

ORIGINAL ARTICLE

## 혼합물 실험계획법을 이용한 3성분(Ir-Sn-Sb) 전극의 최적비율 선정

박영식\*

대구대학교 기초교육대학

### Selection of Optimum Ratio of 3 Components (Ir-Sn-Sb) Electrode using Design of Mixture Experiments

Young-Seek Park\*

DU University College, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea

#### Abstract

For electrolysis process using an insoluble electrode, electrochemical performance was greatly affected by the manufacturing method and procedure, such as the firing temperature, pre-treatment, type of precursor solution, coating method, electrode material, etc. Components of the electrode therein is one of the most important factors in electrochemical reaction. To achieve such characteristics, a appropriate ratio of the electrode material should be carefully chosen. The aim of this research was to apply experimental design method in the optimization of electrode component for the maximum generation of oxidants in electrochemical oxidation process. Mixture design, especially expanded simplex lattice design, in DOME (design of mixture experiments) with Design Expert - commercial software - was used to analyze the data. Analysis of variance (ANOVA) showed a high coefficient of determination ( $R^2$ ) value of 0.9470, thus ensuring a satisfactory adjustment of the 3<sup>rd</sup> order special cubic regression model with the experimental data. The application of response surface methodology (RSM) yielded the following regression equation, which is an empirical relationship between the TRO generation concentration and independent variables(mol ratio of 3 electrode components) in a real unit: TRO generation concentration (mg/L) = TRO conc. =  $98.25 \times [\text{Ir}] + 49.71 \times [\text{Sn}] + 95.29 \times [\text{Sb}] - 16.91 \times [\text{Ir}] \times [\text{Sn}] - 29.47 \times [\text{Ir}] \times [\text{Sb}] - 22.65 \times [\text{Sn}] \times [\text{Sb}] + 703.19 \times [\text{Ir}] \times [\text{Sn}] \times [\text{Sb}]$ . The optimized formulation of the 3 component electrode for an high TRO (total residual oxidants) generation was acquired at mol ratio of Ir 0.406, Sn 0.210, Sb 0.384 (desirability d value, 1).

**Key words** : Analysis of variance (ANOVA), DOME (design of mixture experiments), Electrode, Simplex screening design, Total residual oxidants (TRO)

#### 1. 서론

최근 선박평형수의 소독을 위한 다양한 처리 공정 중에서 DSA (dimensionally stable anode) 전극을 이용한 전기화학적 소독 공정이 우리나라를 중심으로 많이 적용되

고 있다. 전기화학적 소독 공정에는 여러가지 소독 메커니즘이 관여되는데, 해수와 같이 염소가 풍부한 환경에서, 전기-염소화가 주요 살균 메커니즘이다(Nanayakkara et al., 2011). 따라서 DSA 전극을 이용한 전기화학적 소독 공정에서 전기-염소화 반응속도를 높이는 것이 중요하

Received 11 March, 2016; Revised 5 April, 2016;

Accepted 6 April, 2016

\*Corresponding author : Young-Seek Park, DU University College, Daegu University, Gyeongsan 38453, Korea  
Phone: +82-53-850-4571  
E-mail: ysparkk@daegu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고, 전극에서 TRO (total residual oxidants)의 생성으로 설명할 수 있는 산화제의 생성능력은 전극의 성능과 관련하여 매우 중요한 요소 중의 하나이다(Cha et al., 2015).

전극의 산화제 생성에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있지만 전극 구성 물질을 어떻게 혼합하여 조성하는가에 크게 영향을 받는다. 불용성 전극인 DSA 전극은 초기에는 Ti 판에 Ir이나 Ru 등의 단일 물질을 이용하여 제조하여 왔으나 성능이나 내구성 등을 동시에 만족시키는 전극은 많지 않아 최근에는 단일 전극 성분 대신 2 성분 이상의 물질을 혼합하여 2, 3 성분계 물질이 혼합된 전극이 개발되고 있다(Park et al., 2014; Zeng et al., 2012; Zhenwei and Huimin, 2012).

