Journal of the Korean Geo-Environmental Society
18(4): 23～29. (April, 2017) http://www.kges.or.kr
ISSN 1598-0820
DOI https://doi.org/10.14481/jkges.2017.18.4.23

하수방류수 내 TOC 제거를 위한 전기분해공정의 최적 조건

Optimal Condition of TOC Removal Parameter for Sewage Effluent using Electrolysis Process

안 상 우† · 정 혁 상[1] · 이 희 경[2] · 고 준 걸[2] · 명 대 원[2]
Sang-Woo An · Hyuk-Sang Jung · Hui-Kyung Lee · Jun-Geol Ko · Dae-Won Myoung

Received: February 15th, 2017; Revised: February 28th, 2017; Accepted: March 16th, 2017

ABSTRACT : As the Enforcement Ordinance of Environmental Policy Act was revised in 2013, Total Organic Carbon (TOC) was added as an indicative parameter for organic matter in Water and Aquatic Ecosystem Environmental Criteria. Under these imminent circumstances, a regulatory standard is needed to achieve the proposed TOC limitation control water quality from the STP (Sewage Treatment Plant). In this study, a electrolysis utilizing the electrochemical reaction was investigated in lab-scale experiments for the treatment of TOC in sewage effluent. TOC reduction by a electrolysis was investigated response surface methodology using the Box-Begnken methods were applied to the experimental results. A central composite design was used to investigate the effects of the independent variables of electrode space (x_1), current density (x_2) and electrolyte concentration (x_3) on the dependent variables removal efficiency of TOC (y). The optimal conditions for electrolysis were determined: electrode space, current density and electrolyte concentration were 50 mm, 10.3 mA/cm^2 and 0.1M, respectively. Statistical results showed the order of significance of the independent variables to be electrode space > current density > electrolyte concentration.

Keywords : Sewage treatment, Effluent, Electrolysis, Total organic carbon (TOC), Hydrogen

요 지 : 2013년 환경 정책 개정에 따라 총유기탄소(TOC)항목이 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률에 도입되었으며, 이러한 정책 시행에 따라 공공하수처리시설에서의 TOC에 대한 수질관리의 필요성이 대두되었다. 본 연구는 실험실 규모 전기분해공정에서 전기화학적 반응을 이용하여 하수방류수 내 TOC 제거특성을 살펴보았다. 실험실 규모의 전기분해공정에서의 실험 결과를 반응표면법에 적용하여 방류수 내 TOC 제거 특성분석을 실시하였다. 중심합성에 사용된 독립변수로는 전해공정의 주요 운전인자인 전극간격(x_1), 전류밀도(x_2), 전해질의 농도(x_3)를 선정하였으며, 종속변수로는 TOC 제거효율(y)이다. 전해공정에서 최적화 조건은 전극간격 50mm, 전류밀도 10.3mA/cm^2, 전해질의 농도 0.1M로 조사되었다. 통계학적 결과를 바탕으로 독립변수는 전극간격 > 전류밀도 > 전해질농도의 순으로 작아지는 것으로 분석되었다.

주요어 : 하수처리, 방류수, 전기분해, 총유기탄소(TOC), 수소

1. 서 론

급속한 산업발전과 도시화로 인한 환경오염에 대한 사회적 관심과 수생태계의 수질관리에 대한 중요성이 부각되고 있는 실정이다. 과거와는 달리 공공수역의 난분해성물질에 대한 사회적인 관심이 높아지면서 2013년부터 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)항목을 도입하였다. 이러한 공공수역의 목표 수질기준 달성을 위해 공공수역으로 유입되는 주요 배출시설 중 하나인 공공하수처리시설에서 TOC에 대한 수질관리의 필요성이 대두되었다(Jeong et al., 2016).

에너지 다소비시설인 공공하수처리시설은 기후변화협약에 대비한 역할이 증대되면서 온실가스의 감축 및 하수처리시설의 에너지 자립화에 대한 일환으로 신·재생에너지 이용에 대한 관심이 증대되고 있는 실정이며, 바이오가스 발전이 효용성이 가장 높은 것으로 조사되고 있다(Kim et al., 2010a; Kim et al., 2010b). 이러한 에너지 자립화 사업은 공공하수처리시설에서 사용되는 석탄을 기원으로 하는 에너지 사용에서 신·재생에너지로 전환을 의미하는 것과 동시에 CO_2 감축을 목적으로 시행되고 있다. 하지만 하수처리시설에서 TOC를 신규 규제물질로 선정되면 생물학적으로 처리에서 미처리된 난분해성 물질이 TOC로 검출되어 수질관리에 어려움이 있을 것으로 예상된다.

