

전기분해를 이용한 하수 슬러지 감량

이병헌[†] · 방명환 · 김건하^{*}

부경대학교 환경시스템공학과

^{*}한남대학교 토목환경공학과

Volume Reduction of Waste Water Sludge using Electrolysis

Lee, Byunghoon[†] · Bang, Myunghwan · Kim, Geonha^{*}

Department of Environmental System Engineering, Pukyong National University

^{}Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University*

(Received 12 October 2005, Accepted 3 January 2006)

Abstract

In this research, volume reduction of activated sludge using electrolysis was studied to find an optimum condition using lab scale experiments. Wasted sludge was treated by electrolysis with controlling current density, chloride concentration, electrode distance, and reaction time. Volume of return sludge was reduced by 9.79% in average while maximum was 16.7%. Sludge volume reduction efficiency was affected by current density and reaction time. It was reversely proportional to the electrode distance. Especially current density was effective on the system performance significantly. Electric conductivity, salinity and COD were increased by electrolysis implying sludge disintegrated and converted to COD in part. An empirical equation for total solid removal efficiency by electrolysis was proposed by multiple linear regression analysis as: $TS_{rem}(\%) = 5.534 \times \text{current density (A/l)} + 0.178 \times \text{reaction time (m)} + 2.758$.

keywords : Eletrolysis, Empirical equation, Sludge, Volume reduction

1. 서 론

우리나라에서 발생하는 폐기물은 총량이 269,548 ton/d이고, 이중 일반폐기물이 18.5%인 49,902 ton/d, 사업장폐기물이 36.9%로 99,505 ton/d 그리고 건설폐기물이 44.6%로 120,141 ton/d등으로 배출되고 있다(환경부, 2002a). 전체 사업장 폐기물 중 유기성 슬러지가 27,182 ton/d로 28.3%, 하수처리장에서 발생하는 하수슬러지가 3,671 ton/d로 3.8%을 차지하고 있다(환경부, 2002b). 2000년 7월에 개정된 폐기물관리법 시행규칙에 따르면 1일 처리용량이 10,000 m³ 이상의 하수종말처리시설 및 폐수종말처리시설에서 배출되는 유기성 슬러지의 고형물 중 유기성 물질의 함량이 40% 이상이고 함수율이 75%를 넘는 경우 육상매립을 금지하고 있다. 이 법안은 2005년 1월부터 축산폐수처리시설과 분뇨처리시설에서 배출되는 슬러지까지 확대 적용되었는데, 이에 따라 환경기초시설에서 발생하는 유기성 슬러지에 대한 처분 문제가 중요한 환경현안이 되고 있다.

하수슬러지 최종처분 방법은 해양투기가 70%로 대부분을 차지하고 있으나 해양 투기 및 매립은 점차 금지되고 있으며, 소각은 비산재 처리 및 다이옥신 문제, 악취로 인한 민원 발생등의 문제점을 가지고 있다. 퇴비화의 경우

각종 규제로 인해 활성화가 이루어지지 않고 있으며, 슬러지 자원화 기술은 충분한 기술 확보 및 판로 개척의 문제를 해결하여야 한다(김, 2004). 폐기물관리법의 적정기준을 만족하기 위해서는 유기물의 함량이 40% 이상인 하수처리장의 하수 슬러지와 배출시설계 폐수슬러지에 대한 감량화가 우선적으로 이루어져야 한다. 이 슬러지들은 탈수단계의 효율이 낮아 수분함량이 높으며, 적당한 환경이 조성되면 쉽게 분해되어 2차적인 환경오염을 유발할 수 있다(배, 2002).

슬러지 감량화는 슬러지내의 수분을 저감시켜 부피와 질량을 감량하여 최종 처분이 용이하도록 하기 위한 과정으로, 많은 경우 유기성 고분자응집제를 이용한 슬러지 개량과 벨트프레스와 같은 탈수시설을 이용한 탈수공정을 이용하고 있다. 그러나 유기성 고분자응집제를 이용한 슬러지 개량은 여과성을 향상시키지만 하수 슬러지 내 친수물질의 양을 감소시키지 못하므로 최종 탈수슬러지 케이크에서의 함수율이 80% 정도로 높게 유지되는 문제점을 안고 있다. 따라서 하수슬러지 감량을 위하여 하수슬러지의 고유 성상을 개선해야 필요가 있다.

