

## 질소/인 회수를 위한 Struvite 생성 메커니즘

§이 상 훈

계명대학교 환경학부 환경과학전공

### Mechanisms on Struvite Production for Nitrogen and Phosphorus Recovery

§Sang-hun Lee

Dept. of Environmental Science, Keimyung University, 1095 Dalgubeol-daero, Daegu 42601, Korea

#### 요 약

폐수내 질소와 인을 이용한 struvite 회수는 수계 부영양화 방지 및 비료자원화에 효과적인 기술이나, 해결해야 할 이론 및 기술적 문제점이 있다. 본 연구에서는, 기존 문헌의 상세한 검토를 통하여, 이론적 측면에서 적절한 반응식 선정 및 이론적 고찰을 이용한 struvite 생성 반응예측 가능성을 논의하고, 기술적 측면에서는 struvite 생성의 대표적인 저해물질인 Ca의 배제를 통해 struvite 결정의 순도를 높일 수 있는 효과적인 방법을 소개하려 한다. 반응예측 측면에서는 중성-염기성 pH 영역에서 효과적인 struvite 반응식 및 반응계수를 이용, 정량적 모델을 구축할 수 있다. 이러한 모델은 실제 회분식 실험결과와 잘 일치하며 특히 이온들의 charge balance도 함께 고려하여 struvite 생성시 희석된 수용액에서 흔히 동반되는 pH 저하를 합리적으로 예측할 수 있다. 한편, Ca의 배제를 통한 struvite 순도 향상은  $\text{HPO}_4^{2-}\text{-P}$  대비 고농도의  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 을 조성하여 해결할 수 있는데, 이는 고농도 암모늄 이온의 존재가 struvite 생성 관련 열역학적 구동력을 강화시켜 인산염이 Ca 대신 고농도 암모니아와 용이하게 반응하여 struvite 생성에 유리한 이온환경을 조성하기 때문이다. 즉 인산염이  $\text{Ca}^{2+}$ 과 빠르게 반응하여 이미 침전물이 형성하였을지라도, 고농도 암모늄으로 인한 열역학적 구동력으로 인산-칼슘 침전물이 재용해 되어 struvite를 생성시킬 수 있다.

주제어 : struvite, pH, 인산염, 칼슘,  $\text{NH}_4^+$

#### Abstract

The recovery of struvite using nitrogen and phosphorus in wastewaters is useful for prevention of eutrophication and use as fertilizer, but there are theoretical and technical issues to be resolved. Through the detailed literature review, this study discusses the possible reasonable prediction of struvite formation reaction by setting a feasible reaction equation with some theoretical considerations. In a technical aspect, the purity of struvite in solid precipitates can be promoted by excluding Ca in an effective way. As for the struvite reaction prediction issue, selection of proper equilibrium reaction as well as its reaction equilibrium coefficient is significant in the neutral and basic pH regions. The equilibrium reaction agrees well with the experimental batch test results. Considering the charge balance of the ions, the pH drop along struvite formation in a diluted solution can be predicted. Also, improvement of struvite purity through elimination of Ca can be expected by providing a highly concentrated  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  relative to  $\text{HPO}_4^{2-}\text{-P}$  because  $\text{NH}_4^+$  can enhance the thermodynamic driving force toward favorable struvite formation. Even though the phosphate reacts rapidly with Ca to form a solid precipitate, the thermodynamic driving force due to the high  $\text{NH}_4^+$  activity can dissociate the phosphate-calcium precipitates and produce struvite.