난분해성 물질을 처리하기 위한 수처리 분야에서 고도산화처리는 전기화학적 방법, 촉매를 이용한 방법(TiO_2), 화학

† Geo-Environments Division, WIZINNOTEK Co. ltd. (Corresponding Author : swan@wizinnotek.com)
1) Geo-Environments Division, WIZINNOTEK Co. ltd.
2) Department of Railroad Construction Safety Engineering, Dongyang University

적 산화방법(O_3, H_2O_2, Fenton 등)에 대한 연구(Kim et al., 2015; Lee et al., 2016; Jo et al., 2014)가 진행되고 있으며, 이러한 고도산화처리방법은 에너지 다소비시설로 분류된다. 이 중에 에너지를 생산할 수 있는 전기화학적 방법은 하수와 접촉한 전극에 전기에너지를 가하여 오염물질을 처리하는 방법으로(Lee et al., 2008) 전기분해, 전기응집, 전기부상 및 전위차 생성 등이 있다.

전기분해를 이용한 공정에서 유기오염물질의 제거는 직접 산화반응 및 간접 산화반응에 의한 것으로 알려져 있다. 직접 산화반응은 하수 중의 오염물질이 전극 계면 사이에서 전자교환이 직접적으로 이루어지는 전기화학반응이며, 간접적 산화반응은 전극표면에 hydroxyl, hypochlorite, 오존, 과산화수소와 같은 산화제가 발생하여 오염물질과 2차 반응을 진행하여 산화제거하는 반응이다(Ahn & Kwon, 2011; Lee et. al., 2016). 특히 난분해성 오염물질 및 독성물질을 제거하기 위해서는 anode에서 산화반응이 진행되어야 하며, 이때 전극 촉매물질로 Pt, graphite, IrO_2, RuO_2, TiO_2 등이 주로 사용되며 부생가스로 수소(H_2)를 생산하는 것으로 알려져 있다(Shim et al., 2004; Lee et al., 2008).

전기분해장치의 설계 및 운전을 위해서는 전극간격, 전류밀도, 전해질농도 등 다양한 공정변수들이 전기화학 반응의 성능에 영향을 미치기 때문에 설계와 운전과 관련한 다양한 인자들에 대한 최적화가 필수적이며, 공정변수를 최적화를 위해 사용되는 방법으로는 반응표면분석법, 유전자 알고리즘(generic algorithm), simulated annealing, particle swam optimization 등이 있다(Baek & Lee, 2014; An et al., 2013; Lee et al., 2016). 본 연구에서는 하수방류수 내 TOC를 제거하기 위한 전기분해공정을 최적화하기 위하여 기초 실험을 진행하였고, 이 결과를 토대로 반응표면분석법을 적용한 최적화를 수행하였다. 또한, 후속연구로써 전기분해공정에서 TOC 분해와 동시에 수소생산 특성을 연구함으로써 수처리 분야에서 고도산화처리와 더불어 에너지 생산 기술을 확립하고자 한다.

Table 1. Physicochemical properties of effluent samples from A sewage treatment plant

Parameters	Effluent	
	Range	Average
pH	6.8~7.6	7.1
EC	572~617	578
COD_{Cr} (mg/L)	17.1~25.2	21.9
TOC (mg/L)	13.2~18.2	15.8
SS (mg/L)	3.5~4.6	3.9
T-N (mg/L)	6.3~7.2	6.8
T-P (mg/L)	0.485~0.611	0.572

2. 연구방법

2.1 A 하수처리장 방류수 수질특성

본 연구를 위하여 경기도 A시에 위치한 A 하수처리장에서 2016년 10월부터 2017년 2월까지 월에 1회씩 하수방류수 특성조사를 위하여 방류수 시료(4L)를 채취하였으며, 방류수의 분석결과는 Table 1과 같다. A 하수처리장의 총 5회의 수질특성분석은 COD_{Cr}은 17.1～25.2mg/L, TOC 13.2～18.2mg/L, SS 3.5～4.6mg/L, T-N 6.8～7.12mg/L, T-P 0.485～0.611mg/L로 조사되었다(Table 1). Jeong et al.(2016)의 연구에 의하면 BOD 기준으로 안정적인 하수처리장이어도 A 하수처리장은 향후 TOC 방류수 수질기준이 TOC 15mg/L로 선정될 경우에는 현행 TOC 방류수질 보다 5% 더 TOC를 제거하여야 하며, 보수적으로 75 percentile(TOC 7.4mg/L) 수준으로 방류수질이 결정되면 최대 53% 삭감하여야 하는 것으로 판단된다.

2.2 Lab scale 회분식 전기분해반응기

Lab scale 회분식 전기분해반응기의 모형도는 Fig. 1에 도시하였다. 반응조의 총 용량은 4.78L이며, TOC 제거를 위한 하수방류수는 1L를 주입하였다. 각 전극의 면적(100mm×40mm×2mm)은 반응조의 용량을 고려하였으며, digital regulated D.C. power supply를 사용하여 일정한 전류를 유지하도록 직류전원을 공급하였다. 또한, 반응조의 농도를 균일하게 하기 위하여 내부에 교반기를 설치하여 교반을 실시하였다.

