



가수분해 산물 분포를 이용한 급속혼화강도가 화학적 인 제거 효율에 미치는 영향의 규명 Evaluation of effect of rapid mixing intensity on chemical phosphorus removal using Al hydrolysis speciation

김승현^{1*} · 윤동수¹ · 문병현²

Seung-Hyun Kim^{1*} · Dong-Soo Yoon¹ · Byung-Hyun Moon²

1 경남대학교 토목공학과, 2 창원대학교 환경공학과

(2011년 3월 10일 접수 ; 2011년 6월 10일 수정 ; 2011년 6월 14일 채택)

Abstract

Mechanism of rapid mixing effect on chemical phosphorus removal is evaluated in this study. Assuming that chemical phosphorus removal is unaffected by mixing time, only rapid mixing intensity is evaluated. In order to find out the mechanism, it is hypothesized that rapid mixing affects the Al hydrolysis speciation, and that formation of more monomeric species (Al^a) results in better removal of phosphorus. According to a ferron assay, more Al^a formed at higher mixing intensity than at lower intensity. Subsequent experiments revealed that better phosphorus removal was obtained at higher intensity than at lower intensity, in terms of the molar ratio of $Al_{added}/P_{removed}$. The proposed hypothesis was proved in this study. Chemical phosphorus removal is affected by rapid mixing intensity due to its effect on the Al hydrolysis speciation.

Key words : Phosphorus Rapid mixing intensity Ferron assay Aluminum Hydrolysis speciation

주제어 : 인, 급속혼화강도, 페론 분석법, 알루미늄, 가수분해 산물의 분포

1. 서론

최근 인의 방류수 수질기준이 강화되면서 하수처리장에서 인을 화학적으로 제거하기 위한 시설이 여러 군데 설치되고 있다. 그러나 아직 화학적 인 제거시설에 대한 명확한 설계기준이 제시되지 못하고 있는 실정이다. 지금까지는 화학적 인 제거의 설계조건이 제시된 문헌은 미국환경청의 설계안내서(USEPA, 1987)가 유일하다. 이 안내서는 아래와 같은 급속혼화조건을 추천하고는 있으나 이 조건에 대한 근거는 제시하지 않았다.

- 혼화시간 30 초

- G 값 (mean velocity gradient) 300 m/sec/m
- 황산 알루미늄 내지 알루미늄네이트 나트륨의 최소용액 농도 6 %

화학적 인 제거에서 급속혼화의 중요성은 여러 연구에서 보고되었다 (Black, 1980; Ferguson and King, 1977; Lijklema, 1980; Diamadopoulos and Benedek, 1984). 이들 중, Black은 현장에서 측정한 인 제거의 효율이 실험실 결과에 미치지 못하는 경우에는 대부분 급속혼화 내지는 수리학적 과부하가 원인이라고 지적하였다. 그리고는 화학약품 주입지점의 급속혼화강도를 증가시키는 간단한 조작

* Corresponding author Tel:+82-55-249-2671, E-mail: shkim@kyungnam.ac.kr(Kim, S.)

을 통해서 인 제거의 효율을 2배나 개선할 수 있다고 주장하였다. 그러나, Black은 화학적 인 제거에서 급속혼화가 중요하다고 언급만 하였지, 이를 주제로 체계적인 연구를 실시하지는 않았다. 이들과는 달리 급속혼화가 화학적 인 제거에 중요하지 않다고 주장한 연구자도 있다 (Kavanaugh et al., 1978). 그들은 화학적 인 제거에 영향을 미치는 인자를 모형실험을 통해서 평가하였는데, Fe (III)을 급속응집제로 사용한 이들의 실험에서는 세 가지 종류의 급속혼화장치 사이의 차이가 90% 신뢰도에서 통계학적으로 의미가 없었다.

대부분의 연구자와 달리, Kim (1992; 1993)은 화학적 인 제거에서 급속혼화의 영향을 집중적으로 연구하였다. Kim은 위에 제시된 USEPA의 설계조건에 근거하여 몇 개의 혼화조건을 선정 한 후, 염화 알루미늄을 급속응집제로 사용하여 실험을 실시하였다. 그 결과에 근거하여 Kim은 USEPA의 설계조건 중 혼화시간을 제외한 혼화강도와 알루미늄의 최소용액농도가 화학적 인 제거에 영향을 미친다고 주장하였다 (1992; 1993). 그의 연구에서는 혼화강도가 강할수록 그리고 용액의 농도가 진할수록 화학적 인 제거의 효율이 향상되었다. 그러나 이 연구에서도 급속혼화가 화학적 인 제거에 영향을 미치는 기작은 제시되지 않았다.

