

전기투석을 이용한 구리이온의 제거 시 운전인자의 영향

정효상 · 이강춘^{*,†}

동의대학교 환경공학과

*동의대학교 화학공학과

Effect of Operating Parameters on the Removal Performance of Copper Ion by Electrodialysis

Hyo-Sang Jung · Gangchoon Lee^{*,†}

Department of Environmental Engineering, Dong-eui University

*Department of Chemical Engineering, Dong-eui University

(Received 4 October 2010, Revised 2 November 2010, Accepted 4 November 2010)

Abstract

To evaluate the feasibility of electrodialysis for copper removal from industrial wastewater, the effect of operating parameters on the removal of copper was experimentally estimated. The limiting current density (LCD) linearly increased with the copper concentration and the flow rate. The time when the copper concentration of diluate reaches to 3 mg/L was linearly proportional to initial concentration of diluate, and the concentration of concentrate did not affect the removal rate. Increase in the flow rate gave a positive effect on the removal rate and became insignificant at flow rates greater than 2.4 L/min. The removal rate increased with the applied voltage. From the operation of the electrodialysis module used in this research, the flow rate of 2.4 L/min and the voltage corresponding to the 80~90% of LCD were found be the optimum operating condition for the copper removal from highly concentrated copper solutions.

keywords : Copper Removal, Electrodialysis, Heavy metal, Limiting current density, Wastewater treatment

1. 서론

산업발달과 인구증가 및 도시화로 인하여 발생되어 배출되는 유해물질의 종류와 양이 크게 증가하고 있다. 국내의 4대강 및 기타 하천에 유입되는 산업폐수 중 중금속 및 특정 유해물질을 함유한 특정폐수는 하루에 약 200만 톤 이상, 산업폐수는 640여 만 톤이 배출되고 있다. 중금속 폐수는 폐금속 광산이나 제련소, 도금, 염색공장은 물론 쓰레기 처리과정 등 다양한 경로로 발생되며, 중금속이 하천에 유입되어 상수원 오염은 물론 인근 지하수 및 토양을 오염시켜 인체뿐만 아니라 생태계에 커다란 위협을 주고 있다. 중금속에 의한 오염은 중금속이 가진 체내 농축 특성 및 잔류독성으로 인하여 직간접적으로 인체에 해를 줄 뿐만 아니라 수중생물의 오염물질 분해를 저하시켜 수질의 자정작용을 감소시키는 등 생태계에 미치는 영향이 매우 크므로 효과적인 처리를 위한 기술개발이 요구된다(윤영상 등, 2004). 특히 구리는 수계의 새우류, 패류 등과 같이 독성물질을 분해시켜 줄 수 있는 간이 없는 동물에 치명적인 독성을 나타내는 것으로 연구되었다(김영철, 2007). 또한 생물학적 폐수처리공법으로 폐수 내 질소성분을 제거하는 경

우 질화규에 큰 독성을 나타내는 물질 중 중금속은 은, 수은, 니켈, 크롬, 구리, 아연 등이 알려져 있다(김금용과 백주현, 2009). 필요에 따라 생물학적 폐수처리 전에 전처리 공정으로 중금속 제거공정이 고려될 수 있다.

산업폐수로부터 중금속을 제거하기 위한 방법 중 현재 실용화되었거나 연구되고 있는 것은 응집침전법, 이온교환법, 흡착법, 산화환원법, 전기분해법, 중화법 및 추출법과 같은 물리화학적 처리방법과 생물학적 처리법으로 생체흡착법 등이 있다. 이 중 응집침전법과 이온교환수지를 이용한 이온교환법이 가장 널리 이용되고 있다. 응집침전법은 설치가 용이하고 유지비용과 에너지소모가 상대적으로 낮은 장점을 지니고 있으나 처리효율이 낮고 처리부산물로 다량의 슬러지가 발생하므로 슬러지의 폐기처리가 문제이며, 이온교환수지법은 응집침전법에 비하여 중금속 처리율이 높고 저농도의 중금속 이온 등 독성물질을 선택적으로 제거할 수 있는 장점을 지니고 있으나 고가의 수지를 사용해야 하므로 물질의 회수 및 재사용이 병행되지 않을 경우 다른 방법에 비해 비경제적인 것으로 알려져 있다.

구리는 표면처리, 도금산업, 금속의 채취 및 제련, 전자부품산업, 반도체 및 PCB제조, 폐광산지역 등에서 광범위하게 발생된다. 구리함유 폐기물이 수계에 오염되면 먹이사슬을 통해 연쇄축적 및 직접적으로 인체 내로 흡수될 경우 강한 지속성 때문에 인체에 영향을 나타낼 수 있다(양재규

[†] To whom correspondence should be addressed.

glee001@deu.ac.kr

등, 2008). 구리는 호흡과 경피접촉을 통해 인체에 침투하며, 구강을 통해 위장기관에 흡수되고 단백질과 결합하여 알부민, 셀룰로플라즈민, 적혈구에 분포하며, 고농도로 구리를 섭취 시 구토, 위염, 뇌출혈, 설사 등 위에 자극을 일으키는 원인이 된다.

