CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 17, No. 4, December 2011, pp. 363~369

청정환경기술

전기투석에 의한 암모니아성질소의 제거 시 운전인자의 영향

윤태경*, 이강춘†, 정병길, 한영립‡, 성낙창††

동의대학교 환경공학과, †화학공학과
614-714 부산광역시 부산진구 엄광로 995
‡동아대학교 환경문제연구소, ††환경공학과
604-714 부산광역시 사하구 하단동 낙동대로 550번길

(2011년 10월 13일 접수; 2011년 10월 26일 수정본 접수; 2011년 10월 27일 채택)

Effects of Operating Parameters on the Removal Performance of Ammonia Nitrogen by Electrodialysis

Tae-kyung Yoon*, Gang-choon Lee†, Byung-gil Jung, Young-rip Han‡, and Nak-chang Sung††

Department of Environmental Engineering and †Chemical Engineering, Dong-eui University,
995 Eomgwangno, Busanjin-gu, Busan 614-714, Korea
‡Environmental Problem Research Institute and ††Department of Environmental Engineering, Dong-A University,
550 Nakdongdearo, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

(Received for review October 13, 2011; Revision received October 26, 2011; Accepted October 27, 2011)

요 약

고농도의 암모니아성질소를 함유하는 폐수의 처리에 전기투석공정의 적용성이 실험적으로 평가되었다. 처리 성능은 전기투석공정의 운전인자 중 유입농도, 운전전압, 그리고 유속이 암모니아성질소의 제거효율에 미치는 영향으로 측정되었다. 한계전류밀도는 유입농도와 유입유속이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였고, 유입농도에 따라 목표농도에 도달하는 시간은 직선적인 비례관계를 보였다. 상대적으로 큰 암모니아성질소의 이온당량전도도와 이온이동도로 인하여 유입유속의 증가는 제거속도를 지속적으로 증가시켰다. 또한 운전전압의 증가에 따라 제거속도는 증가하였다. 본 연구에 사용된 전기투석모듈에서 고농도의 암모니아성질소를 제거하는 운전조건으로 유입유속은 3.2 L/min, 운전전압은 한계전류밀도에 해당하는 전압의 80~90%가 추천된다.

주제어 : 전기투석, 암모니아성질소, 한계전류밀도, 폐수처리

Abstract : To evaluate the feasibility of electrodialysis for ammonia nitrogen removal from wastewater, the effects of operating parameters such as diluate concentration, applied voltage and flow rate on the removal of ammonia nitrogen were experimentally estimated. The removal rate was evaluated by measuring the elapsed time for ammonia nitrogen concentration of diluate to reach 20 mg/L. Limiting current density (LCD) linearly increased with ammonia nitrogen concentration and flow rate. The elapsed time was linearly proportional to initial concentration of diluate. Due to relatively large equivalent ion conductivity and ion mobility of ammonia nitrogen, the removal rate increased consistently with flow rate. Increase in the applied voltage gave positive effect to removal rate. From the operation of the electrodialysis module used in this research, the flow rate of 3.2 L/min and 80~90% of applied voltage for LCD are recommended as the optimum operating condition for the removal from high concentrate ammonia nitrogen solution.

Keywords : Electrodialysis, Ammonia nitrogen, Limiting current density, Wastewater treatment

1. 서 론

산업화와 인구의 도시집중화에 의해 발생되는 폐수에 의해 하천, 호소 등의 방류수역의 오염이 증가하게 되었으며 이에 부영양화의 방지 및 친수공간의 확보, 수자원의 안정적 공급을 위하여 방류수의 수질규제가 시급한 상황이다. 특히 우리나라는 지표수에 대한 의존도가 높아 부영양화에 의한 수질생태계의 파괴는 수자원이용에 있어서 큰 문제점으로 부각되어 부영양화의 주요 원인물질인 질소와 인에 대해 방류수 기준이 강화되었다. 총 질소(T-N)의 경우 방류수 수질기준이 60 mg/L에서

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: tkyoon@deu.ac.kr

20 mg/L로 강화되었다. 이에 따라 고농도의 질소를 함유하는 하폐수에 대한 처리에 많은 투자가 이루어지고 있는 실정이다.

질소는 크게 유기질소와 무기질소로 나눌 수 있다. 그리고 무기질소의 대표적인 물질이 질산성질소와 암모니아성질소이다. 암모니아성질소는 축산폐수, 생활폐수, 매립지의 침출수 등에 많이 함유되어 있고, 하수처리장에 유입되는 질소의 형태 중 가장 많은 비중을 차지하며 인체에 직접적인 영향을 미치기보다는 오염된 수계에서 부영양화를 촉진시켜 어류의 집단폐사에 주요한 원인으로 작용하고 있으며, 질산화과정에서 대량의 산소를 소모하고, 염소소독 시 염소를 다량으로 소비한다. 우리나라는 암모니아성질소에 대한 먹는물 수질기준을 0.5 mg/L 이하로 관리하고 있다.