급속혼화가 물 속에서 화학약품을 균일하게 분산시키는 목적으로만 제공되는 것으로 알려져 있지만 급속혼화는 급속응집제 가수분해 산물의 분포 (hydrolysis speciation)에도 영향을 미친다. Srivastava (1991; 1992)는 모의실험에 근거하여 물 속에 주입된 급속응집제의 가수분해 산물은 급속혼화의 영향을 받는다고 주장하였다. 급속혼화의 강도가 강할 경우에는 단일성 (monomer) 산물이 주로 생성되는 반면, 강도가 약할 경우에는 복합성 (polymer) 산물이 주로 생성된다. 이러한 결과는 화학적 인 제거를 위하여 주입된 알루미늄이나 철과 같은 급속응집제의 가수분해 산물의 분포는 급속혼화강도에 의해서 결정된다는 것을 의미한다. 그러나 Srivastava는 그의 주장을 입증할 수 있는 실험결과는 제시하지는 않았다.

급속응집제의 가수분해 산물의 종류가 화학적 인 제거의 효율에 영향을 미친다는 결과는 여러 연구자에 의해서 언급되었다 (Recht and Ghassemi, 1970; Diamadopoulos and Benedek, 1984; Lijklema, 1980). 이들의 연구결과에 의하면, 화학적 인 제거의 효율은 알루미늄과 철과 같은 금속의 가수분해 진행 정도에 따라서 달라졌다. 가수분해가 상당히 진행된 응집제 보다는 그렇지 않은 응집제를 사용하

였을 때 더 좋은 효율을 얻을 수 있었다. 즉, PACI (polyaluminum chloride)보다는 염화 알루미늄 내지 황산 알루미늄을 사용하였을 때 인이 효과적으로 제거되었다. 국내에도 유사한 결과가 있다. 한 과 강 (2010)은 염기도를 증가시켜 PACI를 제조한 후 화학적 인 제거효율을 비교하여, 응집제의 염기도가 낮을수록 인 제거효율이 높아진다는 결과를 제시하였다.

위에서 언급된 바와 같이, 급속혼화가 화학적 인 제거에 영향을 미치는지 여부에 대해서는 확실하게 밝혀지지 않았다. 그러므로, 이 연구는 급속혼화가 화학적 인 제거에 미치는 영향을 조사하고, 그 기작을 파악하기 위하여 실시되었다. 이러한 연구목적을 달성하기 위하여, 본 연구에서는 급속혼화가 알루미늄 가수분해 산물의 분포에 영향을 미치고, 그 영향으로 인하여 화학적 인 제거의 효율이 달라진다는 가설을 세웠다. 즉, 급속혼화의 강도에 따라서 다른 종류의 알루미늄 가수분해 산물이 생성되고, 이들이 하수에 포함된 인과 다르게 반응하기 때문에 인 제거의 효율이 차이가 난다고 가정하였다. 이런 가설을 증명하기 위하여 급속혼화의 강도가 알루미늄 가수분해 산물의 분포에 영향을 미치는지 여부를 우선 조사한 후, 급속혼화 강도에 따른 화학적 인 제거효율의 차이를 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 인공하수

인은 물리적으로는 용존성 인 (dissolved phosphorus)과 입자성 인 (particulate phosphorus)으로 구분할 수 있다. 이들 중 용존성 인은 화학공정에 의해서 제거되는 반면, 부유물질인 입자성 인은 화학공정보다는 침전과 여과와 같은 고액분리공정에 의해서 제거된다. 본 연구는 하수에 있는 인의 화학적 제거에 초점을 두고 실시하였으므로, 실험에 사용되는 인공하수에는 입자성 인을 포함하지 않았다. 인공하수는 하수의 주요 요소인 알칼리도를 포함하도록 $\text{NaHCO}_3\text{-NaH}_2\text{PO}_4$ 로 제조하였다. 인공하수의 알칼리도와 인 농도는 미국 가정오수의 평균농도 (100 mg/L as CaCO_3 및 10 mg/L as P)를 선정하였다. Table 1에 본 연구에서 제조된 인공하수의 성분을 제시하였다.

