압의 변화로 탈염 및 재생공정이 가능하여 비교적 운전 제어가 간단하고, 작동 중에 높은 압력 펌프, 열 발생 장치를 요구하지 않고 2차 오염물을 발생시키지 않아 친환경적인 기술이다.¹³⁻¹⁹⁾

하지만 탈염기술은 제거 대상인 이온의 형태와 염의 농도에 따라 적절한 기술을 적용하고 선택해야 한다. 일반적으로 축전식 탈염기술은 역삼투막 기술과 비교하여 염 농도가 약 35,000 ppm인 해수(sea water)에서 높은 전력을 요구하지만 약 3,300 ppm의 기수(brackish water)에서는 유사한 전력을 요구한다. 하지만, 그 이하의 염 농도에서는 요구된 전력 대비 고효율의 탈염성능을 나타낸다고 보고되고 있다.^{12,14)} 따라서 축전식 탈염기술을 적용하여 고효율의 탈염성능을 얻기 위해서는 비교적 낮은 농도의 염수에 국한되어야 한다.

본 연구에서는 일반적으로 석탄 생산과정에서 배출한 광산수를 에너지 비용이 적고 친환경적인 기술인 축전식 탈염기술에 적용이 가능한지를 살펴보고자 이온교환폴리머로 코팅한 전극으로 구성된 셀과 이온교환폴리머로 코팅되지 않은 전극으로 구성된 셀을 통해 탈염실험을 진행하여 비교 분석하였고, 또한 저농도 염(200 ppm NaCl)의 탈염성능과 비교하여 적절한 운전의 조건 및 특성을 논의하고 문제점들을 파악하여 이를 극복할 수 있는 방안을 제시하려고 한다.

2. 실험 및 방법

2.1. CDI용 전극의 구성

본 연구에서 사용한 이온교환폴리머가 코팅되지 않은 탄소전극(General electrode, GE), 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극(Ion exchange polymer coated electrode, IEE)과 CDI 셀은 (주)시온텍에서 제공받아 사용하였다. 탄소전극은 활성탄소분체(P-60, Daedong AC Co.)를 dimethylacetamide (DMAc)에 용해된 poly(vinylidene-fluoride)와 혼합하여 집전체인 graphite sheet (F02511, Dongbang Carbon) 위에 도포하고 건조시켜 만들어졌다. 이온교환폴리머는 술폰화 반응에 의해 준비된 양이온교환 그룹을 갖는 폴리스티렌(polystyrene)을 DMAc와 혼합함으로써 제조한 양이온교환폴리머 용액과 아민화 반응에 의해 준비된 음이온교환 그룹을 갖는 폴리테르술폰(polyethersulfone)을 DMAc와 혼합함으로써 제조한 음이온교환폴리머 용액을 각각 탄소전극 위에 침지코팅을 이용하여 도포하였다.²⁰⁾

2.2. CDI 셀의 구성

Fig. 1에서 보이는 것처럼 두 전극 사이에 전기적인 접촉을 막고 용액이 흐를 수 있는 비전도체 스페이서를 두고 전극의 외측에 아크릴 판을 놓아 동일한 압력으로 셀을 체결하였다. 또한 누수를 막기 위해 실리콘 가스켓을 각각 스페이서, 전극, 아크릴 판 사이에 두었다. Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 시료는 정량펌프로 이용하여 일정한 유량으로 셀의 가장자리에 위치한 유입구를 통해 전극과 접촉한 스페이서를 거쳐 셀의 정중앙에 위치한 유출구로 배출되었다. 전극에 전압을 공급하기 위해 potentiostat(SP-150 & VMP3B-20, Bio-Logic SA)을 연결하였고 pH & 전도도 측정기(Orion Star A215, Thermo Scientific)를 이용하여 유출수의 pH와 전도도를 실시간으로 측정하여 데이터를 컴퓨터로 전송하였다.

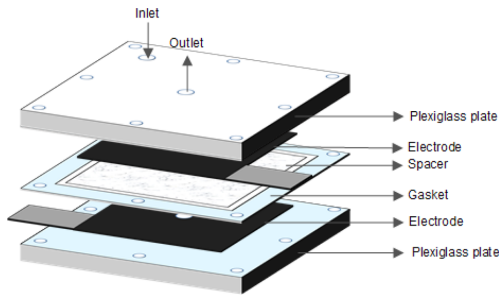


Fig. 1. CDI unit cell components.

