

생물학적 처리공정 내 Alum 주입에 따른 인 처리 효율과 미생물 활성도 변화에 관한 연구

최정수 · 주현종^{*,†}

경기대학교 일반대학원 환경에너지시스템공학과

*경기대학교 환경에너지시스템공학과

Study on Change of Microbial Activity and Removal Efficiency of Phosphorus with Alum Injection in the Biological Process

Jung Su Choi · Hyun Jong Joo^{*,†}

Department of Environmental Energy System Engineering, Graduate School Kyonggi University

*Department of Environmental Energy System Engineering, Kyonggi University

(Received 15 January 2011, Revised 7 February 2011, Accepted 8 February 2011)

Abstract

The effects of coagulants on the microorganisms when they are injected directly into the biological treatment facility for T-P removal have been easily observed from the results of past experiments. As such this study is set out to derive the effective plans for the coagulant dosage by analyzing the effects of the injected coagulant on the microbial activity during the chemical treatment for T-P removal. The research methods entailed the assessment of removal efficiency of T-P according to the coagulant dosage while changing the molar ration between Alum and influent phosphorus. At the same time Specific Oxygen Uptake Rate (SOUR) according to the coagulant dosage was measured. SOUR was used as a method for indirect assessment of the microbial activity according to the coagulant dosage. The results from the study showed that with the increase in the alum dosage, the removal efficiency T-P tended to increase. On the other hand, the increase in coagulant dosage resulted in the decrease in SOUR, which indicates the decrease in the microbial activity. Such reduction in the activity could be explained by the increase in the concentration of removal efficiency of TBODs. Based on experiment results from the study, it is determined that coagulant dosage affects the microbial activity. Moreover, the indirect assessment on the microbial activity using SOUR is considered possible.

keywords : Alum, Effect of chemical addition, Phosphorus removal, Specific oxygen uptake rate

1. 서론

수질오염총량제는 유역의 목표수질을 설정하여 당해 유역에서 배출되는 오염물질의 배출 총량이 목표수질을 달성할 수 있는 양 이하가 되도록 관리하는 제도이다. 현재 BOD를 대상으로 1단계 총량제가 실시 중이며 2011년부터는 2단계 총량제가 실시될 예정이다.

2단계에서는 각 수계별 하류지역의 부영양화를 방지할 수 있도록 총 인(Total Phosphorus, TP) 농도를 규제하는 방향으로 계획되어 있다(환경부, 2007). 또한 현재 환경부는 총 인 처리 강화를 위한 시범 운영 연구를 시행하였으며, 2012년부터 수질 보전이 중요한 상수원 보호구역, 수변구역의 경우 총 인을 2.0 mg/L에서 최대 0.2 mg/L까지 강화할 계획에 있다(환경부, 2010).

인의 처리방법에는 생물학적 처리방법으로 인 방출, 인

섭취를 유도하는 방법인 A²/O 공정이 가장 일반적으로 알려져 있지만, 처리효율의 한계와 공정의 운전조건 등에 따라 영향을 많이 받는 단점이 있다. 반면에 화학적 처리 방법인 응집제 주입은 슬러지 발생량이 증가하는 단점이 있으나, 생물학적 방법에 비해 처리 효율이 높고, 방류수질의 안정성을 기대할 수 있다(신항식과 곽종운, 2002).

화학적 인 처리 시 응집제의 일반적 주입 위치는 1차 침전지 앞, 반응조 내 주입, 2차 처리 후로 구분되며, 현재 국내 하수처리장의 경우 대부분 화학적 인 처리 시 반응조 내 주입을 선택 운전하고 있다. 이는 반응조 내 응집제를 주입 할 경우 1차 침전지 앞 및 2차 처리 후 인을 처리하는 것 보다 적은 응집제가 주입되기 때문이다.

인 처리를 위한 응집제 주입은 반응조 내 응집제를 직접 주입하므로 처리효율이 높고, 경제성이 뛰어나지만 미생물에 영향을 주는 문제가 발생되기도 한다. 과거의 실험 결과로부터 인 처리를 위해 응집제가 생물학적 처리 시설에 직접 투여 될 경우 미생물에 영향을 미치는 경우가 쉽게 관찰되어 왔다.

