

압착성형법으로 제작된 전기화학적 이온교환 전극에서 구리이온의 흡착과 용출특성

박 세 용* · 김 래 현[†] · 조 영 일*

서울산업대학교 화학공학과, *연세대학교 화학공학과
(1998년 3월 5일 접수, 1998년 4월 15일 채택)

The Adsorption and Elution Characteristics of Copper Ions in Electrochemical Ion Exchange Electrode Fabricated by the Compressed Diecasting

Sei-Yong Park*, Lae-Hyun Kim[†], and Young-Il Joe*

Dept. Chem. Eng., Seoul National Polytechnic Univ., Seoul 139-743, Korea

*Dept. Chem. Eng., Yonsei Univ., Seoul 120-749, Korea

(Received March 5, 1998; accepted April 15, 1998)

요 약: 전기화학적 이온교환전극을 양이온 교환수지 Amberlite IRP-64와 결합제로서 Stylen-Buthylene-Rubber (SBR)를 혼합하여 압축성형 방법으로 제작하여, 전극전위와 전해질의 pH에 따른 구리이온의 흡착과 용출특성을 고찰하였다. 흡착공정에서는 -1800 mV에서 최대 흡착속도를 나타내었으며 90 분 경과 후, 92%의 흡착율을 나타내었다. 용출공정의 경우, 본 실험영역에서는 전위의 증가에 비례하여 용출율은 증가되어 나타났으며, 3600 mV에서 50 분 이후 88%의 용출율을 나타내었다. 전기화학적 이온교환 전극 근처의 국부적인 pH 변화는 흡착과 용출공정에 크게 영향을 미치는 것으로 사료되며, 전해질의 pH가 각각 염기성과 산성에서 높은 흡착율과 용출율을 나타내었다.

Abstract: Electrochemical Ion Exchange(EIX) electrode containing Amberlite IRP-64 as a cation ion exchange resin and Stylen-Buthylene- Rubber (SBR) as a binder was fabricated by the compressed diecasting method. The adsorption and elution characteristics in copper sulfate solution were investigated at the various electrode potentials and electrolyte pHs. In the adsorption process, it was found that the maximum adsorption rate of copper was obtained at -1800 mV and the ratio of adsorption was 92% during 90 min. In the elution process, the elution rate of copper was increased in proportion to anodic potential in the present experimental range and the ratio of elution was 88% during 50 mins at 3600 mV. The adsorption and elution processes were significantly affected by the variation of local pH in the vicinity of electrochemical ion exchange electrode. The higher performances of adsorption and elution were obtained at basic and acidic electrolytes.

Key words: Electrochemical Ion Exchange, Adsorption, Elution Process

1. 서 론

산업이 고도화되고 환경기준이 강화되면서 ppm 이하의 매우 묽은 용액 중에 함유된 유해물질의 제거, 고가의 유용한 물질들의 분리 및 회수의 필요성이 증대되고 있다. 그러나 기존의 분리방법들은 분리능의 한계와 경제성 등의 문제로 새로운 분리방법과 그에 따른 공정개발이 요구되는 시점에 있다.

일반적인 이온교환 메커니즘은 이온교환수지와 전해질간의 화학전위 차이에 의해 이온교환기가 활성화되고 벌크상의 이온성분이 흡착되게 된다[1]. 또한 이온교환수지의 재생 시에는 산 등의 첨가로 화학 전위 차를 변화시켜 흡착된 이온성분들을 탈착, 용출시키는데 이때는 첨가된 산에 의해 2차 환경오염이 유발되는 등의 문제가 생겨날 수 있다.

이에 비하여 전기화학적 이온교환 (electrochemical ion exchange; EIX) 공정은 보다 발전된 이온교환 공정중의 하나로 수 ppm에서 ppb 단위의 매우 묽은 용액에서 이온성분들의 분리와 회수에 특히 유용한 공정이며, 이온교환수지의 재생시, 즉 흡착된 이온을 용출

시킬 때에는 산 등이 추가되지 않으므로 환경친화적인 공정으로 알려져 있다[2-6].

