Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.25, No.5, pp.651-658, October, 2011

상하수도학회지, 논문
25권 5호, pp.651-658, 10월, 2011

영가철 충진 복극전해조를 이용한 질산성질소 및 대장균의 연속식 제거

Continuous Removal of Nitrate and Coliform using Bipolar ZVI Packed Bed Electrolytic Cell

정주영 · 박정호 · 최원호 · 박주양*

Jeong, Joo Young · Park, Jeong Ho · Choi, Won Ho · Park, Joo Yang*

한양대학교 건설환경공학과

(2010년 11월 12일 접수 ; 2011년 8월 22일 수정 ; 2011년 10월 4일 채택)

Abstract

Nitrate is a common contaminant in industrial wastewater and ground water. The maximum contaminant level set by EPA for nitrate of 10 mg/L as N. In this study, nitrate was removed using bipolar ZVI packed bed electrolytic cell that maximized the contact area between each electrode and contaminants under 600 V. Also this study investigates the simultaneously deals with removal of ammonia by operating air stripping tower. In addition to the air stripping also helped to precipitate iron ions to the form of iron oxides. Bipolar ZVI packed bed electrolytic cell was also effective in removing coliform by electrical power. In the continuous experiments for the simulated wastewater (initial nitrate for 25 mg/L as N), maximum 96.3% removal of nitrate was achieved in the applied 600 V at the flow rate of 6 mL/min.

Key words : Ammonia, bipolar electrolytic cell, coliform, nitrate, ZVI

주제어 : 암모니아, 복극전해조, 대장균, 복극전해조, 질산성질소, 영가철

1. 서 론

질산성질소는 질소 순환과정에서 무기이온인 NO_3^-로서 자연계에 존재하며 무기비료 사용, 부패한 동식물 혹은 분변, 생활하수, 공장폐수 등에서 환경 중으로 배출된다. 질산성질소는 화학적으로 불활성이지만 미생물의 작용 등으로 인해 환원될 수 있으며 물의 오염지표와 수역에서의 부영양화 지표로 사용된다. 세계적인 먹는물 기준으로 질산성질소는 50~100 mg/L정도이며, EPA에서는 최대오염농도를 10 mg/L as N으로 규정하고 있다 (Choi et al., 2009). 기존의 물리화학적 및 생물학적 처리방법 즉 응집, 침전 및 여과의 방법 등을 통한 질산성질소의 제거에는 한계가 있다고 알려져 있으며 (Zhou et al., 2007; Paidar et al., 2002), 상대적으로 비용이 많이 들고 처리공정이 복잡하며 설비의 규모가 거대하다는 단점이 있다. 이에 따라 최근 기존의 처리방법의 단점을 극복하고자 전기화학적 환원에 관련된 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 전기화학적 처리방법은 물리화학적 혹은 생물학적 처리방법과 비교하여 추가적인 화학약품의 첨가가 필요 없고, 부산물이 발생하지 않으며, 초기 투자비용이 적게 들고 설비가 소규모화 되는 장점이 있다 (Koparal and Oütveren, 2002).

한편 암모니아성질소의 기준치는 우리나라 먹는물 수질

* Corresponding author Tel:+82-2220-0411, Fax:+82-2220-1945, E-mail: jooypark@hanyang.ac.kr(Park, J.Y.)

기준으로 0.5 mg/L로서, 질산성질소보다 더 엄격하게 규제하고 있다. 수중의 암모니아성질소는 pH에 따라 암모늄 이온과 자유 암모니아로 존재하며, 알칼리 환경에서 자유암모니아의 분율이 높아지기 때문에 공기 중으로 탈기시킬 수 있는 여지가 있다. 탈기공정은 상대적으로 비용이 저렴하고 장비가 간단한 점 때문에 산업폐수의 전처리 등으로 많이 사용되고 있으며 암모니아를 효율적으로 탈기시킬 수 있다고 알려져 있다 (Ozturk et al., 2003). 또한 공기와의 접촉면적을 크게 할 수 있는 충진식 탈기탑은 암모니아의 제거 및 회수를 효율적으로 할 수 있다고 알려져 있다 (Djebbar and Naraitz, 1998). 하지만 장시간 운용 시 공기와 폐수에 포함된 금속이온의 반응으로 인해 충진물 표면에 scaling과 fouling이 발생하여 폐색이 일어날 수 있으며, 온도에 따라 효율이 달라지기 때문에 야외에서 운용 시 계절의 영향을 많이 받는 단점이 있다 (Quan et al., 2009).