Table 1 Characteristics of synthetic wastewater used in this study

Parameter	Concentration
Phosphorus, mg/L as P	9.79~11.7
Alkalinity, mg/L as CaCO_3	100~102
pH	7.48~7.56

2.2 자-실험

화학적 인 제거 실험은 자-실험을 통하여 실시하였다. 다만 일반적인 자-실험과 달리 완속혼화를 생략하고 급속혼화만 제공하였다. 급속혼화와 완속혼화는 목적이 다르다. 급속혼화는 하수에 주입된 금속응집제가 인과 화학적으로 균일하게 반응하도록 유도하는 과정이고, 완속혼화는 급속혼화과정 중 생성된 침전물의 크기를 성장시키는 과정이다. 그러므로, 완속혼화가 부유물질인 입자성 인의 제거에는 도움이 될 것으로 판단된다. 그러나 본 연구는 급속혼화가 화학적 인 제거에 미치는 영향을 조사하였기 때문에 자-실험에서 완속혼화는 생략하였다.

급속혼화에는 혼화강도와 시간 등 두 가지 조건이 있다. 본 연구에서는 혼화강도는 다양하게 변화시켰으나 (G 값으로 30, 50, 380, 450, 600 s⁻¹), 혼화시간은 30 s로 일정하게 제공하였다. 위에서도 언급된 바와 같이 혼화강도와 달리 혼화시간은 화학적 인 제거에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으므로 (Kim, 1992), 동일한 시간을 사용하였다. 고액분리는 완전하게 이루어진다는 가정하에 자-실험에서 생성된 침전물은 0.45 μm의 공극 크기를 갖는 여과지를 사용해서 분리하였다. 잔류 인 농도는 Standard Methods (1995)에 준해서 측정하였다. 인을 제거하기 위한 금속응집제는 황산알루미늄 (Al₂(SO₄) · 18H₂O)을 사용하였다. 황산알루미늄은 용해농도 5%로 제조하여 정해진 농도 (Al/P 몰비 0.2~1.8)를 주입하였다.

2.3 페론 분석법 (ferron assay)

Smith (1970)에 의하면, 알루미늄이 물과 반응하여 생성되는 알루미늄 가수분해 산물은 세 가지 종류 (Al^a, Al^b, Al^c)로 구분된다. 이 중 Al^a는 단일성 산물, Al^b는 복합성 산물, 그리고 Al^c는 수산화 침전물로 구성되는데, 페론 분석법 혹은 NMR (Nuclear Resonance Magnetic)을 이용해서 각각의 산물의 농도를 개별적으로 측정할 수 있다. 페론 분석법은 페론과 알루미늄 가수분해 산물 사이의 반응속도 차이를 이용한다. 단일성 산물로 구성된 Al^a와의 반응은 순간적으로 일어나는 반면, 복합성 산물로 구성된 Al^b와의 반응은 느리게 진행된다. 그리고 침전물인 Al^c과는 반응이 일어나지 않는다. 본 연구에서는 2분 이내에 반응하는 산물은 Al^a, 그리고 2분 이후 2시간까지 반응하는 산물은 Al^b로 간주하였다.

페론 시약은 아래에 표기된 방법으로 제조하였다 (Parker and Bertsch, 1992; 송 등, 2006). 제조된 시약은 4°C에서 5일간 숙성하여 사용하였으며, 숙성 후 20일을

초과하지 않았다. 알루미늄 가수분해 산물의 농도는 페론 시약 10 mL를 주입하고, 적당량의 Al을 주입한 후, 시료의 최종부피를 35 mL로 만들어서 370 nm 파장에서 분석하였다.

