

응집을 이용한 인의 제거에 급속혼화강도 및 응집제 주입량이 미치는 영향

한현진, 문병현*

창원대학교 환경공학과
641-773 경남 창원시 의창구 창원대학로 20

(2012년 10월 5일 접수; 2012년 11월 29일 수정본 접수; 2012년 11월 30일 채택)

Effect of Rapid Mixing Intensity and Coagulant Dosages on Phosphorus Removal by Coagulation

Hyun-Jin Han, and Byung-Hyun Moon*

Department of Environmental Engineering, Changwon National University
20 Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongnam 641-773, Korea

(Received for review October 5, 2012; Revision received November 29, 2012; Accepted November 30, 2012)

요 약

본 연구는 교반강도 및 응집제 주입량의 변화에 따라 플록의 성장특성이 인의 제거에 미치는 영향을 파악하고자 수행되었다. 본 연구에서는 Al/P 몰비를 1.0, 1.5와 2.0으로 급속혼화강도 G값을 100, 300과 500 s⁻¹로 변화시켜 수행하였다. 응집시 발생하는 응집지수(floc size index, FSI)와 크기가 다른 여과지를 이용하여 인의 제거율을 측정하여 성장 특성을 파악하였다. 연구결과 교반강도가 높을수록 용존인의 제거효율이 증가하였으며 Al/P 몰비가 낮을수록 교반강도의 영향이 컸다. T-P의 제거율은 Al/P 몰비 1.0 이하에서는 급속혼화 교반강도가 높을수록 높았으나 Al/P 몰비 1.0 이상에서는 G값 300 s⁻¹에서 가장 높은 제거 효율을 나타내었다. Al/P 비 1.0 이하에서는 G값 500 s⁻¹에서 가장 큰 FSI값을 나타내었으며, Al/P 몰비 1.0 이상에서는 G값 300 s⁻¹에서 가장 큰 FSI값을 나타내었다. 실제하수처리장 유출수를 대상으로 응집에 의한 인 제거에 Al/P 몰비와 급속혼화 강도의 영향은 인공조제수의 결과와 유사하였다.

주제어 : 응집, 급속혼화, Al/P 몰비, 인 제거, 플록

Abstract : In this study, the effects of mixing intensity and coagulant dosages on the characteristics of floc growth for phosphorus removal were investigated. The experiments were conducted under Al/P molar ratio of 1.0, 1.5 and 2.0; rapid mixing intensity with G value of 100, 300, and 500 s⁻¹. The characteristics of floc growth were measured by flocculation index (FSI) and the removal efficiencies of phosphorus by using different size filters. The removal efficiencies of soluble phosphorus increased as Al/P molar ratio and rapid mixing intensity increased. However, the highest removal efficiencies of T-P were observed at G value of 300 s⁻¹. When Al/P molar ratio was lower than 1.0, the value of FSI at G value of 500 s⁻¹ was the largest. However, when Al/P ratio was larger than 1.0, the value of FSI at G value 300 s⁻¹ was the largest. Effects of mixing intensity and Al/P molar ratio on coagulation for phosphorus removal of synthetic and real wastewater effluent were observed to be similar.

Keywords : Coagulation, Rapid mixing, Al/P molar ratio, Phosphorus removal, Floc

1. 서 론

인은 수체 내 제한인자로서 부영양화를 초래하며 조류 발생 시에는 2차적 산소소비량이 질소에 비해 상대적으로 높아 하수 및 폐수에 함유되어 있는 인을 처리하여야 한다[1]. 4대강 오염총량관리제도에서 관리대상물질로써 생화학적 산소요구량

(biochemical oxygen demand, BOD)과 더불어 총인이 포함되어 시행중이며, 또한 연안오염총량관리제도에서 총인이 관리대상 물질로 지정되었으며 4대강 사업으로 인한 수질개선 대책에도 총인 처리에 대한 관심이 높아 하수처리장의 방류수 중에 포함된 인의 효과적인 제거에 대해 집중적인 연구가 필요한 시점이다. 정수처리 공정에서 화학적 처리인 응집에 의한 오염물질 제거에 대한 연구는 활발하게 수행된 바 있다[2,3]. 그러나 하수처리에서 응집에 의한 인 제거는 가장 보편적이고 효과적인 처리 방법이지만 국내에서 하수에 함유된 인 제거를 위한 연구는 정

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: bhmoon@changwon.ac.kr

doi:10.7464/ksct.2012.18.4.404

수처리에 비해 미약하여 보다 많은 연구가 필요하다.