본 연구에서는 영가철 충진 복극전해조를 이용하여 수중의 질산성질소를 전기화학적으로 환원시키고자 하였고, 이로 인해 생성된 암모니아성질소 및 유출수 내의 철 이온을 제거하기 위하여 탈기탑을 후단에 적용시켰다. 또한 부수적으로 대장균에 대한 전기적 살균효과도 확인해 보았다. 추가적인 약품의 투입이 필요 없기 때문에 제어가 간편하고 무인운전이 가능한 이 방법을 통하여, 본 논문에서는 질산성질소의 제거 거동 및 발생되는 부산물들의 처리효율을 평가하였다.

2. 영가철 충진 복극전해조

본 연구에서는 질산성질소의 제거를 위하여 영가철 충진 복극전해조(bipolar ZVI packed bed electrolytic cell)를 사용하였다. 여기서 복극전해조는 **Fig. 1**에 나타난 바와 같이, 양 극판 사이에 도전성 영가철 입자와 절연성 주문진규사가 일정한 비율로 혼합 충진된 형태가 적용되었다. 단극전해조에서 양극판과 음극판 사이에 동일한 크기의 전류가 흐르는 것과 비교하여 영가철이 충진된 복극전해조에서는 상대적으로 더 높은 전압과 낮은 전류가 필요하다. 높은 전압이 인가되었을 때, 각각의 영가철 입자가 전기적으로 분리되어 작은 전극과 같은 작용을 하게 되어 유효 전극면적이 극대화 될 수 있으며 전극 간격에 따라 상대적으로 낮은 전해질 조건에서 추가적인 전해질의 주입 없이 반응을 일으킬 수 있다 (Juvekar et al., 2009).

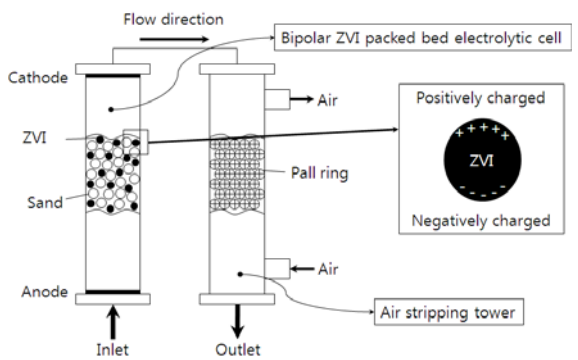


Fig. 1. Schematic of combined reactor and isolated effects of ZVI particles

주 전극에 전압이 인가되어 그 사이에 전기장이 형성되면, **Fig. 1**에 나타난 것처럼 충진된 도전성 철 입자의 양 끝단은 양극과 음극의 역할을 하게 되며 각각의 철 입자 극에서 전기분해 반응이 일어날 수 있다. 또한 본 실험에서는 전기적인 힘으로 오염물질을 환원시키기 때문에 영가철을 단순히 환원제로만 사용한 경우와 다르게 낮은 pH조건이 요구되지 않으므로 지속적인 산 주입이 필요 없다. 충진물과의 접촉면적도 넓으므로 부산물로서 생성되는 암모니아가 일부 탈기될 수 있는 효과도 가진다. 또한 전기분해에 의한 살균효과까지 기대할 수 있으므로 기존의 소독방법에서 문제가 되었던 염소계 관련 소독부산물의 발생을 일으키지 않는 장점을 가진다.