2.3 반응표면 분석방법

통계학적 반응표면분석법을 이용하여 전기분해공정에서 방류수 내 TOC 제거 특성분석을 실시하였으며, 실험계획은 중심합성계획(Central composite design)의 Box-Behnken 실험설계법을 적용하였다. Box-Behnken 실험설계법은 균형 불완비블록 계획법(Balanced Incomplete Block Design)

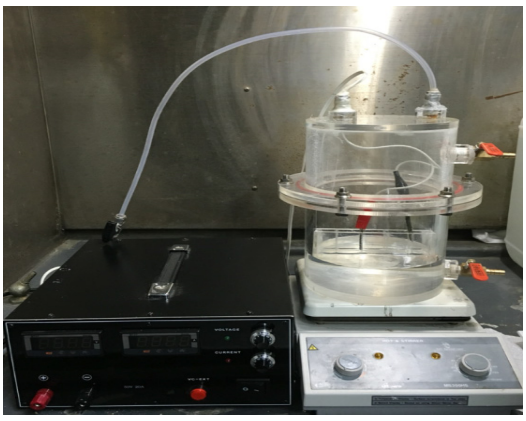

Fig. 1. Photography of experimental apparatus

에 2^k요인 배치계획을 결합하여 기본계획을 수립하고, 중심점에서 실험수 n_c를 추가시켜서 2차 반응표면식을 추정할 수 있는 새로운 실험계획법이다(An et al., 2009; An et al., 2010; An et al., 2013; Cha et al., 2012).

본 연구에서 독립변수로는 전극간격(x_1), 전류밀도(x_2), 초기 전해질 농도(x_3)와 종속변수로는 TOC 제거효율(y)을 각각 설정하였다. 하수방류수의 최적 TOC 제거조건의 결정은 반응 표면도(Response surface plot)를 작성하여 판단하였으며, 각 변수의 설정범위는 기초실험을 통하여 종속변수에 큰 영향을 미치는 독립변수와 범위를 선정하였다(Table 2). Box-Behnken 실험설계법을 통해 도출한 실험 결과는 Mintab (version 14, Minitab Inc., U.S.A)를 사용하여 통계처리를 하였으며, 모든 실험은 3번 반복 측정하여 그 평균값을 회귀분석에 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기분해를 이용한 방류수 내 TOC 제거 실험

Lab scale 반응기를 이용하여 TOC 제거효율에 영향을 미치는 전극간거리, 전류밀도, 전해질의 농도를 다양하게 하여 TOC 제거특성을 살펴보았다(Fig. 2).

Table 2. Box-Behnken design for experiment

Code		Explanatory variable		
		Electrode space (mm)	Current density (mA/cm^2)	Electrolyte amount (M)
Max level	+1	25	10.3	0.1
Central level	0	50	20.6	0.3
Min level	-1	75	30.9	0.5

Run order	Coded factor			Uncoded factor		
	Electrode space	Current density	Electrolyte amount	Electrode space	Current density	Electrolyte amount
1	0	1	-1	50	10.3	0.5
2	0	-1	1	50	30.9	0.1
3	-1	0	-1	75	20.6	0.5
4	1	0	-1	25	20.6	0.5
5	-1	-1	0	75	30.9	0.3
6	0	0	0	50	20.6	0.3
7	-1	0	1	75	20.6	0.1
8	-1	1	0	75	10.3	0.3
9	1	-1	0	25	30.9	0.3
10	1	1	0	25	10.3	0.3
11	0	1	1	50	10.3	0.1
12	1	0	1	25	20.6	0.1
13	0	0	0	50	20.6	0.3
14	0	0	0	50	20.6	0.3
15	0	-1	-1	50	30.9	0.5

전기분해를 이용한 하수방류수의 처리에 있어서 전극간격이 전기분해 처리에 미치는 영향에 대하여 알아보기 위하여 초기 수온이 25℃, 전류밀도 20.6mA/cm^2, 전해질 0.3 M인 조건으로 고정하고 전극간격을 25mm, 37.5mm, 50mm, 62.5mm, 75mm로 변화하였다. 전기분해에 사용된 음극(-)은 DSA(IrO_2/TiO_2)로 고정시키고 금속의 석출이 발생하는 양극(+)은 석출이 일어나지 않는 DSA(IrO_2/TiO_2) 전극으로 30분간 전해하여 TOC, T-N, T-P의 제거율을 나타내었다. TOC의 처리효율은 전극판 간격이 25mm인 경우, 70.4% 처리효율을 나타내었으며, T-N 31.1%, T-P 21.2%로 나타났다. 전

