

질소 제거를 위한 전기화학적 처리 공정의 최적 운전조건 및 폐수 성상에 따른 영향에 관한 연구

심주현 · 강세한 · 서형준[†] · 송수성*

인하대학교 환경공학과 · *수도권매립지관리공사

(2008년 11월 28일 접수, 2009년 1월 15일 채택)

A Study on the Optimum Operating Conditions and Effects of Wastewater Characteristics in Electrochemical Nitrogen Removal Process

Joo-Hyun Sim · Se-Han Kang · Hyung-Joon Seo[†] · Su-Sung Song*

Department of Environmental Engineering, Inha University · *Sudokwon Landfill site Management Corporation

ABSTRACT : This study was performed under four operational conditions for nitrogen removal in metal finishing wastewater. The conditions include electrode gap, reducing agent, the recycling of treated wastewater in 1st step and the simultaneous treatment of nitrate and other materials. Result showed that the removal efficiency of NO₃⁻-N was highest at the electrode gap of 10 mm. As the electrode gap was shorter than 10 mm, the removal efficiency of NO₃⁻-N decreased due to increasing in concentration polarization on electrode. And, in case that the electrode gap was longer than 10 mm, the removal efficiency of NO₃⁻-N increased with an increase in energy consumption. Because hydrogen ions are consumed when nitrate is reduced, reducing reaction of nitrate was effected more in acid solution. As 1.2 excess amount of zinc was injected, the removal efficiency of NO₃⁻-N increased due to increasing in amount of reaction with nitrate. As the effluent from 1st step in the reactor was recycled into the 1st step, the removal efficiency of NO₃⁻-N increased. Because the zinc were detached from the cathode and concentration-polarization was decreased due to formation of turbulence in the reactor. The presence of NH₄⁺-N did not affect the removal efficiency of NO₃⁻-N but the addition of heavy metal decreased the removal efficiency of NO₃⁻-N. As chlorine is enough in wastewater, the simultaneous treatment of nitrate and ammonia nitrogen may be possible. The problem that heavy metal decrease the removal efficiency of NO₃⁻-N may be solved by increasing current density or using front step of electrochemical process for heavy metal removal.

Key Words : Electrochemical Process, Nitrate Removal, Metal Finishing Wastewater, Operational Condition

요약 : 표면처리폐수 내 질산성 질소를 제거하기 위한 전기화학적 처리공정에서 전극간격, 환원제, 1단 처리수 반송, 타 물질과 동시 처리 등 네 가지 조건을 변화시키며 실험을 진행하였다. 실험 결과, 전극간격은 10 mm일 때 질산성 질소 제거효율이 높았으며 10 mm 보다 전극간격이 좁아질 경우 농도분극 현상의 증가로 인해 제거효율이 감소하며 10 mm 보다 넓어질 경우 전압이 상승하여 에너지 소모가 증가하였다. 환원제 영향에 대한 실험 결과, 질산성 질소가 환원되는 과정에서 수소가 소모되기 때문에 수소이온 농도가 높은 산성조건에서 더 원활한 환원반응이 이루어졌으며 아연을 1.2배 투입할 경우 질산성 질소와의 반응량이 증가하여 질산성 질소 제거효율이 증가하였다. 1단 처리수를 반송할 경우 난류가 형성되어 환원전극에 부착된 아연이 탈착되어 재이용되고 내부 확산이 증가하여 농도분극현상이 감소함으로 인해 질산성 질소 제거효율이 증가하였으며 아연 투입량 감소 효과가 나타났다. 암모니아성 질소는 질산성 질소 제거에 영향을 미치지 않았고 폐수 내 염소성분이 충분할 경우 질산성 질소와 동시 처리에도 문제가 없는 것으로 나타났다. 중금속은 환원되는 과정에서 전자를 소모하여 질산성 질소 제거효율은 감소하지만 전류밀도 증가나 본 장치의 전단을 중금속 제거용으로 사용하는 방법 등으로 해결이 가능할 것으로 생각한다.

