

전기화학적공정에서 질산성질소 제거효율 향상에 관한 연구

심주현 · 강세한 · 서형준[†]

인하대학교 환경공학과

(2007년 11월 29일 접수, 2007년 1월 14일 채택)

Study on the Improvement of Nitrate Removal Efficiency in Multi-Step Electro-chemical Process

Joo-Hyun Sim · Se-Han Kang · Hyung-Joon Seo[†]

Department of Environmental Engineering, Inha University

ABSTRACT : In this study, the nitrate removal efficiency was examined under a variety of operating conditions, such as different doses of the reducing agent, different electrode types, different HRTs(hydraulic retention times), and different current densities, using the multistep electrochemical process. The nitrate removal efficiency increased and the input energy decreased when the reducing agent was used, and almost no difference was found between the electrode types in terms of their nitrate removal efficiency and current efficiency. So that the Zn reducing agent could be recovered, though, the B-type electrode was chosen(step 1: Pt-Zn; step 2: Pt-Zn; step 3: Pt-Zn; step 4: Pt-Zn). HRT experiments were carried out on constant electric current density unrelated HRTs and various electric current density related HRTs: the constant amount of electric current per unit volume. As a result, HRT and the electric current density caused concentration polarization and the lack of an applied current. That is to say, the lower the HRT, the greater the decrease in concentration polarization and in the amount of applied current per unit volume. Therefore, optimal conditions were found through the experiments that were conducted on HRT and electric current density. When a spacer was installed in the process, the nitrate removal efficiency and energy efficiency increased even more because the diffusion likewise increased.

Key Words : Electro-Chemical Treatment, Nitrate Removal, Metal Finishing Wastewater, Concentration Polarization

요약 : 본 연구에서는 다단계 전기화학적 반응기를 이용하여 환원제의 투입, 전극의 종류, 수리학적 체류시간(HRT : Hydraulic Retention Time) 및 전류밀도 변화에 따른 질산성질소의 제거효율을 살펴보았다. 실험결과, 환원제 투입은 질산성질소 제거효율을 증가시켰으며 에너지투입량은 감소시켰다. 전극종류를 변화시켰을 경우, 질산성질소 제거효율 및 전류효율의 차이는 거의 없었으나 Zn 환원제의 회수를 위해 B-type(1단 : Pt-Zn, 2단 : Pt-Zn, 3단 : Pt-Zn, 4단 : Pt-Zn)을 선정하였다. 수리학적 체류시간 변화실험에서는 수리학적 체류시간과 무관하게 동일전류밀도를 공급한 실험과 수리학적 체류시간 변화에 따른 전류밀도 변화 실험 즉, 단위부피당 동일 전류량 공급 실험을 진행하였다. 실험 결과, 수리학적 체류시간과 전류밀도 변화에 의해 농도분극현상과 적용 전류량의 부족현상이 발생하게 된다. 즉 수리학적 체류시간이 감소할수록 농도분극현상은 감소하지만 단위 부피당 적용전류량이 부족하게 된다. 따라서 수리학적 체류시간과 전류밀도 실험을 통해 적절한 운전조건을 도출할 수 있으며, 내부 스페이서의 설치로 확산을 증가시킬 경우 질소제거효율 및 에너지효율이 증가될 수 있을 것으로 예상된다.

주제어 : 전기화학적 처리, 질산성질소 제거, 표면처리폐수, 농도분극현상

1. 서론

현재 표면처리산업에서 발생하는 폐수내의 질소처리는 생물학적 처리와 물리화학적처리에 의존하고 있다. 물리화학적 처리공정으로는 과과점 염소주입, 스트리핑, 이온교환공정 등이 있다. 하지만 과과점 염소주입은 표면처리산업 폐수와 같이 pH 4.5 이하이거나 pH 8.5 이상인 폐수에는 적합하지 않으며, 스트리핑 공정은 질산염이나 아질산염과 같은 형태의 질소가 포함된 폐수에는 적용할 수 없

다.¹⁾ 또한 이온교환공정의 경우 수지가 강산성과 강염기성에서 산화되는 문제점을 가진다.²⁾

생물학적 처리공정의 경우 일반 하수와 달리 다양한 종류의 난분해성 물질들과 미생물의 성장에 악영향을 미치는 독성물질들을 많이 포함하는 표면처리폐수의 적용에 있어서는 그 한계가 있으며,³⁾ 시설을 설치할 부지와 시설관리 비용 등 중소기업이 감당하기 힘든 문제점을 지니고 있다.