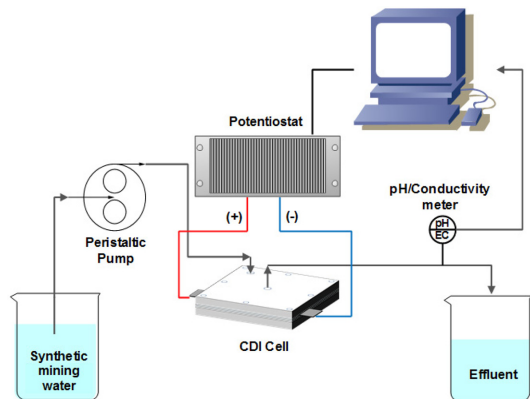


Fig. 2. Schematic diagram of a CDI process prepared in this study.

2.3. CDI 셀의 탈염실험

유입 시료는 일반적으로 석탄 생산 과정에서 배출되는 광산수(약 6000 ppm)와 유사하게 제조하였고, 탈염능의 비교를 위한 저농도 염 (200 ppm) 용액도 제조하였다. 이 두 시료의 조성은 Table 1에 나타내었다. 본 실험에서 광산수는 각각 탄소전극(GE)과 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극(IEE)으로 처리하였고, 저농도 염 용액은 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극(IEE)만 실험을 진행하였다. 시료는 20 mL/min의 유량으로 셀에 공급하였고 potentiostat을 이용하여 고농도 염 용액인 광산수는 전극에 2 V, 저농도 염 용액은 1.5 V를 인가하여 10 분 동안 흡착을 진행하였고, 이어서 두 용액 모두 0 V를 인가하여 5 분 동안 탈착을 진행하였다. 흡착과 탈착은 7 사이클로 운전하였고 유출수의 pH와 전도도는 3 초 간격으로 측정하여 데이터를 수집하였다.

3. 결과 및 고찰

탄소전극(GE)으로 조립된 셀과 이온교환폴리머로 코팅된 탄소전극(IEE)으로 조립된 셀을 이용하여 광산수(약 6000 ppm)의 탈염운전을 수행하였고, 성능 비교를 위해 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극을 이용하여 저농도 염(200 ppm) 용액의 탈염운전도 진행하였다. 운전 중에 배출된 시료의 전도도 변화를 기록하여 Fig. 3에 나타내었다. 또한 염의 제거 양상을 관찰하기 위하여 Fig. 3에서 보여준 전도도를 아래의 식(1)

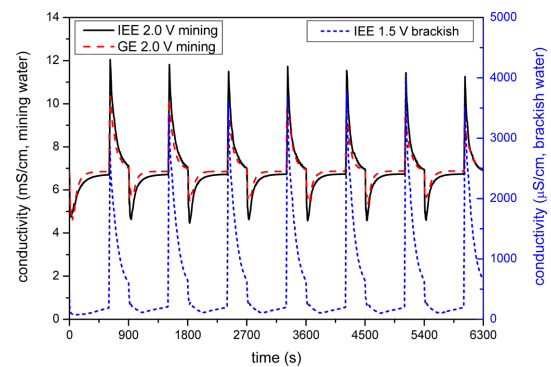


Fig. 3. Changes of conductivity in desalination operations.

Table 1. Compositions of water samples prepared in this study

Materials	K ₂ SO ₄ (mg/L)	CaCl ₂ (mg/L)	MgSO ₄ ·7H ₂ O (mg/L)	Na ₂ SO ₄ (mg/L)	NaHCO ₃ (mg/L)	NaCl (mg/L)	pH	Conductivity (μS/cm)
Brackish water	-	-	-	-	-	200	8.88	420
Mining water	87.13	393	1,992	1,148	1,018	1,527	8.21	6,837

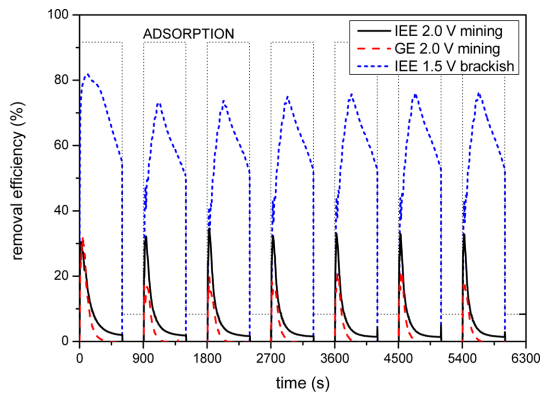


Fig. 4. Changes in removal efficiency calculated using the conductivity.

