

## 분극곡선 측정을 통한 전해부상조의 설계인자 평가

임봉수<sup>†</sup> · 김경수 · 최찬수<sup>\*</sup>

대전대학교 환경공학과

<sup>\*</sup>대전대학교 응용화학과

## Evaluation on Design Factors of Electrolytic Flotation Reactor by Measuring Polarization Curve

Lim, Bong-Su<sup>†</sup> · Jin, Jing-Zhu · Choi, Chan-Soo<sup>\*</sup>

*Department of Environmental Engineering, Deajeon University*

*<sup>\*</sup>Department of Applied Chemistry, Deajeon University*

*(Received 28 November 2006, Accepted 26 February 2007)*

### Abstract

This study was carried out to obtain the optimum design factors for an eletrolytric flotation reactor. When the effluent of the leachate treatment facility was treated under the condition of 10 volts, 30 minutes, at the Al-Al electrode system; COD removal efficiency was 45%, and total phosphorus removal efficiency was 98%. The high removal efficiency was caused by the fact that phosphate was removed by leaching  $Al^{3+}$  from two electrodes. The leachate containing high ammonium nitrogen concentration was treated by a batch test under the condition of 60 minutes reaction time and added chloride ion; ammonium nitrogen removal efficiency was 89%. This high efficiency was affected by added chloride ion to wastewater. To find the optimum current density and voltage of the leachate containing chloride ion (ratio of  $Cl^-/NH_4-N$  is 11) a electrochemical polarization curve was used. These values were found to be  $4.5 \text{ mA/cm}^2$  and about 2.1 V, respectively. When C-Al electrode system was used at a batch test, the total nitrogen removal efficiency was increased by 1.8 to 3.3 times, compared to Al-Al electrode system due to high  $Cl_2$  gas production.

**keywords** : Design factor, Eletrolytric flotation reactor, Leachate treatment, Polarization curve

## 1. 서론

최근 산업활동의 부산물로 생성되는 오염물질의 배출량이 급격히 증가하고 그 종류 또한 복잡하고 다양하여 수중 오염물질을 제거하기 위해 적용된 기존의 생물학적 처리공정만으로는 효과적으로 제어하는데 한계를 드러내고 있다.

전기화학적 수처리 방법이 기존 수처리 기술들에 비해 몇 가지의 장점은 1) 전기화학적 방법에서 사용되는 주요 반응물은 환경에 전혀 영향을 미치지 않는 전자(Electron)이므로, 독성화학물질을 다량 필요로 하는 기존의 방법들에 비해 2차 오염 문제가 적어 매우 환경친화적인 기술 2) 전기화학공정은 주로 상온·상압조건에서 운전되므로 에너지 효율 측면에서 보았을 때 경제적인 기술 3) 비교적 일반적인 조건에서 전기화학 반응을 일으킬 수 있으므로 매우 안전한 기술 4) 전극에 가해지는 전압을 조절함으로써 운전자가 원하는 반응경로나 반응생성물을 얻을 수 있으므로 선택성이 높은 기술이다(정 등, 2005a).

이러한 전기화학적 방법은 폐수특성과 처리목적에 따라

양극산화, 전기펜톤, 전해부상, 전해응집공정 등 다양한 공정들로 연구개발되었다. 이중 양극산화공정은 반응성이 없는 양극표면에서 직접 혹은 간접산화물 통해 유기오염물질을 제어하고 있으나, 산화-환원반응에 참여하는 알루미늄(Al) 전극을 활용하였을 때 Al 성분으로 인한 인체거해과도 높아 대표적인 수처리공정으로 침출수, 염색폐수, 축산폐수, 농약물질 등의 처리에 적용되어 연구되고 있다. 본 연구에서 사용되는 전해부상조는 전기화학적 방법의 일반적인 장점 외에 몇가지 주요 장점을 가지고 있다. 첫째, 혼화, 응집, 부상 분리과정이 한 반응조내에서 일어나는 단순한 반응조이다. 둘째, 양극에서 발생하는 활성산소와 각종 산화제 기능에 의해 추가적인 살균과정이 필요 없다. 셋째, 기존에 설치된 반응조를 개조하여 전해응집 부상반응조로 쉽게 활용 가능하고 신규설비 뿐만 아니라 기존 설비의 진단 혹은 후단에 설치하여 전처리나 후처리 설비로 활용이 가능하다.

전해부상조는 약품주입이 필요없이 동일한 고액분리효과를 가져올 수 있는 전극판에서의 수소와 산소의 미세기포에 의한 부상효과와 전극에서의 산화환원반응을 통한 용존성 오염물질의 분해가 촉진되어 처리효율을 극대화시킬 수 있는 수처리 시스템이다(Alexandrova et al., 1994; Burns et

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
bslim@dju.ac.kr

al., 1997; Hosny, 1996; Poon, 1997). 그러나, 본 연구에서 사용되는 전해부상조를 이용한 수처리공정은 처리기능면에서 양호함에도 불구하고 취약점은 AI 전극에 알루미늄 피막( $Al_2O_3$ )인 스케일이 형성되어 장시간 사용시 효율이 저하되고, 세척을 빈번히 해주어야 하는 유지관리의 어려움이 있는 공정이다. 또한 반응조의 설계에 있어서 전극의 간격, 전극과 원수의 접촉면적, 반응시간, 전압, 전류밀도 등의 설계인자들이 폐수의 성상에 따라 설계조건들을 적합하게 선정하여야 하나, 현장 경험만으로는 부족하므로 이론적인 기술원리에 의한 체계적인 실험을 통한 자료를 제시하여 설계인자들을 개발하여야 활용될 수 있다.

