

총인 처리를 위한 응집제 주입량 최적제어 시스템의 적용성 연구 A Feasibility Study on Optimization System of Coagulant Dosing for Total Phosphorous Treatment

서정미 · 조영범 · 최예묵* · 박철휘†

Jeong-Mi Seo · Young-Beom Cho · Ye-Mook Choi* · Chul-Hwi Park†

서울시립대학교 환경공학과 · *모리트

Department of Environmental Engineering, University of Seoul · *Molit

(2014년 6월 9일 접수, 2014년 7월 21일 수정, 2014년 7월 29일 채택)

Abstract : In this study, we developed an M-COS (molit coagulant-dosing optimization system), which enables to apply the optimum coagulant dose determined in real time, in order to satisfy the total phosphorus (TP) regulation (0.5 mg/L), and then tested its field applicability. Field tests were conducted at three different periods in 2014 in a pilot plant where the M-COS was installed. Coagulant reduction rate by the M-COS was 10.4%, 15.3%, and 9.0% for each period (average 11.6%), when comparing with a control where coagulants were applied at a constant rate. Total cost for the M-COS or control was estimated by summing up the coagulant cost and sludge treatment cost, and then the resulting cost increase was predicted. Cost reduction rate by the M-COS was 13.8%, 20.0%, and 11.4% for each period (average 15.0%). This study indicates that the M-COS can be an alternative to a conventional system for TP treatment, with a better cost efficiency.

Key Words : M-COS (Molite Coagulant-dosing Optimization System), Total Phosphorous, Cost

요약 : 본 연구에서는 강화된 TP 처리를 위해, 처리해야 할 인 농도에 대한 응집제 최적 주입 비율을 보다 손쉽게 결정하고 조절할 수 있는 실시간 자동제어가 가능한 응집제 주입량 최적제어 시스템(M-COS)을 구성하였으며, 실제 하수처리장 현장 실험을 통하여 유량과 수질 변동에 따른 현장 적용성을 검토하였다. 현장적용은 1월말(Period 1), 4월초(Period 2), 5월 중순(Period 3)의 각 시기에 M-COS가 설치된 pilot plant에서 운전·평가되었다. 그 결과, 수질에 따른 능동적 대처가 가능한 M-COS에 비해 대조군의 경우 과량으로 주입된 경우가 많이 발생하여, M-COS에 의한 응집제 절감률은 각 기간 동안 10.4%, 15.3%, 9.0%로 평균 11.6%가 절감되는 것으로 평가되었다. 또한, 응집제 주입에 따른 구입비, 슬러지 발생량, 슬러지 처리비용, 처리용량(1,000,000 m³/d)을 반영한 처리비용 증가액을 예측하였다. 예측된 M-COS 실험군의 처리비용 증가액은 대조군 대비 각각 13.8%, 20.0%, 11.4%로 평균 15.0%의 비용절감 효과가 나타나, 현장적용이 가능함을 판단할 수 있었다.

주제어 : 응집제 주입량 최적제어 시스템(M-COS), 총인, 비용

1. 서론

총인(total phosphorous, TP)은 하천 수계 내에서 조류 성장의 주요 원인물질로, 환경관련법 상 수질환경기준, 배출기준에 그 농도가 규정되어 있으며, 2011년부터 2015년까지 추진되는 제2단계 수질오염총량관리의 대상물질로서, 생물학적산소요구량(biochemical oxygen demand, BOD)과 함께 선정된 상태이다. 이에 정부는 유역중심의 수질관리 방법으로 점오염원에 대한 기준을 2012년부터 TP 수질 기준 2 mg/L에서 수역에 따라 0.2~0.5 mg/L로 대폭 강화하였다. 강화된 방류수질 기준을 충족키 위해서는 효율적인 인 제거 처리시설이 요구되고 있다.^{1,2)}

기존 국내 공공하수처리장에서 고도처리로 적용되고 있는 BNR (biological nutrient removal) 공정은, (i) 질소·인 동시 제거를 위한 미생물 제어조건을 최적화하기 어려우며, (ii) 국내의 하수 배제 방식이 대부분 합류식으로 되어 있어, 질소·인에 비해 유기물 농도는 상대적으로 낮아 내부 탄소원의 부족을 야기시키므로, 강화되고 있는 TP 방류수 수질

기준을 충족시키기에 많은 어려움을 가지고 있다. 이렇듯 조류성장의 제한인자로 작용하고 있는 TP의 요구수준은 생물학적 처리만으로는 달성하는데 한계가 있어 생물학적 처리와 함께 물리화학적 처리의 병행이 요구된다.³⁾

물리화학적 처리는 비교적 공정이 간단하고 시설의 유지관리가 간편하며 처리효율이 높다는 장점을 지니나, 화학약품 비용과 발생된 슬러지 처분비용 등이 높다는 단점을 갖고 있다.⁴⁾ 일반적으로 응집공정에서 응집제 투입량 결정은 일종의 모형실험장치라 할 수 있는 Jar-test에 의해 수동으로 행해지고 있어 현장운영 인력이 부족한 상황에서는 수질변화에 능동적으로 대처하기 어려울 뿐 아니라 실험에 소요되는 시간이 길어 상시 변동하고 있는 원수수질에 따라서 최적의 요구량을 주입하는 것이 근본적으로 어려운 실정이다.⁵⁾ 화학적 처리에 따른 설비는 하수처리시설의 고도처리설비에 예비용으로 설치된 간이 약품투입 설비를 이용하거나 약품투입설비만 추가·보완하는 방식으로 이루어진다. 하지만 현재 전국하수처리장에서 사용되고 있는 약품투입설비들은 변화하는 수질과 유량을 전혀 고려하지 않

† Corresponding author E-mail: chpark@uos.ac.kr Tel: 02-6490-2863 Fax: 02-6490-2859

고 약품의 과소투입은 피하고 과량주입이 그 대응책이 되고 있다.⁶⁾ 응집제 과량 주입은 응집·응결 및 침전공정의 플록 불량 원인으로 작용하며, 약품비 증가, 활성슬러지 반송에 의한 미생물 활성도 저하, 최종 슬러지 처리시 흡착으로 인한 기기수명 단축 등 2차 처리비용의 증가를 유발할 수 있다. 따라서, 적정량의 응집제 주입은, 인 처리를 위한 응집제 비용 및 발생슬러지 처리비용의 절감을 가져올 수 있다. 그러나, 유입수의 유량변동과 수질변화에 대응한 적절한 응집제 주입의 실시간 자동제어는 여전히 해결해야 할 과제로 남아 있었다. 이에, 전하분석시스템(charge analyzing system, CAS),⁶⁻⁹⁾ 유동전류계(streaming current detector, SCD),^{10,11)} PDA (photometric dispersion analyzer)¹²⁾ 등의 장비를 적용하여 응집제를 최적으로 주입하는 여러 방법들이 시도되어 왔다. 그 중 나 등⁸⁾은 CAS를 이용한 자동제어시스템(charge analyzing system - titration, CAS-T)을 실비·운영하여, 정수처리시 침전공정 처리효율 향상 및 평균 10%의 응집제 절감률을 제시하였으며, 김 등⁹⁾은 CAST (charge analyzer system titrator)를 하수에 적용하여 5~10%의 총인 수질 개선과 6.5~23.5%의 응집제 절감 사례를 제시하여 온라인 CAST시스템이 현장적용 가능성을 시사하였다.

