ISSN(Print): 1225-7672 / ISSN(Online): 2287-822X
DOI http://dx.doi.org/10.11001/jksww.2015.29.2.193

반응표면분석법-중심합성계획을 이용한 최적 응집제 주입량 산정 연구

Optimization of coagulant dosage using response surface methodology with central composite design

김예슬·오재일*
Yeseul Kim·Jeill Oh*

중앙대학교 사회기반시스템공학부
Department of Civil and Environmental Engineering and Urban Design and Studies, Chung-Ang University

ABSTRACT

The determining the appropriate dosage of coagulant is very important, because dosage of coagulant in the coagulation process for wastewater affects removing the amount of pollutants, cost, and producing sludge amount. Accordingly, in this study, in order to determine the optimal PAC dosage in the coagulation process, CCD (Central composite design) was used to proceed experimental design, and the quadratic regression models were constructed between independent variables (pH, influent turbidity, PAC dosage) and each response variable (Total coliform, *E.coli*, PSD (Particle size distribution) (<10 μm), TP, PO_4-P, and COD_{cr}) by the RSM (Response surface methodology). Also, Considering the various response variables, the optimum PAC dosage and range were derived. As a result, in order to maximize the removal rate of total coliform and *E.coli*, the values of independent variables are the pH 6-7, the influent turbidity 100-200 NTU, and the PAC dosage 0.07-0.09 ml/L. For maximizing the removal rate of TP, PO_4-P, COD_{cr}, and PSD(<10 μm), it is required for the pH 9, the influent turbidity 200-250 NTU, and the PAC dosage 0.05-0.065 ml/L. In the case of multiple independent variables, when the desirable removal rate for total coliform, *E.coli*, TP, and PO_4-P is 90-100 % and that for COD_{cr} and PSD(<10 μm) is 50-100 %, the required PAC dosage is 0.05-0.07 ml/L in the pH 9 and influent turbidity 200-250 NTU. Thus, if the influent turbidity is high, adjusting pH is more effective way in terms of cost since a small amount of PAC dosage is required.

Key words: Analysis of variances, Central composite design, Coagulation, Wastewater, Poly-aluminum chloride, Response surface methodology
주제어: 분산분석, 중심합성계획, 응집, 하수, PAC (Poly-aluminum chloride), 반응표면분석법

1. 서 론

응집공정에서 오염물의 제거 정도는 투입되는 응집제의 양에 가장 의존적이기 때문에 적절한 응집제의 투입량 결정이 매우 중요하다. 만약 응집제 양이 불충분할 경우 입자가 효과적으로 불안정화가 되지 못하며, 응집제 양이 과다하게 투입될 경우 재안정화, 과도한 슬러지 생산 및 부식과 같은 부정적인 효과를 발생시킬 것이다 (U.S. EPA, 2014). 따라서, 응집공정에서의 적절한 응집제량 산정에 대한 관심이 점점 높아지고 있으며, 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다 (Samrani et al., 2008; Wang et al., 2007; Ghafari and Azizb, 2009).

하수를 대상으로 하는 응집공정에서는 다양한 수질 항목들을 측정하여 응집제 투입량을 결정하는데, 대

Received 8 December 2014; Revised 30 March 2015;Accepted 7 April 2015
*Corresponding author: Jeill Oh (E-mail: ohjeill@cau.ac.kr)

표적인 수질항목으로는 병원균, 입자성물질, 무기물질, 유기물질 등이 있다.

병원균은 숙주 내에서 성장과 증식을 하고 질병을 야기하는 미생물이다. 지표균으로서 주로 사용되는 균은 대장균군에 속하며, 이는 사람의 내장에서 나온 수인성 병원균으로 배설물에 의해 나타나 물의 오염을 초래한다(Peavy et al., 1998). 물 속 병원균의 유일한 배출원은 아니지만 인간의 배설물에 의한 오염이 가장 크며, 감염된 인간의 장으로부터의 배설물이 정수 공급 계통으로 유입되면 엄청난 정도의 전염병을 야기할 수 있는 수십억 개의 병원균이 검출 될 수 있다. 따라서 지표 미생물(Indicator organism)로서 Total coliform 또는 *E.coli* (*Escherichia coli*)가 병원성 미생물의 잣대가 될 수 있으며, 해당 값이 높다고 하여 병원성 미생물이 무조건적으로 많다고 할 수는 없지만 확률적으로 높다고 평가된다(Masters and Ela, 2008).

물에 들어 있는 용존 고형물의 양은 그 물이 가정용으로 적합한지를 판단하는 기준이 된다. 고형물 함량이 높은 물은 통변성을 자주 나타내며, 때로 이에 적용되지 못한 사람들에게는 역효과를 나타낸다(Sawter et al., 1994). 특히, 입자 크기에 따른 개수가 관심이 되며, 이는 대장균 및 탁도 와도 밀접한 관계가 있다. 대장균은 살균제에 의해 불활성화 되지 않고 여과 할 수 있는 입자의 특정 유형으로 간주 될 수 있기 때문에 하수내의 고형물 입자의 수와 관련이 있다. 또한 탁도는 0.1-1 μm 크기의 입자에 의해 가장 강하게 영향을 받는다(Bache and Gregory, 2007). 특히 보고자 하는 10 μm 이하의 입자는 콜로이드성 물질로 물에 부유된 상태로 존재하며, 응집공정이 이러한 콜로이드의 표면전하를 중화시킴으로서 'Floc'이라는 집합체로 콜로이드를 응집시킨다. 이러한 플록은 침전이 가능할 만큼 충분히 크며, 탁도(무기물의 콜로이드)를 제거하기 위해 필요하 (U.S. EPA, 2001).