본 연구는 기존 전해부상조의 최적설계인자가 설정되지 않아 현장에서 폐수처리공정으로 활용되는데 많은 시행착오를 겪고 있으므로 이에 따른 반응조의 최적 기초설계인자를 도출하고자 한다. 이를 위해 대상폐수는 도시 쓰레기매립장 침출수를 이용하여 전기화학적 분극실험에 의한 분극곡선을 통해 전해부상조 설계에 적합한 전류와 전압을 예측하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험실규모의 실험장치는 S회사에서 개발한 알루미늄, 탄소 전극을 이용한 것으로 연속운전이 가능한 전해부상조이다. Fig. 1은 실험에 사용된 전해부상조의 처리공정도이다.

본 연구에서 사용한 직류전원장치는 Digital Electronics에서 제조한 DC Power Supply LP-503TP로 최대전압은 50 V이고 최대전류는 6 A이다. 그리고 Timer는 전극의 부동

태화현상을 완화하기 위하여 주기적으로 양, 음극을 변환시키는 작용을 한다.

전해부상조는 아크릴로 제작하였으며 혼화조, 반응조, 부상조, 슬러지저장조, 방류조로 구성되었다. 전극은 알루미늄이나 탄소전극으로 교체할 수 있으며, 전극판은 여러개 겹쳐서 양극과 음극이 적당한 간격으로 조정 가능하게 연결되었다.

### 2.2. 운전방법

전해부상조로 실험할 때 원수는 혼화조에서 충분히 혼합되고 응집제의 작용으로 부유물질이 응집된 후 반응조에 유입되는 것이나 본 연구에서는 쓰레기매립장 침출수를 대상폐수로 하였는데 부유물질이 비교적 낮아 혼화조를 거치지 않고 원수저장조에서 직접 반응조에 유입되도록 하였다. 반응조의 운전은 대상폐수에 적합한 정전압을 도출하여 운전하고자 하였다. 반응조에 유입된 원수는 직류전류가 흐르는 (+)와 (-)전극의 작용으로 산화환원되고 부상조로 유입되며 이때 생성된 부상슬러지는 슬러지 저장조로 굽어모이고 처리수는 처리수 유출배관으로 방류조에 유입되어 최종 배출된다. 슬러지 저장조에 누적되는 슬러지는 양이 많은 경우 수시로 제거하였다.

직류전원장치는 전극에 일정한 전류와 전압을 흐르게 하고 Timer는 전극의 (+)와 (-)을 5분 간격으로 변화시켜 전극의 부동태화 현상을 완화하도록 하였다. 분극실험을 위하여 EG&G Princeton Applied Research사의 Mode 273A (Potentiostat/Galvanostat) 전압장치를 사용하였다. Fig. 2는 분극실험장치의 사진이다.

분극실험은 분극전압에 대한 전류특성을 알아보기 위한 것으로 정전압장치를 사용하여 선형전압을 가하거나 순환

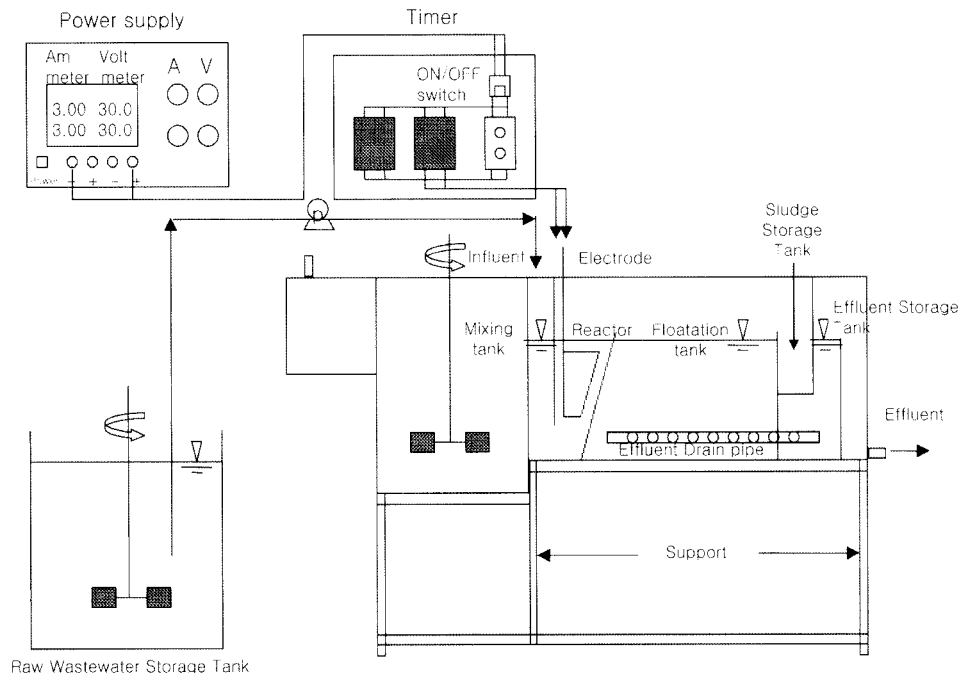


Fig. 1. Schematic of the electrolytic flotation process.

