

전기분해공법을 이용한 고령화된 매립장 침출수 처리에 관한 연구

정순형 · 이영세* · 최현국* · 최준호

대구보건대학 보건환경과

* 상주대학 응용화학공학과

A Study on the Aged Landfill Leachate Treatment with Electrolysis

Soon-Hyung Chung · Young-Sei Lee* · Hyun-Kuk Choi* · Joon-Ho Choi

Department of Health and Environment, Taegu Health College, Korea

**Department of Applied Chemical Engineering, SangJu National University, Korea*

Abstract

Recently, sanitary landfill was one of the most widely used for disposal of waste in Korea. With increasing of use and public awareness of this method for disposal, there is an increased concern with respect to the pollution potential by the landfill leachate. Especially, an aged landfill leachate contained relatively large amount of the nonbiodegradable substances which could not be removed by biological treatment processes. So, this study was conducted to the removal of nonbiodegradable substances, such as Humic acid and Fulvic acid with the electrolysis.

In this study, electrode materials, electrolyte concentration, electrode distance, current density, and pH value were found to have significant effect on both pollutant removal efficiency and current efficiency in electrochemical oxidation process.

Key words : Advanced treatment, Electrolysis, Electro-oxidation, Electro-coagulation, Landfill leachate.

I. 서론

최근 경제성장과 인구의 도시집중, 각종 제품의 life cycle의 단축화 경향으로 폐기물 발생량은 기하급수적으로 늘어나고 있으며, 이들 폐기물 중 상당량이 매립 처리되고 있는 실정이다¹⁾. 침출수는 일반적으로 높은 농도의 질소성분과 생물학적 난분해성 물질을 함유하고 있어 적절한 처리 없이

하천으로 유입시, 질소는 질산화과정을 거쳐 질산성질소 형태로 변화하면서 하천의 용존산소를 고갈시켜 하천 생태계에 악영향을 유발시킬 뿐만 아니라 질산화과정에서 생성된 무기성 질소성분은 조류의 번식을 촉진시켜 부영양화를 초래하는 것으로 널리 알려져 있다^{2,3,4)}. 또한 침출수는 경우에 따라 유해중금속 및 유해유기화합물을 함유하는 경우도 있는데, 이는 주변의 토양오염 및 지하수로

염을 유발하는 것으로 알려져 있다^{5,6)}.

오늘날 침출수 수질관리에 있어 가장 큰 문제점은 첫째, 침출수 발생량의 정확한 예측이 어렵다는 점이며, 둘째, 매립연령에 따라 수질의 변화 폭이 심하다는 것이다^{7,8,9)}. 일반적으로 매립연령이 10년 이상으로 고령화된 매립장 침출수를 처리하기 위하여 여러 가지공법이 시도되고 있으나, 현재로서는 적절한 처리가 어려운 실정이다^{10,11)}.

특히 경제적 문제 때문에 생물학적 처리가 연구되고 있으나, 호기성 처리 시 Humic acid, Fulvic acid 등과 같은 고농도의 생물학적 난분해성물질, 과도한 거품발생, 영양분의 불균형 등의 이유로 적정처리가 어려운 것으로 인식되고 있다^{12,13)}. 일부 연구자들의 보고에 의하면 침출수 내의 유기물질이 주로 난분해성 물질로 구성되어 있어 BOD/COD비와 COD/TOC비가 각각 0.03, 2.0인 침출수를 7.7일간 포기하였으나, COD농도는 조금도 감소하지 않았다고 보고하고 있으며¹⁴⁾, RBC(Rotating Biological Contactor)공법도 매립연령이 높은 침출수 처리에는 전혀 효과가 없는 것으로 학계에 보고되었다^{4,15)}.

이렇듯 고령화된 매립장 침출수에 최종적으로 남는 난분해성 유기오염물질은 분자량이 500~20,000 사이인 Humic acid, Fulvic acid가 대부분이며, 이러한 분자량이 큰 물질들은 박테리아의 응집에 악영향을 미쳐, 생물학적처리효율의 저하를 가져온다고 알려져 있다^{16,17)}.

