

## Utilization of response surface methodology to optimize a coagulation–flocculation process for tunnel wastewater treatment

반응표면분석법을 이용한 터널폐수 응집-혼화 공정의 주요인자 영향 분석 및 최적화

Se-Uk Jeong · Jae-Hyun Lee · Tae-Won Park · Young Mo Kim\*

정세욱 · 이재현 · 박태원 · 김영모\*

동아대학교 토목공학과

**Abstract :** A coagulation-flocculation (CF) process using aluminum sulfate as a coagulant was employed to treat highly suspended solids in tunnel wastewater. Response surface methodology (RSM) based on a Box-Behnken design was applied to evaluate the effects of three factors (coagulant dosage, pH and temperature) on total suspended solids (TSS) removal efficiency as well as to identify optimal values of those factors to maximize removal of TSS. Optimal conditions of coagulant dosage and pH for maximum TSS removal changed depending on the temperature (4 ~ 24 °C). As temperature increased, the amount of coagulant dosage and pH level decreased for maximum TSS removal efficiency during the CF process. Proper adjustment of optimal pH and coagulant dosage to accommodate temperature fluctuations can improve TSS removal performance of the CF process.

**Key words :** Tunnel wastewater, Coagulation-flocculation process, RSM, Optimization

**주제어 :** 터널폐수, 응집-혼화 공정, 반응표면분석, 최적화

### 1. 서론

도로 및 터널 공사, 택지·산업단지 개발 등과 같은 토목 건설현장의 굴착과정에서 발생하는 토사가 지표수로 유입될 경우 탁수에 의한 인근 지역 하천의 수질오염사고가 발생할 수 있다 (Lee et al., 2011). 건설현장에서 발생하는 폐수 중에서 터널공사 폐수는 터널내부에 타설되는 콘크리트, 시공에 사용되는 장비의 윤활유, 암석발파에 따른 분진 및 토사 등의 세척을 통해 발생한다. 이러한 터널폐수의 특징은 일반적으로 부유물질 농도가 높은 (1,500–3,000 mg/L) 반면 유기물 농도는 낮은 특성을 지니고 있다 (Kang et

al., 2011).

특히 폐수 내에 시멘트의 주성분인 석회, 실리카, 알루미늄, 산화철 등과 같은 성분이 단순 중력침전으로는 제거가 불가능한 10 μm 이하의 미세입자 형태로 다량으로 존재하고 있어 응집-혼화공정을 통해 이들 물질 제거가 효과적으로 이루어지도록 해야 한다 (Kang et al., 2012). 효과적인 응집-혼화공정을 위해서는 원수성상에 맞는 적절한 응집제 선택, 적정 응집제 주입량, pH, 온도, 교반강도, 교반시간 등의 인자가 중요시 되며, 이 조건들이 최적화 되었을 때 응집-혼화공정의 효율이 최대가 된다 (Wang et al., 2013). 현재 우리나라 하·폐수처리 공정에서는 대표적으로 무기 응집제  $Al_2(SO_4)_3$  (Alum : 황산알루미늄)이 운영상 편리성 및 경제성 이유로 널리 사용

\* Received 02 September 2014, revised 10 October 2014, accepted 13 October 2014.

\* Corresponding author: Tel : (051) 200-7624 E-mail : youngmo@dau.ac.kr

되고 있다 (Kang et al., 2012). 그러나 해당 원수의 특성과 주변 환경이 모두 고려되지 않은 채 응집제 주입량 또는 pH와 같은 한 요인만을 고정하여 몇 가지 수준 (Level)에 따라 수행되기 때문에 요인인자가 여러 개일 경우 반응값에 대한 최적값을 찾기란 극히 힘들다. 또한 어떤 조건들이 반응값에 어느 정도 영향을 미치는지와 이들 요인들 사이의 상호관계를 정량화시키기란 불가능하다 (Cho et al., 2007). 최근 국내 환경 분야에서는 실험 모델의 최적조건에 대한 규명 및 최적화 기법 중 회귀분석 도출하는데 반응표면분석 (RSM: Response Surface Analysis)을 적용하여 이들 프로그램을 통해 만들어지는 모형으로 설계 변수의 영향도 해석 및 처리조건의 최적화 연구를 수행하고 있다 (Cho et al., 2008; Kwon et al., 2011).