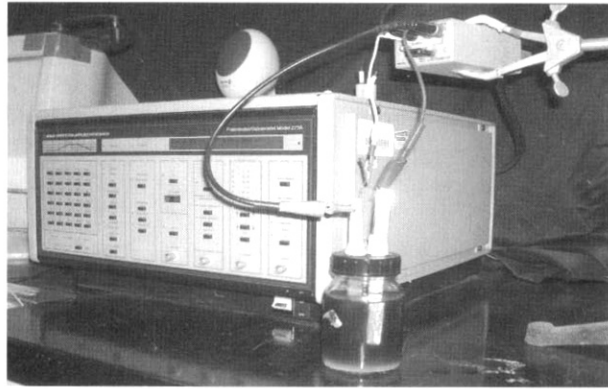


Fig. 2. Instrument for electrochemical polarization experiment.

전압을 가하여 분극곡선을 얻는다. 이 곡선이 뜻하는 바는 반응에 필요한 특정 전류를 얻기 위하여 가해야 하는 분극 전위를 알려준다. 실험반응조의 구성으로 2-전극계를 사용하고 실험에서 얻은 분극곡선으로 전류밀도와 전압관계를 얻으면 바로 반응장치에 적용할 수 있는 중요한 기초자료를 제공한다. 시료는 연속운전시 3회이상 채취하여 분석하였으며 수질분석항목은 COD, TN, NH<sub>4</sub>-N, TP 등을 측정하였으며, 분석 방법은 Standard Methods(APHA, 1998)에 의해 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 전압에 의한 제거효과

연구대상 폐수는 대전시 대덕구 금고동 쓰레기매립장 침출수처리시설(2단계)에서 배출되는 최종 방류수를 원수로 사용하였으며, 사용한 폐수의 성상은 COD 1,092-1,157 mg/L(평균 1,092 mg/L), TN 1,581-2,458 mg/L(평균 2,037 mg/L), NH<sub>4</sub>-N 564-815 mg/L(평균 680 mg/L), TP 13.5-

15.1 mg/L(평균 14.5 mg/L) 정도로 질소농도가 비교적 높고 유기물질은 생분학적으로 분해하기 어려운 난분해성 물질이다.

두 전극이 Al-Al 전극시스템으로 연속운전하여 대상폐수 처리시 전해부상조의 적정 전압을 알아보기 위해서 전압별 제거효율을 분석한 결과를 Table 1에 나타내었으며, 전압 변화에 따른 TP와 COD의 제거효율을 Fig. 3에 도시하였다. 이 경우 Al 전극판 한개의 면적이 24 cm<sup>2</sup>인 22개의 전극판이 양극과 음극이 0.5 cm 간격으로 서로 교차되어 연결되었다. 반응시간은 30분으로 하였으며 추가적인 NaCl가 주입되지 않은 경우이다.

전압이 증가할수록 제거효율이 증가하는 경향을 보였으며 10V에서 COD 제거효율은 45%, TP 제거효율은 98%로 각각 나타났고 그 이상에서는 제거효율의 변화가 매우 적으므로 적정 전압은 10V 정도인 것으로 판단된다. 총인제거효율이 높은 것은 양극에서 용출되는 Al<sup>3+</sup> 이온량의 증가로 수중에 존재하는 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>와 결합하여 불용성의 Al<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>를 형성한 것으로 판단된다(신 등, 2001).

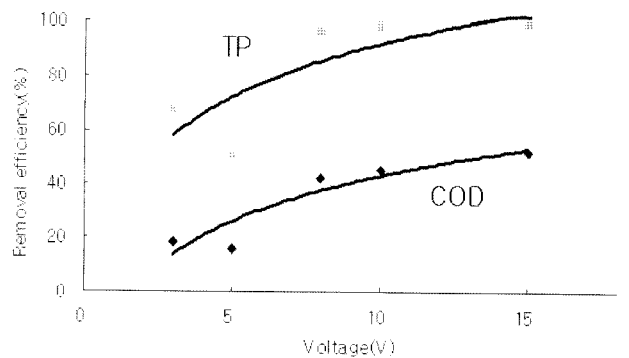


Fig. 3. COD and TP removal vs. voltage in the electrochemical floatation process.

