생물공정 처리수의 PAC (Poly Aluminum Chloride) 응집에 의한 고효율 인 제거 특성

High-Rate Phosphorous Removal by PAC (Poly Aluminum Chloride) Coagulation of A2O Effluent

황응주† · 천효창
Eung-Ju Hwang† · Hyo-Chang Cheon

대구대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Daegu University

(2009년 5월 18일 접수, 2009년 8월 14일 채택)

ABSTRACT : High-rate phosphorous removal by PAC (poly aluminum chloride) coagulation of A2O effluent was investigate to meet the stringent requirement of wastewater discharge from municipal wastewater treatment plant. A series of jar tests were conducted to find optimum coagulation condition and to enhance removal efficiency. The optimum volumetric concentration of PAC was 30 ppm (2.81mol Al/mol P by mol ratio). Only 17.2% of soluble P was removed for 30 minutes' settling without PAC addition, while this increased to 30.3% by dosing 10ppm PAC. It even increased conspicuously from 49.3% to 88.4% by increasing PAC dose from 20 ppm to 30 ppm. 92.4% of total P was removed by 30 ppm PAC, and the effluent concentration (0.3 mg/L) was acceptable for discharge. The optimum value of coagulation time, settling time, and pH were 4minutes, 20 minutes, and 7.0, respectively. It was not necessary to control pH of raw sample whose pH was 7.0. Soluble P removal was remarkably enhanced at pH 7.0. This implied that sweep floc formation by $Al(OH)_3$ was the main mechanism of coagulation for soluble P removal. Influent and effluent of secondary clarifier were tested for coagulation, and the effluent was better for high-rate P removal. It resulted in 0.18 mg/L of P and 95.4% of P removal by coagulation. It was favorable to recycle the treated water to coagulation tank and the optimum recycle ratio was 0.3.

Key words : *Poly aluminum chloride, Total phosphorous, Chemical coagulation, A2O process, PH*

요약 : 2011년부터 시행될 2단계 수질 오염 총량제에 대비하여 고효율 인 제거 공정 개발이 필요하며 본 연구에서는 생물학적 처리와 화학적 응집처리를 조합한 공정이 대안으로 검토되었다. 2세대 응집제로서 최근 많이 사용되고 있는 PAC(poly aluminum chloride)를 이용하고 실제 하수종말처리장 A2O 공정의 호기조 유출수를 시료로 하여 인 응집 특성 및 적정 조건, 효율 향상 방안 등에 대해 실험연구를 수행하였다. 먼저 적정 PAC 투입 농도는 부피기준으로 30 ppm, mol비로는 2.81 mol Al/mol P인 것으로 나타났다. 단순침전에서 17.2%에 불과하던 용존성 인의 제거율이 PAC 10 ppm 투입으로 30.3%까지 증가하였으며, 20 ppm에서 30 ppm으로 PAC 투입량을 증가시킬 때 49.3%에서 88.4%로 제거율을 크게 향상시킬 수 있었다. 이때 총 인의 제거율은 92.4%, 유출수 총 인 농도는 0.3 mg/L로 총량제에 부합하는 방류수 수질을 달성할 수 있었다. 적정한 응집시간은 4분, 침전시간은 20분, 초기 pH는 7로 나타났고 원시료 (pH 7.0)는 별도의 pH 조절 없이 응집 가능한 것으로 판단되었다. pH 7 조건에서 용존성 인의 제거가 크게 향상되었으며, 추가적인 확인 연구가 필요하나, 이는 인의 경우 $Al(OH)_3$에 의한 sweep floc formation이 주요 제거 기작임을 의미하였다. 2차침전조 유입부에 PAC를 투입하여 2차침전조를 응집침전조로 활용하는 방안과 별도의 응집침전조를 2차침전조 후단에 설치하여 PAC를 투입하는 방안을 비교한 결과 PAC 투입량 대비 인 제거효율 증진 관점에서 후자가 바람직한 것으로 조사되었다. 이때 처리수의 인 농도는 0.18 mg/L, 제거율은 95.4%로 향상시킬 수 있었다. 끝으로 응집 처리수를 반송할 경우 인 제거 효율을 높일 수 있었으며 적정 반송율은 0.3인 것으로 분석되었다.