주제어 : 유사페톤반응, 철 광물, 석유계총탄화수소, 미사질식토

1. 서론

표면처리공정에서 가장 중요한 오염문제는 세척공정에서 유발되는 수세수이다. 수세수는 그 양이 많을 뿐만 아니라 수중에 포함된 중금속과 화학물질은 독성을 가지고 있어 생물체에 축적될 경우 소량으로도 치명적인 영향을 미

칠 수 있으며 다량의 질소, 인 역시 함유하고 있어 주요 수질오염원으로 인식되고 있다.^{1,2)}

현재 국내에서는 일반적으로 가장 경제적인 방법으로 알려져 있는 화학적 침전법을 사용하여 표면처리폐수를 처리하고 있다. 그러나 화학적 침전법은 pH 조정을 위해 과다한 양의 화학약품이 소요되고 다량의 슬러지가 발생되어 슬러지 처리비용이 증가하는 단점이 있다.³⁾ 또한 2008년부터 강화된 방류수 수질기준으로 인해 질소의 규제치가 120 mg N/L에서 60 mg N/L로 낮아져 이에 따른 처리공

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

Fax: 032-865-1425

정의 강화가 필요하다.⁴⁾

본 연구의 전기화학적 처리공정은 전해질을 포함하는 유·무기성 폐수에 전기를 공급하여 전기적 산화환원 반응 및 환원제를 통한 화학적 처리를 동시에 적용하는 공정이다. 폐수 내 오염물질은 전극표면에서 전자기동에 의한 산화, 환원, 분해, 석출 등으로 인한 직접분해 반응과 전극반응에 의해 생성된 중간 산화제와의 간접분해 반응을 통해 제거된다. 전기화학적 처리공정은 짧은 반응시간과 작은 설치면적, 폐수의 부하변동에 강하며 안정적인 방류수 수질을 유지할 수 있다는 장점을 가지고 있음에도 불구하고 대부분의 전기화학적 처리공정의 적용은 생활하수나 오수에 집중되어 있었다. 그러나 최근 타 공정과 병행하여 처리효율을 증가시키거나 폐수처리 시 운전조건 등에 대한 연구도 점차 증가하고 있다.^{5,6)}

따라서 본 연구에서는 표면처리폐수를 처리하는데 있어서 전기화학적 공정 적용 및 효율증대를 위해 전극간격, 환원제 및 반송 등의 운전조건을 평가하였으며 타 물질과 동시 처리 시 질산성 질소 제거효율의 변화 등을 살펴보았다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 재료 및 장치

본 연구의 대상시료는 100 mg NO₃⁻-N/L를 NaNO₃를 사용하여 제조하였으며, 황산을 사용하여 pH를 2로 조절하였다. 본 연구의 실험장치는 다단계(4단) 전기화학적 처리 장치를 사용하였으며, 처리장치의 모식도는 Fig. 1에 나타내었다. 각 단의 용량은 1 L이고 산화-환원전극은 각각 3장씩 설치하였다. 각 전극의 면적은 80 mm × 80 mm이고 각 단의 산화-환원전극 재질은 Pt-Ti(1단), Pt-Zn(2, 3, 4단)이다. 전극간격 실험을 제외하고 전극간격은 10 mm, 전류밀도는 100-50-25-25 A/m²이며 pH 변화에 따른 환원제 영향 실험을 제외하고 체류시간은 30분이다. 전원공급장치는 정전압과 정전류의 공급이 가능하며 출력범위는 0~30 V, 0~5 A이며, 미세조정은 10 mV, 10 mA까지 할 수 있다.

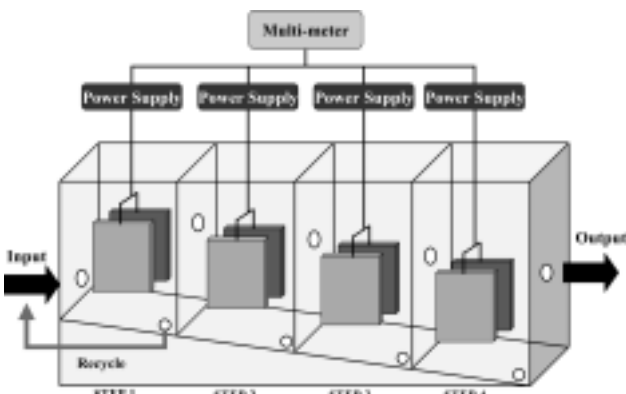


Fig. 1. Schematic diagram of the electro-chemical treatment system for nitrogen removal.