Table 1. Results of water quality analysis in the electrochemical floatation process

Voltage	Item	pH	Electric conductivity	CODer	TN	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	TP
3 V	Influent	7.7	30,000	1,029	2,050	815	1,064	14.8
	Effluent	8.8	28,500	847	1,980	792	1,027	4.9
	Removal(%)	-	-	18	3	3	4	67
5 V	Influent	7.3	28,000	1,134	2,068	-	-	15
	Effluent	8.2	29,000	950	2,017	-	-	7.5
	Removal(%)	-	-	16	2	-	-	50
8 V	Influent	7.3	42,000	1,097	2,029	606	1,065	13.9
	Effluent	8.9	41,000	635	1,916	547	1,031	0.6
	Removal(%)	-	-	42	6	10	3	96
10 V	Influent	7.2	36,000	1,045	1,581	564	1,177	13.5
	Effluent	9.1	32,750	570	1,509	510	1,094	0.3
	Removal(%)	-	-	45	5	10	7	98
15 V	Influent	6.9	35,000	1,157	2,458	735	1,251	15.1
	Effluent	9.1	36,000	554	2,377	651	1,158	0.2
	Removal(%)	-	-	52	3	11	7	98.7

Note : All units were mg/L except pH and electric conductivity (μS/cm).  
Reaction Time: 30 minutes

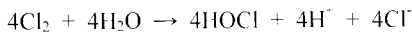
### 3.2. 질소제거

#### 3.2.1. 대상폐수 성장조정

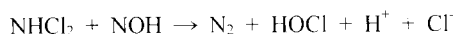
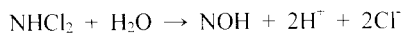
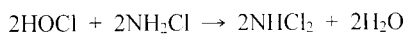
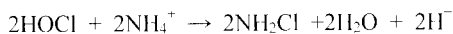
쓰레기매립장 침출수처리시설의 방류수를 대상폐수로 실험한 결과 총질소제거효율이 매우 저조한 것은 방류수의 질소 성분중 50%이상 이 질산성질소이므로 더 이상 산화의 효과를 기대할 수 없어 제거효율이 저조한 것으로 판단된다. 따라서 질소 성분중 암모니아성질소가 방류수의 암모니아성질소 농도에 비해 약 4배 정도로 높은 침출수 원수를 대상으로 실험을 제시하였다. Table 2은 침출수 원수를 대상폐수로 하였을 때 전해부상조의 연속운전 실험결과이다.

침출수 원수를 대상폐수로 조정하여 실험하였으나 그 결과는 여전히 COD와 NH<sub>4</sub>-N은 각각 9%, 11%의 제거효율로 저조하였다. 김 등(2001)의 연구에서 양극은 탄소(C), 음극은 알루미늄(Al) 전극을 사용하고, 전극간격 2.5 cm, 0.1 N NaCl 주입(이 경우 NH<sub>4</sub>-N가 320 mg/L이므로 Cl<sup>-</sup>/NH<sub>4</sub>-N = 11정도), 반응시간 50분, 전류밀도 20 mA/cm<sup>2</sup>, 시간간격에 의한 전극의 변환이 없는 조건에서 총질소와 암모니아성질소의 제거효율이 각각 63%, 90%로 보고하였다.

한편, 전기분해에서 불용성극판을 양극으로 사용하면 양호한 질소제거효과를 얻을 수 있다. 질소성분에서 주로 암모니아성 질소를 제거하는데 암모니아성 질소의 제거원리는 다음과 같은 메카니즘으로 설명할 수 있다(White, 1993).



- 차아염소산생성반응



- 탈질 반응

폐수내의 Cl<sup>-</sup>이온이 양극에서 Cl<sub>2</sub>가스로 발생되어 수용액 내에서 HOCl을 생성하고, HOCl은 암모늄이온과 반응하여 NH<sub>2</sub>Cl, NHCl<sub>2</sub>를 생성하고, 그리고 NHCl<sub>2</sub>는 물과 반응하여 NOH를 생성한다. 최종으로 NHCl<sub>2</sub>는 NOH와 반응하여 N<sub>2</sub> 가스를 생성함으로써 암모늄이온을 제거한다. 질소제거에 영향을 미치는 인자에는 전류밀도, 반응시간, 염소이온 침

가율(Cl<sup>-</sup>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 등이 있다. 일반적으로 암모니아성질소의 제거효율은 전류밀도의 증가에 따라 높아지며 반응시간에 따라 높아진다. 이론적으로 암모니아성질소를 완전히 제거하기 위한 Cl<sup>-</sup>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 비는 약 27.6정도로 나타났다(길 등, 2000).

#### 3.2.2. 염소주입한 Batch실험

염소이온농도에 의해 암모니아성질소를 제거하기 위해 염소이온농도와 암모니아성질소 농도의 비가 11이 되도록 0.87 M의 NaCl를 주입하였다. 암모니아성질소의 제거효율과 적정 반응시간을 파악하기 위하여 Batch실험을 수행하였다. Batch실험의 운전조건은 전압 10~12 V, 전류 6 A, 반응시간 10~80분으로 변화를 주었으며, 시료량 1 L, 전극표면적 3.5 cm<sup>2</sup>, 전극판 간격 1~3 cm 정도이었다. 전극은 (+)와 (-) 모두 Al 전극을 사용하였다.

이와 같은 Batch실험에서 반응시간에 따른 처리효율은 Table 3에 나타내었다. 반응시간에 따른 TN, COD제거효율은 Fig. 4에, 암모니아성질소 제거효율은 Fig. 5에 나타내었다. 반응시간이 증가할수록 처리효율이 증가되는 경향을 띠었으나, 60분 이후에는 감소되었다. COD의 경우 반응시간이 60분일 때 약 40%까지 제거되었으며, 암모니아성질소의 제거효율은 89%로 매우 높았으나 총질소제거효율은 26%로 암모니아성질소의 제거효율에 비해 낮았다. 총질소 제거효율이 암모니아성질소에 비해 매우 낮은 것은 질소의 형태가 다른 형태로 변하여 반응조내에 존재하거나 NO<sub>3</sub>-N이 제거될 수 있는 기회가 적었기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 정 등(2005b)의 전기응집/산화공정과 같은 유사공정에서 최적 반응시간은 50~60분 정도로 제시하고 있으며 COD제거효율은 45~75%정도의 효율을 얻고 있다.