주제어 : Poly aluminum chloride, 총 인, 화학 응집, A2O 공정, 수질 총량제

1. 서 론

수질오염 총량제는 유역의 목표수질을 설정하여 당해 유역에서 배출되는 오염물질의 배출총량이 목표수질을 달성할 수 있는 양 이하가 되도록 관리하는 제도이다. 현재 BOD를 대상으로 1단계 총량제가 실시 중이며 2011년부터는 2단계 총량제가 실시될 예정에 있다. 2단계에서는 각 수계별 하류지역의 부영양화를 방지할 수 있도록 총 인 농도를 규제하는 방향으로 계획되어 있다.[1] 한 연구에 의하면 2단계 수질 총량제에 대비한 대구지역 하수종말처리장 총 인의 2015년 방류수질 목표는 개략적으로 0.22~0.32 mg/L의 범위가 되는 것으로 조사되었다.[2] 그러나 대부분의 하수종말처리장에서는 현재의 설비로 이러한 수질목표를 달성하기 어려운 형편이라 할 수 있다. 일례로 인 제거가 가능한 A2O공정을 운영하고 있는 한 하수종말처리

† Corresponding author : E-mail : ejhwang@daegu.ac.kr Tel : 053-850-6694 Fax : 053-850-6699

Table 1. Experimental condition

Run	Main parameter	InitialT-P(mg/L)	PAC conc.(ppm)	Coag. time (min)	Settling time (min)	pH
1	PAC concentration (0, 10, 20, 30, 40, 50 ppm)	3.94	-	4	20	7.0
2	Initial T-P (3.32, 3.71, 3.94, 4.03 mg/L)	-	30	4	20	7.0
3	Coagulation time (1, 2, 4, 6 min)	3.94	40	-	20	7.0
4	Settling time (10, 20, 40, 60, 90, 120 min)	3.94	40	4	-	7.0
5	pH (3, 5, 7, 9, 11, 12.5)	3.30	30	4	20	-
6	Pre-settling (yes, no)	3.94	0-50	4	20	7.0
7	Recycling ratio (0, 0.3, 0.5, 1)	3.32	30	4	20	7.0

장의 경우 2008년 1월~4월 평균 방류수 총 인 농도가 1.42 mg/L로서 총량제 목표수질을 달성하기 위해서는 시급한 대책 마련이 필요한 상황이다.

인은 자연계에서는 기체로서 존재하지 않으며, 침전물을 만들기 쉽고[3], 인산염 중 칼슘염을 제외하고 그 용해도는 낮으며, 토양 중에서의 확산, 이동은 적기 때문에[4] 토양에 축적되고 순환하기 어려운 물질이다. 기체 상태로 전환이 어렵기 때문에 항상 침전물의 형태로 물로부터 분리되며, 이 같은 이유로 생물학적 공정에서는 미생물에 흡수된 침전물의 형태로, 화학적 공정에서는 응집제에 화학적 또는 물리적으로 결합된 침전물의 형태로 제거된다. 그러나 생물학적 처리에서 미생물에 흡수되어 제거 가능한 인의 양에는 한계가 있어 대략 1 mg/L의 농도를 생물공정에서 달성 가능한 인 농도로 보는 것이 일반적이다.[5] 따라서 총량제에서 요구되는 것과 같은 고효율 인 제거를 위해서는 생물학적 처리와 화학적 처리의 병행이 필요하다. 화학적 처리는 기존의 하수처리시설에 간단한 추가 설비로 고효율의 인 제거가 가능하며 급격한 유입수질 변동에 능동적으로 대처할 수 있는 장점을 갖고 있다. 일본의 경우 생물학적 처리와 화학적 처리를 병행하여 총인 농도를 최대 0.02 mg/L까지 저감시킬 수 있으며 BOD 1 mg/L, COD 5 mg/L 등 고도 수질의 달성이 가능한 것으로 조사되기도 하였다.[2] 한편 화학적 처리에 사용되는 응집제는 알루미늄계와 철염계로 구분할 수 있는데, 본 연구에 앞서 Alum, $FeCl_2$, $FeCl_3$, $FeSO_4$, PASS (poly aluminum sulfate silicate), PACS (poly aluminum chloride silicate), PAC (poly aluminum chloride)등을 이용하여 하수처리장 인 제거 시험을 실시한 결과 가장 높은 인 제거 효율을 보인 PAC를 적정 응집제로 선정할 수 있었다.[2]