많은 연구자들이 지하수의 질산염, 양식장 폐수의 암모니아, 염색 폐수등의 처리에 전기분해를 이용하여 색도, 유기물질 및 부유물질을 제거하고 있으며, 철의 전기분해를 이용해 인의 제거 일반 활성 슬러지 공정에 도입하여 영양염류 제거등에 전기분해가 이용되고 있다(이 등, 2003). 전기

[†] To whom correspondence should be addressed.
bhlee@pknu.ac.kr

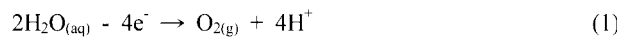
분해공법은 다기능성(versatility), 에너지 효율성, 자동화, 비용효율 등에 있어서 많은 장점이 있는 공법이다(Juttner et al., 2000). 또한 전기분해는 이용되는 물질이 전자이므로 환경친화적이라는 장점이 있으나 분자량이 높은 유기물질의 분해에는 많은 에너지가 소모되는 단점도 있다.

전기분해에 의한 폐수처리의 원리는 양극표면에서 전자의 이동에 의해 오염물이 파괴되는 직접산화와 음극에서 발생하는 Cl₂, hypochlorite, peroxide, ozone, Fenton's reagent, peroxide sulphate 등과 같은 산화물질을 이용한 간접산화로 구분된다. 전기분해에 의한 폐수처리는 국내외에서 많이 연구되고 있으나 국내에서의 전기분해에 대한 연구는 철이나 알루미늄을 이용한 전기응집 또는 전기부상에 의한 처리에 국한되고 있으며 또한 적정 운전조건이 명확히 설정되지 않고 있다. 길 등(2000a)은 전기분해를 이용한 고농도 폐수의 암모니아 제거효율의 경험 모델을 전류농도, 수리학적 체류시간, 전극 간격, 염소/암모니아 질량비의 함수로 나타내었다. 특히 염소의 농도는 전기분해에 많은 영향을 미치는데, 이는 염소와 물이 반응하여 강력한 산화제인 차아염소산과 염산을 발생하기 때문이다. 그러나 하수처리장과 같은 대규모 시설에 염소농도를 높이는 것은 한계가 있다.

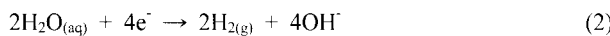
전기분해에 의한 오염물질 제거능력을 이용하여 하수처리장에서 발생하는 유기슬러지의 성상을 개선 또는 감량하기 위한 연구는 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 하수처리장 슬러지를 분해/감량화 시킬 수 있는 한 방법으로 전기분해를 적용하여 보았다. 하수처리장의 슬러지를 이용하여 실험실 규모 전기분해 실험을 수행하였으며 문헌에 제시되고 있는 전기분해에 대한 주요 인자가 슬러지 감량에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

2. 배경이론

슬러지를 전기분해할 경우 다음과 같은 화학반응이 일어난다. 양극에서는 물의 산화반응이 발생한다:



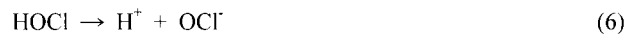
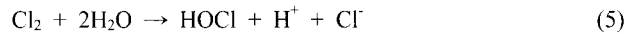
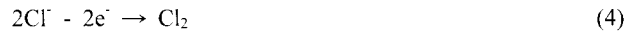
음극에서는 환원반응이 발생한다:



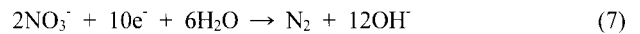
양극에서는 산소가스가 발생하며 음극에서는 수소가스 및 수산화 이온이 생성된다. 강력한 산화력을 가지고 있는 수산화이온은 전기적 전하 때문에 음극에서 양극으로 이동하며 이때 물질을 산화시킨다. 이온의 발생량은 패러데이 법칙에 따라 전류에 비례하며 이를 다음과 같이 나타낼 수 있다(Menon, 1996):

$$R = \frac{i \cdot \varepsilon}{F} \quad (3)$$

여기서, R = 이온발생량(mol/s); i = 전류(A); F = Faraday 계수(C/mol); ε = lumped parameter이다. 전류는 Ohm의 법칙에 따라 양극과 음극간의 전압경사에 비례한다. 따라서 슬러지의 감량 및 오염물질의 분해는 전류와 비례관계가 성립하게 된다. 염소이온이 존재하는 경우 양극에서 다음과 같은 반응이 발생한다.