**Table 3.** Removal efficiency vs. reaction time (Unit : mg/L)

Reaction time (min)	Item	CODcr	TN	NH <sub>4</sub> -N
10	Influent	2,372	3,332	2,068
	Effluent	1,789	2,654	1,896
	Removal(%)	25	20	8
40	Influent	1,860	2,276	1,510
	Effluent	1,324	1,731	807
	Removal(%)	29	24	47
60	Influent	2,082	2,751	1,603
	Effluent	1,280	2,034	184
	Removal(%)	39	26	89
80	Influent	2,148	2,881	2,040
	Effluent	1,288	2,090	187
	Removal(%)	40	27	91

**Table 2.** Results of water quality analysis for raw Leachate; continuous test

Item	pH	Electric conductivity	CODcr	TN	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	TP
Influent	8.2	over than 50,000	2,272	3,154	2,853	301	14
Effluent	8.5	over than 50,000	2,074	2,810	2,532	280	7.5
Removal (%)	-	-	9	10.9	11	7	46.4

Note : All unit were mg/L except pH and electric conductivity (μS/cm).

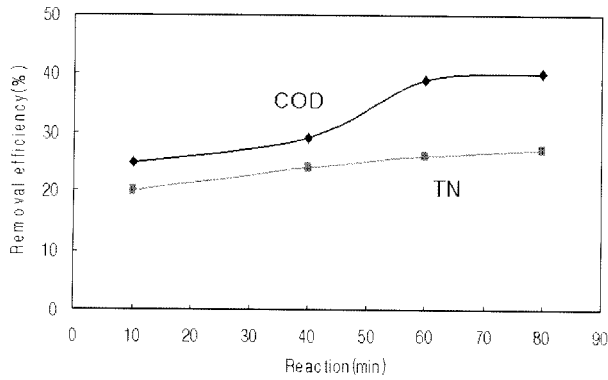


Fig. 4. TN and COD removal efficiency vs. reaction time (Batch Test).

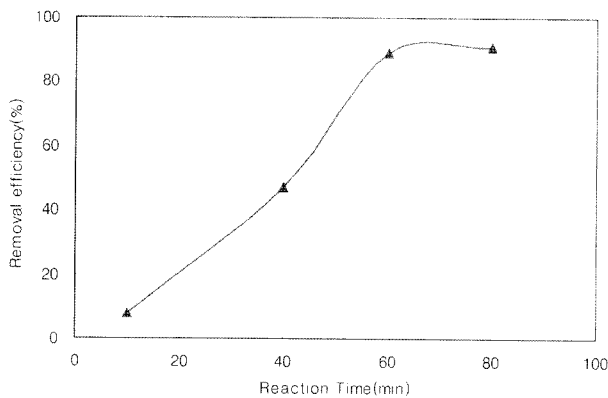


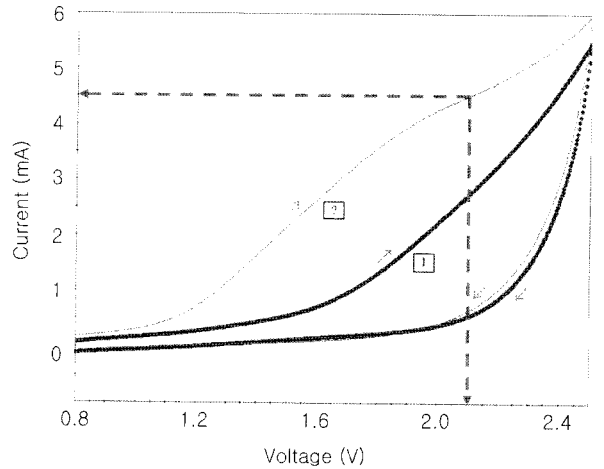
Fig. 5. NH<sub>4</sub>-N removal efficiency vs. reaction time (Batch Test).

### 3.3. 분극곡선에 의한 전극특성

본 연구에서 사용한 전극은 양극과 음극이 모두 알루미늄전극이었는데 김 등(2001)의 연구에서는 양극은 탄소, 음극은 알루미늄전극으로 사용한 결과 비교적 좋은 질소 제거효율을 얻었다. 그러므로 총질소와 암모늄이온의 제거에 영향주는 주요 원인이 염소(Cl<sub>2</sub>)의 발생량이라고 판단된다. 탄소전극과 알루미늄전극의 질소제거효율을 비교하기 위하여 (1) C을 작업전극(+)으로 Al을 대전극(-)으로, (2) Al을 작업전극(+)으로 Al을 대전극(-)으로 하여 분극곡선을 그렸다. 분극곡선에서 X축은 전압, Y축은 전류인데 전극면적이 1 cm<sup>2</sup>이므로 Y축은 대략적으로 전류밀도로 볼 수 있다. 분극곡선의 그림에 표시된 화살표는 전압이 가해질 때 폐수 내의 오염물질들의 산화환원이 일어나는 방향을 가리킨다.

