

RO-CEDI 접합공정을 이용한 발전소에서의 고순수의 생산에 관한 연구

송정훈, 연경호, 김종배, 조재원, 문승현
 광주과학기술원 환경공학과

**A Study on Production of High Purity Water for a Power Plant
 Using an RO-CEDI (Reverse Osmosis-Continuous Electroceionization) Hybrid Process**

Jung-Hoon Song, Kyeong-Ho Yeon, Jung-Bae Kim, Jae-Weon Cho, Seung-Hyeon Moon
 Department of Environmental Science and Engineering,
 Kwangju Institute of Science and Technology

서론

현재까지 발전소용 고순수는 발전소의 종류와 지역적인 특성에 따라 각각 다른 수질 조건을 요구하지만, 공통적인 요구조건은 사용되는 물의 비저항이 10MΩcm 이상이다. 이를 만족시키기 위해 현재 발전소에서 RO-IX (역삼투-이온교환법)공정이 가장 널리 사용되고 있지만, 화학적 재생으로 인한 폐액의 발생과 화학적 재생시 이온교환수지의 오염문제, 그리고 낮은 약이온종 제거율 등이 RO-IX 공정의 가장 커다란 단점으로 알려져 오고 있다. 현재 추가적인 공정을 IX시스템의 전후에 부가하여 이 문제점을 극복하고 있지만, 추가 건설비용과 공정운전 비용이 든다는 점에서 추가공정 설치는 상당히 비효율적이다. 따라서 대체공정의 개발이 필요하고 신기술인 RO-CEDI (역삼투-전기탈이온)공정이 이의 대체공정으로서 관심을 받고 있다. 이번 연구에서는 현재 널리 쓰이고 있는 RO-IX 공정의 대체 공정으로서 RO-CEDI 공정의 성능이 연구되었다. 여러 가지 공정변수에 따라 성능의 변화를 도식적으로 해석하고, CEDI 공정을 이용하여 이온 및 약이온종을 제거함으로써 IX 공정의 단점을 극복하는 실험을 제시함으로써 발전소용 고순수의 제조시 CEDI 성능을 평가하였다.

이론

그림1에서 보는 바와 같이 전기투석의 희석실에 이온교환매개체를 충전한 공정이 전기탈이온 공정이다. 원수보다 높은 전기전도성이 있는 이온교환매개체를 충전함으로써 이온의 이동을 촉진하게 되며, 이온교환매개체는 물의 해리로 자체적으로 재생되어진다. 따라서 이온교환방법과 달리 폐이온교환수지의 발생이 없으며 재생을 필요하지 않는다. 이온교환수지 공정에서 나타나지 않는 Electro osmosis 효과가 나타남으로서 전기탈이온 공정은 이온교환 공정보다 더 높은 제거효율을 가지게되며 높은 비저항을 가지는 고순수를 얻을 수 있다. 전기탈이온에 의한 약이온종의 제거는 전기탈이온 시스템에서 독특하게 일어나는 국부적인 pH변화에 기인한다. Silicic acid는 pH가 9.5 이상에서, Boric acid는 pH가 9.2 이상에서 다음과 같은 이온화가 일어나게 되며, 전기탈이온 공정으로 쉽게 제거할 수 있다. .

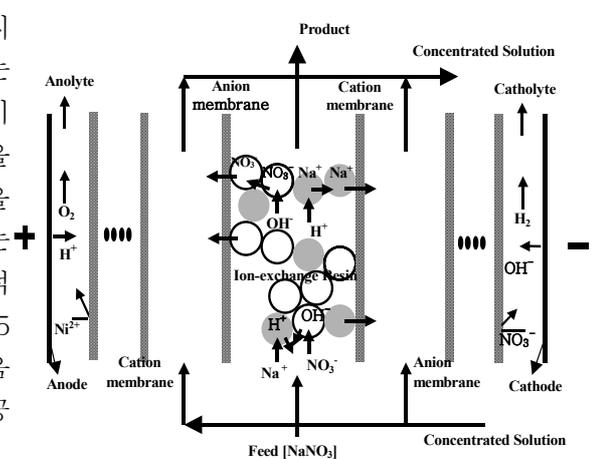
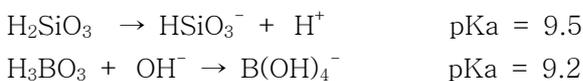


