

생물학적 처리수 재이용을 위한 전기화학 기술의 적용

장 구 영

한국의국어대학교 환경학전공

(2008년 1월 14일 접수, 2008년 4월 1일 채택)

Application of Electrochemical Technology for Reusing Biologically Treated Water

Guyoung Kang

Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies

ABSTRACT : Laboratory experiments were conducted to investigate disinfection as well as removal of color and residual organics from reclaimed municipal wastewater by electrochemical processes with Nb/Pt anode installed. RNO was rapidly bleached by OH· and the second order rate constants of RNO removal were $\frac{0.223 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$, $\frac{1.679 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$ and $\frac{2.322 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$ with for 5 A, 10 A, and 15 A, respectively, with r^2 of > 96%. In batch electrochemical processes, after 15 min at currency of 15 A and initial pH of 5, 7.5 and 9, COD_{Mn} was below 4 mg/L, color unit below 5 degree and general bacteria was not detected, the concentration of which are suitable for drinking water regulation. In the continuous electrochemical process, with HRT of 3.7~49.2 min, free chlorine were 0.2~0.7 mg/L, general bacteria was not detected, color unit below 5 degree and THMs was 0.017 mg/L. Therefore, electrochemical process with Nb/Pt anode was employed satisfactory to meet for reusing biologically treated water as well as disinfection.

Key Words : Electrochemical, Hydroxyl Radical, RNO, Disinfection, THMs

요약 : 본 연구는 생활하수 최종처리수의 색도, 잔류 유기물질 제거 및 소독에 관한 연구를 Nb/Pt Anode 전극으로 구성된 전기분해장치를 이용하여 수행하였다. RNO는 OH·에 의하여 빠르게 탈색시키며, 전류세기 5 A, 10 A, 15 A에서 RNO의 2차 분해속도는 각각 $\frac{0.223 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$, $\frac{1.679 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$, $\frac{2.322 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$ 로 96% 이상의 r^2 조사되었다. 회분식 전기분해장치에서 전류세기 15 A와 초기 pH 5, 7.5, 9일 때 15분 후 COD_{Mn} 농도는 4 mg/L 미만, 색도는 5도 미만, 일반세균은 불검출로 먹는물 수질 기준값으로 조사되었다. 전기분해 연속 시스템의 HRT 3.7~49.2분에서 유리염소는 0.2~0.7 mg/L, 일반세균은 불검출, 색도는 5도 미만과 THMs는 0.017 mg/L이다. 그러므로 Nb/Pt anode 전기분해 공정은 소독뿐만 아니라 생물학적 처리수의 재이용 기술로 적용될 수 있다.

주제어 : 전기분해, 수산화 라디칼, RNO, 소독, THMs

1. 서론

산업화와 인구 집약적 도시화는 생활용수 사용량이 급격히 증가하면서 물 부족과 깨끗한 수계관리에 대한 종합적 물 관리 정책 및 생활하수 재사용에 대한 요구가 높아지고 있다. 특히 생활하수 재사용을 위하여 질소 및 인 제거를 위한 고도처리기술로 생물학적 분리막(MBR)에 많은 연구가 수행되고 있다.^{1~3)} 이러한 고도 하수처리 시스템에서 방류수질은 법규 이내로 처리가 이루어지고 있지만, 처리수내 미량의 미분해 유기물질로 인한 MBR 막오염 및 색도 증가와 염소소독 시 trihalomethane(THMs)이 생성되는 등의 단점이 있다.^{4,5)}

2003년 1월 1일부터 하수처리장 방류수 수질기준에 영양염류와 대장균 항목까지 신설되어 염소계 소독설비와

자외선 소독설비가 설치 운영되고 있고, 염소계 소독에 의한 건강에 유해한 반응 생성물인 THMs 으로 인해 자외선 소독 설비가 증가되고 있는 추세이다. 그러나 하수 최종 처리 수내 faecal coliforms는 E. coli. 보다 많은 자외선 조사량이 필요하여 설치비 및 관리비 증가에 대한 단점을 가지고 있다.⁶⁾ UV 소독은 소독 부산물 THMs가 발생하지 않는 장점은 있으나 방류수 SS는 UV관 벽면에 스케일을 형성시켜 소독 효율이 저하되고, 처리수내 색도 원인물질인 미량의 난분해성 유기성 물질 제거에는 불충분한 실정이다.