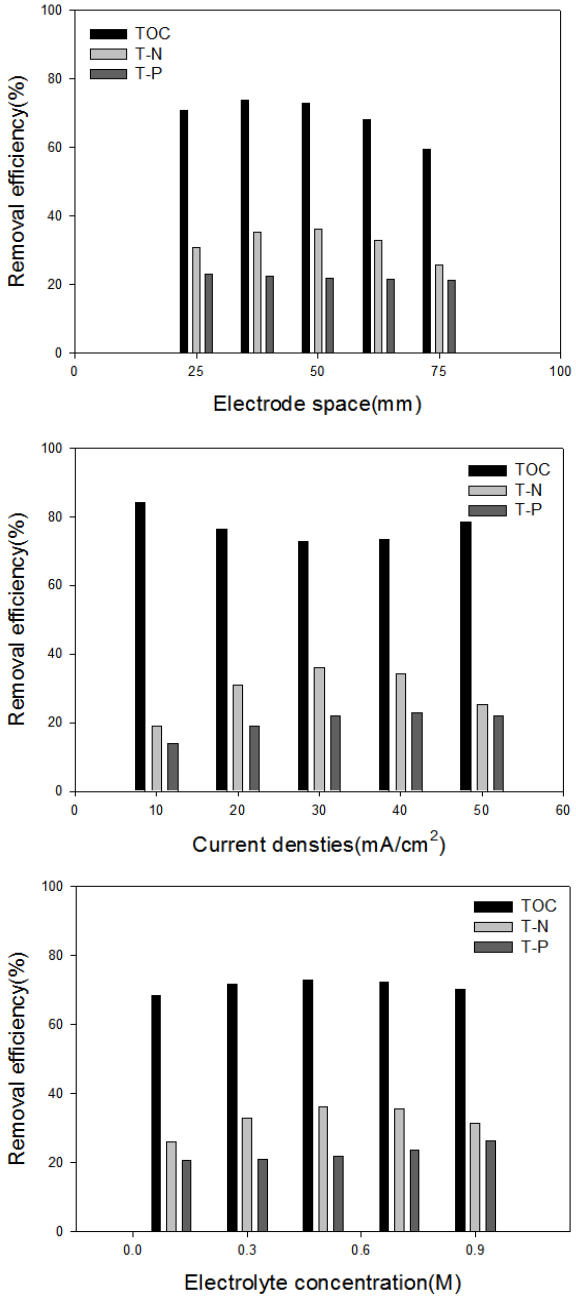

Fig. 2. Removal efficiency of TOC, T-N and T-P in electrolysis system

극판 간격이 증가할수록 처리효율은 저감되었는데 이는 동일 인가전압에서 전극판 간격이 늘어남에 따라 하수방류수내의 전기저항이 증가하였기 때문으로 사료된다.

전류밀도가 전기분해 처리에 미치는 영향에 대하여 알아보기 위하여 초기 수온이 25℃, 전극간격 25mm, 전해질 0.3M인 조건으로 고정하고 전류밀도를 10.3mA/cm^2, 20.6mA/cm^2, 30.9mA/cm^2, 41.2mA/cm^2, 51.5mA/cm^{2}로 변화하였다. 전기화학 공정에서 전류밀도의 세기는 반응기 내에서 반응속도를 조절할 수 있는 가장 중요한 변수이다. TOC의 처리효율은 전류밀도가 10.3mA/cm^{2}인 경우, 83.2% 처리효율을 나타내었으며, T-N 18.3%, T-P 15.2%로 나타났다. 대부분의 유기물질이 체류시간에 따른 온도상승으로 인한 반응속도 증가 때문에 전류밀도가 높을수록 제거율이 증가하는 경향을 보이며, 일정시간 이후 제거율의 변화가 적은 것으로 알려져 있다. 본 실험결과 전류밀도가 증가하면 TOC의 제거효과가 소폭 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 일정 전류밀도에서 전극 산화로 인한 제거효과의 감소로 판단된다. 또한, 일정 전류밀도 이상에서는 잦은 전극의 교체와 정류기의 규격이 증가하기 때문에 경제성이 저하되기 때문에 최적 전류밀도에서 운전이 필요한 것으로 사료된다.