본 연구는 응집-혼화공정을 이용한 터널폐수 내 총 부유물질 (TSS: Total Suspended Solids) 제거에 영향을 미치는 인자 (응집제 주입량, pH, 온도)에 대한 통계학적 해석, 모델식 구축 및 반응조건의 최적 값을 제시하는데 목적을 두고 Box-Behnken법을 이용하여 실험을 수행하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 터널폐수 성상

본 연구에서 대상으로 한 터널폐수는 B시 Y구 전력구 공사현장에서 취수하여 조사하였다. 현장폐수 성상은 굴착 깊이에 따른 암반의 종류와 부유물질 침전차이로 인해 부유물질 농도 (264-1,084 mg/L)와 탁도 (222-1,057 NTU) 범위가 크게 발생되었다 (Lee et al., 2013). 특히 공사현장이 부산 앞바다와 인접한 관계로 지하수 내에 해수가 유입되어 약 15%의 염분이 검출되는 것이 특징이었다 (Kang et al., 2012).

현장의 부득이한 사정으로 지속적인 원수 취수가 어려워 응집-혼화 실험은 합성폐수를 제조하여 진행하였다. 합성폐수는 현장 인근 바닷물

과 지하수를 현장 실험수 염분 농도와 유사하게 되도록 혼합한 후 굴착현장에서 채취한 슬러지 및 부유물질을 주입하여 Table 1과 같은 성상으로 조성하였다.

Table 1. Characteristics of synthetic tunnel wastewater

Parameters	Value(average)
TSS(mg/L)	1,110 ± 70.71
Turbidity(NTU)	798 ± 11.31
pH	8.00 ± 0.13
BOD <sub>5</sub> (mg/L)	0.6 ± 0.01
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	0.4 ± 0.09
TN(mg/L)	1.2 ± 0.23
TP(mg/L)	0.5 ± 0.21
Mn(mg/L)	9.7 ± 1.19
Al(mg/L)	0.3 ± 0.08
Fe(T)(mg/L)	6.8 ± 0.83
Salinity(‰)	15 ± 0.5

### 2.2 Jar-test 실험장치 및 방법

Jar-test 수행 전 원수의 온도는 인큐베이터를 이용하여 특정 온도로 고정하였으며, pH는 0.1 M로 제조한 HCl과 NaOH를 이용하여 조절하였다.

Jar-test는 0.5 L 용량의 합성폐수를 1 L 비커에 담고 8% 황산알루미늄 (alum) 용액을 주입하여 급속교반 (150 rpm-1분), 완속교반 (20 rpm-5분) 순으로 진행한 후 10분간 침전을 시킨 뒤 상징액 50 ml를 채취하여 수질분석을 실시하였다 (Jar-tester, Model J-JT6S).

### 2.3 실험분석

화학적 산소요구량 (COD<sub>Mn</sub>), 총질소 (TN; Total Nitrogen), 총인 (TP; Total Phosphorus), 알루미늄 (Al), 망간 (Mn), 철 (Fe(Total)) 농도는 HUMAS社의 HS-2300 Plus를 이용하여 분석하였다. 총부유물질 (TSS: Total Suspended Solids)과 생화학적 산소요구량 (BOD<sub>5</sub>)은 Standard Methods에 준하여 분석하였고

(Eaton et al, 2005), 탁도는 Hach社의 2100A Turbidity meter, pH와 염도는 TOA-DKK社의 To-A pH meter (HM-21P)와 ATAGO社의 PR-100 SA를 사용하여 각각 측정하였다.

### 2.4 실험계획과 통계적 분석방법

통계적으로 인자간 상호작용을 고려하면서 응집효율과 응집제 주입량, pH, 온도가 미치는 영향을 확인하여 최적의 인자조건을 결정하기 위해 RSM을 실시하였다. 인자는 응집제 주입량 ( $X_1$ ), pH( $X_2$ ), 온도( $X_3$ )로 정하여 실험범위를 Table 2와 같이 설정 후 +1, 0, -1과 같이 3단계 부호화하였다. 실험계획은 Table 3과 같이 Box-Behnken법에 따라 17개 조건을 설정하여 jar-test를 진행하였으며 실험결과는 Design-expert 7을 이용하여 분석하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 RSM 모델구축 및 통계 분석

세가지 변수 (응집제 (alum) 주입량, pH, 온도)와 그의 세가지 레벨을 가지는 17-run Box-Behnken 실험을 통하여 터널폐수 내 고형물질 (TSS) 제거 효율에 대해 식 (1)과 같은 2차식 형태의 모델을 얻을 수 있었다.