Key words : struvite, pH, phosphate, Ca,  $\text{NH}_4^+$

· Received : April 8, 2019 · Revised : May 3, 2019 · Accepted : May 21, 2019

§ Corresponding Author : Sang-hun Lee (E-mail: shlee73@kmu.ac.kr)

Department of Environmental Science, Keimyung University, Osan Hall 303, 1095 Dalgubeol-daero, Dalseo-gu, Daegu 42601, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

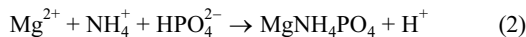
## 1. 서 론

질소(N)와 인(P)은 수계에서 부영양화를 일으키는 오염물질인 동시에 작물성장을 위한 주 영양물질이다<sup>1-3</sup>. 부영양화 방지를 위해 일반하수 또는 축산폐수 중 질소와 인 농도를 일정 수준에 맞춰 저감하고 있다. 인의 경우 또한 농업 비료, 식량 공급 및 산업 원료와 같은 유용한 자원인데<sup>1-3</sup>, 대부분 해외 인광석 등에서 추출하여 활용하기 때문에, 안정적 공급측면에서 전략적으로 다른 인회수 기술을 개발할 필요가 있다<sup>4</sup>. 이를 감안하면, 폐수 등 오염원으로부터의 P 회수는 부영양화 같은 수질 오염과 인광석 같은 광물 자원의 고갈 가능성을 방지하는데 유익하다.

효과적인 인 회수물질 중 하나로 대두되는 struvite ( $MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$ )는 광물질로 폐수 처리 설비 운영 중에도 흔히 발생하는데<sup>5</sup>, struvite가 비료로 활용가능한 점이 부각되면서 활발한 연구가 진행되고 있다. 통상적인 struvite 생성 반응식은 다음과 같은 형태가 가장 널리 알려져 있다<sup>6</sup>.



위 식에서 좌변에 있는 반응 이온의 활성도곱이 struvite 용해도 곱,  $pK_{SP} = 13.26$ 보다 높으면 침전이 자발적으로 진행된다. 식 (1)에서 알 수 있듯이 struvite는  $Mg$ ,  $NH_4^+$  및  $PO_4^{3-}$  이온이 몰비로 1:1:1로 구성된 물질이다. 일반적으로 비료에는 암모늄 질소, 인산염 인 및 칼륨의 주 영양 성분이 포함되는데, struvite는 이러한 영양성분이 두 가지나 존재하기 때문에 유용한 회수물인 것이다. 상기 식 (1)의 반응은  $PO_4^{3-}$ 가 우세한 강알칼리조건에서 적용가능하고 실제 pH 범위에서는 다음의 식이 더 적합하다<sup>7</sup>.



이중  $PO_4^{3-}$  혹은  $HPO_4^{2-}$ 는  $Mg^{2+}$ 이 아닌  $Ca^{2+}$  같은 다른 이온과 쉽게 결합하여 다른 형태의 침전물을 형성시킬 수 있는데 이러한 침전물은 질소인을 모두 함유하는 struvite 보다 비료로서의 가치가 떨어지기 때문에 흔히 불순물로도 취급된다<sup>5</sup>. 따라서 다른 침전반응을 가급적 배제하고 질소와 인을 모두 포함하는 struvite ( $MgNH_4PO_4$ ) 침전반응을 향상시켜 순도를 높이는 것이 비료 이용 목적으로 바람직하다<sup>8</sup>. 암모늄 질소와 인산염이온은 폐수내 풍부하게 존재하기 때문에 struvite 반응환경은 일단 고농도 하수 혹은 축산폐수로

하는 것이 바람직하다<sup>9</sup>. Struvite 생성은 일단 결정핵 형성 및 결정체의 성장을 거치고 이 후 주로 중력 침강을 통해 액중 분리된다<sup>8</sup>. 관련 연구는 최근에도 활발하게 진행되고 있으나 실용화를 위해서 극복해야 할 문제가 있다. 그 중 크게 두가지 주제를 들면 다음과 같다.