하수방류수는 다량의 화학물질이 첨가되어 있기 때문에 넓은 범위의 이온강도를 나타내며, 전해질의 첨가는 하수방류수의 전기전도도를 증가시킨다. 전기분해를 이용한 하수방류수의 처리에 있어서 전해질의 양이 전기분해 처리에 미치는 영향에 대하여 알아보기 위하여 초기 수온이 25℃, 전극간격 25mm, 전류밀도 20.6mA/cm^{2}인 조건으로 고정하고 전해질의 양을 0.1M, 0.3M 0.5M, 0.75M, 1.0M로 변화하였다. TOC의 처리효율은 전해질의 양이 0.1M인 경우, 68.2% 처리효율을 나타내었으며, T-N 24.5%, T-P 20.1%로 나타났다. Merzouk et al.(2009)은 전해질 첨가량 증가에 따라 제거율의 큰 차이가 없지만 낮은 전기전도도에서는 폐수를 제거하기 위한 에너지 소비가 증가하며, 전해질이 과다 함유되어 있을 경우에는 전극이 점 형상의 부식(pitting corrosion)으로 인한 전극의 과도한 소모로 첨가량을 제한하여야 한다고 보고하였다(Lee et al., 2016). 하지만 본 실험에서는 A 하수처리장의 전기전도도가 평균 578μs/cm로 낮아 전해질 첨가량이 증가할수록 방류수질의 제거율이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험을 통해 전해질 농도는 성능과 비용적 측면에서 최적의 농도를 유지할 필요가 있다고 판단되었다.

3.2 반응표면분석에 의한 반응모델 추정

Box-Behnken 실험설계법에 의해 설정된 조합(Table 2)에 따라 전기분해 시스템에서 하수방류수의 TOC 제거율을 측정하였다(Table 3). 완전 2차식으로 분석한 분산분석 결과 결정계수는 98.6%였으며, 수정 결정계수는 96.0%로 분석되었다. 수정 결정계수는 종속변수 변이의 96.0%를 설명이 가능한 매우 높은 기여율을 나타내었으며, 이는 관측점들이 변동을 표본회귀선에서 매우 높게 설명해 주고 있는 것으로 판단된다. 또한 Table 3에서 제시한 변수들의 기본 단위가 다르기 때문에 이들 변수들을 코드화하여 통일된 변수로 적용하여 산출한 반응 모델은 Eq. (1)과 같다. 여기서 x_1, x_2, x_3는 전극간격, 전류밀도, 전해질 농도이다.

$$y = 72.90 - 5.69x_1 - 2.88x_2 + 0.81x_3 - 7.63x_1^2 + 8.40x_2^2 - 3.48x_3^2 + 0.83x_1x_2 - 3.25x_1x_3 + 4.73x_2x_3 \quad (1)$$

또한, 전체 모델의 적합성 외에 전체 모델에 어떻게 영향을 주는지를 파악하기 위하여 Table 4의 회귀분석 및 분산

Table 3. Experimental results of the Box-Behnken design

Run order	Coded factor			TOC removal (%)
	Electrode space (mm)	Current density (mA/cm^2)	Electrolyte amount (M)	
1	0	1	-1	68.4
2	0	-1	1	77.8
3	-1	0	-1	63.7
4	1	0	-1	59.7
5	-1	-1	0	83.2
6	0	0	0	74.8
7	-1	0	1	70.4
8	-1	1	0	76.4
9	1	-1	0	69.3
10	1	1	0	65.8
11	0	1	1	80.9
12	1	0	1	53.4
13	0	0	0	73.2
14	0	0	0	70.7
15	0	-1	-1	84.2

Table 4. Regression analysis and response surface model fitting

Source	DF	Seq. SS	F	P
Model	9	1,025.62	38.36	0.000
- Linear	3	330.19	37.05	0.001
- Square	3	561.16	62.97	0.000
- Interaction	3	134.28	15.07	0.006
Residual error	5	14.85		
- Lack of fit	3	6.31	0.49	0.723
- Pure error	2	8.54		
Total	14	1,040.48		

a) DF : Degree of Freedom
b) Seq. SS : Sum of squares
c) F : F value
d) P : P value

분석(ANOVA)을 수행한 결과 선형항, 순수 2차항, 교호작용항의 p값이 0.001(<0.05), 0.000(<0.05), 0.006(<0.05)로 매우 높은 유의성을 나타내었다. F-검정 결과 순수 2차항과 선형항의 F-값이 교호항에 비하여 높은 값을 나타내어 실험의 측정값에 대한 대부분의 변동은 주효과와 상호효과가 복합적으로 기인한다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 각 독립변수의 주효과도와 상호효과도를 도시하였다. 주효과도는 기울기가 클수록 주효과가 큰 것을 나타내었다. 하수방류수 내 TOC를 처리를 위한 전기분해공정에서 TOC 제거효과는 전극간격이 가장 큰 변수로 작용하며 전류밀도, 전해질 농도의 순서로 효과가 작아지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 전해공정에 의한 TOC 산화반응에서 전극간격이 커지면 TOC 제거효과가 감소하는 것과 동일한 결과를 나타내었다. 하지만 전류밀도의 경우에는 전류밀도가 증가하면 TOC의 제거효과가 소폭 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 초기조건에서 전해질 0.3M의 첨가로 인하여 낮은 전류밀도에서도 TOC 제거효과를 가지며, 또한 전류밀도가 높아지면 Merzouk et al. (2009)가 연구한 것과 같이 전극의 일부 부식으로 인한 TOC 제거효과의 감소로 사료된다. 전해질 농도를 증가하는 실험에서는 전해질의 농도가 다른 인자들에 비하여 TOC 제거