(1)

$$Y = 92.85 + 2.21X_1 + 1.70X_2 + 0.75X_3 + 0.38X_1X_2 - 0.30X_1X_3 - 0.60X_2X_3 - 1.31X_1^2 - 2.43X_2^2 - 1.30X_3^2$$

RSM에 의해 도출된 모델의 ANOVA (Analysis of variance) 결과는 Table 4와 같았으며, 나타난 수치는 각각의 요인이 측정치에 어떻게 영향을 주는가를 의미한다. p value는 각 계수의 중요성을 확인하는 도구로 사용되고 각 독립 변수 간의 상호 작용 강도를 표시하는데 사용된다 (Yoon et al., 2012). 본 2차 회귀 모델의 p value는 0.0029로 낮은 값을 가졌는데 이는 낮은 확률의 F test 값을 의미하므로 본 모델이 중

Table 2. Levels of independent variables

Variables	Symbol	Coded variable levels		
		-1	0	+1
Coagulant dosage (mg/L)	$X_1$	1.46	7.3	13.13
pH	$X_2$	5	7	9
Temperature (°C)	$X_3$	4	14	24

Table 3. Box-Behnken experimental design and results of TSS removal efficiency

Run	Independent variables			Dependent variable
	Coagulant dosage ( $X_1$ , mg/L)	pH ( $X_2$ )	Temperature ( $X_3$ , °C)	TSS removal (Y, %)
1	13.13	9	4	91.47
2	13.13	5	24	88.1
3	1.46	9	24	86.75
4	7.3	7	24	91.47
5	13.13	9	24	92.37
6	1.46	7	14	87.87
7	7.3	9	14	91.92
8	1.46	9	4	87.65
9	1.46	5	24	86.98
10	13.13	7	14	94.16
11	13.13	5	4	87.87
12	7.3	7	14	94.61
13	7.3	7	14	93.26
14	7.3	7	14	92.81
15	7.3	5	14	87.87
16	1.46	5	4	82.48
17	7.3	7	4	90.57

요하다는 것을 증명할 수 있다. 모델 F value 값이 10.224라는 의미는 모델이 중요하다는 것을 암시하고 있으며, 모델 F value의 noise가 발생할 확률이 0.29%로 낮다는 것을 의미한다 (Yoon et al., 2012). 적합성 결여검증 (Lack of Fit)도 0.326 ( $p > 0.05$ )로 만족하였으며, 회귀모델의 유효성과 정확성을 판단하는데 기여하는 결정계수 ( $R^2$ ) 값은 0.93으로 종속변수의 93% 확률로 설명이 가능한 높은 상관관계를 보였다. Adeq. Precision은 signal에서 noise까지의 비율을 측정할 수 있으며 보통 4이상의

Table 4. ANOVA results for the fitted model

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	p value(prob. >F)
Model	158.16	9	17.57	10.224	0.0029
$X_1$	49.05	1	49.05	28.539	0.0011
$X_2$	28.74	1	28.74	16.722	0.0046
$X_3$	3.27	1	3.27	1.905	0.2100
$X_1X_2$	1.14	1	1.14	0.664	0.4421
$X_1X_3$	0.71	1	0.71	0.412	0.5415
$X_2X_3$	2.90	1	2.90	1.690	0.2348
$X_1^2$	4.59	1	4.59	2.669	0.1463
$X_2^2$	15.80	1	15.80	9.191	0.0191
$X_3^2$	4.55	1	4.55	2.645	0.1479
Residual	12.03	7	1.72		
Lack of Fit	10.28	5	2.06	2.342	0.326
Pure Error	1.76	2	0.88		
Cor Total	170.19	16			
Std. Dev.	1.31		R-Squared		0.93
Mean	89.89		Adj R-Squared		0.84
C.V.%	1.46		Pred R-Squared		0.17
PRESS	141.65		Adeq Precision		10.89