지금까지 응집제에 대한 연구는 다양한 오염성분들의 응집기작을 규명하거나 응집제를 이용한 색도나 탁도 유발 물질의 총체적인 제거에만 치중해왔다.[6] 또한 2세대 응집제인 PAC, PASS, PACS등의 응집 특성에 대한 연구는 많이 진행되었으나[7~11] 대부분 합성된 시료를 이용한 실험[12,13]이거나 BOD 등의 유기물질 제거가 주목적이었으며[14,15] 실제 하폐수를 시료로 하여 인을 주요 응집 대상으로 실험한 연구 결과가 보고된 경우는 많지 않았다. 따라서 본 연구에서는 실제 하수종말처리장 A2O공정의 호기조 유출수를 시료로 하여 유입수 총인 농도, PAC 투입 농도, 응집시간, 침전시간, pH 등의 인자가 인 응집에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 적정 PAC 투입지점 결정을 위해 최종침전지 상징수를 응집 처리할 경우의 장단점을 검토하였고 응집처리수의 반송을 통해 응집효율을 향상시키는 방안과 적정 반송율을 조사하였다. 이를 통해 현장에 직접 적용 가능한 고효율 인 제거 공정의 최적 설치 및 운전 조건을 도출하였다.

2. 실험 재료 및 방법

대구시의 한 하수종말처리장에서 운전 중인 A2O공정의 호기조에서 채취한 시료를 응집실험의 대상으로 하였다. 시료의 pH, TCOD, SCOD, TSS, VSS, TP, SP (soluble P) 농도는 각각 7.0, 377.4 mg/L, 30.4 mg/L, 1,910 mg/L, 1,640 mg/L, 3.30~3.94 mg/L, 1.54~1.73 mg/L이었다. PAC는 경기화학사 제품을 사용하였고 Al_2O_3함량은 17%이며 비중은 1.37 mg/L이다. 응집실험은 Jisco사의 J-65모델 Jar tester를 이용하여 실시하였다. 시료 1 L를 비이커에 담아 PAC를 투입하고 Jar tester에서 52 rpm으로 4분간 교반 후 20분 침전, 상등액을 분취하였다. 응집 전후 시료의 TP를 Standard Method (digestion & stannous chloride method)에 따라 분석하였으며 필요에 따라 GFC (0.4 ㎛)로 여과한 시료의 인 농도를 측정하였다. 인 농도 측정에 사용한 자외선분광기는 Shimadzu사의 UV-1700모델이다. 실험은 7회에 걸쳐 진행되었으며 각 실험의 조건은 Table 1과 같다. 여기서 PAC의 투입 ppm 농도는 부피기준이며 Run 5의 초기 pH는 NaOH용액과 HCl 용액을 이용하여 조절되었다. Run 6에서는 전침전(pre-settling)을 한 경우와

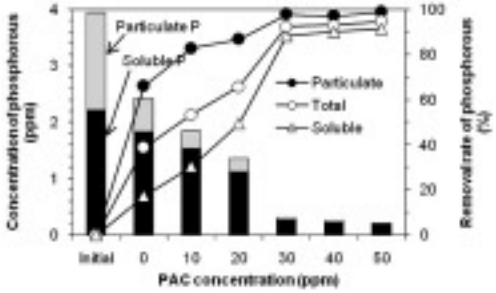

Fig. 1. Effect of PAC concentration on the removal of phosphorous.

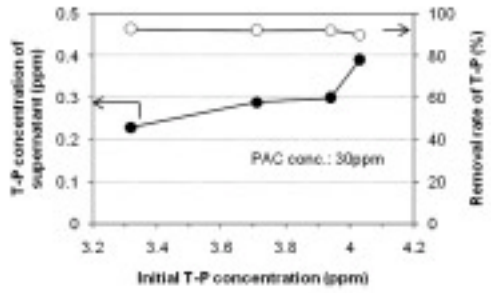

Fig. 2. Effect of initial phosphorous concentration on its removal.

하지 않은 경우의 응집 효율을 비교하였으며, 전침전 시간은 하수처리장 2차침전지 체류시간에 해당하는 4시간으로 하였다. Run 7에서는 PAC를 30 ppm 투입하여 52 rpm으로 4분간 교반 후 20분 침전, 상등액을 분취하고 이를 원시료에 0.3:1, 0.5:1, 1:1비율로 혼합하여 다시 PAC 30 ppm을 주입하여 응집 실험하였다. 이는 응집 처리수 반송의 영향을 살펴보기 위함이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PAC 투입 농도와 초기 총 인 농도에 따른 인 제거 특성