최근 오염물질을 회수하거나, 처리된 물을 재사용함으로써 환경오염을 최소화하는 청정기술인 무방류 처리 시스템 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 기술들 중 하나인 전기투석법은 다른 공정에 비하여 설치면적과 공간을 적게 차지하고, 설치 및 운전이 용이하고, 폐수의 정상변화에 안정적이며, 화학약품을 주입하지 않고, 슬러지의 발생이 획기적으로 감소되어 운전비용 절감효과도 있다. 그리고 물질의 상변화가 없고, 역삼투압법에 비해 상대적으로 에너지 소모가 적어 기능면이나 경제적인 면에서도 다른 공정에 비해 매우 효율적이기 때문에 차세대 기술로 자리 잡을 것으로 예측되고 있다(Martin et al., 1995; Strathmann, 2004).

본 연구에서는 구리이온을 함유하는 폐수의 처리를 목적으로 고농도의 구리를 함유한 산업폐수를 처리하는 데 전기투석법의 적용 가능성을 실험적으로 평가하였다. 전기투석 운전 시 한계전류밀도를 측정하고, 구리의 농도, 운전전압, 유속 등의 운전변수가 제거효율에 미치는 영향을 측정하고, 최적 운전조건에 대한 검토를 수행하여 현장적용성을 평가해 보고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 전기투석

전기투석은 전기화학적 전위차를 이용 이온교환막을 통하여 이온 물질을 선택적으로 분리하는 공정으로 환경분야에서는 물의 연수화공정, 질산성 질소 제거공정, 도금폐수 중 유기금속의 회수공정, 중금속 제거공정, 원자력발전소의 일차 냉각계통에서 발생하는 방사선물질 제거공정, 정유폐액의 탈염공정, 정수처리공정, 중수도공정 및 고도정수처리공정 등에 적용된다. 또한 식품산업에서는 아미노산이나 유기산의 분리정제공정, 유기공품 제조업의 탈염공정, 식염제조공정 유장의 탈염, 당의 정제과정에서의 탈색공정 등 최종제품을 얻기 위한 정제과정으로도 활용되고 있다. 그리고 전자산업이나 자동차산업에서의 초순수 제조공정, 철강산업에서 금속이나 산 회수공정, 의약산업의 최종 제품의 분리정제공정 등에서도 전기투석공정의 안정성이 입증되면서 활용 폭을 넓혀가고 있다(Strathmann, 2004).

두 전극 사이에 전기장이 존재하면 구동력으로 전기적인 전위차에 의해 양이온은 음극부분으로, 음이온은 양극부분으로 이동하게 되고, 두 전극 사이에서 양이온막이나 음이온막이 설치되면 막을 통하여 양이온이나 음이온이 선택적으로 이동하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 이온의 농축과 분리를 할 수 있게 된다. 두 전극사이에 교차적으로 양이온막과 음이온막을 설치하고 직류를 흐르게 하면 교차된 막 사이에서는 이온농도가 증가하지만 다른 막 사이에서는 이온농도가 감소하는 효과가 나타나 결과적으로 농축용액

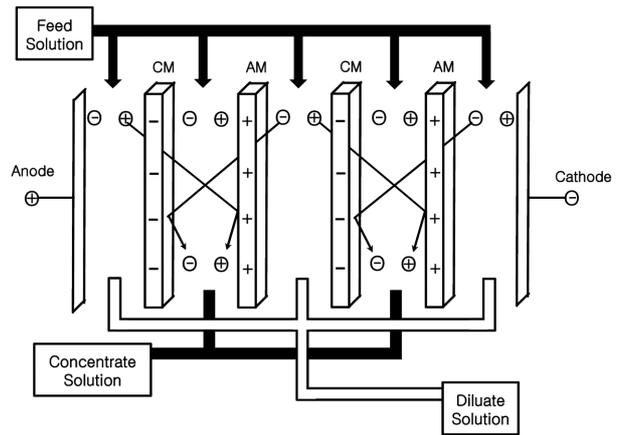


Fig. 1. Principle of electrodialysis.

과 희석용액으로 분리된다(Sata, 2004).

전기투석 공정은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 양극과 음극 사이에 양이온교환막과 음이온교환막이 한 쌍의 셀(cell pair)을 구성하고 있으며 전기적으로 하전된 막과 전위차의 조합에 의해 다양하게 배열하여 사용할 수 있다. 전해질을 포함한 수용액이 이들 cell pair 사이에 공급되고, 양극과 음극 사이에 직류전원을 통해 주면 양이온은 음극을 향하여 이동하게 되고 음이온은 양극을 향하여 이동하게 된다. 이때 양이온은 음이온을 띠고 있는 양이온교환막을 쉽게 통과하나 양이온을 띠고 있는 음이온교환막에 의해서는 배척된다. 음이온의 경우는 양이온과 정반대의 공정이 진행되게 되며, 이로 인해 농축실과 희석실이 교대로 나타나게 된다. 희석된 용액은 일반적으로 희석액(dilute), 농축된 용액은 농축액(concentrate)이라 칭한다.