최근에는 고령화된 매립장 침출수를 생물학적으로 처리하기 위하여 도시하수와의 연계처리가 많이 활용되고 있는데, 침출수량이 도시하수량의 2% 이내에서는 연계처리에 아무런 영향을 미치지 않으나, 그 비율이 4-5%로 증가하면 하수처리효율을 저하시킨다는 연구가 학계에 보고되고 있다^{18,19)}. 또한 4-5%이상의 비율로 연계처리를 할 경우 슬러지 발생량이 도시하수 단독처리보다 2배 이상증가하고, 철 및 구리와 같은 무기물질이 침전함과 동시에 시설물을 더럽히는 것으로 보고되고 있으나²⁰⁾, 실험실 규모의 회분식 반응조를 이용한 일부의 연구에서 침출수 비율을 하수의 10%로 하여도 하수처리에 이상이 없는 것으로 보고하고 있다^{21,22)}. 본 연구에서는 이와 같이 생물학적 처리가

어려운 고령화된 매립장 침출수를 처리하기 위하여 전기분해공법을 도입하였으며, 이러한 연구결과는 매립장 침출수 처리에 있어 전기분해공법의 적용타당성을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 확신한다.

II. 실험

1. 실험장치

본 실험에 사용된 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었으며, 전기분해 반응기는 7mm두께의 아크릴판을 사용하여, 길이 50cm, 폭 20cm 그리고 높이 20cm로 제작하여 실험을 수행하였다. 반응기는 시료도입부와 셀 형태의 4개의 전극반응기와 별도의 침전지를 설치하였으며, 하나의 셀은 길이 10cm, 폭 20cm 그리고 높이 20cm로 전극판 2개가 들어갈 수 있도록 제작하였으며, 전극간의 간격을 조절할 수 있도록 제작하였다.

그리고 본 연구에 사용된 탄소전극, 알루미늄전극 및 철 전극의 규격은, 높이 20cm, 폭 20cm 그리고 두께 0.7cm의 크기로 잘라 사용하였으며, 전극판의 유효접촉면적은 400cm²로 하여 실험을 수행하였다. 그리고 전극간의 간격은 1~5cm로 조절이 가능하게 제작하였으며, 전극판을 통해 흐르는 전류 및 전압은 전류 0~40 A 그리고 전압 0~40 V까지 조절이 가능한 DC Power Supply를 사용하였다.

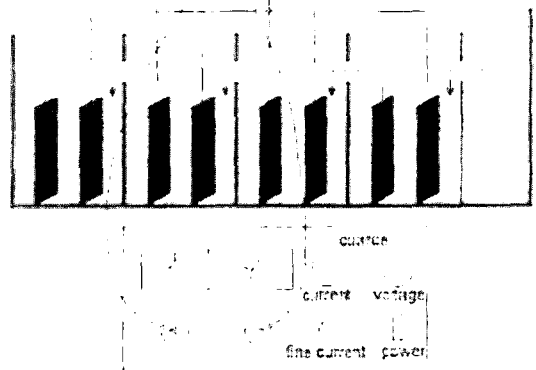


Fig. 1. Schematic diagram for the electrolysis.

2. 실험 및 분석방법

본 연구에 사용된 침출수는 대구광역시 인근에 위치한 Y사에서 운영하고 있는 매립장 침출수로서 매립연령이 15년이며, 이미 매립이 종료된 매립지를 대상으로 실험을 수행하였다. 실험 및 분석에 필요한 침출수는 20 L용량의 용기에 담아 연구실로 이송 후 필요시 일정량을 분취하여 실험을 수행하였으며, 부유물질에 의한 영향을 최소화하기 위하여 2시간 침전시킨 상등수를 사용하여 실험을 실시하였다. 고령화된 매립장 침출수처리에 가장 효율적인 전극을 선정하기 위하여, 양극에는 탄소전극을 고정하고, 음극에 탄소전극, 알루미늄전극 및 철 전극을 바꾸면서 전류효율이 가장 우수한 전극을 선정하였다.

그리고 전극간의 거리변화에 따른 침출수의 처리효율분석실험에서는 전극간 거리를 1~5cm로 변화시키면서 실험을 수행하였으며, 전류밀도변화에 따른 침출수 처리효율 실험에서는 20~100 mA/cm²로 그리고 전해질 농도에 따른 침출수의 처리효율 실험에서는 전해질로 NaCl을 사용하여 0-0.2 N까지 변화시키면서 실험을 수행하였다.