따라서, 본 연구에서는 총인 처리를 위한 응집제 최적 주입 자동제어를 위하여, 온라인 CAST 시스템 개념을 도입하고, 처리 인 농도에 대한 응집제 최적 주입율을 보다 손쉽게 결정 및 조절할 수 있는 실시간 자동제어가 가능한 운전자 친화적인 시스템을 구성하고자 하였다. 또한 구성된 응집제 주입량 최적제어 시스템(molit coagulant-dosing optimization system, 이하 M-COS)을 실제 하수처리장 현장실험을 통하여 유량과 수질변화에 따른 현장 적용성을 검토하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. Jar-test

TP제어를 목적으로 하는 M-COS의 기초참고자료로, 생물반응조 유출수의 응집제 투입에 따른 최적효율을 파악하고자 Jar-test를 실시하였으며, 처리대상수의 Jar-test 전후 수질 특성도 함께 분석하였다.

서울시에 위치한 J하수처리장(J-sewage treatment plant, J-STP)의 생물반응조 유출수를 채수하여 Jar-tester (C-JT-1, Changshin Science, Seoul, Korea)의 2 L Jar에 각각 분취하고, 응집제를 0.0, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 mg/L로 각각 주입하였으며, 120 rpm에서 1분간 급속교반하고, 40 rpm에서 15분간 완속교반 한 후 30분간 침전시켰다. 침전 후 상등액을 채취하여 분석하였으며, 분석된 수질항목은 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 부유성 고형물질(suspended solid, SS), 총질소(total nitrogen, TN), 총인(total phosphorous, TP), 인산염인(phosphate phosphorous, PO₄-P), pH, 알칼리도(alkalinity), 온도 등으로 수질오염공정시험법과 standard method에 준하여 측정하였다.^{13,14)} 사용된 응집

제는 액상 PAC (Polyaluminium Chloride, [Al₂(OH)_nCl_{6-n}]_m, SamPAC 1500, Samgoo Chemical Industry, Ansan, Korea)로 염기성 알루미늄 중합체로서 산화알루미늄(Al₂O₃) 함량은 10%이며 비중은 1.2 이상이다.

2.2. M-COS의 구성

응집제 주입량 최적제어시스템(M-COS)은 (i) 유동전류계(streaming current detector, SCD)를 포함하고 있는 ‘자동전하적정장치(automatic charge titration system, A-CTS)’, (ii) 생물반응조 유출수와 응집·침전 처리수 각각의 인 농도 모니터링을 위한 ‘PO₄-P 자동분석기(Robochem PO₄, Centennial Technology, Korea)’와 ‘TP 자동분석기(Robochem TP, Centennial Technology, Korea)’, (iii) 자동제어시스템이 내장된 ‘PLC (programmable logic controller)’와 ‘HMI (human-machine interface)’에 의한 자동제어 화면으로 구성하였다.

시스템 자료들을 토대로 하여 전방제어(forward control)와 피드백제어(feedback control)를 병행하는 방식으로 진행하였으며, 시료채취 및 측정·분석, 제어·진단, 데이터베이스까지 시료당 측정시간을 약 15분 정도로 구성하였다. 구체적인 로직 다이어그램(Logic Diagram)은 김 등⁹⁾이 제시한 순서도를 본 연구에 맞게 변형하여 나타내었다(Fig. 1).

2.2.1. 자동전하적정장치(A-CTS)

본 연구에 사용된 A-CTS는 응집제 주입량 최적제어 시스템의 주요구성장치로서, SCD가 내장되어 있는 전하분석시

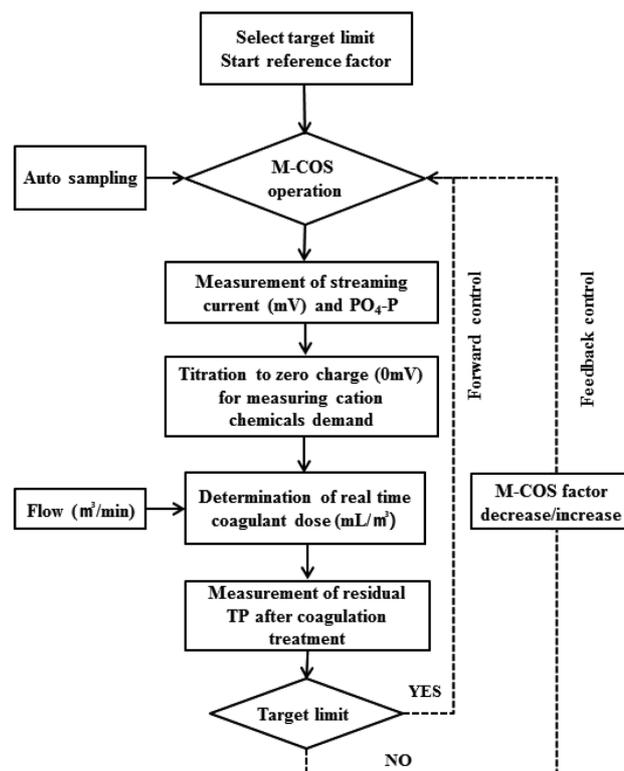


Fig. 1. Logic diagram for the determination of real-time coagulant dose under M-COS operation.