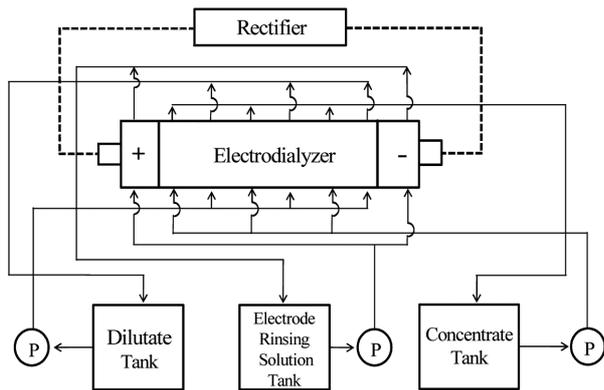
전기투석 공정에서 이온교환막을 통한 이온의 투과성은 이온종의 특성 및 유입 용액의 농도, pH, 유량, 전류밀도 등과 같은 운전조건에 의존하며, 이온교환막을 통한 선택적 이온투과는 주로 특정 이온 종에 대한 선택특성, 유입 용액의 농도에 대한 이온 선택성의 평가 및 이온교환막을 통한 이온의 선택투과 차이 등에 영향을 받는다. 전기투석에 사용되는 이온교환막은 높은 선택투과성, 낮은 전기저항, 높은 기계적 강도, 높은 화학적 안정성 등의 물성을 보유하는 것이 권장된다.

2.2. 실험장치

본 연구에서 사용한 전기투석장치는 기본적으로 회분식 시스템이지만 연속식으로도 운전이 가능하도록 제작되었다. 시스템은 희석조(유입액조), 농축조(유출액조), 전극액조, membrane stack, 펌프, 유량계, 정류기 등으로 구성되었다. 희석조, 농축조 및 전극액조는 내화확성이 좋은 아크릴로 제작되었으며, 부피는 6 L이다. 그리고 최대유속이 17 L/min인 내화확성 magnetic pump를 사용하여 인공폐수 및 전극액을 이송하였으며, 유량계를 사용하여 유량을 확인하였다. 또한 DC 0~35 V, 0~10 A SCR 정류방식의 정류기(신일전자디지털(주), 한국)를 사용하여 전류를 공급하였다. Fig. 2는 사용된 전기투석 장치의 개략도를 보여준다.

Table 1. Specifications of ion exchange membranes and membrane stacks

	Cation exchange membrane	Anion exchange membrane
Model names	Selemion CMV	Selemion AMV
Types of membrane	Strong acidic cation permeable membrane	Strong basic anion permeable membrane
Thickness (μm)	130	130
Counter-ion	Na^+	Cl^-
Effective area of membrane	0.021 m^2/Sheet	
Size of membrane	160 mm \times 280 mm	
Space between membranes	0.75 mm	
No. of cell pairs	10	

**Fig. 2.** Schematic diagram of electro dialysis apparatus.

Membrane stack은 일본 AGC ENGINEERING CO., LTD.의 CH-0 모델을 사용하였다. Stack은 모두 10개의 cell pairs, 두 개의 극, 그리고 3장의 양이온교환막과 그 밖의 셀 프레임으로 구성되어 있다. 하나의 cell pair는 양이온 교환막 1장, 음이온 교환막 1장, 그리고 셀 프레임 2장을 포함한다. Table 1은 실험에 사용된 membrane stack에 대한 사양을 보여준다.

2.3. 실험방법

다양한 농도의 구리 용액과 전극액을 제조하기 위하여 Junsei Chemical Co.의 특급시약 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 와 Na_2SO_4 를 사용하였다. 처리수로 사용될 구리폐액은 초순수를 사용하여 구리농도 100, 200, 300 mg/L로 제조하여 사용하였다. 용액은 미국 Barnstead사의 Ultrapure Water System을 사용하여 전도도가 $0.054 \mu\text{S}/\text{cm}$ 이하에서 저항률(resistivity) 값이 안전한 상태인 18.1~18.2 $\text{M}\Omega\text{-cm}$ 범위의 초순수를 이용하여 제조하였다. 모든 실험에 전극액은 4 wt% Na_2SO_4 수용액을 사용하였다.

희석액은 전기투석기로 유입되어 희석되는 용액을 말하고, 전기투석기를 통과 시 이온교환막을 통하여 희석액으로부터 투과된 구리에 의해 농축되는 용액을 농축액이라 한다. 회분식 실험의 경우 유입용액이 희석조에서 전기투석기를 순환하며 희석되고, 구리를 함유한 용액이 이온교환막을 통과하여 농축조로 모이게 된다. 연속식은 유입액과 유출액의 순환 없이 전기투석기를 one pass로 통과시키는 방법이다. 본 실험에서는 회분식 방식으로 진행하여 구리이온의 제거특성을 연구하였다.