2.2. 실험방법

본 연구에서는 전극간격, 환원제, 1단 처리수 반송 및 타 물질과 동시 처리 실험을 진행하였으며 그 순서는 다음과 같다. 첫째, 전극간격 실험은 산화-환원전극의 간격에 의한 영향을 파악하였다. 둘째, 환원제에 관한 실험은 pH 변화에 따른 영향과 환원제 투입비율에 따른 영향을 살펴보았다. 셋째, 1단 처리수 반송 실험은 1단 처리수를 반송하여 처리하는 실험과 반송을 통한 아연 투입량 조절 실험을 진행하였다. 넷째, 타 물질과 동시 처리 실험은 질산성 질소와 암모니아성 질소를 동시에 처리할 때 암모니아성 질소의 영향과 질산성 질소와 중금속을 동시에 처리할 때 중금속의 영향을 살펴보았다. 환원제 투입의 경우 환원제 투입량 조절 실험을 제외한 일반적 실험에서는 몰비 1 : 1 : 1(Zn : Sulfamic acid : Nitrate)로 투입하였다.

전극간격 실험은 1단 연속식으로 진행하였으며 1, 5, 10, 15 mm로 조절하고 전류밀도는 100 A/m²로 실험하였다. pH 변화에 따른 환원제 영향 실험은 전극간 전류를 적용하지 않은 상태에서 환원제만을 투입하여 1단 연속식으로 2시간 동안 pH를 2로 조절한 인공폐수와 조절하지 않은 인공폐수를 대상으로 진행하였으며 환원제 투입비율 실험은 인공폐수의 질산성 질소 농도를 기준으로 몰비를 다르게 조절하여 환원제를 투입하였다. 실험에 적용한 몰비는 다음 Table 1에 나타내었다.

1단 처리수 반송 실험은 1단 처리수를 5, 10, 15 Q로 반송하여 처리한 실험과 10 Q 반송과 함께 아연 투입량을 0.25, 0.5, 0.75배 감소한 실험을 진행하였다. 암모니아성 질소와 동시 처리 실험은 염화암모늄(NH₄Cl)과 황산암모늄((NH₄)₂SO₄)을 이용하여 각각 250 mg NH₄⁺-N/L를 인공폐수에 투입하여 실험하였다. 중금속과 동시 처리 실험은

Table 1. Mole ratio of reducing agent

	Zn	Sulfamic acid	Nitrate
Mole ratio	0.8	0.8	1
	0.8	1	1
	1	0.8	1
	1	1	1
	1.2	1	1
	1	1.2	1
	1.2	1.2	1

Table 2. Summary of the analytical methods

Item	Analytical methods
NO ₃ ⁻ -N	Full Automatic Water Analyzer (BRAN+LUEBBE TRAACS 2000)
Cr ⁶⁺	ICP-OES
Cu ²⁺	(Inductively Coupled Plasma, Varian Vista-pro)
Voltage	MultiMeter (KEITHLEY 2700)
pH	Orion 920A Probe
Conductivity	YSI 30 Probe

중크롬산 칼륨($K_2Cr_2O_7$)과 황산구리 5수화물($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)를 이용하여 각각 650 mg Cr/L, 150 mg Cu/L를 투입하여 실험하였다. 본 실험에서 질산성 질소, 암모니아성 질소, 중금속들의 농도는 실제 표면처리폐수의 분석을 통해 결정하였다. 실험 분석은 Table 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전극간격 실험

각 전극간격 별 질산성 질소 제거효율과 에너지 소모량은 다음 Table 3에 나타내었다. 전극간격이 전기화학적 질산성 질소 처리에 어떠한 영향을 주는지 살펴보기 위해 전극간격을 1, 5, 10, 15 mm로 변화시켜 1단 연속식으로 실험한 결과 10 mm 간격으로 실험을 한 경우 가장 높은 52%의 질산성 질소 제거효율을 보였으며 15 mm 간격으로 실험을 한 경우 가장 낮은 45.4%의 질산성 질소 제거효율을 보였다.

전극간격이 10 mm 보다 좁아지면 전극 사이로 폐수의 확산이 원활하게 이루어지지 않아 농도분극 현상이 심화되어 전극표면에서 물분해가 진행되고 이로 인해 전극사이의 전압이 상승하고 제거효율이 감소하게 된다. 그리고 전극간격이 10 mm 보다 넓어지면 전극 사이의 저항이 증가하여 전압이 상승하고 제거효율이 감소하게 된다.

투입한 환원제 중 아연을 분석한 결과 유출수에서는 검출되지 않았으며 이후 다른 실험에서도 검출되지 않았다. 이는 반응에 참여한 아연은 Zn^{2+} 로 산화된 후 환원전극에 100% 부착되며 미 반응한 아연은 침전되었기 때문이다. 따라서 이후 실험에서 유출수의 아연 결과는 나타내지 않았다.