위와 같이 표면처리산업에서 발생하는 질소 제거를 위한 많은 기술들이 제안되어지고 있다. 하지만 국내 사정과 현장 적용이란 관점에서는 아직까지 많은 점이 부족한 실정이다. 또한 표면처리폐수 처리 시 문제가 되는 물질 중 하

[†] Corresponding author
E-mail: hjseo@inha.ac.kr
Tel: 032-860-7505

Fax: 032-865-1425

나인 질소는 2005년부터 질소규제(T-N 120 mg/L)가 실행되었고 향후 2008년부터는 질소규제 수준(T-N : 60 mg/L)이 강화된다는 정부의 방침이 있어 이에 따른 준비가 필요하다.⁴⁾ 따라서 국내 표면처리산업중 중·소규모의 업체에 적용 가능한 공정으로는 전기화학적 질소제거 공정이 가장 타당할 것으로 사료된다.

본 연구에 사용된 전기화학적처리공정은 전기적으로 질산성질소를 질소로 직접적으로 환원시키는 기작과 환원제 투입을 통한 화학적 처리 기작을 동시에 적용하는 공정으로 하·폐수 처리 분야에 대한 적용도 점차 증대되고 있다.^{5,6)}

본 연구의 목적은 전극 표면에서의 전기화학적 산화-환원 반응을 통해 폐수 내 함유되어 있는 질산성질소 처리시 전극판 종류, 환원제 투입 여부, 수리학적 체류시간 및 전류밀도 등의 조건 변화가 질산성질소의 제거효율 및 에너지 효율에 미치는 영향을 파악하는 데 있으며, 최적 조건을 도출하는 데 있다.

2. 실험 재료 및 방법

2006년 3~10월 동안 인천지역 2군데의 표면처리공장에서 발생하는 폐수의 질산성질소를 월 2회 이상 측정된 결과, 평균 약 70~100 mg NO₃⁻-N/L(pH=2 이하)의 농도를 보였다. 이에 따라 본 연구에서는 측정된 폐수 농도 중 가장 높은 100 mg NO₃⁻-N/L를 NaNO₃를 사용하여 인공으로 제조하여 사용하였으며, 황산을 사용하여 pH를 2로 조절하였다. 본 연구는 환원제 투입, 전극 배열 및 수리학적 체류시간 변화 등 크게 3가지 실험으로 진행되었다. 첫째, 환원제 투입에 관한 실험에서는 연구에 사용된 Zn powder와 sulfamic acid(NH₂SO₃H)의 투입에 관한 영향을 파악하였다(Experiment I). 둘째, 전극 배열에 관한 실험에서는 전극 배열에 따른 영향을 파악하였으며(Experiment II), 셋째, 수리학적 체류시간 변화에 관한 실험에서는 수리학적 체류시간에 따른 동일전류밀도 및 전류밀도 변화가 공정에 미치는 영향을 파악하였다(Experiment III).

본 연구에서는 이전에 수행한 batch 형 연구⁷⁾를 기본으로 안정된 처리와 연속처리를 위해 연속 다단계(4단) 전기화학적 공정을 이용하였으며, 공정 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 각 단계에 설치된 전극판은 산화전극, 환원전극 각 3장씩(80 mm × 80 mm), 10 mm의 간격으로 설치하였으며, Experiment III 실험인 수리학적 체류시간 변화 실험에서는 80 mm × 50 mm인 전극을 사용하였다. 수리학적 체류시간 변화 실험을 제외한 모든 실험에서의 각 단별 수리학적 체류시간은 1시간이었으며, 각 실험에서의 운전조건을 Table 1에 나타내었다.

운전방식은 모든 실험에서 초기 1단에 유입수를 채운 후 전기를 공급하여 운전하였다. 이후 다음 단계 가득 채워지게 되면 전기를 공급하는 방식으로 4단계까지 순차적으로 전기를 공급하였다. Experiment I과 II실험에서는 모든 단계 채워져 전기가 모든 단계 공급되는 시점에서부터 4시간 동

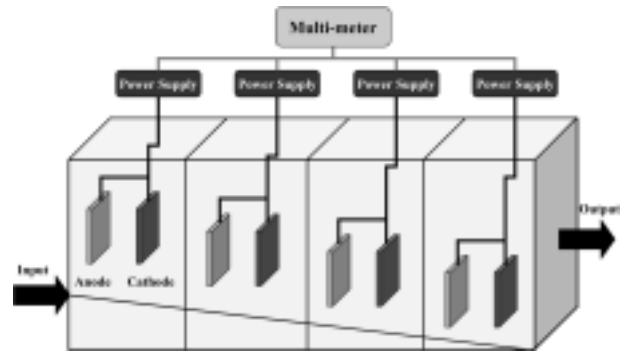


Fig. 1. Schematic diagram of the electro-chemical treatment system for nitrogen removal.