긴 범위가 바람직하다 (Zhu et al., 2010). 본 ANOVA에 제시된 Adeq. Precision은 10.89로 디자인 공간을 탐색하는데 사용할 수 있는 것으로 판단되어졌다. RSM을 통해 얻어진 모델식의 오차 항에 대한 잔차분석을 통하여 모델의 적합 정도를 판단하였다 (Fig. 1). 제시된 모델은 정규 확률도에서 모든 데이터들이 잔차 -2와 2 사이에서 직선적으로 분포됨에 따라 정규분포를 나타내었고 (Fig. 1a), 잔차-적합치의 경우 잔차분포가 대부분 -1과 1 사이에 들어오면서 0에 근접하여 분포된 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 1b). 히스토그램 데이터가 특정 방향으로 치우치는지 여부를 살펴본 결과 정형적인 정규분포를 보여주고 있었으며 (Fig. 1c), 잔차-데이터 순서의 경우 관측치 6번과 12번을 제외한 대부분 관측치에서 잔차분포 -1과 1 사이에 데이터들이 분포되고 있는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 1d).

따라서 오차 항에 대한 4가지 가정 정규성 (normality), 등분산성 (equal variation), 독립성 (independence), 선형성 (linearity) 등을

모두 만족하여 모형에 문제가 없는 것으로 판단되었다 (Cho et al., 2007).

해당 항별 (선형, 순수이차, 교호항) 인자에 대한 유의성 및 효과를 확인한 결과 (Table 4), 1차 선형효과 (linear effect)를 나타내는 요인효과에서 alum 주입량 ( $X_1$ )과 pH ( $X_2$ )는 p value가 0.01 이하로서 통계적으로 유의하였으나, 온도 ( $X_3$ )는 유의하지 않았다. 특히 본 선형조건에서는 응집제 (alum) 주입량이 TSS 제거효율 (Y)에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 순수이차 (quadratic)항은 pH ( $X_2$ )만 높은 유의성이 나타났으며 다른 인자들은 순수이차 항에 대해서 큰 영향을 주지 못하였다.

실험인자의 수준변경에 따른 TSS 제거율에 대한 이들의 영향을 선형 및 비선형 효과의 차이를 계산하여 판단한 결과 (Fig. 2), 응집제  $Al_2(SO_4)_3$ 는 초기 수준에서 주입량이 증가할수록 TSS 제거율이 점차 증가하다가 10.21 mg/L 이상 주입량부터는 제거율 93%에서 더 이상 증가되지 않았다 (Fig. 2a). 따라서  $Al_2(SO_4)_3$  주