3.2. 환원제 실험

3.2.1. pH 변화에 따른 환원제 영향

pH를 조절하지 않은 100 mg $NO_3^-/N/L$ 인공폐수와 pH를 2로 조절한 동일한 질산성 질소 농도의 인공폐수를 대상으로 환원제에 의한 질산성 질소 제거 효율을 확인하였다. 실험 결과, Fig. 2와 같이 pH를 조절한 경우 조절하지 않은 조건보다 7%p 더 높은 질산성 질소 제거효율을 보였다. 이는 다음 식 (1), (2)에서 보듯이 환원제와 질산성 질소와의 반응에서 수소이온이 소모되기 때문에⁷⁾ 수소이온 농도가 높은 산성 조건에서 제거효율이 증가하는 것으로 사료된다.

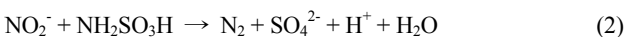
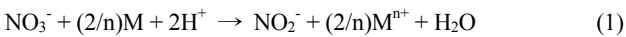


Table 3. Removal efficiency of nitrate and energy consumption on electrode gap

Electrode gap (mm)	1	5	10	15
Removal efficiency of nitrate (%)	47.4	47.8	52.0	45.4
Energy consumption (kJ)	41.10	34.64	33.72	37.51

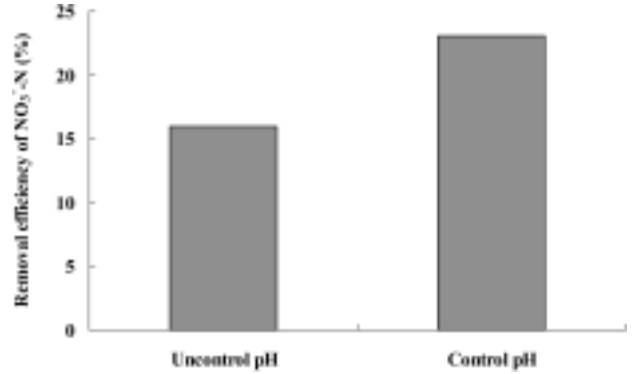


Fig. 2. Removal efficiency of nitrate on pH of wastewater.

3.2.2. 환원제 투입비율 실험

Fig. 3은 환원제 투입 비율에 따른 질산성 질소 제거효율을 나타낸 것이며 Fig. 4는 환원제 투입비율에 따른 에너지 소모량을 나타낸 것이다. 이론적인 환원제 투입비율은 인공폐수 내 질산성 질소 농도와 동일한 몰비인 1:1:1 (Zn : Sulfamic acid : Nitrate)이다. 그러나 실제 운전에서도 이 비율로 투입하는 것이 질산성 질소 제거에 효율적인지 알아보기 위해 환원제의 투입 몰비를 다르게 하였다. 그 결과, 아연을 1.2배 투입하는 조건의 질산성 질소 제거효율이 가장 높았으며 환원제 투입량이 부족할 경우 제거효율이 감소하는 것으로 나타났다.

아연은 산화되어 전자를 방출한 후 환원전극에서 다시 환원되어 부착된다. 이 과정에서 방출된 전자는 식 (1)과 같이 질산성 질소를 아질산성 질소로 전환하는 역할을 한다. 그러나 아연은 분말 형태로 투입되어 100% 반응하기 힘들기 때문에 이론적 비율로 투입할 경우 부족하게 된다. 그러므로 아연을 이론적인 투입량보다 과량 투입한 경우 질산성 질소와 아연의 반응량이 증가하여 질산성 질소 제거효율이 증가하는 것으로 생각된다.

sulfamic acid는 이론적 투입비율 이상으로 투입할 경우 질산성 질소 제거효율의 차이가 없었으나 에너지적인 측면에서 보았을 때 영향을 미치는 것으로 파악되었다. sulfamic acid의 투입 비율이 증가하면 전압이 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이는 sulfamic acid의 투입 비율이 증가하

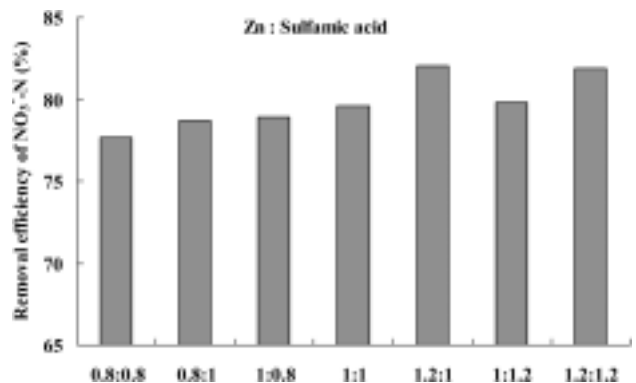


Fig. 3. Removal efficiency of nitrate on mole ratio of reducing agent per mole of nitrate.

