

응집공정을 이용한 하수처리수 중의 인 제거 Mechanism Removal Mechanism of Phosphorus in Wastewater Effluent using Coagulation Process

한승우[†] · 강임석*
Seung-woo Han[†] · Lim seok Kang*

(주)수엔텍 · *부경대학교 환경공학과

SU En Tech Co., Ltd. · *Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

(2010년 7월 14일 접수, 2010년 8월 30일 채택)

Abstract : The experimental results for the analysis of aluminum hydrolysis species with PACls (polyaluminum chloride) prepared by different basicity (r value) showed that monomeric Al species were reduced while polymeric Al species were increased with an increase in basicity for PACls. The PACl with 2.2 of r value contained the highest amount of polymeric Al species. According to the experimental results for the phosphorus removal, the alum and PACl ($r=0$), which consisted of mainly monomeric Al species, were the most effective for phosphorus removal. Therefore, it was concluded that the Al coagulant containing higher amount of monomeric or lower molecular Al species would be more beneficial for phosphorus removal.

Key Words : Coagulant, Aluminum Hydrolysis, Species, Phosphorus Removal

요약 : 염기도에 따라 제조된 PACl 응집제에 함유된 Al 가수분해종의 분석결과, 염기도 증가에 따라 단분자성 Al종이 감소하고 고분자성 Al종은 증가하였으며, 염기도 2.2에서 가장 많은 고분자성 Al종을 함유하고 있었다. 단분자성 또는 저분자성 Al 가수분해종을 주로 함유하고 있는 alum과 $r=0$ 인 PACl에서 인의 제거효율이 가장 높은 것으로 나타나, 효율적인 인의 제거를 위해서는 단분자성이나 저분자성 Al 종을 많이 함유한 응집제가 더 효과적이라고 판단된다.

주제어 : 응집제, Al 가수분해종, 인 제거

1. 서론

2010년 2월 환경부에서 개정 및 공포된 하수도법 시행규칙 개정 내용¹⁾에 따르면, 용수사용 및 공공수역의 생태계 보전에 중점을 두고 부영양화 생성의 주요인자인 T-P와 COD에 대하여 2012년부터 공공하수처리시설의 방류수 수질기준을 강화한다는 것이다. 또한 2010년 4월에는 T-P와 COD에 대하여 2012년부터 폐수종말처리시설의 방류수수질기준을 강화한다는 내용으로 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률의 시행규칙을 개정 공포하였다.²⁾

이는 T-P와 난분해성 유기물질의 측정항목인 COD가 종전의 관리지표인 BOD에서 새로운 관리지표로 제시되는 것으로 보이며, 공공수역에서의 화학물질 사용과 자연적인 유기물질 생성 및 난분해성 유기물질의 유입 등 오염원의 변화로 인하여 관리지표의 변화 요구가 반영된 것으로 판단된다.

하천 수계내에서의 유기물질 증가는 생활하수·산업폐수·축산분뇨등 점오염원과 산림·농경지·도시 등의 비점오염원이 오염물질 유입의 주원인이지만, 조류 및 수생식물이 생산하는 수계내 자체 생산 유기물질량이 전체 유기물질 부하량의 약 25~30%로 추정되고 있다.³⁾ 그러므로 공공수역 수질관리의 문제점으로 나타나는 유기물질을 제어하

기 위하여 조류의 성장제한 인자인 T-P의 처리강화가 요구되는 상황으로, 하수처리시설의 T-P에 대한 현행법적 방류수 수질기준은 2008년 1월부터 2 mg/L(겨울철 8 mg/L)을 적용받고 있으나, 현재 설치되어 가동중인 생물학적 처리에 의한 제거 가능한 T-P의 양에는 한계가 있으며, 2012년부터 강화되는 수질기준을 만족시키기 위해서는 화학적 응집을 이용한 인의 화학적 처리에 대한 다양한 검토가 필요한 실정이다.³⁾

인은 비교적 용해도가 낮아 수중에서 침전물(precipitate)의 생성이 용이하다.⁴⁾ 따라서 생물학적인 처리공정에서의 인의 처리는 미생물에 흡수된 형태로 제거되어 지며, 화학적인 처리공정에서는 응집제와 화학적 또는 물리적으로 결합된 침전물의 형태로 제거되어 진다.⁵⁾ 저농도의 인을 효과적으로 제거하기 위해서는 일반적으로 생물학적 처리공정보다는 화학적 처리공정에서 응집-침전 또는 응집-여과 설비로 효과적인 인의 처리가 가능하며, 유입수질의 변동에 능동적으로 대처할 수 있는 특징을 가지고 있다.⁶⁾

대부분의 하수처리장에서는 생물학적인 고도처리를 통해 인을 제거하고 있으나, 계절의 변화에 따른 미생물 활동성의 변화가 심하여 인의 처리정도에 대한 대응이 어려운 실정이다. 이에 따라 인의 처리를 위해 응집제를 사용한 화학적 처리를 병행하여 사용하고 있으나, 저농도의 인을 이용