3. 실험 재료 및 방법

3.1. 실험 재료

영가철 충진 복극전해조 내 질산성질소의 농도 설정을 위하여 $NaNO_3$ (99%, Duksan)을 사용하였으며, 주 전극 양극에는 산화에 따른 전극소실을 방지하기 위해 반응성이 낮은 백금이 코팅된 니오븀 전극을 사용하였다. 주 전극 음극에서는 전극손실이 일어나지 않으므로 SUS304 전극을 사용하였다. 이 때 전극망은 반응기의 크기에 맞게 각각 가로 40 mm, 세로 80 mm, 두께 1 mm로 제작하였다. 제작된 복극전해조 반응기의 재질은 내약품성이 강한 아크릴 수지이며 크기는 높이가 625 mm, 가로 40 mm, 세로 80 mm이다. 충진물로는 (주)상아기공에서 구입한 구 형태의 영가철(지름 0.6 mm)과 (주)주문진규사에서 구입한 급속여과사(유효직경 0.8-1.2 mm, 균등계수 1.6 이하)를 사용하였다. 또한 반응기내 전압유지를 위해서 D.C. power supply (Maximum 600 V, current output 1.4 A, Sorensen, USA)를 사용하였다. 또한 복극전해조와 동일한 크기와 재질의 암모니아 탈기탑에는 (주)솔마로eng.에서 구입한 5/8 인치의 pall ring (PE, 공극율 87%, 표면적 340 m^2/m^3)이 충진되었다. 모든 실험은 상온에서 수행되었으며, 모든 물은 특별한 언급이 없는 이상 deionized water가 사용되었

상하수도학회지, 논문
25권 5호, pp.651-658, 10월, 2011

다. 실험에 사용된 영가철의 성분은 아래의 Table 1에 나타내었다.

3.2. 실험 방법

3.2.1. 영가철 충진 복극전해조를 이용한 질산성질소의 환원

실험에 사용된 질산성질소의 초기농도는 25 mg/L as N으로 하였다. 샘플 내에 존재하는 질산성질소 및 pH는 nitrate electrode (Orion-9700BNWP, USA), pH meter (Orion-8156BNUWP, USA)를 이용하여 측정하였다. 주 전극과 전선은 압착터미널을 이용하여 고정시켰으며 반응기 내부에 노출된 전선부위는 산화의 억제를 위하여 실험시마다 실리콘으로 방수코팅처리 하였다. 반응기 내 채널링 방지 및 층류 유지를 위해서 흐름은 연동펌프(Easy-load, Masterflex)를 이용하여 상향류 상태를 유지시켜 주었으며, 영가철과 주문진규사의 충진비는 1:1 (v/v)이었다. 충진할 때에는 먼저 주 전극과 철입자가 직접적으로 닿지 않도록 깊이 1 cm는 지름 0.3 mm 이하의 잔사만으로 충진하고, 그 이후부터 영가철 각 입자가 서로 붙지 않도록 영가철과 주문진규사를 번갈아가며 충진하였다. 실험에 사용된 모든 튜빙은 Masterflex□ 96410-25을 사용하였고, 반응조의 운영조건은 Table 2에 나타내었다.

3.2.2. Air stripping tower에서의 암모니아 탈기

부산물인 암모니아성질소를 제거하기 위해 후단에 탈기탑을 설치하였으며, 공기와의 접촉을 극대화시키기 위해 pall ring을 충진하였다. 유입되는 처리수의 유량은 10 mL/min이고 air compressor (Airssen, 2HP)를 통해 주입되는 공기량은 10 L/min으로 기액비(G/L ratio)는 1000으로 유지시켰다. 또한 탈기탑 내 균일한 공기주입을 위해서 원형의 에어스톤을 탈기탑 하단에 설치하였으며, pH 유지를 위한 추가적인 알칼리 주입은 하지 않았다. 질산성질소의 환원물질인 암모니아성질소를 분석하기 위해 phenate method (American Public Health Association, 1989, 4500-NH3 H)를 사용하였다. 이를 위해 phenol, sodium nitropusside(III), alkaline citrate, sodium hypochlorite와 반응하여 파란색으로 발색된 시료를 UV-VIS spectrophotometer (UV mini 1240, Shimadzu) 파장 640 nm, 빛의 통과거리 1 cm에서 측정하였다. 탈기탑 파트별 연결부위는 실리콘으로 방수코팅처리하였으며, 탈기탑의 운영조건은 Table 3에 나타내었다.