## 2. Struvite 생성반응 정량화 및 예측 문제

인회수율 극대화를 위해서 용액 또는 폐수의 최적 이온 조건 및 관련 매커니즘이 명확히 정리되어야 하는데, 특히 struvite 형성을 위한 최적의 pH 조건이 다양한 이온 환경 하에서 합리적으로 설정되어야 한다<sup>10</sup>. 예를 들어, Wang 등<sup>11</sup>은 1:1:1의 Mg:N:P 몰비에서 struvite 결정화를 위한 최적 pH가 9.0이라고 제시하였으며, 이 중 N:P가 증가하면 struvite의 결정화를 위한 최적 pH 값도 약간 증가하는 경향을 보인다는 것이다. 가령 N:P를 5에서 30으로 올리면 최적 pH 값이 9.0에서 9.5로 증가하는 등 복잡한 양상을 보인다. 또한, 기존 연구에서 쉽게 간과되는 점은 식 (2)에서 보듯이 흔히 발생하는 struvite 결정화 반응 중에 나타나는 pH 의존성이다. 즉, struvite 생성반응은  $H^+$  이온 생성을 동반하기 때문에 낮은 pH에서는 struvite 생성이 지체된다. 생성 반응을 촉진하기 위해서는 액중  $H^+$  이온의 생성을 예측하고 이를 적절한 방법으로 억제해야 한다. 불행히도 struvite 형성시 pH 의존성에 대한 정량화는 충분히 연구되지 않았으며<sup>9-10,12</sup>, struvite 생성 및 pH 감소에 미치는 반응이온의 효과도 정량적 방식으로는 충분히 연구되지 않는 실정이었다<sup>10</sup>. 예를 들면, 다양한 범위에서의 반응농도, pH 조건 및  $Ca^{2+}$  존재하에서 struvite 침전을 예측하기 위해 기계적 또는 경험적 모델이 개발되었지만<sup>2,9,11,13</sup>, 불행히도 이러한 모델은 struvite 침전과 pH 감소의 현실적인 상관 관계를 모사하지 못했다<sup>2,9,10</sup>. 사실 pH의 감소를 모델링하는 것은 다소 어려운 일인데 그 이유는 첫째,  $PO_4^{3-}$ 를 포함하는 전형적인 struvite 침전 평형반응식은  $H^+$  생성을 나타내지 않는다. 따라서  $HPO_4^{2-}$  및  $H^+$  생성을 명확히 나타내는 새로운 형태의 반응식이 이용해야 하고(식 (2)) 그 식의 평형상수도 파악해야 한다<sup>9-10</sup>. 둘째, 먼저 언급했던 struvite 침전에 따른  $H^+$  생성 외에도 다른 이온종간의 전환, 특히  $NH_3 \leftrightarrow NH_4^+$  전환에 의한 pH 완충 효과도 모사해야 한다는 점이다. Lee 등의 연구에서는  $HPO_4^{2-}$ 와  $H^+$  생성의 반응을 가진 또 다른 유형의 평형 방정식을 이용하였다<sup>9</sup>. 이 때  $HPO_4^{2-}$ 가 포함된

struvite 생성식의 평형계수는 Tsuno 등<sup>14)</sup>이 언급한 값이 유일하여 이를 이용하였다( $pK_{sp} = 14.1$ ). 이러한 평형 모델은 실험 데이터를 사용하여 검증 되었으며, 그 결과 만족스러운 결과를 나타내었다<sup>9)</sup>. 즉 새로운 평형 모델(식 (2))을 통하여 회분 수용액내 struvite 침전의 최적 이온 조건을 검증하고 보다 현실적인 예측이 가능해진 것이다. 물론 이 평형모델에는 struvite 생성반응 외에 다양한 반응식의 평형 계수와 이온농도가 적용되었으며, 반응양론, 침전반응속도, 및 열역학적 평형이 모델개발에 고려되었다. 기존 회분식 struvite 생성 실험 결과 수소이온이 많을수록(높은 pH 조건) 침전물 회수량이 많음을 확인되었다. 다만, 이 경우 struvite 뿐 아니라 hydroxyapatite 같은 칼슘-인산 물질도 높은 pH 수준에서 일부  $H^+$  이온을 생성 할 수 있다<sup>15)</sup>. 반면, 낮은 pH에서 비교적 pH 강하 및 침전물량이 적었으며 그에 따라 질소/인 처리율도 낮았다. 높은 질소/인 비를 적용할 경우 pH 감소가 완화된 높은 암모늄 농도가 pH 저하방지에 기여하였음을 확인하였다. 높은  $NH_3$  (+  $NH_4^+$ ) 농도(혹은 높은 질소/인 비율)는  $NH_3$ 의  $NH_4^+$ 로의 전환이 활발하여 pH 저하가 방지된 것이다.

