

전기분해 반응조의 간접산화 효과가 하·폐수 재활용 시스템 설계에 미치는 영향

신춘환*

동서대학교 에너지·환경공학과
617-716 부산 사상구 주례동 산 69-1

(2009년 4월 27일 접수, 2009년 6월 1일 수정본 접수, 2009년 6월 8일 채택)

Effect of Indirect Oxidation on the Design of Sewage/wastewater Reuse System with an Electrolysis Reactor

Choon-Hwan Shin*

Department of Energy & Environmental Engineering, Dongseo University,
San 69-1, Jurye-dong, Sasang-gu, Busan 617-716, Korea

(Received for review April 27, 2009; Revision received June 1, 2009; Accepted June 8, 2009)

요 약

Ti/IrO₂ 를 양극으로 SUS 316L 을 음극으로 사용한 전기분해 반응조에 간접산화조를 설치하여 간접산화 효과를 제시함으로써 하·폐수 재활용 시스템의 설계에 미치는 영향을 고찰하였다. 전기분해 반응조의 운전조건은 극판 간격, 전류 밀도, 전해질 농도에 대한 영향을 조사하여 극판 간격 6 mm, 전류 밀도 1.0 A/dm² L, 전해질 농도 15%로 설정하였다. 산화에 의한 제거효율은 유기물은 COD로서 직접산화조에서 55%, 간접산화조에서 12.5~15.0%의 추가 분해가 일어나고 있으며 T-N (전체 질소량), T-P(전체 인량)는 직접산화조에서 각각 88%, 75%의 제거 효율을 나타내고 있으나 COD제거와는 달리 간접산화조의 추가 제거 효과는 거의 없는 것으로 판명되었다. 또한 COD, T-N, T-P의 제거는 2~5일의 반응초기에 일어나고 있기 때문에 전기 분해 반응조의 체류시간을 크게 설계할 필요는 없다는 결론을 얻을 수 있었다.

주제어 : 전기분해조, 직접산화, 간접산화, 하·폐수 재활용, 체류시간

Abstract : In this paper, we investigated the effect of an indirect oxidation zone in an electrolysis reactor that used Ti/IrO₂ as the anode and SUS 316L as the cathode. Based on our preliminary results, the electrolysis reactor was operated with pole plate interval of 6 mm, current density 1.0 A/dm²L and electrolyte concentration 15%. The removal efficiency, COD (chemical oxygen demand), was additionally increased by 55% and 12.5~15.0% in the direct and indirect oxidation zones, respectively. The removal efficiencies of T-N (total nitrogen) and T-P (total phosphorus) were found to be 88% and 75%, respectively. It was shown that the additional effect of the indirect oxidation zone on the removal was nearly negligible. Also, as the removal of COD, T-N and T-P took place during the initial 2~5 days of reaction, it was concluded that there was no need to extend the retention time of the electrolysis reactor.

Key words : Electrolysis reactor, Direct oxidation, Indirect oxidation, Sewage/wastewater reuse, Retention time

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail : 6116shin@gdsu.dongseo.ac.kr