3.2.3. 철 이온의 침전제거

복극전해조를 통과한 유출수에는 눈으로는 식별할 수 없지만 영가철이 산화되면서 생성된 철 이온이 존재한다. 생성된 철 이온은 복극반응조 내에서 산소 및 수산화기와 접촉하여 산화철과 수산화철 형태로 1차 침전되며, 후단의 탈기탑에서는 공기 중의 산소와 접촉하여 산화철의 형태로 2차 침전이 이루어지게 된다. 여기서는 각 단계에서의 2가철과 총 철의 농도를 측정하기 위해 ferrozine method를 이용하였다. 이것은 채취한 샘플에 0.7 M HNO_3의 acid quench 용액과 10%의 ammonium acetate buffer

Table 1. Chemical component of zero valent iron

	Fe	C	Si	Mn	P	S
Chemical composition (%)	98.39~98.83	0.14~0.18	0.65~0.85	0.35~0.55	0.015	0.015

Table 2. Conditions of ZVI bipolar packed bed electrolyzer

Reactor volume	Porosity	Voltage	Flow rate	HRT
2000 mL	41%	600 V	6~12 mL/min	2~1 hr

Table 3. Conditions of air stripping tower

Tower volume	Porosity	Packing material	Gas flow rate	Liquid flow rate	G/L ratio
2000 mL	85%	Pall ring 5/8 inch	10 L/min	10 mL/min	1000

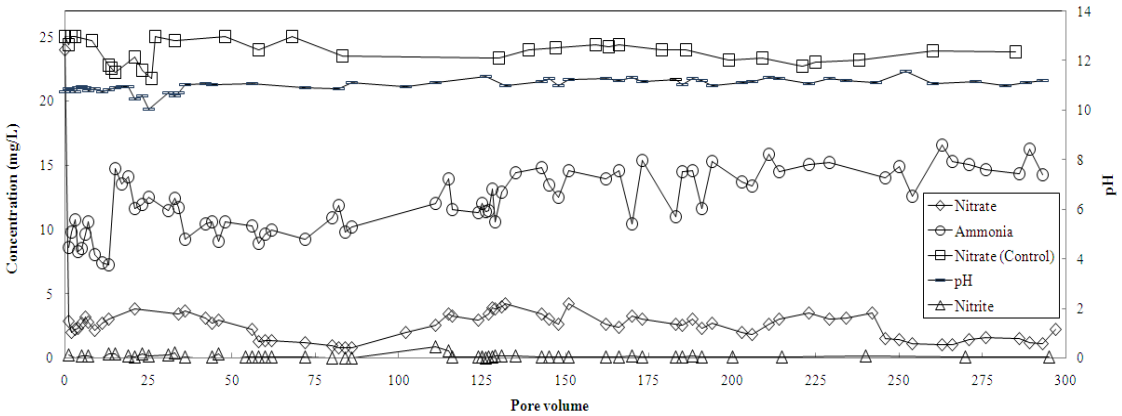


Fig. 2. Nitrate removal and ammonia production in continuous reactor

solution, ferrozine 용액과 10%의 hydroxylamin (as reductant)을 혼합하여 자주색으로 발색된 시료를 암모니아와 마찬가지로 파장 562 nm, 빛의 통과거리 1cm에서 측정하였다. 또한 반응기 내의 철 입자는 FESEM/EDS (SU70, Hitachi), 가속전압 15 kV 조건에서 분석하였다.

3.2.4. 대장균 및 일반세균의 분석

대장균 및 일반세균의 분석에는 22시간 이내에 일반식품, 가공식품 및 모든 공장 환경에서 대장균 검출이 가능한 3M petrifilm coliform count plate를 사용하였다. 분석방법은 접종 · 배양 · 계수의 3단계로 이루어져 있으며, 대장균 군체가 존재할 경우 배지 내에 붉은색으로 염색됨과 동시에 발생되는 이산화탄소 가스방울의 형태로 식별하였다. 또한 일반세균의 경우 가스방울 없이 붉은색 군체만으로 식별하였다. 본 실험에서는 살곶이다리 근처의 중랑천 샘플을 일정비율로 혼합하여 사용하였으며 살균효과 비교를 위해 3가지 조건– ① 오수를 혼합한 샘플(초기상태), ② 전압을 인가하지 않은 상태로 반응기를 통과시킨 샘플, ③ 전압을 인가한 상태로 반응기를 통과한 샘플 각각을 배양하여 본 반응조의 살균효과를 살펴보고자 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 질산성질소의 제거 특성