Lee 등은 이러한 pH 저하를 비교적 정확히 예측할 수 있는 동적모델을 제시하였는데<sup>10)</sup>, 이 경우에도 통상적으로 이용되는 식 (1)이 pH 저하를 직접적으로 나타내지 못하므로 대신,  $HPO_4^{2-}$ 와  $H^+$  생성을 포함한 식 (2)와 평형상수 ( $pK_{sp} = 14.1$ )를 이용하였다<sup>10,14)</sup>. 평형 반응식에서 동적시스템의 구현이 용이하도록 준정상상태라는 개념을 도입하였는데 이는 액중 생성 struvite 농도는 시간에 따라 변화하도록 설정하되 struvite 생성 반응 및 그에 따른 pH 저하는 매시간 항상 평형반응(식 (2))를 따른다고 가정하는 것이다. 즉, 엄밀한 의미에서의 반응동역학식은 반응물질( $HPO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$  및  $Mg^{2+}$ )의 제거속도 및 struvite 생성속도를 구현해야 하지만 다수의 반응속도 계수를 전혀 모르므로, 각 시간대별 평형반응을 가정하고 struvite 농도만 시간대 별로 나타낸 것이다. 이 경우 속도계수는 일부 실험데이터를 이용, 확정한다<sup>10)</sup>. 용액 pH의 변화는 식 (2)에서 볼 수 있듯이 struvite의 생성에 따라 감소하지만, 이온종 사이의 전환( $NH_3 \rightarrow NH_4^+$  및  $PO_4^{3-} \rightarrow HPO_4^{2-} \rightarrow H_2PO_4^-$ ) 반응이 완충작용을 한다<sup>8,10,16)</sup>. 이 중 실질적인 약염기성 pH에서는  $NH_3 \rightarrow NH_4^+$ 간 전환이 중요한 pH 완충작용을 한다. 상기에 언급한 준정상상태 가정에 의거하여 미지의 수소이온 농도는 각 반응물질의 전하 및 농도를 고려한 charge balance 식을 이용하여 구할 수

있다<sup>10,16)</sup>. 이 때 미지의 개별 이온 농도는  $NH_3+NH_4^+$  또는 인산염 중 각각의 알려진 총 농도와  $H^+$  농도의 함수로 쉽게 나타낼 수 있다<sup>16)</sup>.

### 3. Struvite 공침전물에서 효과적인 Ca 제거 방안

또 하나 본 연구에서 지적하고자 하는 문제는 struvite 형성에 대한 주요 억제제로 알려진  $Ca^{2+}$ 의 저해작용을 최소화하는 것이다<sup>5)</sup>. 도시하수나 산업폐수의 경우 통상적으로 30 ~ 60 mg/L 농도범위의  $Ca^{2+}$ 이 포함되어 있는데 이는 struvite 반응물질과 공존시 struvite 결정핵 생성과 성장을 저해하는 가장 대표적인 물질로 알려져 있다<sup>5)</sup>. 구체적으로  $Ca^{2+}$  이온은 인산염과 빠르게 반응하여 struvite 보다 빠르게 인산 칼슘을 형성한다. 이러한 경쟁반응을 통해  $Ca^{2+}$ 가 struvite 결정핵 생성을 지연시키고 결정성장을 지연시킬 수 있다고 알려져 왔다<sup>5)</sup>.