Table 1. Operating conditions of experiments

Experiment	HRT (min)	Cathode(Anode=all Pt) Current density(A/m ²)								
		Type	step				step			
			1	2	3	4	1	2	3	4
I, II	60	A	Ti	Ti	Ti	Ti	25	100	50	25
		B	Zn	Zn	Zn	Zn				
III-1	60, 40, 30, 15	B	Zn	Zn	Zn	Zn	50	25	12.5	12.5
III-2	60, 40, 30, 15	B	Zn	Zn	Zn	Zn	100	50	25	25
III-3	60	B	Zn	Zn	Zn	Zn	50	25	12.5	12.5
	75						37.5	18.75	18.75	
	100						50	25	25	
	200						100	50	550	

안 운전하였으며, Experiment III에서는 2시간 동안 운전하였다.

환원제를 투입한 경우 투입량은 인공폐수 내 NO₃⁻-N 농도와 1 : 1로 투입하였다.

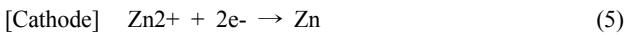
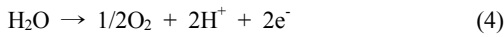
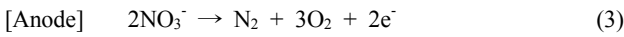
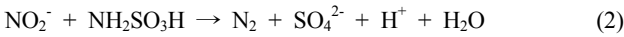
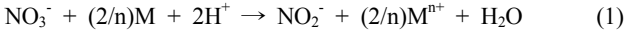
실험 분석의 경우 전도도, pH 및 전압은 멀티메타(multimeter model 2700, Keithley)를 사용해 측정하였으며, NO₃⁻-N의 경우 AA(full automatic water analyzer TRAACS2000, Bran+Luebbe)를 이용해 분석하였다. AA의 측정원리는 카드뮴-구리코일을 통해 NO₃⁻-N를 NO₂⁻-N로 환원시킨 후 NO₂⁻-N를 숄퍼닐아미드(Sulfanilamide)와 반응시켜 디아조화(diazotization)하고 나프틸 에틸렌디아민(N-(1-Naphthyl) ethylenediamine)이 염산염과 반응하여 생성된 아조화합물의 흡색 흡광도를 540 nm에서 측정하는 것이다.^{8,9)} 실험결과에서 질산성질소의 제거효율은 반응 최종 유출수의 농도를 사용하여 결정하였으며, 전류효율 및 질산성질소제거량은 시간에 따른 유출수의 농도를 사용하여 결정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1. 환원제 투입 여부에 관한 실험(Experiment I)

본 실험에서는 Type-B의 전극배열을 사용하여 환원제 투입이 공정에 미치는 영향을 파악하였다. Fig. 2에는 환원제의 투입에 관한 질산성질소 제거효율 및 전류효율을 나타내었다. 실험결과 환원제를 투입한 경우, 질산성질소

의 제거효율은 거의 100%로 환원제를 투입하지 않은 경우에 비해 약 10%p 좋았으며 전류효율 또한 약 23.7%로 약 5.5%p 좋은 결과를 보였다. 본 연구에서는 환원제에 의한 직접 산화·환원반응과 전기적 산화·환원반응이 동시에 일어나게 되며 그 반응식은 아래 식 (1)~(5)와 같다.⁹⁾



환원제를 투입할 경우, 환원제에 의한 질소 환원으로 인해 제거효율 및 전류효율은 상대적으로 증가하게 되고, 폐수의 전도도 또한 상승하게 된다. 전도도의 상승 즉, 다른 이온들의 첨가는 질산염의 전기적 직접 제거 효율을 낮추게 되지만^{7,11)} 환원제에 의한 제거효율 부분이 추가되므로 전체적인 효율은 증가하게 되며, 전도도의 상승으로 인한 적용 전압의 감소로 에너지는 감소하게 된다.¹²⁾ 이를 확인하기 위해 단위에너지 당 질산성질소 제거량을 Table 2에 나타내었다.