1. 서 론

국내 뿐 아니라 전 세계적인 물 부족 현상의 해소 및 새로운 수자원 개발은 에너지확보 차원에서 관심이 증가하고 있다. 물 자체가 에너지원으로 인식되는 것은 산업, 생활 등 인간 활동의 전반에 걸쳐 물을 필요로 하지 않는 영역이 없다는 것으로부터 가치가 인정되며, 생활의 편리함과 고급화의 일환으로 자연친화적 환경의 요구가 커짐으로써 하·폐수의 정화에 점차 관심이 커지고 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 하·폐수 재이용 장치를 개발하고 및 운전조건을 설정함으로써 새로운 수자원을 확보 할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 하·폐수 재이용시스템 개발 및 운전조건 확립은 하·폐수 정화에 대한 화학약품의 비용을 줄임에 따라 경제적 부담을 줄일 수 있으며 화학약품에 의한 2차 수계오염의 원인을 막을 수 있다. 현재 하·폐수처리 공정에서 여전히 악취발생 및 COD, BOD 등의 처리 문제가 남아 있으며, 다양한 하폐수들을 일괄적으로 처리하기에는 pH 조절의 어려움이 따른다는 사실은 잘 알려진 문제점이다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 각종 산업시설로부터 배출되는 하·폐수의 재이용을 위한 system 개발에 있어 우선 system의 기본구성을 각종 유기물 산화와 질산화에 우수한 효과를 보이고 있는 전기분해조와 탈취기능을 가질 수 있는 활성탄 흡착조, 그리고 처리수질 향상을 위한 막 분리조의 3개 조로 구성하여 이에 대한 각각의 처리방법 및 유입, 유출수의 수질평가에 의한 장, 단점을 비교한 자료들을 system 개발을 위한 단위반응조 제작의 기본으로 하였다. 따라서 system 구성의 1차 처리조인 전기분해장치를 bench-scale type으로 제작 완료하였으며 1차 성능 test를 거쳐 수정보완 작업을 진행하고자 한다.

여기서 전기분해는 난분해성 유기물 제거, C/N (Carbon/Nitrogen)비 감소, sludge 발생량 감소 등의 장점을 가지고 있으며 동절기에 생물처리의 효율이 저하될 경우에도 안정적인 처리수질을 확보할 수 있어 운전이 용이하다는 장점도 겸비하고 있다. 특히 방류수에 대한 별도의 소독공정이 필요하지 않다는 경제적인 장점도 가지고 있다.

본 연구에서는 전기분해 반응조에 불용성 전극을 사용함으로써 전기분해효율을 극대화시키고 전해질 사용으로 전기저항을 감소시켜 전류효율을 상승시키고자 하였다. 또한 전류밀도는 수중에 형성되는 HOCl, OCl⁻에 의한 전기전도도, 최종 방류수의 소독효율 등을 지배하는 인자로 활용되기 때문에 일정한 전류밀도에서 전극간격 조절, 전극판의 선택 등이 전기분해 반응조의 효율을 결정하게 된다. 여기서 전극은 Ti/Pt의 조합이 가장 효과가 큰 것으로 확인되었으나[1,2], 본 연구에서는 기존에 사용하던 Ti/IrO₂를 양극으로, SUS316L을 음극으로 그대로 사용하였으며, 전류밀도는 1.0 A/dm²L, 15% 전해질 사용, 전극간격을 6 mm로 고정하여 내부 반응 없이[3] COD, T-N, T-P 제거효율을 직접산화조에서의 효과와 간접산화조에서의 효과를 비교하여 제시하고자 하였다.

Table 1. Details of the electrolysis reactor

Items	Specifications	Number of units	Remarks
Electrolyte storage	5 L	1	
Agitating motor	0~100 rpm	1	
Impeller & coupler	SUS 304	1	
Direct oxidation tank	18 L	1	Available capacity: 15 L
Indirect oxidation tank	45 L	1	Available capacity: 37 L
Anode (Ti/IrO ₂)	200 x 300	9	3 per each
Cathode (SUS 316L)	200 x 300	12	4 per each
Recycling pump	700 ml/min	1	<50% recycling
D.C. power supply	50A-30V	1	

2. 재료 및 방법

2.1. 전기분해 반응조의 구성

전기분해 반응조 구성을 위해 Table 1의 내용과 같은 단위 장치를 사용하였다.