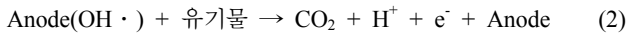
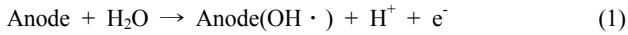
최근 고도폐수처리 기술로 전기분해를 이용한 난분해성 유기물질(Brilliant Blue 염료, Dihydroxybenzoic acid, phenol, pentachlorophenol, 및 nonylphenol polyethoxylate)의 분해 연구가 활발하고, 전기분해 장치 내 Cl⁻ 존재 시 유리염소인 차아염소산(HOCl)과 차아염소산이온(OCl⁻)이 생성되어 Bacillus subtilis spores 불활성화 소독 효과에 대하여 보고되었다.^{7~10)} 또한 전극표면에서 수산화 라디칼(OH·)이

† Corresponding author
E-mail: kanggy@hufs.ac.kr
Tel: 031-330-4269

Fax: 031-330-4529

Ti/RuO₂-TiO₂ 전극에서 발생되며,¹¹⁾ 염소 및 오존에 의한 세포 사멸효과 보다 좋은 것으로 보고되었다.¹²⁾

전기분해는 전극에 전기를 공급하면 OH·이 anode 전극 표면에 생성되어 유기물을 직접적으로 산화시키는 전기화학 반응식 (1), (2)와 같으며,^{13,14)}



간접 산화반응은 전해질 Cl⁻이 전기분해 시 유리염소가 생성되어 탈색과 소독 효과능이 향상 되었다고 보고되었다.^{7,15)} 따라서 생활하수 처리수내 잔류유기물 처리와 소독이 동시에 가능한 전기분해 기술 적용 타당성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 니오브/백금(Nb/Pt) anode 전극이 설치된 전기분해장치에서 OH·에 의하여 분해되는 N,N-Dimethyl-4-nitroso aniline(RNO) 분해와 생활하수의 생물학적 처리수 pH 변화에 따른 처리특성을 회분식 반응기에서 고찰하였고, 연속식 전기분해장치를 사용하여 생활오수에 대한 생물학적 처리수의 재이용, 소독 및 소독 부산물 THMs 농도에 대한 수질평가로 Nb/Pt anode 전기화학적 기술의 적용성을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 전극접촉 전기분해 장치

전기분해장치는 내경 20 cm 높이 10 cm인 아크릴 원통으로 제작하였고, 전극은 직경 12 cm 니오브(Nb) 망에 백금(Pt)를 입힌 anode 전극 2장과 SUS 316 재질인 cathode 1장을 두께 1 mm인 PE 재질 망사구조를 사이에 두고 설치하였다. 전극을 고정하는 고정판은 SUS 316 두께 10 mm로 제작하여 전극장치의 cathode로 사용하였다. cathode와 anode의 투시면적은 망사구조의 공극을 고려하지 않고 직경 12 cm인 원형 단면적 113 cm²로 유체가 통과할 수 있는 망사구조이고 전기분해가 이루어지는 anode 전극 총

면적은 452 cm²이다. 조합된 전극은 Fig. 1과 같이 아크릴 반응조내 설치하고, Masflex 펌프(Cole-Parmer, USA)를 이용하여 2 L/min.으로 순환시켰다.

2.2. 전기분해 장치 내 OH· 생성

Nb/Pt anode 전극과 SUS cathode 전극으로 구성된 전기분해 장치의 주요 촉매 기작은 전기화학반응식 (1), (2)와 같이 anode 전극 표면에 OH·이 발생하여 유기성 물질이 전극면에 접촉 순간 산화되고 있으며, 전극 표면에서 발생된 OH·생성은 직접적으로 분석을 할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 OH·발생의 간접적인 증명으로 Fig. 1과 같이 회분식 전기분해장치 내 전해질 NaCl을 첨가하여 초기 Cl⁻ 농도 200 mg/L와 OH·에만 산화되어 탈색되는 RNO 5 mg/L을 1 L로 제조하여 반응조에 넣고 균일 혼합 후 전류세기를 5 A, 10 A, 15 A로 운전하여 RNO 흡광도 변화를 UV 흡광광도계(UV-1650PC, Shimadzu, Japan)로 분석하였다.¹⁵⁾ 대조구 실험은 수용액내 전해질로 Cl⁻ 농도 200 mg/L와 RNO 5 mg/L에 관한 RNO 흡광도 변화 실험으로 1) 전원 공급 없이 운전, 2) 전류세기 15 A에서 5분 동안 생성된 유리염소에 전원을 공급하지 않은 상태에서 초기 RNO 5 mg/L를 주입한 뒤 RNO흡광도 변화와, 3) OH·포착제로 알려진 dimethyl sulfoxide(DMSO) 1,000 mg/L를 첨가한 후 전류세기 15 A로 운전하고 anode 전극표면에서 OH·를 포착하여 RNO 탈색을 흡광도 변화로 조사 하였다.