그림 1. 개략적으로 도식화된 CEDI 시스템 모습

재료 및 실험방법

1. 전처리 단계로서 RO시스템의 성능분석

우선 RO-EDI 시스템을 구성하고 이에 표2. 공정변수에 따른 RO 시스템의 성능실험 조건 대한 분석을 하기 위해서는 RO의 공정변수에 따른 영향을 살펴보았다. 현재까지 알려진 RO-IX 공정에서 18MΩcm 이상의 고순수를 만들기 위해서는 현재까지 RO system에서 나오는 물이 5μs/cm 이하가 되어야 한다. 이를 만족시키기 위해서 RO 시스템을 공정변수에 따라서 분석하는 것이 필

Conditions	Feed Temperature (°C)	Pressure (Kg/cm ²)	Feed Concentration (ppm)	Recovery Rate (%)	Feed pH
Experiment	Varied	10	75	15	6.4
Temperature effect	15	Varied	75	15	6.4
Pressure effect	15	10	Varied	15	6.4
Concentration effect	15	10	64	Varied	6.4
Recovery effect	15	10	60.72	15	Varied
pH effect					

요하며, 새한(주)에서 판매되는 CSM 역삼투막을 사용하여 RO 시스템을 자체 제작하였다. 공정변수에 대한 영향을 살펴보기 위해서 표1에서 나타난 조건하에서 RO 시스템을 온도, 압력, 농도, 회수율, pH에 따라서 살펴보았다.

2. 고순수를 만들기 위한 EDI시스템의 성능분석

RO system을 분석을 한 후 IX의 대체공정으로서의 CEDI 시스템을 분석하였다. 10MΩcm 이상의 고순수를 제조하는데 있어서 각각의 공정변수에 따른 영향을 살펴보았다. 공정변수를 온도, 유입수의 유속, 전류밀도, 유입수의 전도도라고 가정하고 EDI시스템의 변화를 조사하였다.

표2. 공정변수에 따른 EDI 시스템의 성능실험 조건

Variables	Temperature (°C)	Flow rate (ml/min)	Current density (A/m ²)	Feed Conductivity (μs/cm)
Experimental Conditions	Varied	10	20	2.3
Temperature	25	Varied	20	2.3
Flow rate	25	10	Varied	2.3
Current density	25	10	20	Varied
Feed conductivity				

유효 막면적 5×10cm²의 크기를 갖는 EDI 시스템을 자체 제작 하였으며, 이온교환막으로는 Dokuyama Soda Co.의 CMX 양이온 교환막과, AMX 음이온 교환막을 사용하였다. 실험조건을 표2에서 나온것과 같이 달리 하면서 각각의 공정변수에 따른 영향을 살펴보았다.

3. IX공정의 단점을 극복하기 위한 약이온종 제거에 대한 EDI 시스템의 성능실험

현재 이온교환법의 가장 커다란 단점중의 하나는 낮은 약이온종 제거율 이다. 이를 극복하기 위한 실험으로서 EDI 시스템을 가지고 약이온종 제거실험을 하였다. 유효 막면적 2×10cm²를 가지고 있는 EDI 시스템을 자체 제작하고, 이온교환막으로는 CMX와 AMX를 사용하였다. 약이온종인 Boric acid와 Silicic acid를 각각 10ppm을 녹인 유입수를 만든 후 전류밀도를 20A/m²로 고정후 제거실험을 하였다.

4. 스택구성 및 분석방법

EDI 시스템을 구성하는데 있어서 그림1에서 보이는 것과 같이 중금속 침전을 막기 위한 다층식 충전방법을 1Cell pair, 3compartment EDI system 구성을 이용해 실험을 하였다. 또한, 유출수의 비저항을 Conductivity meter를 이용하여