- ① Ferron (8-hydroxy-7-idoquinoline-5-sulphonic acid)과 1,10-phenanthroline의 농도가 각각 2.85×10⁻³ M, 2.52×10⁻³ M이 되도록 1번 시약을 1 L 제조하고 0.45 μm 여과지로 여과
- ② Sodium acetate 농도가 4.3 M이 되도록 2번 시약을 1 L 제조하고 0.45 μm 여과지로 여과
- ③ NH₂OH · HCl 100g에 con. HCl 40 mL을 가하여 3번 시약을 1 L 제조하고 0.45 μm 여과지로 여과
- ④ 1번 시약 500 mL와 2번 시약 200 mL을 혼합하고, 3번 시약 200 mL을 첨가한 후 증류수로 페론 시약 1 L 제조

2.4 통계처리

실험자료들 사이의 차이가 실험오차가 아니라 실질적 차이인지를 평가하기 위하여 통계처리를 실시하였다. 통계처리가 가능하도록 모든 자료는 최소한 3번 이상의 실험을 동일한 조건에서 실시하여 획득하였다. 통계처리는 SPSS package를 사용하여 실시하였으며, 여러 변수를 동시에 비교하는 다중비교는 Scheffe 방법을 사용하여 95% 신뢰도에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 혼화강도에 따른 알루미늄 가수분해 산물의 분포

혼화강도에 따른 알루미늄 가수분해 산물의 분포를 페론 분석법을 이용하여 조사한 결과를 Fig. 1에 제시하였다. 이 결과에 의하면 비록 그 차이가 크지는 않지만 혼화강도에 따라서 Al 가수분해 산물의 분포가 다르게 나타났다. 황산알루미늄의 가수분해 결과, 단일성 산물인 Al^a는 78.3~89.3%, 복합성 산물인 Al^b는 1.5~10.2%, 수산화 침전물인 Al^c는 0.4~18.6%가 생성되었다. 본 연구에서 얻어진 Al 가수분해 산물의 분포는 문헌에 나타난 다른 연구결과와 유사하였다. 송 등 (2006)은 페론 분석법을 사용하여 황산알루미늄의 가수분해 산물의 분포를 조사하였는데, 이들의 결과에 의하면 Al^a는 83%, Al^b는 8%, Al^c는 9%이었다. 또한 한과 강 (2010)이 동일한 방법을 사용하여 황산알루미늄 가수분해 산물의 분포를 측정된 결과에 의하면, Al^a는 88%, Al^b는 12%이 생성되었다. 이러한 결과들은 본 연구에서 사용된 페론 분석법의 신뢰도를 뒷받침한다.

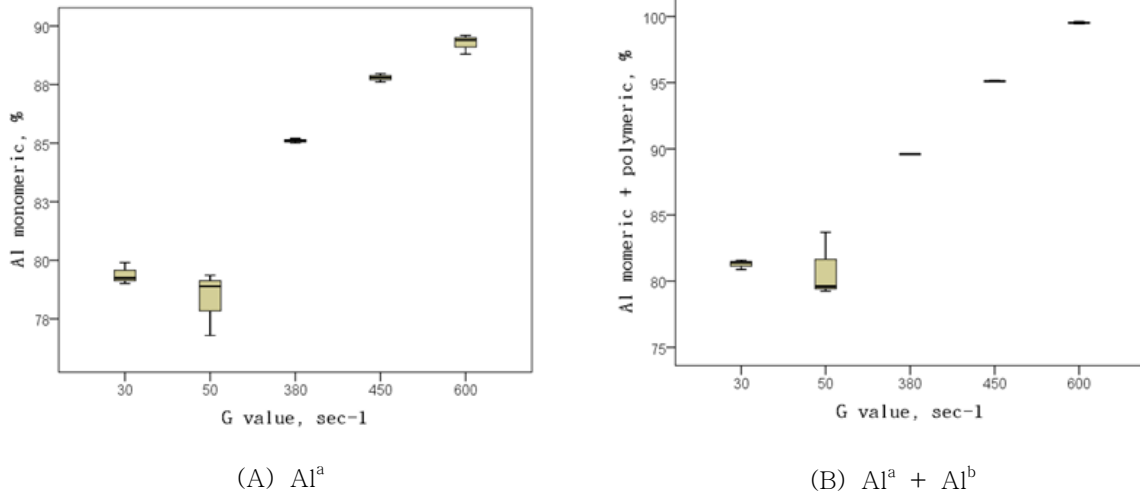


Fig. 1 Aluminum speciation according to rapid mixing intensity; a) Al^a b) Al^a+Al^b