2.3. 생물학적 처리수의 전기분해

H대학 창업센터에서 발생하는 생활하수를 실험실에서 혐기-무산소-호기성 나선형 생물막 시스템(A2SFS)으로 처리된 처리수를 전기분해 장치 원수로 사용하여 생활하수 재이용과 소독효과를 조사 하였고, 전기분해 장치에 원수로 사용된 A2SFS 처리수질은 3회 분석 평균값(표준편차)로 11(0.9) mg/LPO₄⁻³-P와 일반세균 5.2 × 10⁵(2.1 × 10³) CFU/mL이며, 하수도 시행규칙 제 6조 제1항 방류수 수질기준 값 이하인 COD_{Mn} 13(1.3) mg/L, NO₃⁻-N 17(0.2) mg/L, 색도 40(1.3)도 및 pH 7.5(0.1)이었다.

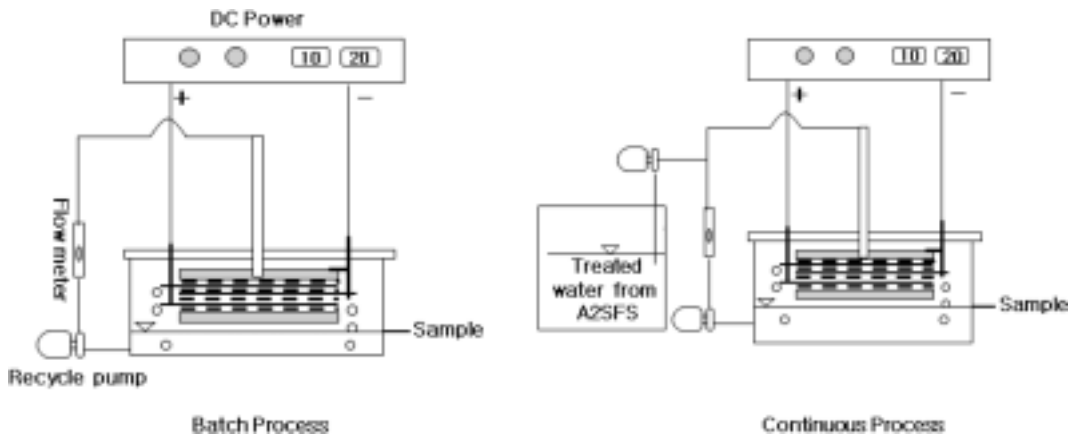


Fig. 1. Schematic diagrams of the electrochemical process.

Table 1. Analytical condition for THMs in the GC

GC Model	GC 6890, Agilent Technologies Co., USA
Injector	1077 split/splitless injector
Column	RTX624 150 m × 530 μm × 3 μm
Detector	ECD
Purge & Trap Concentrator	Tekmar 3000
Injector Temperature	180 °C
Column Temperature Program	50 °C(2 min)→180 °C(6 min), 8 °C/min
Detector Temperature	ECD - 290 °C

생물학적 A2SFS 처리수의 전기분해처리는 회분식 실험과 연속식 실험으로 진행하였다. 회분식 실험은 전기분해 처리 시 pH의 영향을 조사기 위해 원수 pH 7.5를 H₂SO₄와 NaOH로 5.0, 9.0으로 조정 한 후 전류세기를 15 A로 고정하고 각각 90분 동안 운전하였다. 연속 전기분해 실험은 전류세기 15 A와 전극 하단부 반응조 용량을 0.942 L로 유지하고, 유입유량 19.2, 34.7, 81.9 및 255.7 mL/min로 전기분해 장치를 운전 하였다.

전기분해 후 수질분석 항목 COD_{Mn}, NO₃⁻-N, PO₄⁻³-P, 색도, 유리염소는 표준 수질 시험방법으로 분석하고,^{16,17)} 연속식 실험에서 정상상태일 때 THMs은 Purge & Trap 농축기(Tekmar 3000, Tekmar Co., U.S.A.)와 RTX624 Capillary 컬럼이 설치된 가스크로마토그래프(GC 6890, Agilent, U.S.A.)를 사용하여 Table 1과 같이 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Anode 전극표면에서 생성된 OH·에 의한 RNO 흡광도 변화