환원제 주입시 질소제거는 단위부피당 95.4 mg NO₃⁻-N이 제거되어, 미주입에 비해 약 11 mg NO₃⁻-N 이상 높은 제거량을 보였다. 또한 투입에너지는 환원제 주입시 164.0

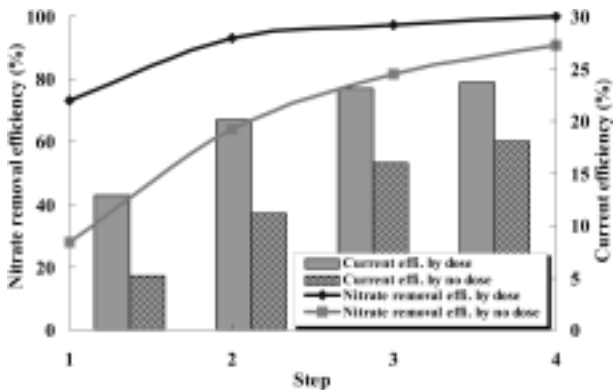


Fig. 2. Nitrate removal efficiency and current efficiency on reducing agent dose.

Table 2. Amount of nitrate removal per unit consumption energy on reducing agent dose

	Dose of reducing agent	No dose of reducing agent
mg NO ₃ ⁻ -N/L	95.4	84.4
Wh	164.0	179.9
mg NO ₃ ⁻ -N/L-Wh	0.58	0.47

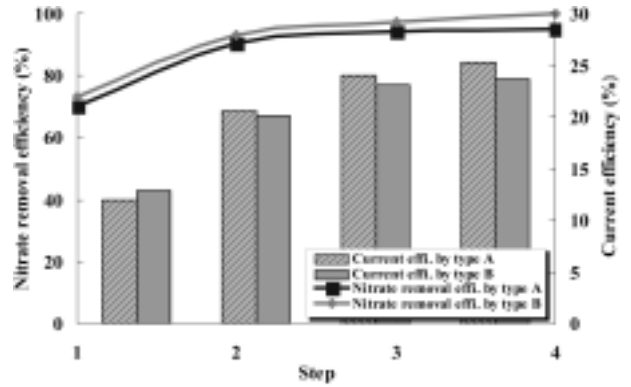


Fig. 3. Nitrate removal efficiency and current efficiency on two types electrode.

Wh로 약 15.9 Wh 낮게 측정되었다. 따라서 환원제의 투입은 전기화학적 처리 제거효율 증가 및 에너지투입 감소의 2가지 장점을 가지게 된다.

3.2. 전극 종류에 관한 실험(Experiment II)

Fig. 3에는 환원제 투입상태에서의 전극종류에 따른 실험 결과를 도시하였다. Ti를 사용한 A-type의 제거효율과 Zn를 사용한 B-type의 질산성질소 제거효율은 각각 94.9%와 100%로 B-type의 질산성질소 제거효율이 다소 높았으나 큰 차이를 보이지 않았다. 이전에 본 연구실에서 batch형 반응기를 이용하여 수행한 연구⁷⁾에서는 A-type을 이용하였을 경우 질산성 질소제거효율이 높았다. 반면 전류효율의 경우 1단에서는 B-type이 높았으나 전체적인 전류효율에서는 A-type이 다소 높았다. 전극종류에 따른 실험결과, 전극 종류에 따라 전류효율과 제거효율이 각각 우위를 가졌지만 그 차이가 미비하였다. 따라서 본 연구에서는 Zn을 환원제로 사용하는 기작을 이용한 처리이므로 이후 Zn의 회수를 위해 환원전극으로 Zn을 선택하는 것이 더 좋을 것으로 사료되므로 이후 실험부터는 Zn을 환원전극으로 사용하는 B-type 배열을 이용해 실험을 진행하였다.

3.3. 수리학적 체류시간에 관한 실험(Experiment III)

3.3.1. 수리학적 체류시간 별 동일 전류밀도에 관한 실험 (Experiment III-1, 2)

본 실험에서는 각 단의 전류밀도를 고정된 후 수리학적 체류시간만을 바꾸어가며 실험을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과, 전류밀도가 50-25-12.5-12.5 A/m²(저 전류밀도)인 경우 수리학적 체류시간 60분에서 85.6%로 가장 좋은 효율을 보였으며, 100-50-25-25 A/m²(고 전류밀도)인 경우 수리학적 체류시간 30분에서 90.0%로 가장 좋은 효율을 보였다. 위의 결과처럼 전류밀도의 차이에 따라 각기 다른 수리학적 체류시간에서 최대 질산성질소 제거효율이 나타나는 이유는 농도분극현상과 단위 부피당 적용 전류량이 부족하기 때문이다. 즉 반응기내에 유량이 증가하게 되면, 전극판 사이에서 전기적 반응에 의