지금까지 2, 3 성분계 전극의 개발을 위한 복합 성분의 물 혼합비는 주로 연구자들의 풍부한 경험과 Trial & Error 방식에 의해서 많은 시간과 노력을 들여 이루어지고 있으므로 체계화되지 못하고 수많은 시행착오를 거쳐서 산화제 생성능도가 높은 전극 조성을 얻었다(Kim and Park, 2009a, b). 따라서 이러한 시간적 손실을 줄이고 연구 결과를 체계화할 수 있는 과학적이고 합리적인 방법의 개발이 필요하다(Park et al., 2010; Park and Kim, 2014).

본 연구에서는 전극 성분의 최적 구성 비율을 구하기 위하여 실험 절차에 있어서 합리적인 방법론으로 대두되고 있는 실험계획법 중 혼합물 실험계획법 (DOE, design of mixture experiments)을 이용하였다. 혼합물 실험계획법은 혼합물의 구성 성분을 결합하여 실험을 실시하는데, 반응변수의 평균이 구성 성분의 비율만의 함수

이고 혼합물의 양에는 영향을 받지 않는 반응표면 실험의 특수한 경우이다. 혼합물 실험은 성분비의 합이 1이라는 조건이 수반되는 특징이 있다. 즉 혼합물을 구성하는 k가지 물질의 성분비를  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, k$ )라고 하면  $x_1 + x_2 + \dots + x_k = 1$ 과 같은 제약식이 존재하며, 여기서  $x_i \geq 0$ 이다. 혼합물 실험계획법은 심플렉스 격자 배열법 (simplex lattice design)과 심플렉스 중심 배열법 (simplex centroids design), Lambrakis design, 심플렉스 선별 계획법 (simplex screening design) 등이 있다. 심플렉스 선별 계획법은 인자의 수가 많다고 판단될 때 중요한 인자만을 선별하고 싶은 경우에 사용하도록 계획한 실험계획법이다(Kim and Park, 2005; Park and Kim, 2011; Park and Kim, 2014).

본 연구는 난분해성 물질 제거를 위한 산화제 생성능이 우수한 것으로 알려진 Ir, Sn, Sb 삼성분(Chen et al., 2002; Jeong et al., 2015)에 대해 최적의 오염물질 제거 성능을 발휘할 수 있는 전극 구성에 대한 최적 비율을 찾고자, 혼합물 실험계획법 중 심플렉스 선별 계획법을 이용하여 3 성분계 전극의 최적 비율을 선정하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험재료 및 실험방법

#### 2.1.1. TRO 생성에 대한 3 성분 실험계획

Fig. 1에 성분의 수가 3인 경우의 단순 심플렉스 격자 계획과 심플렉스 선별 계획을 나타내었다. Fig. 1(a)는 단순 심플렉스 격자 계획으로 3 성분이고 차수가 2차인 경우의 그림이며, 2차 모형까지 추정이 가능하지만 모형

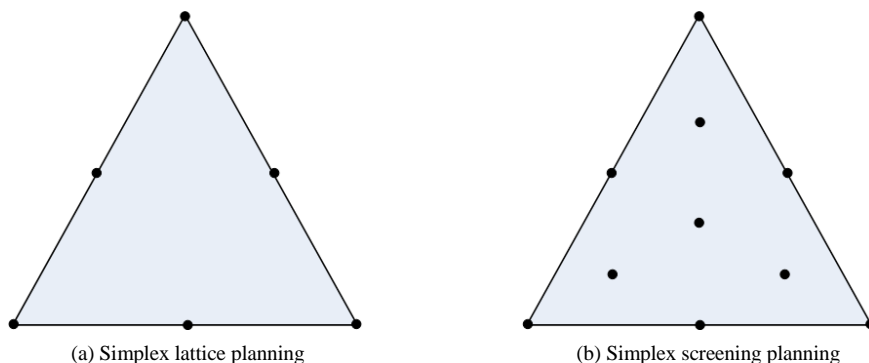


Fig. 1. Simplex lattice and simplex screening planning in case of 3 component.