하여 응집 mechanism에 대한 연구는 미흡하며, 사용하고자 하는 응집제에 대하여 합리적이고 과학적인 응집제의 선정이 결여되어 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2012년부터 강화되는 하수처리 방류수의 수질기준을 만족하기 위하여 하수처리수에 함유되어 있는 orthophosphate (PO_4^{3-})와 T-P를 구분하여 alum과 PACI 응집제의 인 제거효율을 평가하고, Al(III)염 응집제에 함유되어 있는 Al 가수분해종과 인의 응집 mechanism 규명을 통하여 효과적인 인의 제거를 위한 적정 응집제 선정 조건을 도출하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

하수처리 방류수 수질기준을 맞추기 위하여 Al(III)염 응집제에 의한 하수처리수의 인 제거효율을 평가하고, Al(III)염 응집제에 함유되어 있는 Al 가수분해종과 인의 응집기작 규명 및 인 제거를 위한 적정 응집제 선정에 관한 실험을 실시하였다.

응집실험에 사용된 응집제는 수처리 현장에서 일반적으로 사용되는 alum과 염기도별로 실험실에서 제조된 PACI를 사용하였다. PACI 응집제는 Al(III) 용액에 염기를 첨가하여 알루미늄을 가수분해시켜 제조하였다.⁷⁻⁹⁾ 이 때 미리 가수분해시키기 위하여 첨가되는 염기의 첨가율을 염기도라 하며 이를 $r (=OH_{added}/Al_T)$ 로 표시하였다(이하 염기도는 r 값이라 표시함). 즉, 염기도는 알루미늄의 가수분해에 의하여 생성되는 수소이온이 염기에 의하여 중화되는 정도를 나타내는 것이다. PACI 제조에 사용된 Al(III)염으로는 0.2 M $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ 를 사용하였으며, 염기로는 0.5 M NaOH를 다양한 농도로 정량적으로 주입하면서 PACI 응집제를 제조하였다.

제조된 PACI 응집제에 함유되어 있는 Al 가수분해종의 분포는 Ferron 분석법¹⁰⁻¹³⁾을 이용하였다. Ferron 분석법에 있어서 Ferron 시약과 Al 가수분해종과의 반응은 (1) 단분자성 Al 종은 Ferron 시약과의 반응이 빠르게 이루어져 반응 즉시 흡광도가 일정하게 되며, (2) 고분자성 Al 종은 Ferron 시약과 반응시간 동안 일정한 반응속도로 반응하여 평형에 이르면 일정한 흡광도를 유지하게 되며, (3) precipitate Al 종은 Ferron 시약과 반응하지 않는다는 사실을 기초로 하여 제조한 응집제의 Al 가수분해종의 분포실험을 하였다.

제조된 응집제와 조제한 Ferron 혼합 발색시약을 이용한 응집제의 Al 가수분해종 분포실험 절차는 발색시약 10 mL를 순수에 첨가한 후 적정량의 알루미늄 시료를 첨가하여 혼합한다. 혼합 30초 후에 1 cm 석영 cell을 사용하여 370 nm에서 흡광도를 측정한다. 총알루미늄의 측정은 ICP [Inductively coupled plasma, Thermo JARREL ASH (ICAP 61E-Trace Analyzer)]를 사용하였고, monomeric Al 종은 반응 30초 후의 흡광도 수치로서 예측하여 정량화하였으며, Al 가수분해종과 Ferron 시약과의 총 반응시간은 Al-Ferron 착

Table 1. Characteristics of wastewater treated at a A wastewater treatment plant in Busan

pH	Turbidity (NTU)	Alkalinity (mg/L)	T-P (mg/L)
6.9~7.2	1.5~3.0	100~120	2~3.5

화합물 생성이 완료되어 흡광도의 변화가 나타나지 않는 120분으로 하였다.

본 연구에서 사용된 대상시료는 부산시 소재 A하수처리장의 최종 침전지 유입 직전의 폭기조 물을 채수하여 침전시킨 후 상정수를 대상 원수로 사용하였으며, 대상 원수의 수질은 Table 1과 같다.

응집실험은 Jar tester를 이용하였으며, 응집실험에서의 응집제별 주입농도는 P와 Al의 몰 비로 1:0.8, 1:1.0, 1:1.2, 1:1.4, 1:1.6, 1:1.8 (P mol:Al mol)로 각각 주입하여 실험을 하였다. 응집실험에 사용된 Jar tester는 Phipps & Bird사 것으로 paddle의 크기는 2.5 W × 7.5 L cm이며 교반속도를 조절할 수 있는 장치이다. 사용된 Jar는 2 L의 사각형 Jar를 사용하였으며, 교반속도는 급속혼화 250 rpm(평균속도경사, $G = 550 \text{ sec}^{-1}$)과 완속혼합 30 rpm ($G = 22 \text{ sec}^{-1}$)이었으며, 교반시간은 각각 1분과 30분으로 유지하였으며 교반 후 침전시간은 1시간으로 하였다. 침전 후 수면아래 10 cm 지점의 채수구를 통하여 채수한 다음 T-P와 orthophosphate (PO_4^{3-})의 분석을 하였으며, 분석은 Standard methods¹⁴⁾에 따랐다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 응집제 특성 분석