칼슘/인산염 이온의 침전 반응과 그에 따른 struvite 생성저해는 기존 연구에서 많이 다루어졌다<sup>5,15)</sup>. Le Corre 등은 pH, 흡광도, 입자 크기 및 XRD (X-ray Diffractometer)를 포함한 다양한 분석 장비를 사용하여 struvite 결정화에 대한 Ca 용액 농도의 영향을 조사하였다. 조사 결과 용액내  $Ca^{2+}$  이온의 존재는 struvite 및 침전생성물의 입도, 형태 및 순도 등에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되었다<sup>5)</sup>. 다른 연구에서도  $Ca^{2+}$  농도를 증가 시키면 전체 침전결정 크기가 감소하고 struvite 성장 억제 등 struvite 결정화에 악영향을 미치며 침전물 중 비정질 물질의 형성이 자주 관찰된다고 보고되었다<sup>15)</sup>. Ca 저해작용에 관한 정량적 연구도 일부 수행되었는데 Wang 등은 합성폐수를 이용한 회분식 실험 결과, struvite 순도를 극대화하기 위해 Ca과 인산염 종내 인의 비는 0.5 미만이어야 하고 pH는 8.7 근처로 유지되어야 한다고 보고했다<sup>3)</sup>. 특히 용액의 pH가 10이상인 경우에 Ca과 인산염종과의 결합이 매우 활발하여 무정형 인산 칼슘의 형성이 현저하고 침전물내 struvite 순도가 상당히 감소함을 관찰하였다. 반면, Ye 등에 따르면 최대 인회수는 pH 9.7 정도에서 가능하다고 보고하였다. 이들의 연구 방법론은 다양한 범위의 이온 조건과 때로는 통계적 모델(반응 표면 방법론) 적용을 포함하는 실험적 회분 반응으로부터 최적의 이온 농도를 확인하는 것이다<sup>15)</sup>. 불행히도, 그들은 인 제거가 얼마나 빨리 혹은 어떻게 진행되었는지를 고려한 반응 속도와

같은 시간 관련 요소를 무시했다. 이러한 연구는 구체적으로 어떤 방안으로 Ca를 배제시킬 수 있는지에 대한 근거로는 부족하다. 또한 struvite 회수 대상으로 자주 이용되는 축산폐수내에는  $\text{HPO}_4^{2-}$ 이나  $\text{NH}_4^+$  이온 농도범위가 어느 정도 한정되어 있어 너무 넓은 범위의 반응농도를 대상으로 하는 것 보다는 가능하면 축산폐수나 특정 산업폐수의 농도조건에 맞춰서 연구하는 것이 합리적이다.

Lee 등의 연구에서는 고순도 및 적절한 결정 크기를 갖는 많은 양의 struvite를 생성시키고 더불어 인 회수를 극대화하기 위한 반응이온 조건을 다루었는데 이 중 Ca의 배제방안 및 struvite 고순도화를 중점적으로 연구하였다<sup>8)</sup>. 실제 폐수의 전형적인 농도비를 고려하여 Mg:P:N의 몰비를 1:1:7로 하였고, 초기  $\text{Ca}^{2+}$  농도는 30 ~ 60 mg/L로 설정하였다. 특히 이들은 회분식 반응조건에서 용액내뿐 아니라 침전물내 칼슘이온함량이 시간에 따라 어떻게 변하는지에 중점을 두었다. 또한, 다양한 농도조건에서 침전물의 크기 분포도 관찰하였다. 실험 결과, 널리 알려진 바와 같이 칼슘의 존재가 struvite보다 작은 고품침전물을 발생시키고 칼슘-인산과 struvite 반응 사이의 경쟁이 확인되었다<sup>8)</sup>. 즉, 반응개시 1분내 struvite의 반응물질은  $\text{Mg}^{2+}$ 과  $\text{NH}_4^+$  이온 농도가 서서히 감소하는 반면,  $\text{Ca}^{2+}$ 과  $\text{HPO}_4^{2-}$  이온은 빠르게 제거되어 작은 입도의 칼슘-인산 침전물이 생성되었