2.2. 전기분해장치 제작

Figure 1과 2에 본 연구를 위해 제작한 전기분해 반응조 및 극판의 형태를 각각 나타내었다. 본 연구를 위해 설계된 bench-scale의 lab test 용 전기분해 반응조는 30 V, 30 A 용량의 직류 전원 공급장치, 양극 및 음극으로 사용된 극판의 재질은 양극판(anode)은 염소 가스(Cl₂) 발생 및 전극판의 전자방출로 유발되는 전극판의 부식을 방지하기 위해 티타늄(Ti)에 이산화이리듐(IrO₂)을 전착한 망형대의 불용성 극판을 사용하였으며, 환원반응이 주로 발생하는 음극판은 스테인레스스틸(SUS) 재질의 망 형태를 사용하였다. 전극판을 망 형태로 사용하면 유체 흐름을 원활하게 할 수 있을 뿐 아니라 극판 가격이 저렴해지기 때문에 설비비용의 절감효과를 예상 할 수 있다. 또한 전기분해 장치는 전기비용이 많이 든다는 단점을 가능하면 최소화하기 위해 18 L 용량의 직접산화조 이외에 이보다 큰 45 L 용

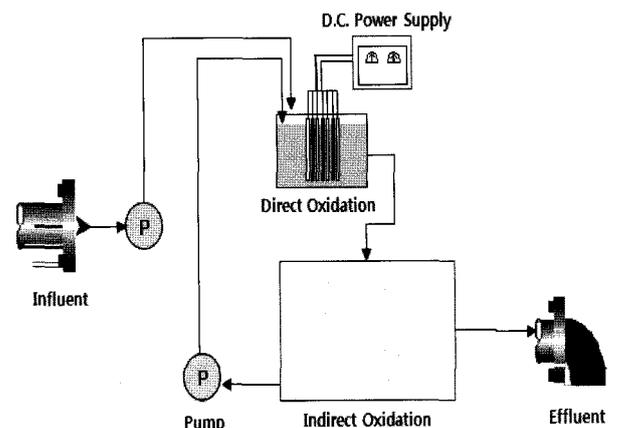


Figure 1. Schematic diagram of the electrolysis reactor.

Table 2. Characteristics of synthetic wastewater

Component	Concentration (ppm)
CODCr	250~300
CODMn	50~100
T-N	20~30
T-P	2.0~3.0
pH	6.8~7.2

량의 간접산화조를 설치하여 체류시간 연장에 의해 유기물 분해효과를 상승시키고자 하였다.

Figure 2에서 볼 수 있는 바와 같이 양극과 음극을 교대로 설치하는 과정에서 양극과 음극판의 간격이 좁을수록 전해처리 효과는 좋으나, 전기도모량이 많아지는 단점이 있다는 점을 고려하고 전극간격을 크게 하면 유기물 및 무기물의 산화 효과는 감소한다는 결과[4]에 따라 전극간격을 좁게 유지하여 낮은 전압으로 적정처리가 가능하도록 해야 한다. 본 실험의 조건에서는 유기물 제거능력을 기준[3,5]으로 설정한 6 mm로 설치하였다.

2.3. 합성폐수

전기분해 반응조의 초기 운전조건 설정을 위해 아래 Table 2와 같은 합성폐수를 사용하였다.

2.4. 전기분해 반응조 설계의 이론적 고찰

물을 전기분해하면 양극과 음극의 반응은 다음과 같다.

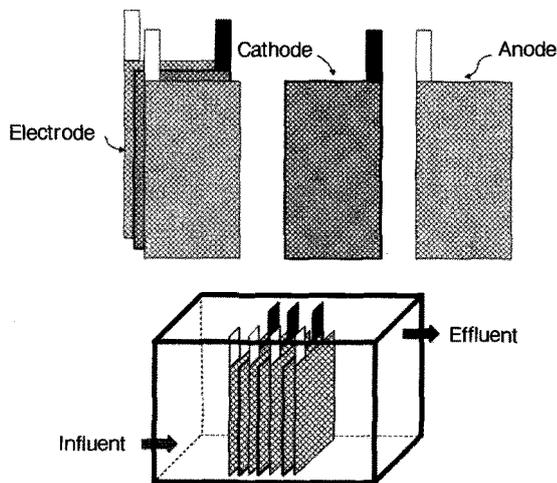
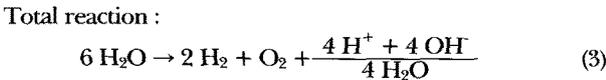
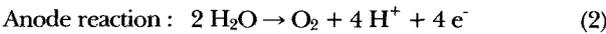
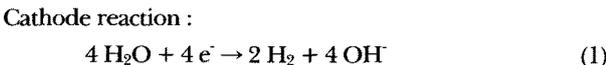
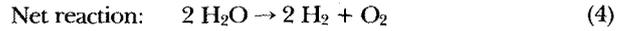
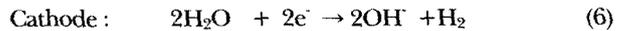
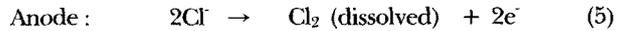