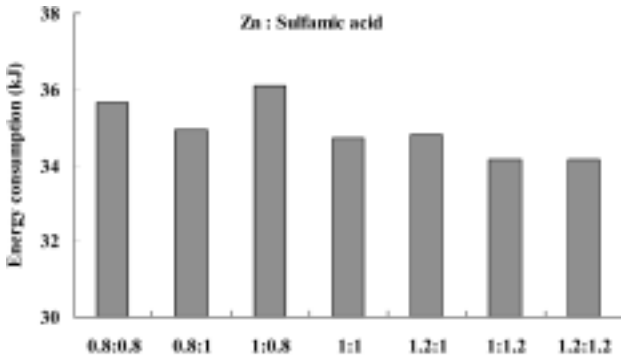


Fig. 4. Energy consumption on mole ratio of reducing agent per mole of nitrate.

면 전도도가 증가하기 때문이다. 전도도가 증가하는 이유는 sulfamic acid의 이온화 및 sulfamic acid와 질산성 질소의 반응 시 수소 이온이 생성되기 때문이다. 이와 같은 전도도 증가로 인해 에너지 소모량이 감소하는 것으로 사료된다.

3.3. 1단 처리수 반송 실험

3.3.1. 1단 처리수 반송 실험

다음 Fig. 5는 1단 처리수를 반송한 경우 각 반송비에 따른 질산성 질소 제거효율을 나타낸 것이다. 환원제로 투입하는 아연은 분말 형태로 투입되며 반응 중 산화하여 전자를 방출한 후 환원전극에 부착된다. 이러한 아연의 환원전극 부착은 다단계 전기화학적 질소 처리 장치의 특성상 전류밀도가 가장 높은 1단의 환원전극에 가장 많은 양의 아연이 부착된다. 따라서 1단 처리수의 반송을 통해 환원전극에 부착된 아연을 탈착시켜 전기화학적 질산성 질소 처리 공정에 재이용하는 실험을 진행하였다. 1단 처리수를 반송한 경우 모든 반송비 조건에서 반송을 하지 않은 조건보다 질산성 질소 제거효율이 증가하였다. 이와 같은 결과는 반송을 통해 형성되는 난류로 인해 탈착된 아연이 재이용되고 내부확산이 원활해져 농도분극 현상이 감소하기 때문으로 사료된다. 하지만 반송비 10 Q 조건과 15 Q 조건의 경우 질산성 질소 제거효율의 차이가 거의 없었다. 즉, 10 Q 이상의 반송비에서는 탈착된 아연의 재이용 효

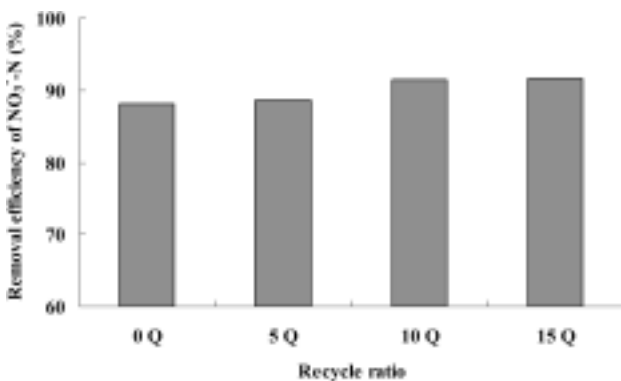


Fig. 5. Removal efficiency of nitrate on recycle ratio.