본 실험에서는 인가전압 600 V, 반응조 내 체류시간이 2시간이 되도록 초기 주입 유량을 6 mL/min으로 하였으며 시간에 따라 점차적으로 12 mL/min까지 증가시켰다. 이때, EBCT(Empty Bed Contact Time) 및 실제 체류시간을 나타내는 HRT(Hydraulic Retention Time)는 유량에 따라 각각 5.56~2.78 및 2~1 시간이었다. Fig. 2에 유출수에서의 질산성질소, 암모니아성질소, 아질산성질소의 값을 나타내었다. 초기 24.1 mg/L였던 질산성질소의 농도가 0.9 mg/L로 최대 96.3% 제거되었으며, 주문진규사와 영가철의 혼합물은 충진했으나 전압을 인가하지 않은 control과 비교해서 전압을 인가하였을 경우 유출수 중 잔류 질산성질소가 5 mg/L 이하로 안정적인 제거효율을 보여주었다.

한편 유출수의 pH는 음극에서 물이 전기분해됨으로 생성되는 수산화기 및 식 (1)와 같이 질산성질소가 전자를 받아 암모니아성질소로 환원되는 과정에서 발생하는 수산화기의 영향으로 10.5~11정도를 나타내었다. 중간산물인 아질산성질소(NO_2^-)의 형태는 실험 전 과정동안 0.1 mg/L 안팎으로 매우 적은양이 관찰되었는데, 이는 충분한 전기적 에너지가 가해짐으로 인하여 암모니아로의 전환이 완전하게 이루어 진 까닭이라 판단된다. 한편 인가전압을 100 V로 낮추었을 때는 유출되는 아질산성질소의 양이 1 mg/L까지 상승하였다.

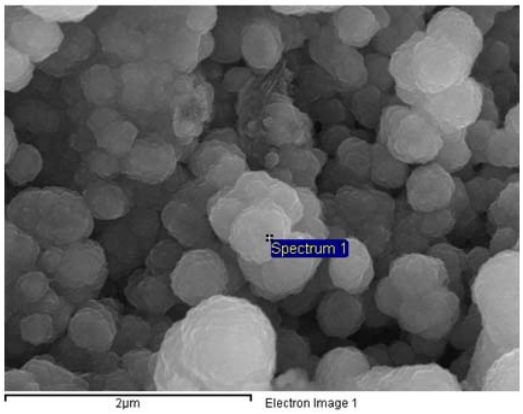
$$NO_3^- + 7H_2O + 8e^- \rightarrow NH_4^+ + 10OH^- \quad (1)$$

본 논문에서는 언급하지 않았지만, 인가전압 150 V와 300 V 조건에서 실험을 실시한 결과, 300 V 조건에서는 주입된 질산성질소의 약 절반정도가 제거되었고, 150 V 조건에서는 질산성질소가 거의 제거되지 않은 것으로 나타났다. 이는 낮은 전도도 조건에서 충분한 전기적 에너지가 각각의 철볼에 가해지지 않으면, 철볼의 양 극이 대전되지 않고 일반적인 단극식 전해조와 같이 거동함으로, 전기적 산화 · 환원이 일어나지 않는 것으로 사료된다.

4.2. 반응기 내 철의 거동

영가철 충진 복극전해조에서 전압 인가 시 각각의 영가철

상하수도학회지, 논문
25권 5호, pp.651-658, 10월, 2011



Element	Weight%	Atomic%
C	1.87	4.11
O	40.94	67.63
Al	0.81	0.79
Si	1.69	1.59
Fe	54.69	25.88
Totals	100.00	100.00

Fig. 3. FESEM micrograph and EDS results

입자의 양극부분은 산화되어 이온의 형태로 존재한다. 용해된 철 이온은, 수중에 존재하는 산소 및 양극에서 물의 전해로 인해 생성되는 산소와 결합하여 FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4 등의 형태로 침전되며, 음극에서 질산성질소가 암모니아성질소로 환원됨에 따라 생성된 OH^-와 일부 결합하여 $Fe(OH)_2$, FeOOH 등으로도 침전하는 것으로 보여진다 (Huang and Zhang, 2005). **Fig. 3**에는 실험이 종료된 후, 반응기 내 충진되어있던 철 입자의 표면을 FESEM/EDS 분석한 모습을 나타내었다.

반응기 내에서 침전되어 제거되지 못하고 유출되는 총 철은 1 mg/L 안팎이며, 후단의 탈기탑에서 공기 중 산소와 접촉함으로 충진된 pall ring 표면에 산화철 형태로 대부분 필터링되는 것으로 보여진다. 그 결과 유출수에서는 철 농도가 검출되지 않았다 (**Fig. 4**).