다. 그러나 반응이 점차 경과되면서 놀랍게도 struvite 핵형성과 결정 성장이 계속 유지되었는데, 놀라운 점은 용해된 마그네슘과 암모늄 농도의 지속적 감소와 동시에 반응초기 칼슘-인산 침전물 형성에 소진되었던 칼슘의 재용해가 동시에 발생한 것이다. 이는 칼슘-인산 침전물이 분리되면서 생성된 인산염이  $\text{Mg}^{2+}$  및  $\text{NH}_4^+$  이온과 결합하였음을 의미한다. 또다른 흥미로운 점은 이러한 칼슘 재용해가 struvite와 칼슘-인산 침전물 형성에 관련된 열역학적 에너지 차이와 높은 상관관계를 가진다는 점이다. 비록, 칼슘-인산 침전물 생성 반응이 struvite의 그것보다 반응속도 측면에서는 빠를지라도 반응시간이 경과하면서 struvite 생성의 높은 열역학적 구동력으로 인해 열역학적으로 불안정한 칼슘-인산물을 재용해시켜 고품물에서 칼슘을 배제시키고 남은 인산염을  $\text{Mg}^{2+} + \text{NH}_4^+$ 과 결합시켜 struvite를 생성시킴으로서 열역학적 안정화를 취한다는 것이다(Fig. 1 참조). 이는 MINTEQ 프로그램에서 제공한 열역학적 평형식에 의해 검증되었으며<sup>8)</sup> 다른 연구에서도 유사한 결과 즉 struvite 공침전물중 Ca의 재용해 현상이 보고되었다<sup>17)</sup>. 이러한 흥미로운 결과는 추가적인 에너지나 약품 투입 없이 단지 열역학적 자발성을 통해 침전물내 Ca 제거와 고순도 struvite 회수에 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 예를 들어, 칼슘-인산에는 없는 반응 물질인 암모늄을 고농도화 시키면 별다른 조작 없이도 간단하게

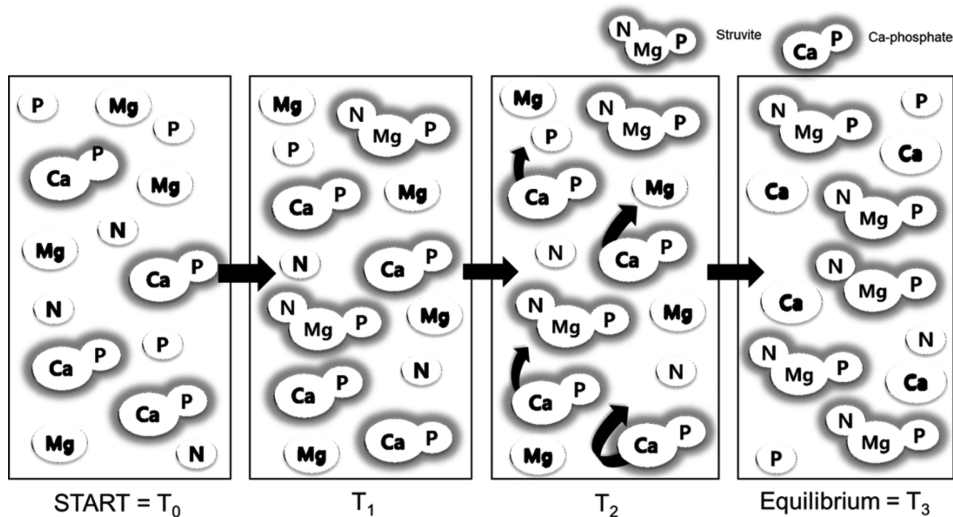


Fig. 1. Schematic illustration of the reaction progress from T<sub>0</sub> to T<sub>3</sub>; the Ca-phosphate precipitate is formed at T<sub>0</sub> but Ca re-dissolution occurs by the thermodynamic driving force toward the struvite formation at the equilibrium at T<sub>3</sub> (adapted from Lee, S.-H. et al. (2013))<sup>8)</sup>.

struvite 고순도화를 진척시킬 수 있을 것이다.