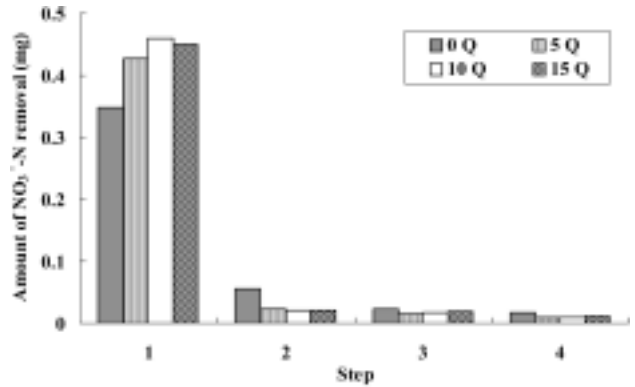


Fig. 6. Amount of nitrate removal in each step on recycle ratio.

과 및 난류에 의한 농도분극 현상 감소가 더 이상 진행되지 않아 질산성 질소 제거효율의 차이가 거의 없는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 반송비별 각 단계의 질산성 질소 제거량을 나타낸 것이다. 반송을 통해 탈착된 아연이 1단에서 재사용되는 비율이 높은지 후단으로 유입되어 후단의 질산성 질소 제거효율을 증가시키는 비율이 높은지 알아보기 위해 각 단계의 질산성 질소 제거량을 살펴본 결과 5, 10, 15 Q로 반송할 경우 총 질산성 질소 제거량에 대한 1단에서 제거된 질산성 질소량은 각각 89.7%, 90.2%, 89.8%를 차지하는 것으로 나타났다. 반면 반송하지 않은 조건에서 1단의 질산성 질소 제거량은 총 질산성 질소 제거량의 약 78.5%로 1단 처리수를 반송한 경우와 11.2~11.7%P 차이가 났다. 또한 반송을 한 경우 후단의 질산성 질소 제거량이 반송을 하지 않은 조건보다 감소하였다. 이와 같은 결과는 반송을 통해 형성되는 난류로 인해 탈착되는 아연이 후단으로 공급되어 이용되기보다 1단의 질산성 질소 제거반응에 더 많이 재이용되기 때문으로 사료된다. 또한 반송을 할 경우 1단의 질산성 질소 제거량이 증가하기 때문에 후단으로 유입되는 폐수의 농도가 낮아져 후단의 질산성 질소 제거량이 감소하는 것으로 사료된다. 따라서 반송을 통해 질산성 질소 제거효율을 증가시켜 반응기의 부피를 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

3.3.2. 1단 처리수 반송에 따른 아연 투입량 조절 실험

아연 투입량에 대한 질산성 질소 제거효율을 Fig. 7에 나타내었다. 앞선 1단 처리수 반송 실험에서 1단의 제거효율이 증가하는 것을 통해 1단 환원전극에 부착되는 아연을 재이용할 수 있는 것으로 사료되었다. 이를 확인하기 위하여 1단 처리수를 10 Q로 반송하면서 아연 투입량을 이론적 투입량의 0.25배, 0.5배, 0.75배로 감소시켜 실험을 진행하였다. 가장 높은 질산성 질소 제거효율을 보인 조건은 아연을 0.75배로 투입한 조건으로 88.1% 질산성 질소 제거효율을 보였다. 이는 반송을 하지 않은 경우의 질산성 질소 제거효율 88.2%와 동일한 질산성 질소 제거효율이다. 즉, 1단 처리수를 10 Q로 반송하는 경우 환원

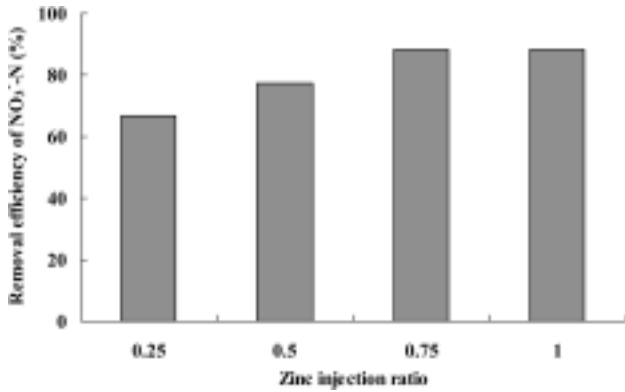


Fig. 7. Removal efficiency of nitrate on zinc injection ratio under 10 Q recycling.