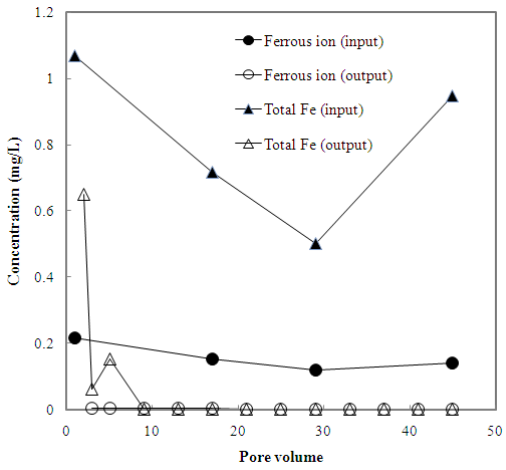


Fig. 4. Various concentrations of total Fe and Fe^{2+} in air stripping tower

4.3. 암모니아 탈기 특성

영가철 충진 반응조에서 질산성질소의 제거에 따른 환원물질로 암모니아성질소가 생성 되었으며 이 때 pH는 10.5 이상으로 나타났다. 수중에 존재하는 암모니아성질소는 pH에 따라 암모늄이온(NH_4^+) 및 자유암모니아(NH_3)로 존재하게 되는데, 식 (2)와 **Fig. 5**에서와 같이 10.5 안팎의 높은 pH에서는 90% 이상이 자유암모니아로 존재함을 알 수 있다. **Fig. 6**에서는 탈기탑에서의 암모니아성질소 제거효율을 나타내었다. 유입수의 암모니아성질소의 농도는 15~20 mg/L이고, 유출수에는 약 40%가 제거된 10 mg/L 안팎으로 나타났다. 실제 제거효율이 이론값보다 낮은 이유는 실시간으로 암모니아가 탈기됨으로 인해 pH가 10.5에서 8.5까지 감소하면서 암모늄이온의 분율이 점차 증가하였고 이것이 탈기능의 감소로 이어진 것으로 판단된다. 따라서 알칼리성분을 지속적으로 주입함으로 pH를 높게 유지시켜준다면, 지속적인 제거효과를 얻을 것으로 사료된다.

$$\text{(At low pH)}\ NH_4^+ + OH^- \leftrightarrow \text{(At high pH)}\ NH_3 + H_2O \quad (2)$$

또한 환원으로 제거되는 질산성질소와 생성되는 암모니아성질소의 질량보존이 이루어지지 않는데, 이는 복극전해조 내에서 물이 전기분해 됨으로 발생하는 열과 기포로 인하여 후단의 탈기탑으로 유입되기 전에 이미 일부 암모니아가 탈기되어 유출되는 것으로 보여진다.

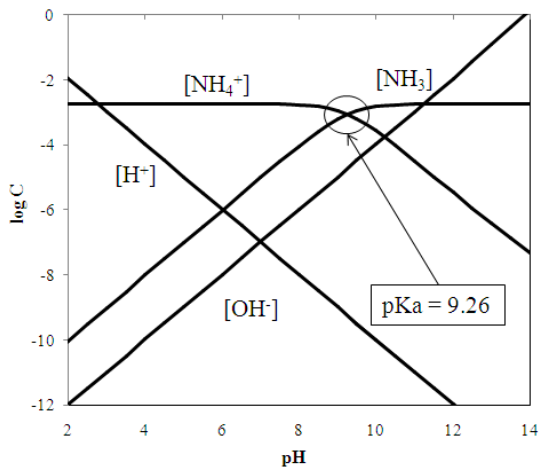


Fig. 5. Logarithmic concentration diagram for ammonia nitrogen(Visual MINTEQ ver. 3.0 beta)