인은 오늘날 수질항목의 주요한 요인으로서, 연구에 의하면 조류 및 사이아노박테리아균(Cyanobacteria)의 생장에는 인이 필수성분이며, 대체로 인의 양이 성장속도의 조절 인자로 작용 한다. 인이 풍부한 곳에서는 수화 현상(Algal blooming)이 일어나며, 이것은 공해를 일으키는 원인으로 작용한다(Sawyer et al., 1994).

실험계획법은 실험에서 적은 비용으로 최대의 정보를 얻고자 계획하는 것으로, 실험 설계 단계, 실험 자료의 분석 단계와 최적화 단계로 구성된다. 반응표면설계는 이러한 실험계획방법 중의 발전된 단계로서 선별계획(Screening design)을 통해 주요 요인들을 인지하며, 상호작용 설계(Interaction design)을 통해 요인들 간의 상호작용을 입증한다. 결국 반응표면설계는 최적화, 예측, 보정 및 공정 제거의 조정 등을 가능하게 한다(Montgomery, 2013; Patience, 2013; Myers et al, 2009). 여러 논문에서는 응집공정에서의 수질요인과 같은 분석 조건의 최적화를 위하여 반응표면설계를 사용하고 있다(Wang et al, 2007; Ghafari and Azizb, 2009).

본 연구에서는 응집공정에서의 응집제 PAC (Poly-aluminum chloride) 최적 주입량 결정을 위하여 중심합성계획으로 실험설계를 진행 하고자 하며, 반응표면분석으로 영향변수들(pH, 유입탁도, PAC 주입량)에 대한 각 반응변수(Total coliform, *E.coli* (*Escherichia coli*), PSD (Particle size distribution) (<10 μm), TP (Total phosphorus), PO_4-P (Orthophosphate), COD_{cr} (Chemical oxygen demand using chromate))의 이차 회귀모형 모델식을 구축 하고자 한다. 또한, 여러 가지 반응변수를 고려하여 응집제의 최적 주입량 및 최적 범위를 도출하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 대상물질 및 실험방법

청천시 침사지 이후 하수를 대상으로 실험을 진행하였으며, 해당 하수는 B 하수처리장에서 채취하였다. 채취한 하수의 수질 특성은 Table 1과 같다.

산업단지, 주거단지, 관광단지 등등 지역의 특성에 따라 하수 pH 변화가 나타나므로 본 연구에서는 pH를 영향변수로 선정하였으며, 실시간 측정되는 유입수의 탁도 변화를 고려하여 유입탁도를 영향변수로 선정하였다. 또한 응집제량을 영향변수로 구분하여 유입수의 평균 인 농도를 기준으로 90 % 이상을 제거 목적으로 하여 2 mol Al/ mol P의 비로 응집제 주입량을 Table 2와 같이 산정하였다 (Metcalf and Edy, 2004).

중심합성계획 설계에 따른 2^3 요인 설계를 바탕으로 영향변수를 범위를 선정하였는데, 응집제 주입량은 유입수의 평균 인 농도를 기반으로 Table 2에서 산정된 응집제 주입량을 중심점으로 PAC 0.03-0.13 ml/L를 첨가하였으며, pH는 유입수의 평균 pH를 중심점으로 선정하여 0.1 M hydrochloric acid 와 0.1 M sodium hydroxide solutions을 주입하여 pH 4.3–9.7의 변화를

pp. 155-163
pp. 165-169
pp. 171-182
pp. 183-192
pp. 193-202
pp. 203-209
pp. 211-222
pp. 223-231
pp. 233-241
pp. 243-249
pp. 251-259
pp. 261-269
pp. 271-281

Table 1. Characteristics of the wastewater used in this study

Parameters		Mean	S.D.	Range
pH		6.65	0.13	6.55-6.88
Turbidity	NTU	150.00	118.97	14.70–285.30
Total coliform	CFU/ml	44,360	22,522	9,800-65,000
E.coli	CFU/ml	13,500	7,874	2,500-22,000
PSD(<10 μm)	#/ml	3,175,997	1,887,633	716,839-5,909,200
T-P	mg/L	9.91	6.52	1.62-17.26
PO4-P	mg/L	6.35	3.44	1.29-9.88
CODcr	mg/L	366.40	237.39	68.08-648.76

Table 2. Determine PAC dosage according to the P concentration of wastewater

	Molecular weight	Number of P or Al in molecular formula	PAC concentration (ml/L) 2 mol Al/mol P
P	31	1	0.01012
PAC	238	2	0.08

주었다. 유입탁도 역시 유입수의 평균 탁도를 중심점으로 선정하여 침전된 고형물과 증류수를 이용하여 14.7-285.3 NTU의 변화를 주었다.

응집실험은 실험실 내에서 1 L 비커를 통해 Jar-test를 진행하였으며, 운전조건은 급속혼합을 기반으로 하여 Table 3과 같이 선정하였다.

응집실험을 통하여 관찰하고자 하는 수질인자를 반응변수(측정인자)로 선정하였으며, 해당하는 수질 측정인자로는 *E.coli,* Total coliform, PSD, PO_4-P, T-P, COD_{cr} 등이 있다. *E.coli*와 Total coliform은 3M사의 Petrifilm *E.coli* / Coliform count plate로 48시간의 배양과정을 거친 후 측정하였다. PSD는 Atik사의 AccuSizer 780A로 0.5-1000 μm 크기의 Particle 분포를 측정하였다. U.S. EPA (2001)에서 제시하였듯이, 10 μm 이하 크기의 입자들이 콜로이드성 물질로 플럭 (Floc) 형성에 큰 영향을 미치므로, 본 연구에서는 이를 대상으로 하여 비교·분석 하였다. PO_4-P, T-P, COD_{cr}는 HUMAS 사의 시약과 HS-1000을 이용하여 발색시약에 의한 흡광도법을 통해 측정하였다.