A2O공정 호기조 유출수 시료의 총인(T-P) 농도는 3.94 mg/L로서 이 중 입자성 인이 1.73 mg/L, 용존성 인이 2.21 mg/L이었다. PAC 투입 농도를 0, 10, 20, 30, 40, 50 ppm (시료 총인 농도 기준 0, 0.94, 1.87, 2.81, 3.75, 4.69 mol Al/mol T-P 또는 0, 3.21, 6.42, 9.64, 12.87, 16.09 mg Al/L)으로 증가시킴에 따라 인 제거 효율이 **Fig. 1**과 같이 향상되었다. PAC를 투입하지 않고 단순 침전시킬 경우(0 ppm) 입자성 인의 65.9%가 제거되었으나 용존성 인은 17.2%로 제거율이 낮았고 총 인을 기준으로 38.5%의 제거가 가능하였다. 이때 총 인의 농도는 2.42 mg/L로서 2단계 총량제에서 요구되는 대구지역 하수종말처리장 방류 농도 산출 범위(0.22~0.32 mg/L)[2]를 크게 초과하였다. 따라서 추가적인 인 제거 공정이 필요하며 특히 용존성 인의 제거 효율을 높이는 것이 관건임을 알 수 있다. 용존성 인의 경우 PAC를 10 ppm 투입할 경우 제거율이 다소 증가하였고 20, 30 ppm으로 투입율이 증가할수록 제거율의 증가가 더욱 커졌다. 특히 20에서 30 ppm으로 PAC농도가 증가할 때 많은 양의 용존성 인이 제거되었다. 반면 30 ppm 이상의 투입율에서는 용존성 인은 물론이고 총 인의 제거율도 크게 증가하지 않았다. 따라서 PAC 투입에 따른 효율과 경제성을 고려할 때 30 ppm의 투입율이 적정한 것으로 사료되었다. 참고로 PAC 투입율 30, 40, 50 ppm 각각에 대해 응집 후 총 인의 농도는 0.3, 0.27, 0.21 mg/L이었다. 일반적으로 화학적 인 응집에 필요한 금속염의 첨가량은 양론식에서 요구되는 양의 1.5~2.5배, 즉 1.5~2.5 mol metal/mol P로 알려져 있으나[5] 본 연구의 PAC 30 ppm은 2.81 mol Al/mol P로서 다소 높게 나타났다. 이 같은 결과의 원인은 명확하지 않다. 다만 MLSS가 높을 경우 투입된 PAC가 고형물에 포획된 형태로 소모될 수 있으므로 입자성 및 용존성 인의 비율과 같은 하수의 특성에 따라 적정 mol비에 차이가 있을 것으로 판단된다. 한편 시료를 채취할 때마다 총 인 농도에 변동이 있었으며 그 영향을 **Fig. 2**와 같이 평가한 결과, PAC 투입 농도를 30 ppm으로 동일하게 할 때 초기 인 농도가 높을수록 응집 후 잔류 인 농도도 높아지고 따라서 다소 제거율이 떨어지는 것으로 나타났다. 특히 초기 인 농도 4.03 mg/L 일 때 잔류농도가 0.39 mg/L로 상승하여 하수처리장 현장에서 유입 T-P 농도에 따라 PAC 농도를 조절할 필요가 있을 것으로 판단된다.

3.2. 응집시간, 침전시간

PAC를 투입한 후 응집반응에 소요되는 시간과 침전에 소요되는 시간은 반응조의 부피를 결정하는 주요 인자이다. 먼저 응집시간에 따른 인 제거 특성은 **Fig. 3**과 같다. 응집시간 2분까지 많은 양의 인이 제거되었고 그 후로 4분이 경과할 때까지 서서히 인 농도가 감소하였다. 4분 경과 후는 응집시간을 증가시켜도 인 제거에 영향을 미치지 못하였으며 따라서 응집에 필요한 교반조의 체류시간은 4분이 적정한 것으로 나타났다. 아울러 응집 후 침전시간은 **Fig. 4**에서와 같이 20분이 적정한 것으로 나타났다. 한가지 언급할 것은 추가적인 인 제거 효율이 필요한 경우는 **Fig. 1**에서와 같이 PAC 투입량을 50 ppm으로 증가시켜 T-P를 0.21 mg/L로 감소시키는 것과 PAC 투입량은 40 ppm으로 유지하고 침전시간을 90분으로 증가시켜 T-P를 0.22 mg/L (**Fig. 4**)까지 감소시키는 방안을 함께 고려하여 보다 현장 상황에 맞고 경제적인 방법을 선택하는 것이 필요하다.