응집처리공정에는 알럼(alum)과 PACl (Poly aluminium chloride) 같은 Al(III)계 응집제가 가장 광범위하게 사용되고 있다. Al(III)계 응집제를 원수에 주입하면 수중에서 가수분해반응에 의해 발생하는 알루미늄 가수분해종과 오염물질이 결합하여 응집되고 침전에 의해 제거가 이루어진다. 정수처리 응집 공정에서 급속혼화의 교반시간 및 교반강도, 응집제 주입량이 가수분해종의 분포와 밀접한 관계가 있으며, 오염물질의 제거에 미치는 영향에 대한 연구결과가 보고되고 있다[4-6]. 가수분해종에 따라 응집 플럭의 크기 및 형태특성이 변화하며 이에 따라 고액분리가 영향을 받아 인의 제거 효율도 변화된다. 그러나 가수분해종에 따른 응집 플럭의 크기 및 형태특성이 하수처리장 유출수에 함유된 인의 제거효율에 미치는 영향에 관한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 응집공정의 운전조건 변화에 따른 가수분해종의 분포와 응집입자의 성장특성이 하수처리장 유출수에 함유된 오염물질 특히 인의 제거효율에 미치는 영향에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 응집공정을 이용한 인공하수와 실제 생물학적 하수처리장 유출수에 함유된 인의 제거를 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 응집제에서 발생하는 가수분해종 분포에 영향을 끼치는 Al/P 몰비와 급속교반 혼화강도가 응집 플럭의 크기에 미치는 영향과 용존인과 총인제거에 미치는 영향을 탐구하여 최적 운전인자를 도출하고자 하였다.

2. 재료 및 실험방법

본 연구에서 먼저 수질성상의 변화를 방지하기 위하여 인공조제수를 조절하여 실험에 사용하였다. 인 첨가를 위해 NaH_2PO_4 를 사용하였으며, 알칼리도 첨가를 위해 NaHCO_3 를 사용하였다. 원수의 성상은 Table 1에 나타내었다.

응집실험은 2 L 용량의 사각형(W 11.5 × L 11.5 × H 21.0 cm)에 교반을 위한 패들(W 2.5 × L 7.0 cm)이 각각 6개 설치된 자 테스트기(Jar testor)를 사용하였다. 급속혼화는 교반강도 G값 50, 100, 300, 500 s^{-1} 에서 교반시간은 30초 실시하였으며 급속교반 후 완속교반은 G값 50 s^{-1} 에서 30분 교반하고 침전 30분 후 상등액을 취하여 잔류 인을 분석하였다. 실험에 사용한 응집제는 알럼($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)이며 10 g/L 농도로 조절하여 Al과 P의 몰비를 0.2, 0.5, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0가 되도록 조정하여 주입하여 실험하였다. 잔류인은 0.45 μm 필터로 여과한 용존인과 여과하지 않은 T-P를 표준방법에 따라 분석하였다. 또한 여지의 공극이 1 μm 와 3 μm 를 사용하여 여과한 인의 제거율도 분석하였다. 응집반응 시 성장하는 응집지수(floc size index, FSI)를 iPDA (intelligent Photometric Dispersion Analyzer)를 사용하여 연속적으로 측정하여 분석하였다.

Table 1. Raw water characteristics

Characteristics	pH	Soluble-P (mg/L)	T-P (mg/L)	Alkalinity (mg as CaCO_3/L)
Value	7.30-7.60	9.85-10.52	10.25-10.97	95.00-113.00

FSI와 평균 응집입자의 크기는 높은 상관관계를 가지는 것으로 보고되어 본 연구에서는 FSI를 사용하여 응집입자의 성장크기변화를 살펴보았다[7].

3. 결과

3.1. Al/P 몰비와 혼화강도에 따른 인 제거효율

Figure 1에는 Al/P 몰비와 혼화강도에 따른 용존인의 제거 효율 변화를 나타내었다. Al/P 몰비가 증가되고 G값이 증가될수록 용존인의 제거효율이 상승하는 경향을 나타내었다. Al/P 몰비가 1.5와 2.0에서는 용존인의 제거율이 거의 유사하였으며 Al/P 몰비가 1.5 이상에서는 대부분의 용존인이 제거되는 것으로 나타내었다. 응집제의 주입량을 Al/P 몰비 1.0 미만으로 주입하여 G값 50, 100, 300 s^{-1} 에서 운전한 경우 1몰의 인을 제거하기 위해 평균적으로 1.35 몰의 Al이 필요하였으며 G값 500 s^{-1} 에서는 1.28 몰의 Al이 필요하였다. Al/P 몰비 1.0 이상에서는 G값 50, 100, 300 s^{-1} 에서 1.0 몰의 인을 제거하기 위해 평균적으로 1.4 몰의 Al이 필요하였으며 G값 500 s^{-1} 에서는 평균적으로 1.35 몰의 Al이 필요한 것으로 나타났다. 따라서 용존인의 제거율은 급속혼화 강도가 높을수록 높아지는 것을 알 수 있으며, Al/P 몰비가 낮을수록 급속혼화 강도의 영향이 크게 나타났다. 이는 급속혼화 강도가 높을수록 용존인의 제거율이 높았다는 기존 연구자들의 연구결과와 유사한 것으로 나타났다[4].