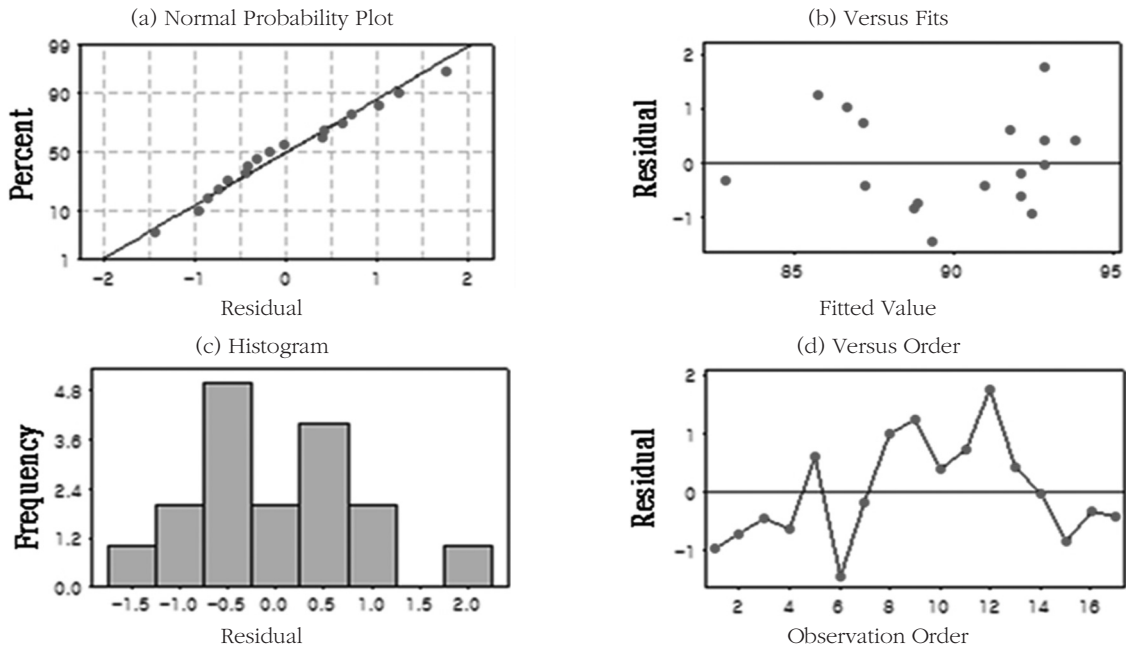


Fig. 1. Residual plot of model for error values : (a) normal probability plot of the residuals; (b) residuals and predicted response plot; (c) histogram of the residuals; (d) scatter plot of the residuals and predicted.

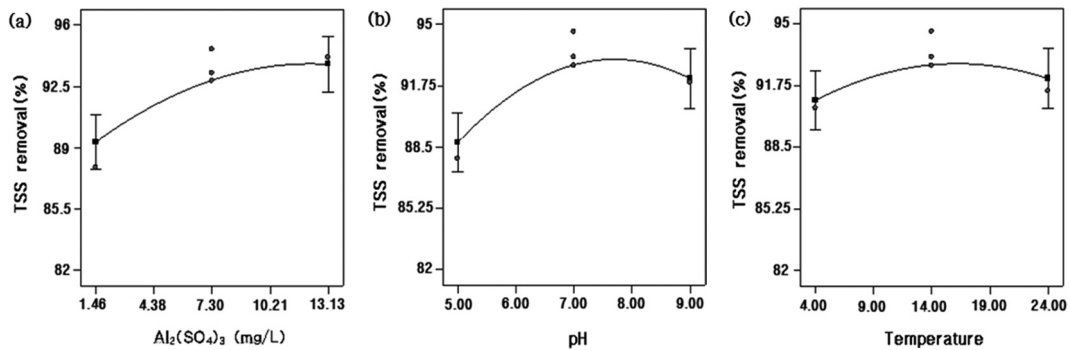


Fig. 2. Main effect plot of (a)  $Al_2(SO_4)_3$ ; (b) pH; (c) temperature for TSS removal.

입량이 약 10 mg/L 정도일 때 충분히 터널폐수 내의 고형입자들을 플록형태로 제거할 수 있다고 판단되어졌다. pH 인자의 경우 이전 연구 결과처럼 중성 조건 (pH 7.5)일 때 alum에 의한 응집-혼화 공정의 TSS 제거율이 92.5%로 가장 높게 나타났다 (Guida, et al., 2007) (Fig. 2b). pH가 산성이나 알칼리성 수준으로 이동할 경우 TSS 제거율이 감소되는 것을 확인할 수 있었는데 산성 조건에서의 변화 폭이 더 크게 나타났다. 알루미늄 응집제는 물에 용해될 때 pH가 감소하면 할수록  $Al^{3+}$  형태의 이온농도로 존

재하게 된다 (Kang et al., 2012). 따라서 원수 내 pH가 낮으면 어떤 입자나 이물질의 표면에 Al 화학종이 흡착되기보다는 단순히 물속에 이온으로 존재하는 것이 보다 안정적이기 때문에 응집 효과가 떨어지게 된다 (Kang et al., 2012). 온도 인자의 경우 14°C 부근에서 TSS 제거율이 가장 높았으나, 온도변화 (4°C, 24°C)에 따른 TSS 제거율 감소는 alum 응집제 주입량 및 pH 인자 수준변화에 따른 결과와 비교하였을 때 매우 미미하였다 (Fig. 2c).