Table 1. Operation expression for optimum coagulant dose in M-COS

$$M = [A-CTS] \cdot \theta \cdot \{1 + \alpha \cdot (P_c - P_b)\} \cdot \{1 - \beta \cdot (T_c - T_b)\} \cdot \{1 + \gamma \cdot |pH_c - pH_b|\} \cdot \{1 - \delta \cdot (A_c - A_b)\} \cdot \{1 - \varepsilon \cdot (Q_c - Q_b)/Q_b\} \cdot \{1 + \psi \cdot (TP - \Omega)\}$$

Only, when $TP < \Omega$, $M = \phi$ (minimum default dose for system maintenance)

M	Real time optimum coagulant dose
[A-CTS]	polyDADMAC titration demand
θ	Conversion factor
α / β	PO ₄ -P characterization factor / Coefficient of temperature variation
P_c / P_b	PO ₄ -P concentration of sewage (current/before)
T_c / T_b	Temperature of sewage (current/before)
γ / δ	Characterization factor of pH / Alkalinity
pH_c / pH_b	pH of sewage (current/before)
A_c / A_b	Alkalinity of sewage (current/before)
ε / ψ	Coefficient of retention time adjustment / Feedback modification factor
Q_c / Q_b	Quantity of inflow sewage (current/before)
TP	Residual TP concentration after coagulation treatment
Ω	Target limit of residual TP concentration

스팀(Charge Analyzing System, CAS, AFG Analytic GmbH, Sachsen, Germany), 샘플 챔버를 포함하는 온라인 샘플링 시스템, 자동세척시스템으로 구성하였다. CAS 내부의 SCD는 물속의 전기적 변화를 측정하는 기기로서, 시료수 중 전기적으로 하전된 입자들이 SCD 내부에서 왕복운동하는 피스톤에 순간적으로 부착되어 전극의 흐름에 따라 움직이고 이때의 전류를 측정할 수 있다. 측정된 전류는 전기적으로 처리되어 유동전류(streaming current, SC)값으로 출력되었다.¹⁵⁾

A-CTS에 생물반응조 유출수를 10 mL 샘플링하여 SCD로 SC를 측정하였고, 측정된 SC값이 0 mV 될 때까지 polyDADMAC (diallyldimethyl ammonium chloride, AFG Analytic GmbH)으로 적정하여 응집제 요구량을 산출하였다. 전하적정 완료 즉시 SC 측정부를 세척액(R124, AFG Analytic GmbH)으로 세척하고 다시 시료 10 mL를 취하여 동일한 방법으로 전하적정시험을 시행하였다.

처리대상수의 특성을 파악하기 위해 실시했던 Jar-test의 자료들을 바탕으로 A-CTS의 환산계수를 처리수 수질기준에 만족하도록 조정하였으며, 산출된 응집제 요구량과 환산계수 및 그 외 생물반응조 유출수의 PO₄-P, 처리수의 TP, pH, 온도, 유량 등의 자료들을 최적주입연산식에 적용하여 응집제 주입량을 결정하였다. 사용된 최적주입연산식은 Table 1에 제시하였다.

2.2.2. 인 자동분석기

PO₄-P 자동분석기는 수질오염공정시험법의 아스코르빈산 환원법을 자동화한 장비이다. 생물반응조 유출수의 SS가 높아 분석기의 자동시료주입 튜브의 막힘현상을 최소화하고자 200 μm 거름망을 포함하고 있는 전처리 장치를 별도로 구성하여 한번 거른 후, 자동분석기 내로 시료를 유입시켜 PO₄-P를 측정하였고, 실시간으로 대체적인 생물반응조 유

출수의 인 농도를 모니터링 하였다.

TP 자동분석기는 수질오염공정시험법의 흡광광도법을 자동화한 장비이다. 응집제 주입으로 처리된 대조군(일정한 양으로 응집제 주입)과 실험군(M-COS에 의한 응집제 주입)의 유출수를 분석기 내로 각각 유입시켜 마이크로배치(micro-batch)형 분석 방법으로 고온·고압에서 산화 분해한 후 아스코르빈산 환원법의 원리로 처리수의 TP 농도를 측정하였다.

2.2.3. PLC & HMI

M-COS의 자동제어 운전을 위하여 디지털 또는 아날로그 입출력 모듈을 통한 로직, 시퀀싱, 타이밍, 카운팅, 연산 등의 프로그램을 사용하여 프로세서를 제어하는 디지털 전자장치인 PLC console을 사용하였으며, 이 디지털 전자장치의 세계를 시·청각적으로 연결하는 인터페이스로 HMI를 사용하여 자동제어 운전화면을 구성하였다.

응집제는 생물반응조 유출수, 유량, 수질 자료, 유동전위의 적정요구량을 바탕으로 주입율이 결정되어 주입될 수 있고, 일정시간 경과 후 처리된 TP 농도 결과는 실시간으로 모니터링될 수 있도록, 전방제어와 후방제어가 동시에 가능한 운전자 친화적인 자동화면으로 고안·제작하였다.

2.3. 현장 Pilot-plant

서울시 J-STP의 2013년도 유입수, 1차침전지 유출수, 2차침전지 유출수의 성상을 조사한 결과 Table 2와 같이, 2차침전지 유출수의 TP 농도가 평균 0.555 mg/L(최대값 2.201 mg/L)로 방류되어 법적기준을 초과하는 것으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 수질과 유량에 따른 응집제 최적주입의 TP 자동제어가 필요할 것으로 판단하여 실시간 자동제어가 가능한 응집제 주입량 최적주입시스템(M-COS)을 구성하였다.

파일럿 플랜트(pilot plant)는, (i) 대형 컨테이너(27 m²)와

Table 2. Water quality indexes of influent and effluent sampled from J-STP (2013)^{a)}

Water quality index	Sample number ^{b)}	Influent	Primary effluent	Secondary effluent
BOD (mg/L)	102 365	150.4±28.4 (56.0, 238.7)	100.9±22.8 (28.0, 141.6)	6.9±2.01 (2.4, 9.9)
COD (mg/L)	102 365	73.6±16.2 (25.2, 148.0)	51.4±10.4 (16.0, 69.9)	8.4±2.4 (3.0, 15.3)
SS (mg/L)	249 365	99.6±21.6 (45.0, 244.0)	49.6±8.1 (17.0, 88.0)	4.1±1.5 (1.5, 8.5)
TN (mg/L)	48 365	40.34±7.74 (24.31, 65.23)	32.70±6.82 (21.33, 50.08)	9.64±1.90 (4.63, 15.08)
TP (mg/L)	49 365	4.020±0.634 (2.871, 6.217)	3.222±0.456 (2.236, 4.255)	0.555±0.398 (0.106, 2.201)

^{a)} Values were expressed as mean±standard deviation (SD). Values in parenthesis represent minimum and maximum levels of each analyzed water quality index.

^{b)} Sample number for the influent and primary effluent was presented in the left column, and that for the secondary effluent was in the right column.