**Table 1.** Experimental points and generated TRO concentration with 3 component electrode

Run No.	Ir	Sn	Sb	TRO concentration (mg/L)
1	0.333	0.333	0.333	96.0
2	0.667	0.167	0.167	102.0
3	1.000	0.000	0.000	95.2
4	0.000	1.000	0.000	51.7
5	1.000	0.000	0.000	100.0
6	0.500	0.000	0.500	86.8
7	0.167	0.667	0.167	70.0
8	0.000	0.500	0.500	67.0
9	0.000	1.000	0.000	49.2
10	0.000	0.000	1.000	94.1
11	0.500	0.500	0.000	69.9
12	0.167	0.167	0.667	100.0

적합도의 검정이 불가능하다. Fig. 1(b)는 3성분이고 차수가 3차인 심플렉스 선별 계획에 대한 그림으로 특수 3차 모형까지 추정이 가능하며, 모형적합도의 검정이 가능하다(Lee, 2008). Ir, Sn, Sb 3성분인 경우 단순 심플렉스 격자 계획을 적용할 경우 실험점은 Fig. 1(a)에서 보듯이 한 성분의 비율이 1이고 다른 성분이 들어 있지 않는 꼭지점[(Table 1의 run 3, 4, 5), (9, 10은 반복)]과 두 꼭지점을 연결한 변에 위치한 실험점(Table 1의 run 6, 8, 11)은 두 가지의 성분이 섞여 있는 혼합물로 구성되어 있어 세 성분이 모두 혼합된 실험점이 존재하지 않는다. 따라서 세 가지의 성분이 골고루 혼합되어 있는 혼합물인 내부점이 필요하다. 꼭지점 및 세 변에 위치한 실험점에 내부점(Table 1의 run 2, 7, 12)과 중앙점(Table 1의 run 1)을 추가한 Fig. 1(b)와 같은 심플렉스 선별 계획을 이용하여 10회의 실험점을 구성하고 반복 실험점을 2회(run 9, 10) 추가하여 총 12회의 실험점을 구성하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 반응 변수로 실험에서 구한 TRO 생성농도(mg/L)를 입력하였다(Design-Expert®, 2007; Lee, 2008).

2.1.2. 전극 제조

두께가 1 mm, 30 x 50 mm 크기의 메시형 Ti 판을 아세트 용액이 들어 있는 초음파 세척기에 투입하고 30분 동안 세척하면서 Ti 판에 묻어 있는 기름 성분을 제거하였다. Ti 판을 공업용 에탄올로 5분간 초음파 세척한 후,

3차 증류수로 5분간 초음파 세척하고 상온에서 건조하여 보관하였다. 염산과 황산을 1:1 혼합한 혼산 6 M 용액에 Ti판을 투입한 후 50~60 °C에서 1시간 에칭하여 잔류 그리트 제거와 표면의 활성화를 실시하고, 3차 증류수로 5분간 초음파 세척하고 건조하였다. SnSO<sub>4</sub>, IrCl<sub>3</sub> hydrate 및 Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 혼합물 실험계획법에 의한 mol비를 기준으로 하여 무게를 측정하고 후 10% 농염산(35%)과 부탄올이 1:1로 혼합된 50 mL에 넣고 교반기로 혼합하였다. 용액을 건조된 Ti 판에 붓으로 도포하고 80 °C로 유지되는 건조기에서 5분 동안 건조시켜 용매를 증발시킨 뒤, 350 °C로 유지되는 전기로에서 5분 동안 소성시킨 뒤 상온으로 냉각시켰다. 이 과정을 10회 반복하고 최종적으로 500 °C로 유지되는 전기로에서 1시간동안 소성시켜 전극을 제조하였다.