Table 3. Summary of Jar-test conditions

Factor	Value
Temperature	20 ℃
Coagulant type	PAC
Rapid stirring velocity and time (AWWA, 1969)	110 rpm and 20 sec
Settling time	2 min

2.2 실험설계

본 연구에서는 pH, 유입 탁도, PAC 응집제량의 변화에 따른 수질항목들(Total coliform, *E.coli*, PSD (<10 μm), T-P, PO_4-P 및 COD_{cr}의 제거율)의 변화를 Design-Expert® Software (version 9.0) 프로그램을 통하여 통계적으로 설계하고 분석하였다.

반응함수로서 일반적으로 가정되는 간편하고 실용적인 반응표면 모형은 여러 개의 영향변수에 대한 중회귀모형 (Multiple regression model)이며, 해당 연구에서는 이차 회귀모형 (Second order regression model)을 선정하였다. 이는 곡선적인 반응을 극사하기 위하여 일차 회귀모형보다 이차 회귀모형이 적합하다고 판단되었으며, 삼차 이상의 회귀모형에서는 회귀계수들이 급격하게 증가함에 따라 자유도의 손실이 따르므로 이차 회귀모형(식 (1))이 가장 적합하다고 판단되었다 (Bas and Boyacı, 2007; Bezerra et al., 2008).

$$Y=\beta_0+\sum_{i=1}^{k}\beta_i X_i+\sum_{i=1}^{k}\beta_{ii}X_i^2+\sum_{i=1}^{k-1}\sum_{j}^{k}\beta_{ij}X_iX_j+\epsilon \qquad (1)$$

where, Y = response

$X_{i \text{ or } j}$ = input factors that in fluence the response Y

$\beta_{i \text{ or } j}$ = cosefficients

ϵ = random error

이차 회귀모형을 구축하고자 중심합성계획(Central composite design)을 통하여 회귀계수를 결정하였다. 중심합성계획은 요인점(Factorial points), 중심점(Center points), 축점 (Axial points)의 세부분으로 구성되며, 요인점은 2^k 요인 설계로부터 얻어지는 점을, 중심점은 설계의 중심이 되는 점을, 그리고 축점은 설계의 중심점으로부터 각 요인을 나타내는 축을 따라 일정거리만큼 떨어진 점(2^k)을 뜻한다 (k: 영향변수의 개수).

이차 회귀모형을 구축하고자 선정한 중심합성계획 설계에 따라 2^3 요인실험점 8개, 중심점 3개, 축점 6개로 선정하여 각 반응변수에 대해서 총 17개 실험점으로 중심합성계획을 세웠으며, 각각의 영향변수 pH(X_1), 유입 탁도(X_2), PAC 응집제량(X_3)를 식 (2)와 같이 선형변환(Linear transformation) 하였다. 이는 데이터 중심이 실험자가 생각하는 흥미영역(Region of interest)의 한 가운데 위치한다고 가정하고 계산을 간편하게 하고자 원래의 변수 대신 부호변수(Coded variable)을 사용하는 방법이다(Bas and Boyacı, 2007; Bezerra et al., 2008).

$$x_i = \frac{X_i - [X_{\max} + X_{\min}]/2}{[X_{\max} - X_{\min}]/2} \tag{2}$$

whrer, x_i = coded value of the ith independent variable
X_i = uncoded value of the ith independent variable
$X_{\max}$ = maximum values of the natural variable
$X_{\min}$ = minimum values of the natural variable

중심합성계획에 따른 실험 계획 및 반응변수 (수질측정인자) 결과는 Table 5와 같다.

Desirability function approach (DAF)를 통하여 여러

Table 4. Level of the variable tested in the 2^3 central composite design

Factor	Value				
	-1.353	-1	0	1	1.353
pH	4.3	5	7	9	9.7
Influent Turbidity (NTU)	14.7	50	150	250	285.3
PAC coagulant amount (ml/L)	0.03	0.04	0.08	0.12	0.13

Table 5. Central composite design with six responses in coded units

Run	Factors			Responses					
	pH (x_1)	Influent turbidity, NTU (x_2)	PAC amount, ml/L (x_3)	Total coliform removal, %	E.coli removal, %	PSD (<10 μm) removal, %	T-P removal, %	PO_4-P removal, %	COD_{cr} removal, %
1	-1	-1	-1	99.16	98.90	-85.80	5.65	1.79	13.54
2	1	-1	-1	81.19	67.40	4.78	59.61	56.91	45.11
3	-1	1	-1	99.51	99.45	7.84	65.67	59.17	60.19
4	1	1	-1	91.73	91.95	92.12	90.07	87.77	85.23
5	-1	-1	1	98.89	99.90	-89.56	2.21	0.62	13.57
6	1	-1	1	99.43	99.70	-30.37	28.82	37.78	43.53
7	-1	1	1	99.19	99.95	-29.84	51.98	45.63	53.85
8	1	1	1	99.95	99.90	-3.86	68.72	68.34	67.60
9	-1.353	0	0	99.55	99.15	-50.44	54.05	58.33	52.38
10	1.353	0	0	98.80	98.42	86.91	96.67	95.80	79.60
11	0	-1.353	0	99.86	99.60	-33.77	17.22	1.22	2.89
12	0	1.353	0	99.97	99.95	42.18	73.45	64.23	67.45
13	0	0	-1.353	84.34	72.23	24.56	25.32	33.96	10.44
14	0	0	1.353	99.55	99.92	-84.30	12.62	27.11	9.95
15	0	0	0	99.34	99.92	-17.66	57.30	56.80	35.18
16	0	0	0	99.77	99.92	43.91	52.52	52.24	36.62
17	0	0	0	99.55	98.38	1.94	57.95	56.33	48.59