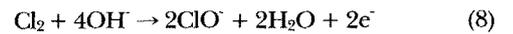
Figure 2. Shapes of cathode and anode.



이와 같이 수용액을 전기분해하면 수소와 산소가 발생하기 때문에 용액의 pH에 관계없이 물의 분해가 이루어진다는 이론적 근거에 의해 유입수의 pH 조절이 필요하지 않는 이유를 제공해 주고 있으며 전해질로 소금을 사용할 경우 전극반응에 의해 차아염소산 및 차아염소산 이온을 형성하고 이것은 화학적 자동산화에 의해 염소산염으로 전환된다. 염소의 전기분해 과정은 아래와 같다.



Reaction in solution :



Eq. 5의 반응에 의해 염소 발생을 확인할 수 있는데, 이러한 반응은 낮은 온도에서도 가능하고, 전해액이 알칼리성일 경우에도 가능하다. 따라서 수용액의 온도와 pH에는 상관없이 양극 주위는 산, 음극 주위는 Eq. 6에 의해 알칼리가 생성될 수 있다는 이론[5]에 따라 Eq. 7 및 8과 같이 차아염소산 이온(OCl⁻)이 발생된다는 사실을 확인할 수 있다.

HOCl의 산·염기 해리 반응에서 pKa = 7.5의 값을 가지기 때문에 활동도를 1로 가정했을 경우 pH 7.5일 때 HOCl과 OCl⁻의 농도는 같아지고, pH 7.5 이하에서는 HOCl 이, pH 7.5 이상에서는 OCl⁻이 우세한 화학종임을 알 수 있다. 여기서 처리수의 pH가 약산성 영역을 나타내고 있기 때문에 OCl⁻ 보다는 HOCl의 농도가 상대적으로 높아 살균효과는 주로 HOCl에 의해 나타날 것으로 예상이 가능하다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 초기운전조건의 영향

3.1.1. 접촉시간, 전류밀도, 전해질 농도의 영향

Figure 3에는 접촉시간, 전류밀도, 그리고 전해질 농도의 변화에 따른 COD_{Mn}의 처리 효율을 나타내었다. 우선 여러 연구자[6-9]에 의해 밝혀진 바와 같이 전류밀도의 상승에 따라 차아염소산 등의 증가로 하·폐수 내의 유기물 제거율이 상승한다. 즉, 직접 및 간접산화 효과에 의해 살균력에 대한 시너지 효과를 예상할 수 있지만, 시설비의 감소와 전력비 등의 유지관리비를 절감하는 차원에서 체류시간 등의 운전조건에 따라 전류밀도는 1.0 A/dm²L로 고정시켰다.

전류밀도를 1.0 A/dm²L로 고정시키고, 소금의 농도를 전체 폐수량의 약 15%로 조절하여 0~120분 운전시간 동안의 COD_{Mn}의 농도변화를 조사하였다. 실험결과 COD_{Mn}농도 약 65 mg/L의 합성폐수를 전기분해 반응조에서 처리하여 운전시간 약 30분에서 25 mg/L, 60분에서 12 mg/L, 120분에서 8 mg/L를 나타내고 있는 결과를 확인하였다.