또한 pH 변화에 따른 침출수 처리효율 실험에서는 pH가 처리효율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 침출수의 pH를 3, 5, 7, 9로 변화시키면서 실험을 행하였다.

수질분석은 BOD, COD_{Cr}, TOC, Color 그리고 T-N을 중점으로 분석하였으며, 수질오염공정시험 방법에 준하여 분석하였다²³⁾.

III. 결과 및 고찰

1. 침출수의 수질특성

매립연령이 15년 이상 된 매립장 침출수 원수의 수질을 분석한 결과 Table 1과 같은 결과를 얻었다.

Table 1. Characteristics of the landfill leachate (unit : mg/L)

	BOD	COD _{Cr}	TOC	T-N	Color (Pt-Co unit)
Range	900~1,600	8,000~14,000	820~1,100	150~270	2,200~3,200
Mean	1,100	11,000	890	190	2,500
S·D*	220	570	77	35	340

S·D* : Standard Deviation(number of samples : 7).

Table 1에서 살펴본 바와 같이 색도가 평균 2,500(Pt-Co unit)으로 짙은 갈색을 띄고 있었으며, BOD/COD_{Cr}값이 0.10으로 조사되어, 유기성오염물질 중 대부분이 생물학적 난분해성물질로 구성되어 있는 것으로 조사되었다. 이렇듯 낮은 BOD/COD_{Cr}비는 활성슬러지공법과 같은 생물학적처리공법의 도입시 유기성오염물질의 제거효율이 극히 낮을 것으로 예측되었다.

2. 전극재질에 따른 전류효율

폐수중의 유기성오염물질을 전기·화학적 공법으로 처리함에 있어 전류효율은 대단히 중요한 인자로 작용하는데, 이는 처리방법의 선택기준으로 작용함과 동시에 처리비용의 대부분을 차지하는 것으로 알려져 있으며, 전류효율은 아래와 같은 COD법으로 구할 수 있다.

$$CE(\text{Current Efficiency})(\%) = \frac{[COD_i - COD_f] \times V}{\frac{[I \times t]}{[F \times 2]} \times M} \times 100\%$$

여기서 COD_i와 COD_f는 전기분해 전 후의 COD(mg/L)농도이며, V는 용액의 부피(L), I는 전기분해동안 적용된 전류량(A), t는 전기분해시간(sec), F는 페르데이상수(96,500 coulomb/mole), M는 산소의 분자량으로 나타낸다.

전극재질은 전류효율에 영향을 미치는 중요한 인자로서, 이는 유기성오염물질의 제거를 위한 전기·화학적 산화공정의 효율성을 결정하는 것으로 알려져 있다^{24,25)}. Fig. 2는 양극에 탄소전극을 그리고 음극에 탄소, 알루미늄 및 철 전극을 이용하였을 경우 전류효율을 나타낸 것이다. 초기 pH가 8.7인 침출수에 100 mA/cm²의 전류밀도로 0-100분간 전기분해를 실시한 결과 Fig. 2와 같은 결과를 얻었다. 양극에 탄소전극을 그리고 음극에 알루미늄 전극을 사용하였을 때 전류효율이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 모든 전극에서 전기분해시간 70분에서 가장 높은 전류효율을 얻을 수 있었다. 그러나 대체로 낮은 전류효율이 관측된 바, 고령화된 매립장 침출수를 전기분해공법으로 처리할 경우 처리효율이 낮을 것으로 예측되었다.

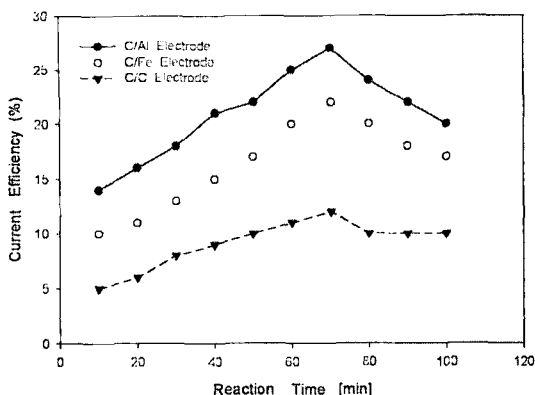


Fig. 2. Current efficiencies of electrode materials [Initial pH : 8.7, Electrode distance : 2cm, Electrolyte concentration : 0.05 N, Current density : 100 mA/cm²].