[†] To whom correspondence should be addressed.

hjoo@kyonggi.ac.kr

하지만 현재 생물반응조 내 응집제 주입은 총 인 처리에 초점을 두어 최적 주입량을 도출하고 있으며, 응집제가 미생물 활성도에 미치는 영향에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 강화된 공공하수처리시설의 방류수 총 인 농도 기준을 만족하기 위한 응집제 주입이 미생물 활성도에 미치는 영향을 도출하는데 있다.

이에 따른 본 연구의 응집제 선정은 물리적 시간적 제한을 감안하여 화학적 인 처리 응집제로 가장 보편적이게 사용되고 있는 액상 Alum(Aluminium Sulfate, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)을 선택하여 실험하였다. 동시에 Lab. Scale 반응기를 제작하였으며, 응집제와 유입 인과의 몰 비(mole Al : mole P)를 변화하면서 응집제 주입량에 따른 인 처리 효율 및 최적조건을 도출하였다.

또한 미생물 활성도의 간접적인 지표로 사용가능한 비산소소비율(Specific Oxygen Uptake Rate, SOUR)을 이용하여 응집제를 반응조 내 직접 주입하였을 때 SOUR의 변화를 측정하였다. 이러한 연구 절차를 토대로 응집제 주입에 따른 인 처리 효율과 SOUR을 비교하여 응집제를 반응기에 직접 주입 시 미생물에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1. 실험 장치

본 연구에 사용된 반응기의 구성 및 형태는 Fig. 1의 (a)에 나타내었으며, 실험실 규모의 반응기는 생물학적 처리의 기본이 되는 활성슬러지 공정을 선택 운전하였다. 반응기는 포기조 및 침전조 체적을 30 L, 20 L로 설계하였으며, 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)은 포기조 7.2 hr, 침전조 4.8 hr로 운전하였다.

또한 산소 소비율 측정 장치의 구성은 Fig. 1의 (b)에 나

타낸 바와 같이 기질, 슬러지, 세척용수 투입, 산소 소비율 측정 반응기, 용존산소(DO) 측정기 등과 전체 시스템을 통제하는 Programmable Logic Controller (PLC) 제어프로그램으로 구성하였다.

2.2. Alum 주입량에 따른 인 처리 특성

본 연구에 사용된 유입수는 응집제를 이용한 인 처리에 영향을 최소화 할 수 있도록 CH_3OH , NH_4Cl , KH_2PO_4 , K_2HPO_4 , $NaHCO_3$ 를 이용하여 만든 합성폐수이다. 유입수 기질 농도는 CH_3OH 를 이용하여 $TBOD_5$ 농도를 150 mg/L, 질소 농도는 NH_4Cl 을 이용하여 T-N 농도를 30 mg/L로 제조하였다.

유입 T-P의 경우 KH_2PO_4 (2.5 mg/L)와 K_2HPO_4 (2.5 mg/L)를 사용하여 5 mg/L로 설정하였으며, 필요한 알칼리도는 $NaHCO_3$ 를 사용하여 400 mg/L as $CaCO_3$ 로 맞추어 공급하였다. 각 조건별 Alum 주입량에 따른 인 처리 효율 도출을 위해 유입수와 포기조, 방류수 지점에서 Sample 분석을 실시하였으며, 방류수 수질에 영향을 줄 수 있는 유입수 기질의 농도, 유입유량, 슬러지체류시간(Sludge Retention Time, SRT), 슬러지 반송유량, DO 농도, pH, 온도는 동일하게 유지하였다. 조건별 실험 기간 동안의 운전조건을 Table 1에 나타내었다.

반응조 내 응집제 직접 주입 시 주입량에 따라 인 처리 효율을 도출하기 위하여 mole Al : mole P 비를 변화하면서 실험을 수행하였으며, 모드별 운전 조건을 Table 2에 나타내었다.