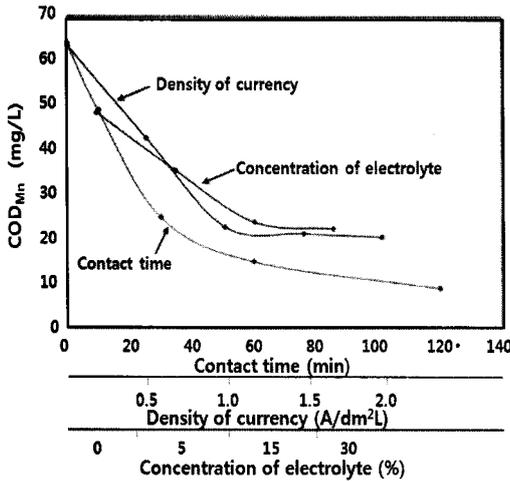


Figure 3. COD_{Mn} removal according to the contact time, density of current and concentration of electrolyte.

이러한 결과는 운전시간 약 1시간에서 약 82%의 처리효율을 예상할 수 있기 때문에 전류효율을 감안한 경제적 범위의 확정을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다. 또한 전류밀도는 실제 설비의 운전에서 경제성과 직접적인 영향이 있기 때문에 운전경비를 최소화 할 수 있는 방안과 재이용수로서의 처리효율을 최대화 할 수 있는 적정 조건을 설정하기 위해 향후 pilot plant의 현장설치 이후에 다시 검토되어야 할 중요한 인자가 된다. 여기서 전도도를 유발하는 물질로는 chloride 외에 nitrate, sulfate 등이 있으며, nitrate나 sulfate보다 chloride가 유기물질 분해에 효과적인 것으로 보고된 결과[6,7]를 이용하여 NaCl 용액을 전해질로 사용하였으며, 내부 반응이 50% 일 경우 10%로 전해질 농도를 조절한 실험[3]과는 달리 본 실험에서는 산화효율 상승을 위해 15%로 조절하여 COD_{Mn}의 농도변화를 조사한 결과 전기분해효율뿐만 아니라 직류전원 공급기에 전기적 부하 또한 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 물론 전해질 농도의 증가에 따라 수중 염소이온 농도의 변화도 예상할 수 있기 때문에 유기물 산화효과가 상승하고 있음을 확인할 수 있었다.

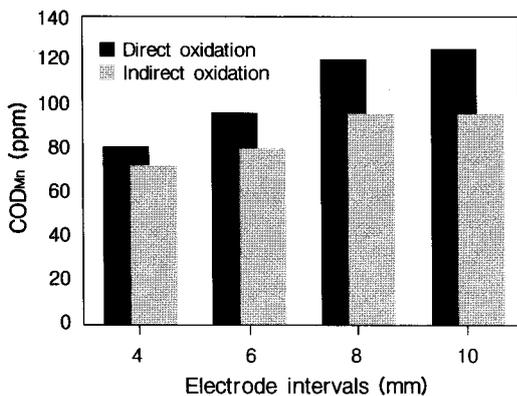


Figure 4. COD_{Mn} removal according to the electrode intervals (initial concentration: 200 mg/L).

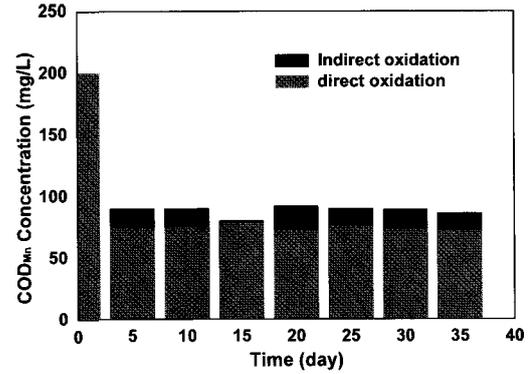


Figure 5. Comparison of COD_{Mn} from the direct and indirect oxidations.