Fig. 2(a)는 회분식 전기분해장치를 사용하여 전류세기 15 A와 전해질 Cl⁻ 200 mg/L 수용액 상에서 0, 2, 5, 20분 동안 anode 전극 표면에 생성된 OH·이 RNO 물질을 산화시키는 흡광도 변화로, 초기 RNO는 440 nm 파장에서 최대 흡광도 0.924를 나타내고 있다. 전류 공급 후 2분, 5분, 20분 후 440 nm 파장의 흡광도는 빠르게 소멸되어 노란색의 RNO 물질이 Nb/Pt anode 전극 표면에서 산화력이 강한 OH·과 반응하여 투명하게 탈색시켰다. Fig 2(b)는 전기분해 시 OH·에 의한 RNO 탈색을 확증기 위한 대조구 실험으로 OH· 포착제 DMSO를 초기에 혼합하고 5분 동안 전기분해 후 RNO 최대흡광도는 440 nm 파장에서 0.429로 DMSO 없는 경우 흡광도 0.059보다 높은 흡광도를 보여 주었으므로, Nb/Pt anode 전극표면에 생성되는 OH·과 DMSO가 반응하여 RNO 직접 산화력을 저감시키고 있음을 확인하였다. RNO 첨가없이 전해질만 넣은 뒤 5분 동안 전기분해를 운전하여 약 6 mg/L 유리염소가 생성된 후 전기 공급 없이 RNO를 첨가 하고 5분 동안 반응 후에 RNO 최대 흡광도는 파장 440 nm에서 400 nm로 변화되었으며 붉은색으로 변화되었다. 이는 유리염소에 의하여 RNO는 탈색 되지 않고 유리염소와 결합된 붉은색의 물질

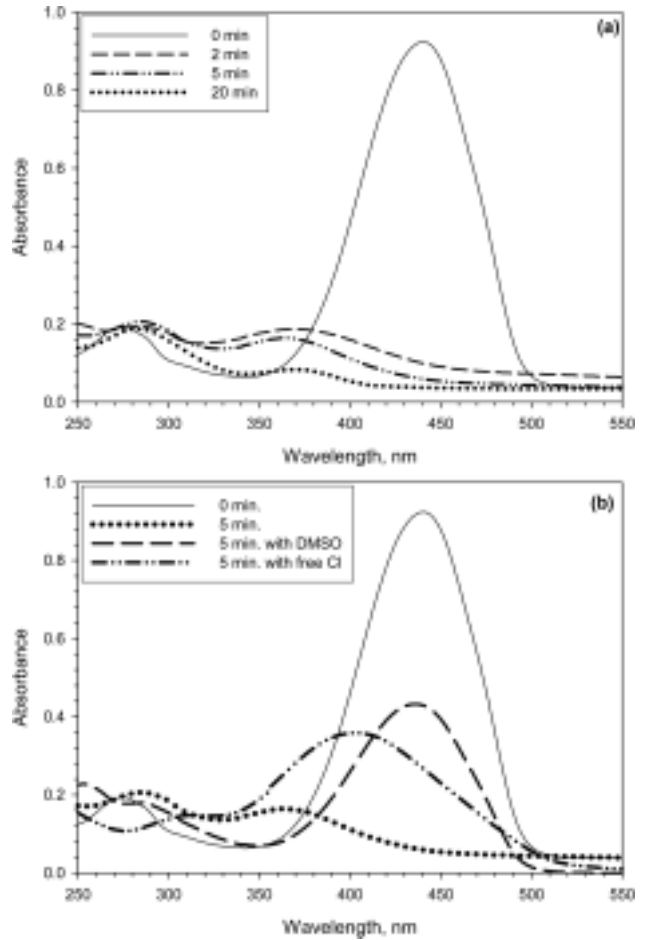


Fig. 2. UV spectrum of RNO during operation of the electrochemical process in batch experiment. (a): RNO spectrum at 15 A, (b): RNO spectrum with DMSO scavenger and free Cl⁻ only at 15 A.

로 전환되었음을 보여주는 것이다. 그러므로 Nb/Pt anode 전극은 전기분해 시 anode 전극표면에서 식 (1)과 (2)와 같이 산화력이 강한 OH·을 생성되어 RNO를 노란색에서 직접 산화 분해 기작에 의하여 투명하게 탈색이 이루어지고 있음을 확인 하였다.^{13,14)}