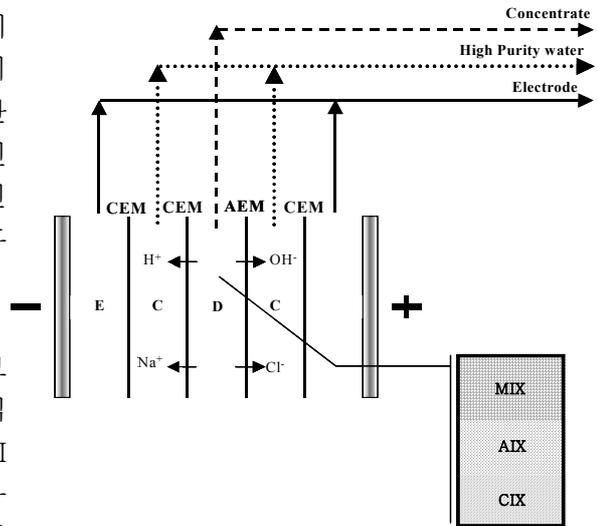


그림2. CEDI stack 구성도

측정하고, 이온에 대한 분석은 Ion chromatography를 이용하여 분석하였다.

결과 및 토론

1. EDI 전처리 공정으로서 RO시스템의 분석

RO 시스템을 온도, 압력, 유입수 농도, 회수율, pH에 대해서 살펴보았으며, RO 유입수에 가장 커다란 영향을 주는 공정변수로는 유입수의 온도와 농도인 것으로 나타났다. 온도의 증가에 따른 RO시스템의 성능변화를 열역학적 모델 $J_s = C^*(1-\sigma)J_v + P_m(C_m - C_p)$ - 우변의 첫 번째 항은 Convection을 의미하고 두 번째 항은 Diffusion을 의미함을 적용한 결과 σ 값이 거의 1에 가까움을 보임으로서 Diffusion 증가에 기인한 것으로 나타났다. 또한 유입수의 농도에 따른 도식적인 해석결과 발전소용 고순수를 생산하기 위해서는 RO시스템에 유입되는 유입수의 전도도가 약 300 μ s/cm이하에서 결정되어야 한다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 자료들은 실제 공정 운전 시 모니터링 자료로서 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

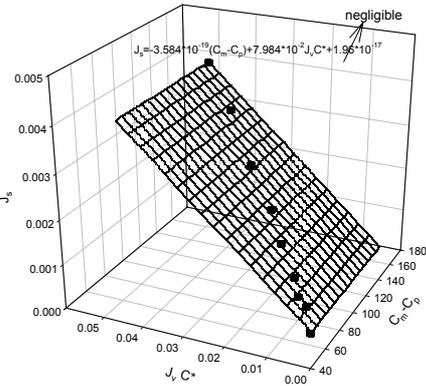


그림 3 열역학적 모델을 이용한 온도에 따른 CEDI 성능변화

2. EDI시스템의 공정변수에 따른 성능변화

고순수를 생산하기 위해서 구체적인 성능평가가 이루어져야 하는 부분은 EDI시스템이다. EDI 공정의 성능평가를 유입수 온도와 유속, 전류밀도, 전도도에 따라서 분석을 하였다.

① 온도의 영향

온도의 증가는 그림 4에서 보이는 바와 같이 EDI 시스템의 성능을 증가시키는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 온도의 증가로 인한 전도도의 증가와 이에 따른 이온의 이동도의 증가로 사료된다.

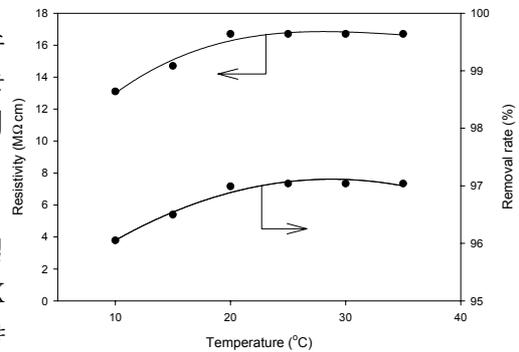


그림 4. 온도에 따른 CEDI 공정의 성능변화

② 유속의 영향

유입수의 유속의 증가는 EDI 시스템의 성능을 감소시킬 수 있다. Layered bed system (CIX: AIX: MIX = 3: 3: 4)에 대한 최적 유입수의 유량은 체류시간이 약 5초에서 나타났고, 이때 유출수는 16.7M Ω cm의 비저항을 가짐을 알 수 있었다.

③ Current density의 영향

20A/m²의 전류밀도이상에서 16.7M Ω cm의 고순수를 생산할 수 있었고, 이보다 적은 전류밀도는 유출수의 비저항을 낮추는 것을 알 수 있었다.