3.1.2. 극판 간격에 따른 유기물 제거효과

Figure 4에서 볼 수 있는 바와 같이 극판 간격이 좁을수록 유기물 제거효과는 상승하고 있는 사실을 확인할 수 있으며, 특히 극판 간격 4, 6, 8, 10 mm에서의 직접산화조와 간접산화조의 COD_{Mn} 제거효율의 차이가 각각 5, 15, 25, 30 mg/L로 커지고 있어 극판 간격이 커지면 간접산화조에서의 산화가 활발히 일어나고 있는 현상도 확인할 수 있다. 이는 극판 간격이 작으면 전력량이 많아 강한 산화효과를 나타내고 있으나 멀어질수록 직접산화조에서 산화되지 못한 유기물이 간접산화조에서 추가로 산화되고 있음을 알 수 있다. 여기서 4 mm의 극판 간격에서는 강한 전력에 의해 극판의 부식 현상이 발생하고 있을 뿐 아니라 전류효율이 저하되는 현상[10,11]을 밝히고 있기 때문에 전기 소모량을 감안한 6 mm를 선택하였다.

3.2. 연속운전에 의한 제거효율

3.3.1. 유기물 제거

Figure 5는 연속적으로 운전하였을 경우 직접산화조와 간접산화조 유출수의 COD_{Mn}의 농도변화를 나타낸 결과이다.

사용된 원수는 초기 운전조건 설정 때와는 달리 초기농도 200 ppm의 인공하수를 제조하여 연속으로 주입하면 2일이 지난 후부터 90~95 ppm의 농도를 나타내고 있어 약 55%의 처리효율을 보이고 있다. 이러한 결과는 분해된 유기물이라 하더라도 수중에 잔류하면서 COD_{Mn}으로 측정될 수 있기 때문에 분해된 저분자의 유기물을 여과시킬 수 있는 부속장치의 필요성을 암시하기도 한다. 또한 6 mm 전극 간격에서 간접산화조에 의해 추가 분해되는 유기물은 약 15 ppm 정도로 나타나 간접산화조에서 12.5~15.0% 정도의 추가 분해가 일어나는 것을 확인할 수 있다.

3.3.2. 질소 제거 특성

Figure 6은 T-N 농도 약 13 ppm의 인공하수를 제조하여 연속으로 주입하면서 연속적으로 운전하였을 경우의 직접산화조와 간접산화조에서의 유출수의 T-N의 농도변화를 나타낸 결과이다. T-N 제거효율에서는 운전 초기에는 약간의 차이가 나타나지만 5일 이후부터 직접산화조와 간접산화조에서

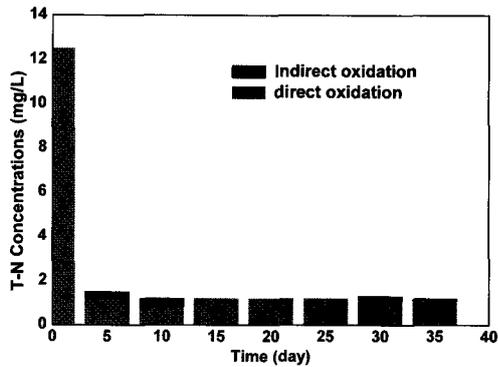


Figure 6. Comparison of T-N removal between direct and indirect oxidation.

의 농도가 1.5 ppm~1.3 ppm 범위의 값으로 측정되기 때문에 약 88%의 처리효율을 나타낸다. 그러나 시간이 지나면 표준 활성슬러지법의 단점인 낮은 T-N 제거효율과 같이 원래 상태로 환원될 가능성이 [12,13]이 있기 때문에 최종 처리를 위해서는 응집제 등 화학약품 처리와 병행한 결과와 비교할 필요가 있을 것으로 판단된다. 다만 현재의 결과로부터 거의 모든 T-N 제거는 직접산화조에서 일어나고 간접산화조의 효과는 그다지 크지 않음을 알 수 있으며, 이는 다른 연구 결과와도 일치하고 있다 [13,14].