전기화학적 이온교환 공정은 흡착과 용출공정으로 나눌 수 있다. 흡착 공정은 이온교환 수지와 결합제를 혼합하여 금속 전극에 일체화시킨 EIX 전극을 작업전극(working electrode)으로 하여 외부로부터 전위를 가하여 이온성분이 표면확산과 기공확산을 통하여 이동하여 활성화된 이온교환기에 흡착되는 것이다. 용출공정은 이온성분이 흡착된 EIX 전극과 상대전극의 극성을 각각 흡착공정과 반대로 하여 외부로부터 전위 차를 가해주면 흡착된 이온들이 탈착, 용출 되는 과정이다. 따라서 EIX 전극 공정은 외부 전위의 조작에 의해 흡착과 용출공정이 조절되는 특성을 가지고 있다[3-8].

EIX 전극 공정의 장점은 비슷한 공정의 전기영동장치 등에 비하여 장치의 크기가 작고 내구성과 경제성이 높으며, 묽은 용액의 처리시 기존의 이온교환막 또는 흡착제를 사용하는 경우에 비하여 높은 흡착효율을 나타낸다. 또한 적절한 이온교환수지를 사용하면 선택적으로 이온성분을 흡착시킬 수 있으며, 간단한 소규모 장치에서 용출이 가능하고 재생능력이 뛰어나므로 다른 분리공정들에 비하여 경쟁력이 있는 공정으로 평가되고 있다[3-8].

EIX 전극은 전극제조 방법과 이온교환수지의 결합제로 사용되는 고분자 물질에 따라 흡, 탈착능, 내구성 등이 현저하게 달라지게

[†] 주 저자 (e-mail: lhkim@duck.snpu.ac.kr)

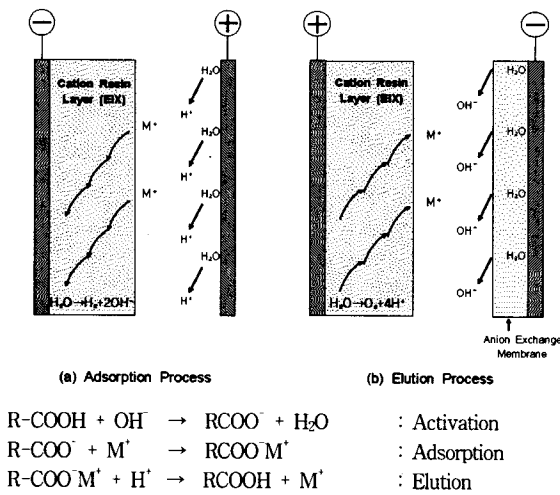


Figure 1. Schematic diagram of adsorption and elution mechanism.

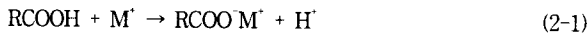
되며, 용용분야는 묽은 용액중의 중금속 이온이나 유해물질 제거, 원자로 등에서 발생하는 방사성 오염물질 제거, 귀금속의 회수, 물의 탈 이온화 (deionization), 부식성 음이온의 제거, 질산염 (nitrate)의 제거 등에 이용될 수 있다[9-12].

본 실험에서는 흡착과 용출능이 우수한 것으로 알려진[6] 상업용 Amberlite IRP-64 양이온 교환수지와 결합제로서 SBR을 사용하여 압축성형법으로 EIX 전극을 제조하여, 황산구리 용액 중에서 Cu 이온에 대한 외부전위와 전해질의 pH 변화에 따른 EIX 전극의 흡착과 용출특성을 조사하였다.

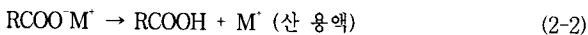
2. 이론적 고찰

2.1. 일반적인 이온교환 공정기구

기존의 이온교환 공정기구에서 흡착은 식 (2-1)과 같이 이온교환 수지와 전해질간의 화학 전위 차이에 의하여 이온교환기가 활성화되고, 벌크상의 이온성분들이 흡착되는 것으로 알려져 있다[1].



이온교환수지의 재생공정은 식 (2-2)와 같이 산 등을 추가하여 화학 전위를 변화시켜, 흡착된 이온성분들을 이온교환기로부터 탈착, 용출시키는 것으로 알려져 있다.