Table 2 Summary of statistical analysis at various rapid mixing intensities*

Rapid mixing intensity	30 s ⁻¹	50 s ⁻¹	380 s ⁻¹	450 s ⁻¹	600 s ⁻¹
30 s ⁻¹			a, ab	a, ab, p	a, ab, p
50 s ⁻¹			a, ab	a, ab, p	a, ab, p
380 s ⁻¹	a, ab	a, ab		a, ab, p	a, ab, p
450 s ⁻¹	a, ab, p	a, ab, p	a, ab, p		a, ab
600 s ⁻¹	a, ab, p	a, ab, p	a, ab, p	ab,	

*a means that the amount of Al^a is different from those obtained under other conditions ab means that the sum of Al^a plus Al^b is different from those obtained under other conditions; p means that the molar ratio of Al_{added}/P_{removed} is different from those obtained under other conditions

혼화강도가 강할수록 전체 가수분해 산물 중 단일성 산물 (Al^a)의 비중이 높았으며, 강도가 약할수록 그 비중이 작았다. 예를 들면, 혼화강도가 G 값으로 600 s⁻¹인 경우에는 Al^a의 비중이 89.3% 이었으나, 30 s⁻¹인 경우에는 79.4% 이었다. 복합성 산물인 Al^b도 혼화강도가 강할수록 많이 생성되었다. 혼화강도가 G 값으로 450 s⁻¹인 경우에는 7.3%가 생성되었으나, 30 s⁻¹인 경우에는 1.5%만이 생성되었다. 수산화 침전물로 구성된 Al^c의 분포는 Al^a와는 반대양상을 나타냈다. 혼화강도가 G 값으로 450 s⁻¹인 경우에는 Al^c의 비중이 4.9%에 불과하였으나, 50 s⁻¹인 경우에는 그 비중이 18.2%로 늘어났다.

각각의 혼화강도에서 얻어진 Al 가수분해 산물 분포의 차이를 Scheffe 방법으로 95% 신뢰도에서 평가한 결과를 Table 2에 제시하였다. Table 2에서 a는 Al^a의 차이가, ab는 Al^a와 Al^b의 합의 차이가 통계학적으로 의미가 있다는

것을 나타낸다. 즉, G 값 30 s⁻¹ (79.4%)과 50 s⁻¹ (78.3%)에서 얻어진 Al^a 양의 차이는 통계학적으로 의미가 없었으며, 450 s⁻¹ (87.8%)과 600 s⁻¹ (89.3%)에서 얻어진 양의 차이도 의미가 없었다. 반면, G 값 380 s⁻¹에서 얻어진 Al^a의 양은 다른 혼화강도에서 얻어진 양과는 통계학적으로 다르게 나타났다. 다시 말하면, 혼화강도 30~50 s⁻¹에서는 단일성 산물인 Al^a가 적게 생성되었으며, 혼화강도를 증가시켜 380 s⁻¹이 되었을 때 더 많은 양의 Al^a가 생성되었다. 그리고 가장 강한 혼화강도에서 (450~600 s⁻¹) 가장 많은 양의 Al^a가 생성되었다.

유사하게 혼화강도가 강할수록 단일성 산물과 복합성 산물의 합도 많아졌다. 혼화강도가 G 값으로 600 s⁻¹인 경우에는 Al^a와 Al^b가 전체 가수분해 산물의 99.6%를 차지하여 수산화 침전물인 Al^c는 거의 측정되지 않았다. 반면 혼화강도를 약하게 하여 G 값이 30 s⁻¹이 되었을 때는 그 합이

81.4%로 줄어들었다. 각각의 혼화강도에서 얻어진 Al^a 와 Al^b 의 합에 대해서도 Scheffe 분석을 실시하였다. Table 2에 의하면, G 값 $30\ s^{-1}$ (81.4%)과 $50\ s^{-1}$ (81.8%)에서 얻어진 단일성 및 복합성 가수분해 산물 합차이는 통계학적으로 의미가 없었다. 반면 G 값을 증가시켜 $380\ s^{-1}$ 이 되었을 때는 이들보다 많은 양 (89.6%)이 생성되었으며, 이후 G 값을 증가시킬수록 단일성 산물과 복합성 산물의 합은 늘어났다. 이러한 결과는 혼화강도가 알루미늄 가수분해 산물의 분포에 영향을 미칠 수 있다는 Srivastava의 모의결과를 실험적으로 확증한다.