RNO 5 mg/L과 전해질 Cl⁻ 200 mg/L 수용액 상에서 전류세기 5, 10, 15 A로 20분 동안 운전 결과 anode 전극 표면에서 발생된 OH·가 RNO를 직접산화 시키는 분해율의 결과는 Fig. 3과 같다. Nb/Pt anode 전극은 5~15 A 전류세기 범위에서 전류세기가 증가할수록 RNO 분해가 빠르게 진행되고, 5분 만에 anode 전극표면에서 발생된 OH·에 의하여 RNO는 투명하게 탈색 되었다. 대조구로 OH·포착제 DMSO를 혼합 후 전기분해 시 anode 전극표면에서 생성된 OH·가 DMSO에 포착되어 RNO 분해가 저감하였고, 유리 잔류염소 만으로는 RNO 물질은 분해되지 않고 붉은색으로 전환되었다. Fig. 3에서 초기부터 5분 동안 전류세기 5, 10, 15 A에서 RNO 분해를 2차 반응으로 가정하여 $\frac{1}{RNO}$ 와 시간에 대한 결과는 Fig. 4와 같고, 전류세기

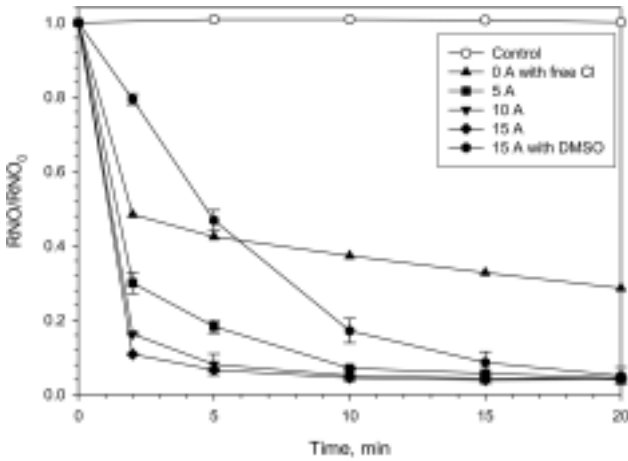


Fig. 3. Electrochemical bleaching of 5 mg/L RNO during operation in the batch electrochemical process at different currents(0A: initial free chlorine 6 mg/L).

에 따른 RNO 분해속도는 각각 $\frac{0.223 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$, $\frac{1.679 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$, $\frac{2.322 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$ 로 96% 이상 높은 상관관계인 r^2 을 보여 주었다. 전류세기 15 A에서 OH· 포착제 DMSO 1,000 mg/L 첨가 한 경우 anode 전극에서 생성되는 OH· 일부가 포착되어 RNO 분해속도는 $\frac{0.052 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$ 로 DMSO가 없는 경우보다 약 44배 분해 속도가 저감하였다. 이는 Nb/Pt anode를 이용한 전기분해장치에서 anode 전극 표면에서 OH· 생성은 전류세기에 영향을 받고 있으며, 전류세기가 증가할수록 RNO 유기물질 분해가 빠르게 진행되며 anode 전극 표면에서 OH· 생성이 증가되기 때문이라고 판단된다.

3.2. 생물학적 처리수의 전기분해장치 운전

A2SFS 처리수 pH는 7.5이고, 이 처리 수에 H₂SO₄와 NaOH로 초기 pH를 5와 9로 조정 한 후 회분식 전기분해 장치 내 전류공급 장치를 15 A로 90분 동안 운전한 결과는 Fig.

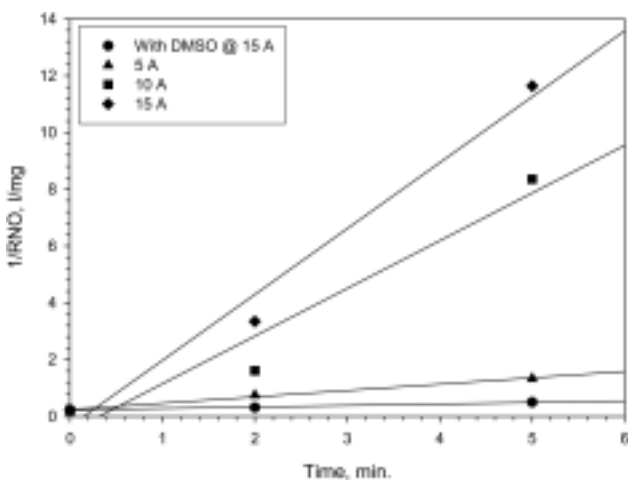


Fig. 4. RNO disappearance in the batch electrochemical process at different currents.