(ii) 2개의 응집 반응조(W 1.0 m × L 3.4 m × H 0.7 m)로 구성되어 J-STP에 설치되었다. 대형 컨테이너는 A-CTS, TP & PO₄-P 자동분석기, PO₄-P 분석 전처리장비, 대조군과 M-COS 실험군용 침전반응조(20 L) 2개, PLC console, HMI monitor를 포함하였으며, 2개의 응집 반응조는 총인 처리효율 파악을 위해 대조군과 M-COS 실험군용으로 각각 사용되었다. 이 반응조로 유입되는 실험원수는 J-STP의 생물반응조 유출수(2차 침전지 유입 전단 지점)로서, 자동펌핑을 통하여 유입되었으며, 평균 유입유량과 체류시간을 130 m³/d와 22 분으로 구성하였다. 또한, 길이를 0.6 m, 1.3 m, 1.5 m로 나누어 3개의 구획을 만들었고, 유입된 원수는 길이 0.6 m의 급속혼화조(G 1500/s)를 거쳐 나머지 2개의 완속혼화조(G 40/s, G 30/s)로 순차적으로 혼화·이동하였으며, 실시간으로 산정된 최적응집제 주입량이 급속혼화조로 자동주입되었다. 응집혼화 후, 처리수를 컨테이너 내부의 침전지로 자동유입시켜, 잔류 총인 농도를 측정하였다.

수동적으로 응집제를 일정량 조정하여 주입하는 대조군과 자동전하적정장치의 전하적정값과 인 자동분석기의 농도 자료를 통하여 실시간 측정값에 따라 적정 응집제 주입량을 산정하는 M-COS 자동연산모드를 적용한 실험군을 통하여 원수 내 TP 처리 특성을 파악하였다. 파악된 자료를 토대로, 대조군 대비 M-COS 실험군의 응집제 주입 절감률을 평가하였고, 주입된 응집제에 의한 슬러지 발생량을 예측하여 그에 따른 슬러지 처리비용도 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 처리대상수의 특성 및 Jar-test 결과

M-COS 운전 처리대상수인 생물반응조 유출수의 특성을 파악하고자 2013년 1년간의 자료를 사전 조사하여 Table 2에 제시하였다. 평균 TP 농도 4.020 mg/L의 하수가 J-STP로 유입되어 1차 침전지를 거치면서 3.222 mg/L 농도로 20% 정도의 TP가 제거되었다. 이후 생물반응조에 유입되고 2차 침전지를 거치면서 유입하수 TP 농도의 86%가 제거되어, 최종 방류 TP 농도는 0.555 mg/L로 나타났다. 이 농도는 III 지역 법적규제기준(0.5 mg/L)을 초과하는 것으로서, 1년간 실제 초과회수가 365회 중 151회(41.4%)로 조사되었으며, 초과된 횟수의 TP 평균농도는 0.920 mg/L로 높게 나타났다. 이러한 부분들을 규제기준 이하로 제어하기 위해, 생물반응조 유출수 지점에 응집제 최적주입을 시도하였다. M-COS 운전의 직접적 처리대상수인 생물반응조 유출수의 성상을 분석하여 Table 3에 나타내었으며, 2012년 1월 1일부터 적용되는 1일 하수처리용량 500 m³ 이상 III지역에 해당하는 방류수 수질기준을 함께 표시하였다.²⁾

생물반응조 유출수의 수질특성을 분석한 결과(Table 3), 총화학적산소요구량(TCODcr)은 3240.8 mg/L, 30분 침전 후 상등수를 측정된 침전 후 화학적산소요구량(post-sedimentary CODcr, pCODcr)은 11.7 mg/L이었다. 이 유출수의 침전 전 ·

Table 3. Water quality characteristics of bioreactor effluent^{a)}

Index	Mean±SD	Min	Max	Final discharge water criteria
TCODcr (mg/L)	3240.8±864.2	1687.5	4496.4	≤ 40
pCODcr (mg/L)	11.7±4.7	4.2	20.7	
MLSS (mg/L)	3124±185	2645	3364	≤ 10
MLVSS (mg/L)	2247±220	1911	2641	
TP (mg/L)	90,051±8,469	72,505	105,400	≤ 0.5
pTP (mg/L)	1,341±0,341	0,842	2,051	
PO ₄ -P (mg/L)	0,991±0,300	0,511	1,544	
TN (mg/L)	217,88±53,37	120,35	301,50	≤ 20
pTN (mg/L)	10,71±2,65	6,40	16,40	
Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	93.5±8.5	80.0	114.0	
pH	6.8±0.1	6.6	7.0	
Temp (°C)	11.6±0.8	10.0	13.0	

^{a)} 20 samples were analyzed.

후의 TN은 각각 217.88 mg/L와 10.71 mg/L 이었으며, TP는 각각 90.051 mg/L와 1.341 mg/L으로 나타나, 침전된 고형물 내에 다량의 유기물질, 질소, 인이 함유되어 있음을 예측할 수 있었다. 또한, 고형물에 포함된 인 성분들의 98%가 중력에 의한 자연침강으로 제거되었으므로, 응집침전에 의한 TP 처리 시 침전 후 TP 농도가 실제 처리해야 될 인 농도임을 판단할 수 있었다. 생물반응조 유출수의 총부유성고형물(MLSS)은 3124 mg/L, 유기성부유고형물(MLVSS)은 2247 mg/L로, 총부유성고형물의 72% 정도가 유기성부유고형물임이 확인되었다.

생물반응조 유출수의 알칼리도는 93.5 mg/L, pH는 6.8로 측정되었다. 본 연구에서 사용될 PAC 응집제는 알칼리도 및 pH 변동을 야기시키지 않으며, 낮은 pH 조건에서는 Al³⁺, AlOH²⁺, Al(OH)²⁺와 같은 monomer 형태로 많이 존재하여 응집효과가 낮으나, pH 7 정도의 중성 부근에서는 Al₁₃O₄(OH)₂₄⁷⁺ 등의 폴리머 형태로 존재하여 높은 응집효과를 나타내는 것으로 보고되었다.³⁾ 따라서, 현장 처리대상 하수에서 측정된 이 중성 pH는, PAC 응집제 주입 시 응집효과를 높일 수 있는 좋은 조건으로 판단되었다.

위와 같은 특성을 가진 생물반응조 유출수에 대한 최적 응집제 주입량을 결정하기 위해 Jar-test를 시행하였다. 즉, 유출수에 PAC응집제를 0.0, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 mg/L 농도로 주입한 후, 수질 오염원들의 농도를 측정하였고(Fig. 2), 최대 주입량(10.0 mg/L)에서의 오염원 제거율과 회귀분석을 통해 예측된 최적 응집제 주입량을 평가하였다.