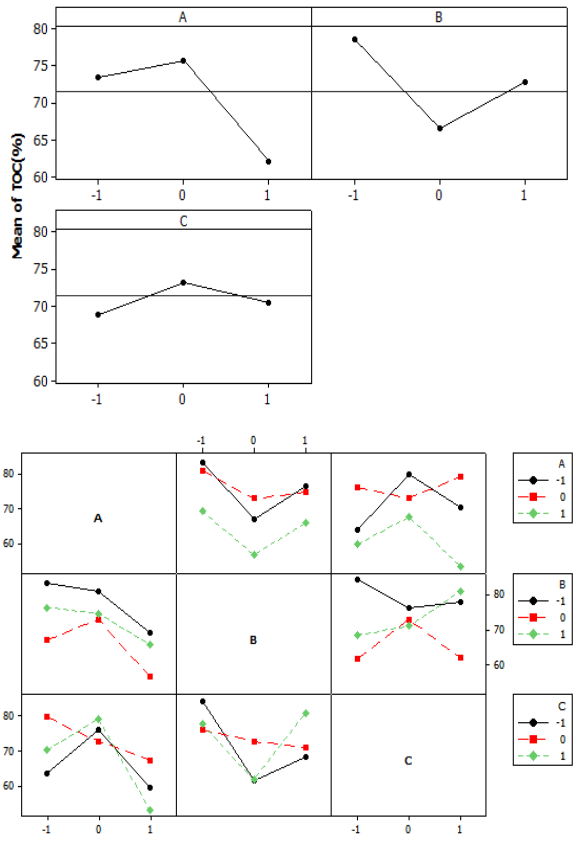

Fig. 3. Results of ANOVA test for TOC removal efficiency at main effect and interaction effect

효과에 미치는 영향은 작은 것으로 나타내었다. 즉, 본 실험조건에서 하수방류수 내 TOC 제거를 위한 전해공정에서 전극간격이 전체 반응을 좌우하는 것으로 판단된다.

3.3 잔차분석

반응표면분석을 통해 얻어진 모형의 오차항에 대한 잔차분석을 통하여 전체적인 모형의 적합 정도를 판단하였다. 회귀분석에서 잔차분석은 모형의 적합성을 도출하는 데 중요한 역할을 하게 되며 적절한 회귀모형이 가져야 할 잔차에 대한 기본 가정으로 잔차는 평균이 0이고, 분석은 일정해야 하며, 정규분포와 서로 독립적인 것으로 선정하였다. 잔차분석은 실험에서 얻어진 결과들이 정규분포, 평균과 분산, 상호독립성 그리고 독립변수와 종속변수 사이의 관계가 선형관계 조건을 만족한다는 가정 아래 판단하였다(An et al., 2009; An et al., 2010; An et al., 2013; Cha et al., 2012). 잔차분석 결과 정규확률도에서 모든 데이터들이 잔차 2에서 2 사이에 직선적으로 분포됨에 따라 정규분포를 나타내었고, 잔차-적합치의 경우 잔차분포가 0을 중심으로 분포되어 있다. 또한 히스토그램을 통해 정규분포를 보여주고 있으며, 잔차-데이타 순서의 경우 모든 관측치에서 2에서 2 사이에 모든 데이터들이 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4). 따라서 오차항에 대한 4가지 가정인 정규성, 등분산성, 독립성, 그리고 선형성을 모두 만족하여 모델에 문제가 없는 것으로 나타났다.

3.4 최적반응조건 결정

Fig. 5는 최적반응조건을 결정하기 위해 추정된 반응표면 모델식을 이용하여 TOC의 제거율에 관한 반응표면도(2D)를 작성하였다. 추정된 반응표면 모델식과 반응표면도를 이용하여 반응변수를 최적화하는 최적공정조건(Optimal Response Condition)을 구할 수 있다. Fig. 5의 반응변수별 반