### 3.2 RSM을 이용한 계절변화에 따른 응집-혼화 공정의 최적화

계절 (4℃:겨울철; 14℃:봄·가을철; 24℃:여름철)변화에 따라 주요인자인 alum 주입량과 pH가 터널패수의 응집-혼화공정에 의한 TSS 제거율에 미치는 영향을 3차원 반응 표면과 2차원 등고선 평면도를 통해 살펴보았다 (Fig. 3). 계절별 응집-혼화 공정에 의한 TSS 제거효율 변화를 2차원 등고선 평면도로 비교해보았을 때

겨울철 (Fig. 3a)에 TSS 제거효율이 약 80% 초반을 의미하는 파란색 분포가 pH 6.0 이하와 alum 4.38 mg/L 이하 범위에 나타났고, 90% 이상의 TSS 제거효율을 의미하는 노란-빨간색 분포는 상대적으로 봄, 여름, 가을철 조건에서 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 수온이 상승하게 되면 수화 반응이 촉진되며 입자들의 열운동이 증가하여 입자의 충돌 빈도수가 증가하기 때문에 응집 효과가 증대된 것으로 판단된다 (Kang et al., 2011).

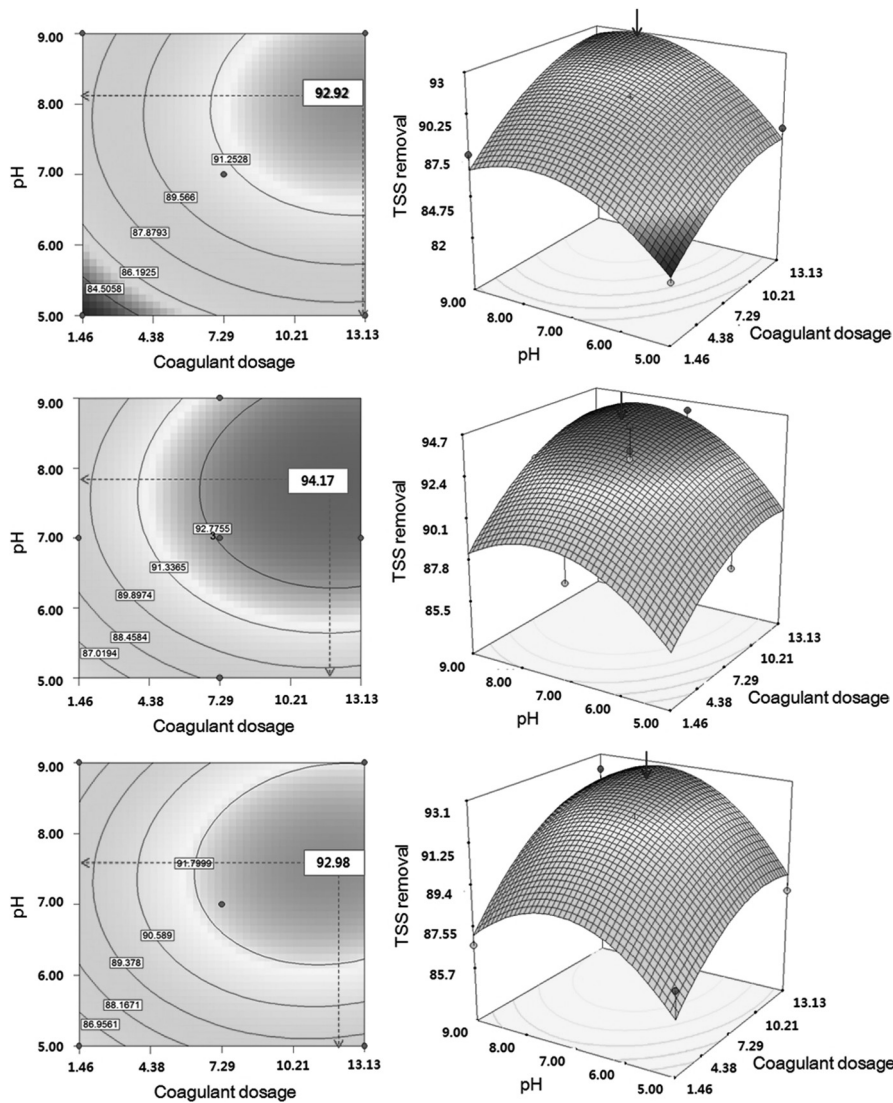


Fig. 3. Two-dimensional contour plots and tree dimensional response plots for TSS removal(%): (a) Temperature 4℃; (b) Temperature 14℃; (c) Temperature 24℃.