2.3. Alum 주입에 따른 SOUR 측정

응집제 주입량에 따라서 미생물에 미치는 영향을 분석하기 위하여 산소 소비율 장치를 사용하였으며, Fig. 2에 본

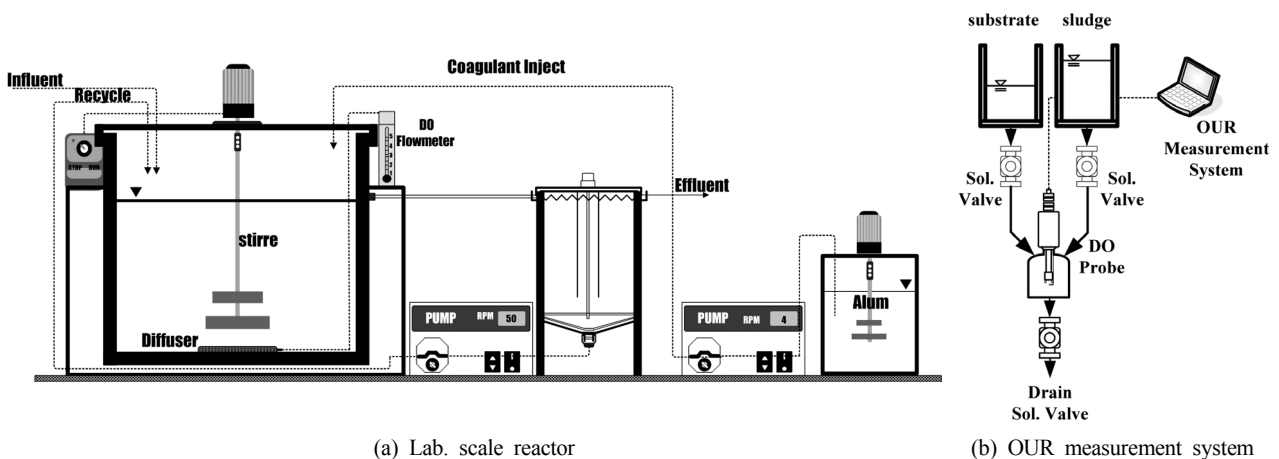


Fig. 1. Schematic diagram of lab. scale reactor (a) and OUR measurement system (b).

Table 1. Experimental condition of lab. scale reactor

Experimental condition							
Aerobic volume L	Influent flow L/day	Return sludge L/day	pH	Temp. °C	DO Conc. mg/L	SRT day	HRT hr
30	100	100	7~8	20	2~3	20	7.2

Table 2. Experimental condition of mole Al : mole P

Coagulant	Initial T-P (mg/L)	Mode (mole Al : mole P)					
		Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6
Alum, Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18H ₂ O, 8%	5.0	0 : 1	0.25 : 1	0.5 : 1	0.75 : 1	1 : 1	1.25 : 1

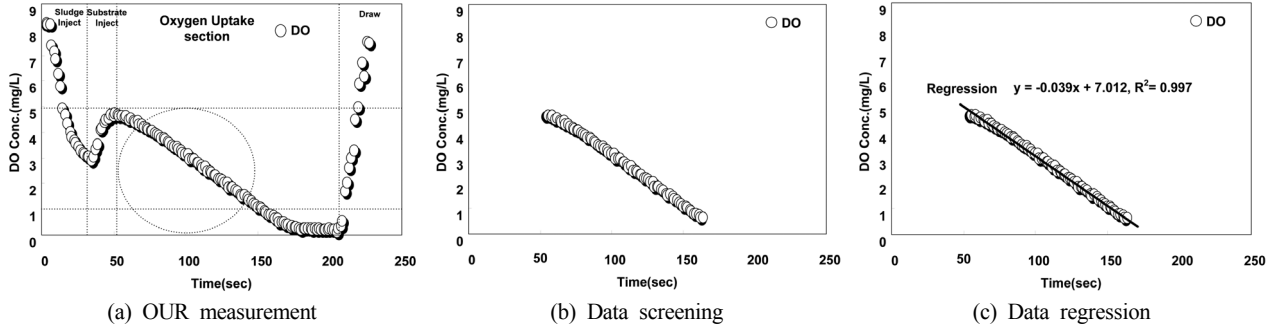


Fig. 2. Measurement of oxygen uptake rate, data screening and data regression.