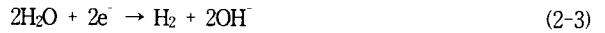
이러한 이온교환수지의 이온교환 능은 주로 이온교환기의 활성화와 화학 전위 차에 의존되므로 묽은 용액의 처리 시에는 한계가 있는 것이다. 또한 이온교환수지의 재생공정, 즉 흡착된 이온성분들을 용출시킬 때에는 추가되는 산등으로 인한 2차 환경오염 등의 문제가 발생할 수 있다.

2.2. 전기화학적 이온교환전극에 의한 이온교환 공정기구

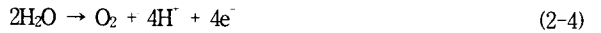
전기화학적 이온교환전극에 의한 이온교환 공정은 Figure 1과 같이 EIX 전극과 상대전극의 외부 전위 조작에 따라 흡착공정과 용출공정으로 이루어진다.

흡착공정은 식 (2-1)과 같은 화학전위 차에 의한 이온교환 공정과 Figure 1(a)의 가해진 외부 전위에 의한 이온교환 공정이 더해진 것이다. 양이온 교환수지와 결합제를 혼합하여 금속전극과 일체

화된 EIX 전극이 음극, 상대전극을 양극으로 하여 외부로부터 전위를 작용시키면 EIX 전극 내에서는 식 (2-3)과 같이 물 분해에 의한 OH⁻ 이온이 발생되어 이온교환기의 수소를 탈 수소화시켜 이온교환기가 활성화된다. 이때, 전하의 균형을 유지하기 위하여 전해질 벌크상에서 이동하여 온, 이온성분들이 활성화된 이온교환기에 흡착되어진다. 그러나 환원전위의 증가로 식 (2-3)과 같은 급격한 물 분해로 인한 수소 가스의 발생은 이온성분들의 이동을 방해하고, 흡착을 어렵게 하므로 흡착공정시에는 최적의 외부 전극전위가 존재할 것으로 사료된다. 본 실험에서 사용된 양이온 교환수지의 이온 교환기는 -COOH이다.



용출공정은 이온성분들이 흡착된 EIX 전극과 상대전극의 극성을 흡착공정과 반대로 하여 전위를 작용시키면, 양극이 된 EIX 전극 내에서는 식 (2-4)와 같이 물 분해에 의한 H⁺ 이온이 발생하여 이온교환기에 흡착된 이온성분들을 탈착, 용출시킨다.



따라서 EIX 전극공정은 이온교환수지의 이온교환 능력과 외부 전위가 더해져 흡착속도가 향상되고 외부 전극전위 조작에 의하여 EIX 전극의 이온교환수지가 전기화학적으로 재생되는 것이다.

2.3. 다공성 EIX전극에서 이온의 이동

먼저 다공성 EIX 전극에서의 이온의 이동 요인중의 하나는 온도, 농도구배 등의 추진력에 의한 확산이다. 확산의 가장 일반적인 원인은 확산성분의 농도구배로, 농도구배가 있는 용액에서의 확산은 Fick's의 법칙에 의해 식 (2-5)로 표현할 수 있다.

$$(J_i)_{diff} = -D_i \text{grad } C_i \quad (2-5)$$

여기서 $(J_i)_{diff}$ 는 확산성분 i 의 플럭스이고, D_i 는 확산계수이다. 전기화학계에 가해진 외부 전위는 이온의 이동을 가속화시킨다. 균일 성분의 용액 계에서 전기장에 의한 성분 i 의 이동 $(J_i)_{el}$ 은 전위 ψ 와 전해질 농도 C_i 에 비례하므로 성분 i 의 플럭스는 식 (2-6)과 같다.

$$(J_i)_{el} = -u_i z_i C_i \text{grad } \psi \quad (2-6)$$

여기서 z_i 는 성분 i 의 원자가, u_i 는 전기화학적 이동도로 정의된다. 전기화학적 이동도는 Nernst-Einstein식에 의하여 식 (2-7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_i = \frac{z_i F}{RT} = \frac{D_i F}{RT} \quad (2-7)$$

여기서 F 는 패러데이 상수, R 은 기체상수, T 는 절대온도이다. 위의 식은 이상용액의 경우이나, 실험적으로 이온교환수지의 작은 기공들이 이온구름의 형성을 방해하는 것으로 추측되므로 좋은 근사값으로 사용할 수 있을 것으로 사료된다[6].