RSM 분석결과로부터 각 해당 계절별 최적 TSS 제거 조건을 찾아본 결과 겨울철 (주입량 13.12 mg/L; pH :8.13) (Fig. 3a), 봄·가을철 (주입량 12.67 mg/L; pH 7.82) (Fig. 3b), 여름철 (주입량 12.04 mg/L; pH 7.63) (Fig. 3c)로 각기 다르게 나타나, 온도변화에 따른 응집제 주입량과 pH 인자들 간의 상호영향성을 확인할 수 있었다. 흥미롭게도 온도 (4℃→24℃)가 증가할수록 TSS 제거율에 대한 최적 pH조건 (8.13→7.63)과  $Al_2(SO_4)_3$  농도 (13.12 mg/L→12.04 mg/L)는 함께 감소하였다. 이는 온도변화에 따라 각기 다르게 분포하는 alum 응집제의 용해도와 관련 있는 것으로 판단되었다. 해수 내 pH 변화에 따른 수산화알루미늄 ( $Al(OH)_3$ )의 용해도 곡선을 살펴보면 각기 다른 수온 (10℃, 35℃)에서의 최소 용해도에 해당하는 pH 값은 6.8 (at 10℃)과 6.0 (at 35℃)으로 저온에서 보다 높은 pH 값을 얻는다 (Edzwald and Haarhoff, 2011). 따라서 계절이 여름철로 변할 때 (수온이 상승할 때) alum 응집제와 수산화나트륨 같은 pH 조절제의 주입을 감소시키는 것이 응집-혼화 공정의 고형물질 제거 효율 증대에 도움이 될 것으로 판단되었다.

한편 같은 범위의 pH 환경조건에서 응집-혼화공정으로부터 동일한 TSS 제거 효율을 얻기 위해서는 온도가 낮을 때 (겨울철)가 온도가 높을 때 (여름철)보다 alum 응집제 투여량이 더 많이 요구되었다. 특히 pH조건이 낮아질수록 겨울철 경우 alum 주입 요구량이 증가하였으며, 여름철에는 겨울철과 반대로 alum 주입 요구량이 감소되었다. 또한 TSS 제거 효율을 동일하게 얻기 위한 겨울철과 여름철의 alum 주입량 차이는 pH가 낮아질수록 더욱 두드러지게 나타났다 (pH 8.0에서 TSS 제거율 약 91% 달성을 위해 여름철, 겨울철의 alum 주입량이 약 7 mg/L 으로 유사하게 나왔으나, pH가 6.0으로 감소되면서 TSS 제거율 약 89% 달성을 위해 겨울철 주입량은 약 10 mg/L 이상으로 증가되었

고 여름철은 약 4.3 mg/L으로 감소되어 두 계절간의 주입량 차이가 상당히 커진 것을 볼 수 있었다.). 이는 해수 내 alum 응집제의 최소 용해도 값이 pH가 낮아질수록 저온에서 고온보다 높아지기 때문인 것으로 보였다 (Edzwald and Haarhoff, 2011). 본 RSM 결과에서 볼 수 있듯이 응집-혼화공정을 이용한 최적의 TSS 제거 효율을 위해 주요 공정인자는 계절변화에 따라 각기 다른 적정한 조건으로 운영되어야 할 것으로 평가되었다.