응집제가 주입되지 않은 Jar에서 TP농도와 용존성 TP(soluble TP, sTP) 농도는 각각 1.271 mg/L와 1.017 mg/L로 측정되었으며, 10.0 mg/L 응집제를 주입한 Jar의 경우에는 각각의 농도가 0.100 mg/L와 0.039 mg/L까지 낮아졌다. TP 중 용존성 TP가 차지하는 비율은 초기 80% 정도에서 10.0 mg/L 응집제 주입 후 39% 정도 수준으로 감소하였다. 반면, TN농도와 용존성 TN(soluble TN, sTN) 농도는 응집제가

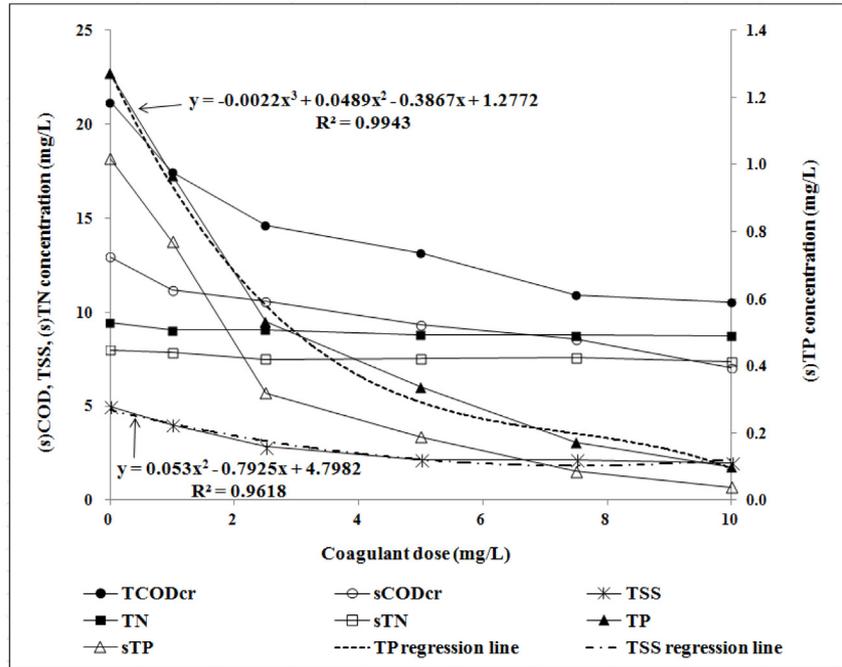


Fig. 2. Changes in the water quality indexes of bioreactor effluent after PAC treatment.

주입되지 않은 Jar에서는 각각 9.43 mg/L와 7.98 mg/L이었고, 10.0 mg/L로 응집제를 주입한 Jar에서는 8.73 mg/L와 7.38 mg/L로 나타나 7.4%와 7.5%의 매우 저조한 제거효율을 나타냈다. 이는, 총인과 달리 총질소를 제거대상으로 고려하지 않는 응집공정상의 특성으로부터 기인된 것으로 판단되었다. 한편, TCODcr농도와 용존성 COD (soluble CODcr, sCODcr) 농도는 10.0 mg/L 응집제 주입 후, 각각 21.2 mg/L에서 10.5 mg/L, 13.0 mg/L에서 7.0 mg/L로 낮아져, 그 제거효율이 각각 50.5%와 46.2%로 나타났다. TSS농도 역시 5 mg/L에서 2 mg/L로 낮아져 60%의 제거효율을 나타냈다. 응집제 주입농도에 따른 수질항목들의 농도변화를 측정하여 회귀분석한 결과에 따라(Fig. 2), TP 법적기준 III지역의 규제기준 농도인 0.5 mg/L 이하를 만족시키는 최소 응집제량은 3.0 mg/L (25.0 mL/m³, 10% as Al₂O₃)로 산정되었으며, 이때 제거효율은 60.9%로 평가되었다. 박 등¹⁾은 생물

반응조 유출수(초기 TP: 4.4 mg/L, CODcr: 14 mg/L)의 TP 농도를 0.5 mg/L 방류기준에 만족하는 최소 응집제량을 25 mL/m³ (17% as Al₂O₃)으로 산정하였으며, 그때의 TP 제거효율을 88.6%로 보고한 바 있다. 본 연구에 사용된 J-STP의 생물반응조 유출수는 초기 TP농도가 1.271 mg/L로 상대적으로 낮아 제거효율이 낮게 나타난 것으로 사료되며, TP이외의 CODcr 등의 다른 오염물질 농도가 상대적으로 높았으므로 응집침전 반응 시 방해물질로 작용하여 응집제 주입량이 다소 높게 나타난 것으로 판단되었다.

3.2. M-COS의 현장적용

M-COS의 현장적용은 1월말(Period 1), 4월초(Period 2), 5월 중순(Period 3)의 각 시기에 M-COS가 설치된 pilot plant에서 운전·평가되었다. Jar-test에 의해 산출된 최소 응집제 주입량(25.0 mL/m³)을 기준으로, 대조군의 응집제 주입량을

Table 4. Coagulant dose and residual TP concentration under control or M-COS operation

	Influent PO ₄ ³⁻ -P	Control			M-COS			Coagulant cost benefit (%) ^{a)}
		N	Coagulant dose (mL/m ³)	Residual TP (mg/L)	N	Coagulant dose (mL/m ³)	Residual TP (mg/L)	
Period 1 ^{b)}	0.741±0.193 (0.363, 1.173)	156	25.0	0.222±0.054 (0.127, 0.408)	156	22.4±4.9 (10.0, 37.0)	0.357±0.076 (0.244, 0.499)	10.4
Period 2 ^{c)}	0.771±0.128 (0.512, 1.270)	254	30.0	0.150±0.092 (0.029, 0.470)	254	25.4±3.4 (15.6, 36.4)	0.219±0.065 (0.110, 0.409)	15.3
Period 3 ^{d)}	0.785±0.127 (0.522, 1.036)	195	30.0	0.207±0.092 (0.018, 0.485)	195	27.3±3.7 (19.9, 39.9)	0.162±0.063 (0.020, 0.341)	9.0

^{a)} It represents % decrease in the coagulant dose under M-COS operation compared with control. Value was calculated as 100 × (A-B)/A, A and B mean coagulant dose under control or M-COS, respectively.

^{b)} Both systems were operated on Jan 22 to Jan 24 in 2014.

^{c)} Both systems were operated on April 3 to April 6 in 2014.

^{d)} Both systems were operated on May 14 to May 16 in 2014.