수중의 암모니아성질소를 제거하는 방법으로는 전염소처리, 공기탈기, 화학적 침전, 이온교환, 생물학적처리 등이 있다[1-9]. 전염소처리는 trihalomethanes, haloacetic acids 등의 발암성, 변이원성으로 알려진 반응부산물을 생성할 가능성이 있어 그 처리에 큰 문제점을 안고 있다. 화학적 침전법은 응집제의 사용과 침전슬러지의 후처리가 필요하고, 이온교환법은 부산물 생성이 없고 수온에 대한 영향이 거의 없지만 주기적인 화학적 재생을 위해 많은 양의 화학물질이 필요하고 재생폐액이 발생한다는 단점이 있다.

최근 오염물질을 회수하거나, 처리된 물을 재사용함으로써 환경오염을 최소화하는 청정기술인 무방류 처리 시스템 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 종전의 사후 처리 방식에서 벗어나 오염물질의 발생을 사전에 예방하는 방식으로 생산기술 자체를 청정 생산기술로 개선하거나, 발생된 오염물질을 적정하게 처리하여 재활용함으로써 오염물질의 배출량을 최소화하고자 하는 기술이다. 이러한 기술들 중 하나인 전기투석법은 다른 공정에 비하여 설치면적과 공간을 작게 차지하고, 설치 및 운전이 용이하고, 폐수의 성상변화에 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[10].

전기투석은 전기화학적인 전위차를 이용하여 이온교환막을 통하여 이온 물질이 투과하는 공정으로 환경 분야에서는 물의 연수화공정, 질산성질소 제거공정, 도금폐수 중 유가금속의 회수공정, 중금속 제거공정, 원자력발전소의 일차 냉각계통에서 발생하는 방사선물질 제거공정, 정유폐액의 탈염공정, 정수처리공정, 중수도 공정 및 고도정수 처리공정 등에 적용된다. 또한 식품산업에서는 아미노산이나 유기산의 분리정제공정, 유가공품 제조업의 탈염고정, 식염제조공정 유장(cheese whey)의 탈염, 당의 정제과정에서의 탈색공정 등 최종제품을 얻기 위한 정제과정으로도 활용되고 있다. 그리고 전자산업이나 자동차산업에서의 초순수 제조공정, 철강 산업에서 금속이나 산 회수공정, 의약산업의 최종제품의 분리정제공정 등에서도 전기투석 공정의 안정성이 입증되면서 활용 폭을 넓혀가고 있다[11,12].

전기투석법은 이온교환막의 성질이나 운전조건뿐만 아니라 이온에 따라서도 투과속도가 다르다. 이온교환막을 통한 이온의 투과성은 선택투과특성이나 이온종의 특성 및 유입용액의 농도, pH, 운전온도, 유량, 전류밀도 등과 같은 운전조건에 의존하며, 이온교환막을 통한 선택적 이온투과는 주로 특정 이온종에 대한 선택특성, 유입용액의 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 물성이 요구된다.

본 연구에서는 고농도의 암모니아성질소를 함유하는 폐수의 처리를 목적으로 고농도의 암모니아성질소의 제거에 전기투석법의 적용성을 실험적으로 평가하였다. 전기투석 운전 시 암모니아성질소의 농도, 운전전압, 유속 등의 운전변수가 제거효율에 미치는 영향을 측정하고, 최적 운전조건에 대한 검토를 수행하여 현장 적용성을 평가해 보고자 한다.

2. 실 험

2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 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 내화학성이 좋은 아크릴로 제작되었고 부피는 6 L이다. 희석액(diluate)은 초기 폐수가 희석조에 유입되어 회분식 운전으로 양이온과 음이온이 제거되는 용액을 칭하고, 농축액(concentrate)은 희석조에서 제거된 이온들이 농축조에 축적되는 용액을 칭한다. 그리고 최대 유속이 17 L/min인 내화학성 magnetic pump를 사용하여 인공폐수 및 전극액을 이송하였으며, 유량계를 사용하여 유량을 조절 및 확인하였다. 또한 DC 0~35 V, 0~10 A, SCR 정류방식의 정류기(신일전자디지털(주), 한국)를 사용하여 전류를 공급하였다. Figure 1은 사용된 전기투석 장치의 개략도를 보여준다.