식 (5)의 OCl⁻은 산화력을 가지고 있으므로 염소이온 농도가 높을수록 전기분해에 의한 오염물질 제거효율이 높다. 슬러지의 질산성질소는 음극에서 다음과 같은 환원 반응을 통하여 제거된다:



전기분해시 암모니아 농도가 증가하는 것은 슬러지가 분해되면서 암모니아를 생성하기 때문으로 추측된다.

3. 실험재료 및 방법

본 연구에서 사용한 하수슬러지는 부산시 소재 N 하수처리장에서 발생하는 2차 슬러지를 채취하여 사용하였다. 전기분해 실험을 수행할 때 마다 여러 차례에 걸쳐 슬러지를 채취하였으며, 채취한 즉시 실험실로 운반하여 성상을 분석하고 실험을 실시하였다.

Fig. 1은 실험에 사용한 전기분해 반응조와 전류 공급 장치의 개략을 보이고 있다. 반응조는 강화 아크릴 재질로

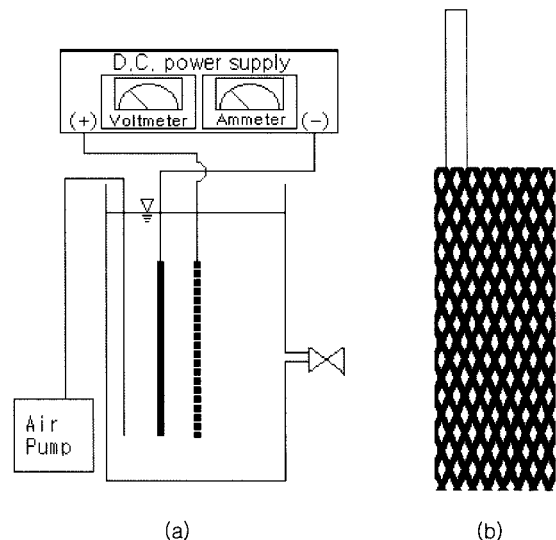


Fig. 1. Schematic description of experimental set-up used in this research: (a) Laboratory scale electrolytic cell; (b) Screen Electrode (Not to scale).

직경 120 mm, 높이 600 mm의 원형 컬럼으로 제작하였으며 전체 용적 5.7 L 유효부피 3.0 L이었다. 전력 공급기로서 DC 전원공급장치를 사용하였으며 30 V 전압에 가변부하를 조절하여 실험조건에 필요한 전류를 공급하였다. 소형 폭기기와 연결한 산기석을 반응기 안에 설치하였으며 최소량의 공기를 주입하여 슬러지를 순환시켰다. 반응시간이 5 - 25 분 내외이므로 폭기로 인한 슬러지 성상의 변화는 무시할 수 있다고 가정하였다. 시료 채취를 위해 반응조 하단에서 15 cm되는 지점에 밸브를 설치하였다. 음극판(Cathode)은 스테인레스 스틸 재질을 사용하였으며 양극판(Anode)은 염소가스 발생 및 극판의 전자방출로 유발되는 극판 부식을 방지하기 위해 티타늄(Ti)에 이리듐(Ir) 전착한 불용성 극판(Dimensionally Stable Anode, DSA)을 사용하였다. 전압경사의 분포를 유지하면서 유체저항을 줄이기 위하여 스크린 형태의 극판을 사용하였다(Fig. 1(b)). 양극과 음극간의 간격을 5 mm에서 15 mm까지 변화시킬 수 있도록 아크릴로 제작한 전극간격 고정판을 반응기 내에 설치하였다.

전압경사는 슬러지 비저항이 일정하지 않으므로 전류를 기준으로 조정하였는데, 반응조 유효 용적이 3 L로 일정하기 때문에 전류를 반응조 유효 용적으로 나눈 전류농도(단위: Ampere/liter)의 값을 사용하였다. 실험 인자는 전류 농도, 염소이온의 농도, 전극판 간격 및 반응시간으로 하였다. 전극판의 특성 또한 영향을 미치는 인자이지만 본 연구에서는 불용성 극판을 사용하였으므로 전극판의 특성은 고려하지 않았다. 전류농도의 값은 0.25, 0.50, 1.00, 1.50, 1.75 A/L의 5단계로 조정하였다. 전극판의 간격은 5.00, 7.00, 10.00, 13.33, 15.00 mm로 하였으며 염소이온농도는 0.0, 33.3, 100.0, 166.7, 200.0 mg/L를 사용하였고 반응시간은 5.00, 8.30, 15.00, 21.67, 25.00 분으로 하였다. 염소이온의 농도는 NaCl로 조정하였다. 실험에 사용된 슬러지의 양이 3 L로 일정하였으며, 동일한 반응조와 동일한 전극을 사용하여 총 27회의 반복실험을 수행하였다.