3.3. pH의 영향

일반적으로 PAC와 수중에 존재하는 콜로이드성 물질의 응집기작은 크게 두 가지로 나누어진다.[16] 첫째는 Al^{3+}, $AlOH^{2+}$,

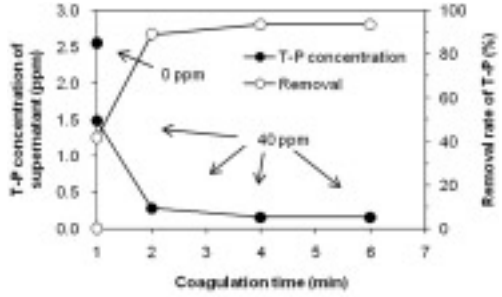

Fig. 3. Effect of coagulation time on the removal of phosphorous.

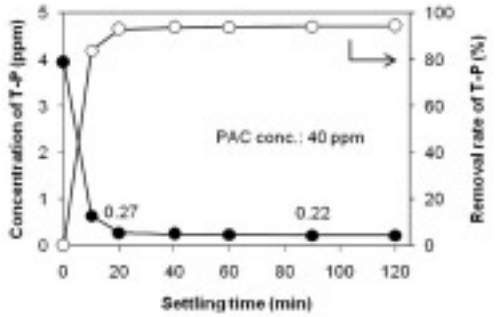

Fig. 4. Effect of settling time in coagulation on the removal of phosphorous.

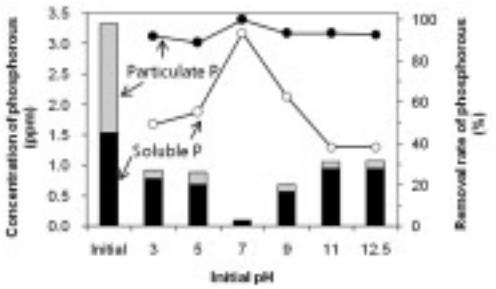

Fig. 5. Effect of initial pH on the removal of phosphorous (PAC 30 ppm).

$Al(OH)_2^+$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ 등의 PAC 유래 양이온이 콜로이드성 물질의 음전하부위가 갖는 제타전위를 감소시킴으로써 입자간 반발력을 최소화하여 응집이 일어나도록 하는 기작(흡착-전하중화 메커니즘, adsorption-charge neutralization)이다.[16,17] 둘째는 첫째 기작에 의해 형성된 floc이나 콜로이드물질이 중력에 의해 침전하는 $Al(OH)_{3(s)}$에 휩쓸려 제거되는 sweep floc formation 기작이다.[16,18,19] 이들 기작은 Al 화합물의 조성에 영향을 받으며 따라서 pH에 따라 응집제거 효율이 크게 변화할 수 있다. PAC 응집에 미치는 pH의 영향에 대해서는 많은 연구가 진행된 바 있다(Table 2).

이들 결과를 종합하면 PAC의 경우 pH 3~5.5 범위의 산성조건에서 응집 제거가 원활함을 알 수 있다. 또한 이들 연구에서 연구자들은 공통적으로 pH 7 이상의 알칼리 조건에서는 $Al(OH)_4^-$가 주로 생성되어 응집이 저해되는[6,15,19] 것으로 분석하고 있다. 한편 일부 연구에서 pH가 너무 낮은 강산성 조건에서는 응집효과가 좋은 $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ 등의 polymer 형태보다는 Al^{3+}, $AlOH^{2+}$, $Al(OH)_2^+$와 같은 monomer 형태가 주로 존재하여 응집효과가 낮은 것으로 분석하기도 하였다.[6,15,21,22] 본 연구에서는 주로 COD, 색도, humic substance들을 대상으로 한 앞선 연구들과는 다르게 적정 pH가 7로서 다소 높게 나타났다.(Fig. 5) 그 이유는 명확하지 않으나 다음과 같은 추정이 가능하다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 입자성 인의 경우 pH 변화에 크게 영향을 받지 않는 반면 용존성 인의 경우 pH에 영향을 크게 받으며 특히 pH 7에서 용존성 인 농도가 급격히 감소함으로써 pH 변화는 주로 용존성(엄밀히 0.4 ㎛ 미만 입자) 인의 응집에 영향을 미친다 할 수 있다. 한편, 하수 중 용존성 인은 대부분 ortho-P 즉 PO_4^{3-}형태의 인이며 COD, 색도, humic substance보다는 분자량이 낮은 특징을 갖고 있다. 한 연구에 의하면 국내 한 하수처리장 유출수 용존성 인의 70%가 ortho-P인 것으로 조사되었다.[23] 따라서 흡착-전하중화 기작에 의해 단위 응집 floc이 형성되었더라도 침전성이 불량하여 침전이 되기 위해서는 sweep floc 기작의 역할이 상대적으로 더 중요할 것으로 판단된다. Sweep floc 기작에 있어 중요한 $Al(OH)_{3(s)}$는 중성의 pH에서 가장 많이 존재하므로[5,21] 결과적으로 pH 7 조건에서 가장 높은 용존성 인 제거율을 달성할 수 있었던 것으로 추측된다. 다른 연구에서 최적으로 나타났던 pH 5에서 인 제거율이 낮았던 것은 $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ 등의 polymer가 많은 조건에서[21] 흡착-전하중화 기작은 pH 7에서보다 효과적으로 일어났으나 상대적으로 $Al(OH)_{3(S)}$의 분율이 낮아 sweep floc 기작이 제한적으로 일어났기 때문으로 사료된다. 결론적으로 하수처리장에서 채취한 시료의 초기 pH는 7.0으로서 응집 효율 증가를 위해 별도의 pH 조절은 필요 없는 것으로 판단된다.