또한 전해질에서의 전류의 흐름은 이온들의 이동으로 나타나는데, 이온들이 완전 해리를 한다는 가정 하에서 대류에 의한 성분 i 의 이온플럭스는 식 (2-8)과 같다.

$$(J_i)_c = C_i u_i \quad (2-8)$$

여기서 C_i 는 성분 i 의 농도이다.

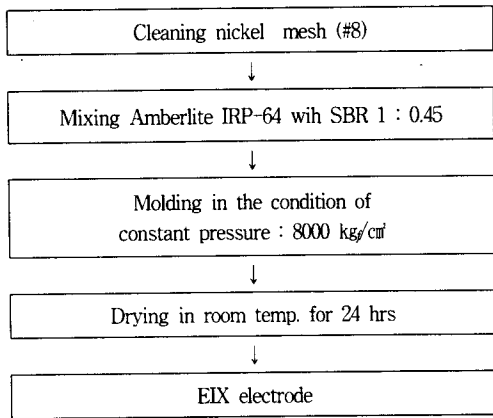


Figure 2. Schematic diagram of EIX electrode for manufacturing.

따라서 균일 성분의 용액 계에서 EIX 전극에 외부 전위가 가해졌을 때, 성분 i 의 총 플럭스는 식 (2-9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_i = (J_i)_{diff} + (J_i)_{el} + (J_i)_c = -D_i \text{ grad } C_i - u_i z_i C_i \text{ grad } \psi + C_i u_i \quad (2-9)$$

EIX 전극 내에서의 이온 플럭스는 전해질 용액의 농도가 매우 묽고 농도가 일정하게 유지된다면 결국 외부 전위에 의한 전기이동 (migration)이 지배적이므로 외부 전위는 흡착과 용출 특성에 중요한 영향을 미칠 것으로 사료된다.

3. 실험

3.1. EIX 전극의 제조

본 실험에서의 EIX 전극의 제조는 혼합된 이온교환수지와 결합제를 금속전극에 내구성 있게 일체화시키기 위하여, Figure 2와 같이 먼저 8 mesh의 니켈 망을 산과 알칼이 용액 중에서 산화물 등을 제거한 후, 세척하여 금속전극으로 사용하였다. 다음에 용출능이 다른 양이온교환 수지에 비하여 우수한 것으로 알려진, 상업용 Amberlite IRP-64와 결합제인 SBR을 1:0.45의 중량 비로 5시간 이상 혼합하여, 니켈 망 전극에 부착, 미국 FRED S. CRAVER INC 사의 유압 프레스를 사용하여 8000 kg/cm²의 압력으로 성형하였다. 가압 성형후, 전극의 건조조건은 전극의 성능과 내구성 등에 중대한 영향을 미치므로 본 실험에서는 수차의 실험 결과, 내구성이 우수한 것으로 나타난 실온에서 24시간 건조하였다. 이때 제작된 EIX 전극은 두께 2 mm, 직경 25 mm의 원판형이었다.

Figure 3은 제조된 EIX 전극의 SEM 사진으로 8000 kg/cm²의 높은 압력에서 압착, 성형하였음에도 표면에서의 다공성은 비교적 양호한 것으로 나타났다.

3.2. 실험 장치

실험장치는 Figure 4와 같이 회분식 반응조로 구성하여, EIX 전극의 양면에 3 mm 간격을 두어 두께 1 mm, 가로 3 cm, 세로 3 cm의 니켈 전극을 설치하였다.

EIX 전극 가까이에 IR-drop을 최소화하기 위하여 Luggin Capillary를 사용하여 포화카로멜 기준전극을 설치하고 EIX 전극 근처의 국부 수소이온 농도를 측정하기 위하여 pH meter를 설치하였다. 또한 순환 항온조 내에 회분식 반응조를 설치하여 전해질의 온도를 20±0.2 °C로 유지시켰으며, 실험전 질소가스를 약 30분간 흘려보내 전해질 속의 용존산소를 제거하고자 하였다.