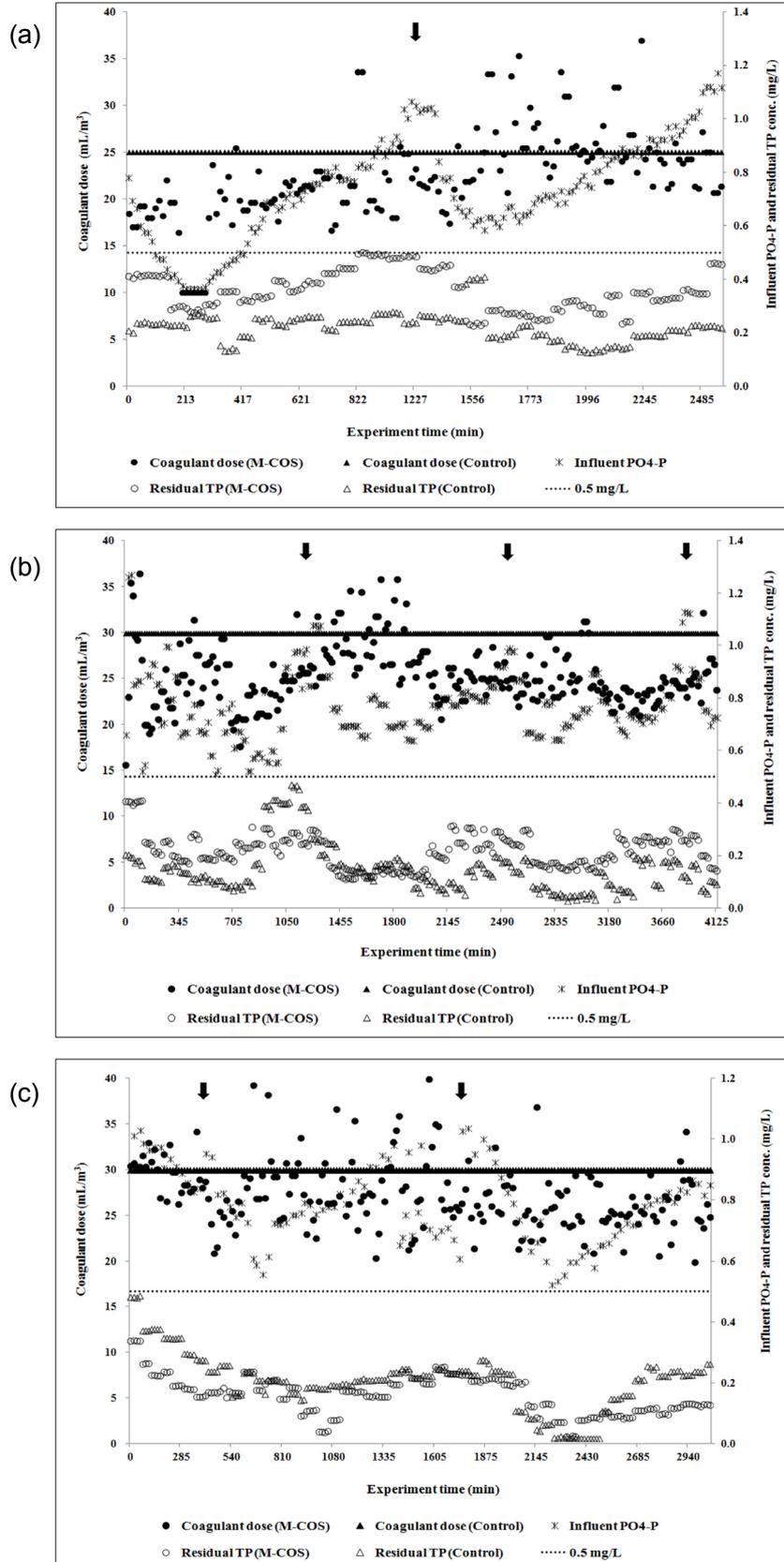


Fig. 3. Changes in the coagulant dose and residual TP under control or M-COS operation: The operations started at 13:23 on Jan 22 and continued till 8:37 on Jan 24 for the Period 1 (a), from 15:00 on April 3 till 17:45 on April 6 for the Period 2 (b), and from 5:00 on May 14 till 8:15 on May 16 for the Period 3 (c). Black arrows indicate the time frame corresponding to 10 am to 11 am.

25 mL/m³과 30 mL/m³으로 정을 주입하였고, M-COS에 의해 산출된 응집제 최적 주입량으로 실험군을 운전하였다. 응집제 주입 후 그에 따른 TP 농도 변화를 모니터링하였으며, 각각의 결과들을 Table 4와 Fig. 3에 제시하였다.

인 농도 변화를 짧은 시간 주기로 모니터링하기 위해 부유성고형물을 다량 함유하고 있는 생물반응조 유출수를 200 µm 필터에 여과하여 그 시료를 PO₄-P 자동분석기로 측정하여 인 농도 변화 경향을 파악한 결과, Period 1, 2, 3의 평균 PO₄-P농도는 각각 0.741 mg/L, 0.771 mg/L, 0.785 mg/L로 나타났으며, Fig. 3에서 볼 수 있듯이 각 기간의 오전 시간대에 PO₄-P 농도가 대체적으로 높게 조사되었다. 이는 오전시간에 일반 가정에서 식사, 세면, 화장실 등을 사용하고 3~4시간 후에 사용하수가 하수처리장으로 유입되는 관계로 오전 10시~11시경 사이에 인 농도가 높게 나타나는 것으로 판단되었다. 오전 시간대에 보다 주의하여 TP처리 운전이 필요할 것으로 사료된다.

응집제 주입 후, 대조군과 M-COS실험군의 TP 농도 변화를 각 기간 동안 분석하였으며(Fig. 3), 그에 따른 응집제 절감률을 평가하였다(Table 4). Period 1, 2, 3에서 각각 25 mL/m³, 30 mL/m³, 30 mL/m³의 응집제가 정을 주입된 대조군의 경우, 처리되고 남은 TP농도는 평균 0.222 mg/L, 0.150 mg/L, 0.207 mg/L로 나타났다. M-COS의 경우, 각 시기에 평균 22.4 mL/m³, 25.4 mL/m³, 27.3 mL/m³의 응집제가 주입되었으며, 처리되고 남은 TP 농도는 평균 0.357 mg/L, 0.219 mg/L, 0.162 mg/L로 나타났다. 대조군과 M-COS 실험군 모두 응집제 주입 후 TP 농도는 III지역 법적기준(0.5 mg/L)을 만족하고 있으나, 수질에 따른 능동적 대처가 가능한 M-COS에 비해 대조군의 경우 과량으로 주입된 경우가 많이 발생하여, M-COS에 의한 응집제 절감률은 각각 10.4%, 15.3%, 9.0%로 평균 11.6%가 절감되는 것으로 평가되었다.