Figure 2-4에는 Al/P 몰비와 급속혼화강도가 응집 플럭의 크기에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 여지공극이 각각 0.45, 1.0, 3.0 μm 를 사용하여 분석한 용존인의 제거효율 변화를 나타내었다. 전반적으로 Al/P 몰비가 높고 급속교반강도가 높을수록 인의 제거효율이 증가함을 알 수 있다. Figure 2에 나타난 Al/P 몰비 1.0에서는 0.45와 1 μm 의 여지를 사용하여 측정된 인의 제거 효율에 비해 3.0 μm 여지를 사용한 경우의 제거율이 낮아 응집에 의해 생성된 플럭의 크기 분포 중 많은 부분은 크기가 작은 미세한 플럭으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그러나 Al/P 몰비를 각각 1.5 및 2.0으로 증가시켜 주입

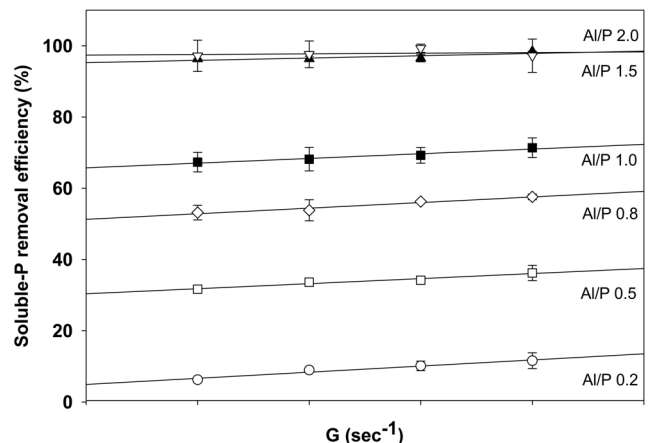


Figure 1. Effect of Al/P molar ratio and mixing intensity on soluble-P removal efficiency.

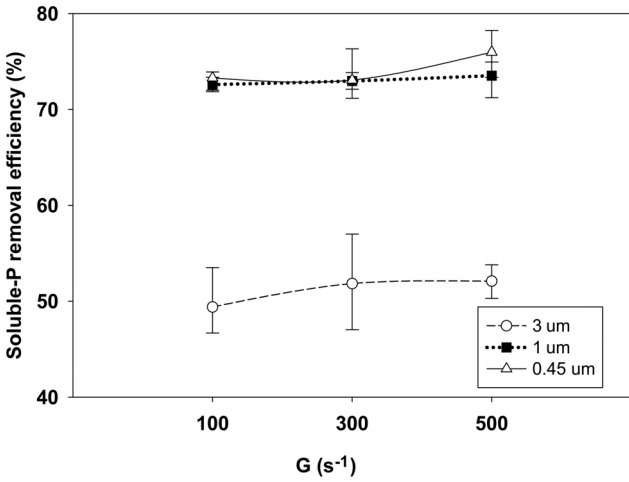


Figure 2. Effect of mixing intensity on soluble-P removal efficiency with different pore size filter at Al/P molar ratio of 1.0.

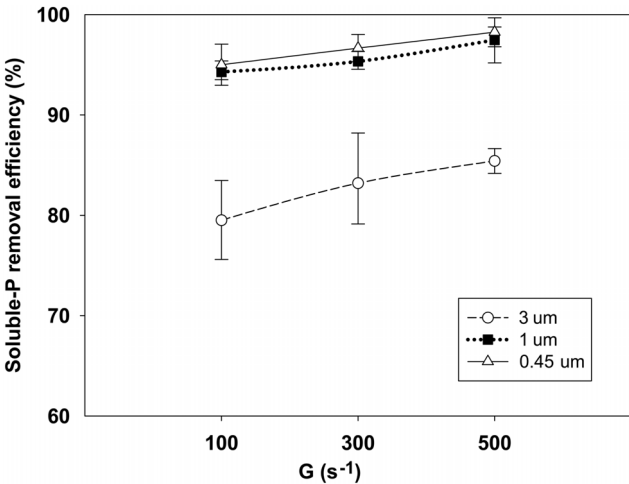


Figure 3. Effect of mixing intensity on soluble-P removal efficiency with different pore size filter at Al/P molar ratio of 1.5.

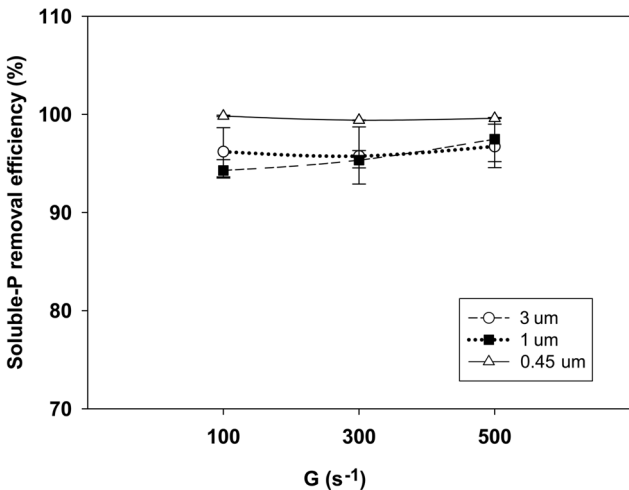


Figure 4. Effect of mixing intensity on soluble-P removal efficiency with different pore size filter at Al/P molar ratio of 2.0.