가지 반응변수를 고려하여 영향변수들의 최적의 통합점을 도출하고자 하였다. 이 방법은 여러 가지의 반응변수를 하나의 기준으로 계량화(Desired result, di)하여 계량화된 값들의 기하평균(Geometric mean) (D)의 최대값을 산정함으로서, 각 반응변수들의 최적의 통합점을 산정하는 방법으로 식 (3)과 같다.

$$D=(d_1 d_2 \cdots d_m)^{\frac{1}{m}} \tag{3}$$

where, m=the number of responses

이때 계량화된 값(di)는 0과 1사이에 존재하며, 만약 반응변수가 목표치에 도달하면 di=1을, 반응변수가 허용 가능한 범주를 벗어났을 경우 di=0을 나타낸다(Myers et al., 2009).

또한 Overlay plot을 통하여 반응변수들의 관심 범위를 지정함으로서 영향변수의 최적 범위를 도출하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 반응변수 각각에 대한 최적화

응집과정을 통해 pH, 유입탁도, PAC 양의 변화에 따른 Total coliform, *E.coli*, PSD(<10 μm), T-P, PO_4-P 그리고 COD_{cr} 제거율에 대한 관계를 반응표면분석-중심합성계획을 통하여 살펴보았으며, 그 결과인 Table 5을 바탕으로 각 반응변수에 대한 이차 회귀 모델식을 구축하였다(Table 6). 각 모델식에 대한 ANOVA(Analysis of variance) 결과는 Table 7과 같다. 반응변수 각각에 대해서 모델에 대한 자유도는 9이고 잔차에 대한 자유도는 7로서 5% 유의수준에서 검증하고자 할 때, $F_{0.05}(9,7)$의 값은 3.68로 모든 반응변수의 F value은 이보다 크기 때문에 각 모델식의 타당성을 검증할 수 있으며, P value도 5 % 유의수준에서 귀무가설을 기각하여 해당 모델식이 유의하다고 판단된다. 또한 PSD(<10 μm), T-P, PO_4-P 그리고 COD_{cr} 제거율에 대한 결정계수 (R^2)의 값이 0.92-0.99 범위로 각 반응변수의 값들의 92-99%가 해당 모델식에 의하여 설명된다고 할 수 있다. 반면, Total coliform와 *E.coli* 제거율에 대한 결정계수가 0.90, 0.86으로 다소 낮은 값을 보여주었다. 이는 인 제거 대비 주입된 PAC 농도가 해당 인자들을 제거하는데 있어서는 과대 주입되었기 때문에 해당 인자들이 유입탁도와 pH 변화에 크게 반응하지 않고 높은 제거율을 나타낸 것이 주원인으로 판단된다.

각 반응변수에 대한 이차 회귀 모델식의 반응 표면은 Fig. 1와 같으며, pH를 중심점(pH 7)에 고정하였을 때, 유입탁도와 PAC 주입량의 변화에 따른 각 반응변수의 제거율을 보여주고 있다.

각 반응변수에 따른 반응 표면과 반응변수의 제거율을 최대로 할 때의 영향변수의 값을 살펴보면(Table 8),

Table 6. Second-order regression model for each response

Response	Final equation in terms of actual factors
Total coliform	$109.30-5.93x_1-0.02x_2+286.16x_3+6.51\times10^{-3}x_1x_2+45.70x_1x_3$ $-0.34x_2x_3+0.02x_1^2+4.75\times10^{-5}x_2^2-2831.27x_3^2$
E.coli	$117.31-11.42x_1-0.05x_2+569.10x_3+0.015x_1x_2+65.10x_1x_3$ $-0.84x_2x_3+0.16x_1^2+1.20\times10^{-4}x_2^2-4543.53x_3^2$
PSD (<10 μm)	$-350.61+26.70x_1+0.90x_2+3530.30x_3-0.02x_1x_2-150.69x_1x_3$ $-3.18x_2x_3+0.57x_1^2-5.38\times10^{-4}x_2^2-17333.72x_3^2$
T-P	$-7.76-28.99x_1+0.50x_2+2287.00x_3-0.02x_1x_2-59.13x_1x_3$ $-0.03x_2x_3+3.22x_1^2-3.53\times10^{-4}x_2^2-13097.37x_3^2$
PO_4-P	$3.53-30.95x_1+0.76x_2+1590.10x_3-0.03x_1x_2-40.07x_1x_3$ $-0.43x_2x_3+3.31x_1^2-1.10\times10^{-3}x_2^2-8808.58x_3^2$
COD_{cr}	$116.76-56.28x_1+0.30x_2+1528.80x_3-0.01x_1x_2-21.67x_1x_3$ $-0.75x_2x_3+4.71x_1^2+2.03\times10^{-4}x_2^2-8393.56x_3^2$