3. 전극간 거리변화에 따른 처리효율

고령화된 매립장 침출수를 대상으로 전류효율 실험을 실시한 결과, 양극에 탄소전극 그리고 음극에 알루미늄전극을 사용하였을 때 가장 높은 전류효율을 얻었으며, 이들 전극을 이용하여 전극간 거리 변화에 따른 침출수 처리효율 실험을 수행하기 위하여 1~5cm까지 1cm씩 전극간 거리를 두면서 실험을 수행하였다. 이때 전해질농도 0.05 N NaCl, 반응시간 0~100분 그리고 전류밀도 100 mA/cm²로 실험을 수행한 결과 Fig. 3, 4와 같은 결과를 얻었다.

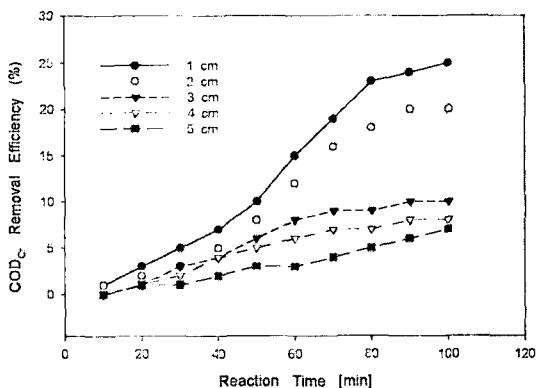


Fig. 3. Effect of COD_{Cr} removal efficiency according to various electrode distance. [Initial pH : 8.7, Electrode : C/Al, Electrolyte concentration : 0.05 N, Current density : 100 mA/cm²].

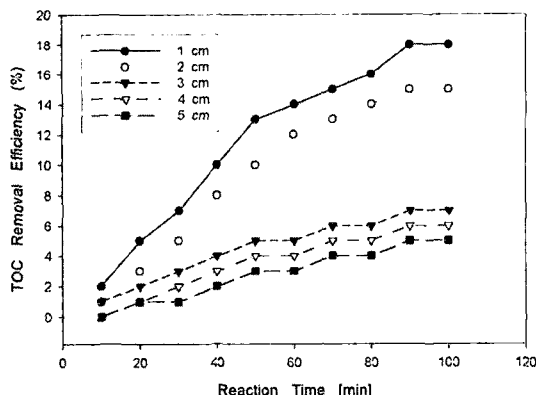


Fig. 4. Effect of TOC removal efficiency according to various electrode distance [Initial pH : 8.7, Electrode : C/Al, Electrolyte : 0.05 N, Current density : 100 mA/cm²].

전극간 거리변화에 따른 COD_{Cr} 및 TOC 제거효율을 분석한 결과, 반응시간 100분을 기준으로 1cm에서 가장 높은 25.0%와 18.0%가 제거된 것으로 조사되었으며, 전극간의 간격 3cm 이상에서는 COD_{Cr} 및 TOC의 제거효율이 현저히 분화되는 것으로 조사되었다.

전극 간 간격이 작을수록 유기성오염물질의 제거효율이 상승하였는데, 이는 전극 간 간격이 가까울수록 효율적인 전류가 흐르기 때문에 양극의 직접산화반응이 효과적으로 진행됨과 동시에 양극에서 생성된 산소 및 HOCl과 같은 강력한 산화제가 유기오염물질을 산화시키는 간접산화반응도 병행하여 일어나기 때문으로 판단되었다. 그리고 전극간 거리가 가까울수록 Al³⁺이온의 용출속도가 빨라져 금속산화물을 형성하는 전기응집반응도 효과적으로 일어나기 때문으로 판단되었다. 그러나 이렇듯 낮은 유기성오염물질의 제거효율을 감안할 때, 고령화된 매립장 침출수 처리에 있어 전기분해공법의 적용이 효과적이지 못한 것으로 판단되었다.