구리의 제거실험은 정류기를 사용하여 정전압 모드로 수행되었고, 농축액 및 희석액의 농도, 유입유속, 공급전압의 3가지 운전변수에 따른 제거능을 실험하였다. 유입유속, 유입농도의 영향에 대한 실험에서 전압은 한계전류밀도의 80%에 해당하는 전압으로 진행하였다. 농축액의 농도에 따른 제거효율실험을 제외하고는 농축액과 희석액은 같은 농도로 하여 실험을 진행하였다. 유입유속은 0.8~3.2 L/min 사이에서 유량변화에 따른 제거효율을 측정하였다. 공급전압의 영향은 한계전류밀도의 60, 80, 100%에 대하여 실험하였다. 모든 실험에서 전극액의 부피는 4 L로 하였으며, 농축액과 희석액의 부피는 5 L로 하였다.

샘플의 채취는 분석에 필요한 최소한의 양으로 3 mL를 채취하였으며, 10분마다 샘플을 채취하여 전기전도도, 온도, 농도를 측정하였다. 실험운전의 종료시점은 구리의 농도가 방류수 수질기준인 3 mg/L 이하가 되었을 때 하였다.

2.4. 분석

구리농도의 측정에는 Varian사의 55B spectro AA Spectrophotometer가 사용되었으며, 분석 시료에 대해 3회 분석하여 재현성을 확인하였다. 전기전도도는 HANNA INSTRUMENTS(포르투갈)사의 HI9032를 사용하여 측정하여, 매 분석 시 12,860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 buffer solution으로 온도에 따라 검량선을 작성하여 측정하였다. 용액의 pH는 Orion사의 pH meter model 420A를 사용했으며, 매 분석 시 pH 4.01, 7.00, 10.01의 buffer solution으로 온도에 따른 검량선을 작성하고 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 한계전류밀도(Limiting current density, LCD)

전기투석 공정의 운전에서 지속적으로 전압을 높여주면, 일정 수준의 전압까지는 전류가 높아지지만, 그 이상의 전압에서는 전압을 높여주어도 전류가 높아지지 않는 상태가 된다. 이 상태에서는 희석액에 남아 있는 염이 거의 없어 막 표면에서 전류를 운반할 이온이 없는 상태다. 이 때 지속적으로 공급되는 기전력은 물분해 현상으로 이어져 전류를 소모하므로 전류효율이 저하된다. 막표면에서 물분해로 생성된 H^+ 와 OH^- 는 양이온막 표면에서는 pH를 감소시켜 막에 영향을 주고, 음이온막 표면에서는 pH를 증가시켜 다가이온의 수산화물로 침전을 야기해 막표면에 코팅되어 운

전을 불가능하게 할 수 있다. 이 지점을 한계전류밀도라 하며, 주어진 막의 조건에서 전기적인 저항을 최소로 해주고, 전류효율을 최대로 해 줄 수 있는 조건에서의 최대전류밀도로 정의된다. 따라서 전기투석기의 운전은 주어진 조건에서 측정되는 한계전류밀도, 즉, 물분해가 일어나는 조건 이하에서 운전되어야 한다(김경수 등, 2001; Sata, 2004; Strathmann, 2004).

전기투석기의 한계전류밀도는 전류(I)-전압(V) 관계 즉, I/V curve를 통해 측정할 수 있다. 일반적으로 I/V curve의 변곡점이 한계전류밀도를 나타낸다(Cowan and Brown, 1959). 한계전류밀도 이상의 전류에서는 전류가 증가함에 따라 전체 저항이 급격히 증가하는데, 이는 막의 탈염표면(desalting surface)에서 경계층의 두께가 증가하여 용액의 저항이 커지기 때문이다. 한계전류밀도에 영향을 주는 인자로는 유입유속, 이온농도, 막 간 간격 등이다(Tanaka, 2002, 2003).

한계전류밀도에 영향을 미치는 운전인자로 농도와 유입유속이 선택되었다. 농축액과 희석액은 같은 농도로 하였고, 회분식으로 실험을 진행하였다. 실험은 V-I법을 적용하여 공급전류를 0.05 A 단위로 증가시키면서 셀 전압을 측정하였다. 얻어진 그래프에서 변곡점에 해당하는 전류를 막의 유효면적으로 나누어 한계전류밀도를 계산하였다.

한계전류밀도에 유입농도의 영향을 측정하는 실험에서 유입유속은 1.6 L/min로 고정하였다. 농축액과 희석액의 농도는 같게 하여 구리의 농도를 100, 200, 300 mg/L로 변화시키면서 한계전류밀도를 측정하였다. Fig. 3은 농도에 따른 V-I 관계를 보여준다. 한계전류밀도 이상에서는 공급되는 전류에 대한 셀 전압의 증가율이 증가하였다. Fig. 3으로부터 도식적으로 계산된 한계전류밀도는 각각 100 mg/L에서 10.0 mA/cm^2 , 200 mg/L에서 16.2 mA/cm^2 , 300 mg/L에서 21.4 mA/cm^2 로 측정되었다. Fig. 4는 Fig. 3으로부터 측정된 한계전류밀도와 유입농도의 관계를 보여준다. 한계전류밀도는 유입농도에 따라 선형으로 증가한 경향을 보였다. 이것은 유입액의 농도가 증가할수록 membrane stack의 희석액이 통과하는 부분에서 막과 bulk solution 사이에 형성된 확산경계층에서 물질전달에 대한 driving force인 농도