을 활용하여 염의 제거효율을 계산하였고 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{염 제거 효율 (\%)} \\ = \frac{\text{초기 전도도} - \text{최종 전도도}}{\text{초기 전도도}} \times 100 (\%) \end{aligned} \quad (1)$$

또한 고농도와 저농도의 염을 처리할 때 시간에 따라 제거되는 염의 양을 비교하기 위하여 아래의 식(2)을 통해 염 제거 속도를 계산하였고 Fig. 4의 제거효율과 함께 Fig. 5에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{염 제거 속도 (mg/min} \cdot \text{cm}^2) \\ = \frac{\text{유입 유량} \times \text{제거된 염의 양}}{\text{전극의 유효 면적}} \end{aligned} \quad (2)$$

Fig. 3에서 관찰할 수 있듯이 광산수는 초기 흡착이 진행되면서 전도도가 급격하게 감소하다가 바로 급격하게 증가하였고 약 2분 안에 초기 전도도와 일정해지는 것을 관찰할 수 있었다. 반면에 저농도 염 용액은 초기에 전도도가 광산수와 유사하게 급격히 감소하였지만 약 2 분간 더 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이후에는 완만하게 증가하였고 초기 전도도에 다시 도달하지 않는 것으로 판단할 때 지속적으로 탈염이 진행된다는 것을 알 수 있었다. 이는 광산수에 함유한 고농도의 염에 의해 탄소전극의 흡착용량이 빠른 시간 안에 포화되었고 동시에 계속되는 고농도 염을 함유한 시료의 유입으로 인해 급격하게 전도도가 상승하여 빠른 시간 내에 초기 염 농도와 동일해졌다고 판단된다.

Fig. 4에서 보이는 것처럼 이온교환폴리머가 코팅된 전극으로 고농도 염 용액인 광산수의 염 제거효율은 저농도 염 용액을 처리한 제거효율보다 2배 이상 낮았다. 하지만 Fig. 5와 같이 시간에 따라 제거된 염의 양은 이온교환폴리머가 코팅된 전극을 사용하여 처리

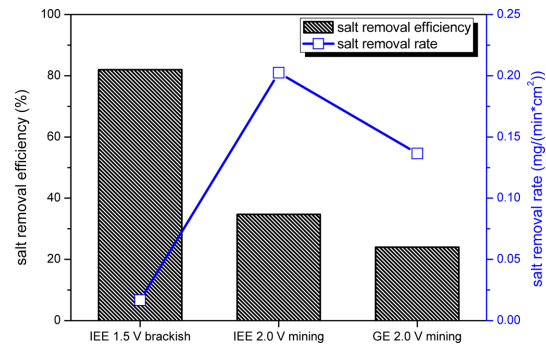


Fig. 5. Comparison of changes in salt removal efficiency and salt removal rate.