4. 전류밀도변화에 따른 처리효율

전류효율 및 전극간의 간격에 따른 고령화된 매립장 침출수 처리효율 실험에서 가장 효과적인 것으로 조사된 탄소/알루미늄전극을 사용하고, 전극간 거리를 2cm로 일정하게 유지하면서 전류밀도 변화에 따른 침출수처리 효율을 분석하였다. 이때

전류밀도는 20~100 mA/cm²로 20 mA/cm²씩 증가시키면서 실험을 수행하였으며, 전해질로 0.05N-NaCl을 사용하여 실험을 수행한 결과 Fig. 5, 6과 같은 결과를 얻었다.

전류밀도는 수처리를 위한 전기·화학적 산화공정에서 오염물질제거에 중요한 인자로 작용한다. 일반적으로 전류밀도가 높을수록 산화반응이 촉진되어 높은 유기성오염물질의 제거효율을 얻을 수 있는 반면, 수처리에 소요되는 비용이 상승하게

된다. 따라서 전기분해로 처리하고자하는 대상 폐수에 적합한 전류밀도를 도출하는 것은 매우 중요하다.

Fig. 5, 6에서 살펴본 바와 같이 전류밀도 80 mA/cm²이하에서 유기성오염물질의 제거효율이 급격히 둔화되는 것으로 관측되어, 고령화된 매립장 침출수를 전기분해공법으로 처리하고자할 때 80 mA/cm²이상의 전류밀도가 소요되는 것으로 조사되었다.

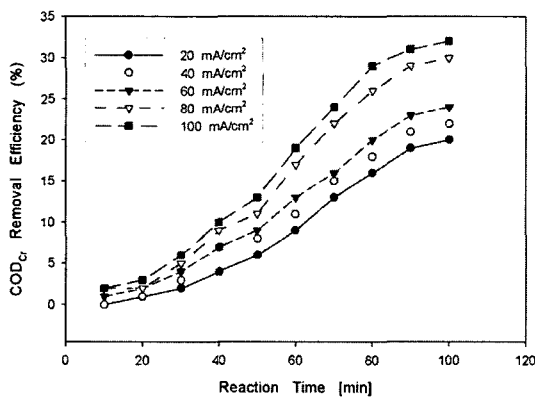


Fig. 5. Effect of COD_{Cr} removal efficiency according to various current density [Initial pH : 8.7, Electrode : C/Al, Electrode distance : 2cm, Electrolyte concentration : 0.05 N].

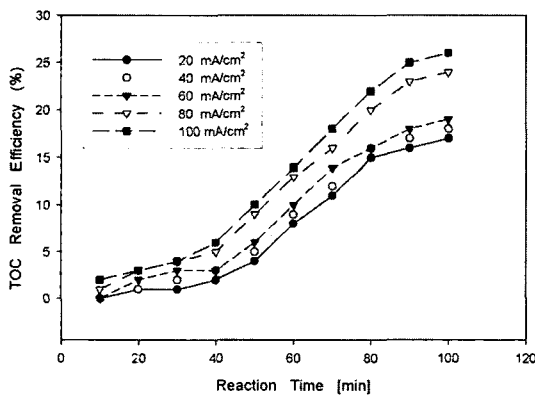
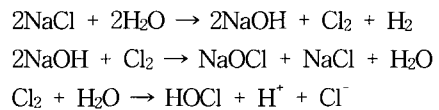


Fig. 6. Effect of TOC removal efficiency according to various current density [Initial pH : 8.7, Electrode : C/Al, Electrode distance : 2cm, Electrolyte concentration : 0.05 N].

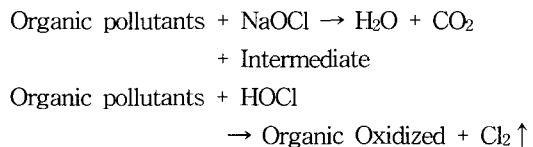
5. 전해질농도변화에 따른 처리효율

일반적으로 전기분해공정에서 NaCl을 전해질로 많이 활용하고 있으며, 전해질의 농도 증가에 따라 전류효율이 향상하는 것으로 널리 알려져 있다¹⁹⁾. 이는 전해질의 농도가 증가할수록 수용액상의 전기전도도가 증가하여 전기응집반응 및 전기산화반응이 향상됨과 동시에 반응의 안정화에 소요되는 시간이 짧아지기 때문으로 알려져 있다²⁰⁾.