2.1.3. 전기분해 반응기 및 실험

산화제인 TRO (total residual oxidants) 생성 실험에 사용할 반응기는 아크릴을 이용하여 회분식으로 제작하였다. 30 x 50 mm의 메시형 전극을 반응 부피가 2 L인 반응기에 투입하여 실험하였다. 양극은 제조한 Ir-Sn-Sb 전극을 사용하고 음극은 티타늄 전극을 사용하여 실험하였다. 직류 전원공급기(Hyunsung E&E, 50 V 20 A)를 이용하여 전극에 전원을 공급하였으며, 전해질인 NaCl은 1 g/L의 농도로 투입하였고, 전극에 인가하는 전류는 1.4 A이었다. 실험은 2.1.1절에 나타낸바와 같이 총 12

**Table 2.** ANOVA results of the mixture special cubic model for TRO

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	Prob > F
Model	3996.74	6	666.12	33.75	0.0007
Linear Mixture	3439.94	2	1719.97	87.14	0.0001
AB	14.84	1	14.84	0.75	0.4255
AC	40.52	1	40.52	2.05	0.2113
BC	23.93	1	23.93	1.21	0.3210
ABC	482.60	1	482.60	24.45	0.0043
Residual	98.68	5	19.74		
Lack of fit	84.09	3	28.03	3.84	0.2134
Pure error	14.60	2	7.30		
$R^2=0.9759$ , Adjust $R^2=0.9470$					
Adequate precision	14.662				

회의 실험점에 대해 TRO 생성을 위한 전기분해 실험을 실시하였다.

## 2.2. 분석 및 측정방법

전극의 성능을 평가하기 위하여 전기분해에서 생성되는 산화제의 총 농도를 나타내는 TRO를 측정하였다. 전기분해 반응에서 생성되는 TRO 농도는 수질분석기(DR2800, HACH, USA)를 이용하여 측정하였다. TRO는 DPD (N,N-diethyl-p-phenylenediamine)을 spectrophotometric method(US EPA method 316)에 의거 530 nm에서  $Br_2$ 로 정량하였다. 정량범위는 0-4.5 mg/L이며 정량한계는 0.02 mg/L이었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 혼합물 반응표면분석

혼합물 반응표면분석을 위하여 설계 분석에서 'Fit summary'를 수행한 결과 3차 모형인 'Sp cubic' 모형을 추천하였다. 'Sp cubic' 모형의 Prob > F 값이 기준값인 0.05에 비해 0.0043으로 충분히 작아서 특별 삼차 모형이 적절함을 제시하고 있으며, 출력 결과에서도 'suggested'로 적절한 모형으로 선정하였다. 모형의  $R^2$  값은 0.9759로 나타났다.

특별 삼차모형의 항들 중에서 설명력이 떨어지는 p 값이 0.25 이상인 이차항이나 교호작용의 항들을 후방 소거법(backward elimination)으로 오차항에 풀링하기 위

해 f(x) Modle을 클릭하고 Mixer order에서 'special cubic'을 선택하였다. 'election'에서 'Backward'를 선택하고 Alpha에는 기준값으로 0.25를 선택하고, 분석 결과를 보기 위해서 분산분석(ANOVA, analysis of variance)를 실시하였다. Table 2에 나타내었듯이 후방 소거 결과 이차항인 AB항과 BC항의 p 값이 각각 기준으로 정한 값인 0.25를 넘는 0.4255와 0.3210으로 나타나 제거되어야 하지만 특별 삼차항인 ABC의 Prob > F 값이 0.0043으로 나타나 유의하므로 모형의 위계 순서(hierarchical order)를 존중하여 제거하지 않았다(Lim et al., 2008).

선택된 모형의 적절성을 진단하기 위하여 'Diagnostics'를 실시하였다. Fig. 2의 그림의 표준화잔차의 정규확률 그림을 보면 개략적으로 직선모형을 따르고 있어 오차의 정규성을 가정할 수 있었다. (b)의 표준화잔차와 예측값의 산점도를 살펴보면  $\pm 2$  이내의 수평밴드 내에서 램덤하게 퍼져 있어 오차가 등분산성을 만족하면서 선택된 모형이 적절한 것으로 판단되었다.