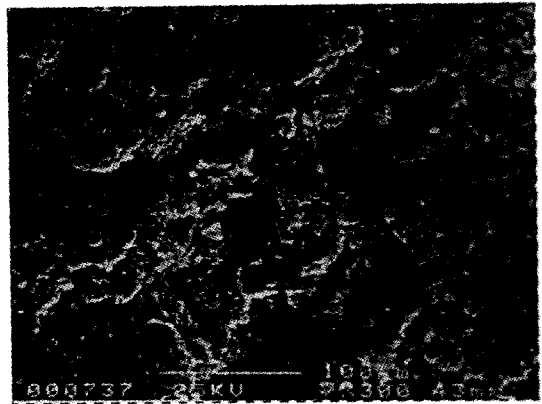
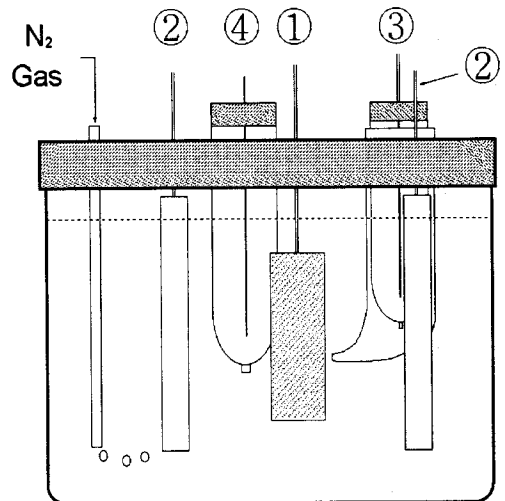


Figure 3. Scanning electron microscopy of the surface of EIX electrode.



- 1. EIX electrode
- 2. Ni electrode
- 3. Reference electrode (SCE)
- 4. pH electrode

Figure 4. Schematic diagram of batch cell system.

전위를 공급하는 potentiostat은 EG&G사의 model 273을 IBM-PC에 접속하여 제어하고, 자료를 기록하였다.

용출공정시에는 Figure 1(b)와 같이 용출된 구리이온들의 니켈 전극으로의 전착을 방지하기 위하여 일본 Yokogawa Soda사의 음이온 교환막 AM-1을 니켈판 전극에 부착하였다.

구리이온의 농도의 분석은 Varian 사의 Spectra AA 원자흡광분광기를 사용하였다.

3.3. 실험조건

실험조건은 시약 급의 CuSO₄·5H₂O를 사용하여 10 ppm의 Cu 전해질 용액을 조제하여 사용하였다. 외부 전위의 실험 범위는 흡착공정시 0~3600 mV, 용출공정시 0~3600 mV로 하였다. 전해질의 pH는 0.1 M H₂SO₄ 용액과 0.1 M NaOH 용액을 사용하여 조절하였다.

또한 본 실험에서 선택한 흡착과 용출능이 우수한 양이온 교환수지 Amberlite IRP-64의 성질은 Table 1과 같다. 이온교환용량의 측정은 Na 적정법[13]에 의하여 Amberlite IRP-64 0.25 g을 0.1 N NaCl 용액에 분산시켜, 자석교반기로 24시간 동안 교반하여 평형

Table 1. Physical properties of Amberlite IRP-64 Cation Exchange Resin

Matrix	Ionic group	capacity(meq/g)		Maximum Temp. (°C)	pH range	physical form
		dry resin	measured			
polystyrene resins. Vinyl addition polymers	-COOH	10	4.6~6.2	120	5~14	powder

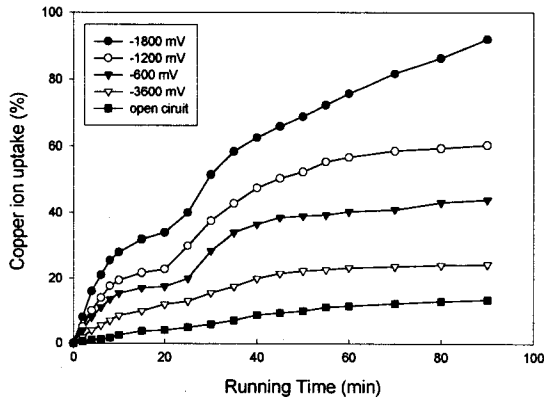


Figure 5. Copper ion uptake from aqueous solution containing 10 ppm of Cu by IRP-64 based EIX.