Membrane stack은 일본 AGC Engineering Co., Ltd.의 CH-0 모델을 사용하였다. Stack은 모두 10개의 cell pairs, 두개의 극, 그리고 3장의 양이온 교환막과 그 밖의 셀 프레임으로 구성되

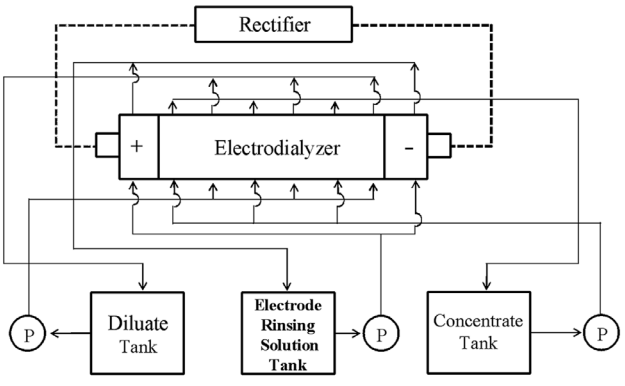

Figure 1. Schematic diagram of electrodialysis apparatus.

Table 1. Specifications of ion exchange membrane and membrane stack

	Cation exchange membrane	Anion exchange membrane
Model name	Selemion CMV	Selemion AMV
Type	Strong acidic cation permeable membrane	Strong basic anion permeable membrane
Thickness (μm)	130	130
Counterion	Na^+	Cl^-
Membrane effective area	0.021 m^2/Sheet	
Membrane size	160 mm × 280 mm	
Space between membranes	0.75 mm	
Cell pairs	10	

어있다. 하나의 cell pair는 양이온 교환막 1장, 음이온 교환막 1장, 그리고 셀 프레임 2장으로 구성된다. Table 1은 실험에 사용된 membrane과 stack에 대한 사양을 보여준다.

2.2. 실험방법

다양한 농도의 암모니아성질소 용액과 전극액을 제조하기 위하여 Junsei Chemical Co.의 특급시약 NH_4Cl과 Na_2SO_4가 사용되었다. 처리수로 사용될 암모니아성질소 용액은 매립지 침출수 및 축산폐수의 T-N 농도를 기준으로 500, 1,000, 2,000, 3,000 mg NH_4^+-N/L의 4가지 농도로 제조하여 사용하였다. 용액은 미국 Barnstead사의 Ultrapure Water System을 사용하여 전도도는 0.054 μs/cm 이하에서 resistivity값이 안정한 상태인 18.1~18.2 MΩ-cm 범위의 초순수를 이용하여 제조되었다. 모든 실험에 전극액은 4 wt% Na_2SO_4 수용액을 사용하였다.

회분식 실험의 경우 유입용액이 희석조에서 전기투석기를 순환하며 희석되고, 암모니아성질소를 함유한 용액이 이온교환막을 통과하여 농축조로 모이게 된다. 연속식은 유입액과 유출액의 순환 없이 전기투석기를 one pass로 통과시킨다. 본 실험은 회분식 방식으로 진행하여 암모니아이온의 제거특성을 연구하였다.

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. 모든 실험에서 농축액과 희석액은 같은 농도로 하여 실험을 진행하였다. 유입유속은 0.4~3.2 L/min 사이에서 유량변화에 따른 제거효율을 측정하였다. 공급전압의 영향은 한계전류밀도의 60, 80, 100%에 해당하는 전압에 대하여 실험하였다. 전극액은 4 L로 실험을 하였으며, 초기 농축액과 희석액은 5 L로 하였다.

샘플의 채취는 분석에 필요한 최소한의 양으로 3 mL를 채취하였으며, 15분마다 샘플을 채취하여 전기전도도, 온도, 농도를 측정하였다. 실험운전의 종료시점은 암모니아성질소의 농도가 총 질소에 대한 방류수 수질기준인 20 mg/L 이하가 되었을 시점으로 하였다.

2.3. 분석

희석액과 농축액의 암모니아성질소 농도는 Varian사의 UV-Visible Spectrophotometer Cary 50을 사용하여 수질오염공정시험방법으로 분석되었다. 전기전도도의 측정은 HANNA INSTRUMENTS(포르투갈)사의 HI9032를 사용하였으며, 매 분석 시 12,860 μS/cm의 buffer solution으로 검량선을 작성하여 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 남아있는 염이 거의 없어 막표면에서 전류를 운반할 이온이 없는 상태다. 이 때 지속적으로 공급되는 기전력은 물분해 현상으로 이어져 전류를 소모하고, 전류효율이 저하된다. 막표면에서 물분해로 생성된 H^+와 OH^-는 양이온막 표면에서는 pH를 감소시켜 막에 영향을 주고, 음이온막 표면에서는 pH를 증가시켜 다가이온의 침전을 야기해 운전을 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 운전되어져야 한다[11-13].