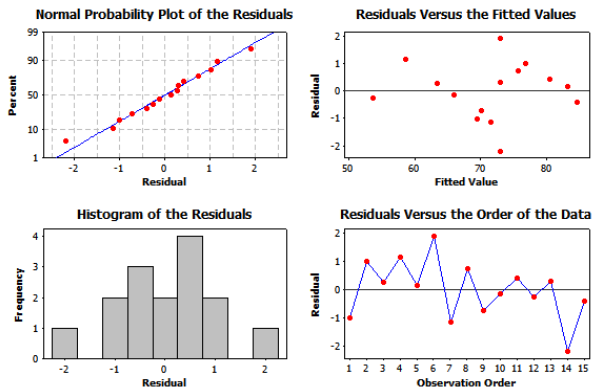

Fig. 4. Residual plot of model for error values

응표면도를 도시하였으며, 이를 보다 정량화하기 위하여 만족도 함수(Desirability)를 이용하여 최적반응조건을 도출하였다. 만족도 함수는 반응변수의 형태에 따라 망소특성, 망대특성, 그리고 망목특성의 만족도 함수로 구분되며, Minitab에서는 3가지 형태의 만족도 함수를 이용한 다중 반응 최적화 모듈이 삽입되어 있다(An et al., 2009; An et al., 2010; An et al., 2013; Cha et al., 2012). 본 연구에서는 반응변수들은 크면 클수록 좋은 경우라 가정하여 Minitab의 다중반응 최적화 모듈의 망대특성의 만족도 함수를 사용하여 최적화 범위를 도출하였다.

각 반응변수들의 hold value를 선정하여 최적화 조건을 살펴보았다. 전극간격 0(50mm)인 조건에서 전류밀도 -1(10.3 mA/cm^2)와 전해질 농도 -1(0.1M)로 운전하였을 시, TOC의 제거효과는 84.6%로 보수적인 TOC 규제기준인 75 percentile (TOC 7.4mg/L)을 만족하기 위한 TOC 53% 삭감조건을 만족하는 것으로 조사되었다.

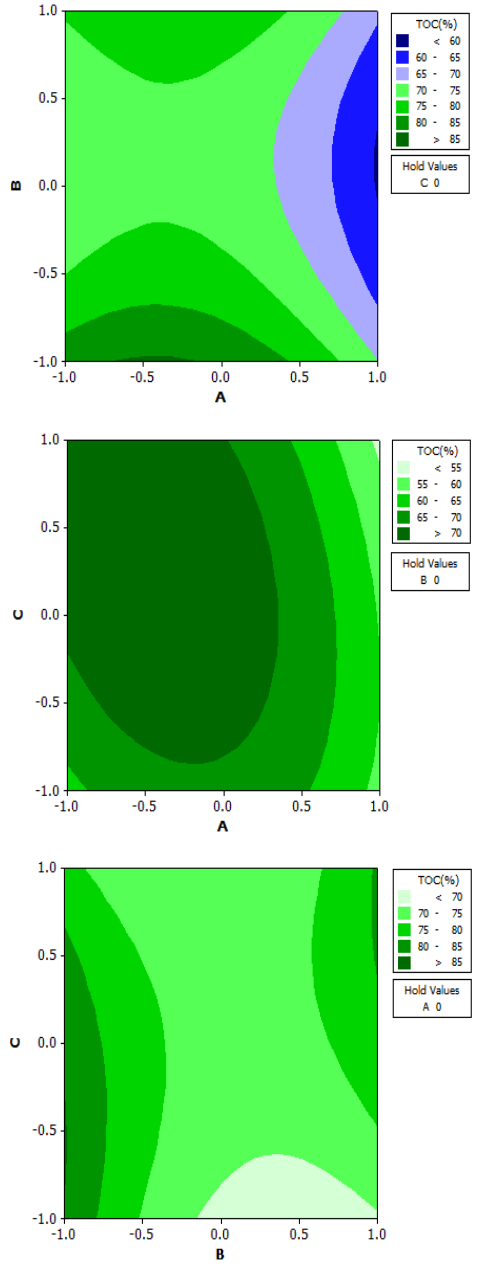

Fig. 5. Response surface plot for TOC removal efficiency

4. 결 론

본 연구는 하수방류수 내 TOC를 제거하기 위한 전기분해공정의 특성을 파악하기 위하여 Lab scale 회분식 실험과 반응표면분석법을 이용하여 TOC 제거에 영향을 미치는 인자에 대한 유의인자선정 및 수학적 모형구축과 함께 최적화를 구현하는 것을 목적으로 하였다. Lab scale 회분식 반응기를 이용한 전기분해 실험 결과, 전극간격 50mm, 전류밀도 10.3mA/cm^{2}와 전해질 농도 0.3M로 운전하였을 시, TOC의 제거효과는 83.1% 제거되는 것을 관찰할 수 있었다. 하수방류수의 TOC 제거율은 전극간격이 좁을수록 제거율은 증가하였고, 전류밀도와 전해질 첨가량이 증가함에 따라 TOC 제거율이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