한 경우 여지공극 크기에 따른 제거율의 차이가 감소됨을 알 수 있다. Figure 4에 나타난 Al/P 몰비 2.0에서 1.0와 3.0 μm 여지 사이의 인 제거효율은 유사하게 나타나 응집 플러크의 크기가 대부분 3.0 μm 이상으로 증가됨을 알 수 있다. 따라서 급속혼화강도가 커질수록 발생하는 응집입자의 크기가 증가하며 특히 작은 응집입자의 크기가 증가되어 인의 제거효율도 높아지는 것으로 나타났다. 최근 연구결과에 따르면 급속혼화강도 G값이 증가할수록 단일성 및 복합성 알루미늄 가수분해 산물이 증가하여 인의 제거효율이 상승한다고 보고되었다 [4,5,8]. 즉, 교반강도가 높을수록 단일성 및 복합성 알루미늄 가수분해 산물이 많이 생성되어 용존인과 결합되면 0.45 μm 이상의 응집 플러크의 생성을 촉진시켜 인의 제거효율이 증가된다고 할 수 있다. 그러나 Al/P 몰비가 증가할수록 급속혼화강도가 인의 제거에 끼치는 영향은 감소되는 것으로 나타났다. 즉 응집체가 인과 결합하여 응집 플러크 형성할 수 있도록 충분히 주입되면 급속혼화에 따른 가수분해종의 분포변화가 인 제거에 끼치는 영향은 감소됨을 알 수 있다.

Figure 5에서는 Al/P 몰비와 급속혼화강도에 따른 T-P의 제거효율 변화를 나타내었다. Al/P 몰비가 1.0 이하에서는 급속혼화강도가 높을수록 T-P의 제거효율도 상승하였다. 그러나 Al/P 몰비 1.0 이상에서는 G값 300 s⁻¹에서 가장 높은 제거효율을 나타내었다. 단일성 알루미늄 가수분해 산물에 의해 형성된 응집 플러크는 작고 침강성이 낮고 복합성 알루미늄 가수분해 산물에 의해 형성된 플러크는 알루미늄 수산화침전물에 의해 형성된 응집 플러크보다는 작지만 비교적 크고, 침전이 잘 이루어지며, 알루미늄 수산화침전물은 유기물질을 효과적으로 흡착·제거한다고 보고되고 있다[6]. 응집제 주입량이 인 제거 이론적 요구량인 Al/P 몰비 1.0 이하로 주입되는 경우 크기는 작지만 플러크의 결합력이 강한 단분자성 가수분해종이 많이 형성되어 혼화강도가 높아질수록 제거효율이 높아지는 것으로 나타났다. 그러나 응집제 주입량이 증가되면 고분자성 가수분해종 및 침전물이 증가되고 이러한 가수분해종과 결합하여 발생하는 스윙

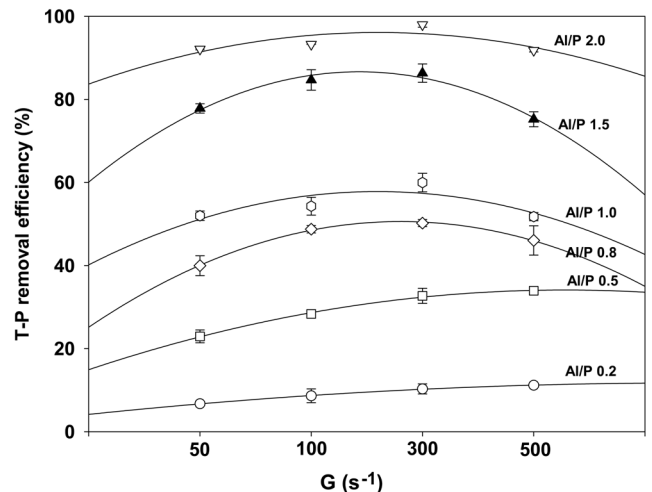


Figure 5. Effect of mixing intensity and Al/P molar ratio on T-P removal efficiency.

(sweep) 플럭은 입자간 결합력이 약하여 G값 500 s⁻¹에서 파괴 현상이 우세해지고 파괴된 입자는 재응집 능력이 저해되어 침강성의 저하가 일어날을 알 수 있다[9]. 따라서 Al/P 몰비와 급속혼화강도에 따라 변화되는 가수분해종의 분포에 의해 응집 플럭의 크기분포특성도 변화되며 이에 따라 침전성은 영향을 받으며 총인의 제거율도 변화됨을 알 수 있다.