전기투석기의 한계전류밀도는 전류(I)-전압(V) 관계 즉, 1/I-V/I curve를 통해 측정할 수 있다. 일반적으로 1/I-V/I curve의 변곡점이 한계전류밀도를 나타낸다[14]. 한계전류밀도 이상의 전류에서는 전류가 증가함에 따라 전체 저항이 급격히 증가하며, 이는 막의 탈염표면(desalting surface)에서 경계층의 두께가 증가하여 용액의 저항이 커지기 때문이다. 한계전류밀도에 영향을 주는 인자로는 유입유속, 이온농도, 막간 간격 등이 있다[15,16].

한계전류밀도에 영향을 미치는 운전인자로 농도와 유입유속이 선택되었다. 농축액과 희석액은 같은 농도로 하였고, 회분식으로 실험을 진행하였다. 실험은 V-I법을 적용하여 공급전류를 0.1 A 단위로 증가시키면서 셀 전압을 측정하는 방식으로 진행하였다. 그려진 그래프의 두 접선의 교점에 해당하는

전류가 한계전류가 되며, 그것을 막의 유효면적으로 나누어 한계전류밀도를 계산하였다.

한계전류밀도에 유입농도의 영향을 측정하는 실험에서 유입유속은 1.6 L/min로 고정하였다. 농축액과 희석액의 농도는 같게 하여 암모니아성질소의 농도를 500, 1,000, 2,000, 3,000 mg/L로 변화시키면서 한계전류밀도를 측정하였다. Figure 2는 농도에 따른 V-I 관계를 보여준다. 한계전류밀도 이상에서는 공급되는 전류에 대한 셀 전압의 기울기가 증가한다. Figure 3은 Figure 2로부터 측정된 한계전류밀도와 유입농도와의 관계를 보여준다. 한계전류밀도는 유입농도에 따라 선형으로 증가한 것을 보여 준다. 이것은 유입액의 농도가 증가할수록 membrane stack의 희색액이 통과하는 부분에서 막과 bulk solution 사이에 형성된 확산경계층에서 물질전달에 대한 driving force인 농도구배가 커지고 이에 따라 한계전류밀도가 증가하였기 때문이다. Figure 2로부터 도식적으로 계산된 한계전류밀도는 각각 500 mg/L에서 6.52 mA/cm^2, 1,000 mg/L에서 13.3 mA/cm^2, 2,000 mg/L에서 24.7 mA/cm^2, 3,000 mg/L에서 36.2 mA/cm^{2}로 측정되었다.

유입유속에 따른 한계전류밀도의 변화를 측정하는 실험은 농축액과 희석액의 초기농도를 1,000 mg/L로 고정하고 유입유속을 0.8, 1.6, 2.4, 3.2 L/min로 변화시키면서 공급전류에 따른 셀 전압을 측정하여 Figure 4의 V-I 그래프를 얻었다. Figure 4로부터 도식적으로 계산된 한계전류밀도는 각각 0.8 L/min에서 8.57 mA/cm^2, 1.6 L/min에서 13.3 mA/cm^2, 2.4 L/min에서 17.6 mA/cm^2, 3.2 L/min에서 21.9 mA/cm^{2}로 측정되었다. Figure 5는 Figure 4로부터 측정된 한계전류밀도와 유입농도와의 관계를 보여준다. 유입유속이 증가함에 따라 한계전류밀도가 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 유입유속이 증가함에 따라서 확산경계층의 두께가 얇아지고, 그에 따라 막의 저항이 작아지고, 결과적으로 한계전류밀도가 커지는 것을 보여준다.

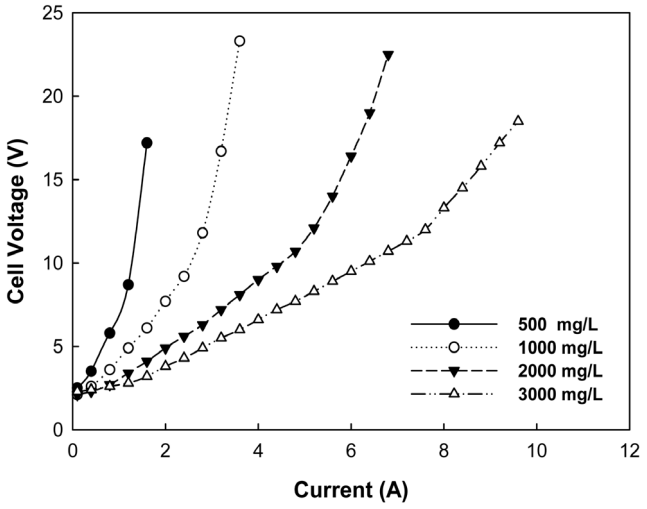

Figure 2. V-I measurements at various NH_4^+-N concentrations.