Table 2. Previous reports on the effect of pH on coagulation of organic pollutants.

Wastewater	Pollutants	Coagulant	Optimum pH	Reference
Synthetic	Humic acid	PAC	5.0	6
Synthetic	Ortho-P	PAC	5.0	12
Landfill leachate	COD, color	PAC	5.5	14
Landfill leachate	COD, color	Alum	6.8	15
Pulp and paper mill wastewater	COD, color	PAC	3.0	20

3.4. 2차 침전 후 PAC 투입의 효과

하수 중 인의 응집 제거를 위한 PAC 투입지점은 유입수, 포기조, 침전조 유입 직전, 또는 2차침전조 상징수 등을 생각해 볼 수 있다. 유입수에 투입할 경우 생물학적인 인 요구량의 공급이라는 관점에서 바람직하지 않으며 포기조의 경우 BOD가 방해물질로 작용하여 PAC요구량이 증가할 수 있으므로 역시

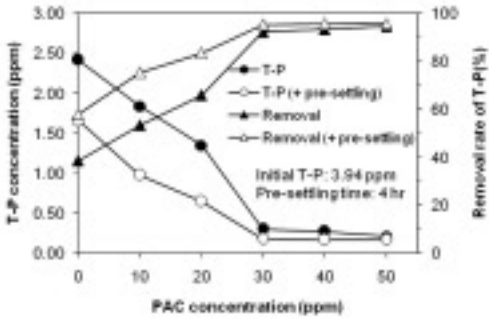

Fig. 6. Effect of pre-settling in the secondary clarifier on the subsequent coagulation of phosphorous.

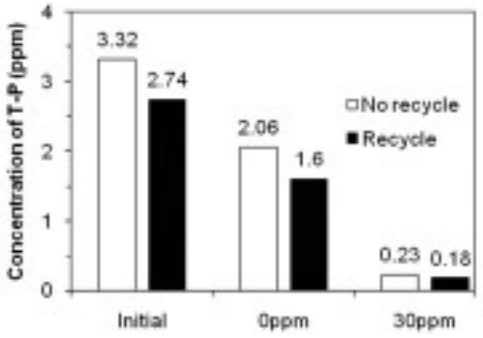

Fig. 7. Effect of recycling of coagulation supernatant on phosphorous removal.

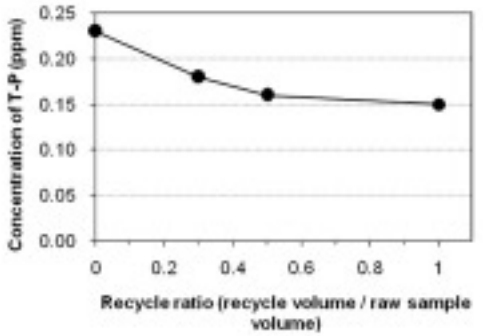

Fig. 8. Effect of recycling ratio on phosphorous removal.