Ferron 분석법을 이용하여 Al(III)염 응집제에 함유된 Al 가수분해 종을 분석하여 단분자성 Al 종, 저분자성 Al 종, 고분자성 Al 종 및 precipitate Al 종으로 구분할 수 있었다. 여기서 단분자성 Al 종은 $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)^{2+}$ 등의 단분자 상태의 Al 종을 나타내며, 저분자성 Al 종은 $Al_2(OH)_2^{4+}$, $Al_3(OH)_4^{5+}$ 등의 2~3개의 Al을 함유하고 있는 저분자 형태의 Al 종을 나타낸다. 그리고 고분자성 Al 종은 $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ 등의 고분자 형태의 Al 종을 나타내며, precipitate Al 종은 침전물 형태의 Al 종으로서 $Al(OH)_3(s)$ 등을 나타낸다.¹⁵⁻¹⁸⁾

Al-Ferron의 반응에 따라 흡광도 변화에 의한 Al 가수분해종의 분석 결과 각 응집제에 함유되어 있는 Al 종의 분포를 Fig. 1에 나타내었으며, Fig. 2는 동일한 응집제에 함유되어 있는 고분자성 Al 종을 저분자성 Al 종과 고분자성 Al 종으로 세분화하여 나타낸 것이다. Fig. 1과 같이 PACI의 r 값의 증가에 따라 단분자성 Al 종이 감소하고 고분자성 Al 종은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 첨가되는 염기의 OH^- 이온이 알루미늄 이온과의 착화합물 형성에 의한 고분자성 Al 성분으로 전이됨에 따른 결과로서, 초기 Al(III)염에 대한 염기의 첨가량 및 첨가율은 고분자성 알루미늄 응집제의 제조에 있어 매우 중요한 인자라 알려져 있다.¹⁹⁻²²⁾

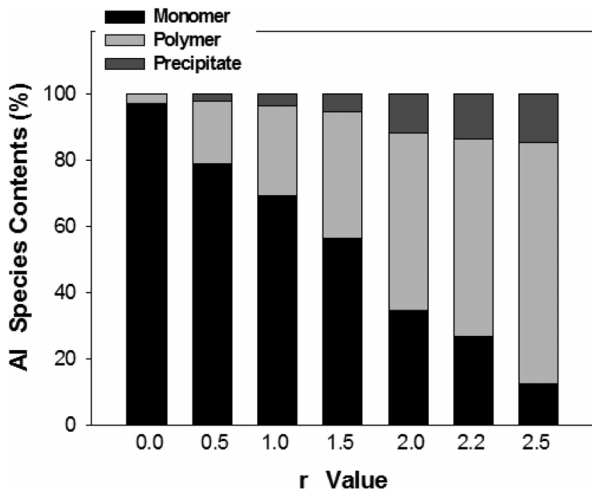


Fig. 1. Distribution of Al(III) hydrolysis species with various r values on PACl.

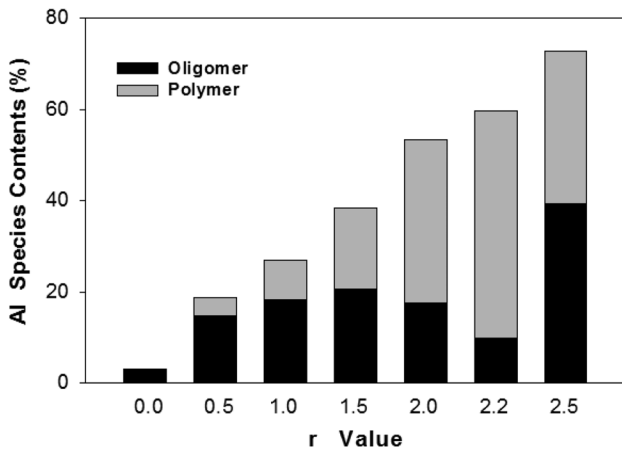


Fig. 2. Distribution of Al(III) hydrolysis species with various r values on polymeric and oligomeric species of PACl.

그리고 Fig. 2의 결과를 살펴보면 r 값이 2.5의 경우에 있어서 전체 고분자성 Al 종을 가장 많이 함유하는 것으로 나타났으나, 세분화하여 살펴보면 고분자성 Al 종중에 저분자성 Al 종이 급격히 증가됨을 알 수 있다. 이는 염기를 다량 주입됨에 따라 단분자성 Al종에서 고분자성 Al종으로 전이되어 precipitate Al종으로 전이가 일어나는 것이 아니라, 단분자성 Al종에서 저분자성 Al종으로 전이되어 반응이 종료되어 고분자성 Al종으로 전이가 진행되지 않고 precipitate Al종으로의 전이가 진행되어 나타난 것으로 판단된다. 한과 한 등은 r 값이 2.35 이상에서 다량의 염기 주입으로 인하여 급격한 pH의 증가가 일어나고 이로 인하여 precipitate Al(III)종이 급격히 증가한다고 보고하였다.^{8,9,13)}