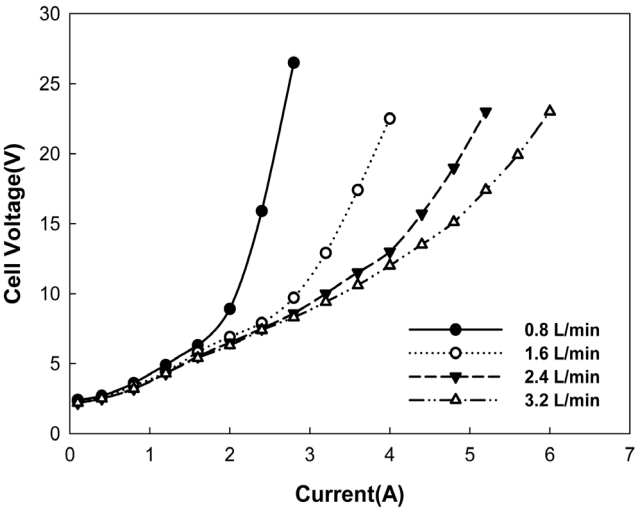

Figure 4. V-I measurements at various flow rates.

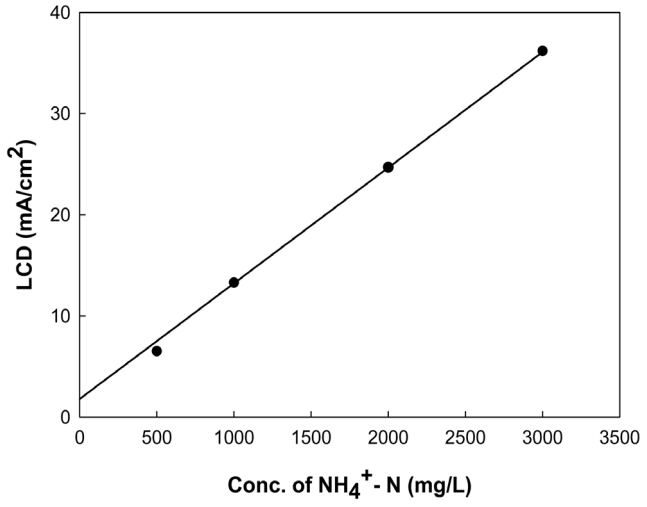

Figure 3. Limiting current densities at various NH_4^+-N concentrations.

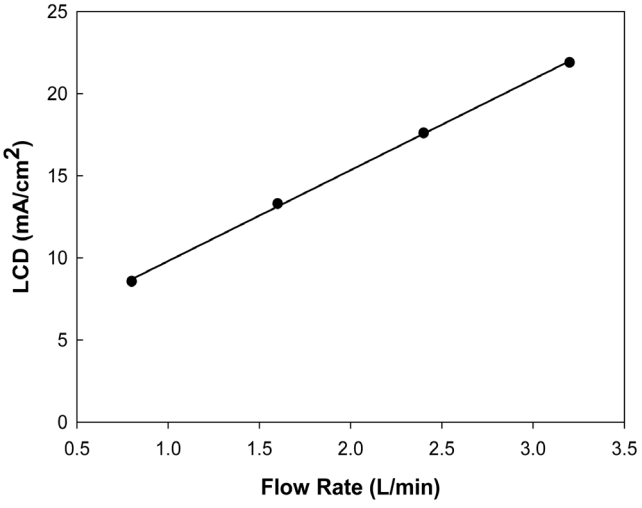

Figure 5. Limiting current densities at various flow rates.

3.2. 농도의 영향

농도에 따른 암모니아성질소의 제거특성은 유입농도 즉, 희석액의 초기농도 변화에 따른 제거성능으로 평가되었다. 실험은 유입유속을 1.6 L/min, 정전압을 9.6 V로 고정하고 농축액의 초기농도를 1,000 mg/L로 하여 행하였다. 전기투석에서의 농축액은 전기투석 운전 시 농축조의 전기전도도를 상승시켜 초기에 원활한 전류흐름을 주기 위하여 일정 농도의 용액으로 하여 실험을 진행하는 것이 일반적이며, 그 농도는 희석액의 제거속도에 큰 영향이 없었다[17]. 따라서 본 연구에서는 농축액의 초기농도를 일정하게 하였다. 그리고 정전압 9.6 V는 한계전류밀도 조건에서 측정된 전압의 80%에 해당한다. 한계전류밀도 조건으로 운전할 시 물분해 현상으로 야기될 위험을 방지하고자 일반적으로 한계전류밀도 보다 조금 낮은 조건으로 운전한다.