슬러지의 고형물농도 및 유기물농도의 변화를 파악하기 위하여 염도, 전기전도도, pH, BOD, COD, TS, VS, TSS, VSS, TN, NH₃-N, TP 농도등을 분석하였다. 염도, pH, 전기전도도는 YSI 30FT 미터기를 이용하여 실험 후 바로 측정하였으며, 전기전도도는 YSI 30 Conductivity/Temperature/Salinity 미터기를 사용하여 측정하였다. 그 외 모든 항목은 Standard Methods(AWWA, 1998)에 준하여 측정하였다.

실험값은 SPSS ver. 12K를 이용하여 통계처리 하였다. 슬러지 성상의 특성 및 전기분해의 효율을 파악하기 위하여 기술통계분석을 실시하였으며 인자간 선형상관도를 파악하기 위하여 산점도를 도시하였다. 전기분해의 운전인자가 슬러지 감량에 미치는 영향을 탐색하기 위하여 전류, 염도, 전극간 거리, 수리학적 체류시간을 인자로 하여 이변량 분산분석(Two-way ANOVA)를 실시하였다. 다중선형회귀분석을 이용하여 전기분해를 이용한 총고형물 제거효율을 예측할 수 있는 경험식을 도출하였다.

4. 결과 및 고찰

Table 1은 전기분해 전, 후의 슬러지 성상을 나타내고 있다. 실험에 사용한 슬러지의 성상은 비교적 균질하였는데 평균치는 pH = 6.4, 전기전도도 = 2310 mS, 염도 = 1.744 mg/L, TS = 8320 mg/L, VS = 5258 mg/L, TSS = 6728 mg/L, VSS = 4964 mg/L, COD = 7551 mg/L, BOD = 3944 mg/L, TN = 817 mg/L, TP = 133 mg/L, SCOD = 103 mg/L, NH₄-N = 33.9 mg/L 이다.

Table 2는 실험조건에 따른 TS, VS, TSS, VSS, COD, BOD, TN, TP 등의 제거율 및 SCOD 증가량과 NH₃-N 증가량에 대한 기술통계이다. 각 측정항목의 평균제거율은 4.7-11.7%의 범위에 있다. TS와 TSS의 제거율은 10-11%인 반면 SCOD의 평균 증가율은 360%로서 급격히 증가하였는데, 이는 슬러지가 분해되면서 액상형태의 유기물로 분해되기 때문으로 생각된다. 물리화학적 방법으로 슬러지를 처리하는 경우, 슬러지 입자의 크기가 작아지고 탈수능력이 증가하며 고형물질은 분해하면서 용존 유기물로 전환된다(Kim et al., 2005).

전기분해의 운전인자가 슬러지 감량에 미치는 영향을 탐색하기 위하여 전류농도(current), 염도(chloride), 전극간 거리(distance), 반응시간(time)을 인자로 하여 이변량 분산분석을 실시하였다. Table 3은 이변량 분석결과의 요약을 보이고 있다. 유의수준을 0.01으로 할 때 (99% 신뢰도), TS 제거율, COD 제거율 및 SCOD 증가량이 유의하였으며 Table 3에 보인 변수 이외는 유의하지 않은 결과를 보였다. Table 3에서 0.01보다 작은 숫자는 0.01 유의수준에서 유의한 것을 의미한다. 전류농도는 TS 및 COD의 제거와 밀접한 관계가 있음을 보이고 있으나 염소농도와 전극간 거리, 반응시간은 큰 관계가 없었다. 이는 본 연구에서 실시한 실험조건에 영향을 기인한 결과라고 생각한다. 서론에서 언급한 바와 같이 여러 문헌에 의하면 염소농도, 전극간 거리, 반응시간은 전기분해에 직접적인 영향을 미치지만 전류가 전기분해 효율에 미치는 영향은 다른 인자에 비하여 월등히 높다. 염소의 농도를 높이기 위하여 해수를 첨가하는 방안도 소개된 바 있으나, 비용등의 문제로 현실성이 없으며 또한 염도가 높으면 탈질 효율이 떨어지는 우려(Tsuneda et al., 2005)도 있는 등 후속처리에 문제가 될 수 있다. 그러나 전류*체류시간과 COD 제거량 및 염도*체류시간과 TS 제거량 간에 관계가 있음을 보이고 있는데, 이 결과로부터 인자간의 복합작용이 슬러지의 고형물과 유기물의 분해에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 특히 4 변수 중 전류농도가 가장 영향을 크게 미치고, 반응시간 및 염도의 영향은 0.05 유의수준에서 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Fig. 2는 전류농도에 따른 TS 제거율과 COD 제거율을 나타내었다. Fig. 2(a)에서 전류농도가 증가할수록 TS 제거율이 증가하는 양상을 보이고 있다. Fig. 2(b)에서 전류농도가 증가할수록 COD 제거율이 증가하는 양상을 보이고 있다.