TRO 생성에 대하여 분산분석을 실시한 후 산출한 수정 반응 모형에 대해 실제 변수인 전극 성분의 몰 비율을 적용한 모델링 결과를 식(1)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 \text{TRO conc.} = & 98.25 \times [\text{Ir}] + 49.71 \times [\text{Sn}] + 95.29 \times [\text{Sb}] \\
 & - 16.91 \times [\text{Ir}] \times [\text{Sn}] - 29.47 \times [\text{Ir}] \times [\text{Sb}] \\
 & - 22.65 \times [\text{Sn}] \times [\text{Sb}] \\
 & + 703.19 \times [\text{Ir}] \times [\text{Sn}] \times [\text{Sb}] \quad (1)
 \end{aligned}$$

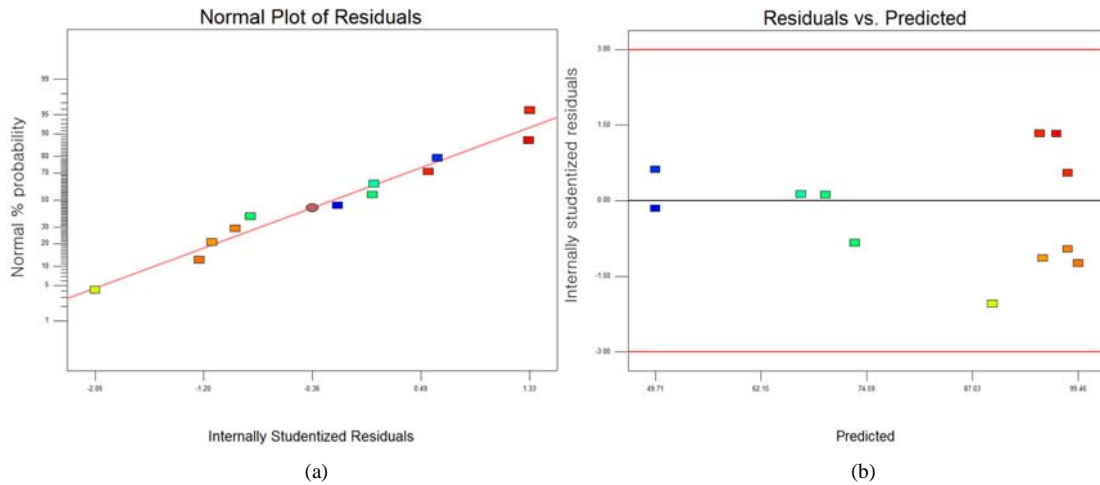


Fig. 2. Residual plot of model for error values: (a) Normal probability plot of the residuals, (b) Scatter plot of the residuals and predicted.

식(1)에서 보듯이 혼합물의 성분비가 TRO 농도에 미치는 영향이 나타나 있다. 단일 성분 중에서 Ir 성분의 몰비의 영향이 가장 크며, Sn의 영향이 가장 적은 것으로 나타났다. 이차항은 - 값을 나타내어 음의 영향을 나타내지만 크기는 작은 것으로 나타났으며, 3차항의 값이 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 식(1)의 유의성은 Table 2의 분산분석표에서 보는 바와 같이 매우 높은 것으로 나타났다. 아울러 원 모형의 R<sup>2</sup> 값과 오차항을 제외한 후의 R<sup>2</sup> 값은 각각 0.9759와 0.9470으로 식(1)의 회귀적합 결과는 충분한 설명력을 갖는 것으로 판단된다.

3성분 전극을 이용한 TRO 생성에서 Prob > F 값이 0.0007로 기준인 0.05보다 훨씬 낮은값으로 나타나 높은 유의성을 나타내었다(Park et al., 2010). 회귀방정식을 검정하는 방법으로는 분산분석표에 의한 F-검정, 상관관계 R<sup>2</sup> 잔차평균제곱 외 ‘적합성결여’(lack of fit)를 사용하고 있다. ‘적합성결여’의 p값이 0.2134으로 나타나 유의성을 판정하는 기준인 0.05보다 높게 나타났다. 적합성결여 결과가 유의하지 않은 것으로 나타나 회귀 모형이 반응을 설명하는데 적합하다고 판단되었다(Park and Kim, 2011a). "Adequate Precision"은 신호대 잡음비율(the signal to noise ratio)을 나타내며, 4 이상이면 바람직한 것으로 판정하는데, 14.662로 나타나 바람직한 것으로 나타났다(Lim et al., 2008).