3.2 혼화강도가 화학적 인 제거에 미치는 영향 및 기작

G 값으로 나타낸 혼화강도 $380\ s^{-1}$ 에서 주입된 알루미늄의 농도에 따라서 인공하수로부터 제거된 인의 농도를 몰 농도로 나타낸 결과를 Fig. 2에 제시하였다. 이 그림에 의하면, 인공하수에 주입된 알루미늄 주입농도가 약 0.4 mM에 도달할 때까지는, 이들 사이에 직선관계가 유지되었다. 인공하수의 인 농도가 0.32~0.38 mM 이므로 이 결과는 알루미늄 주입량과 하수에 함유된 인의 양 사이의 몰비 (Al/P)가 1보다 작을 때까지는 화학양론 관계 (stoichiometric relationship)를 유지하면서 인이 제거되었다는 것을 의미한다. 이러한 화학양론 관계는 하수에 알루미늄이 주입되었을 때, 인 제거는 흡착보다는 침전물 형성 (precipitation)에 의해서 이루어진다는 것을 의미한다. 이에 대한 상세한 설명은 다른 문헌을 참고할 수 있다 (김, 1994). 화학양론 관계는 알루미늄 주입량이 인공하수의 인의 양보다 많아지면서 사라졌으므로, 화학적 인 제거의 효율은 Al/P 비율이 1보다 작은 경우와 큰 경우로 구분해서 평가하였다.

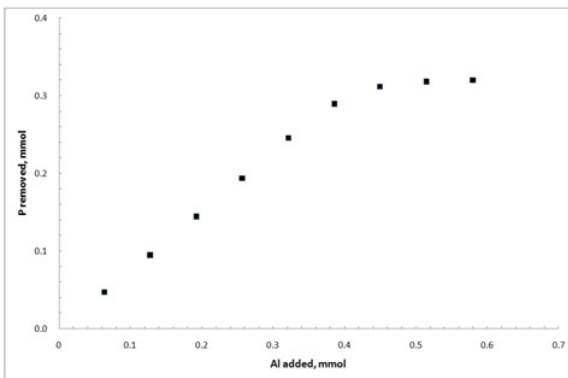


Fig. 2 P removed as a function of added Al at rapid mixing intensity of $380\ s^{-1}$ as G

알루미늄 가수분해 산물 중 단일성 산물이 많이 생성됨으로써 인 제거효율이 향상되는지 여부를 확인하기 위하여 각각의 혼화강도에서 주입된 알루미늄과 제거된 인 사이의 몰비율 ($Al_{added}/P_{removed}$)을 산정하여 비교한 결과를 Fig. 3과 4에 제시하였다. 몰 농도 기준 알루미늄 주입량이 인공하수에 함유된 인의 양보다 작은 경우는 ($Al/P < 1$) Fig. 3에, 큰 경우는 ($Al/P > 1$) Fig. 4에 나타내었다. 혼화강도에 따라서 인 제거효율이 달라질 수 있다는 것이 Fig. 3에 잘 나타나 있다. 혼화강도가 약했을 때는 몰 비율 ($Al_{added}/P_{removed}$)이 1.3을 초과하였으나, 혼화강도가 강했을 때는 그 비율이 1.3보다 낮았다. 즉, 혼화강도를 강하게 하면 1.3몰보다 적은 양의 알루미늄을 주입해서 1몰의 인

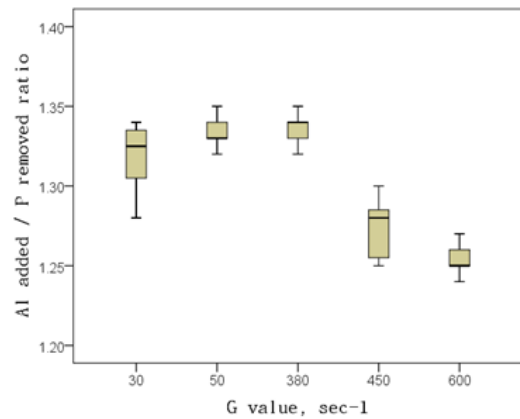


Fig. 3 Comparison of the molar ratios of Al_{added} to $P_{removed}$ at various mixing intensities when the amount of Al added is less than the amount of P in the synthetic wastewater