M-COS에 의한 응집제 주입량 자료들을 살펴보면(Fig. 3), 정을 주입된 대조군에 비해 M-COS 실험군에서 간헐적으로 더 많은 양이 주입된 구간을 확인할 수 있었다. 이는 A-CTS 특성상, 하수 속의 인을 포함한 모든 음전하를 대상으로 응집제 요구량을 산정하기 때문에 COD, SS 등과 같은 오염물질들의 동시 제거라는 긍정적인 면도 있으나(Fig. 2), 응집제 과량주입 가능성이라는 부정적인 측면도 내포하고 있어, 전체적인 시스템의 효율을 저하시키는 원인으로도 작용할 수 있음을 시사해주었다.

그러나, 일반적으로 현장 하수는 유입수질 변동이 심하게 나타나는 경우가 있으므로, 1시간 이상 길리는 Jar-test가 변동이 심하게 발생된 시간대의 적정 응집제량을 판단하기에는 이미 시간이 늦어지는 상황이 발생할 수 있다. 따라서, 운전자는 TP 방류수질 기준을 초과하지 않기 위해 과거 경험상 가장 나쁜 시점을 기준으로 응집제를 과량으로 지속 주입하기 때문에, 실제로는 본 연구에서 적용한 정을주입율보다 더 많은 양의 응집제를 주입하게 된다. 이러한 가능성을 고려한다면, 제시된 과량주입 구간은 실제 과량주입이 아닐 수 있으며, 과량주입이라 하더라도 전반적인 시

스템 효율에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 사료된다.

온라인 CAST 시스템 개념이 도입된 A-CTS와 PO₄-P 자동분석기 시스템 개념을 접목하여 처음으로 구성된 M-COS 시스템의 현장실험은 평균 11.6%의 응집제 절감률을 보여 주었다. 이는 응집제 절감률 측면에서, 응집제 주입량 자동 제어 시스템을 적용한 타 연구들의 평균 10% 절감,⁸⁾ 2~33% 절감,¹⁶⁾ 6.5~23.5% 절감,⁶⁾ 평균 14% 절감⁹⁾ 등의 결과들과 유사하여, J-STP 현장에 실제로 적용 가능성을 시사하였다. 더불어, 본 시스템은 운전자 친화적인 자동제어 화면을 제공하고 있어, A-CTS에 의한 응집제 요구량 및 유입원수와 처리수의 인 농도를 실시간으로 동시에 모니터링 할 수 있으므로 기존 시스템 대비 더 발전적이고 차별성이 있음을 제시하였다. 따라서, 본 연구는 응집제 주입량 자동 제어 시스템의 현장 적용을 위한 유용한 자료로 활용될 수 있다.

3.3. 경제성 분석

M-COS의 경제성은, 대조군과 M-COS 실험군 운전결과를 근거로 하여, 처리용량 백만톤(1,000,000 m³/d) 시설을 기준으로 분석되었다. 첫째, 응집제 주입량에 따른 구입비를 산정하였고, 둘째, 응집제 주입에 의해 발생한 슬러지 처리비용을 산정하였으며, 셋째, 산정된 응집제 구입비와 슬러지 처리비용을 합산하여 총 처리비용을 산출한 후, 대조군 대비 M-COS 사용을 통해 절감된 비용을 계산하였다(Table 5).

Table 5. Estimated sludge production and cost increase derived from coagulant application

Items	Capacity : 1,000,000 m ³ /d					
	Control			M-COS		
	Period 1	Period 2	Period 3	Period 1	Period 2	Period 3
Coagulant amount (m ³ /d)	25.0	30.0	30.0	22.4	25.4	27.3
Coagulant cost (1,000 won/d) ^{a)}	3900	4680	4680	3494	3962	4259
Sludge production (ton/d) ^{b)}	281	366	366	238	288	321
Sludge cost (1,000 won/d) ^{c)}	10594	13798	13798	8973	10858	12102
Total cost (1,000 won/d) ^{d)}	14494	18478	18478	12467	14820	16361
Increased cost (won/m ³) ^{e)}	14.5	18.5	18.5	12.5	14.8	16.4
Reduction rate (%) ^{f)}	-	-	-	13.8	20.0	11.4

a) PAC, 10% as Al₂O₃, 1.2 g/mL : 130 won/kg (Public Procurement Service, 2014)

b) It was estimated from the regression analysis for the concentrations of suspended solid produced by coagulant treatment. Moisture content of sludge was assumed as 77% (J-STP, 2012), and removal rate of SS was based on the result of Fig. 2.

c) Sludge treatment cost was assumed as 37,700 won/ton (J-STP, 2012)

d) Total cost = coagulant cost + sludge cost

e) Increased cost (won/ m³) = total cost/1,000,000 m³

f) It was calculated as % decrease in total cost under M-COS operation, compared with control.

1일 응집제 구입비는 대조군과 M-COS 실험군에서 각각 3,900~4,680 천원과 3,494~4,259 천원으로 산정되었다. 응집제 주입에 따른 슬러지 발생량을 산정하기 위해 생물반응조 유출수에 응집제를 0.0, 1.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0 mg/L로 주입한 후 MLSS 농도를 측정하여 회귀분석 하였다($y = -3.9025x^2 + 65.611x + 2425$, $R^2 = 0.9853$, $x = \text{coagulant dose}$, $y = [\text{MLSS}]$). 생물반응조 유출수에 10.0 mg/L PAC를 주입할 경우, MLSS 농도는 응집제 주입 전 대비 약 9%(건조무게) 정도 증가한 것으로 관찰되었다. 응집제 주입에 따른 증가된 슬러지 발생량은, 위 결과값들의 회귀분석을 통해 산출된 SS 발생량에 SS 침전 제거율(Fig. 2)을 반영하였으며, 슬러지 평균 함수율(77%, J-STP, 2012)을 고려하여 최종 산정하였다.

Period 1, 2, 3에서 응집제 구입비용과 응집제 주입에 따라 발생된 슬러지 처리비용을 합산한 후, 처리용량(1,000,000 m³/d)을 반영하여 응집제 주입에 의해 증가된 처리비용을 산정하였다. 그 결과, 대조군과 M-COS 실험군의 처리비용 증가액은 각각 14.5~18.5 won/m³와 12.5~16.4 won/m³로 산출되어, M-COS 실험군이 11.4~20.0%(평균 15.0%)의 비용절감 효과를 가져왔다. 본 연구에서 산출된 처리비용 증가액은, 정유 주입에 의한 응집제 주입 후 증가액을 산출한 박 등¹⁾의 연구 결과(40.6~48.7 won/m³)보다 최대 4배 가량 낮았다. 특히, M-COS 실험군은, 4개의 시범운영 지역에서 생물반응조 유출수에 응집제 처리 후 처리비용 증가액을 보고한 한국환경공단¹⁷⁾의 결과(10.2~20.9 won/m³) 범위 내로 산출되어, 현장적용이 가능함을 판단할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 강화된 TP 처리를 위해, 처리해야 할 인 농도에 대한 응집제 최적 주입 비율을 보다 손쉽게 결정하고 조절할 수 있는 실시간 자동제어가 가능한 응집제 주입량 최적제어 시스템(M-COS)을 구성하였으며, 실제 하수처리장 현장실험을 통하여 유량과 수질 변동에 따른 현장 적용성을 검토하였다.