3.2. Al/P 몰비와 혼화강도에 따른 FSI 변화

Figure 6에서 Figure 9에서는 Al/P 몰비 0.5, 1.0, 1.5, 2.0에서 혼화강도에 따른 FSI의 변화를 나타내었다. Al/P 몰비가 0.5인 경우 G값 500 s⁻¹에서 급속교반동안 FSI값이 다른 G값에 비해 크게 증가되고 완속교반 동안에도 큰 FSI값을 나타내었다. 그러나 FSI값이 비교적 0.4 이하로 적게 나타나 형성

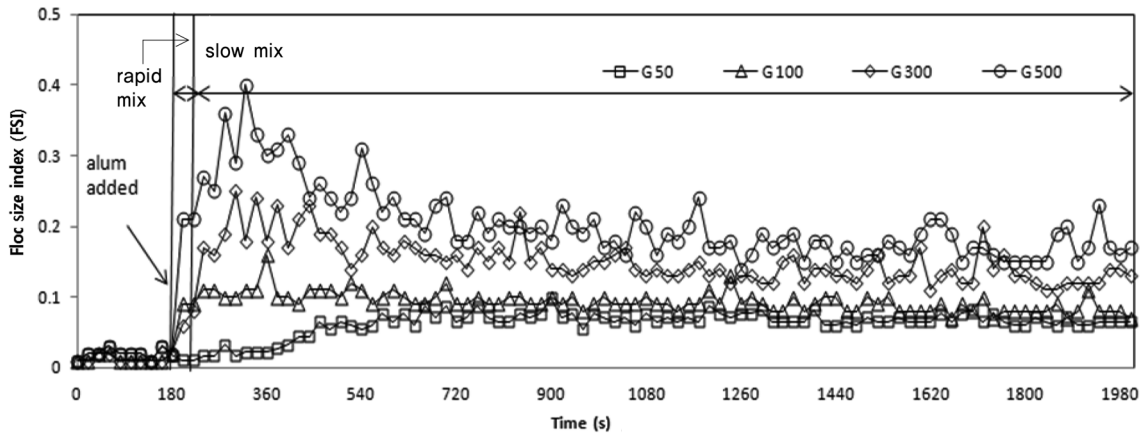


Figure 6. Effect of mixing intensity on FSI at Al/P molar ratio of 0.5.

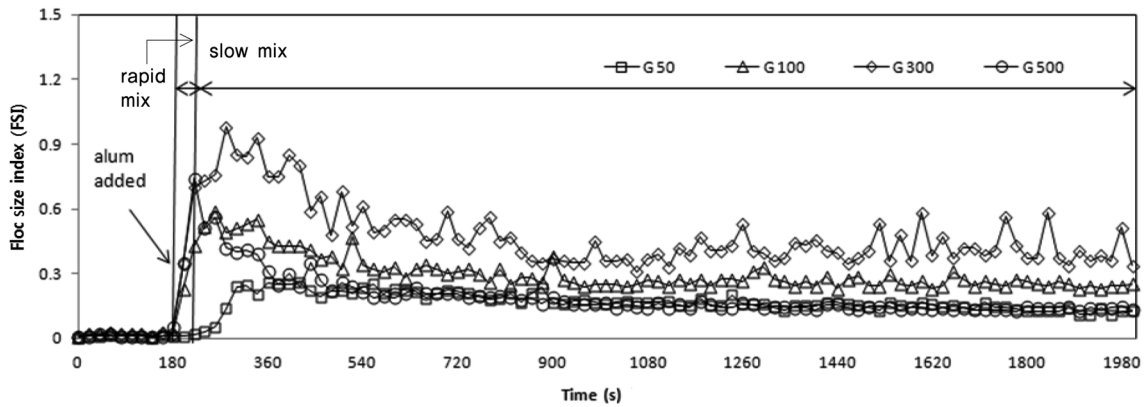


Figure 7. Effect of mixing intensity on FSI at Al/P molar ratio of 1.0.