프로그램 실행 중 산소 소비율에 대한 정보를 제공하는 연산 작업의 예를 나타내었다. 측정 장치로부터 전송받은 산소 소비율 결과 값은 슬러지 유입, 기질 유입, 교반, 배출 및 세척의 측정 순환 사이클로부터 실시간 DO 농도 분석을 통하여 이루어진다. 산소 소비율에 대한 정보는 5분 간격으로 측정된 DO 농도의 수치들 중 미생물이 기질을 소비하면서 얻어진 부분의 변화된 수치를 사용하였다(주현종 등, 2010). Fig. 2(a)는 5분 단위로 산소 소비율 측정 반응기내 Polarographic 타입의 DO probe(YSI 5905/5010/200)를 통하여 슬러지 유입, 기질 유입, 교반, 배출 및 세척 시 측정된 DO 농도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2(b)는 측정된 DO 농도 수치 중 유효한 값을 얻는 과정이며 본 실험 중 유효한 값은 기질이 주입되어 DO 농도가 감소하는 구간부터 1 mg/L로 되는 지점까지로 설정하였다. Fig. 2(c)는 회귀분석을 이용하여 산소 소비율을 얻는 과정을 나타낸 것이다.

2.4. 수질 분석 방법

시료 채수는 매일 동일한 시간에 실시하였으며 시료의 항목별 분석 방법은 Standard Methods(APHA, 2005)에 준하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유입수 특성

운전기간(2009. 10~2010. 7) 동안의 실험에 의한 유입수 특성을 Table 3에 나타내었으며, 조건별 응집제 주입량에 따라 동일한 원수 조건하에 운전하였다.

3.2. Alum 주입량에 따른 공정 운전 결과

해당 모드별 운전 결과를 Table 4에 나타내었으며, 반응조의 MLVSS는 Mode 1, 2, 3, 4, 5, 6에서 평균 3,125~3,269 mg/L로 운전되어 적은 농도 변화를 나타냈다. 하지만 MLVSS/MLSS비의 경우 각각 0.96, 0.91, 0.87, 0.86,

Table 3. Characteristics of influent in the lab. scale reactor (Mode : 1~6)

Constituent	Influent concentration (mg/L, except pH)		
	Min.	Max.	Ave.
pH	7.8	8.2	8.0
Alk	314.0	458.0	394.2
TBOD ₅	137.4	158.6	147.9
NH ₃ -N	24.2	33.0	28.1
T-P	4.7	6.0	5.1

0.86, 0.84로 응집제 주입량이 증가할수록 낮아지는 경향을 나타냈다. 이는 무기 성분 계열의 응집제 주입으로 인해 반응조 내 슬러지와 결합하여 MLSS 농도가 증가한 것으로 판단된다. 어성욱(1999)의 응집제 주입과 MLSS 증가에 대한 연구 결과에서 30 mg/L의 응집제를 주입 하였을 경우 응집제 미 주입 공정에 비해 MLSS가 1.4배 증가한 것으로 나타났으며, 본 연구 결과에서도 최대 1.2배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

응집제 주입에 따른 Alkalinity 감소에 대한 경향은 응집제 주입량에 따라 방류수 농도가 307.2, 283.8, 136.3, 121.2, 114.8, 106.3 mg/L as CaCO₃로 감소하는 경향을 보였으며, 농도변화를 Fig. 3에 나타냈다.

TBOD₅의 경우 유입 TBOD₅는 응집제 mole 비율 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25에서 각각 평균 153.2, 153.2, 146.3, 143.3, 146.3, 143.3 mg/L로 나타났으며, 방류 TBOD₅는 각각 평균 5.7, 5.6, 5.8, 9.8, 11.4, 14.5 mg/L로 96.3, 96.4, 96.0, 93.1, 92.2, 89.9%의 평균 처리효율을 보였다. 조건별 응집제 주입량에 따른 TBOD₅ 변화는 Mode 1, 2, 3에서 95% 이상으로 안정적인 처리 효율을 나타냈지만, 그 이상의 응집제 주입 시 처리 효율이 감소하는 경향을 보였으며, 농도 변화를 Fig. 4에 나타냈다.