Table 1. Descriptive statistics of concentrations of constituents before and after electrolysis

	N	Minimum	Maximum	Average	SD ^a	SE ^b
pH _i ^c	27	6.1	6.8	6.4	0.2	0.04
pH _f ^d	27	6.1	7.2	6.5	0.2	0.04
Cond _i	27	2062.0	2641.0	2310.7	219.6	42.25
Cond _f	27	2113.0	3188.0	2587.2	309.1	59.49
Salinity _i	27	1.5	2.0	1.7	0.2	0.04
Salinity _f	27	1.6	2.4	2.0	0.2	0.05
TS _i	27	7420.0	9350.0	8320.6	778.4	149.80
TS _f	27	6301.6	8598.5	7501.3	705.6	135.78
VS _i	27	4575.0	5840.0	5258.9	552.8	106.38
VS _f	27	3743.5	5727.0	4710.1	572.9	110.25
TSS _i	27	5940.0	7560.0	6728.1	623.3	119.95
TSS _f	27	4934.5	7093.2	5997.2	682.8	131.41
VSS _i	27	4350.0	5560.0	4964.8	514.9	99.10
VSS _f	27	3454.0	5312.1	4423.1	582.3	112.06
BOD _i	27	3539.9	4222.9	3944.1	264.3	50.87
BOD _f	27	3210.7	4195.6	3753.8	238.5	45.91
COD _i	27	6304.8	8741.7	7551.2	766.5	147.52
COD _f	27	4861.3	7787.1	6666.7	780.0	150.12
SCOD _i	27	63.4	157.8	103.1	32.4	6.24
SCOD _f	27	117.5	1117.4	499.6	270.3	52.02
TN _i	27	536.1	1239.0	817.1	224.6	43.23
TN _f	27	425.2	1148.4	742.3	210.5	40.50
NH ₄ _i	27	29.8	37.2	33.9	2.7	0.51
NH ₄ _f	27	37.4	60.5	48.7	6.3	1.21
TP _i	27	114.0	151.4	133.6	13.3	2.57
TP _f	27	105.5	150.6	126.9	14.6	2.80

^astandard deviation^bstandard error^c_i indicate initial^d_f indicate final**Table 2.** Descriptive statistics of independent and dependent variables

	Variables	N	Minimum	Maximum	Variable values	
Independent	current (A/l)	5	.25	1.75	0.25, 0.5, 1, 1.5, 1.75	
	chloride (mg/l)	5	0	200	0.0, 33.3, 100.0, 166.7, 200.0	
	distance (mm)	5	5	15	5, 7, 10, 13.33, 15	
	time (min)	5	5	25	5, 8.3, 15, 21.67, 25	
	Variables	N	Minimum	Maximum	Average	SD _a
Dependent	TS _{rem} ^b	27	4.55	16.70	9.79	3.38
	VS _{rem}	27	0.92	20.18	10.46	4.78
	TSS _{rem}	27	3.00	20.00	10.93	4.75
	VSS _{rem}	27	2.17	20.60	11.06	4.79
	COD _{rem}	27	3.07	22.90	11.74	5.52
	BOD _{rem}	27	-3.38	12.69	4.69	4.65
	TN _{rem}	27	2.65	20.68	9.38	3.59
	TP _{rem}	27	0.49	15.57	5.10	2.99
	SCOD _i ^c	27	85.28	608.03	359.31	135.55
NH ₃ N _i	27	16.16	88.01	43.72	16.17	