Table 7. ANOVA result for each response model

Response	Item	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	F value	P value Prob>F	R-Squared
Total coliform	Model	9	472.79	52.53	7.06	0.0087	0.90
	Error	7	52.06	7.44	-	-	-
	Total	16	524.85	-	-	-	-
E.coli	Model	9	1349.51	149.95	4.71	0.0267	0.86
	Error	7	222.96	31.85	-	-	-
	Total	16	1572.47	-	-	-	-
PSD(<10 μm)	Model	9	43968.98	4885.44	8.73	0.0046	0.92
	Error	7	3916.23	559.46	-	-	-
	Total	16	47885.14	-	-	-	-
T-P	Model	9	12726.69	1414.08	59.97	<0.0001	0.99
	Error	7	165.05	23.58	-	-	-
	Total	16	12891.74	-	-	-	-
PO_4-P	Model	9	12171.55	1352.39	62.60	<0.0001	0.99
	Error	7	151.23	21.60	-	-	-
	Total	16	12322.78	-	-	-	-
COD_{cr}	Model	9	10013.11	1112.57	17.48	0.0005	0.96
	Error	7	445.48	63.64	-	-	-
	Total	16	10458.60	-	-	-	-

Table 8. Optimizing point for maximizing each response

Response	pH	Influent turbidity (NTU)	PAC amount (ml/L)	Removal (%)
Total coliform	7.275	103.340	0.094	99.970
E.coli	6.383	202.179	0.073	99.992
PSD(<10 μm)	8.898	237.077	0.049	92.688
T-P	8.974	249.880	0.065	97.315
PO_4-P	9.000	226.669	0.064	91.872
COD_{cr}	8.993	244.952	0.058	85.359

최적 pH가 중심점(pH 7) 보다 높은 것을 볼 수 있는데 pH가 증가할수록 용존 알루미늄의 농도가 증가하며, 특히 pH가 8.0을 초과할 때부터 용존 알루미늄의 농도는 급격하게 상승하여(Lee, 2012), 응집이 활발히 이루어져 반응변수들의 제거율이 높아짐을 알 수 있다. pH는 효소의 활동에 막대한 영향을 주며, 이는 미생물의 성장과 결부된다. 동물세포의 경우 성장을 위한 최적 pH가 6.5-7.5로(Shuler and Kargi, 2002) Total coliform과 *E.coli*의 실험 결과, pH 7.3과 6.4를 나타내었으며, 이는 다른 반응변수들의 최적 pH보다 낮은 값을 나타냄을 알 수 있다.