해 질산성질소 이온이 빠르게 제거되면서 발생하는 전극 계면과 벌크액 사이의 농도구배인 농도분극현상을 감소시켜 전류의 이동을 증가시키고, 질산성질소의 처리효율을 증가시킨다. 하지만 일정유량이상 증가할 경우 정상적인 질산성질소 제거 반응이 일어나기 전에 폐수가 반응기 내에 체류하지 못하고 유출되어 처리효율이 감소되는 문제 및 단위유량 당 적용전류량의 값이 낮아 처리효율이 감소되는 문제가 일어나게 된다.

저 전류밀도의 경우(Fig. 4(a) 참고), 농도분극현상으로 인한 처리효율의 감소영향보다는 단위유량 당 적용전류량의 부족으로 인한 처리효율감소 문제가 더 크다. 따라서 유량에 대한 적용전류량을 확보할 경우 즉 수리학적 체류시간이 증가할수록 제거효율은 증가하게 된다.

반면 고 전류밀도의 경우(Fig. 4(b) 참고), 수리학적 체류시간 40분과 60분에서 처리효율이 감소하는 결과를 보였는데, 이는 수리학적 체류시간의 증가로 인해 농도분극현상이 증가하여 전체 제거효율은 감소하였기 때문이다.

전류효율에 대한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 전류효율의 경우 고 전류밀도보다는 저 전류밀도에서 높은 결과를 보였으며, 수리학적 체류시간이 감소할수록 높은 값을 나타내었다. 이는 저 전류밀도와 고 전류밀도 적용 시 질산성질소의 제거효율 차이는 약 5%p인데 비해 전류밀도는 2배 증가하였기 때문에 고 전류밀도의 전류효율은 감소하였고, 수리학적 체류시간이 감소할수록 단위유량 당 전류량이 감소하였기 때문이다.

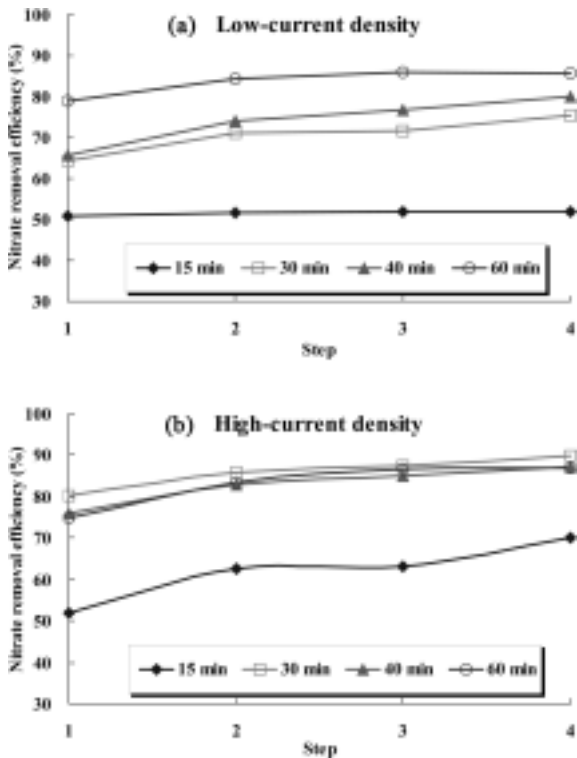


Fig. 4. Nitrate removal efficiency on various HRT under same current density. [(a) : low-current density is applied, (b) : high-current density is applied]

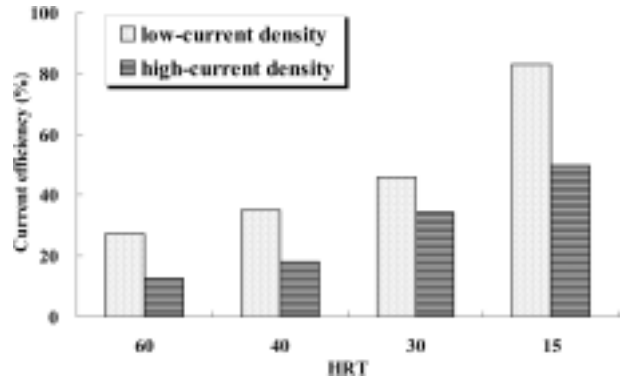


Fig. 5. Current efficiency on various HRT under same current density.