^astandard deviation^b_{rem} indicates removal rate^c_i indicates increased rate

Table 3. Result of Two-Way ANOVA for electrolysis

Variables	Total solid removed	COD removed	SCOD increased
Current	.002 ^a	.002 ^a	.000 ^a
Chloride	.014	.048	.000 ^a
Distance	.203	.032	.001 ^a
Time	.011	.024	.000 ^a
current * chloride	.009 ^a	.086	.000 ^a
current * distance	.050	.089	.001 ^a
chloride * distance	.034	.451	.004 ^a
current * chloride * distance	.515	.167	.006 ^a
current * time	.248	.008 ^a	.000 ^a
chloride * time	.006 ^a	.227	.002 ^a
current * chloride * time	.015	.683	.002 ^a
distance * time	.389	.010 ^a	.004 ^a
current * distance * time	.016	.938	.050
chloride * distance * time	.068	.028	.004 ^b
current * chloride * distance * time	.330	.008 ^a	.045

^a indicates effects of independent variables is significant at 0.01 level

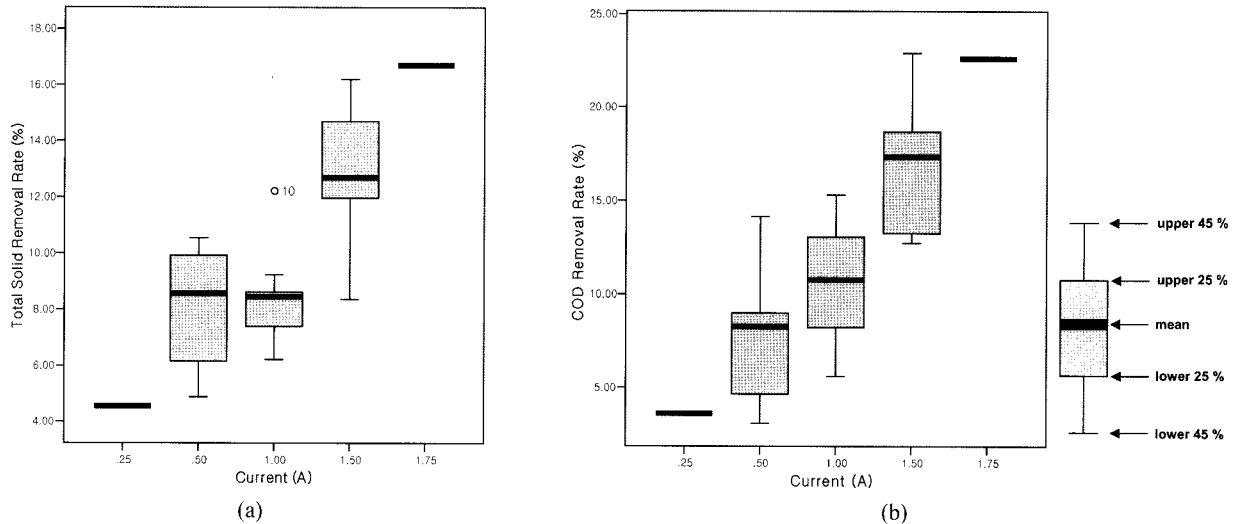


Fig. 2. Leaf plots of removal rates as a function of current: (a) Total solid removal rate; (b) COD removal rate.

Fig. 3은 전류농도(current), 반응시간(time), 총고형물 제거율(tsr) 및 SCOD 증가량(scodi)에 대한 산점도 행렬을 보이고 있다. 전류농도와 반응시간의 산점도는 원형 모양을 나타내고 있는데, 이는 실험설계에 의한 두 독립변수의 상대적인 크기 변화를 나타내고 있다. 반응시간에 대한 총고형물 제거율과 SCOD 증가량은 전류농도의 경우보다 분산되어 있는데, 이는 반응시간의 영향이 전류농도의 영향에 비하여 적은 것을 나타낸다. 총고형물 제거율과 SCOD 증가량간의 선형관계가 상당히 양호한데, 이는 고형물이 분해되어 용존성 유기물로 전환되는 것을 의미한다.

실험자료의 다중회귀분석을 실시하여 전기분해에 의한 2차 슬러지 고형물질 제거효율의 경험식을 구하였다. 경험식은 다음과 같이 나타낼 수 있었다:

$$TS_{rem} = 5.534 (current + 0.178 (tme + 2.758) \quad (8)$$

여기서, TS = 총고형물 제거효율 (%), current = 전류농도

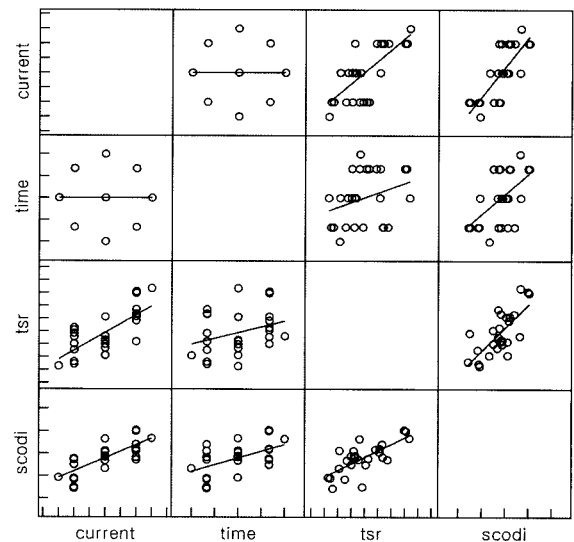


Fig. 3. Scatter plot matrix of dependent variables and treatment efficiencies: current density, reaction time, total solid removal rate, and SCOD increase rate.

(A/L), time = 반응시간(m)이다. 식 (8)의 모든 숫자는 0.01 수준에서 유의하였다. 전류농도와 반응시간의 계수를 비교하여 보면 전류농도의 경우 31배 큰데, 이는 전류농도가 고형물 제거에 미치는 영향이 절대적임을 나타낸다.

Fig. 4는 식 (8)을 이용하여 계산한 총고형물 제거효율 예측치 및 본 연구에서의 실험치를 누적확률 스케일로 도시한 것이다. 45도선은 예측치와 실험치가 일치하는 것을 의미하며 실험치 및 관측치의 최대값의 누적확률을 1로 할 경우의 각 실험치와 예측값의 누적확률을 나타낸다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 예측식은 전 구간에 걸쳐 비교적 양호한 성능을 보이고 있다.

Fig. 5는 식 (8)을 이용하여 작성한 design chart이다. 슬러지 내 염도의 농도가 200 mg/L 이내인 경우, 전류농도가 0-5 A/L까지 변할 때의 반응시간의 변화에 따른 총고형물의 제거효율을 예측할 수 있다. Fig. 5에 의하면 전류농도

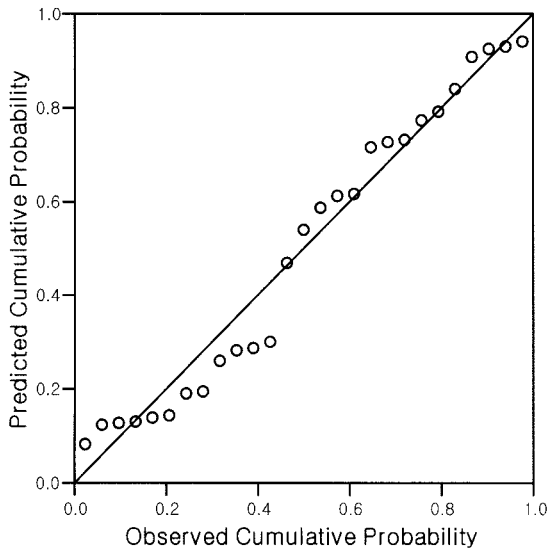


Fig. 4. Performance test of suggested empirical model for total solid removal rate by plotting predicted cumulative probability against observed cumulative probability.

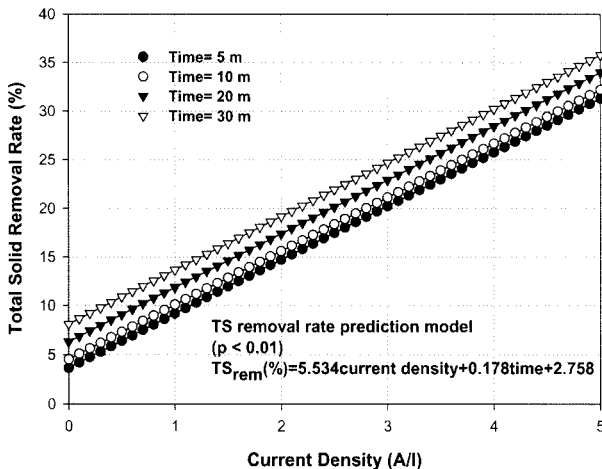


Fig. 5. Design chart for total solid removal rate prediction model as functions of current density and reaction time at chloride concentration = 0 mg/L.

가 3 A/L일 때 반응시간이 5분이면 약 20%의 총고형물을 제거할 수 있다.