탁도의 경우, 탁도가 높을수록 응집 플럭을 형성하

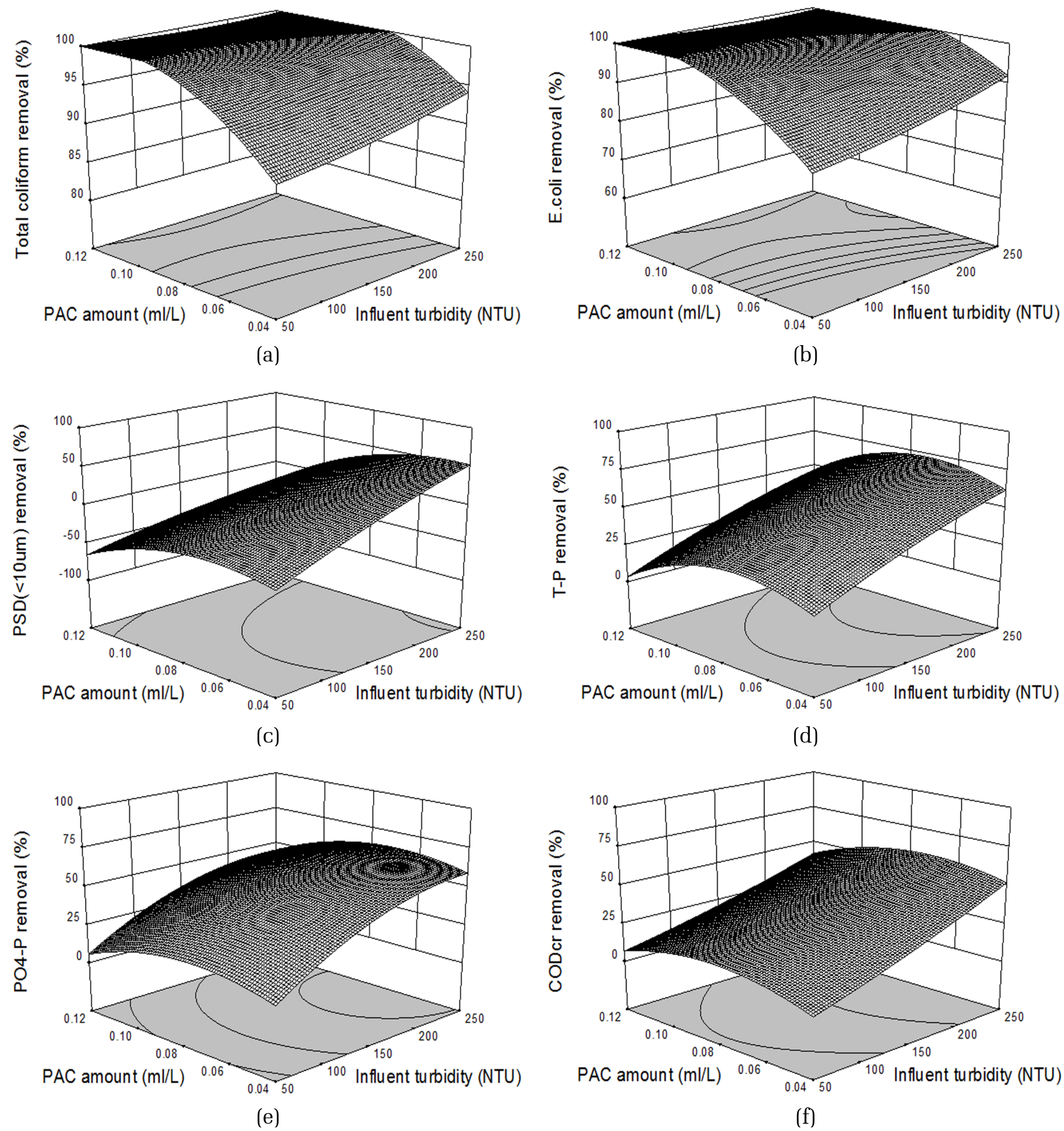


Fig. 1. Design-expert plot; response surface plot for (a) Total coliform removal, (b) *E.coli* removal, (c) PSD(<10 μm) removal, (d) T-P removal, (e) PO_4-P removal, and (f) COD_{cr} removal at pH 7.

는 콜로이드의 입자가 증가하여, 응집을 가속화 시키는 것을 살펴볼 수 있으며, 최적 탁도는 중심점(150 NTU)보다 높게 나타나는 경향을 보였다. 이러한 콜로이드 물질의 안전성은 고체-액체 계면과 관련된 힘에 의해 표현되며, 콜로이드의 분산에 대한 안전성을 촉진하는 계면의 힘은 콜로이드와 액체 사이 계면에서의 표면 전하 존재와 콜로이드 표면층의 수화로 설명할 수 있다(Bratby, 2006).

PAC 주입량은 6가지 반응변수들의 제거율에 가장 민감하게 반응한 영향인자로 분석결과에서 관찰할 수 있었다. 또한, PAC 주입량은 비용과도 밀접한 관계가 있기 때문에 PAC 주입량 변화에 대한 관심이 더 높을 것으로 예상된다. 따라서, 높은 탁도와 pH가 유지된다면 P 제거 대비 산정된 Al 양(중심점, 0.08 ml/L) 보다 적은 양으로 반응변수들의 높은 제거효율을 기대할 수 있을 것이다.

3.2 다수의 반응변수들에 대한 최적화

Numerical method로서 Desirability function (D)을 이용하여 Total coliform, T-P, COD_{cr} 및 PSD(<10 μm) 제거율을 최대로 하는 최적점 결과는 Table 9.와 같으며, *E.coli*, PO_4-P, COD_{cr} 및 PSD(<10 μm) 제거율을 최대로 하는 최적점 결과는 Table 10와 같다. 4가지의 반응변수들을 고려하여 최적점을 산정한 결과 두 경우 유사한 결과가 나타났으며, pH와 유입탁도의 경우 중심점보다 높은 pH 9와 250 NTU를 나타냈으며, 이를 통해 PSD(<10 μm), 인, 유기물질에 대한 제거율이 지배적으로 작용했다는 것을 알 수 있었다. PAC 주입량의 경우, 중심점(0.08 ml/L) 보다는 적을 값을 나타냈지만 반응변수 각각에 대한 제거율에서 나타냈던 최적 주입량 보다는 큰 값을 나타냄을 관찰할 수 있었다.

Graphical method을 이용하여 Total coliform, *E.coli* 의 경우 제거율 90-100%을, T-P, PO_4-P의 경우 제거율 90-100%을, COD_{cr} 및 PSD(<10 μm)의 경우 제거율 50-100%을 목적으로 영향변수의 최적 범위를 보고자 했다. 해당 관심 범위에서 Total coliform, T-P, COD_{cr} 및 PSD(<10 μm) 제거율에 따른 영향변수의 최적 범위는 Fig. 2과 같으며, *E.coli*, PO_4-P, COD_{cr} 및 PSD (<10 μm) 제거율에 따른 영향변수의 최적 범위는 Fig. 3과 같다. Total coliform, T-P, COD_{cr} 및 PSD(<10 μm)의 목표 제거율에 따른 영향변수들의 최적 범위는 pH 9-10.5, 유입탁도 237-260 NTU, PAC 주입량 0.045-0.075 ml/L로 나타났으며, *E.coli*, PO_4-P, COD_{cr} 및 PSD(<10 μm)의 목표 제거율에 따른 영향변수들의 최적 범위는 pH 9-9.3, 유입탁도 185-257 NTU, PAC 주입량 0.05-0.07 ml/L의 결과를 얻을 수 있었다. pH와 유입탁도의 최적 범위는 실험계획으로 선정하였던 중심점 즉, 대상

Table 9. Optimal condition for maximizing Total coliform, T-P, COD_{cr}, and PSD(<10 μm) removal rate by the desirability function

	pH	Influent turbidity, NTU	PAC, ml/L	Total coliform removal, %	T-P removal, %	COD_{cr} removal, %	PSD (<10 μm) removal, %	Desirability, D
Value	9	250	0.076	99.535	96.670	87.015	76.993	-
Desired result, d_i	-	-	-	0.977	1	1	0.917	0.973

Table 10. Optimal condition for maximizing *E.coli*, PO_4-P COD_{cr}, and PSD(<10 μm) removal rate by the desirability function

	pH	Influent turbidity, NTU	PAC, ml/L	*E.coli* removal, %	PO_4-P removal, %	COD_{cr} removal, %	PSD (<10 μm) removal, %	Desirability, D
Value	9	250	0.070	99.954	90.893	87.500	83.699	-
Desired result, d_i	-	-	-	1	0.948	1	0.954	0.975