특히 전해질로 NaCl을 사용할 경우 양극에서 생성되는 산소뿐만 아니라 NaCl주입으로 인해 생성되는 HOCl 및 NaOCl과 같은 산화제가 생성되어 이들이 유기성오염물질을 산화 제거시키는 것으로 알려져 있으며, 이들의 반응메커니즘을 아래의 반응식으로 나타내었다.



상기 반응식에서 살펴본 바와 같이, 생성된 HOCl 및 NaOCl은 높은 산화력을 가지고 있어 폐수중의 유기성오염물질과 다음과 같이 반응하여 제거하게 된다.



본 연구에서는 NaCl을 전해질로 사용하였으며,

0~0.2 N까지 0.05 N씩 농도를 변화시키면서 100 분간 전기분해를 실시하였다. 이때 전극은 탄소/알루미늄 전극을 사용하였으며, 전극간 거리는 2cm 그리고 전류밀도는 80 mA/cm^2 로 일정하게 유지하면서 실험을 수행한 결과 Fig. 7, 8과 같은 결과를 얻었다. Fig. 7, 8에서 보는 바와 같이 전해질의 농도가 높을수록 유기성오염물질의 제거효율은 다소 향상되었으나, 0.1 N이하에서는 제거효율의 둔화가 급격하게 관측되었다.

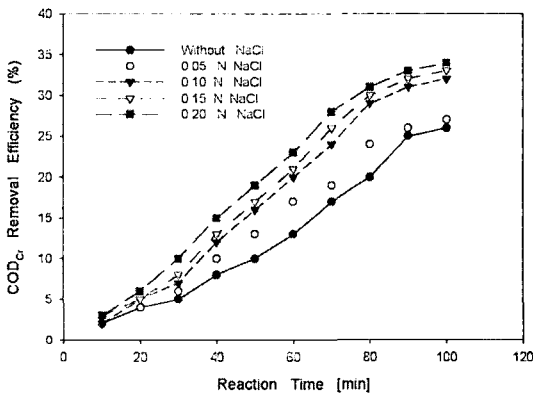


Fig. 7. Effect of COD_{Cr} removal efficiency according to various electrolyte concentration [Initial pH : 8.7, Electrode : C/Al, Electrode distance : 2cm, Current density : 100 mA/cm^2].

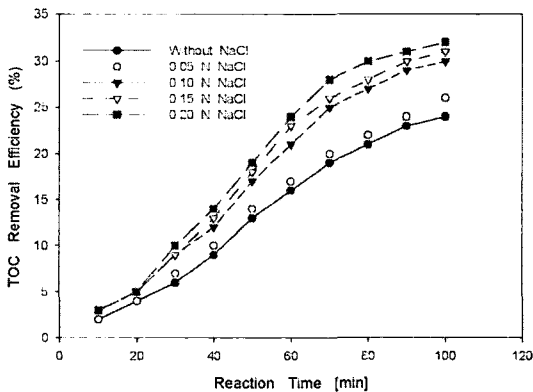


Fig. 8. Effect of TOC removal efficiency according to various electrolyte concentration [Initial pH : 8.7, Electrode : C/Al, Electrode distance : 2cm, Current density : 100 mA/cm^2].

이러한 결과는 0.1 N 이하의 NaCl 주입으로는 유기성오염물질의 산화제로 작용하는 NaOCl 및 HOCl이 효율적으로 생성되지 못하기 때문에 판단되었으며, 이러한 실험결과를 토대로 고령화된 매립장 침출수 처리에 효율적인 전해질 주입농도를 0.15 N 이상으로 설정하였다.