T-P의 경우 유입 농도가 응집제 mole 비율 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25에서 각각 평균 5.12, 5.12, 4.98, 5.13, 4.98, 5.13 mg/L로 나타났으며, 방류 T-P가 각각 평균 4.46, 2.18, 0.94, 0.77, 0.44, 0.18 mg/L로 12.8, 57.5, 81.1, 85.0,

Table 4. Removal efficiency in the lab. scale reactor ('09.10 ~ '10.07)

Mode	mole Al : mole P		Influent (mg/L)			Effluent (mg/L)			Removal efficiency (%)		
			Min.	Max.	Ave.	Min.	Max.	Ave.	Min.	Max.	Ave.
Mode 1 0 : 1		Alk.	314.0	458.0	430.3	270.0	328.0	307.2	14.0	33.6	28.2
		TBOD ₅	142.4	157.4	153.2	4.5	8.0	5.7	94.9	97.0	96.3
		T-P	4.80	5.90	5.12	4.10	4.90	4.46	1.0	20.8	12.8
Mode 2 0.25 : 1		Alk.	314.0	458.0	430.3	264.0	296.0	283.8	14.0	42.4	33.5
		TBOD ₅	142.4	157.4	153.2	5.3	5.7	5.6	96.0	96.6	96.4
		T-P	4.80	5.90	5.12	1.50	2.60	2.18	50.0	70.0	57.5
Mode 3 0.5 : 1		Alk.	324.0	384.0	357.4	122.0	160.0	136.3	57.9	67.7	61.8
		TBOD ₅	137.4	158.6	146.3	4.8	8.5	5.8	94.4	96.9	96.0
		T-P	4.65	5.95	4.98	0.80	1.20	0.94	76.0	83.8	81.1
Mode 4 0.75 : 1		Alk.	372.0	402.0	388.3	106.0	128.2	121.2	67.5	71.5	68.8
		TBOD ₅	138.0	148.6	143.3	9.4	10.6	9.8	92.6	93.5	93.1
		T-P	4.80	5.40	5.13	0.65	0.85	0.77	83.1	88.0	85.0
Mode 5 1 : 1		Alk.	324.0	384.0	357.4	82.0	142.0	114.8	61.8	74.7	67.9
		TBOD ₅	137.4	158.6	146.3	10.4	13.4	11.4	91.1	93.4	92.2
		T-P	4.65	5.95	4.98	0.30	0.60	0.44	87.9	95.0	91.1
Mode 6 1.25 : 1		Alk.	372.0	402.0	388.3	101.0	115.0	106.3	70.5	74.2	72.6
		TBOD ₅	138.0	148.6	143.3	13.7	14.8	14.5	89.3	90.2	89.9
		T-P	4.80	5.40	5.13	0.15	0.32	0.18	94.0	97.2	96.5

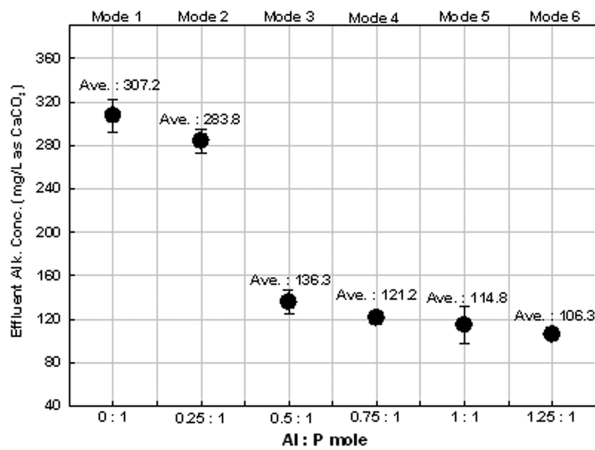


Fig. 3. Effluent alkalinity concentration with Al : P mole ratio.

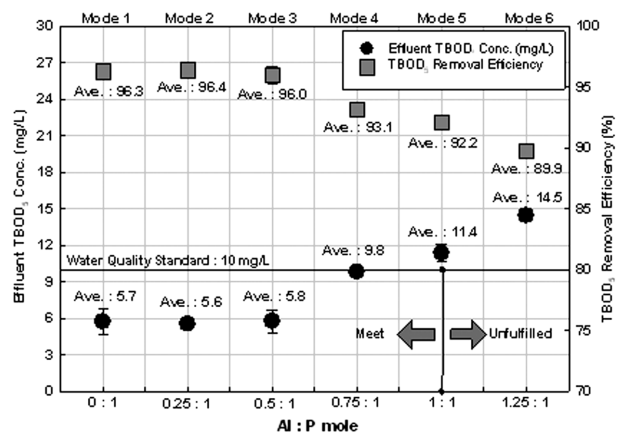


Fig. 4. Effluent TBOD₅ concentration and removal efficiency with Al : P mole ratio.