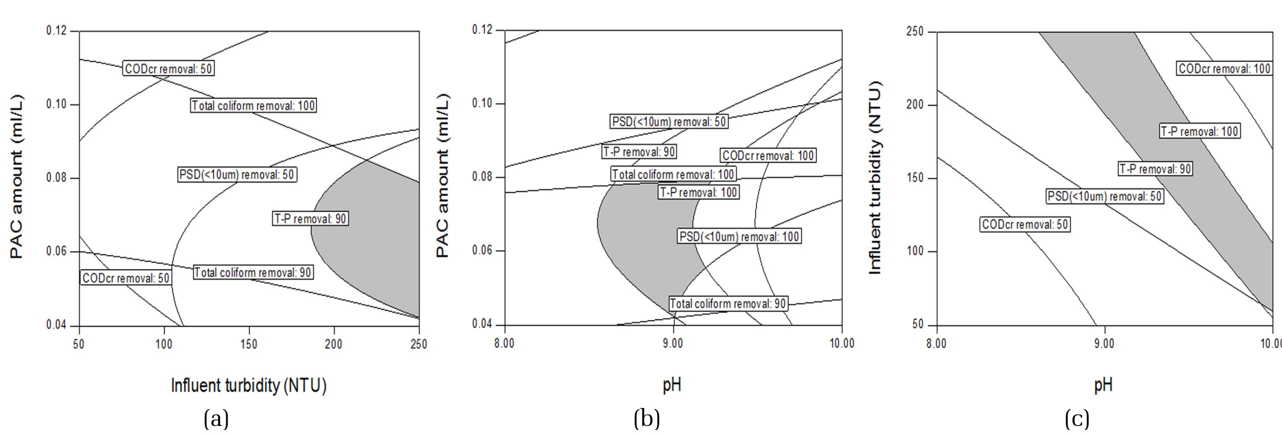
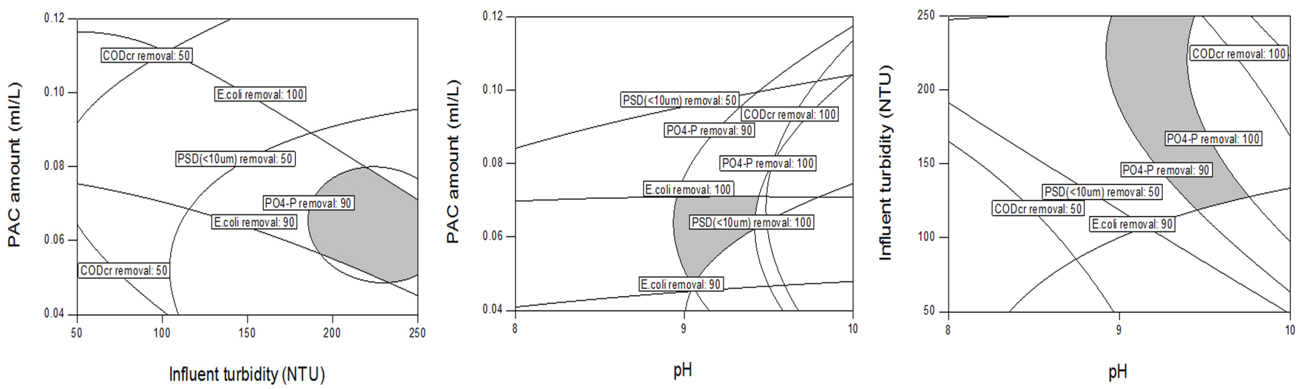


Fig. 2. Design-expert plot; overlay plot for Total coliform, T-P, COD_{cr}, and PSD(<10 μm) removal at (a) pH 9.00, (b) Influent turbidity 250.00 NTU, and (c) PAC amount 0.076 ml/L.



(a) (b) (c)

Fig. 3. Design-expert plot; overlay plot for *E.coli*, PO_4-P COD_{cr}, and PSD(<10 μm) removal at (a) pH 9.00, (b) Influent turbidity 250.00 NTU, and (c) PAC amount 0.070 ml/L.

샘플의 평균값보다 높은 값을 나타내는 반면에 PAC 주입량은 대상 샘플의 평균값보다 적은 결과를 나타내었다. 이는 유입탁도가 높을 시, pH를 조정함으로써 PAC 주입량을 최대로 절감할 수 있음을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 일반 하수를 대상으로 응집제로서 광범위하게 사용되는 PAC의 최적 주입량을 산정하고자 하였다. 하수의 수질항목으로서 병원균, 입자성물질, 무기물질, 유기물질을 보고자, Total coliform, *E.coli*, PSD(<10 μm), T-P, PO_4-P, COD_{cr} 제거율을 최대로 하는 pH, 유입탁도, PAC 주입량을 반응표면분석법-중심합성계획을 통하여 도출하였다.

1) Total coliform/ *E.coli*의 경우, pH 7.275 / 6.383, 유입탁도 103.340 / 202.179 NTU에서 최대 제거율 99.970 /99.992%일 때, PAC 주입량이 0.094 /0.073 ml/L와 같이 관찰 되었으며, 이는 다른 수질항목 보다 높은 제거율을 보였지만, 요구되는 PAC 양 역시 높은 값을 나타내었다. PSD(<10 μm)의 경우, pH 8.898, 유입탁도 237.077 NTU에서 최대 제거율 98.688%일 때, PAC 0.049 ml/L로 나타났으며, 높은 pH와 유입탁도에서 적은 PAC양으로 높은 제거 효과를 보여주었다. T-P/ PO_4-P의 경우, pH 8.974 / 9.000, 유입탁도 249.880 / 226.669 NTU에서 제거율 97.315 / 91.872 %일 때, PAC 0.065 / 0.064 ml/L가 요구되었으며, 이 역시 PSD(<10 μm)와 유사하게 높은 pH 및 유입탁도에서 적은 PAC 양으로 높은 제거 효과를 보여주었다. 반면, COD_{cr}의 경우, pH 8.993, 유입탁도 244.952 NTU에서 최대의 제거율 85.359%일 때, PAC 값이 0.058 ml/L와 같이 나타나, 영향인자의 수준은 입자성물질 및 무기성물질과 유사하게 나타났지만 제거율을 다른 수질항목에 비하여 적은 경향을 보였다.