바람직하지 않다. 침전조 유입 직전에 투입할 경우는 적절한 와류 형성과 4분 정도의 응집시간을 제공할 수 있도록 설비를 보완한다면 수리학적 체류시간이 긴 2차 침전조를 응집 침전조로 활용할 수 있으므로 이상적이라 할 수 있다. 한편 2차 침전조를 거친 후 고형물이 낮은 상태에서 PAC를 투입하는 것도 생각해 볼 수 있는 바, 이때는 별도의 응집설비가 필요한 것이 단점이지만 고형물에 포획되어 소모되는 PAC를 최소화할 수 있고 응집설비의 인 부하를 낮추어 처리수 인 농도를 감소시키는 장점이 있다. 본 연구에서는 2차 침전조의 체류시간에 해당하는 4시간 동안 전침전(pre-settling)시킨 시료에 PAC를 투입하여 인의 응집제거 특성을 살펴보았다. 그 결과 예상했던 것처럼 전침전 없이 응집반응을 시킨 경우에 비해 전침전을 시행할 경우 응집효율이 향상됨을 관찰할 수 있었다(Fig. 6). 전침전의 경우 30 ppm의 PAC투입으로 0.18 mg/L까지 T-P 농도를 감소시킬 수 있었는데 이는 전침전이 없는 경우 PAC 50 ppm 투입으로 얻을 수 있는 0.21 mg/L 보다도 낮은 값이었다. 대단위 하수처리장의 경우 PAC 투입량이 운전비용에 미치는 영향이 상당하고 따라서 화학적 인 제거 공정의 도입 여부 결정에 주요 인자가 됨을 고려할 때 시사하는 바가 큰 결과라 할 수 있다.

3.5. 응집 상징수 반송의 효과

처리된 유출수를 응집조에 반송함으로써 유출수에 잔류하는 PAC를 재이용하고 희석에 의해 응집조에 유입되는 인의 부하를 감소시켜 그 효과로 반응 효율이 향상 되는지 여부를 검토하였다. 그 결과 Fig. 7에서와 같이 반송의 경우 응집공정 유입수의 인 농도를 3.32 mg/L에서 2.74 mg/L로 낮추고 PAC 30 ppm에 의한 응집 시 인 농도를 0.23 mg/L에서 0.18 mg/L로 저하시킬 수 있었다. 또한 반송율에 따른 인 제거 특성을 살펴본 바 반송율을 증가시킬수록 인 제거에 효과적인 것으로 나타났다(Fig. 8). 반송에 따른 응집설비 용량과 PAC 사용량의 증가를 고려할 때 적정 반송율은 0.3 정도인 것으로 판단된다.

4. 결 론

2단계 수질 오염 총량제에 대비할 고효율 인 제거 공정 구축을 위하여 생물공정 처리수의 화학적 응집 공정의 특성과 효율 증진 방안에 대해 연구하였으며 결론은 다음과 같다.

1. 적정 PAC 투입 농도는 부피기준으로 30 ppm, mol비로는 2.81 mol Al/mol P인 것으로 나타났으며 초기 인 농도가 증가할수록 제거율은 저하되었다.
2. 응집시간 4분, 침전시간 20분, 초기 pH 7이 가장 적정한 운전조건인 것으로 나타났다. 이 조건에서 총 인 농도는 처리 전 3.94 mg/L에서 처리 후 0.3 mg/L로 92.4% 제거가 가능하였다.
3. 단순 침전에서 낮았던 용존성 인의 제거율을 PAC에 의한 응집으로 크게 증가시킬 수 있었다. pH 7이 최적 응집 조건이었으며, $Al(OH)_{3(s)}$에 의한 sweep floc formation 기작이 주요 인 제거 기작일 것으로 추정되었다. 원시료의 pH는 7.0으로서 응집효율 향상을 위해 별도의 pH 조절은 필요 없는 것으로 판단되었다.
4. PAC의 투입지점은 2차침전조 상징수로 하는 것이 PAC 투입량 대비 인 제거효율 증진 관점에서 가장 바람직한 것으로 조사되었다. 이때 처리수의 인 농도는 0.18 mg/L,

제거율은 95.4%로 향상시킬 수 있었다. 그러나 2차침전조를 응집침전조로 활용할 때에 비하여 별도의 응집설비가 필요하므로 현장 상황에 맞는 종합적인 고려가 필요한 것으로 사료되었다.

5. 응집 처리수를 반송할 경우 인 제거 효율을 높일 수 있었으며 적정 반송율은 0.3인 것으로 분석되었다.

KSEE

사 사

본 논문은 대구대학교 학술연구비 지원에 의해 작성되었으며, 시료 채취 및 자료조사에 도움을 주신 ㈜월텍 조경진 박사와 대구환경시설공단 표갑두 팀장, 김승민 과장께 감사드립니다.