한 저농도의 염보다 고농도의 염이 약 10배 더 많이 제거된 것을 관찰할 수 있었다. 이는 탄소전극 상부에 코팅된 이온교환폴리머 층이 전극의 격막 역할을 함으로써 탄소전극의 흡착용량 이상의 이온들이 전기장 하에서 이온교환폴리머를 통과하여 전극실로 유입하고 지속적으로 전극실 내부에 존재하였기 때문에 사료된다. 심지어 이온교환폴리머가 존재하지 않는 탄소전극을 사용하여 고농도의 염을 제거하였을 때도 약 7배 더 높은 염 제거 속도를 확인할 수 있었다. 이로써 염의 농도가 클수록 시간에 따라 제거되는 염의 양도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 전극물질인 탄소체의 micropore에서 전기이중층의 중첩 효과와 염의 농도가 높을수록 이온저항의 감소에 의한 것이라고 보고되었다.²¹⁻²³⁾ 결국, 고농도 염을 처리하는 경우 유입 농도와 비교하여 나타난 제거효율은 저농도에 비해 낮을 수 있지만 비교적 저농도의 염보다 더 많은 염을 제거하였음을 알 수 있었다. 또한 전극에 따른 광산수의 처리효율을 살펴보면 탄소전극과 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극으로 탈염한 제거효율은 초기 사이클에서는 동일하게 제거되었지만 이후부터는 이온교환폴리머로 코팅된 전극은 최대 35%로 일정하게 유지하였고 탄소전극은 최대 22%로 이온교환폴리머가 코팅된 전극보다 효율이 낮다는 것을 알 수 있었다. 광산수를 처리하는 동안 potentiostat로 전극에 공급한 전력과 위의 염 제거효율에 고려하여 각 전극에 따른 에너지 소모량을 살펴보았다. 탄소전극과 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극의 에너지 소모량은 각각 1.54, 2.17 kWh/m³로 나타났다. 따라서 동일 인가 전압 하에서 보다 높은 탈염 효율을 보이는 이온교환폴리머 코팅 탄소전극으로 광산수를 탈염할 때 그렇지 않은 탄소전극보다 제거효율 대비 소모되는 에너지가 더 낮다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 이온교환폴리머가 코팅된 전극이 광산수를 처리하기 위해 더 적합하다는 것을 입증할 수 있었다.

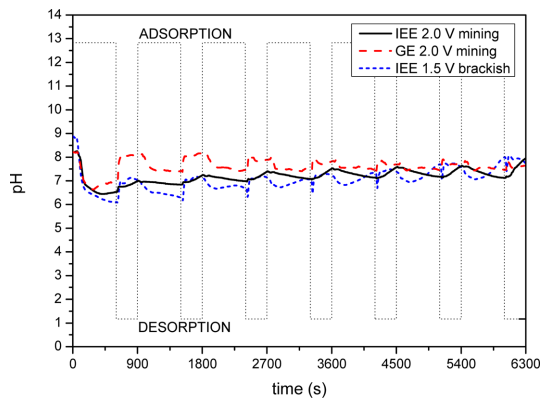


Fig. 6. Changes of pH in desalination operations.

전극의 반응 및 유출수의 특성 등을 관찰하기 위하여 탈염운전을 진행하는 동안 유출수의 pH를 기록하여 Fig. 6에 나타내었다. 모든 실험조건에 대해 그림에서 나타난 pH는 6~8로 pH의 큰 변화가 없다는 것을 알 수 있었다. 우선 광산수의 탈염을 진행했을 때 이온교환폴리머가 코팅된 전극의 경우 pH 변화가 상당히 완만하며 변화의 폭이 가장 적다는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 이온교환폴리머가 코팅된 전극으로 저농도 염 용액을 처리한 유출수의 pH는 탄소전극으로 광산수를 처리한 유출수의 pH와 유사한 경향을 관찰할 수 있었다. 일반적으로 이온교환폴리머가 없는 전극에 전위를 인가하면 전극표면에 물, 산소 등 일부 화학종의 산화, 환원 반응과 같은 패러데이 반응이 일어나고 pH 변화의 폭을 증가시킨다. 그러나 전극에 이온교환폴리머를 코팅하거나 막을 결합하면 이러한 화학종으로부터 전극을 보호함으로써 안정적인 pH를 얻을 수 있고 염의 제거효율을 증가시킬 수 있다고 보고되고 있다.²⁴⁻²⁶⁾ 고농도의 염을 함유한 광산수를 시료로 하여 이온교환폴리머가 코팅되지 않은 전극에 2 V의 전압을 인가하면 상대적으로 유출수의 pH가 수 전해 및 산소의 환원 등과 같은 현상으로 인해 큰 폭으로 증가해야 한다.²⁶⁾ 그러나 이 pH 변화가 저농도 염 용액을 처리하기 위해 이온교환폴리머가 코팅된 전극에 1.5 V를 인가하여 얻은 유출수의 pH 변화와 비슷한 것으로 보아 본 연구에서 제조하여 사용한 광산수에서 완충작용이 일어났음을 알 수 있었다.