2) 여러 개의 반응변수를 고려한 영향변수의 최적점 및 최적범위를 보고자, 반응변수를 Total coliform / PSD(<10 μm) / T-P / COD_{cr} 및 E.coli/ PSD(<10 μm) / PO_4-P / COD_{cr} 두 개의 집단으로 구분하여 분석한 결과, 두 집단이 매우 유사한 결과를 가져왔으며, 최적점의 경우 전자는 pH 9, 유입탁도 250 NTU에서 PAC 0.076 ml/L 주입시, 각 반응변수의 제거율이 99.535 / 76.993 / 96.670 / 87.015%를 나타냈으며, 후자는 pH 9, 유입탁도 250 NTU에서 PAC 0.070 ml/L 주입시, 각 반응변수의 제거율이 99.554 / 83.699 / 90.893 / 87.500 %를 나타냈다. 최적범위의 경우, Total coliform, *E.coli*의 경우 제거율 90-100%을, T-P, PO_4-P의 경우 제거율 90-100%을, CODcr 및 PSD(<10 μm)의 경우 제거율 50-100%을 목적으로 하여, 전자는 pH 9-10.5, 유입탁도 237-260 NTU, PAC 주입량 0.045-0.075 ml/L으로 후자는 pH 9-9.3, 유입탁도 185-257 NTU, PAC 주입량 0.05-0.07 ml/L의 결과를 보여주었다.

이를 통해 유입탁도가 높을 시에는 pH를 조정함으로서 P 제거 대비 산정된 Al 양의 값보다 적은 PAC 양이 요구되며, 이에 따른 비용 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 “차세대 에코이노베이션기술개발

pp. 155-163 pp. 165-169 pp. 171-182 pp. 183-192 pp. 193-202 pp. 203-209 pp. 211-222 pp. 223-231 pp. 233-241 pp. 243-249 pp. 251-259 pp. 261-269 pp. 271-281

사업 (과제번호 414-111-006)”으로 지원받은 과제입니다. 이에 감사드립니다.

References

A.G. El Samrani, B.S. Lartiges, and F. Villieras (2008) Chemical coagulation of combined sewer overflow: Heavy metal removal and treatment optimization, Water Research, 42(4-5), 951-960.

American Water Works Association (AWWA) (1969) Water Treatment Plant Design (adopted from Unit Operations and Processes in Environmental Engineering, 1996).

Clair N. Sawyer, Perry L. Mccarty, and Gene F. Parkin (1994) Chemistry for Environmental Engineering, McGraw-Hill Book co.

David H Bache and Ross Gregory (2007) Flocs in Water Treatment, IWA Publishing.

Deniz Bas and Ismail H. Boyacı (2007) Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology, Journal of Food Engineering, 78(3), 836-845.

Douglas C. Montgomery (2013) Design and Analysis of Experiments, Wiley.

Gilbert M. Masters and Wendell P. Ela (2008) Introduction to Environmental Engineering and Science, Pearson Education, Inc.

Gil-Seong Lee (2012) Effect of CO2 injection on pH control and Coagulation in Water Treatment Plant, Changwon National University.

Gregory S. Patience (2013) Experimental Methods and Instrumentation for Chemical Engineers, Elsevier.

Howard S. Peavy, Donald R. Rowe, and George Tchobanoglous (1998) Environmental Engineering, McGraw-Hill.

Jian-Ping Wang, Yong-Zhen Chen, Xue-Wu Ge, and Han-Qing Yu (2007) Optimization of coagulation–flocculation process for a paper-recycling wastewater treatment using response surface methodology, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 302(1-3), 204-210.

John Bratby (2006) Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment, IWA Publishing.

Marcos Almeida Bezerra, Ricardo Erthal Santelli, Eliane Padua Oliveira, Leonardo Silveira Villar, and Luciane Amelia Escaleira (2008) Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry, Talanta, 76(5), 965-977.

Metcalf and Eddy (2004) Wastewater engineering treatment and reuse, Mc graw hill.

Michael L. Shuler and Fikret Kargi (2002) Bioprocess Engineering Basic Concepts, Pearson Education International.

Raymond H. Myers, Douglas C. Montgomery, and Christine M. Anderson-cook (2009) Response Surface Methodology, Wiley.

Shahin Ghafari, Hamidi Abdul Azizb, Mohamed Hasnain Isa, and Ali Akbar Zinatizadehd (2009) Application of response surface methodology (RSM) to optimize coagulation–flocculation treatment of leachate using poly-aluminum chloride (PAC) and alum, Journal of Hazardous Materials, 163(2-3), 650-656.

U. S. Environmental Protction Agency (2001) The Incorporation of Water Treatment Effects on Pesticide Removal and Transformations in Food Quality Protection Act (FQPA) Drinking Water Assessments, Office of Pesticide Programs United States Environmental Protection Agency Washington, D.C. 20460.

U. S. Environmental Protection Agency (2014) Conventional Treatment, Drinking Water Treatability Database,

Available at: http://iaspub.epa.gov/tdb/pages/treatment/treatmentOverview.do