반응표면법을 이용한 통계학적 분석에 의해 도출된 TOC 제거 모델식은 $y = 72.90 - 5.69x_1 - 2.88x_2 + 0.81x_3 - 7.63x_1^2 + 8.40x_2^2 - 3.48x_3^2 + 0.83x_1x_2 - 3.25x_1x_3 + 4.73x_2x_3$이었으며, 결정계수 98.6%와 수정 결정계수 96.0%로 분석되었다. 또한, 모델식의 주효과 인자는 전극간격, 전류밀도, 전해질농도 순으로 작아지는 것으로 조사되었으며, 최적화 조건에서의 TOC의 제거효과는 84.6%로 보수적인 TOC 규제기준인 75 percentile (TOC 7.4mg/L)을 만족하기 위한 TOC 53% 삭감조건을 만족하는 것으로 조사되었다. 본 연구는 하수방류수 TOC 제거를 위한 전기분해공정을 국내에서 처음으로 적용하였으며, 후속 연구를 통해 전기분해를 통한 고도산화처리와 더불어 에너지를 생산할 수 있는 기술로써 전기분해공정의 타당성 및 적용성 평가를 실시할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업(과제번호 : 2016002200004)”으로 지원받았습니다.

References

1. Ahn, S. Y. and Kwon, H. T. (2011), Study on treatment of industrial wastewater using electrolysis, Journal of Water Treatment, Vol. 19, No. 2, pp. 21~28 (in Korean).

2. An, S. W., Choi, J. Y., Cha, M. W. and Park, J. W. (2010), Adsorption characterization of Cd by coal fly ash using Response Surface Methodology (RSM), Journal of Geo-Environmental Society, Vol. 11, No. 1, pp. 19~26 (in Korean).
3. An, S. W., Jeong, Y. C., Yoo, J. Y., Min, J. E., Lee, S. J. and Park, J. W. (2013), Optimal condition of operation parameter for livestock carcass leachate using fenton oxidation process, Journal of the Korean Society of Groundwater Environment, Vol. 18, No. 1, pp. 26~35 (in Korean).
4. An, S. W., Yoo, J. Y., Choi, J. Y. and Park, J. W. (2009), Adsorption characterization of Cd by activated carbon containing hydroxyapatite using response surface methodology, Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 25, No. 6, pp. 943~950 (in Korean).
5. Baek, J. B. and Lee, G. B (2014), Comparison of sampling and estimation methods for economic optimization of cumene production process, Korean Chemical Engineering Research, Vol. 52, No. 5, pp. 564~573 (in Korean).
6. Cha, J. H., An, S. W., Chun, S. Y., Park, J. W. and Chang, S. W. (2012), The statistical optimization of TCE dechlorination by geobacter lovleyi using Box-Behnken Design, Journal of Geo-Environmental Society, Vol. 13, No. 11, pp. 37~42 (in Korean).
7. Jeong, D. H., Cho, Y. S., Ahn, K. H., Chung, H. M., Park, H. W., Shin, H. S., Hur, J. and Han, D. H. (2016), A Study on the determination method of TOC effluent limitation for public sewage treatment plants, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, Vol. 30, No. 3, pp. 241~251 (in Korean).
8. Jo, E. Y., Park, S. M., Cha, J. D., Park, C. G. and Lee, J. Y. (2014), Removal of organic pollutants using 2-stage electrochemcal wastewater treatment system, Journal of Water Treatment, Vol. 22, No. 1, pp. 71~76 (in Korean).
9. Kim, M. K., Song, Y. I., Lee, S. K., Lee, Y. Y., Choi, B. S. and Lee, Y. H. (2015), A study on advanced treatment of sewage using Fe electrode elctrolysis device, Journal of Water Treatment, Vol. 23, No. 6, pp. 43~51 (in Korean).
10. Kim, S. H., Yoo, Y. D., Ryu, J. H., Byun, C. D., Lim, H. J. and Kim, H. T. (2010a), Methanation with variation of temperature and space velocity on Ni catalysts, New & Renewable Energy, Vol. 6, No. 4, pp. 30~40 (in Korean).
11. Kim, Y. J., Lee, J. Y. and Kang, Y. T. (2010b), Study on energy independence plan for sewage treatment plant, Korean journal of air-conditioning and refrigeration engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 49~55 (in Korean).
12. Lee, H. M., Lee, S. S., Hwang, S. W. and Jin, D. B. (2016), Modeling and optimization of high strength wastewater treatment using the electro oxidation process, Korean Chemical Engineering Research, Vol. 54, No. 3, pp. 340~349 (in Korean).
13. Lee, J. Y., Yi, Y. M. and Uhm, S. H. (2008), Understanding underlying processes of water electrolysis, Korean Chemical Engineering Research, Vol. 19, No. 4, pp. 357~365 (in Korean).
14. Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., Vial, C. and Barkaoui, M. (2009), Studies on the decolorization of textile dye wastewater by continuous electrocoagulation process, Chemical Engineering Journal, Vol. 149, No. 1, pp. 207~214.
15. Shim, K. S., Kim, C. H. and Park, K. B. (2004), Economic analysis of hydrogen production technology using water electrolysis, The Korean Hydrogen & New Energy Society, Vol. 15, No. 4, pp. 324~332 (in Korean).