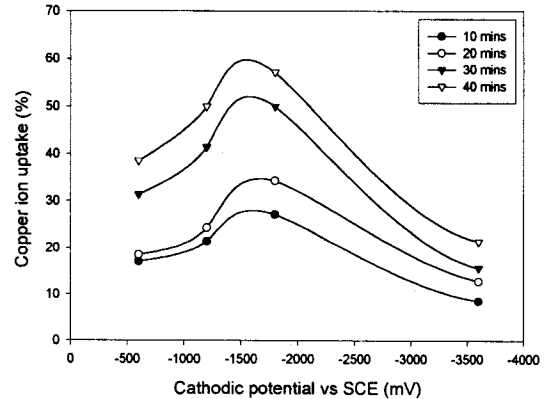


Figure 6. Copper ion uptake with applied cathodic potential.

에 도달시킨 후, 페놀프탈레인 용액을 지시약으로 가하여 0.1 N NaOH로 적정하였다. 이때 측정된 이온교환용량은 4.6~6.2 meq/g 인 것으로 나타났다

4. 결과 및 고찰

4.1. 전극전위에 따른 EIX 전극의 흡착특성

Figure 5는 10 ppm의 구리용액중에서 EIX 전극의 외부 전위에 따른 구리이온의 흡착양상을 나타낸 것이다. 흡착곡선에서 변곡점이 나타나는 것은 식 (2-3)과 같이 작업전극 내부에서 물 분해로 인한 수소가스와 OH⁻ 이온이 발생되어 Figure 1에서와 같이 OH⁻에 의한 이온교환기의 탈 수소가 진행되어 이온교환기가 활성화되며, 활성화 단계에서는 비교적 흡착이 억제되고 활성화 된 이후에 흡착이 증가되기 때문인 것으로 사료된다.

Figure 6의 외부 전위에 따른 흡착양상을 살펴보면 음극전위의 증가에 따라 흡착량은 증가하여 나타났으나 -3600 mV의 경우, -1800 mV에 비하여 흡착량은 현저히 낮은 것으로 나타났다. 이것은 -3600 mV에서는 EIX 전극 내에서 급격한 물 분해로 인한 수소 가스 발생이 구리이온의 이동과 흡착을 방해하기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 결과로부터 EIX 전극의 흡착공정에서는 최대의 흡착을 나타내는 최적의 전극전위 영역이 존재할 것으로 판단된다.

본 실험영역에서는 -1800 mV에서 최대흡착을 나타내었으며 90분 경과 후, 92%의 흡착율을 나타내었다. 개회로 상태에서는 전해질의 구리이온 농도가 10 ppm으로 매우 낮으므로 화학 전위 차가 크지 않게 되어 흡착양상은 매우 낮게 나타난 것으로 사료된다.

4.2. 전극전위에 따른 EIX 전극의 용출특성

EIX 전극의 용출공정은 이온성분이 흡착된 EIX 전극과 상대전극의 극성을 흡착공정과 반대로 하여 외부로부터 전위를 가해주게 된다. 이때, 양극이 된 EIX 전극 내에서는 식 (2-4)와 같은 물 분해에 의한 수소이온이 생성되어, 흡착된 이온성분들을 탈착, 용출시키고 이온교환기와 결합하여 이온교환수지를 재생시키는 과정

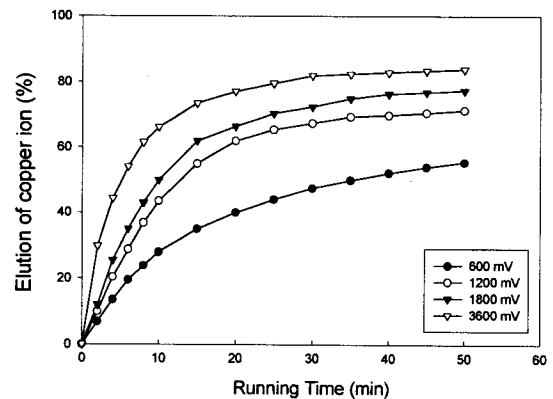


Figure 7. Elution from Cu adsorbed IRP-64 based EIX in distilled water.