Table 3. Amount of nitrate removal per unit consumption energy on various HRT under same current density

	Low-current density(A/m ²)				High-current density(A/m ²)			
	60	40	30	15	60	40	30	15
mg NO ₃ ⁻ -N/L	79.3	71.2	69.8	44.2	78.9	79.2	85.6	55.9
Wh	41.5	36.4	25.7	37.1	82.8	79.8	78.5	159.6
mg NO ₃ ⁻ -N/L-Wh	1.91	1.96	2.72	1.19	0.95	0.99	1.09	0.35

Table 3에는 단위에너지 당 질산성질소 제거량을 나타내었다. 저 전류밀도 및 고 전류밀도 모두 수리학적 체류시간 30분에서 가장 높은 단위에너지 당 질산성질소 제거효율을 보였다. 질소제거량의 경우 저 전류밀도의 경우 가장 큰 영향을 준 단위유량 당 전류량에 따라 수리학적 체류시간이 증가할수록 높은 값을 나타내었으며, 고 전류밀도의 경우 농도분극현상이 가장 적고 단위유량 당 전류량이 일정 확보된 30분에서 가장 높은 값을 나타내었다.

결과적으로 단위에너지 당 처리효율은 고 전류밀도를 적용하는 것이 상대적으로 낮아지나 시간당 처리량 및 처리효율면에서는 더욱 좋은 결과를 보이므로 이후 실험에서는 수리학적 체류시간을 30분으로 고정하고, 고 전류밀도 적용을 기준으로 하여 수리학적 체류시간의 변화에 따라 전류밀도를 변화시켜 단위유량 당 적용전류밀도를 같게 하여 실험을 진행하였다.

3.3.2. 수리학적 체류시간 별 전류밀도 변화에 관한 실험 (Experiment III-3)

Fig. 6에는 수리학적 체류시간 변화에 따라 전류밀도의 변화가 질산성질소 제거효율에 미치는 영향을 나타내었다. 실험결과, 수리학적 체류시간 30분 이상에서는 효율이 Fig. 4(b)보다 낮은 결과를 보였다. 이는 동일한 유속에서 단위유량 당 적용전류량이 감소하였기 때문이다. 하지만 수리학적 체류시간 15분의 경우, Fig. 4(b)보다 약 10%p 높은 질산성질소 제거효율을 보였다. 이는 단위시간 당 투입되는 전류량의 증가로 질산성질소 제거효율이 증가하였기 때문이다. 즉, 동일 전류밀도 실험에서의 수리학적 체류시간 15분 조건은 전류밀도가 낮았기 때문에 제거효율이 감소한 것이라 할 수 있다.

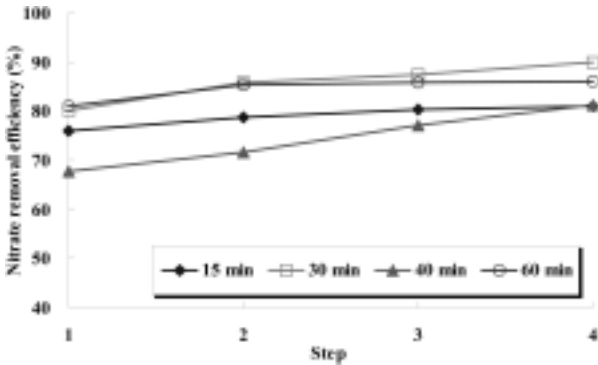


Fig. 6. Nitrate removal efficiency on various HRT and various current density.

Table 4. Current efficiency and amount of nitrate removal per unit consumption energy on various HRT and various current density

	Hydraulic retention time(HRT, min)			
	60	40	30	15
Current efficiency(%)	29.2	26.5	34.3	31.7
mg NO ₃ ⁻ -N/L	79.3	78.2	85.6	70.7
Wh	36.4	59.5	78.5	280.2
mg NO ₃ ⁻ -N/L-Wh	2.18	1.31	1.09	0.25

하지만 전류효율의 경우 Table 4와 같이 모든 수리학적 체류시간에서 유사한 결과를 보였다. 즉, 수리학적 체류시간에 따른 전류밀도의 변화가 각 유량에 맞게 단위시간 당 투입되는 전하량을 동일하게 하였기 때문이다. 단위에너지 당 질산성질소 제거량을 보면 수리학적 체류시간이 증가할수록 높은 값을 나타내었다. 고 전류밀도 적용시의 데이터를 비교해 보면(Table 3참고) 수리학적 체류시간에 따라 전류밀도를 변화시켰을 경우, 수리학적 체류시간 40과 60분 모두에서 단위에너지 당 질소제거량 값이 크게 증가하였다. 이는 수리학적 체류시간에 따른 적정 전류밀도 선정의 중요성을 나타내는 결과라 할 수 있다.