Fig. 6은 탄소-알루미늄전극 사용시 염소이온의 유무에 따른 양전위에서의 분극곡선이다. 곡선 1은 염소이온을 주입하지 않은 경우이고 곡선 2는 염소이온을 주입한 경우이다. Fig. 6의 곡선 2, 탄소를 작업전극으로 사용시, 1.15 V부터 피크가 생성되는데 이는 염소가 산화되기 시작하였다는 것을 설명하며 전압이 약 2.1 V에서 2Cl<sup>-</sup>(aq) → Cl<sub>2</sub>(g) + 2e<sup>-</sup>에 해당하는 염소의 산화가 최대가 되는 피크가 있다는 것을 보여준다. 이때 전류는 4.5 mA인데 전극면적이 1 cm<sup>2</sup>이므로 전류밀도로 볼 수 있다. 특히 유리탄소전극을 사용하면 이 피크는 더 확실히 보인다.

Fig. 6의 곡선 1은 염소가 없는 경우인데 +1.65 V이상

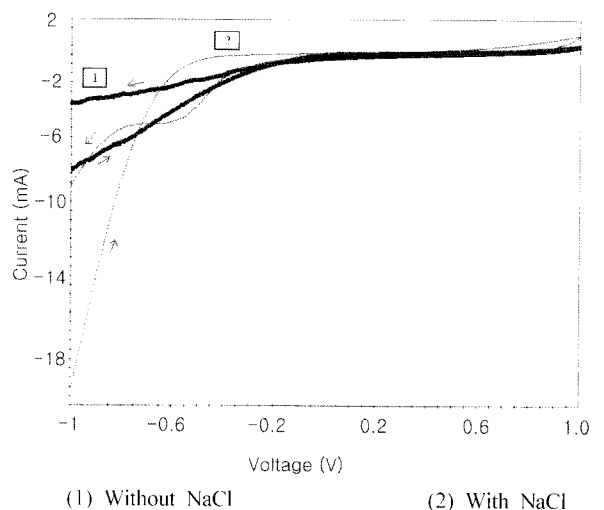


(1) Without NaCl (2) With NaCl  
Fig. 6. Polarization curve of positive potential range with C-Al electrodes.

서 피크가 생성되는데 이는 물이 산화되기 시작한다는 것을 알 수 있다. 곡선 1과 2의 공통사항은 화살표가 반대방향으로 내려올 때 곡선이 거의 겹치는데 이는 염소의 환원이 일어나지 않아 불가역반응이라는 것을 설명한다.

Fig. 7은 탄소-알루미늄전극 사용시 염소이온의 유무에 따른 음전위에서의 분극곡선이다. Fig. 7의 곡선 2에서는 -0.25 V에서는 염소기체의 환원이 일어나고 -0.2 V보다 낮은 음전위에서는 물의 환원반응이 나타난다. +0.8 V에서 불순물의 산화환원반응도 보인다. 그러므로 암모니아성 질소의 제거를 위하여서는 전압을 2.1 V이상으로 하여야 한다는 것을 알 수 있다. 이것은 전해부상조의 설계시 전류밀도가 4.5 mA/cm<sup>2</sup>이상으로 설계하는 것이 바람직한 것을 알 수 있으므로 전압을 설계하는데 중요한 기초자료가 된다.

Fig. 8은 알루미늄을 (+)와 (-)전극에 모두 사용시 염소이온의 유무에 따른 양전위의 분극곡선을 전압 0.5 V이하에서의 결과이다. Fig. 2의 곡선 2를 보면 알루미늄이 양전위로 분극될 때 Butler-Volmer식(문, 1987)에 의한 전류가 나



(1) Without NaCl (2) With NaCl  
Fig. 7. Polarization curve of negative potential range with C-Al electrodes.

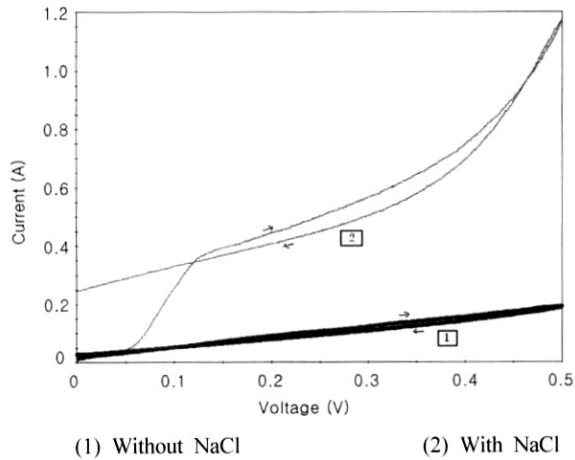


Fig. 8. Polarization curve of positive electric potential (0 ~ 0.5 V) range with Al-Al electrodes.

타하는데 0.06 V에서 전극의 산화피막형성에 의한 부동태화가 일어난다는 것을 우선 보여준다.