희석액의 암모니아성질소 초기농도를 500, 1,000, 2,000 mg/L로 변화시키면서 암모니아성질소의 제거효율을 측정하였다. Figure 6은 희석액의 농도 변화에 따른 암모니아성질소의 제거효율을 나타낸다. 희석액의 초기농도가 증가함에 따라 목표농도에 도달하는 시간은 길어져 희석액 농도가 500 mg/L일 때는 40분경, 1,000 mg/L일 때는 52분경, 2,000 mg/L일 때는 57분경에 목표농도 이하로 암모니아성질소가 희석되었다. 목표농도에 도달하는 시간은 희석액 농도의 증가에 선형적으로 비례하지 않고 고농도일수록 목표농도에 도달하는 시간의 증분은 감소하였다.

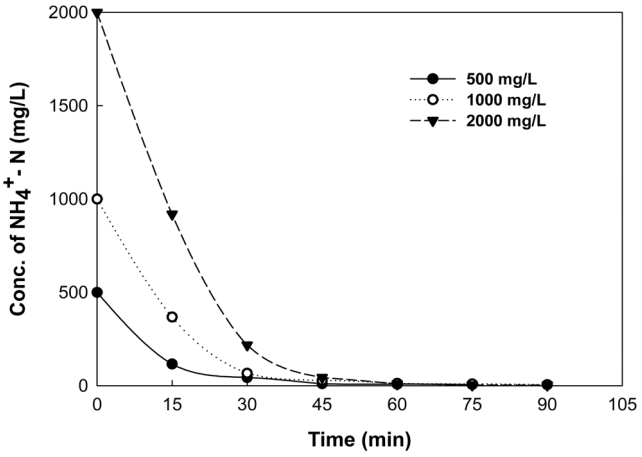

Figure 6. Effect of diluate concentration on NH_4^+-N removal.

Figure 7은 초기농도가 농축액 1,000 mg/L, 희석액 2,000 mg/L에서 운전한 경우 두 용액의 전기전도도 변화를 나타낸다. 희석액의 전도도 변화는 Figure 7의 희석액 초기농도 1,000 mg/L에 대한 결과와 같은 시간에 목표농도에 도달하는 것으로 판단된다. 따라서 전기투석기의 운전 시 분석기기를 이용한 농도분석과 더불어 현장에서 짧은 시간에 바로 측정을 가능하게 하는 공정분석용으로 전기전도도의 적용이 추천된다.

3.3. 유입유속의 영향

유입유속의 변화에 따른 암모니아성질소의 제거실험은 희석액과 농축액의 농도를 1,000 mg/L로, 정전압을 9.6 V로 고정하고 유입유속을 0.4, 0.8, 1.6, 3.2 L/min으로 변화시켰다. Figure 8은 유입유속의 변화에 따른 암모니아성질소의 제거효율을 나타낸다. 유입유속이 3.2 L/min일 때는 35분경에 목표농도 이하로 되었으며, 1.6 L/min일 때는 52분경, 0.8 L/min일 때는 55분경, 그리고 마지막으로 0.4 L/min일 때는 75분경에 목표농도 이하로 암모니아성질소가 제거되어, 제거속도는 유입유속의 증가에 따라 지속적으로 빨라졌다. 이것은 유입유속이 증가하면 membrane stack의 희석액 부분과 농축액 부분에서 물질전달이 일어나는 막 경계층의 두께가 얇아져 물질전달 저항의 감소로 물질전달의 속도가 빨라지기 때문으로 해석된다.

하지만 Lee and Lee[17]는 동일한 시스템으로 질산성질소를 제거하는 실험연구에서 낮은 유입유속에서는 막 경계층의 두께증가가 제거속도에 미치는 영향이 크지만, 높은 유입유속에서는 stack에서의 체류시간 감소가 막 경계층의 두께감소의 영향을 상쇄시킨다는 결과를 도출했다. 그러나 암모니아성질

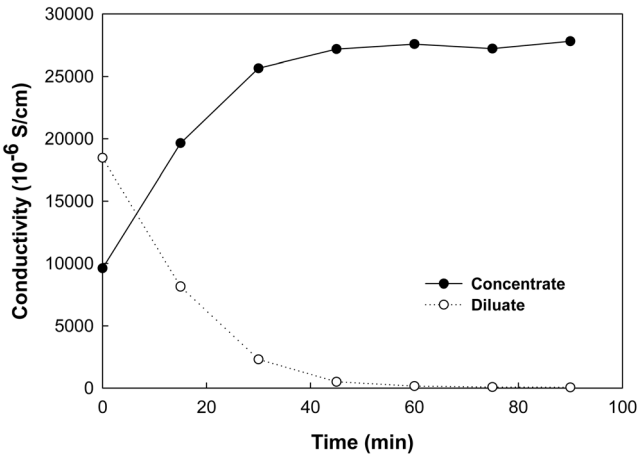

Figure 7. Conductivity change of diluate and concentrate during operation.