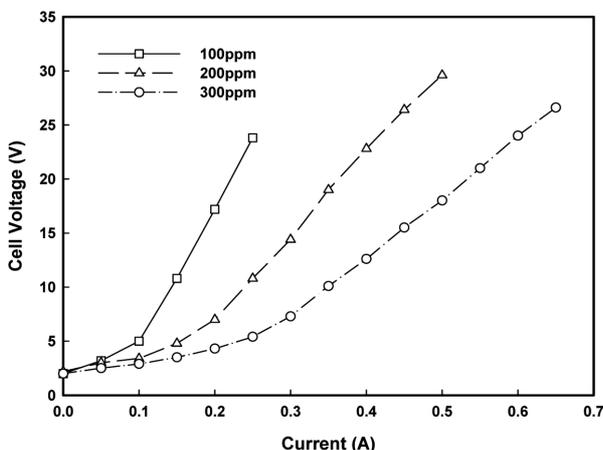


Fig. 3. V-I measurements at various Cu^{++} concentrations.

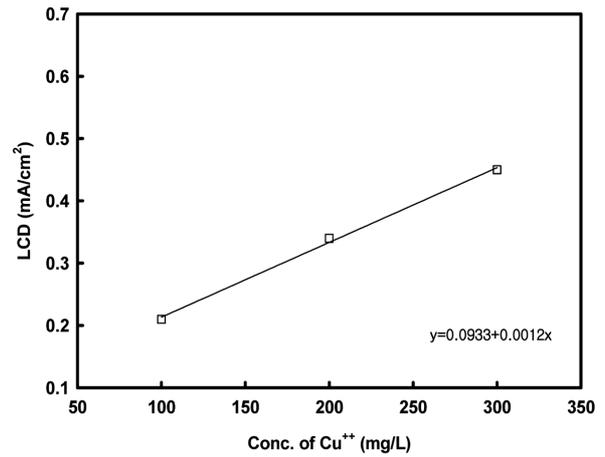


Fig. 4. Limiting current densities at various Cu^{++} concentrations.

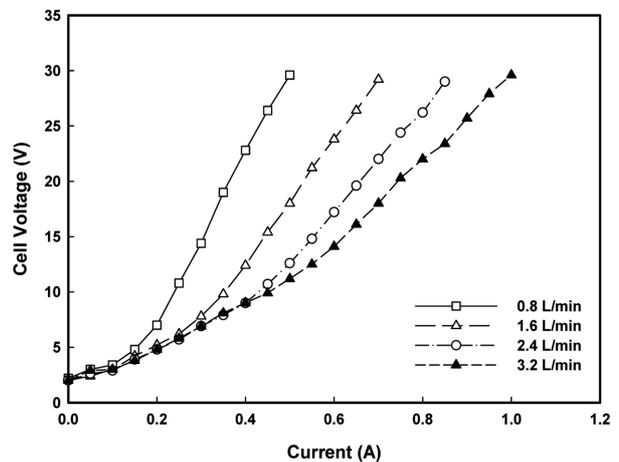


Fig. 5. V-I measurements at various flow rates.

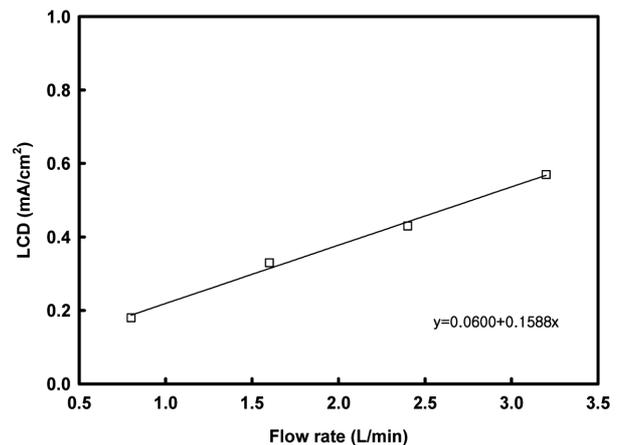


Fig. 6. Limiting current densities at various flow rates.

구배가 커져 이에 따라 한계전류밀도가 증가하였기 때문이다. 유입유속에 따른 한계전류밀도의 변화를 측정하는 실험은 농축액과 희석액의 초기농도를 200 mg/L로 고정하고 유입유속을 0.8, 1.6, 2.4, 3.2 L/min로 변화시키면서 공급전류에 따른 셀 전압을 측정하여 Fig. 5의 V-I 그래프를 얻었다. 그래프에서 나타나는 변곡점이 한계전류를 나타내는데

유입유속이 증가함에 따라 한계전류가 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 유입유속이 증가함에 따라서 확산경계층의 두께가 얇아지고, 그에 따라 막의 저항이 작아지고, 결과적으로 한계전류밀도가 커지기 때문이다. Fig. 5로부터 도식적으로 계산된 한계전류밀도는 각각 0.8 L/min에서 8.57 mA/cm², 1.6 L/min에서 16.2 mA/cm², 2.4 L/min에서 20.5 mA/cm², 3.2 L/min에서 27.1 mA/cm²로 측정되었다. Fig. 6은 유속에 따라 한계전류밀도가 선형으로 증가하는 것을 보여준다.