본 실험에서 결과적으로 도출하고자 하는 것은 짧은 수리학적 체류시간-시간당 처리용량의 증가, 안정적 질산성질소 처리효율 및 낮은 에너지소모량이다. Fig. 7에는 앞서 전류밀도(Experiment III-1), 고 전류밀도(Experiment III-2) 및 전류밀도 변화실험(Experiment III-3)에서의 에너지소

량을 도시하였다.

실험결과, 각 조건에 동일한 전류밀도를 걸어준 경우 단위시간 당 처리량이 증가할수록 즉, 수리학적 체류시간이 감소할수록 에너지소모량은 감소하였다. 고 전류밀도(Fig. 7(b))를 적용한 경우 저 전류밀도(Fig. 7(a))의 경우보다 수리학적 체류시간에 따른 에너지 소모량 차이는 컸다. 이는 앞서 설명한 농도분극현상의 영향이라 할 수 있다. 동일 전류밀도를 적용한 경우에 수리학적 체류시간이 증가할수록 에너지소모량이 증가한 것에 비해 전류밀도를 수리학적 체류시간에 따라 변화시켰을 경우(Fig. 7(c))를 보면 오히려 15분에서 가장 높은 에너지 소모량이 발생했으며, 나머지 수리학적 체류시간에서는 유사한 값을 나타내었다. 30분 이상의 수리학적 체류시간의 경우, 전류의 제거속도로 인한 전극판사이의 농도분극현상을 수리학적 체류시간의 변화 즉, 유속변화를 통한 전극판사이의 전해질 공급으로 상쇄시켰기 때문에 모든 수리학적 체류시간에서 유사한 에너지소모량을 나타낸 것으로 사료된다. 반면 15분의 경우, 유속에 의한 전해질 공급이 확산 등의 영향으로 질소제거속도를 충분히 보완하지 못한 결과 급격한 에너지소모를 증가시킨 것으로 사료된다. 따라서 일정 수리학적 체류시간 이하에서는 내부의 확산현상이 증가할 수 있는 스페이서(spacer) 등을 설치함에 따라 위 현상을 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

앞선 실험을 정리해 보면, 다음과 같은 공정 적용에 대한 기준을 세울 수 있을 것으로 사료된다.

- 1) 환원제를 투입하고 B type의 전극을 이용하여 수리학적 체류시간과 전류밀도에 관한 실험을 진행하여 최적 제거효율을 나타내는 전류밀도를 선택한다.
- 2) 수리학적 체류시간 변화를 통해 투입에너지 당 질소 제거량(mg NO₃⁻-N/L-Wh)을 확인하여, 최적의 전류밀도를 선택할 수 있다.
- 3) 공정 적용상 수리학적 체류시간을 확보하지 못하는 경우 반응기 내 확산을 증가시킬 수 있는 보조제 즉, 스페이서의 설치를 통해 반응 효율을 증가시킬 수 있다.

4. 결론

본 연구의 목적은 4단계 연속 전기화학적 반응기를 통

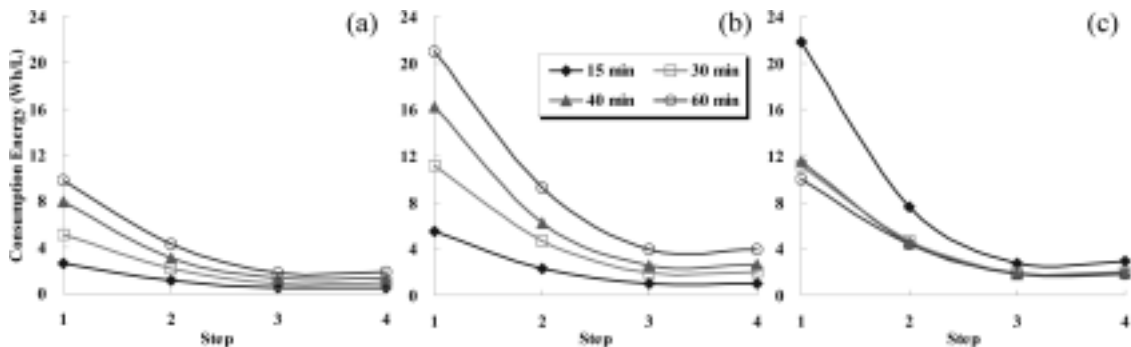


Fig. 7. Variation of consumption energy per unit volume. [(a) : Experiment III-1, (b) : Experiment III-2, (c) : Experiment III-3]