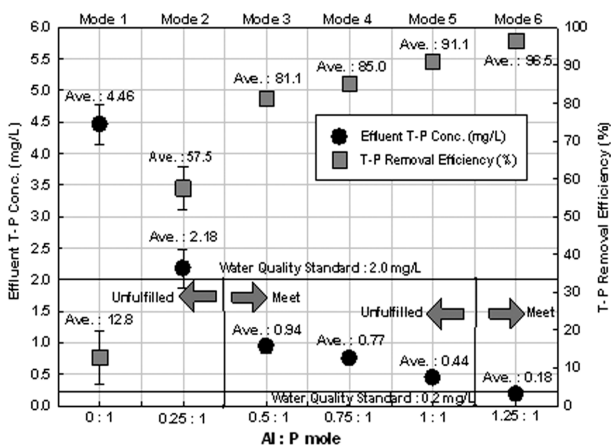


Fig. 5. Effluent T-P concentration and removal efficiency with Al : P mole ratio.

91.1, 96.5%의 평균 처리효율을 보였다. 응집제 주입량 증가에 따라 방류수 T-P 농도가 감소하는 것을 볼 수 있었으며, 농도 변화를 Fig. 5에 나타냈다.

Xie 등(2005)의 화학적 인 처리 연구에서 Al : P mole 비율을 1.5에서 4.0까지 실험한 결과 총 인 처리효율이 40%에서 90%까지 증가하는 것으로 나타났으며, Tchobanoglous and Burton (2004)의 연구결과에서는 Al : P 비율 1 : 1 반응에서 95%의 인 처리효율을 보였다. 또한 환경부(2009)의 총 인 처리 강화 시범운영 연구에서 Al : P mole 비율을 2.1, 3.0, 3.9로 실험한 결과 88.0, 96.5, 94.8%의 총 인 처리효율을 나타냈다. 기존 연구와 유사한 인 처리효율의 경향을 보이고 있지만 Al : P mole 비율에 따라 인 처리효율이 다소 차이가 있는 것으로 나타났으며, 이는 실제 폐수가 아닌 합성폐수의 사용으로 인한 것으로 판단된다.

3.3. Alum 주입량에 따른 미생물 활성도 변화

응집제 주입이 미생물 활성도에 미치는 영향을 간접적인 지표로 활용되어지는 SOUR 측정값을 토대로 평가하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 응집제 주입량을 0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.0, 1.25 mole로 하여 운전한 결과 평균 SOUR 값은 각각 105.0, 85.3, 65.7, 54.8, 49.7, 43.2 mg O₂/g MLVSS·hr로 측정되었으며, 주입량이 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다. 응집제를 주입하지 않은 생물반응조의 경우 SOUR 값이 105.0 mg O₂/g MLVSS·hr로 가장 높은 값을 나타냈으며, 응집제 주입량을 높일수록 SOUR 값은 최소 43.2 mg O₂/g MLVSS·hr까지 감소되는 것을 볼 수 있었다. 이는 응집제 성분이 미생물 활성도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

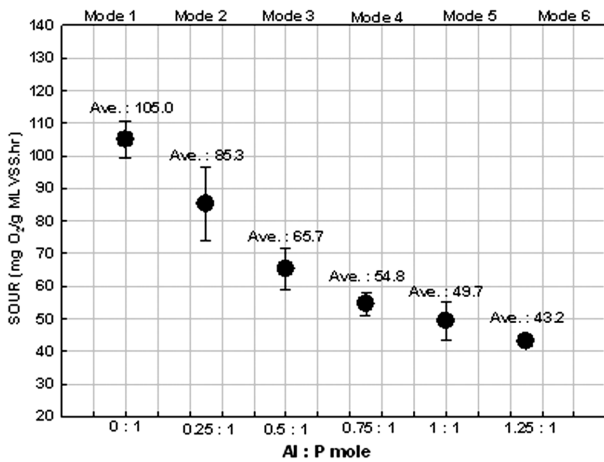


Fig. 6. The relationship between Al : P mole ratio and SOUR.