3.2. 농도의 영향

농도에 따른 구리의 제거 특성에 관한 실험은 유입농도 즉, 희석액의 초기농도와 농축액의 초기농도에 대한 영향으로 구분하여 수행되었다. 희석액의 초기농도 영향 실험은 유입유속을 1.6 L/min, 정전압을 7 V로 고정하고 농축액의 초기농도를 200 mg/L로 하여 실험하였다. 7 V는 한계전류밀도 조건에서 측정된 전압의 80%에 해당한다. 한계전류밀도 조건으로 운전할 시 물분해 현상으로 문제가 야기될 위험을 방지하고자 일반적으로 한계전류밀도보다 조금 낮은 조건으로 운전한다. 희석액의 초기농도는 100, 200, 300 mg/L로 변화시키면서 전기투석의 구리 제거효율을 측정하였다. Fig. 7은 희석액의 농도 변화에 따른 구리의 제거효율을 나타내었다. 희석액의 초기농도가 증가함에 따라 목표농도에 도달하는 시간은 길어져 희석액 농도가 100 mg/L일 때는 60분경, 200 mg/L일 때는 70분경, 300 mg/L일 때는 85분경에 목표 농도 이하로 구리가 희석되었다. 목표농도에 도달하는 시간은 희석농도에 직선적으로 비례하는 경향을 보였다.

농축액 초기농도의 영향에 대한 실험에서는 희석액의 초기농도를 200 mg/L 고정하였고, 그 밖의 운전조건은 희석액의 농도변화 실험과 같았다. 농축액의 초기농도를 100과 300 mg/L로 변화시키면서 구리의 제거효율을 측정하였다. Fig. 8은 농축액의 농도 변화에 따른 희석액의 구리 제거를 나타낸다. 농축액 초기농도가 100 mg/L일 때와 300 mg/L일 때 각각 85분과 80분경에 목표 농도 이하로 구리가 희석되었다. 농축액의 높은 초기농도는 운전시작 40분까지는 구리의 제거속도가 높았지만, 이후 제거속도는 완화되어 두 농축액에 대하여 거의 같은 제거속도를 보였다. 두 농도에 대한 목표 수질에 도달하는 시간차이는 5분으로 그리 크지 않았다. 이는 300 mg/L의 경우 운전초기 농축조에서 전기전도도를 상승시켜 원활한 전기흐름을 주기 때문이며, 100 mg/L의 경우 40분의 운전시간 이후에는 농축액에서 이온의 농도가 상당히 증가하여 농축액의 이온농도에 따른 전기흐름의 차이가 감소되고 또한 희석액에서의 낮은 이온농도가 큰 저항으로 작용하여 전기흐름에 작용하는 농축액의 농도영향을 상쇄시키기 때문으로 사료된다. 전기투석에서의 농축액은 전기투석 운전 시 농축조의 전기전도도를 상승시켜 초기에 원활한 전류흐름을 주기 위하여 일정 농도의 용액으로 하여 실험을 진행하는 것이 일반적이며, 그 농도는 희석액의 구리 제거능에 큰 영향이 없었다.

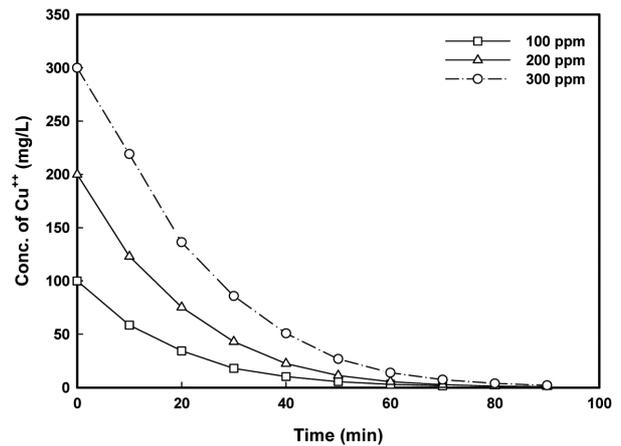


Fig. 7. Effect of diluate concentration on Cu⁺⁺ removal.

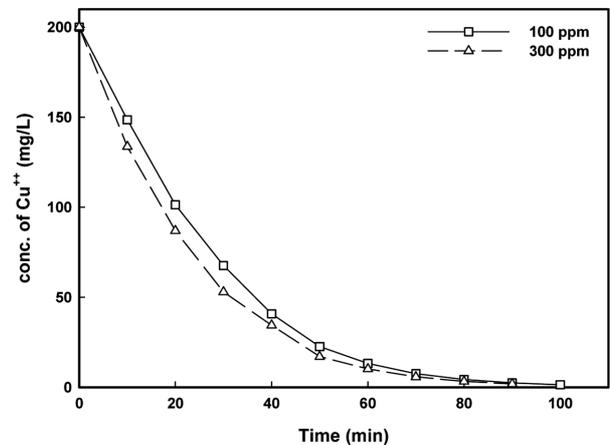


Fig. 8. Effect of concentrate concentration on Cu⁺⁺ removal from diluate.