전기분해는 많은 장점을 가진 공법이고 연구결과에 의하면 슬러지 감량화에도 적용이 가능하지만 유기물의 농도가 매우 높으므로, 슬러지 감량에 따른 효과와 유기물 농도증가에 따른 부작용을 고려하여 활용여부를 결정하여야 한다.

5. 결론

본 논문에서는 전기분해를 이용하여 하수처리장 2차 슬러지의 부피 감량화를 위한 최적조건을 찾고자 하였다. 실험실 규모의 반응조를 이용하여 전류농도, 염소 농도, 전극 간격, 반응시간을 변수로 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 전기분해에 의하여 슬러지내 고형물질이 평균 9.8% 제거되었으며, 최대 16.7%까지 제거됨을 알 수 있었다.
- 2) 전기분해에 의하여 슬러지의 총고형물이 감소되면서 SCOD와 NH₃-N의 농도가 증가하였는데, 이는 슬러지가 분해되어 유기물질로 전환되며 슬러지 내의 질소가 방출되는 것으로 판단된다.
- 3) 총고형물 제거효율은 전류농도와 뚜렷한 비례관계가 있으며 반응시간과도 비례하였다. 전극 간격과는 반비례하였으나 2차 슬러지내에 존재하는 염소 농도의 영향은 적었다.
- 4) 전기분해에 의한 총고형물 제거효율을 예측할 수 있는 경험식을 도출하였다: $TS_{rem}(\%) = 5.534 \times \text{current density (A/L)} + 0.178 \times \text{reaction time (m)} + 2.758$. 본 연구의 실험치와 경험식을 이용한 예측치를 비교한 결과 양호한 근사능을 보였다.

사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김덕진, 하수 슬러지 감량화 기술 동향, *수처리기술*, **12**(3), pp. 85-92 (2004).
- 길대수, 이병현, 최해경, 권동민, 전기분해에 의한 고농도 질소제거의 특성, *대한환경공학회지*, **22**(2), pp. 265-277 (2000a).
- 길대수, 이병현, 이제근, 전기분해에 의한 고농도 유기물질 제거 특성, *대한환경공학회지*, **22**(2), pp. 251-264 (2000b).
- 배재근, 슬러지의 처리 및 자원화의 문제점 및 향후 개선방안, *유기물자원화*, **10**(3), pp. 21-33 (2002).
- 유재정, 민경석, 박정민, 염색폐수중 난분해성물질 전기분해 처리특성, *대한환경공학회지*, pp. 1277-1282 (2003).
- 이성기, 송영일, 최병순, 진성기, 연속회분식 생물막반응기에서 전기분해를 이용한 질소와 인제거, *한국환경관리학회지*, **9**(4), pp. 455-467 (2003).

- 환경부, 2001 전국폐기물 발생 및 처리현황, p. 38 (2002a).
- 환경부, 2001년 하수종말처리장 운영결과 분석, p. 23 (2002b).
- APHA, *Standard Methods for the examination of water and wastewater 20th edition* (1998).
- Della Monica, M., Agostizno, A. and Ceglie, A., An Electrochemical Sewage Treatment Process, *Journal of Applied Electrochemistry*, **10**, pp. 527-533 (1980).
- Feleke, Z. and Sakakibara, Y., A Bio-Electrochemical Reactor Coupled with Adsorber for the Removal of Nitrate and Inhibitory Pesticide, *Water Research*, **36**, pp. 3092-3102 (2002).
- Juttner, K., Galla, U. and Schmieder, H., Electrochemical Approaches to Environmental Problems in the Process Industry, *Electrochimica Acta*, **45**(15-16), pp. 2575-2594 (2000).
- Kim, Y., Ha, J. and Kim, G., Ultrasonically Accelerated of Drainage Material Filterability, *Japanese Journal of Applied Physics (in press)* (2005).
- Menon, R. M., Numerical Modeling and Experimental Studies on Electro-Kinetic Extraction., Ph.D. dissertation, Texas A&M University, College Station, TX., p. 16 (1996).
- SPSS ver. 12k for Windows User's Manual.
- Szpyrkowicz, L., Naumczyk, J. and Zilio-Grandi, F., Electrochemical Treatment of Tannery Wastewater Using To/Pt and Ti/Pt/Ir Electrodes, *Water Research*, **29**(2), pp. 517-524 (1995).
- Tsuneda, S., Mikami, M., Kimochi, Y. and Hirata, A., Effect of Salinity on Nitrous Oxide Emission in the Biological Nitrogen Removal Process for Industrial Wastewater, *Journal of Hazardous Materials*, **B119**, 93-98 (2005).