또한 본 실험에서 응집제의 비교를 위하여 일반적으로 수처리 현장에서 가장 많이 사용되는 alum에 대하여 Ferron 분석법을 이용하여 Al 종을 분석한 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서와 같이 alum의 경우에는 단분자성 Al 종과 저분자성 Al 종이 각각 88.1%와 11.5%로 전체의 99.6%를 차지하고 있는 것으로 나타나, alum 응집제에 함

Table 2. Distribution of Al hydrolysis species for alum

Al species	Monomeric	Oligomeric	Polymeric	Precipitate
Content (%)	88.08	11.48	0.44	0.0

유되어 있는 Al 종은 저분자성 Al 종이 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 한¹³⁾의 실험결과에 의하면, 상업용 응집제로 사용되는 Alum의 경우 단분자성 Al(III)종이 90~97%를 유지하는 것으로 보고한 바가 있다.

3.2. 인의 응집효과 비교

본 실험에서 사용된 하수처리장 유출수에 함유된 인의 성분을 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이 하수처리장 유출수는 T-P 중 용존성 인이 96.5%를 차지하고 있었으며, 용존성 인 중에서는 PO_4^{3-} -P의 함량이 2.76 mg/L로 T-P 3.34 mg/L의 79.7%를 차지하는 것으로 나타났으며, Tripolyphosphates, Pyrophosphates 등의 다중인산염과 유기인은 0.58 mg/L로 16.8%를 나타내, 부산 A하수처리장의 유출수중 인은 대부분이 용존성 인으로 존재하고 있으며, 용존성 인 중에서도 PO_4^{3-} -P의 형태로 존재함을 알 수 있었다.

Fig. 4와 Fig. 5는 하수처리수에 대하여 alum과 염기도(r 값)에 따라 제조된 각 PACl 응집제를 사용하여 응집실험 후 T-P 및 PO_4^{3-} -P의 제거효율을 각각 나타낸 것으로, 응집제 주입량은 Al mol/P mol 비로서 0.8:1, 1.0:1, 1.2:1, 1.4:1, 1.6:1, 1.8:1로 각각 주입하여 응집실험을 실시하였다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 응집실험에 사용된 응집제 중에서 alum과 r 값이 0인 PACl에서 총인의 제거효율이 각각 60~92%와 59~90%로 가장 높은 것으로 나타났으며, r 값이 가장 높은 2.5의 경우에는 25~41%로 가장 낮은 T-P 제거효율을 나타내었다. 또한 PACl 응집제의 r 값이 증가할수록 T-P의 제거효율이 선형적으로 감소하는 경향을 나타내는 것으로 나타났다. Fig. 4의 응집제에 따른 T-P의 제거효율과 마찬가지로 Fig. 5의 응집제에 따른 PO_4^{3-} -P의 제거효율에서도 alum과 r 값이 0인 PACl에서 PO_4^{3-} -P의 제거효율이

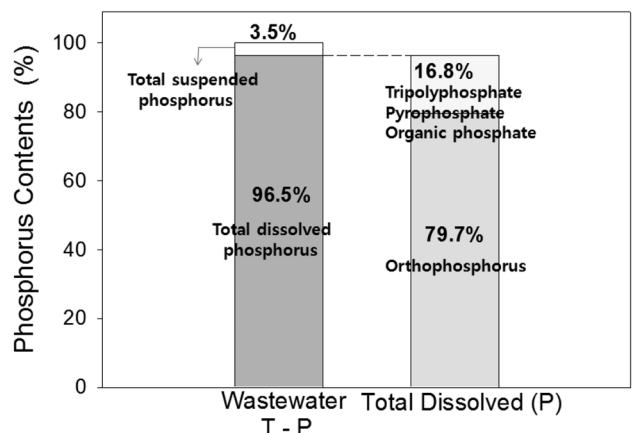


Fig. 3. Distribution of phosphorus species in treated wastewater of A wastewater treatment plant in Busan.

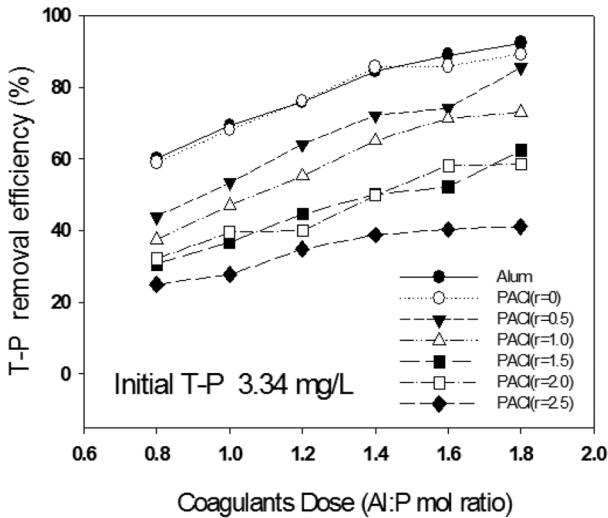


Fig. 4. Total phosphate removal efficiencies under various coagulants doses.