먼저, 현장적용을 위하여 J-STP의 생물반응조 유출수를 대상으로 수질 특성을 파악하였고, Jar-test를 통하여 최적 응집제량을 25 mL/m³으로 산출하였다. 그 결과를 기준으로, J-STP 내 설치된 pilot plant에서 1월말(Period 1), 4월초(Period 2), 5월 중순(Period 3)의 기간 동안, 대조군의 응집제 주입량을 25 mL/m³ 과 30 mL/m³으로 정유 주입하였고, M-COS에 의해 산출된 응집제 최적 주입량으로 실험군을 운전하였다.

Pilot plant 운전 결과, 기간별 대조군과 M-COS 실험군의 평균 응집제량은 각각 25.0 mL/m³, 30.0 mL/m³, 30.0 mL/m³과 22.4 mL/m³, 25.4 mL/m³, 27.3 mL/m³으로 주입되었으며, 응집제 주입 후 처리되고 남은 TP 농도는 III지역 법적기준(0.5 mg/L 이하)을 모두 만족하고 있는 것으로 나타났다. 그러나, 수질에 따른 능동적 대처가 가능한 M-COS에

비해 대조군의 경우 과량으로 주입된 경우가 많이 발생하여, M-COS 실험군의 응집제 절감률은 각각 10.4%, 15.3%, 9.0%로 평균 11.6% 절감되는 것으로 평가되었다.

또한, 경제성 분석을 위하여, 응집제 주입량에 따른 구입비와 주입에 의해 발생된 슬러지량 및 그에 따른 슬러지 처리비용을 예측하였고, 그 예측된 결과값에 처리용량(1,000,000 m³/d)을 반영하여 증가된 처리비용을 평가하였다. 대조군과 M-COS 실험군의 처리비용 증가액은 각각 14.5 won/m³, 18.5 won/m³, 18.5 won/m³과 12.5 won/m³, 14.8 won/m³, 16.4 won/m³으로 산출되었으며, M-COS 실험군에서 13.8%, 20.0%, 11.4%로 평균 15.0%의 비용절감 효과가 나타나, 현장적용이 가능함을 판단할 수 있었다.

사 사

본 연구는 중소기업청에서 시행한 2013년 중소기업 기술개발 지원사업의 중소기업 상용화 기술개발 구매조건부신제품개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

Reference

1. Park, H. Y., Park, S. M., Lee, K. C., Kwon, O. S., Yu, S. J. and Kim, S. J., "Survey of physicochemical methods and economic analysis of domestic wastewater treatment plant for advanced treatment of phosphorus removal," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**(3), 212~221(2011).
2. Ministry of Environment, <http://www.me.go.kr>(2011).
3. Hwang, E. J. and Cheon, H. C., "High-rate phosphorus removal by PAC (poly aluminum chloride) coagulation of A₂O effluent," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **31**(9), 673~678(2009).
4. Cho, I. H., Zoh, K. D., An, S. W., Chang, S. W. and Kim, Y. K., "Characterization of phosphorus removal in wastewater using iron precipitation reactor," *Kor. J. Environ. Health Sci.*, **32**(1), 89~95(2006).
5. Kim, S. G., Lee, H. S. and Jun, T. S., "Development of the automatic control system for the advanced phosphorus treatment in sewage treatment plant," *J. Kor. Soc. Water Environ.*, **28**(2), 300~304(2012).
6. Kim, W. K., Yoo, H. S., Kim, K. H., Jeong, S. G., Jung, I. S., Zoh, K. D. and Cho, I. H., "Application of total phosphorus (TP) treatment in sewage wastewater treatment plant using charge analyzer system titrator (SW-CAST)," in proceedings of the annual meeting of Korean Society on Water Environment and Korean Society of Water and Wastewater, KSWE, EHRD, Incheon, pp. 407~408(2011).
7. Lee, S. H., Oh, H. J., Hwang, T. M. and Jung, J. H., "Evaluation of coagulant control and monitoring system using CAS-T and iPDA analyzer," in proceedings of the annual meeting of Korean Society on Water Environment and Ko-

- rean Society of Water and Wastewater, KSWE, EXCO, Daegu, pp. 302~307(2006).
8. Na, Y. S., Ryu, D. C., Kim, H. S., Lim, Y. K. and Lee, S. W., "Evaluation of auto coagulant controls using CAS-T in drinking water process," in proceedings of the annual meeting of Korean Society of Water and Wastewater and Korean Society on Water Environment, KSWW, SETEC, Seoul, pp. 157~158(2008).
 9. Kim, W. K., Sung, Y. K., Yoo, H. S. and Kim, J. T., "Optimization of coagulation/flocculation for phosphorus removal from activated sludge effluent discharge using an online charge analyzing system titrator (CAST)," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, In press(2014).
 10. Han, M. Y., You, J. O., Lim, B. S., "Evaluation and analysis of streaming current detector in coagulation process - full scale test," *J. Kor. Soc. Civil Eng.*, **17**(II-3), 277~285(1997).
 11. Chae, S. H., "Monitoring and automatic control of coagulation process by streaming current detector," *J. Kor. Soc. Water Wastewater*, **15**(6), 542~550(2001).
 12. Choi, C. H., Maeng, S. K., Sim, J. H., Choi, J. H., Song, K. G., Lee, B. H. and Cha, H. Y., "A study on the applicability of PDA technique in the P-CAP system for T-P removal of STP effluent," *J. Kor. Soc. Water Environ.*, **28**(5), 729~742(2012).
 13. Ministry of Environment, Water Standard Method of Korea (2008).
 14. APHA, AWWA and WEF, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed., AHPA Pub., Washington DC(2005).
 15. Abu-Orf, M. M. and Dentel S. K., "Polymer dose assessment using the streaming current detector," *Water Environ. Res.*, **69**(6), 1075~1085(1997).
 16. Cho, I. H. and Kim, W. K., "A case study of coagulant reduction and improvement in water quality of total phosphorus using charge analyzer system titrator for sewage wastewater treatment plants (SW-CAST)," in proceedings of the annual meeting of Korean Society of Water and Wastewater and Korean Society on Water Environment, KSWW, KINTEX, Goyang, pp. 447~448(2010).
 17. Korea Environment Corporation, Test operation of reinforced total phosphorus(TP) treatment in wastewater treatment plants, Ministry of Environment(2009).