일반적으로 축전식 탈염기술에서 셀을 통과하는 전하에는 전극표면에서 이온의 흡착 반응에 이용되는 전하(비패러데이 전류)와 앞에서 언급했던 화학종의 산화, 환원 반응에 기여하는 전하(패러데이 전류)로 나눌 수 있다. 가장 이상적인 축전식 탈염기술은 비패러데이 반응만 존재하는 것으로 셀을 통과하는 전하가 이온의 흡착에만 이용되는 것이다. 축전식 탈염 운전

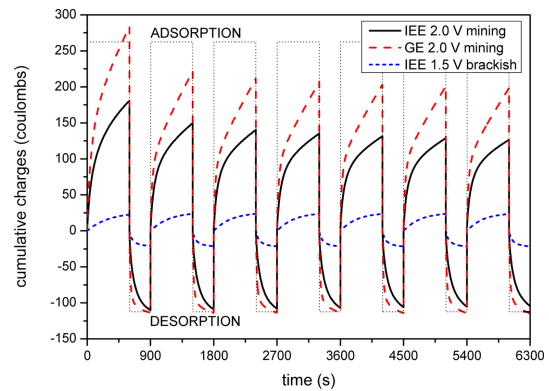


Fig. 7. Changes of cumulative charges in desalination operations.

에서 흡착하는 동안에는 인가한 전압으로 인해 전류가 계속 공급되는데 이때 축적되는 전하들은 전기이중층에 의해 흡착되는 이온들에 의한 것뿐만 아니라 패러데이 반응에 이용되는 전하들도 포함하게 된다. 그리고, 전압이 전환되는 순간 흡착한 이온들이 전극 표면으로부터 탈착되면서 급격히 축적된 전하들이 줄어들게 되고 짧은 시간 안에 이온의 탈착에 이용된 전하들은 더 이상 축적되지 않고 일정해진다. 따라서, 탈착구간에서의 전하량은 순수하게 탈착된 이온들의 전하라고 볼 수 있다. 결국 흡착구간과 탈착구간에서의 축적전하의 차이는 패러데이 반응에 이용되는 전하로 분석할 수 있다. 이와 같은 현상들을 살펴보기 위해 축적되는 전하들의 양상을 확인하였으며, 전극에 미치는 영향을 알아보기 위해 축적 전하의 변화량을 측정하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 관찰할 수 있듯이 고농도의 염을 함유한 광산수의 축적 전하는 흡착과 탈착구간에서 모두 저농도의 염 용액보다 상당히 높게 나타났다. 이는 흡착되는 염의 양이 많아 이러한 양상을 보인 것으로 사료되며, 이는 Fig. 5에서 나타난 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 광산수를 이온교환폴리머가 코팅된 전극으로 처리하였을 때 나타나는 흡착구간에서의 축적 전하는 광산수를 탄소전극으로 처리한 축적 전하보다 훨씬 더 적다는 것을 알 수 있었다. 하지만 Fig. 5에 나타났듯이 이온교환폴리머가 코팅된 전극이 그렇지 않은 전극에 비해 약 1.5 배 높은 이온 제거량을 보여주었다. 또한, 탈착구간에서의 축적 전하는 거의 비슷한 수준이라는 것을 관찰하였다. 따라서, 이온교환폴리머가 코팅되지 않은 전극은 앞서 언급했던 화학종의 산화, 환원반응과 같은 전극반응에 전하가 많이 소비되어 더 큰 축적 전하를 보였다고 판단된다. 결론적으로 광산수를 처리하기 위해 이온교환폴리머가 코팅된 전극에 전위를 인