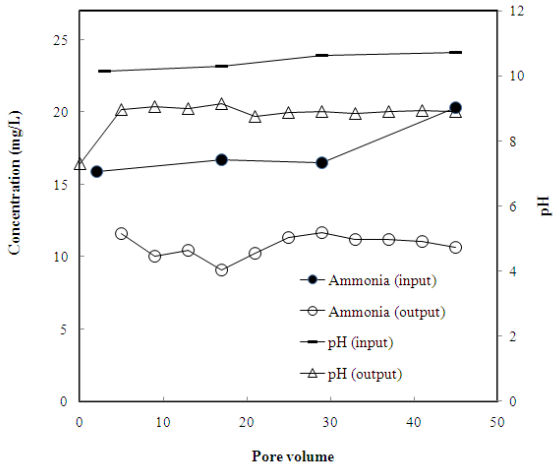


Fig. 6. Concentrations of ammonia and pH in air stripping tower

4.4. 대장균 및 일반세균 살균효과

복극전해조에 의한 수중의 대장균 및 일반세균의 살균효과을 알아보기 위해서 중랑천의 샘플을 멸균된 증류수와 1:20 (v/v)로 희석한 뒤, 반응기를 통과시켜 얻어진 샘플을 3M petrifilm배지에 1 mL 접종하여 incubator에서 35℃로 24~48시간 배양하여 생성된 붉은색 군체를 계수하였다.

Table 4에서는 영가철 충진 복극전해조에서 인가전압의 유무에 따른 일반세균 및 대장균의 제거효율을 나타내었다. 인가전압 없는 경우에도 일반세균 및 대장균은 각각 96% 및 81% 제거되었다. 이는 충진된 영가철 및 모래입자의 표면에 흡착되어 제거된 것으로 보여진다. 하지만 음용수 기준인 일반세균 100 CFU/1mL 이하, 대장균 불검출 조건은 만족하지 못하였다. 반면 전압을 가한 경우 1 pore의 샘플부터 일반세균 및 대장균이 검출되지 않았다. 이러한 효과는 Fig. 7에 나타낸 것처럼 2가지 메인 메커니즘을 생각해 볼 수 있는데, 대장균 및 일반세균이 양극 표면에 전기적으로 흡착되어 전극과 균 간에 직접적인 전자교환 반응에 의해 불활성화 되는 것이 첫 번째 이고, 두 번째로는 전기분해 과정 중 양극에서 OH radical이 생성되어 일반세균 및 대장균을 간접적으로 살균하는 효과 때문으로 보여진다(Jeong et al., 2007). Fig. 8에는 오수를 혼합한 샘플 배지, 전압이 인가되지 않은 반응조를 통과한 샘플 배지, 전압을 인가한

Table 4. The number of total coliform and general bacteria

	General bacteria (CFU / 1 mL)	2 pore	4 pore	6 pore	8 pore	10 pore
With voltage	5066	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Without voltage		133	138	180	150	130

	Total coliform (CFU / 1 mL)	2 pore	4 pore	6 pore	8 pore	10 pore
With voltage	43	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Without voltage		7	5	8	7	3

	Fecal coliform (CFU / 1 mL)	2 pore	4 pore	6 pore	8 pore	10 pore
With voltage	20	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Without voltage		3	3	4	5	2

N.D. = Not Detected

상하수도학회지, 논문
25권 5호, pp.651-658, 10월, 2011

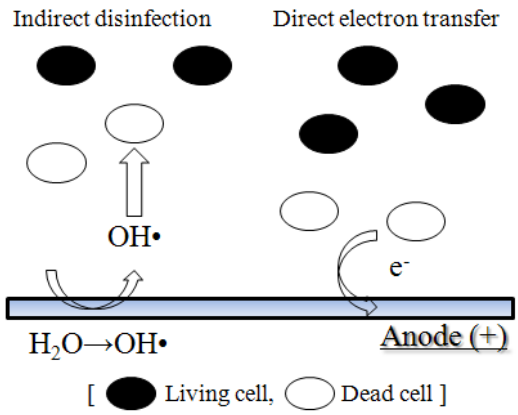


Fig. 7. The two types of inactivation of coliform/ bacteria in the electrochemical disinfection

반응조를 통과한 샘플 배지의 모습을 나타내었다. 전압을 가해준 조건에서는 대장균 및 일반세균이 검출되지 않았다.