Fig. 9는 동일한 조건에서 전압을 3 V의 범위까지 확대한 분극곡선이다. Fig. 9의 곡선 2를 보면 -1.25 V이상에서 알루미늄의 용해산화가 일어나기 시작하고 염소발생은 1.6~1.8 V에서 육안으로 확인하였다. 특히 이 분극곡선은 높은 양극전압에서 부동태피막이 파괴되는 현상을 역방향 분극곡선(Fig. 8 곡선 2의 역방향)에서 보여주는 것이 재미있다. 이것은 높은 양전압을 유지할 때 전극표면의 부동태막이 있어도 수용액에서도 알루미늄의 연속 용해산화가 가능하다는 것을 말한다. 한편 Fig. 9 곡선 2에서 -1.1 V의 전압에서는 물의 산화가 일어난다.

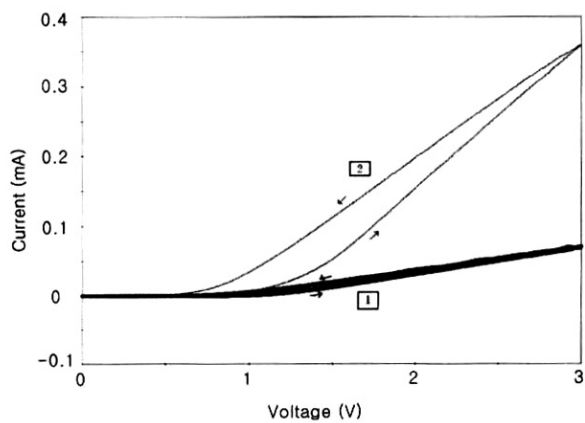


Fig. 9. Polarization curve of positive electric potential (0 ~ 3 V) range with Al-Al electrodes.

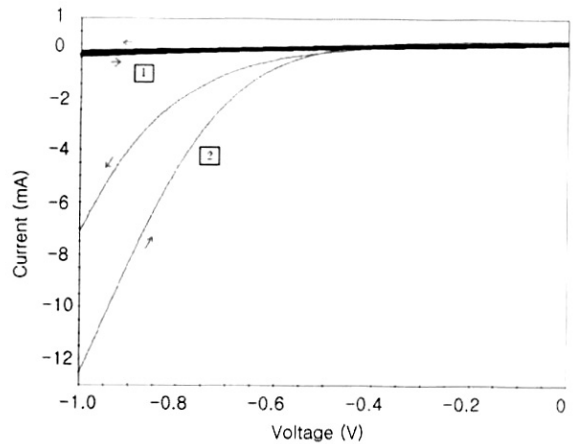


Fig. 10. Polarization curve of negative potential range with Al-Al electrodes.

Fig. 10은 알루미늄을 (+)와 (-)전극에 모두 사용시 염소이온의 유무에 따른 음전위의 분극곡선이다. -0.6 V보다 낮은 음전위에서 염소기체의 환원이 일어남을 알 수 있다.

염소발생에 대한 탄소 전극과 알루미늄 전극을 비교하면 탄소 전극에서 -1.15 V이상에서 염소발생이 주로 일어나지만 알루미늄 전극에서는 염소발생과 함께 알루미늄의 용해가 경쟁적으로 일어난다. 이 침출수 원수의 분극곡선들을 이용하면 반응조의 적정전압과 전류밀도를 예측할 수 있다. 쓰레기매립장 침출수처리시설 원수와 성상이 비슷한 인공폐수를 제조하여 분극곡선을 그려보았는데 그 결과 거의 일치하는 재현성을 나타내었다.

### 3.4. 전극 종류에 따른 제거효율

두 종류의 C-Al, Al-Al으로 Batch실험을 진행하여 질소제거효율을 비교한 결과는 Table 4와 같다. 이 경우 반응조의 운전조건은 전압 10~12 V, 전류 6 A, 반응시간 30분, 시료량 0.2 L, 전극표면적 3.5~5 cm<sup>2</sup>, 전극판 간격 2.5 cm이다.

Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 C-Al 전극 시스템에서의 COD제거효율이 Al-Al 전극 시스템에서보다 약 1.8~2.7배 높고 총질소제거효율은 1.8~3.3배 높다. C-Al 전극 시스템에서 총질소 제거효율은 탄소전극에서 효율적인 염소발생으로 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 이온이 질소가스까지 반응이 완전하게 진행되어 질소가 용액으로부터 대기중으로 이탈되기 때문인 것으로 판단된다. 총인제거효율은 C-Al 전극이 Al-Al 전극의 0.6배 정도로 낮게 나왔는데 그 원인은 5분간격으로 (+)와 (-)전극이 바뀌므로 반응시간 30분중 Al 전극이 양극으로

Table 4. Removal efficiency vs. electrode type (Batch Test)

(Unit : mg/L)

Item	C-Al electrodes			Al-Al electrodes		
	Influent	Effluent	Removal (%)	Influent	Effluent	Removal (%)
COD <sub>cr</sub>	2,062~2,692	1,080~1,829	32~48	2,692	2,198	18
TN	2,395~3,344	1,470~2,657	21~39	3,344	2,959	12
NH <sub>4</sub> -N	1,397~2,784	716~1,974	29~49	2,784	2,164	22
TP	6.9	3.2	54	7.0	0.8	89

**Table 5.** Removal efficiency of C-Al electrode system (Continuous Test)

(Unit : mg/L)

Item	Influent	Effluent	Removal (%)	Electric current	Voltage	Electrode surface area
CODcr	2,837	2,224	21.6	6 A	Switched 5 minute intervals alternatingly between + and - polarity; C anode: 5.1 V, Al anode: 3.5 V	100 cm <sup>2</sup> (20 cm <sup>2</sup> /ea ×5 ea)
TN	2,930	2,457	16.1			
NH <sub>4</sub> -N	2,690	1,991	26			
TP	6.7	2.2	67.2			

로 되는 시간이 줄어들어 Al<sup>3+</sup>가 적게 용출되었기 때문이라고 판단된다.