3.3. 유입유속의 영향

유입유속의 변화에 따른 구리의 제거실험은 희석액과 농축액의 농도를 200 mg/L로, 정전압을 7 V로 고정하고 유입유속을 0.8, 1.6, 2.4, 3.2 L/min으로 변화시켰다. Fig. 9는 유입유속의 변화에 따른 구리의 제거효율을 나타낸다. 유입유속이 3.2와 2.4 L/min일 때는 모두 60분경에 목표 농도 이하로 되었으며, 1.6 L/min일 때는 70분경, 그리고 0.8 L/min일 때는 약 100분경에 목표 농도 이하로 구리가 제거되었다.

유입유속이 증가하면 membrane stack의 희석액부분과 농축액부분에서 물질전달이 일어나는 막 경계층의 두께가 얇아져 물질전달의 저항의 감소로 물질전달의 속도가 빨라진다. 유입유속이 0.8 L/min에서 1.6 L/min로 증가함에 따라 제거속도의 증가가 확인된다. 그러나 1.6 L/min에서 2.4 L/min으로 증가 시 제거속도의 증가는 상당히 완화되었고, 2.4와 3.2 L/min에서의 제거속도는 거의 유사함을 보여준다. 이는 낮은 유입유속에서는 막 경계층의 두께증가가 제거속도에 미치는 영향이 크지만, 높은 유입유속에서는 stack에서의 체류시간 감소가 막 경계층의 두께감소의 영향을 상쇄시키는 것으로 사료된다. Fig. 10은 초기농도가 농

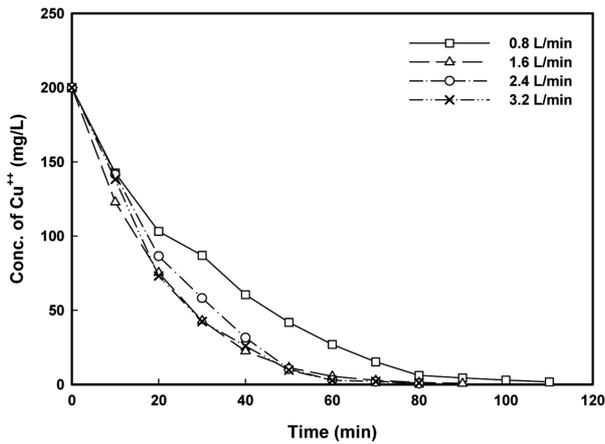


Fig. 9. Effect of flow rate on Cu⁺⁺ removal from diluate.

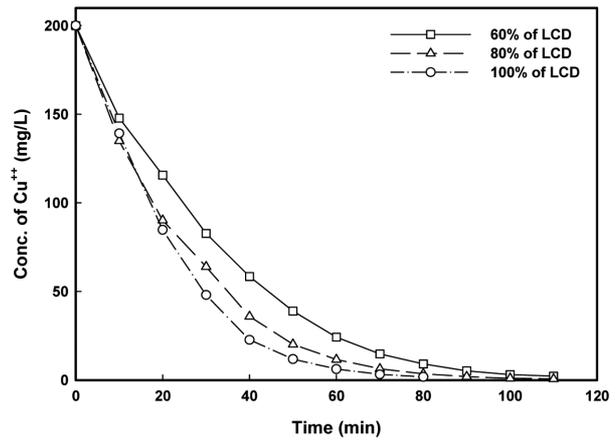


Fig. 11. Effect of voltage on Cu⁺⁺ removal from diluate.

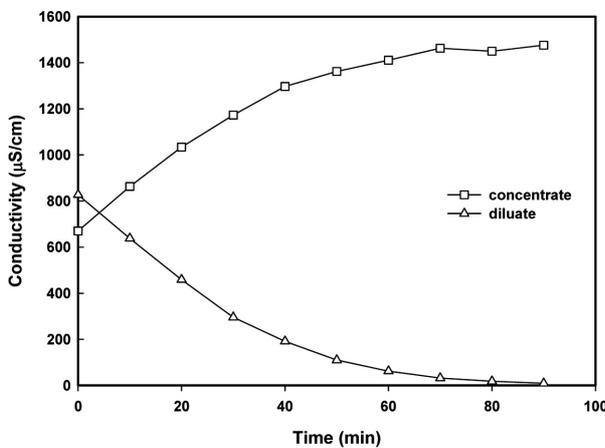


Fig. 10. Variation in conductivities of diluate and concentrate during the experiment.