가할 때 셀을 통과하는 전하가 이온의 흡착에 더 많이 기여하게 되고, 이에 따라 탈염효율을 증가하게 되며, 제거하는 이온의 양 역시 높은 것으로 판단할 때 광산수 처리를 위해서는 이온교환폴리머가 코팅된 전극을 활용하는 것이 가장 적합하다는 것을 입증하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고농도의 염을 함유한 광산수를 처리하기 위해 상용화된 전극과 셀을 이용하여 축전식 탈염기술을 적용해보고 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극과 그렇지 않은 탄소전극에 따른 탈염성능 및 운전상의 문제점들을 저농도의 염 용액의 탈염 처리했을 때와 비교하여 살펴보았다. 광산수의 탈염 실험을 진행하여 전도도의 변화를 살펴본 결과 흡착이 빠른 시간 내에 이루어졌지만, 저농도 염 용액의 경향과 다르게 다시 빠르게 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극이 그렇지 않은 탄소전극보다 더 높은 제거효율을 나타내었고, 본 제거효율을 대비하여 에너지 소모량을 살펴본 결과 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극과 그렇지 않은 전극의 에너지 소모량이 각각 1.54, 2.17 kWh/m³로 나타나 이온교환폴리머 코팅 탄소전극이 보다 적게 소모되는 것으로 나타나 본 광산수 탈염 처리에 있어서 해당 전극이 가장 적합하다는 것을 알 수 있다. 이는 pH의 변화로도 관찰할 수 있었는데 pH 변화는 인가된 전압에 의해 전극표면에 발생하는 패러데이 반응에 의한 것으로, 이온교환폴리머가 코팅된 전극의 pH 변화의 폭이 가장 적다는 것을 관찰하였고 코팅된 이온교환폴리머가 공급전압에 의해 전극표면에서 일어나는 일부 화학반응들을 예방하였다고 판단할 수 있다. 또한 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극으로 탈염 시 나타난 저농도 염 용액의 pH 변화가 이온교환폴리머로 코팅되지 않은 탄소전극으로 탈염 시 나타난 광산수의 pH 변화와 거의 유사한 것으로 나타나 광산수 내에 pH에 대해 완충작용이 있었음을 알 수 있었고 더 정확한 분석을 위해 축적 전하의 변화량을 살펴보았다. 광산수의 염 제거 속도와 축적 전하량은 저농도 염 용액보다 상당히 많은 염이 제거되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이온교환폴리머가 코팅되지 않은 탄소전극과 이온교환폴리머가 코팅된 탄소전극으로 광산수를 처리했을 때 탈착구간에서 축적 전하량은 동일하였지만 흡착구간에서 이온교환폴리머가 없는 탄소전극의 축적 전하량이 상당히 더 크다는 것을 관찰하였다. 이는 전하가 이온의 흡착뿐만 아닌 전극 반응에도 기여했음을 알 수 있었다. 그리하여 고농도의 염을 함유한 광산수의 탈염 처리는 이온교환폴리머가 코팅된 전극

의 사용이 적합하다는 것을 입증하였다.

광산수의 탈염성능은 저농도 염 용액의 탈염에 비해 현저히 낮지만 이온교환폴리머가 코팅된 전극을 적용한 축전식 탈염용 셀을 여러 개 직렬로 배치하여 최대 35% 제거된 유출수의 염을 다음 셀에서 재탈염하는 방식을 적용하면 탈염효율을 상승시켜 실제 광산수 탈염에도 적용할 수 있을 것이라고 예상하였다.

감사의 글

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다 (NRF-2012H1B8A2 025906).

참고문헌

1. Anon., Human Appropriation of the World's Fresh Water Supply (2006).
2. B. Pink, "Water Account Australia 2009-10", Australian Bureau of Statistics (2012).
3. S. R. Rao, J. A. Finch, "A review of water re-use in flotation", *Minerals Engineering*, **2**, 65 (1989).
4. S. Stewart, "Mining and the Environment", *New South Wales Parliamentary Library Research Service*, 7 (2009).
5. C. J. Moran, C. M. Cote, J. McIntosh, "Northern Bowen Basin water and salt management practices", *ACARP*, report C15001, 357 (2006).
6. H. Bartosiewicz, P. Curcio, "Coal handling and preparation plant (CHPP) corrosion control and management", *ACARP*, report C12055, 48 (2005).
7. C. M. Cote, C. J. Moran, C. J. Hedemann, "Evaluating the Costs and Benefits of Salt Management Strategies at Mine Sites Using a Systems Model", *Mine Water Environ.*, **26**, 229 (2007).
8. S. Porada, R. Zhao, A. van der Wal, V. Presser, P. M. Biesheuvel, "Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization", *Progress in Materials Science*, **58**, 1388 (2013).
9. B. Hutton, I. Kahan, T. Naidu, P. Gunther, "Operating and maintenance experience at the Emalahleni water reclamation plant", *International Mine Water Conference*, Pretoria, South Africa, 415 (2009).
10. C. J. Moran, A. Moore, "Salinity and experience constraints to water reuse in coal mining", *9th International Mine Water Congress*, Oviedo, Spain, 489 (2005).
11. K. C. Leonard, J. R. Genthe, J. L. Sanfilippo, W. A. Zeltner, M. A. Anderson, "Synthesis and characterization of asymmetric electrochemical capacitive deionization materials using nanoporous silicon dioxide and magnesium doped aluminum oxide", *Electrochim. Acta*, **54**, 5286 (2009).
12. J.-Y. Choi, J.-H. Choi, "A carbon electrode fabricated