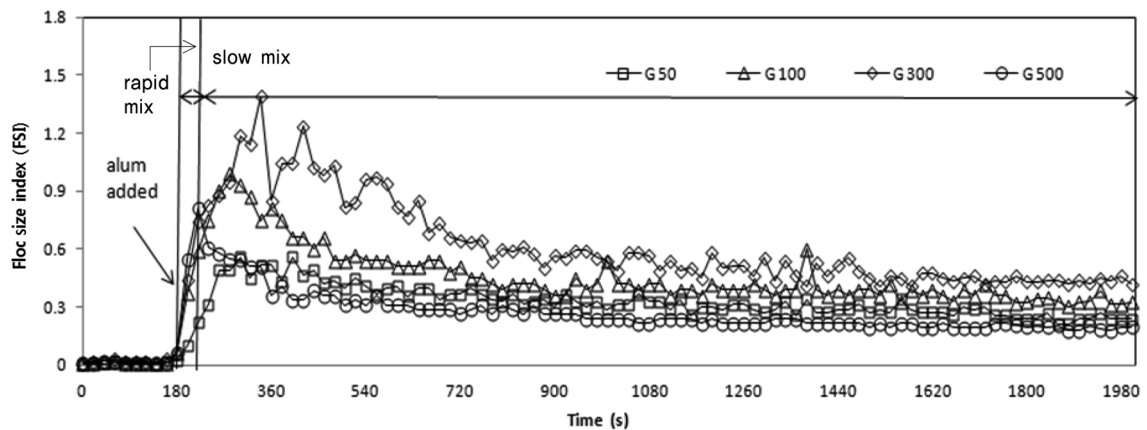


Figure 8. Effect of mixing intensity on FSI at Al/P molar ratio of 1.5.

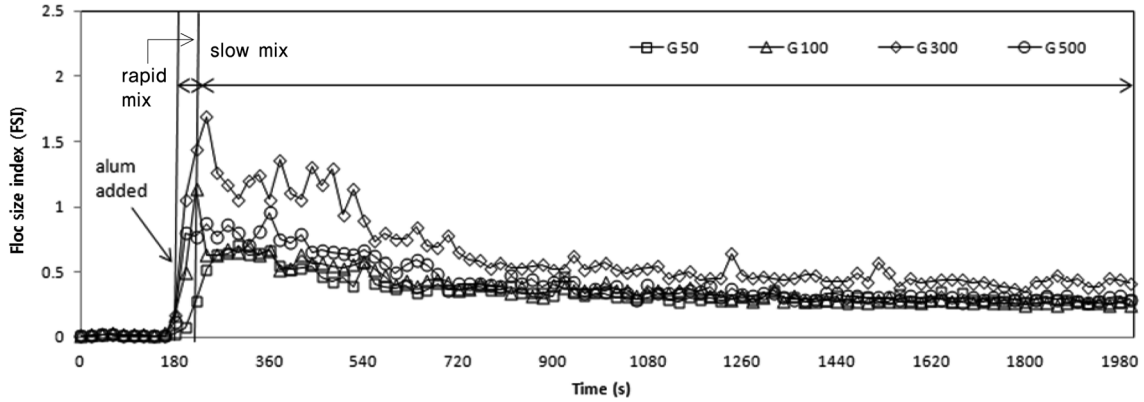


Figure 9. Effect of mixing intensity on FSI at Al/P molar ratio of 2.0.

되는 입자들의 크기는 여전히 작은 것으로 나타났다. Figure 7과 8에는 Al/P 몰비 1.0과 1.5에서 혼화강도에 따른 FSI변화를 나타내었다. Al/P 몰비 1.0과 1.5는 비슷한 경향을 나타내고 있다. 두 조건 모두 급속혼화의 G값 500 s⁻¹에서 가장 큰 FSI 값을 나타내었으나 완속교반 동안 감소하는 것으로 나타났다. G값 300 s⁻¹에서는 급속혼화 이후 완속교반 동안에도 FSI 값이 증가되었으나 약 450 초 이후 감소하였다. 이는 완속교반의 G값이 낮아 생성된 응집 플러크가 침전되는 것에서 기인된 것으로 판단되며, 완속교반 속도를 증가시켜 적절한 완속교반 속도로 운전하여야 함을 알 수 있다. 최근 급속혼화에서 높은 속도경사는 응집성장 및 파괴가 동시에 발생되어 완속교반 동안 파괴된 응집입자의 재응집을 저해하여 응집 플러크의 침강성이 악화된다는 연구결과가 보고되었다[9]. 따라서 급속혼화 강도가 높을수록 비교적 크기가 작은 응집입자들의 생성이 촉진되어 용존인의 제거율은 증가되나 침강성과 밀접한 관계가 있는 T-P의 제거효율은 G값 300 s⁻¹에서 가장 높은 제거효율을 나타낸 결과를 뒷받침한다고 할 수 있다.

Figure 9에는 Al/P 몰비 2.0에서 혼화강도에 따른 FSI의 변화를 나타내었다. 급속교반 후 FSI값은 G값 300, 100, 500 s⁻¹ 순으로 나타났다. G값 300 s⁻¹에서는 급속교반과 완속교반 동안 지속적으로 플러크가 성장하는 것으로 나타났으며, G값 100과 500 s⁻¹은 큰 플러크를 형성하지 못하는 것으로 나타났다. G값 100 s⁻¹에서는 충분하지 못한 교반강도로 인해 응집 플러크의 성장이 저하되며 G값 500 s⁻¹에서는 응집 플러크의 성장에 비해 응집 플러크의 파괴현상의 우세로 인한 것으로 판단된다.