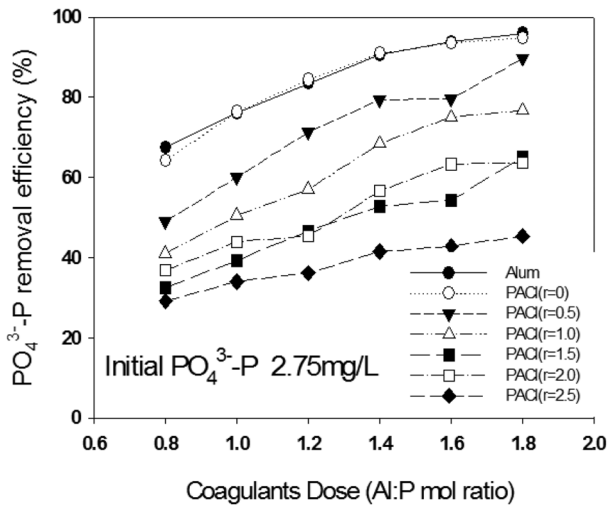
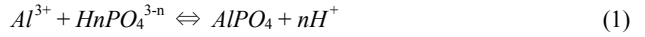


Fig. 5. Orthophosphate removal efficiencies under various coagulants doses.

각각 68~96%와 65~95%로 가장 높은 것으로 나타났으며, r 값이 가장 높은 2.5의 경우에는 29~45%로 가장 낮은 PO₄³⁻-P 제거효율을 나타내었다. 또한 PACI 응집제의 r 값이 증가할수록 T-P의 제거효율이 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 생물학적 처리방식에 의해 처리된 하수처리수의 경우, 미생물에 의한 생성된 인의 형태는 응집과 같은 화학적 처리에 어려움이 야기되므로 T-P에 의한 처리효율이 PO₄³⁻-P의 제거율이 상대적으로 낮게 나타난 것으로 판단된다. 이와 관련하여 John Bratby⁵⁾는 phosphate 종들은 금속염과 함께 강한 착화합물을 형성한다고 설명하고 있다.

Fig. 4와 5의 실험결과에 나타난 바와 같이 단분자성 및 저분자성 Al 종을 주종으로 하고 있는 alum과 r 값이 0인 PACI 응집제의 경우에서 T-P 및 PO₄³⁻-P의 제거효율이 높은 것은 Al염 응집제에 의한 인의 제거 mechanism은 높은 양의 전하를 띠고 있는 고분자성 Al종[예: Al₁₃O₄(OH)₂₄⁷⁺]에 의한 인의 침전물[예: AlPO₄(s)] 형성보다는 식 (1)과 같이 단

분자성 및 저분자성 Al 종이 인의 침전물[예: AlPO₄(s)] 형성에 더욱 효과적이라 판단된다. 또한 Al mol/P mol 비가 증가함에 따라 Al 침전물[예: Al(OH)₃(s)]의 형성이 증가되며, 이에 따라 Al(OH)₃(s)에 용존성 인의 흡착 등의 반응이 이루어져 인의 제거효율이 증가하는 것으로 판단된다.



수중에서 AlPO₄(s)의 침전물이 형성될 때 pH의 변화에 따라 나타날 수 있는 인과 Al(III)의 농도를 나타낸 용해도 곡선을 살펴보면, pH 6.6 이하에서 인과 Al의 농도는 AlPO₄(s)의 용해도에 따라 제어되지만, 6.6 이상의 pH 범위에서는 Al(OH)₃(s)의 용해도에 따라 제어된다. 인의 제거효율은 AlPO₄(s)의 침전물 형성에 의한 pH 5.5에서 가장 높게 나타난다.^{23,24)} 이와 관련하여 김 등²⁵⁾은 alum과 r 값이 2.0인 PACI를 이용하여 pH에 따른 응집실험을 통하여 Al(OH)₃와 AlPO₄의 용해도 곡선과 함께 응집실험 결과를 비교하였는데, 단분자성 및 저분자성 Al 종을 주종으로 하고 있는 alum의 경우에서 AlPO₄의 용해도 곡선과 유사한 실험 결과를 나타내었다(Fig. 6). pH 7 이하의 낮은 pH 영역에서 인은 수중의 OH⁻ 이온이 감소됨에 따라 H₂PO₄⁻ 이온이 주종으로 불안정화 상태로 존재하고 있다.⁵⁾ 그러므로 pH 5.5의 낮은 pH 영역에서 AlPO₄(s)의 침전물 형성에 의한 인의 제거효율은 전하중화 및 Al 침전물 형성에 따른 인과 알루미늄의 응집작용이 효과적으로 이루어져 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 alum과 염기도가 2.0인 PACI 응집제를 이용하여 응집제 주입량을 Al mol:P mol의 비를 1.0과 1.8로 주입하여 pH에 따른 T-P 및 PO₄³⁻-P의 거동을 나타낸 것이다. Fig. 7과 Fig. 8의 pH에 따른 T-P 및 PO₄³⁻-P의 거동 형태는 AlPO₄(s)의 침전물에 의한 용해도 곡선과 유사한 것으로 나타났다. 즉 Al의 용해도가 가장 낮은 pH 6.0 부근