- using a poly(vinylidene fluoride) binder controlled the Faradaic reaction of carbon powder”, *J. Ind. Eng. Chem.*, **16**, 401 (2010).
13. B.-R. Lee, I.-J. Jeong, S.-G. Park, “Effects of N & P Treatment Based on Liquid Organic Materials for Capacitive Deionization(CDI)”, *J. Korean Electrochem. Soc.*, **16**, 123 (2013).
 14. Y. Oren, “Capacitive deionization (CDI) for desalination and water treatment - past, present and future (a review)”, *Desalination*, **228**, 10 (2008).
 15. Y.-J. Kim, J.-H. Choi, “Improvement of Desalination Efficiency in Capacitive Deionization Using a Carbon Electrode Coated with an Ion-exchange Polymer”, *Water Res.*, **44**, 990 (2010).
 16. P. M. Biesheuvel, B. Van Limpt, A. Van der Wal, “Dynamic adsorption/desorption process model for capacitive deionization”, *J. Phys. Chem.*, **113**, 5636 (2009).
 17. P. M. Biesheuvel, “Thermodynamic cycle analysis for capacitive deionization”, *J. Colloid Interf. Sci.*, **332**, 258 (2009).
 18. H. Li, L. Pan, T. Lu, Y. Zhan, C. Nie, Z. Sun, “A comparative study on electrosorptive behavior of carbon nanotubes and graphene for capacitive deionization”, *J. Electroanal. Chem.*, **653**, 40 (2011).
 19. J.-W. Lee, H.-I. Kim, H.-J. Kim, H.-S. Shin, J.-S. Kim, B.-I. Jeong, S.-G. Park, “Desalination Effects of Capacitive Deionization Process Using Activated Carbon Composite Electrodes”, *J. Korean Electrochem. Soc.*, **12**, 287 (2009).
 20. K. S. Kang, W. K. Son, J. H. Choi, N. S. Park, T. I. Kim, “Ion-Selective Capacitive Deionization Composite Electrode, and Method for Manufacturing a Module”, U. S. Patent No. EP 2487278, 1 (2012).
 21. S.-I. Jeon, H.-R. Park, J.-G. Yeo, S. C. Yang, C. H. Cho, M. H. Han, D. K. Kim, “Desalination via a new membrane capacitive deionization process utilizing flow-electrodes”, *Ener. Environ. Sci.*, **6**, 1471 (2013).
 22. K.-L. Yang, T.-Y. Ying, S. Yiacoumi, C. Tsouris, “Electrosorption of Ions from Aqueous Solutions by Nanostructured Carbon Aerogel”, *J. Colloid Interf. Sci.*, **250**, 18 (2002).
 23. K.-L. Yang, T.-Y. Ying, S. Yiacoumi, C. Tsouris, E. S. Vittoratos, “Electrosorption of Ions from Aqueous Solutions by Carbon Aerogel: An Electrical Double-Layer Model”, *Langmuir*, **17**, 1961 (2001).
 24. J.-H. Lee, W.-S. Bae, J.-H. Choi, “Electrode reactions and adsorption/desorption performance related to the applied potential in a capacitive deionization process”, *Desalination*, **258**, 159 (2010).
 25. J.-B. Lee, K.-K. Park, H.-M. Eum, C.-W. Lee, “Desalination of a thermal power plant wastewater by membrane capacitive deionization”, *Desalination*, **196**, 125 (2006).
 26. H. Li, Y. Gao, L. Pan, Y. Zhang, Y. Chen, Z. Sun, “Electrosorptive desalination by carbon nanotubes and nanofibres electrodes and ion-exchange membranes”, *Water Res.*, **42**, 4923 (2008).