6. pH변화에 따른 처리효율

전기분해에서 음극으로 알루미늄전극을 사용하는 경우 전기분해의 적절한 pH 선정은 매우 중요한 인자로 지적되는데, 이는 알루미늄전극으로부터 용출된 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 의 금속수산화물이 pH 5~6 영역에서 침전생성이 잘 일어나며, 전기분해과정에서 전해질로 주입된 NaCl에 의하여 생성되는 HOCl의 존재가 일반적으로 pH 6이하에서 가능하기 때문이다.

pH변화에 따른 고령화된 매립장 침출수의 유기성오염물질의 제거경향을 Fig. 9, 10에 나타내었다.

Fig. 9, 10에서 살펴본 바와 같이 pH 5에서 유기성오염물질의 제거효율이 가장 우수한 것으로 조사되었으며, pH가 상승할수록 제거효율이 현저히 저하되는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 알루미늄전극으로부터 용출된 Al^{3+} 가 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 의 금속수산화물을 형성하는 전기응집의 경우 pH가 높을 경우 용해도가 상승하여 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 의 형성에 장애를

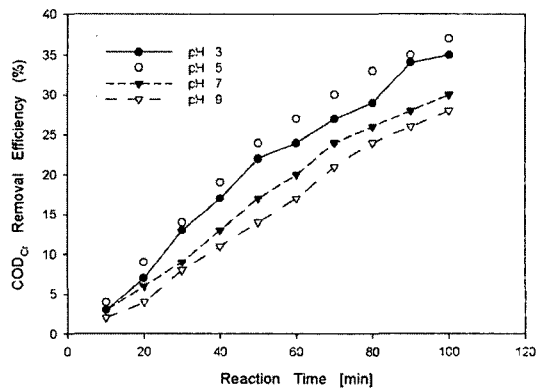


Fig. 9. Effect of COD removal efficiency according to various pH. [Electrode : C/Al, Electrode distance : 2cm, Current density : 80 mA/cm^2 , Electrolyte concentration : 0.15 N].

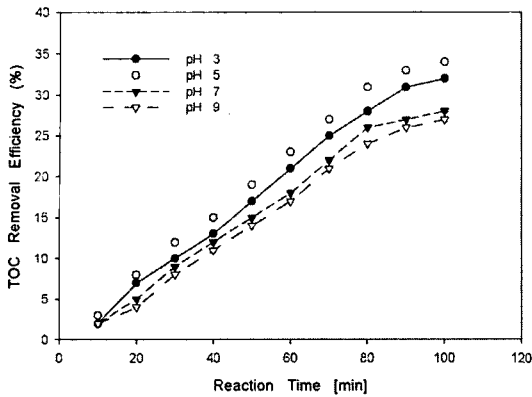


Fig. 10. Effect of COD removal efficiency according to various pH. [Electrode : C/Al, Electrode distance : 2cm, Current density : 80mA/cm², Electrolyte concentration : 0.15 N].

유발함과 동시에 전해질로 주입한 NaCl역시 HOCl보다 산화환원전위(ORP : Oxidation Reduction Potential)가 낮은 OCl⁻의 형태로 수중에 존재함으로 유기성오염물질이 효과적으로 산화 및 제거가 이루어지지 못하기 때문에 판단되었다.

IV. 결 론

본 연구는 BOD/COD_{Cr}비가 0.1로 낮아 생물학적 처리가 어려운 고령화된 매립장 침출수를 대상으로 전기분해공법을 도입한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

매립연령이 10년 이상으로 높아 BOD/COD_{Cr}비가 0.1정도로 낮은 매립장 침출수를 전기분해 할 경우 효율적인 전극은 양극에 탄소, 음극에 알루미늄전극이 가장 효율적이었으며, 전극간의 간격 2cm이하, 전류밀도 80 mA/cm²이상, NaCl을 전해질로 사용할 경우 0.15 N이상, 그리고 적정 pH는 5가 최적 조건인 것으로 조사되었다.