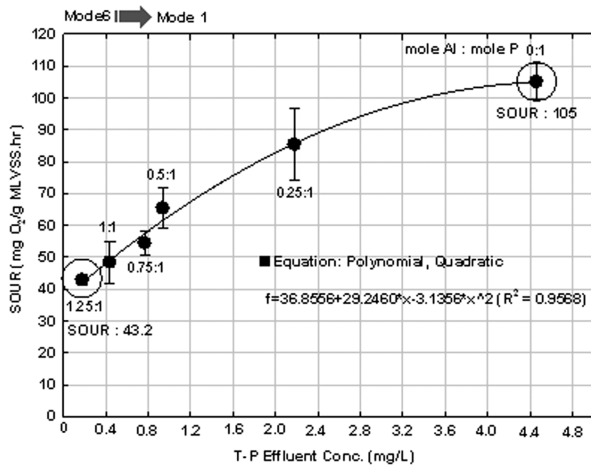


Fig. 7. The relationship between T-P effluent concentration and SOUR with Al : P mole ratio.

Al-Mutairi (2006)의 Alum 주입에 따른 독성 평가 연구에서 응집제 주입량이 증가할수록 방류 COD 값이 증가하였으며, Effective Concentration 50(EC 50) 평가 시 주입량 증가에 따라 EC 50 값이 감소하는 경향으로 Alum 주입이 미생물에 독성을 미치는 결과를 나타냈다. 따라서 Alum 주입에 따른 SOUR 측정값은 미생물 활성도에 미치는 영향을 객관적으로 판단할 수 있는 지표로 활용이 가능하다고 사료된다.

3.4. Alum 주입에 따른 인 처리 효율과 미생물 활성도와의 상관관계

Al : P mole 비율 변화에 따른 방류수 인 농도와 SOUR 및 TBOD₅와의 상관관계를 Fig. 7, 8에 나타내었다. 실험 결과 응집제 주입량에 따라 인 처리와 SOUR의 상관관계는 $f = 36.8556 + 29.2460x - 3.1356x^2$ ($R^2 = 0.9568$) 형태의 함수로 나타났다. 또한 TBOD₅와의 상관관계는 $f = 4.1342 + (3.8540/x) + (-0.3580/x^2)$ ($R^2 = 0.9341$) 형태의 함수로 나타났으며, 인 처리를 위한 Alum 주입이 SOUR 및 TBOD₅와의 관계를 통해 미생물 활성도에 영향을 미칠 수 있다는 결과를 도출하였다.

또한 2012년부터 강화되는 공공하수처리시설의 I지역에서 IV지역에 해당되는 총인 방류수 수질기준 농도를 본 연구에서 도출된 관계식에 적용하였을 경우 SOUR과 TBOD₅의 수치를 Table 5에 나타냈다.

Huang and Cheng (1984)의 연구에서는 SOUR 감소에 따라 방류수 COD 농도가 높아지는 결과를 나타냈으며, 이러한 결과를 토대로 SOUR과 미생물 활성도는 상호 비례적인 관계로 표현하고 있다. 즉 SOUR 값의 증가에 따라 미

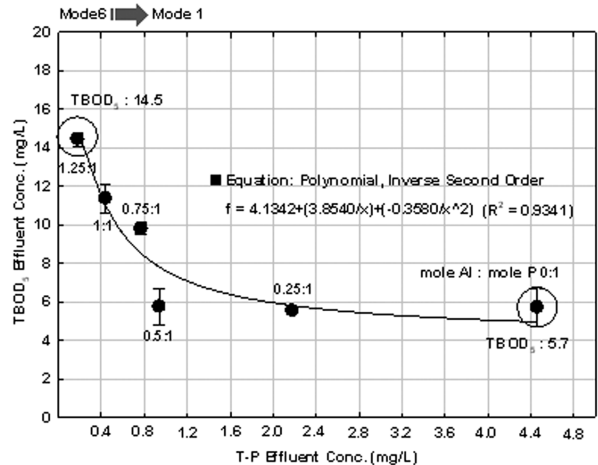


Fig. 8. The relationship between T-P effluent concentration and TBOD₅ with Al : P mole ratio.

Table 5. The SOUR and TBOD₅ data with water quality standard

Parameter	I area	II area	III area	IV area
Water quality standard (mg/L)	0.2	0.3	0.5	2.0
SOUR (mg O ₂ /g MLVSS·hr)	42.58	45.34	50.69	82.80
TBOD ₅ (mg/L)	14.45	13.00	10.41	5.97

생물 활성도 또한 증가한다고 나타내고 있으며, 본 연구결과에서도 Alum 주입량 증가에 따라 총 인의 처리효율은 증가하는 반면 SOUR이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 그에 따라 방류 TBOD₅ 농도 또한 증가하는 것을 볼 수 있었다.