참고문헌

1. 국립환경과학원, 낙동강수계 제2단계 수질오염총량관리 광역시도 경계점 목표수질(안), (2007).
2. 대구환경시설공단, 수질오염총량제 실시에 대처할 고효율 총인처리기술 개발, (2009).
3. 宮功, 津野洋, 水環境基礎科學, コロナ一社, 143(1997).
4. 栗原淳, 越野正義, 肥料製造學, 養賢堂, 95~96(1986).
5. Rittmann, B.E., and McCarty, P.L., Environmental Biotechnology, McGraw-Hill Korea(한역판), 579~590(2002).
6. 김미향, 김영만, 최범석, "알루미늄 응집제들에 의한 몇가지 유기화합물의 응집효과에 관한 연구", *Anal. Sci. & Technol.*, **12**(6), 478~483(1999).
7. Gao, B.Y., Yue, Q.Y., Wang, B.J., and Chu, Y.B., "Poly-aluminum-silicate-chloride (PASiC)-a new type of composite inorganic polymer coagulant", *Colloids Surf., A:* Physico-chemical Engineering Aspects, 229(1-3), 121~127(2003).
8. Gao, B. Y,. and Yue, Q. Y., "Effect of SO_4^{2-}/Al^{3+} ratio and OH^-/Al^{3+} value on the characterization of coagulant poly-aluminum-chloride-sulfate (PACS) and its coagulation performance in water treatment", *Chemosphere*, **61**(4), 579~584(2005).
9. Ghafari, S., Aziz, H. A., Isa, M. H., and Zinatizadeh, A. A., "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(2008).
10. Jiang, J. Q., and Graham, N. J. D., "Development of optimal poly-alumino-iron sulphate coagulant", *J. Environ. Engineering*, **129**(8), 699~708(2003).
11. Gao, B. Y., Hahn, H. H., and Hoffmann, E., "Evaluation of aluminum-silicate polymer composite as a coagulant for water treatment", *Water Res*., **36**(14), 3573~3581(2002).
12. Kwak, J. W., and Gillberg, L., "Influence of pH and coagulant basicity in precipitating orthophosphate by Al/Fe salts", 한국수질보전학회지, **13**(1), 25~34(1997).
13. Sinha, S., Yoon, Y., Amy, G., and Yoon, J., "Determining the effectiveness of conventional and alternative coagulants through effective characterization schemes", *Chemosphere*, **57**(9), 1115~1122(2004).
14. Ntampou, X., Zouboulis, A. I., and Samaras, P., "Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation/flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates", *Chemosphere*, **62**(5), 722~730(2006).
15. Zhang. C., and Wang, Y., "Removal of dissolved organic matter and phthalic acid esters from landfill leachate through a complexation-flocculation process", *Waste Management*, **29**(1), 110~116(2009).
16. Duan, J., and Gregory, J., "Coagulation by hydrolyzing metal salts", *Advances in Colloid Interface Science*, **100~102**, 475~502(2003).
17. Gray, K. A., Yao, C., and O' Melia, C.R., "Inorganic metal polymers: preparation and characterization", *J. American Water Works Association*, **87**(4), 136~146(1995).
18. Rebhun, M., and Lurie, M., "Control of organic matter by coagulation and flocs separation", *Water Sci. Technol.*, **27**, 1~20(1993).
19. Dentel, S. K., and Gosset, J. M., "Mechanisms of coagulation with aluminum salts", *J. Am. Water Works Assoc.*, **80**(4), 187~198(1988).
20. Srivastava, V. C., Mall, I. D., and Mishra, I. M., "Treatment of pulp and paper mill wastewaters with poly aluminum chloride and bagasse fly ash", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects*, **260**(1-3), 17~28(2005).
21. Hundt, T. R., and O' Melia, C. R., "Aluminum-fulvic acid interactions: mechanisms and applications", *J. Am. Water Works Assoc.*, **80**(4), 176~186(1988).
22. Clark, M. M., and Srivastava, R. M., "Mixing and aluminum precipitation", *Environ. Sci. Technol.*, **27**(10), 2181~2189 (1993).
23. 우승순, 이찬기, 김성석, 최규열, 이해금, "춘천시 하수처리장의 처리공정에서 인의 거동과 존재형태", 한국수질보전학회지, **9**(2), 98~104(1993).