#### 4. 결론

본 연구는 RSM을 이용하여 응집-혼화 공정으로부터 터널폐수 내 TSS제거에 대한 주요 환경인자들의 ( $Al_2(SO_4)_3$  농도, pH, 온도) 영향성을 분석하고 최적 조건을 도출하고자 하였다. 추정된 모델식은 유의확률이  $p < 0.0001$ 으로서 높은 유의수준을 보였고, 반응모델의 오차항에 대한 잔차분석 결과는 정규성, 등분산성, 독립성 및 선형성을 모두 만족하여 모형에 문제가 없는 것으로 나타났다. 반응모델의 인자들에 대한 주효과에 대한 유의성 검정결과  $Al_2(SO_4)_3$  주입량과 pH가 선형조건에서 폐수 내 TSS 제거 효율에 가장 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다. 계절이 여름철로 변할 때 (수온이 상승할 때) TSS 제거율에 대한 최적  $Al_2(SO_4)_3$  주입량과 pH 값은 감소되는 것으로 예측되었다. 따라서 여름철에는 주입을 다소 감소시키고 겨울철에는 증가시키는 즉, 계절변화에 따른  $Al_2(SO_4)_3$  응집제와 NaOH 응집보조제의 적절한 조절을 통한 응집-혼화공정의 TSS 제거효율 관리가 요구되는 것으로 판단되었다.

#### 사사

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

## References

- Cho, I.H., Lee, N.H., Chang, S.W., An, S.W., Yoon, Y.H., Zoh, K.D. (2007) Analysis of removal characteristics and optimization of livestock wastewater using a factorial design in the coagulation process, *J. Korean Soc. Water Qual.*, 23, pp.111-121.
- Cho, I.H., Chang, S.W., Lee, S.J. (2008) Optimization and development of prediction model on the removal condition of livestock wastewater using a response surface method in the photo-fenton oxidation process, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 30, pp.642-652.
- Eaton, A., Clesceri, L., Greenberg, A. (2005) Standard methods for the examination of water and wastewater, 21ST ed; APHA, AWWA, WEF. Washington, DC.
- Edzwald, J.K., and Haarhoff, J. (2011) Seawater pretreatment for reverse osmosis: Chemistry, contaminants, and coagulation, *Water Res.*, 45, pp.5428-5440.
- Guida, M., Mattei, M., Rocca, C.D., Melluso, G., Meriç, S. (2007) Optimization of alum-coagulation/flocculation for COD and TSS removal from five municipal wastewater, *Desalination*, 211, pp.113-127.
- Kang, Y.T., Song, K.K., Han, S.Y., Sohn, J.H., Kim, Y.E., Bae, J.H. (2011) A study on the optimization of filtration process for tunneling wastewater treatment, *J. Korean Soc. Water Sci. Technol.*, 19, pp.3-9.
- Kang, Y.T., Song, K.K., Sohn, J.H., Kim, N.K. (2012) The determination of optimum coagulant for tunneling wastewater treatment, *J. Korean Soc. Water Sci. Technol.*, 20, pp.3-10.
- Kwon, D., Jung, C., Lee, C.G., Lee, J. (2011) Flocculation characteristics of microalgae through combined flocculants, *Korean Soc. Biotechnol. Bioeng. J.*, 26, pp.443-452.
- Lee, J.H., Yang, S.H., Choi, C.S., Bang, K.W. (2011) Analysis of Coagulation-Flocculation Conditions for the Removal of Tunnel Excavation Wastewater, *J. Korean Soc. Urban Environ.*, 11, pp.89-95.
- Lee, J.H., Jeong, S.U., Kim, Y.M. (2013) Feasibility of a two step microfiltration and reverse osmosis membrane system for reuse of tunnel wastewater, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 27, pp.779-785.
- Lee, Y.J., Lim, J.L., Lee, K.H., H, T.K. (2012) Optimization of coagulation conditions for the drinking water treatment using a response surface method, *Korean Soc. Water Sci. Technol.*, 20, pp.81-89.
- Wang, Y., Chen, K., Mo, L., Li J., Xu, J. (2013) Optimaization of coagulation-flocculation process for papermaking-reconstituted tobacco slice wastewater tretment using response surface methodology, *J. Ind. Eng. Chem.*, 20, pp.391-396.
- Yoon, C.H., Bok H.S., Choi, D.K., Row, K.H. (2012) Optimization condition of Astaxanthin extract from shrimp waste using response surface methodology, *Korean Chem. Eng. Res.*, 50, pp.545-550.
- Zhu, T., Heo, H.J., Row, K.H. (2010) Optimization of crude polysaccharides extraction from *Hizikia Fusiformis* using response surface methodology, *Carboyd. Polym.*, 82, pp.106-110.