5와 같다. COD_{Mn} 농도는 초기 pH에 의한 유기물 제거에 영향이 없이 15분 후 COD_{Mn} 농도는 4 mg/L 미만으로 조사되었고, 색도는 먹는물 수질 기준인 5도 미만과 일반 세균은 불검출로 나타났다. Nb/Pt anode 전극에 의한 전기분해는 pH 변화가 anode 전극표면에서 OH· 생성에 영향을 주지 않고 잔류유기물과 색도가 제거되며 동시에 짧은 HRT 세포막을 파괴하여 일반세균을 사멸 시키는 소독 효과를 보여주었다.¹²⁾

Fig. 6에서 PO₄³⁻-P는 생물학적 A2SFS 처리수내 11 ± 0.9 mg/L로 전기분해 후 초기 pH 5.0을 제외하고는 15분 후 약 64%가 처리된 4 mg/L 이하로 조사되었다. 이는 전기분해에서 예상치 못한 결과로 A2SFS 처리수내 Ca²⁺과 PO₄³⁻-P가 반응하여 pH 7.5와 pH 9로 운전 시 전압에 관계없이 PO₄³⁻-P는 수용액 상에서 HPO₄²⁻로 전환되어 수용액상 잔류된 Ca²⁺이온과 결합되어 CaHPO₄ 침전물로 제거 되고, pH 5에서는 H₂PO₄가 우점물질로 산성 조건에서 CaHPO₄ 침전물 형성이 낮기 때문인 것으로 사료되며 전기분해 방법에 의한 인의 제거에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.¹⁵⁾

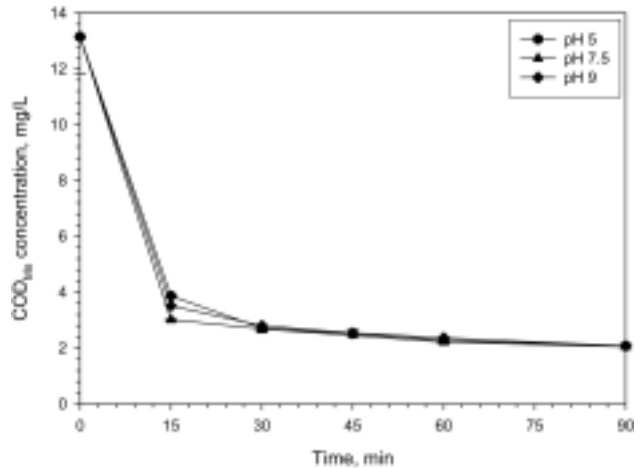


Fig. 5. COD_{MN} concentration vs. time at 15 A in the batch electrochemical process.

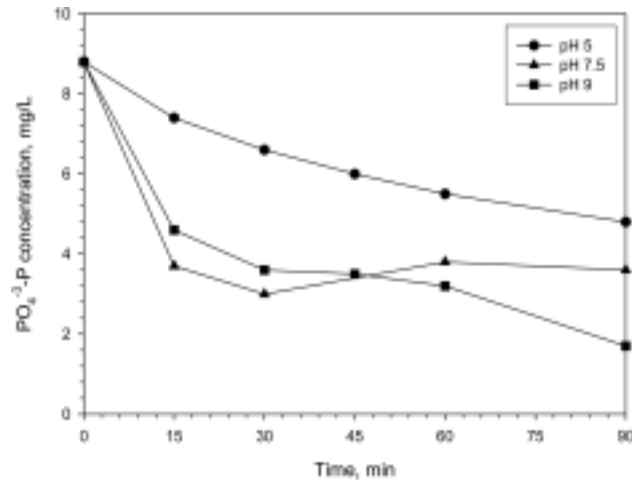


Fig. 6. PO₄³⁻-P concentration vs. time at 15 A in the batch electrochemical process.

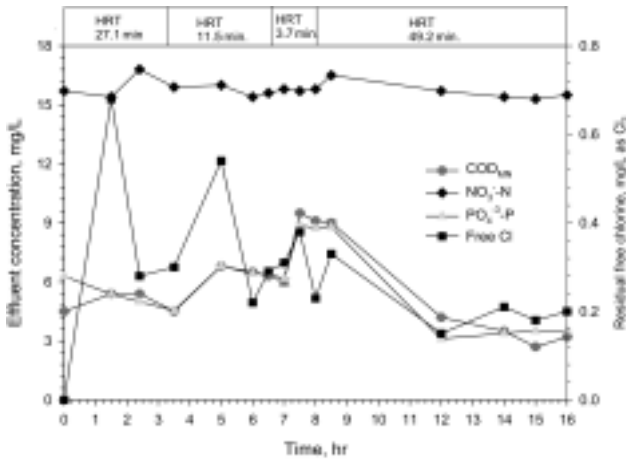


Fig. 7. Effluent concentration and free chlorine in the electrochemical process at various HRTs.