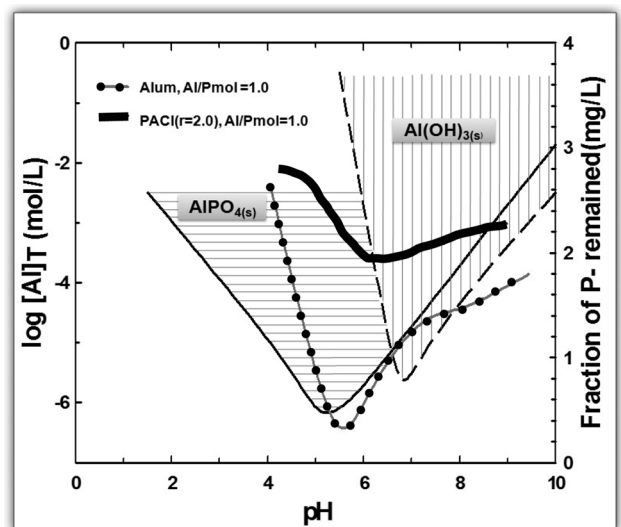


Fig. 6. Comparison of phosphorus removal efficiencies and the solubility diagrams of AlPO₄(s) and Al(OH)₃(s) (Kim et al.²⁵⁾.

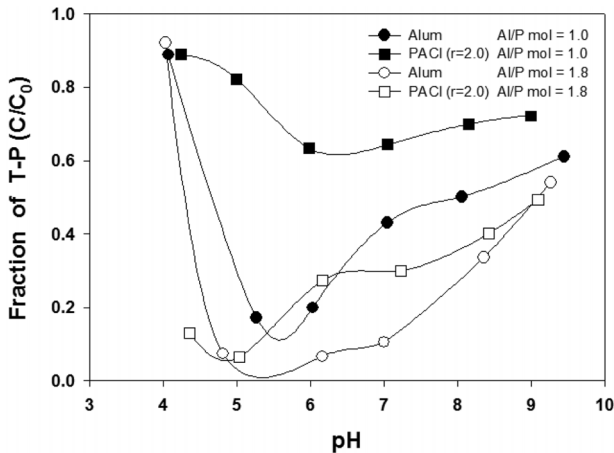


Fig. 7. Effect of coagulation pH on T-P removal with various coagulants and doses.

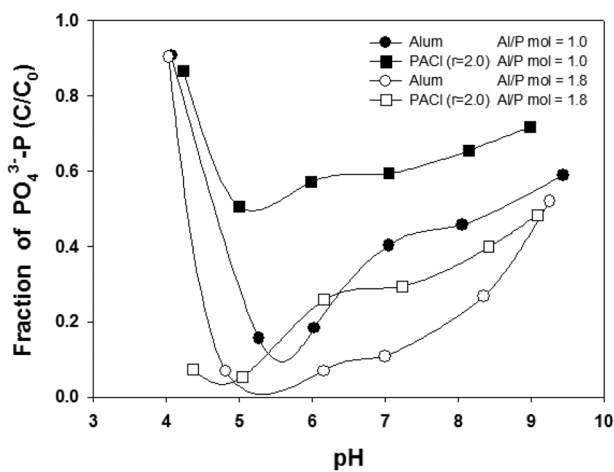


Fig. 8. Effect of coagulation pH on PO_4^{3-} -P removal with various coagulants and doses.

에서 인의 제거효율이 가장 높은 것으로 나타났다. 따라서 인의 효과적인 제거를 위한 응집제는 고분자성 Al 염 응집제 보다는 단분자성 및 저분자성 Al 종을 주종으로 하고 있는 alum이 적절한 응집제라 판단된다. 그리고 Al 염 응집제에 의한 인의 제거 mechanism은 높은 양의 전하를 띠고 있는 고분자성 Al 종에 의한 인의 침전물 형성보다는 단분자성 및 저분자성 Al 종에 의한 침전물 형성이 더욱 효과적이라 판단된다. 또한 Al mol/P mol 비를 1.0에서 1.8로 응집제 주입량이 증가할 경우에 인의 제거효율이 증가한 것은 응집제 주입량의 증가에 따른 Al 염이 첨가됨으로서 형성된 Al 침전물[예: $Al(OH)_3(s)$]에 용존성 인의 흡착이 주로 이루어져 인의 제거효율이 향상된 것으로 판단된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 수처리 현장에서 많이 사용되는 단분자 및 저분자성의 Al(III)종을 주종으로 하고 있는 alum과 고분자성 Al 종을 주종으로 하고 있는 PACI 응집제를 이용하여 하수처리수의 탁도와 PO_4^{3-} -P의 제거효율에 대한 응집실험 결과를 각각 나타낸 것이다. 응집실험에 있어서 응집제 주입량은 Al mol/P mol 비로서 0.8:1, 1.0:1, 1.2:1, 1.4:1, 1.6:1, 1.8:1로 각각 주입하여 응집실험을 실시하였다.