Fig. 3에 실제 측정된 TRO 농도와 식(1)을 이용하여

예측한 TRO 농도 값을 나타내었다. 중간의 실측값과 예측값이 일치하는 선을 중심으로 볼 때 중심선에서 크게 벗어나는 점들이 존재하지 않아 실측치와 예측치가 잘 일치하는 것으로 판단되었다.

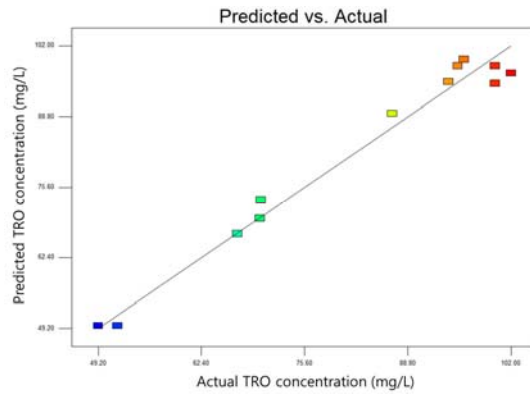


Fig. 3. Actual and predicted TRO concentration with equation (1).

‘Model graphs’에서 등고선 그림의 3개의 좌표축을 그리기 위하여 ‘Trace’를 수행하여 얻은 각각의 Cox 방향의 좌표축에서 반응변수의 예측 값의 그림인 Trace 그림을 Fig. 4에 나타내었다. 표준 표시 인자 A, B, C의 곡선 효과가 존재함을 시각적으로 확인 할 수 있었다.

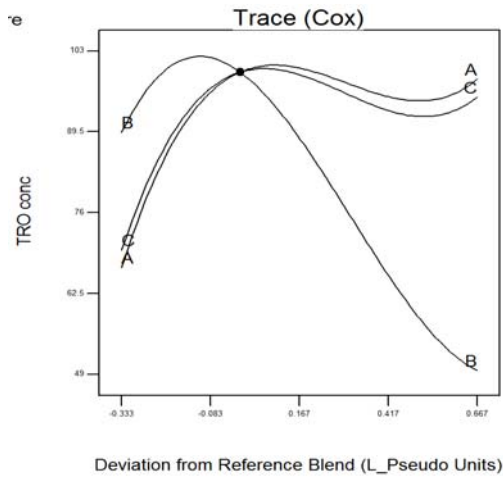
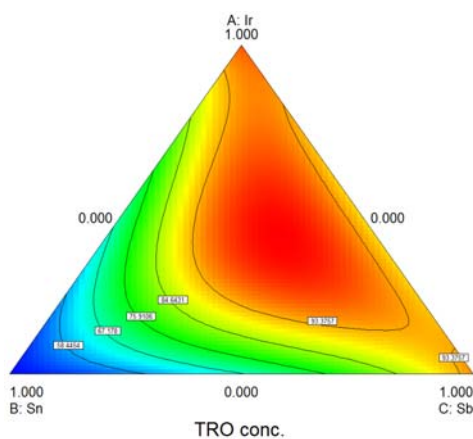
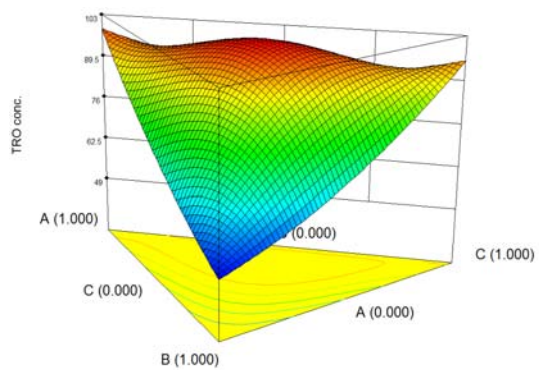


Fig. 4. Trace plot.