전기분해 연속 시스템은 A2SFS 처리 수를 원수로 사용하여 반응조 전극 하단부내 용량 0.942 L를 유지하면서 HRT를 3.7분, 11.5분, 27.1분 및 49.2분으로 연속 운전 결과는 Fig. 7과 정상상태 처리수 농도는 Table 2와 같다. NO₃⁻-N는 유입 농도 17±0.2 mg/L 보다 최대 평균 약 7% 정도 이하의 낮은 처리로 SUS 316 cathode 전극은 NO₃⁻-N 환원 효과가 미비한 것으로 사료된다. 그 이외의 PO₄³⁻-P를 제외하고 COD_{Mn}, 일반세균, 색도 및 pH는 방류수질은 먹는 물 수질기준 이하의 값을 보이므로 전기분해 장치는 생활하수의 생물학적 처리수의 재이용 기술로 적용이 가능하다. 또한, 전기분해 처리수의 유리염소는 0.2~0.7 mg/L(Table 2)이고, HRT 3.7~49.2 min. 범위에서 총 THMs 농도는 평

Table 2. Summary of water quality in the electrochemical process at steady state

Item	Unit	A2SFS effluent*	HRT(min.)			
			3.7 (0.0)	11.5 (0.1)	27.1 (0.2)	49.2 (0.1)
COD _{Mn}	mg/L	13 (1.3)	9.2 (0.3)	6.3 (0.3)	5.1 (0.5)	3.1 (0.4)
NO ₃ ⁻ -N	mg/L	17 (0.2)	16.0 (0.4)	15.6 (0.2)	16.0 (0.7)	15.4 (0.1)
PO ₄ ³⁻ -P	mg/L	11 (0.9)	8.8 (0.1)	6.3 (0.1)	4.9 (0.4)	3.5 (0.0)
General bacteria	CFU/mL	5.2×10 ⁵ (2.1×10 ³)	nd	nd	nd	nd
Color	Do	40 (1.3)	4	1	1	1
pH	-	7.5 (0.1)	6.4 (0.3)	7.2 (0.1)	7.6 (0.0)	7.1 (0.1)
Free chlorine	mg/L as Cl ₂	nd	0.4 (0.2)	0.3 (0.0)	0.3 (0.0)	0.2 (0.0)
THMs	mg/L	0.005 (0.001)	0.017 (0.001)	0.025 (0.001)	0.021 (0.001)	0.003 (0.001)

() : Standard deviation

*: Raw wastewater in the electrochemical process
nd: Not detected

균 0.017 mg/L로 먹는 물 기준 값 0.1 mg/L 보다 약 6배 이상 낮은 농도로 생성되어 안정적인 수계관리가 가능한 기술로 평가 할 수 있다. 그러므로 Nb/Pt anode로 구성된 전기분해 장치는 생활하수의 생물학적 처리수 재이용을 위한 잔류 유기물 제거와 소독 공정에 동시 사용을 위한 기술로 사용 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Nb/Pt anode 전극과 SUS 316 cathod 전극으로 구성된 전기분해장치에서 Nb/Pt anode 전극 표면에서 산화력이 강한 OH· 생성과 생활하수 처리수의 재이용 처리기술과 소독을 위하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) Nb/Pt anode 전극은 5~15 A 전류세기 범위에서 anode 전극 표면에서 생성된 OH·에 의하여 RNO는 탈색되었고, 전류세기 5, 10, 15 A에서 전류세기가 증가할수록

$$RNO \text{ 2차 반응 분해속도는 각각 } \frac{0.223 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}, \frac{1.679 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$$

$$\frac{2.322 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}} \text{ 로 96\% 이상의 } r^2 \text{로 조사되었다.}$$

2) 전류세기 15A로 운전하고, anode 전극에서 발생하는 OH·을 DMSO 포착제와 함께 운전한 결과 RNO 분해 속도는 $\frac{0.052 \text{ l}}{\text{mg} \cdot \text{min}}$ 로 OH·에 의한 한 RNO 분해속도 보다 약 44배 저감되었다.

3) 회분식 실험에서 전류세기 15 A와 초기 pH 5, 7.5, 9로 운전 시 유기물 제거는 15분 후 COD_{Mn}, 색도 및 일반세균은 각각 4 mg/L 미만, 5도 미만과 불검출로 조사되어 재이용수로 사용이 가능한 수질을 확보 하였다.