이러한 조건에서 100분간 전기분해를 실시한 결과 COD_{Cr} 및 TOC가 각각 34%, 32%만이 제거된 것으로 조사되어, 고령화된 매립장 침출수 처리에 전기분해공법의 적용은 생물학적 난분해성물질의 제거에 효과적이지 못한 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 환경부 : 통계연감, 2003.
2. Leckie, J. O., J. G. Pacey, and C. Halvadakis. : Landfill Management with Moisture Control, *ASCE*, 105(2), 337-342. 1979.
3. Dass, P., G. R. Tamke and C. M. Stoffel. : Leachate Production of Sanitary Landfill Site, *ASCE*, 103(6), 981-991. 1977.
4. Robison, H. D. and P. J. Maris. : Treatment of Leachates from Domestic Waste in Landfill Sites, *J. WPCF*, 50(1), 30-42. 1985.
5. Bull, P. S., J. V. Evans, R. M. Wechsler and K. J. Cleland. : Biological Technology of the Treatment of Leachate from Sanitary Landfill, *Water Research*, 17(11), 1474-1488 .1983.
6. Kelly, H. G. : Pilot Testing for Combined Treatment of Leachate from a Domestic Waste Landfill Site, *J. WPCF*, 59(5), 254-266. 1987.
7. Stegmann, R. and H. J. Ehris. : Operation and Design of Biological Treatment Plants, *Water Sciences and Technology*, 13(23), 919-928. 1981.
8. Mavincic, D. S. : Kinetics of Carbon Utilization in Treatment of Leachate, *Water Research*, 18(10), 1279-1292. 1984.
9. Chian, E. S. and F. B. Dewalle. : Sanitary Landfill Leachate and Their Treatment, *Journal of Environ. Eng.*, 102(2), 411-433. 1976.
10. Marincic, L. and Frank, B. L. : Electrochemistry and oxidation of ammonia in wastewater, *Applied Electrochemistry*, 8, 333-345. 1978.
11. Vijayaaraghavan, K., Ramanujam, T. K. and Balasubramanian, N. : In site hypochlorous acid generate ion for treatment of tannery wastewater, *Environmental Engineering*, 9, 887-891. 1998.
12. Chiang, L. C., Chang, J. E. and Tseng S. C.

- : Electrochemical oxidation pre-treatment of refractory organic pollutants, *Water Science and Technology*, **36**(23), 123-130. 1997.
13. Lidia, S., Jereni, N. and Francesco, Z. G. : Electrochemical treatment of tannery wastewater using Ti/Pt and Ti/Pt/Ir electrode, *Water Research*, **29**(29), 517-524. 1995.
 14. Sedlak, R. : Phosphorus nitrogen removal from municipal wastewater, *Lewis*, 218-240. 1991.
 15. Chiang, L. C., Chang, J. E. and Wen, T. C. : Indirect oxidation effect in electrochemical oxidation treatment of landfill leachate, *Water Research*, **29**(2), 671-678. 1995.
 16. Chiang, L. C., Chang, J. E. and Tseng S. C. : Electrochemical treatability of refractory pollutants in landfill leachate, *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, **12**(1), 71-82. 1981.
 17. Eugene, S. : Diffused-air stripping of ammonia in advanced wastewater treatment, *Chemistry in water reuse*, **2**, 497-508, Ann Arbor Science. 1981.
 18. William, J. C. : Diffused-air stripping of ammonia in advanced wastewater treatment, *Chemistry in water reuse*, **2**, 497-508, Ann Arbor Science. 1981.
 19. Bonmati, A. and Flotats, X. : Air stripping ammonia from pig slurry, *Waste Management*, **23**(3), 261-272. 2003.
 20. Liao, P. H., Chen, A. and Lo, K. V. : Removal of nitrogen from swine manure wastewater by ammonia stripping, *Biore-source Technology*, **54**, 17-20. 1995.
 21. Opatken, E. J. and Bond, J. J. : RBC nitrification of high ammonia leachate, *Environmental Process*, **10**(1), 60-63. 1991.
 22. Angelidaki, I. and Ahring, B. K. : Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste, *Applied Microbiology and Biotechnology*, **38**(3), 560-564. 1993.
 23. 동화기술, 수질오염공정시험방법. 2000.
 24. Fujishimas, S., Miyahara, T. and Noike, T. : Effect of moisture content on anaerobic digestion of dewatered sludge, ammonia inhibition to carbohydrate removal and methane production, *Water Science and Technology*, **41**(3), 119-127. 2000.
 25. 김성국, 박상원, 홍대일 : 전기분해에 의한 염색폐수 처리공정에 관한 연구, *한국환경과학회지*, **8**(4), 539-545. 1999.