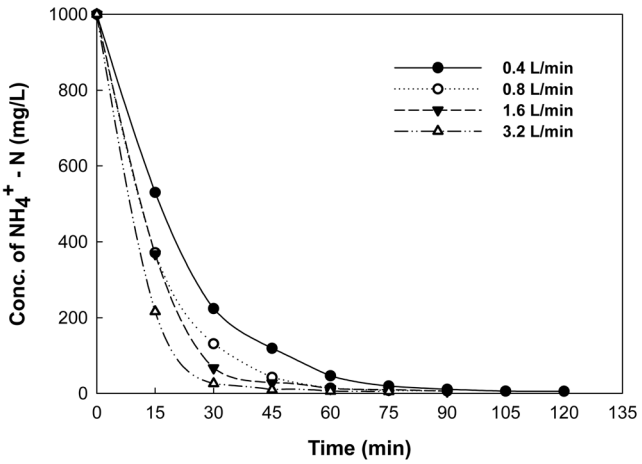

Figure 8. Effect of flow rate on NH_4^+-N removal from diluate.

Table 2. Ionic properties at infinite dilution in aqueous solution at 25 ℃[18]

Ion	Equivalent ion conductivity [$cm^2/(\Omega \cdot eq)$]	Ion mobility [$cm^2/(V \cdot sec)$]
H^+	349.8	3.625×10^{-3}
K^+	73.5	7.619×10^{-4}
Na^+	50.1	5.193×10^{-4}
NH_4^+	73.4	7.610×10^{-4}
OH^-	198	2.050×10^{-3}
Cl^-	76.3	7.912×10^{-4}
NO_3^-	71.4	7.404×10^{-4}

소의 경우 제거속도는 유입유속의 증가에 따라 지속적으로 빨라졌다. 이것은 Table 2에서 제시한 암모니아성질소와 질산성질소의 당량이온전도도(equivalent ion conductivity)와 이온이동도(ion mobility)로 해석될 수 있다. 전기장의 존재에서 이온의 확산 즉, 이동속도는 당량 이온전도도와 이온이동도에 따라 증가한다[18,19]. Table 2에서와 같이 암모니아성질소의 당량이온전도도와 이온이동도는 질산성질소에 비해 크다. 따라서 질산성질소의 실험에서 나타난 체류시간 감소의 영향이 암모니아성질소 시스템에서는 미약하여 유입유속의 증가에 따라 제거속도가 지속적으로 증가하는 것으로 해석된다.

3.4. 전압의 영향

전압의 변화에 따른 암모니아성질소의 제거실험은 희석액과 농축액의 초기농도를 1,000 mg/L로, 유입유속을 1.6 L/min으로 고정하고 정전압을 한계전류밀도에 해당하는 전압의 60, 80, 100%로 변화시키면서 실험하였다. Figure 9는 정전압의 변화에 따른 암모니아성질소의 제거효율을 나타낸다.

전압이 한계전류의 60%일 때는 65분경, 한계전류의 80%일 때는 52분경, 100%일 때는 40분경에 목표농도 이하로 암모니아성질소가 제거되었다. 전압을 60%에서 100%로 증가시킴에 따라 제거속도는 지속적으로 증가하였다. 한계전류밀도 조건

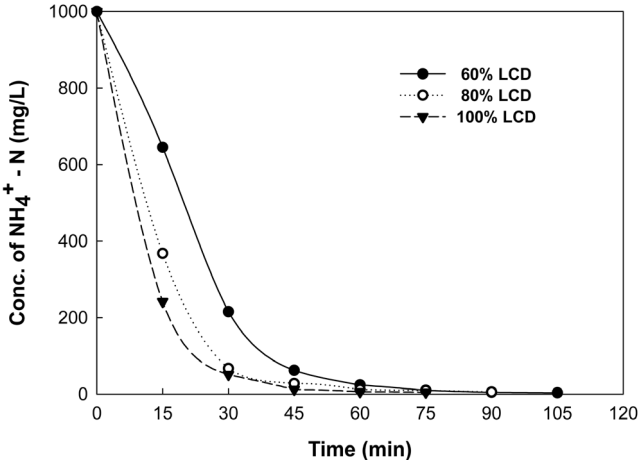

Figure 9. Effect of voltage on NH_4^+-N removal from diluate.

에서 운전이 물분해에 의한 전력손실, 염석출 등에 의한 막오염, 강산성 상태로 인한 막손상 등을 우려한다면 한계전류밀도의 80~90% 범위에서 운전하는 것이 효율적 운전이라 할 수 있다.

4. 결 론

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

한계전류밀도는 희석액이 통과하는 부분의 막표면에 형성된 확산경계층에서 농도구배가 커져 희석액의 농도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 또한 유입유속이 증가함에 따라 확산경계층의 두께 감소로 인한 물질전달의 저항 감소로 한계전류밀도는 유입유속에 따라 선형적으로 증가하였다.