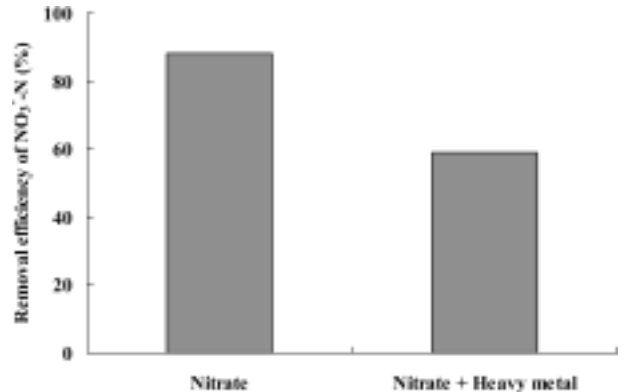


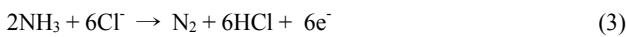
Fig. 8. Removal efficiency of nitrate on wastewater characteristics.

전극에 부착되어 있는 아연을 재이용할 수 있기 때문에 아연 투입량을 25% 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

3.4. 타물질과 동시 처리 실험

3.4.1. 암모니아성 질소와 동시 처리 실험

Table 4는 질산성 질소만을 처리할 때와 암모니아성 질소와 동시 처리할 때의 질산성 질소 제거효율, 암모니아성 질소 제거효율 및 에너지 소모량을 나타내었다. 대상시료에 염화암모늄과 황산암모늄을 이용하여 암모니아성 질소를 투입하여 실험한 결과, 질산성 질소 제거효율은 큰 차이를 나타내지 않았다. 암모니아성 질소 제거효율을 살펴보면 염화암모늄으로 암모니아성 질소를 투입한 조건이 황산암모늄으로 투입한 조건보다 더 높은 암모니아성 질소 제거효율을 보였다. 이 같은 결과는 염화암모늄의 염소 성분으로 인해 나타나는 것으로 염소 이온은 산화전극에서 차아염소산(HClO) 등과 같은 2차 산화제로 전환되고 이 산화제로 인해 암모니아성 질소가 식 (3)과 같이 제거된다.¹²⁾ 황산암모늄의 경우 2차 산화제를 생성할 수 있는 성분이 존재하지 않기 때문에 암모니아성 질소 제거효율이 미비하였다. 그리고 질산성 질소만을 처리할 때 보다 암모니아성 질소를 동시 처리할 경우 에너지 소모량이 적게 나타났다. 따라서 폐수 내 염소성분이 충분할 경우 암모니아성 질소와 질산성 질소를 동시 처리하여도 문제가 없을 것으로 생각된다.



3.4.2. 중금속과 동시 처리 실험

다음 Fig. 8은 질산성 질소만을 처리할 때와 중금속을

동시 처리할 때의 질산성 질소 제거효율을 비교한 것이다. 본 실험의 실제 대상폐수인 표면처리폐수에는 다량의 중금속이 존재한다. 이 같이 대상폐수에 중금속이 존재하는 경우 전기화학적 질산성 질소 처리에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 실제 표면처리폐수를 분석한 결과 크롬과 구리이온이 가장 많이 존재하여 대상시료에 크롬과 구리이온을 첨가하여 질산성 질소 제거효율을 살펴보았다. 실험 결과, 중금속 이온이 존재하는 경우 질산성 질소 제거효율은 58.9%로 중금속 이온이 존재하지 않은 조건의 질산성 질소 제거효율보다 약 29.3%p 감소하였다.

또한 중금속을 동시 처리할 경우 에너지 소모량 역시 질산성 질소만을 처리할 때보다 약 43.4 kJ 증가하였으며, Fig. 9와 같이 실험 완료 후 크롬과 구리가 각각 16.6%와 19.3% 제거되었음을 확인할 수 있었다. 이는 중금속이 첨가된 폐수를 전기화학적 처리하는 경우 중금속 이온들이 질산성 질소 제거반응에 필요한 전자를 소모하여 금속으로

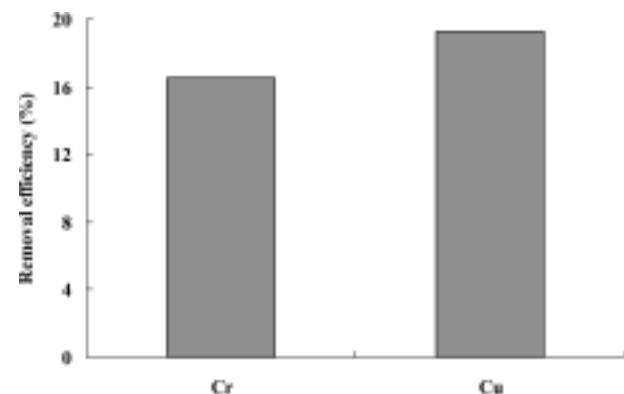


Fig. 9. Removal efficiency of heavy metal.