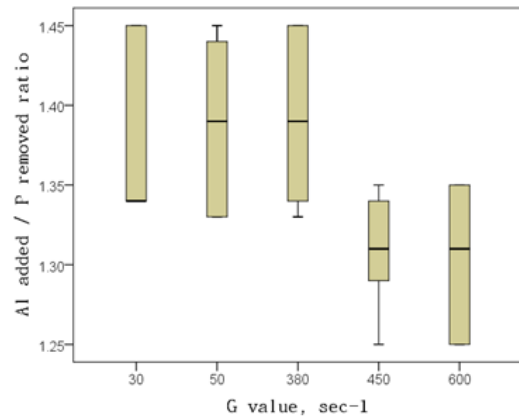


Fig. 4 Comparison of the molar ratios of Al_{added} to $P_{removed}$ at various mixing intensities when the amount of Al added is greater than the amount of P in the synthetic wastewater

을 제거할 수 있으나, 혼화강도가 약해지면 1.3몰 이상의 알루미늄을 주입해야 한다.

각각의 혼화강도에서 얻어진 몰 비율 ($Al_{added}/P_{removed}$)에 대한 통계처리 결과는 **Table 2**에 요약되었다. **Table 2**에 의하면, 혼화강도가 G 값으로 30~380 s^{-1} 까지는 인 제거 효율의 차이가 통계학적으로 의미가 없었다. 그러나, G 값을 450 s^{-1} , 600 s^{-1} 로 증가시키자 인 제거효율이 향상되었다. 즉, 혼화강도가 G 값으로 600 s^{-1} 일 때 평균 몰 비율 ($Al_{added}/P_{removed}$)은 1.25로 인 제거효율이 가장 우수하였다. G 값을 450 s^{-1} 으로 감소시켰을 때, 평균 몰 비율은 1.27이 되어 인 제거효율이 2% 감소하였다. 혼화강도를 더욱 약하게 해서 G 값이 380 s^{-1} 이하가 되었을 때는 평균 몰 비율이 1.33으로 인 제거효율이 6% 감소하였다. 한편 **Fig. 4**에서 알 수 있듯이, 몰 농도 기준 주입된 알루미늄의 양이 인공하수에 함유된 인의 양을 초과하였을 때는 ($Al/P > 1$) 혼화강도에 따른 인 제거효율에 차이가 없었다. 이 조건에서는 몰 비율 ($Al_{added}/P_{removed}$) 1.30~1.39이 얻어졌는데, 통계처리 결과 그 차이는 의미가 없는 것으로 밝혀졌다.

이 결과는 Kim (1992)의 결과와 유사하다. Kim은 인공하수에 염화 알루미늄을 주입하여 실험한 결과에 근거하여, 미국환경청의 혼화강도 추천 G 값인 300 s^{-1} 보다는 600 s^{-1} 에서 더 효과적인 인 제거효율을 얻었다고 주장하였다. 본 연구에서도 혼화강도 600 s^{-1} 에서 가장 효과적인 인 제거효율을 얻었다. 급속혼화강도가 강할수록 인 제거효율이 향상되는 것은 가수분해 산물의 분포 때문이다. 알루미늄의 가수분해 산물 중에는 단일성 산물이 화학적 인 제거에 가장 효과적으로 알려져 있는데, 급속혼화강도가 강할수록 단일성 산물이 많이 생성되기 때문에 강한 급속혼화 조건에서 인 제거효율이 가장 우수하였다. 이러한 결과는 하수처리장에서 화학적 인 제거시설을 도입하는 경우, 급속혼화강도 설계조건으로 G 값 600 s^{-1} 을 제공하는 것이 바람직하다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 인공하수에 황산 알루미늄을 주입하여 급속혼화강도가 화학적 인 제거에 미치는 영향과 그 기작을 조사하였다. 기작을 파악하기 위하여, 본 연구에서는 급속혼화강도가 알루미늄 가수분해 산물의 분포에 영향을 미치고, 그로 인하여 화학적 인 제거의 효율이 달라진다는 가설을 세웠다. 페론 분석법을 사용하여 급속혼화강도에 따른