희석액의 초기농도와 목표농도에 도달하는 시간은 직선적으로 비례관계를 보였고, 실공정을 운전할 경우 전도도가 농도분석 대신 사용될 수 있다.

질산성질소에서와 달리 유입유속의 증가는 확산경계층의 두께에 미치는 영향으로 지속적으로 제거속도를 증가시켰다. 이는 암모니아성질소의 상대적으로 높은 당량이온전도도와 이온이동도에 기인하는 것으로 사료된다.

운전전압의 증가에 따라 제거속도는 지속적으로 증가하였다. 하지만 한계전류밀도에서 운전 시 문제점으로 한계전류밀도에 해당하는 전압의 80~90%가 추천된다.

감 사

이 논문은 2011 학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호 2011AA185).

참고문헌

1. Jung, J. Y., Chung, Y. C., Shin, H. S., and Son, D. H., "Enhanced Ammonia Nitrogen Removal Using Consistent Biological Regeneration and Ammonium Exchange of Zeolite in Modified SBR Process," *Water Research*, **38**, 347-354 (2004).
2. Liao, P. H., Chen, A., and Lo, K. V., "Removal of Nitrogen from Swine Manure Wastewater by Ammonia Stripping," *Bioresource Technol*., **54**, 17-20 (1995).
3. Li, X. Z., Zhao, Q. L., and Hao, X. D., "Ammonium Removal from Landfill Leachate by Chemical Precipitation," *Waste Management*, **19**, 409-415 (1999).
4. Ali, N., Halim, N. S. A., Jusoh, A., and Endut, A., "The formation and Characterisation of an Asymmetric Nanofiltration Membrane for Ammonia-nitrogen Removal: Effect of Shear Rate," *Bioresource Technol*., **101**, 1459-1465 (2010).
5. Lee, H. H., and Phae, C. G., "Removal Characteristic of Ammonia Nitrogen and Behavior of Nitrogen in Synthetic Waste-

water Using Leclercia Adecarboxylata," *J. of KSEE*, **29**(4), 460-465 (2007).
6. Park, S. I, Cheong, K. H., Kim, H. Y., and Paik, K. J., "Removal of NH_4-N from Synthetic Wastewater using Soil Column," *Korean J. Environ. Health*, **31**(4), 280-286 (2005).
7. Yoon, T., Noh, B., and Moon, B., "Parametric Studies on the Performance of Cation Exchange for the Ammonium Removal," *Korean J. Chem. Eng.*, **17**(6), 652-658 (2000).
8. Pontius, F. W., "Nitrate and Cancer. Is there a Link?," *J. Am. Water Works Ass*., **85**(4), 12-14 (1993).
9. Kim, W. H., and Lee, S. H., "Ammonium Ion Removal and Regeneration for Zeolite Filtration in Drinking Water Treatment," *J. Environ. Sci.*, **13**(7), 661-665 (2004).
10. Martin, C. J., Kartinen, Jr. E. O., and Condon, J., "Examination of Processes for Multiple Contaminant Removal from Groundwater," *Desalination*, **102**, 35-45 (1995).
11. Strathmann, H., Ion Exchange Membrane Separation Processes, Membrane Science and Technology Series, 9, Elsevier B.V., Amsterdam, Netherlands, 2004, pp. 147-184.
12. Sata, T., Ion Exchange Membranes: Preparation, Characterization, Modification and Application, The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK, 2004, pp. 215-250.
13. Kim, K. S., Kim, S. H., and Jung, I. H., "The Characteristics of Ni Plating Rinse Wastewater Treatment by a Electrodialysis Apparatus," *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, **4**(4), 241-249 (2001).
14. Cowan, D. A., and Brown, J. H., "Effect of Turbulent on Limiting Current in Electrodialysis Cells," *Ind. Eng. Chem*., **51**, 1445-1448 (1959).
15. Tanaka, Y., "Concentration Polarization in Ion-exchange Membrane Electrodialysis-the Events Arising in a Flowing Solution in a Desalting Cell," *J. Membrane Sci*., **216**, 149-164 (2003).
16. Tanaka, Y., "Current Density Distribution, Limiting Current Density and Saturation Current Density in an Ion-exchange Membrane Electrodialyzer," *J. Membrane Sci*., **210**, 65-75 (2002).
17. Lee, G. H., and Lee, G. C., "Effects of Operating Parameters on the Removal Performance of Nitrate-nitrogen by Electrodialysis," *Clean Technol*., **15**(4), 280-286 (2009).
18. Bard, A. J., and Faulkner, L. R., Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, John Wiley & Sons, Inc., 1980, pp. 62-68.
19. Barthel, J. M. G., Krienke, H., and Kunz, W., Physical Chemistry of Electrolyte Solutions: Modern Aspects, Springer, New York, 1998, pp. 70-74.