④ Feed concentration의 영향

Feed Concentration은 CEDI 시스템의 유출수의 비저항에 영향을 준다. CEDI에 유입수가 약 5~10 μ s/cm 사이에서 발전소용으로 사용가능한 고순수를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

⑤ Optimal 공정변수에 따른 CEDI 성능변화

최적의 온도와, 유속, 전류밀도, 유입수 농도를 구한후

표3. Raw water와 CEDI 유출수의 수질비교

Parameter	Raw Water	Permeate
pH	6.4	7.4
Conductivity(μ s/cm)	2.3	0.06 (16.7M Ω cm)
Dissolved SiO ₂ (ppm)	1.03	-
Cations (ppm)		
Ca	0.25	0.04
Mg	0.06	-
Na	0.03	-
Anions (ppm)		
Cl ⁻	0.01	0.007
NO ₃ ⁻	0.01	-
SO ₄ ²⁻	0.19	-

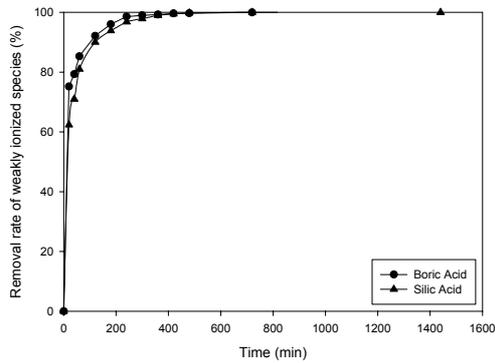


그림 5. 시간에 따른 약이온종의 제거에 대한 공정에서 약이온종에 대해서 매우 낮은 제거율을 가지는 CEDI 성능변화

우 높은 제거율을 가짐으로서 EDI 공정이 고순수의 제조시 매우 유리한 것으로 나타났다. 특히, 반도체 공정이나, 발전소에서 약이온종의 제거는 필수적이라는 점을 감안한다면 이러한 사실은 이온교환방법의 대체공정으로서 매우 중요한 실험결과임을 알 수 있다.

EDI시스템이 크게 두부분으로 나뉘어진다는 기작을 규명하기 위해서 백금선을 이용하여 EDI시스템의 저항을 윗부분 아랫부분에서 비교하였다. 그결과, 그림 6에서 보이는데와 같이 EDI시스템이 크게 두부분으로 나뉘어지며, 아랫부분에서는 탈염이 윗부분에서는 화학적 재생이 일어남을 알 수 있었다.

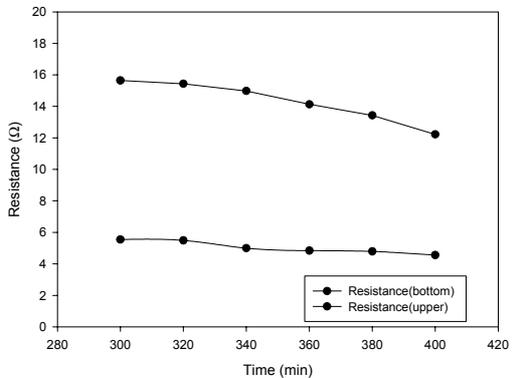


그림 6. 시간에 따른 CEDI 시스템의 윗부분과 아랫부분에서의 저항의 변화

결론

RO-IX 공정의 대체공정으로서 RO-EDI 공정의 성능을 분석하고 평가한 결과 EDI 유출수가 원자력 발전소용 고순수의 요구조건을 만족시킬 수 있는 것으로 평가되었다. RO-IX 공정의 단점인 이온교환 수지의 주기적인 재생과 폐액의 발생, 그리고 약이온종의 제거에 부적절함을 EDI가 극복할 수 있음을 제시할 수 있었다. 또한, 16.7MΩcm을 가지는 고순수의 물을 생산함으로서 대체공정으로서 성능을 입증할 수 있었다.

사사

본 연구는 한국과학기술평가원에서 주관하는 원자력 기초연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jan Severa: Handbook of radioactive contamination and decontamination, Elsevier, p 117-155 (1991)
2. Strathmann, H. Krol, J.J., Rapp, H.-J., Eigenberger, G., Limiting current density and water dissociation in bipolar membranes, J. membrane Science, 125, p 123-142 (1997)