3.3.3. 인 제거 특성

Figure 7은 초기 농도 0.8 ppm인 인공하수를 연속 주입시켜 얻은 T-P의 농도변화를 나타낸 결과이다. T-P 제거효율에서도 연속운전 2일 이후부터 0.2 ppm의 농도를 나타내고 있어 약 75%의 처리효율을 나타내는 것으로 확인하였으며, T-N 제거와 같이 간접산화조의 효과는 크지 않은 것으로 판명되었다. T-P 역시 전기분해 효율과 화학약품 병행처리의 효과를 비교할 필요가 있다. 결과적으로 Figure 5, 6, 7에서 제거효율은 운전 초기에 결정된다는 공통적인 현상을 확인할 수 있다. 따라서 전기분해조는 체류시간을 짧게 설계하여도 동일한 제거효율을 얻을 수 있을 것으로 판단이 가능하다. 다만 유기물 분해의 경우에서 볼 수 있는 바와 같이 간접산화조에서 추가

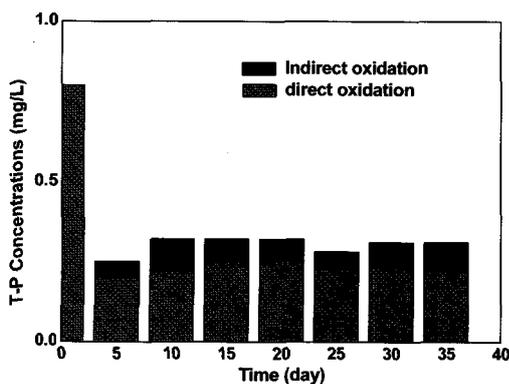


Figure 7. Comparison of T-P removal between direct and indirect oxidation.

분해가 일어나는 결과를 확인할 수 있기 때문에 유기물 분해효과를 상승시킬 목적으로는 간접산화조의 필요성을 제시할 수 있다.

3.3.4. 잔류염소 및 총 염소 제거

앞서 밝힌 바와 같이 전기분해의 효율을 증가시키기 위해 전해질에 사용되는 소금은 전기분해 과정에 다량의 염소 가스를 발생시켜 수중에 잔류염소 및 총 염소의 농도를 증가시키므로 [14,15] 간접산화조의 폭기에 의해 일정량의 염소가 제거된다 하더라도 운전시간 150분, 전류밀도 1.0 A/dm²L, 전해질 15%의 운전조건에서 전기분해조 내의 총 염소와 잔류염소는 각각 25 ppm과 7.0 ppm으로 나타나 용수로 사용할 경우 수질 기준을 만족하지 못하고 있다. 따라서 염소 제거를 위한 추가 연구가 계속되고 있다.

4. 결 론

전기분해 반응조에 간접산화조를 설치하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 전류밀도 1.0 A/dm²L, 전해질 농도 15%의 조건에서 극판 간격에 따른 직접산화조와 간접산화조의 COD_{Mn} 제거효율의 차이가 각각 5, 15, 25, 30 mg/L로 커지고 있어, 극판 간격이 커질수록 간접산화조에서의 산화가 추가적으로 일어나고 있는 현상을 확인하였다.
- 2) 연속운전에 의한 유기물 분해는 직접산화조에서 약 55%의 제거효율을 나타내고 있으며, 간접산화조에서 약 12.5~15.0%의 추가 분해가 일어나고 있음을 확인하였다. 이는 유기물 제거효율의 상승을 위해서는 간접산화조의 설치가 효율적임을 보여준다.
- 3) T-N, T-P는 간접산화조에서 추가 제거가 일어나지 않기 때문에 T-N, T-P 제거를 위해서는 간접산화조가 필요하지 않다는 것을 확인하였다. 다만 T-N, T-P는 시간이 지나면 원래 상태로 환원될 가능성이 있기 때문에 응집제 등의 화학약품 처리 공정과 병행하여 최종 처리한 결과와 비교할 필요가 있다. 또한 모든 제거효율은 운전 2-5 일의 초기에 나타나고 있어 전기분해 반응조는 체류시간을 크게 설계하지 않아도 동일한 제거효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 부산 환경기술개발센터의 연구비 지원(06-4-10-13)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Andre, S., "Electrochemical Treatment of Industrial Organic Effluent," *Chimia*, **16**(3), 23-27 (1995).
2. Trasatti, S., "Electrocatalysis: Understanding the Success of DSA(R)," *Electrochim. Acta*, **45**(15-16), 2377-2385 (2000).