5. 결 론

1. 영가철 충진 복극전해조를 이용하여 600 V 조건에서 초기농도 약 25 mg/L의 질산성질소의 연속식 제거실험을 한 결과 유출수 내 잔류량 5 mg/L 이하 유지, 유량 6 mL/min 조건에서 최대 96.3%의 제거효율을 관찰할 수 있었다. 이 때 아질산성질소의 농도는 0.1 mg/L 안팎을 유지하였으며 암모니아성질소의 농도는 10~15 mg/L로 나타났다.
2. 반응기 내부 충진된 철 입자의 양극에서 산화되어 생성되는 철 이온은, 반응기 내부에서 산화철의 형태로 일부 침전되었으며, 유출되는 약 1 mg/L의 철은 후단의 탈기탑에서 내에 충진된 pall ring 표면에 대부분 침전되어 필터링 되었다.
3. 질산성질소의 환원에 의해 생성되는 암모니아성질소는 복극전해조 내에서 1차 탈기가 일어나며, 후단의 탈기탑에서 2차 탈기가 이루어지나, 추가적인 알칼리의 주입 없이는 pH의 감소로 인해 효율이 감소하는 것으로 나타났다.
4. 유입수에 존재하는 대장균 및 일반세균은 전기적인 에너지 없이도 복극전해조 내 충진물 입자에 표면흡착 되어 일부 제거되는 것으로 나타났으며, 전압인가 시 대장균 및 일반세균이 검출되지 않았다. 이는 전극과 균 사이의 직접적인 전자교환 및 OH radical 생성으로 인한 간접적인 살균효과가 작용한 것으로 판단된다.

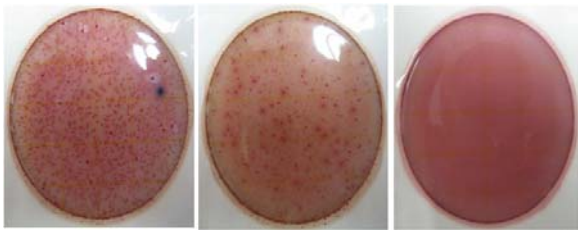


Fig. 8. Incubating cultures on 3M petrifilm. Distilled water added wastewater(left), after passing through the reactor without voltage(center), after passing through the reactor with 600 V at 1 pore volume(right)

감사의 글

본 연구는 서울시 산학연 협력사업인 '특허기술상품화 기술개발 지원사업(과제번호 PA100095)'의 지원을 받아 이루어진 것으로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

Choi, J.-H., Maruthamuthu, S., Lee, H.-G., Ha, T.-H. and Bae, J.-H. (2009) Nitrate removal by electro-bioremediation technology in korean soil, *Journal of Hazardous Materials*, **168**(2-3), pp. 1208-1216.

Djebbar, Y. and Narbaitz, R. M. (1998) Improved Onda correlations for mass transfer in packed towers, *Water Science and Technology*, **38**(6 pt 5), pp. 295-302.

Huang Y. H. and Zhang T. C. (2005) Enhancement of nitrate reduction in Fe^0-packed columns by selected cations, *Journal of Environmental Engineering*, **131**(4), pp. 603-611.

Jeong, J., Kim, J. Y., Cho, M., Choi, W. and Yoon, J. (2007) Inactivation of Escherichia coli in the electrochemical disinfection process using a Pt anode, *Chemosphere*, **67**(4), pp. 652-659.

Juvekar, V. A., Patil, R. S., Gurumoorthy, A. V. P. and Contractor, A. Q. (2009) Analysis of multiple reactions on a bipolar electrode, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **48**(21), pp. 9441-9456.

Koparal, A. Sava and Öütveren, U. B. (2002) Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation, *Journal of Hazardous Materials*, **89**(1), pp. 83-94.

Ozturk, I., Altinbas, M., Koyuncu, I., Arikan, O. and Gomec-Yangin, C. (2003) Advanced physical-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates, *Waste Management*, **23**(5), pp. 441-446.

Paidar, M., Bouzek, K. and Bergmann, H. (2002) Influence of cell construction on the electrochemical reduction of nitrate, *Chemical Engineering Journal*, **85**(2-3), pp. 99-109.

Quan, X., Wang, F., Zhao, Q., Zhao, T. and Xiang, J. (2009) Air stripping of ammonia in a water-sparged aerocyclone reactor, *Journal of Hazardous Materials*, **170**(2-3), pp. 983-988.

Zhou, M., Fu, W., Gu, H. and Lei, L. (2007) Nitrate removal from groundwater by a novel three-dimensional electrode biofilm reactor, *Electrochimica Acta*, **52**(19), pp. 6052-6059.