3.3. 실제하수처리 유출수 적용결과

실제하수처리 유출수를 대상으로 인의 제거를 위한 응집실험을 실시하였다. 실험에 사용한 시료는 고도처리 하수처리장 유출수로 pH, 용존인, 총인 및 알칼리도는 각각, 6.60~7.50, 0.74~1.83 mg/L, 0.98~2.04 mg/L 및 88.00~107.00 mg/L이었다. 응집실험 조건은 인공조제수와 동일하게 수행하였다. Figure 10에는 Al/P 몰비와 혼화강도에 따른 용존인의 제거효율 변화를 나타내었다. 용존인의 제거율은 Al/P 몰비와 급속혼화 강

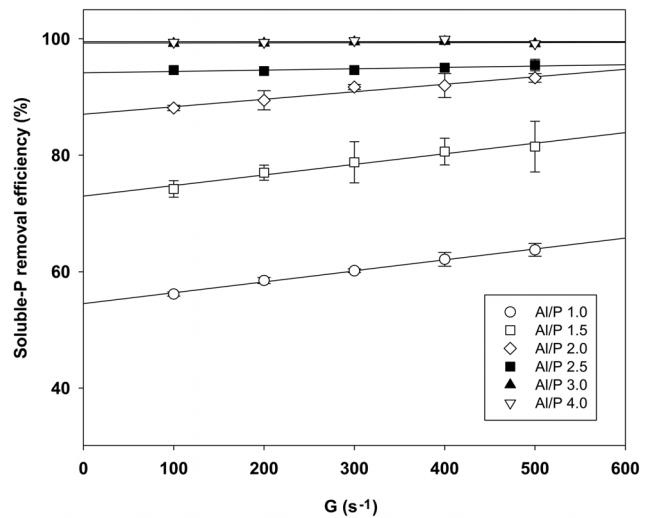


Figure 10. Effect of mixing intensity and Al/P molar ratio on soluble P removal efficiency of real wastewater effluent.

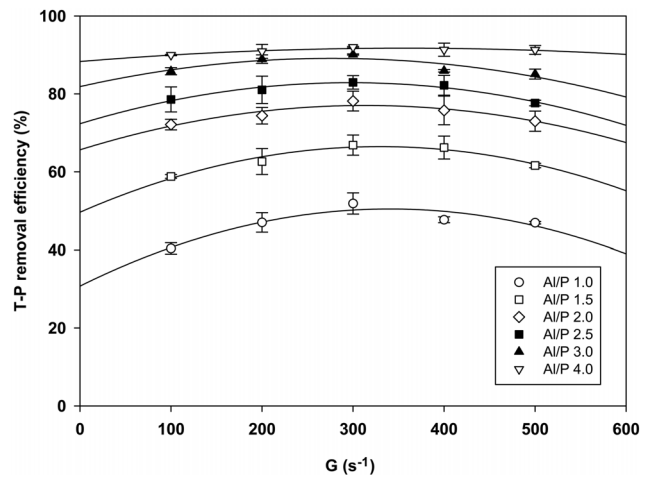


Figure 11. Effect of mixing intensity and Al/P molar ratio on T-P removal efficiency of real wastewater effluent.

도가 높을수록 증가되는 것을 알 수 있었다. 또한, 인공조제수를 대상으로 응집실험 결과에 비해 더 많은 응집제를 주입하

여야 함을 알 수 있다. 이는 실제하수처리장 유출수에 함유된 다른 물질과 인이 주입된 응집제와 경쟁반응에서 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 Al/P 몰비와 급속혼화의 영향은 인공조제수를 대상으로 한 실험결과와 유사한 경향을 내어 용존인의 제거율에 급속혼화 강도가 미치는 영향은 Al/P 몰비가 낮을수록 높았다.

Figure 11에는 Al/P 몰비와 혼화강도에 따른 총인의 제거효율 변화를 나타내었다. Al/P 몰비가 4.0에서 총인의 제거율은 최대값을 나타내었다. 총인의 제거율도 인공조제수를 대상으로 응집실험 결과에 비해 더 많은 응집제를 주입하여야 함을 알 수 있다. 급속혼화 강도가 총인의 제거율에 미치는 영향의 경향도 인공조제수를 대상으로 한 실험결과와 유사한 경향을 내었다. 급속혼화 강도가 높을수록 비교적 크기가 작은 응집입자들의 생성이 촉진되어 용존인의 제거율은 증가되나 침강성과 밀접한 관계가 있는 T-P의 제거효율은 G값 300 s⁻¹에서 가장 높은 제거효율을 나타내었다.