Fig. 5(a)에 혼합물 실험공간인 2차원 심플렉스 공간에서의 등고선 그림을 그렸다. 등고선 모양이 정상점에서 최고가 되는 산(즉, 정상점에서 최대 값을 정상에서 얻을 수 있다.)과 유사한 형태로 나타났으며, TRO 농도가 최대가 되는 지점은 중간점 근처에서 오른쪽 영역의 붉은 색 지점인 것으로 나타났다. Fig. 5(b)에 혼합물 실험공간에서 3차원의 반응 표면 그림을 나타내었다. 반응 표면 그림에서도 등고선 그림에서 예측된 대로 혼합물 반응 표면이 산과 유사하게 중간에 정상점을 가지는 것으로 나타났다.



(a) Contour plot



(b) Plot of reaction surface with a mixture space

Fig. 5. Contour and response surface plots for TRO generation.

### 3.2. 공정 최적화

TRO 발생 성능이 우수한 3성분 전극을 개발하기 위하여 각 성분의 최적 혼합비율이 필요하다. 3성분의 최적 혼합비율을 결정하기 위하여 “optimization”에서 Ir, Sn, Sb 전극 성분의 비율을 계량인자의 범위인 ‘in range’로 선택하고, 반응변수 생성 TRO 농도를 ‘maximize’를 선택하였다. 반응변수 TRO 농도 허용한계로 Limits 간에 각각 하한과 상한 값인 49.2와 103를 입력하고 desirability d의 weight 간을 default 값인 1로 선택하였다. desirability d를 가장 크게 하는 최적조건을 찾기 위해 ‘solutions’를 실행하여 7개의 desirability d 값을 얻었다. 그 중에서 desirability d 값이 1인 것은 5개로 나타났다. 그 중에서 최적의 값으로 선택된 값은 Ir 0.406, Sn 0.210, Sb 0.384(desirability d 값, 1)이 선택되었으며 이 때 얻을 수 있는 최대 TRO 농도는 102.074 mg/L 인 것으로 나타났다.

Graphic optimization을 수행하여 ‘criteria’에서 하위 limit를 100 mg/L로, 상위 limit를 105 mg/L로 하여 그래프 최적화를 실시하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 중앙의 노란색으로 보이는 부분이 TRO 농도가 100 mg/L 이상을 얻을 수 있는 각 성분의 혼합비 영역이며, Graphic optimization에 의해 시각적으로 확인하였다.

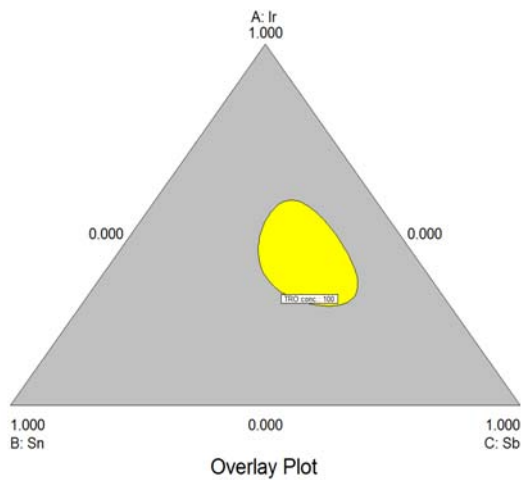


Fig. 6. Experimental areas of over TRO concentration of 100 mg/L in the mixture experimental space.

최적조건에서 재현성을 확인하기 위하여 수치 최적화에서 얻은 최적 조건인 Ir = 0.41, Sn = 0.21, Sb = 0.39인 조건에서 추가 실험을 실시하여 관측될 반응값의 신뢰구간을 구하기 위하여 관측될 반응값인 TRO 농도가 95% PI low 값인 93.97 mg/L와 95% CI high 값인 110.14 mg/L 사이에 속하면 재현성이 있다고 판정된다. 최적 조건의 혼합비율로 새로 제조한 전극으로 TRO 농도를 측정된 결과 각각 103.5 mg/L와 101.7 mg/L로 나타나 재현성이 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

혼합물 실험계획법 중 심플렉스 선별 계획법(simplex screening design)를 이용하여 전극 제조에서 전극의 총 산화제 지표인 TRO 생성을 최대화하기 위한 Ir, Sn 및 Sb 3성분의 최적 혼합비 비율을 구한 결과 다음의 결과를 얻었다.