#### 4. 반응물질의 고농도화를 위한 기술

현재까지의 연구결과를 종합해 보면 struvite 회수율 극대화를 위해서는 반응물질 특히 높은  $\text{NH}_4^+$  농도가 효과적인 것으로 보인다. Struvite 반응물질이 많이 함유된 물질은 하수 혹은 축산폐수를 들 수가 있는데, 문제는 하폐수내  $\text{NH}_4^+$  및 인산염종 농도가 struvite 생성 반응을 신속히 진행시키기에는 농도가 적다. 또한 생물학적 처리를 거친 하수는 질소/인이 많은 경우 세포내 화합물 형태로 존재한다. Struvite 생성을 위해서는 이러한 세포내 질소/인 화합물은 먼저 가용성 이온으로 다시 전환시켜야 한다<sup>9)</sup>. Struvite 반응에 효과적인 고농축 용해성 암모늄 질산 및 인산염인 이온을 제조하기 위해 몇가지 기술을 적용할 수 있는데, 몇가지를 예로 들면 NaOH 등을 이용하여 pH를 높여 알칼리 이온으로 유기성 고형슬러지를 용해시키는 알칼리성 가수 분해나<sup>9),18)</sup> 오존을 이용하여 pH 상승 및 슬러지 용해를 유도하는 알칼리성 오존<sup>19)</sup> 등이 있다. 그리고 이론적 측면에서 새로운 산염기 반응모델을 통하여 보다 합리적으로 관련 반응을 예측할 수 있을 것이다<sup>20)</sup>.

#### 5. 결 론

본 연구에서 제시하는 가장 효과적이고 용이한 struvite 회수방안 중 하나는 반응 농도 특히  $\text{NH}_3$  및  $\text{NH}_4^+$  농도를 극대화시키는 것으로 결론지을 수 있다. 이들 물질을 고농도로 유지하여 (1) 회석 용액내 struvite 생성시 흔히 나타나는 pH 저하를 방지할 수 있고 (2) 대표적인 불순물인 Ca 성분을 struvite 반응시 생성되는 침전물에서 자발적으로 제거하여 struvite 고순도화를 도모할 수 있다.

첫번째, 반응예측 측면에서는 기존의 경험적 모델에서 더 나아가, struvite 생성에 따른 pH 저하를 예측할 수 있게 되었으며 이를 위해 보다 효과적인 평형반응식 및 반응계수를 이용하였다. 여기서,  $\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{NH}_3$  전환반응을 통해 pH 저하를 방지할 수 있음을 정량적으로 확인할 수 있다. 한편,  $\text{Ca}^{2+}$ 의 배제를 통한 struvite 순도 향상도 역시  $\text{HPO}_4^{2-}$ -P 대비 고농도의  $\text{NH}_4^+$ -N으로 해결할 수 있는데, 이는  $\text{NH}_4^+$  이온이 struvite에서 만 필요하기 때문에 고농도  $\text{NH}_4^+$  이온이 struvite 생성 열역학적 자발적 구동력을 높여 struvite 생성에 유리한

조건을 형성하기 때문이며 이로 인해 반응초기 Ca와 결합된 인산염은 채용해되어 struvite 반응에 이용된다.