이 진행된다.

Figure 7은 10 ppm의 구리이온이 포함된 전해질에서 본 실험영역에서 최적전위로 나타난 -1800 mV의 전위를 90분간 가하여 EIX 전극에 구리이온을 흡착시킨 후, EIX 전극의 극성을 바꾸어 증류수 중에서 외부 전위에 따른 용출양상을 나타낸 것이다.

본 실험영역에서는 전위의 증가에 비례하여 용출량이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 전위의 증가에 따라 EIX 전극 내에서 물 분해에 의한 수소이온들의 발생이 증가되어 용출이 증가되는 것으로 사료되며, 3600 mV의 전위에서 50분 경과후 흡착된 구리이온의 88%가 용출되는 것으로 나타났다.

또한 3600 mV 이상의 전위에서는 급격한 물 분해로 인한 산소 가스의 발생으로 EIX 전극의 내구성을 저하시켜 본 실험에서는 최대실험전위를 3600 mV까지로 하였다.

4.3. 전해질의 pH가 EIX 전극의 흡착에 미치는 영향

EIX 전극은 가해지는 외부전위에 의하여 공정 중에 물 분해에

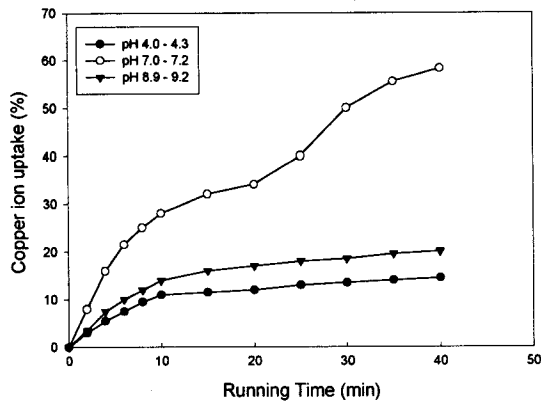


Figure 8. Copper ion uptake from aqueous solution containing 10 ppm of Cu with pH(applied potential -1800 mV).

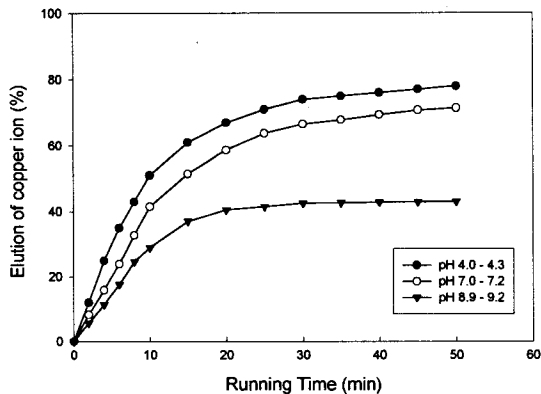


Figure 9. Elution from Cu adsorbed IRP-64 based EIX with distilled water pH(applied potential 3600 mV).

의해, 전극 근처에서는 국부적으로 수소이온농도가 변하는 것으로 사료된다.

Figure 8은 10 ppm의 구리가 포함된 전해질의 pH를 0.1 M H₂SO₄ 용액과 0.1 M NaOH 용액으로 산성과 중성, 알칼리 용액을 조제하여, -1800 mV에서의 흡착양상을 나타낸 것이다.

본 실험영역에서는 전해질의 액성이 산성과 중성에 비하여 염기성에서 보다 높은 흡착양상을 나타내었다. 이것은 Turner 등[4]의 보고와 일치하는 것이며, 염기성 전해질에서는 OH⁻ 이온에 의하여 이온교환기의 활성화가 증대되어 흡착율이 증가하는 것으로 사료된다.