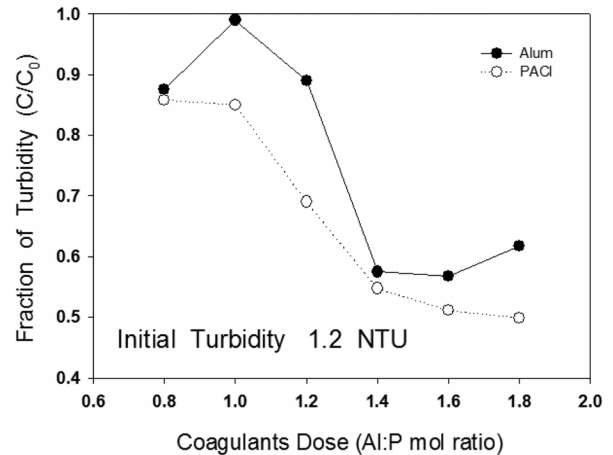


Fig. 9. Comparison of alum and PACI coagulants for turbidity removal as a function of coagulant dose.

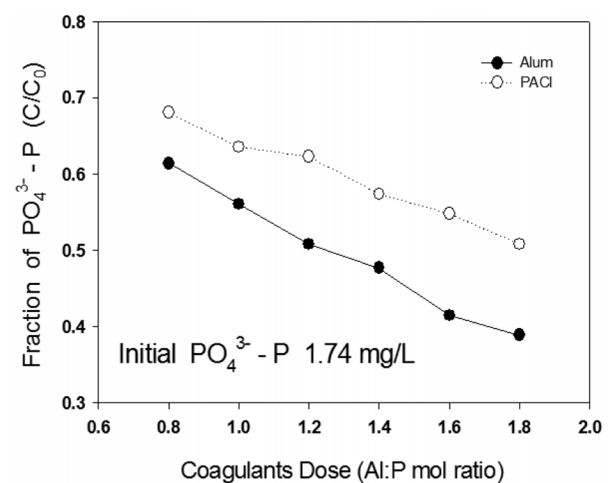


Fig. 10. Comparison of alum and PACI coagulants for PO_4^{3-} -P removal as a function of coagulant dose.

Fig. 9와 Fig. 10에 나타난 바와 같이, 탁도의 경우는 고분자성의 Al종을 주종으로 하고 있는 PACI 응집제의 경우에서 효과적으로 나타났다. 이는 PACI 응집제에 함유된 고분자성 Al 종이 가지는 높은 전하중화 능력에 의한 것으로 판단된다.²⁶⁾ 그러나 PO_4^{3-} -P의 제거효율은 PACI 응집제 보다 단분자 및 저분자성의 Al 종을 주종으로 하고 있는 alum이 더욱 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 하수처리수 중의 인에 대한 저감을 목적으로 수처리용 응집제를 고려한다면 PACI과 같은 고분자성 Al 염 응집제 보다는 alum과 같은 단분자성 및 저분자성 Al 종을 주종으로 하고 있는 응집제의 선정이 필요하리라 판단된다. 그러므로 하수처리수에 대한 효과적인 화학적 응집을 통한 수질개선을 위해서는 처리목적 대상물질에 대한 실험을 통하여 적절한 응집제의 선정이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

염기도에 따른 PACI 응집제를 제조하여 Ferron 분석을

통해 PACI 응집제의 특성과 제조된 PACI 응집제와 alum을 이용한 응집실험을 통해 인의 응집 mechanism을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) r 값에 따라 제조된 PACI 응집제의 Ferron 분석결과, r 값의 증가에 따라 단분자성 Al 종이 감소하고 고분자성 Al 종은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 첨가된 염기의 OH⁻ 이온이 Al 이온과의 착화합물 형성에 의한 고분자성 Al 성분으로 전이됨에 따른 것으로 판단된다.

2) Alum과 r 값이 0인 PACI에서 인의 제거효율이 가장 높은 것으로 나타났으며, PACI 응집제의 r 값이 증가할수록 인의 제거효율이 선형적으로 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

3) Al염 응집제에 의한 인의 제거 mechanism은 높은 양의 전하를 띠고 있는 고분자성 Al 종에 의한 인의 침전물 형성보다는 단분자성 및 저분자성 Al 종이 인의 침전물 형성에 더욱 효과적이기 때문이라 판단된다.

4) pH 7 이하의 낮은 pH 영역에서 인은 수종의 OH⁻ 이온이 감소됨에 따라 H₂PO₄⁻ 이온이 주종으로 불안정화 상태로 존재하고 있으며, Al(OH)_{3(s)}의 용해도가 감소함에 따라 낮은 pH 영역에서의 인 제거는 전하중화 및 Al(OH)_{3(s)}의 침전물 형성에 따른 응집기작이 주된 작용인 것으로 판단된다.