따라서 화학적 인 처리를 위한 응집제 주입 시 미생물에 미치는 영향을 평가 후 응집제 주입량을 결정하여 주입하는 것이 바람직하다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 Alum 주입에 따른 인 처리 효율과 SOUR을 토대로 응집제 주입이 미생물 활성도에 미치는 영향을 분석하였다. 이에 따라 Al : P mole 비율에 따라 인 처리 효율을 살펴보았으며, 동시에 SOUR과의 관계를 도출하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 생물반응조 내 Alum 주입에 따른 총인 처리 효율과 미생물 활성도 지표로 활용되어지는 SOUR은 2차 함수형태의 상관관계를 가지고 있으며, Alum 주입량 증가에 따라 인 처리효율은 증가하는 반면, 미생물 활성도는 감소하는 경향을 나타냈다.
- 2) Alum 주입에 따른 인 처리 효율의 경우 주입량 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 동일한 조건에서 TBOD₅의 경우 일정 비율 이상에서 처리효율이 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 총인 처리 효율 측면에서 생물반응조 내 응집제 주입은 효과적인 방법이지만 다른 오염물질을 처리하는데 있어 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단된다.
- 3) 응집제 주입에 따른 인 처리와 미생물 활성도 지표로 활용되어지는 SOUR과의 관계를 토대로 총인 방류수 수질기준이 가장 강화 될 I지역(TP 0.2 mg/L 이하)에서의 SOUR을 도출한 결과 IV지역(TP 2.0 mg/L 이하)에 비해 약 2.5배 낮은 것으로 나타났다. 즉 기존 2.0 mg/L 농도 기준에서 강화된 0.2 mg/L의 농도를 만족하기 위해서는 응집제 주입이 증가되어야 하며, 그 결과 미생물 활성도에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 따라서 강화되는 총인 수질 농도를 만족하기 위해서는

SOUR를 측정하여 TBOD₅ 등 다른 오염물질 처리효율에 영향을 미치지 않은 범위에서 응집제를 주입해야 할 것으로 판단된다. 또한 미처리 된 총인은 후단에 별도의 처리시설을 구축하여 처리하는 방법 등을 고려해야 할 것으로 사료된다.

- 5) 본 연구는 Al : P 비율에 따른 인 처리 효율과 SOUR의 변화 도출을 위하여 합성폐수를 이용한 결과이며 수온, pH, DO 농도 등의 인자를 적용한 추가적인 연구가 필요 할 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서 사용한 Alum 뿐만 아니라 종류별 응집제에 대해 인 처리 효율 및 SOUR 측정이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

신항식, 박종운(2002). 질소 인 처리기술, 환경관리연구소.
 어성욱(1999). 활성슬러지 포기조에 직접 응집제 주입법에 의한 질산화 영향. *산업연구*, 1(1), pp. 275-294.
 주현종, 김성철, 이광현(2010). SOUR을 이용한 하수처리시설 포기조 설계 적용에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, 26(1), pp. 140-147.
 환경부(2007). *수질오염총량제 시행성과와 2단계 총량제 추진방향*. 유역총량 제도과.
 환경부(2009). *하수처리시설 총인 처리강화 시범운영 연구*. 환경관리공단.
 환경부(2010). *공공하수처리시설의 방류수 수질기준*.
 Al-Mutairi, N. Z. (2006). Coagulant toxicity and effectiveness in a slaughterhouse wastewater treatment plant. *Science Direct*, 65, pp. 74-83.
 APHA, AWWA and WEF (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21th Ed., Washington D.C. USA.
 Huang, Y. C. and Cheng, M. D. (1984). Measurement and new applications of oxygen uptake rates in activated sludge process. *Journal WPCF*, 56(3), pp. 27.
 Tchobanoglous, G. and Burton, F. L. (2004). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, McGraw-Hill, New York, N. Y.
 Xie, W., Wang, Q., Ma, H., Ohsumi, Y., and Ogawa, H. I. (2005). Study on phosphorus removal using a coagulation system. *Process Biochemistry*, 40, pp. 2623-2627.