4.4. 전해질의 pH가 EIX 전극의 용출에 미치는 영향

Figure 9는 EIX 전극을 10 ppm의 구리이온이 포함된 전해질에서 -1800 mV의 전위로 90분간 구리이온을 흡착시킨 후, EIX 전극과 상대전극의 극성을 각각 반대로 하여 3600 mV의 전위를 가하여, 증류수의 pH에 따른 용출양상을 나타낸 것이다. 본 실험영역에서는 증류수의 pH가 산성과 중성조건에서 염기성에 비하여 높은 용출율을 나타내었다. 이것은 일반적인 이온교환 수지의 재생공정과 같은 이유로 식 (2-2)와 같이 증가된 수소이온들이 흡착된 이온성분들을 이온교환기로부터 탈착, 용출시키는 것으로 사료된다. 또한, 본 실험영역에서는 중성인 조건에서도 우수한 용출율을 나타내므로, 이러한 결과는 기존의 이온교환 공정에서 이온교환수지를 재생하는데 있어, 산 등을 첨가하여 2차 환경오염 등을 유발하는 문제를 피할 수 있는 환경 친화적인 공정으로 평가받을 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

양이온교환수지 Amberlite IRP-64와 결합제로서 SBR을 혼합하여 압축성형법으로 제작한 EIX 전극에 대하여 구리이온의 흡착과 용출특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) EIX 전극의 흡착공정에서는 최대의 흡착을 나타내는 최적 전위가 존재하는 것으로 나타났다. 본 실험영역에서는 -1800 mV가 최적전위인 것으로 나타났으며, 90분 이후 92%의 흡착율을 나타내었다. -3600 mV에서의 흡착율의 현저한 감소는 급격한 물 분해에 의한 수소가스 발생이 구리이온의 이동과 흡착을 방해하여 나타난 결과로 사료된다.

2) 용출공정에서는 전위의 증가에 비례하여 용출율은 증가하는 것으로 나타났다. 본 실험영역에서는 3600 mV의 전위에서, 흡착된 구리이온의 최대 용출율은 88%인 것으로 나타났다.

3) 전해질의 pH는 흡착과 용출에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 흡착공정에서는 전해질의 pH가 염기성 (pH 8.9~9.2)에서 높은 흡착율을 나타내었으며, 용출공정에서는 산성 (pH 4.0~4.3)과 중성 (pH 7.0~7.2)인 조건에서 높은 용출율을 나타내었다. 따라서 EIX 전극의 용출공정은 중성인 조건에서도 우수한 용출율을 나타내므로 환경 친화적인 공정으로 평가받을 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. F. Helfferich, "Ion exchange", 91, McGraw-Hill Co., New York(1962).
2. N. J. Bridger, C. P. Jones and M. D. Necille, *J. Chem. Tech. Bio.*, 50, 469(1991).
3. A. D. Turner, J. F. Dozoi and P. Gerontopoulos, "Electrochemical and ion-exchange processes. Radioactive Waste Management and Disposal", 53, Ed. R. Simon. Cambridge University Press(1986).
4. A. D. Turner, A. R. Junkinson and N. J. Bridger, *Electrical International Symposium on Management of Low Intermediate Level Radioactive Wastes*, Stockholm, May(1988).
5. W. S. Wu, M. S. Uddin and K. Hidajat, *Proceeding of APCChE and Chemeca* 93, 1, 335-1(1993).
6. 이원식, 김래현, 정택상, 오세중, *한국공업화학회지*, 6, 4, 519 (1995).
7. Bridger et al., "Electrodes", U.S. Patent, 5, 217, 587(1991).
8. Bridger et al., "Separation Methods", U.S. Patent, 5, 225, 056 (1991).
9. A. Clearfield and J. A. Stynes, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 26, 117(1964).
10. G. alberti and E. Torracca, *J. Inorg. Nucl. Chem.*, 30, 317 (1968).
11. Christopher J. et al., *Process for removing radioactive burden from spent nuclear reactor decontamination solutions using electrochemical ion exchange*, 5, 78, 842(1992).
12. S. Evans, W. S. Hamilton, and J. E. Lewis, *J. Electrochem. Technol.*, 6, 153(1968).
13. S. Evans and W. S. Hamilton, *J. Electrochem. Soc.*, 113, 309(1969).