5) 하수처리수에 대한 효과적인 화학적 응집을 통한 수질 개선을 위해서는 처리목적 대상물질에 대한 실험을 통하여 적절한 응집제의 선정이 필요한 것으로 판단된다.

KSEE

참고문헌

1. 환경부 홈페이지, <http://www.me.go.kr>, 2월(2010).
2. 환경부 홈페이지, <http://www.me.go.kr>, 4월(2010).
3. 환경부, “하수처리시설 총인 처리강화 시범운영 연구,” pp. 3(2009).
4. Rittmann, B. E. and McCarty, P. L., “Environmental Biotechnology,” McGraw-Hill Korea(한역판), pp. 579~590(2002).
5. John Bratby, “Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment,” 2nd. Ed., IWA Publishing, London · Seattle, pp. 119~149(2006).
6. 황응주, 천효창, “생물공정 처리수의 PAC (Poly Aluminum Chloride) 응집에 의한 고효율 인 제거 특성”, 대한환경공학회지, **31**(8), 673~678(2009).
7. Kang, L.-S., Han S.-W. and Jung, C.-W., “Synthesis and Characterization of Polymeric Inorganic Coagulants for Water Treatment,” *Korean J. Chem. Eng.*, **18**(6), 965~970(2001).
8. 한승우, 이철우, 강임석, “수처리용 Al(III)계 무기고분자응집제 제조시 물리적 영향,” 한국화학공학회지, **42**(5), 612~618(2004).
9. 한승우, 정철우, 강임석, “상수처리용 합성 무기고분자 Al(III)계 응집제의 화학적 특성,” 한국환경과학회지, **8**(6), 711~716(1999).
10. Smith, R. M., “Relation among equilibrium and nonequilibrium aqueous species of aluminum hydroxy complexes,” *Nonequilibrium systems in natural water chemistry* (Gould, R.F. eds.), A.C.S. Advances in Chemistry Series No. 106, Washington, D.C., 250~279(1971).
11. Bersillon, J. L., Hsu, P. H. and Fiessinger, F., “Characterization of hydroxy-aluminum solutions,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **51**, 825~828(1988).
12. David, R., Parker, “Identification and Quantification of the “Al13” Tridecameric Polymeric Polycation Using Ferron,” *Environ. Sci. Technol.*, **26**(5), 908~914(1992).
13. 한승우, “수처리용 무기고분자 응집제의 제조 및 적용,” 부경대학교 환경공학과 박사학위논문(2000).
14. APHA-AWWA-WEF, “Standard methods for the examination of water and wastewater,” 21th eds., *APHA AWWA WEF*, (2005).
15. Letterman, R. D., “Filtration strategies to meet the surface water treatment rule,” Denver, CO; *American Water Works Association*(1991).
16. Baes, C. F. and Mesmer, R. E., “The hydrolysis of cations,” John Wiley and Sons, New York(1976).
17. Feng C., Wei C., Wang S., Shi B., Hongxiao Tang, “Speciation of hydroxyl-Al polymers formed through simultaneous hydrolysis of aluminum salts and urea,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **303**(3), 241~248(2007).
18. American Water Works Association, “Water Quality and Treatment,” 5th Ed., McGraw-Hill, New-York., pp. 6.17~6.19(1999).
19. Stumm, W. and Morgan, J. J., “Aquatics Chemistry,” 3rd Ed. John Wiley and Sons, New York, pp. 263~289(1996).
20. Stol, R. J., van Helden, A. and de Bruyn, P., “Hydrolysis-precipitation studies of aluminum(III) solutions. 2. A kinetic study and model,” *J. Colloidal and Interface Sci.*, **57**, 115~131(1976).
21. Smith, R. M., “Relation among equilibrium and nonequilibrium aqueous species of aluminum hydroxy complexes,” *Nonequilibrium systems in natural water chemistry* (Gould, R.F. eds.), A.C.S. Advances in Chemistry Series No. 106, Washington, D.C., 250~279(1971).
22. Hsu, P. H. and Bates, T., “Formation of X-ray amorphous and crystalline aluminum hydroxides,” *Mineral Magazine*, **33**, 749~768(1964).
23. Vernon L. Snoeyink and Davic Jenkins, “Water Chemistry,” John Wiley & Sons, New York, pp. 279~282(1980).
24. Georgantas D. A., Grigoropoulou H. P., “Orthophosphate and metaphosphate ion removal from aqueous solution using alum and aluminum hydroxide,” *Journal of Colloid and Interface Science*, **315**(1), pp. 70~79(2007).
25. 김정숙, 이인성, 강임석, “Al(III)염 응집제를 이용한 하수 중의 인 제거 mechanism에 관한 연구,” 대한상수도학회 · 한국물환경학회 공동추계학술발표회 및 포럼, 한국물환경학회, 서울, pp. 840~841(2008).
26. 한승우, 정철우, 강임석, “상수처리용 합성 무기고분자 Al(III)계 응집제의 응집특성,” 한국환경과학회지, **8**(6), 717~724(1999).