Table 4. Removal efficiency of nitrate and ammonia nitrogen and energy consumption on wastewater characteristics

	Removal efficiency of nitrate (%)	Removal efficiency of ammonia nitrogen (%)	Energy consumption (kJ)
Nitrate	88.17	-	357.43
Nitrate + Ammonium sulfate	86.04	3.54	313.37
Nitrate + Ammonium chloride	89.75	9.87	301.81

로 환원되어 침착하기 때문에 사료된다. 이와 같은 중금속으로 인한 질산성 질소 제거효율 저하는 반응기의 전류밀도를 증가시키거나 본 장치의 전단을 중금속 제거용으로 사용하고 후단을 반송을 통한 질산성 질소 제거용으로 사용하는 등의 방법으로 해결 가능할 것으로 생각한다.

4. 결론

본 연구 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 전극간격은 10 mm 간격이 가장 효율적이었으며 이 보다 좁아지면 농도분극현상이 발생하고 넓어지면 전극간 저항의 증가로 질산성 질소 제거효율과 에너지 효율이 감소하였다.

둘째, 환원제 실험 결과, 질산성 질소가 환원되는 과정에서 수소가 소모되기 때문에 수소가 높은 산성 조건에서 더 원활한 환원반응이 이루어졌다. 환원제 중 아연은 이론적 투입량보다 1.2배 투입한 경우 질산성 질소 제거효율이 증가하였으며 sulfamic acid는 투입량이 증가할 경우 에너지 소모량이 감소하였다.

셋째, 1단 처리수를 반송하면 반송하지 않은 조건보다 질산성 질소 제거효율이 증가하였으며 10 Q 이상의 반송은 제거효율 증가 효과가 없었다. 또한 반송을 통해 아연 투입량 및 반응기 부피를 감소시킬 수 있다.

넷째, 암모니아성 질소는 전기화학적으로 질산성 질소를 처리하는데 영향을 미치지 않았으며 폐수 내 염소성분이 충분할 경우 질산성 질소와 동시처리도 문제가 없을 것으로 사료된다.

다섯째, 중금속은 전자를 소모하여 환원하므로 질산성 질소 제거효율을 감소시켰으나 전류밀도의 상승 또는 본 장치의 전단을 중금속 제거용으로 사용하고 후단을 반송을 통한 질산성 질소 제거용으로 사용하는 방법 등으로 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 인하대학교의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. 송경근, 안규홍, 차호영, 박은수, 염익태, “저압 나노여과에 의한 니켈도금 세척수 중의 이온 제거 특성,” 대한환경공학회지, **20**(4), 593~605(1998).
2. Gray, N. F., *Drinking Water Quality*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 120~122(1994).
3. 정원중, 조순행, “중금속 - 시안 착염을 함유한 도금폐수의 처리,” 대한환경공학회지, **21**(6), 1095~1107(1999).
4. 환경부, 수질환경보전법 시행규칙(2007).
5. Shin, H. S., Kim, S. H., Jun, Y. K., Kim, S. D., and Kim, Y. K., “Effect of Electrolysis with Inorganic Coagulant on COD_{Cr} Removal of Sewage,” *Fall Conference on Environmental Engineering*, Gongju(1998).
6. 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*, Gwangju (1997).
7. U. S. Department of Energy's Los Alamos National Laboratory, <http://www.lanl.gov>, February(1999).
8. Szpyrkowicz, L., Naumczyk, J., and Zilio-Grandi, F., “Application of electrochemical process for tannery wastewater treatment,” *Toxicol. Environ. Chem.*, **44**(3), 189~202(1994).
9. 심주현, 강세한, 서형준, “전기화학적공정에서 질산성질소 제거효율 향상에 관한 연구,” 대한환경공학회지, **30**(2), 155~160(2008).
10. 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).
11. 심주현, 서형준, 김대환, “질소제거를 위한 금속표면 처리 폐수의 전기화학적 처리,” 한국화학공학회지, **45**(2), 190~196(2007).
12. Sasaki, K., Hisatomi, Y., “Oxidation and adsorption of ammonia on a platinized platinum electrode,” *J. Electrochem. Soc.*, **177**(6), 758~761(1970).