3. Shin, C. H., and Bae, J. S., "Operational Performance of an Electrolytic Reactor in Configuring a Graywater Treatment System for Sewage/wastewater Reuse," *J. Ind. Eng. Chem.*, **13**(7), 1091-1097 (2007).
4. Chiang, L. C., Chang, J. E., and Wen, T. C., "Indirect Oxidation Effect in Electrochemical Oxidation Treatment of Landfill Leachate," *Water Res.*, **5**(9), 671-678 (1995-A).
5. Simond, O., Schaller, V., and Connillis, C., "Theoretical Model for the Anodic Oxidation of Organic Metal Oxide Electrodes," *Electrochim. Acta*, **42**(13/14), 2009-2012 (1997).
6. Chen, G., "Electrochemical Technology in Wastewater Treatment," *J. Sep. Purif. Tech.*, **38**(11), 11-41 (2004).
7. Chen, G., Chen, X., and Yue, P. L., "Electrochemical Behavior of Novel Ti/IrO₂-Sb₂O₅-SnO₂ Anode," *J. Phys. Chem. B*, **106**, 4364-4369 (2002).
8. Cossu, R., Polcaro, A. M., Lavagnolo, M. C., Mascica, M., Palmas, S., and Renoldi, F., "Electrochemical Treatment of Landfill Leachate: Oxidation at Ti/PbO₂ and Ti/SnO₂ Anodes," *Environ. Sci. Tech.*, **32**, 570-573 (1998).
9. Coast, C. R., Botta, C. M. R., Espindola, E. L. G., and Oliva, P., "Electrochemical Treatment of Tannery Wastewater Using DSA Electrode," *J. Hazard. Mater.*, **153**, 616-627 (2008).
10. Gattrell, M., and Kirk, D. W., "The Electrochemical Oxidation of Aqueous Phenol at a Glassy Carbon Electrode," *Can. J. Chem. Eng.* **12**(4), 997-1003 (1990).
11. Kelsall, G. H., "Hypochlorite Electro-generation. I. A Parametric Study of a Parallel Plate Electrode Cell," *J. Appl. Electrochem.*, **4**(9), 177-186 (1984).
12. Mark, J., Tetreault, A., Benedict, H., Christopher, K., and Edwin, F., "Biological Phosphorus Removal: A Technology Evaluation," *J. WPCF*, **11**(5), 823-837 (1986).
13. Kim, D., and Kim, Y., "Electrochemical Characteristics of the Sulfonated Polysulfone Cation-exchanger Membrane at Rotating Disk Electrode," *J. Ind. Eng. Chem.*, **11**(4), 579-565 (2005).
14. Song, H. Y., Kondrikov N. B., and Kuryavy V. G., "Preparation and Characterization of Manganese Dioxide Electrodes for Highly Selective Oxygen Evolution During Diluted Chloride Solution Electrolysis," *J. Ind. Eng. Chem.* **13**(4), 545-551 (2007).
15. Kwon, S. W., Shim, J. B., and Kim, E. H., "Electrolysis of Actinide Chloride Using a Solid Cathode Surrounded by a Ceramic Container," *J. Ind. Eng. Chem.*, **12**(5), 802-808 (2006).