4) 전기분해 연속 시스템의 HRT 3.7~49.2분에서 처리수의 일반세균과 색도는 각각 불검출과 5도 미만, 유리 잔류염소 0.2~0.7 mg/L, 소독 부산물인 THMs는 평균 0.017 mg/L로 먹는 물 기준 값 0.1 mg/L보다 약 6배 이상 낮은 농도로 생성되어 생활하수 최종 처리수의 잔류 유기물 제거 및 소독을 동시에 만족시키는 재이용 기술로 활용될 수 있다.

사 사

본 논문은 한국외국어대학교 2007년 학술 연구비 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1. 신정훈, 상병인, 정운철, 정연규, “Membrane-attached biofilm reactor(MABR)에서의 독립영양 미생물을 이용한 질소제거,” 한국물환경학회지, 21(6), 624~629(2005).
2. 류홍덕, 이상일, “수리학적 체류시간에 따른 부유성장 미

- 생물을 이용한 공정과 하이브리드 공정의 유기물, 질소 및 인 제거 특성비교,” *대한환경공학회지*, **28**(1), 15 ~ 25(2006).
3. Kang, Y., Cho, Y., and Chung, E., “Development of the wastewater reclamation and reusing system with a submerged membrane bioreactor combined bio-filtration,” *Desalination*, **202**, 68 ~ 76(2007).
 4. Boero, V. J., Bower, A. R., and Eckenfelder, Jr. W. W., “Molecular weight distribution of soluble microbial products in biological systems,” *Water Sci. Technol.*, **34**, 241 ~ 248(1996).
 5. Pribyl, M., Tucek, F., Wilderer, P. A. and Wanner, J., “Amount and nature of soluble refractory organic produced by activated sludge microorganisms in SBR and continuous flow reactors,” *Water Sci. Technol.*, **35**(1), 27 ~ 34(1996).
 6. Gómez, M., Plaza, F., Garralón, G., Pérez, J., and Gómez, M. A., “A comparative study of tertiary wastewater treatment by physico-chemical-UV process and macrofiltration-ultrafiltration technologies,” *Desalination*, **202**, 369 ~ 376 (2007).
 7. 손현주, 조민, 윤제용, “소금물 전기분해 혼합산화제의 상승 소독 효과,” *대한상하수도 · 한국물환경학회 공동추계 학술발표회*, 대구, pp. A85 ~ A88(2002).
 8. 이경혁, 임재림, 이두진, 김성수, 안효원, “전기분해 방식에 의한 혼합산화제 소독 특성 평가,” *상하수도학회지*, **19**(5), 625 ~ 631(2005).
 9. Leite, R. H., Cognet, P., Wilhelm, A. M., and Delmas, H., “Anodic oxidation of 2,4-dihydroxybenzoic acid for wastewater treatment,” *J. Appl. Electrochem.*, **33**, 693 ~ 701(2003).
 10. Jonnalagadda, S. B. and Nadupalli, S., “Effluent treatment using electrochemically bleached seawater-oxidative degradation of pollutants,” *Talanta*, **64**, 18 ~ 22(2004).
 11. Feng, C., Sugiura, N., Shimada, S., and Maekawa, T., “Development of a high performance electrochemical wastewater treatment system,” *J. Hazard. Mater.*, **B103**, 65 ~ 78(2003).
 12. Diao, H. F., Li, X. Y., Gu, J. D., Shi, H. C., and Xie, Z. M., “Electron microscopic investigation of the bactericidal action of electrochemical disinfection in comparison with chlorination, ozonation and Fenton reaction,” *Pro. Biochem.*, **39**(11), 1421 ~ 1426(2004).
 13. Comninellis, C., “Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for wastewater treatment,” *Electrochim. Acta*, **39**(11-12), 1857 ~ 1862(1994).
 14. Simond, O., Schaller, V., and Comninellis, C., “Theoretical model for the anodic oxidation of organics on metal oxide electrodes,” *Electrochim. Acta*, **42**(13-14), 2009 ~ 2012(1997).
 15. Fukatsu, K. and Kokot, S., “Degradation of poly(ethylene oxide) by electro-generated active species in aqueous halide medium,” *Polym. Degrad. Stab.*, **72**, 353 ~ 359(2001).
 16. 환경부. 수질오염공정시험방법, 사단법인 전국 자가 측정대행사 협의회(1998).
 17. APHA, AWWA, and WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Edition, Edited by Eaton, A. D., Clesceri, L. S., and Greenberg, A. E., American Public Health Association, Washington, DC.(1995).
 18. Snoeyink, V. and Jenkins, D., Water chemistry, Wiley, pp. 298 ~ 312(1980).