실제하수처리장 유출수의 인 제거를 위한 응집공정을 적용할 경우 유출수에 함유되어 있는 인의 농도가 변화하게 되며 이에 따라 적정응집제 주입량에 비해 과소 주입될 경우 급속혼화의 강도를 높게 운전하면 용존인의 제거율이 증가되며 총인의 제거율도 증가되는 경향을 나타내었다. 따라서 본 연구 결과 하수에 함유된 인의 제거를 위한 응집공정에서 응집제 주입량이 과소 주입되는 경우나 고액분리공정에 침전조를 대치하는 여과조나 막분리공정이 적용될 경우 급속교반의 강도를 높게 하여 운전하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

4. 결론

급속혼화 강도와 응집제 주입량이 인의 제거를 위한 응집에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용존인의 제거효율은 급속혼화 교반강도와 Al/P 몰비가 높을수록 증가되었다. 급속혼화의 교반강도가 높을수록 미세 응집 플럭의 생성이 촉진되어 용존인의 제거효율이 증가하는 것으로 나타났다. 급속혼화 교반강도의 영향은 Al/P 몰비가 낮을수록 크게 나타났다.
- 2) T-P의 제거효율은 Al/P 몰비가 증가될수록 증가되었으며, Al/P 몰비가 1.0보다 낮은 경우 교반강도가 높을수록 제거효율이 증가되었다. 그러나 Al/P 몰비가 1.0 이상인 경우는 G값 300 s⁻¹에서 가장 높은 제거효율을 나타냈다.
- 3) 각각의 Al/P 몰비에서 급속교반강도에 따른 FSI를 분석한 결과 Al/P 몰비가 0.5에서는 G값 500 s⁻¹에서 급속 및 완속 교반 동안 가장 큰 FSI값을 나타내었다. Al/P 비 1.0 이상에서는 G값 300 s⁻¹에서 가장 큰 FSI값을 나타내었다.
- 4) 실제하수처리장 유출수를 대상으로 응집실험을 수행한 결과 Al/P 몰비와 급속혼화 강도가 인의 제거에 미치는 영향은 인공조제수를 대상으로 한 결과와 유사하였다. 그러나 인공조제수를 함유된 인의 제거에 필요한 응집제 주입량보다

높게 주입하여야 함을 알 수 있었다. 이는 응집제와 방류수중 다른 물질의 경쟁반응에 의해 인공조제수를 대상 Al/P 몰비보다 높게 주입하여야 함을 알 수 있었다. 용존인 및 총인농도를 새로운 방류수 기준인 0.2 mg/L 이하로 제거하기 위해서는 응집제 주입율을 각각 Al/P 몰비가 2.0 및 4.0 이상 주입되어야 함을 알 수 있었다.

5) 본 연구 결과 인제거를 위한 응집공정에서 Al/P 몰비와 급속혼화 강도가 응집 플럭의 크기에 영향을 미치며 이에 따라 고액분리에 따라 제거효율이 변화함을 알 수 있다. 특히 응집제가 과소 주입되거나 고액분리공정에 여과조나 막분리공정을 이용할 경우 급속교반의 강도를 높게 하여 운전하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

감사

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No.2009-0070040).

참고문헌

1. Kwak, J. W., "Physico-chemical Principle and Practice of Water Treatment," *Yeigigak*, Seoul, 1998, pp. 39-41, pp. 194-269.
2. Liu, G., Zhang, X., and Talley, J. W., "Effect of Copper(II) on Natural Organic Matter Removal During Drinking Water Coagulation Using Aluminum-Based Coagulants," *Water Environ. Res.*, **79**(6), 593-599 (2007).
3. Zhu, I. X., Rothberg, M. R., and Wiedmeier, T., "Pilot Study on TOC Removal in Drinking Water Using Enhanced Coagulation Assisted by Membrane Ultrafiltration," *Am. Water Works Assoc.*, **3**, 1499-1514 (2008).
4. Kim, S. H., Yoon, D. S., and Yoon, B. H., "Evaluation of Effect of Rapid Mixing Intensity on Chemical Phosphorus Removal Using Al Hydrolysis Speciation," *J. KSWW.*, **25**(3), 367-373 (2011).
5. Han, S. W., and Kang, L. S., "Removal Mechanism of Phosphorus in Wastewater Effluent Using Coagulation Process," *Environ. Eng. Res.*, **32**(8), 774-779 (2010).
6. Yan, M., Wang, D., Ni, J., Qu, J., Chow, C. W. K., and Liu, H., "Mechanism of Natural Organic Matter Removal by Poly-aluminium Chloride : Effect of Coagulant Particle size and Hydrolysis Kinetics," *Water Res.*, **42**(12), 3361-3370 (2008).
7. Yu, W. Z., John, G., Luiza, C., and Guibai L., "The Role of Mixing Conditions on Floc Growth, Breakage and Re-growth," *Chem. Eng. J.*, **171**(2), 425-430 (2011).
8. Song, Y. K., Jung, C. W., and Sohn, I. S., "Characterization of Natural Organic Matter by Rapid Mixing Condition," *J. KSWW.*, **20**(4), 559-571 (2006).
9. Yu, W. Z., John, G., and Luiza, C., "Breakage and Re-growth of Flocs: Effect of Additional Doses of Coagulants Species," *Water Res.*, **45**(20), 6718-6724 (2011).