가수분해 산물의 분포를 측정된 결과, 혼화강도가 강할수록 단일성 산물이 많이 생성되었으며, 약할수록 단일성 산물이 적게 생성되었다. 알루미늄 주입량에 대해서 제거된 인의 양을 몰 비율 ($Al_{added}/P_{removed}$)로 표기하여 인 제거효율을 평가한 결과, 급속혼화강도가 강할수록 인 제거효율이 우수하였으며, 혼화강도가 약할수록 인 제거효율이 저하되었다. 본 연구결과 화학적 인 제거에서는 급속혼화강도가 중요하고, 혼화강도가 강할수록 인 제거효율이 향상되는 이유는 강한 혼화조건에서 단일성 알루미늄 가수분해 산물이 많이 생성되기 때문으로 밝혀졌다.

사 사

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

참고문헌

- Black, S.A. (1980) Experience with phosphorus removal at existing Ontario municipal wastewater treatment plants, Phosphorus Management Strategies for Lakes, Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI, pp329.
- USEPA, *Design Manual-Phosphorus Removal*, (1987), Cincinnati, OH.
- Diamadopoulos, E. and Benedek, A. (1984) Aluminum hydrolysis effects on phosphorus removal from wastewaters, *JWPCF*, **56**(11), pp1165.
- Ferguson, J.F. and King, T. (1977) A model for aluminum phosphate precipitation, *JWPCF*, **49**(4), pp646.
- Kavanaugh, M.C., Krejei, V., Weber, T., Eugster, J. Roberts, P.V., (1978) Phosphorus removal by postprecipitation with Fe(III), *JWPCF*, **50**(2), pp216.
- Kim, S.-H. (1992) Rapid mixing in chemical phosphate removal, *Fluid/Particle Separation Journal*, **5**(3), pp137-143.
- Kim, S.-H. (1993) Chemical phosphate removal from wastewaters, Unpublished Ph.D. dissertation, Civil and Construction Engineering, Iowa State University, Iowa.
- Lijklema, L. (1980) interaction of orthophosphate with iron (III) and aluminum hydroxides, *Environ. Sci. Technol.*, **14**(5), 537.
- Parker, D.R. and Bertsch, P.M. (1992) Identification and quantification of the Al13 tridecameric polycation

- using ferron, *Environ. Sci. Technol.* **26**(5), pp908-914.
- Recht, H.L. and Ghassemi, M. (1970) Kinetics and mechanism of precipitation and nature of precipitate obtained in phosphate removal from wastewaters using aluminum ferric salts, Report No. 17010 EK1, Federal Water Quality Administration, Washington, D.C.
- Smith, R.W. and Hem, J.D., (1970) Relations among equilibrium aqueous species of aluminum hydroxyl species In Nonequilibrium Systems in Natural Water Chemistry, Advances in Chemistry Series 106, American Chemical Society, Washington, D.C.
- Srivastava, R.M. (1991) Investigations into Al(III) speciation as a function of mixing conditions, Unpublished Ph.D.dissertation proposal, Civil Engineering Department, University of Illinois at Urbana Champaign, Illinois.
- Srivastava, R.M. (1992) Mixing, Al(III) chemistry, and the rapid mixing process in water treatment, Unpublished Ph.D. dissertation, Civil Engineering Department, University of Illinois at Urbana Champaign, Illinois.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed. Eaton, A.D., Clesceri, L.S., Greenberg, A.E. eds. (1995) American Public Health Association, Washington, D.C.
- 김승현 (1996) 황산반토에 의한 인의 화학적 제거 기본원리의 규명, *대한환경공학회지*, **18**(5), pp603-611.
- 송유경, 정철우, 황보봉형, 손인식 (2006) 응집공정에서 발생하는 알루미늄 가수분해종 분포특성, *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**(5), pp547-554.
- 한승우, 강임석 (2010) 응집공정을 이용한 하수처리수 중의 인 제거 mechanism, *대한환경공학회지*, **32**(8), pp774-779.