#### References

1. Ali, M. I. and Schneider, P. A., 2006 : A fed-batch design approach of struvite system in controlled supersaturation, Chem. Eng. Sci., 61(12), pp.3951-3961.
2. Ali, M. I. and Schneider, P. A., 2008 : An approach of estimating struvite growth kinetic incorporating thermodynamic and solution chemistry, kinetic and process description, Chem. Eng. Sci., 63(13), pp.3514-3525.
3. Wang, J., et al., 2005 : Engineered struvite precipitation: Impacts of component-ion molar ratios and pH, J. Env. Eng., 131, pp.1433-1440.
4. Driver, J., Lijmbach, D., and Steen, I., 1999 : Why recover phosphorus for recycling and how?, Environ. Technol., 20, pp.651-662.
5. Le Corre, K. S. et al., 2005 : Impact of calcium on struvite crystal size, shape and purity, J. Cryst. Growth, 283, pp.514-522.
6. Doyle, J. D. and Parsons, S. A., 2002 : Struvite formation, control and recovery, Wat. Res., 36, pp.3925-3940.
7. Stratful, I., Scrimshaw, M. D., and Lester, J. N., 2005 : Conditions influencing the precipitation of magnesium ammonium phosphate, Water Res., 35, pp.4191-4199.
8. Lee, S.-H. et al., 2013 : Enhancement of struvite purity by re-dissolution of calcium ions in synthetic wastewaters, J. Hazard. Mat., 261, pp.29-37.
9. Lee, S.-H., et al., 2012 : Development and validation of an equilibrium model for struvite formation with calcium coprecipitation, J. Cryst. Growth, 372, pp.129-137.
10. Lee, S.-H., Kumar, R., and Jeon, B.-H., 2016 : Struvite precipitation under changing ionic conditions in synthetic wastewater: experiment and modeling, J. Colloid Interface Sci., 474, pp.93-102.
11. Wang, J. et al., 2006 : Modeling the crystallization of magnesium ammonium phosphate for phosphorus recovery, Chemosphere, 65, pp.1182-1187.
12. Hanhoun, M. et al., 2011 : Temperature impact assessment on struvite solubility product: A thermodynamic modeling approach, Chem. Eng. J., 167, pp.50-58.
13. Liu, Z. et al., 2011 : Effect of struvite seed crystal on MAP crystallization, Chem. Technol. Biotechnol., 86, pp.1394-1398.
14. Tsuno, S., Somiya, I., and Yoshino, M., 1991 : Struvite formation from supernatant of digested sludge, J. Jpn Sewage Works Assoc., 28, pp.58-77.
15. Ye, Z.-L. et al., 2010 : Short communication: Phosphorus

recovery from synthetic swine wastewater by chemical precipitation using response surface methodology, J. Hazard. Mater., 176, pp.1083-1088.

16. Stumm, W. and Morgan, J. J., 1996 : Aquatic Chemistry: Chap. 3, 3rd Ed. John Wiley and Sons, New York. p.88-144.

17. Capdevielle, A. et al., 2013 : Optimization of struvite precipitation in synthetic biologically treated swine wastewater—Determination of the optimal process parameters, J. Hazard Mat., 244-245, pp.357-369.

18. Tong, J. and Chen, Y., 2009 : Recovery of nitrogen and phosphorus from alkaline fermentation liquid of waste activated sludge and application of the fermentation liquid to promote biological municipal wastewater treatment, Water Res., 43, pp.2969-2976.

19. Saktaywin, W. et al., 2005 : Advanced sewage treatment process with excess sludge reduction and phosphorus recovery, Water Res., 39, pp.902-910.

20. Lee, M.-S., 2018 : Acid-base Reaction. J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 27(5), pp.3-8.

이 상 훈

- 한양대학교 자원공학과 석사
- 퍼듀대학교 Biological Engineering 박사
- 현재 계명대학교 환경학부 환경과학전공 조교수

學會誌 投稿 安內

種 類	內 容
論 說	提案, 意見, 批判, 時評
展望, 解說	現況과 將來의 견해, 研究 技術의 綜合解說, Review
技 術 報 告	實際的인 試驗, 調查의 報告
技術, 行政情報	價値있는 技術, 行政情報를 간결히 解說하고, comment를 붙인다.
見 聞 記	國際會義의 報告, 國內外의 研究 幾關의 見學記 등
書 評	
談 話 室	會員相互의 情報交換, 會員 自由스러운 말, 隋霜 등
Group 紹介	企業, 研究幾關, 大學 등의 紹介
研究論文	Original 研究論文으로 本 學會의 會誌에 揭載하는 것이 適當하다고 보여지는 것

수시로 원고를 접수하오니 많은 투고를 바랍니다.