1) 혼합물 설계 분석에서 3차 모형인 ‘Sp cubic’ 모형이 추천되었고, ‘Sp cubic’ 모형의 Prob > F 값이 0.0043으로 충분히 작아서 특별 삼차모형이 높은 유의성을 가지는 것으로 나타났다. 수정 모형의 R<sup>2</sup> 값은 0.9470로 나타나 모형이 다항식 적합도(fit)를 잘 만족하는 것으로 나타났다. ‘적합성결여의 p값이 0.2134로 나타나 회귀 모형이 반응을 설명하는데 적합하다고 판단되었다.

2) ‘수치 최적화’를 이용하여 ‘desirability’ d가 가장 큰 최적 조건을 찾은 결과 5개의 단일 값을 얻을 수 있었으며, 그 중 최적의 값으로 선택된 값은 Ir 0.406, Sn 0.210, Sb 0.384(desirability d 값, 1)이 선택되었으며, 이 성분비로 전극을 제작할 경우 얻을 수 있는 최대 TRO 농도는 102.074 mg/L인 것으로 나타났다.

3) 혼합물 설계 중 심플렉스 선별 계획을 이용하여 12회의 실험 횟수만으로 합리적으로 3성분 전극의 최적 혼합비를 얻을 수 있는 방법론을 제시하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2015년도 대구대학교 교내연구비의 지원을 받아 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

Cha, H. G., Seo, M. H., Lee, H. Y., Lee, J. H., Lee, D. S., Shin, K. S., Choi, K. H., 2015, Enhancing the efficacy of electrolytic chlorination for ballast water treatment by adding carbon dioxide, Marine Pollu. Bull., 95, 315-323.

Chen, G., Chen, X., Yue, P. L., 2002, Electrochemical behavior of novel Ti/IrO<sub>2</sub>-Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SnO<sub>2</sub>, J. Phys. chem. B., 106, 4364-4369.

Design-Expert<sup>®</sup> Software, 2007, Version 7.1 User's guide, 1-30.

Jeong, H. J., Lee, K. P., Chung, H. S., Kim, D. S., Kim, H. S., Choi, Y. H., Im, D. S., Seong, J. H., Lee, Y. G., 2015, Optimization mixture ratio of *Petasites japonicus*, *Luffa cylindrica* and *Houttuymia cordata* to develop a functional drink by mixture design, J. of Life Sci., 25(3), 329-335.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2009a, A Study on the preparation of the dimensionally stable anode(DSA) with high generation rate of oxidants(1), J. Environ. Sci., 18(1), 49-60.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2009b, A Study on the preparation of the dimensionally stable anode(DSA) with high generation rate of oxidants(2), J. Environ. Sci., 18(1), 61-72.

Kim, D. S., Park, Y. S., 2011, A Basic study of plasma reactor of dielectric barrier discharge for the water

- treatment, *J. Environ. Sci.*, 20(5), 623-630.
- Kim, S. J., Park, J. I., 2005, An Optimum design of secondary battery using design of experiments with mixture, *IE Interfaces*, 18(4), 402-411.
- Lee, S. H., 2008, Engineers statistical data analysis using Minitab, Iretech., 779-801.
- Nanayakkara, K. G. N., Zheng, Y. M., Alam, A. K. M. K., Zou, S., Chen, J. P., 2011, Electrochemical disinfection for ballast water management: Technology development and risk assessment, *Marine Pollu. Bul.*, 63, 119-123.
- Park, S. H., Kim, J. U., 2011, Modern desing of experi-ments using MINITAB, 2<sup>nd</sup> ed., Min-Young Sa, Seoul, 480-491.
- Park, S. H., Lim, D. C., Kim, K. S., Bae, J. R., Jeon, O. H., 2010, A Study of the optimization of the compounded PP Using the DOE, *Transactions of Kor. Soc. Auto. Eng.*, 18(1), 74-85.
- Park, Y. S., Lee, K. S., Park, Y. S., Kim, D. S., 2014, Discussion of optimal component ratio of Ir-Sn-Sb electrode by experimental design method of mixture, *Proceedings of the Kor. Environ. Sci. Soc. Conf.*, 23, 383-385.