축액 100 mg/L, 희석액 200 mg/L에서 운전한 경우 두 용액의 전기전도도 변화를 나타낸다. Fig. 10은 유입유속 1.6 L/min, 희석액과 농축액의 초기농도는 각각 200과 100 mg/L로 구리제거성능 실험 시 희석액과 농축액의 전기전도도 변화를 측정하는 것이다. 희석액의 전도도 변화는 Fig. 7의 희석액 초기농도 200 mg/L에 대한 결과와 같이 70분경에 목표농도에 도달하는 것으로 판단된다. 따라서 전기투석기의 운전 시 분석기기를 이용한 농도분석과 더불어 현장에서 짧은 시간에 바로 측정을 가능하게 하는 공정분석용으로 전기전도도의 적용이 추천된다.

3.4. 운전전압의 영향

전압의 변화에 따른 구리의 제거실험은 희석액과 농축액의 초기농도를 200 mg/L로, 유입유속을 1.6 L/min으로 고정하고 정전압을 한계전류밀도에 해당하는 전압의 60, 80, 100%로 변화시키면서 실험하였다. Fig. 11은 정전압의 변화에 따른 구리의 제거효율을 나타낸다.

전압이 한계전류의 60%일 때는 100분경, 한계전류의 80%일 때는 80분경, 100%일 때는 70분경에 목표 농도 이하로 구리가 제거되었다. 전압을 60%에서 80%로 증가시켰을 때 목표 농도에 도달하는 시간 감소는 20분이었지만, 80%에

서 100%로 증가시켰을 때에는 시간 감소가 10분으로 둔화되었다. 한계전류밀도 조건에서 운전이 물분해에 의한 전력손실, 막 오염, 강산성상태로 인한 막손상 등을 우려하고 분리속도를 고려한다면 한계전류밀도의 80~90% 범위에서 운전하는 것이 효율적 운전이라 할 수 있다.

4. 결론

고농도의 구리를 함유하는 폐수의 처리에 전기투석법의 적용 가능성을 평가하기 위하여 전기투석공정의 운전인자 중 유입농도, 운전전압, 그리고 유속이 구리의 제거효율에 미치는 영향을 회분식 실험으로 측정하여 결론은 다음과 같이 요약된다.

- 1) 희석액의 초기농도와 목표농도 도달시간 간에는 정비례 관계를 보였으며, 농축액의 초기농도가 제거속도에 미치는 영향은 거의 없었다.
- 2) 유입유속의 증가는 확산경계층의 두께를 감소시킴으로써 제거속도를 증가시켰지만, 일정속도 이상의 유입유속에서는 Cu 이온 제거속도에 미치는 유속의 영향이 미미하였다. 이는 유속증가로 인한 막 내부에서의 용액의 체류속도 감소에 기인하는 것으로 사료된다.
- 3) 실험 전기투석모듈에서 0~300 mg/L의 Cu 이온을 제거하는 최적 운전조건으로 유입유속 2.4 L/min, 한계전류밀도의 80~90%에 해당하는 운전전압이 권장된다.

사 사

이 논문은 2010학년도 동의대학교 교내연구비(과제번호 2010AA186)에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김경수, 김석환, 정일현(2001). 전기투석장치에 의한 Ni 도금 폐수의 처리 특성. *한국환경분석학회지*, 4(4), pp. 241-249.
- 김금용, 백주현(2009). 이상일, 부유 및 부착성장 질화균에 미치는 구리 독성의 영향. *대한환경공학회지*, 31(10), pp. 855-864.

- 김영철(2007). 특정수질유해물질 구리(Cu)의 수계에서의 현황 및 관리방향. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 440-447.
- 양재규, 이남희, 이승목(2008). pH를 달리하여 제조한 3가철 침착 활성탄에 의한 구리 제거특성 평가. *대한환경공학회지*, **30**(3), pp. 345-351.
- 윤영상, 최순범, 원성욱(2004). 중금속 폐수처리를 위한 기술개발 현황 및 장단점 분석. *DICER TechInfo Part 1*, **3**(7), pp. 68-85.
- Cowan, D. A. and Brown, J. H. (1959). Effect of Turbulent on Limiting Current in Electrodialysis Cells. *Ind. Eng. Chem.*, **51**, pp. 1445-1448.
- Martin, C. J., Kartinen Jr. E. O., and Condon, J. (1995). Examination of processes for multiple contaminant removal from groundwater. *Desalination*, **102**, pp. 35-45.
- Sata, T. (2004). *Ion Exchange Membranes: Preparation, Characterization, Modification and Application*, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, pp. 215-250.
- Strathmann, H. (2004). *Ion Exchange Membrane Separation Processes, Membrane Science and Technology Series, 9*, Elsevier B. V., Amsterdam, Netherlands, pp. 147-184.
- Tanaka, Y. (2002). Current Density Distribution, Limiting Current Density and Saturation Current Density in an Ion-exchange Membrane Electrodialyzer. *J. Membrane Sci.*, **210**, pp. 65-75.
- Tanaka, Y. (2003). Concentration Polarization in Ion-exchange Membrane Electrodialysis-the Events Arising in a Flowing Solution in a Desalting Cell. *J. Membrane Sci.*, **216**, pp. 149-164.