해 질산성질소의 처리효율을 최적화하고 수리학적 체류시간의 감소를 통한 반응기의 규모를 최소화하는 데 있다. 이와 같은 연구목적에 따라 본 연구에서는 전극판의 종류, 환원제의 투입 여부, 체류시간 및 전류밀도 등의 조건변화에 대한 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 처리효율의 증가와 반응기내 전도도를 증가시키기 위해 환원제(Zn powder, Sulfamic acid)를 투입한 결과, 질산성질소의 제거효율은 거의 100% 제거되었으며, 전류효율 또한 23.7%로 환원제를 투입하지 않은 공정에 비해 5.5%p 높았다.

2) 전극종류에 따른 질산성질소제거효율의 차이는 크지 않았다. 따라서, Zn 환원제 회수 및 재활용을 위해 환원전극을 Ti로 구성한 전극(A-type)보다는 환원전극을 Zn으로 구성한 전극(B-type)의 사용을 결정하였다.

3) 수리학적 체류시간변화에 따른 질산성질소 제거효율은 농도분극현상과 단위부피 당 적용전류량의 차이에 의해 결정된다. 전류밀도가 낮게 적용된 경우 농도분극현상으로 인한 처리효율의 감소보다는 단위유량 당 적용전류량의 부족으로 인한 처리효율감소 영향이 크며, 전류밀도가 높은 경우에는 농도분극현상으로 인한 처리효율감소 영향이 더 컸다.

4) 수리학적 체류시간변화에 따른 전류밀도 변화결과, 전류밀도가 감소된 수리학적 체류시간 40, 60분 공정에서의 질산성질소 처리효율이 다소 낮아졌지만 단위에너지 당 질소제거량 값이 크게 증가하였다. 이는 수리학적 체류시간에 따른 적정 전류밀도 선정의 중요성을 나타내는 결과라 할 수 있다.

5) 수리학적 체류시간에 따른 전류밀도변화 실험 중 15분의 경우, 유속에 의한 전해질 공급이 확산 등의 영향으로 질소제거속도를 충분히 보완하지 못한 결과 급격한 에너지 소모를 증가시켰다. 따라서 일정 수리학적 체류시간 이하에서는 내부의 확산현상이 증가할 수 있는 스페이서(spacer) 등을 설치함에 따라 위 현상을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 산업자원부가 지원하는 인하대학교 서해연안 환경연구센터의 2007년도 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. Reynolds, T. D. and Richards, P. A., *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, 2nd ed., PWS, Boston, 327~349(1996).
2. 심주현, 서형준, 조계민, 심진기, “이온교환공정과 전기분해공정을 이용한 고농도 질산 에칭폐액의 재활용에 관한 연구,” *대한환경공학회지*, **26**(6), 675~681(2004).
3. 정종식, 정유상, 이국두, 이재복, “분말활성탄이 투여된 무산소/호기공정과 전기분해공정의 조합에 의한 안료폐수의 총질소와 유기물질 제거 특성,” *대한환경공학회지*, **26**(5), 579~587(2004).
4. 환경부, *수질환경보전법 시행규칙*(2007).
5. 정종식, 이재복, “전기화학적 산화에 의한 안료폐수의 유기물질 제거,” *대한환경공학회지*, **24**(9), 1641~1650(2002).
6. 유재정, 민경석, 박정민, “염색폐수중 난분해성물질 전기분해 처리특성,” *대한환경공학회지*, **25**(10), 1277~1282(2003).
7. 심주현, 서형준, 김대환, “질소제거를 위한 금속표면처리 폐수의 전기화학적 처리,” *한국화학공학회지*, **45**(2), 190~196(2007).
8. 환경부 고시 제2007-147호, *수질환경공정시험법*(2007).
9. APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater*, 20th ed., New York(1998).
10. U. S. Department of Energy's Los Alamos National Laboratory, <http://www.lanl.gov>, February(1999).
11. Kim, S. D., Yoon, J. L., Park, J. S., and Choi, Y. K., “Optimal pH of Electrolysis System for Removing COD of sewage,” *Fall Conference on Water Quality*, Nov, Gwangju(1997).
12. Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., and Cocke, D. L., “Electrocoagulation-science and applications,” *J. Hazard. Mater.*, **B84**(1), 29~41(2001).