위의 Batch실험 결과에 의해 C-Al 전극으로 전해부상조에서 연속운전을 하였는데 반응조건과 결과는 Table 5와 같다. 연속운전 결과 COD제거효율은 21.6%, TN과 NH<sub>4</sub>-N의 제거효율은 16%와 26%로 Batch실험결과 (COD 32%, TN 21%, NH<sub>4</sub>-N 29%)보다 조금 낮다. 그것은 직류전원장치의 조건제한으로 최고 6 A의 전류 밖에 통과할 수 없으므로 연속운전시 전류밀도가 Batch실험보다 낮은 원인이라고 사료된다.

#### 4. 결론

쓰레기매립장 침출수처리시설의 원수와 방류수를 대상폐수로 전해부상조로 처리할 때 기초설계자료인 전압, 전류밀도, 반응시간 등에 대해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 쓰레기매립장 침출수처리시설의 방류수를 대상폐수로 (+)와 (-)전극 양쪽에 알루미늄전극을 갖는 전해부상조를 이용한 결과 반응시간 30분에서 적정전압은 10 V 정도이었으며 이 경우 COD 제거효율은 45%, 총인제거효율은 98%이었는데 인제거효율이 높은 것은 양극에서 Al<sup>3+</sup>가 용출되어 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>가 제거된 것으로 기인된다.
- 2) 질소제거를 위해 암모니아성 질소의 함량이 높은 침출수처리시설의 원수에 Cl<sup>-</sup>이온을 주입한 대상폐수로 Batch실험을 한 결과 반응시간 60분에 암모니아성질소 제거효율 89%로 나타났는데 Cl<sup>-</sup>이온의 주입에 의해 암모니아성질소의 제거에 매우 큰 영향을 미치고 있다.
- 3) 분극곡선을 이용하면 전해부상조의 적정 전류밀도와 전압을 예측할 수 있으며 Cl<sup>-</sup>이온을 주입한 침출수 원수 (Cl<sup>-</sup>/NH<sub>4</sub><sup>-</sup>-N=11)의 경우 적정 전류밀도는 4.5 mA/cm<sup>2</sup>이고 전압은 2.1 V 정도인 것으로 예측되었다. 분극곡선에 대한 재현성이 높았으며 전해부상조 설계시 이 분극곡선에 의한 분극분석장치를 포함시키면 현장에 활용이 가능할 것으로 예상된다.
- 4) 전극 재질이 다른 탄소와 알루미늄을 갖는 Batch실험에서 탄소-알루미늄전극을 이용한 것이 알루미늄-알루미늄전극보다 Cl<sub>2</sub> 가스 발생량이 많아 총질소제거율이 1.8~3.3배정도 증가하였다.

## 사 사

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2004-000-10494-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 길대수, 이병현, 최해경, 권동민, 전기분해에 의한 고농도 질소 제거의 특성, *대한환경공학회지*, **22**(2), pp. 265-277 (2000).
- 김종식, 송세달, 전기분해에 의한 매립장 침출수 처리에 관한 연구, *한국공업화학회지*, **12**(4), pp. 439-443 (2001).
- 문경만, Butler-Volmer식을 중심으로한 이론적 고찰, *한국부식학회지*, **16**(2), pp. 34-43 (1987).
- 신민석, 이광형, 김달중, 한무영, 전기부상에 의한 축산폐수의 처리, *한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동 춘계 학술발표회 논문집*, pp. 387-390 (2001).
- 정준선, 탁용석, 윤제용, 전기화학적 산화 공정을 통한 수처리, *첨단환경기술*, **3**, pp. 110-120 (2005a).
- 정호진, 구봉현, 전봉준, 전기응집/산화공정을 이용한 유기성 폐수처리에 관한 연구, *한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동 춘계 학술발표회 논문집*, pp. 310-315 (2005b).
- Alexandrova, L., Nedialkova, T. and Nishkov, I., Electroflotation of Metal ions in Wastewater, *Int. J. Miner. Process*, **41**(3-4), pp. 285-294 (1994).
- APHA, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Ed., Washington D.C. (1998).
- Burns, S. E., Yiacoymi, S. and Tsouris, C., Microbubble Generation for Environmental and Industrial Separations, *Sep. Purif. Tech.*, **11**, pp. 221-232 (1997).
- Hosny, A. Y., Separating Oil from Oil-water emulsions by Electroflotation Technique, *Sep. Tech.*, **6**, pp. 9-17 (1996).
- Poon, C. P. C., Electroflotation for Groundwater Decontamination, *J. Hazard. Mater.*, **55**, pp. 159-170 (1997).
- White, G. C., *The Handbook of Chlorination*, 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold, New York, p. 172 (1993).