

호소수내 암모니아성 질소 및 인 동시 제거를 위한 란탄-제올라이트 복합체 개발 Development of La(III)-zeolite Composite for the Simultaneous Removal of Ammonium Nitrogen and Phosphate in Confined Water Bodies

백주헌 · 김금용 · 류홍덕 · 이상일[†]
Joo-Heon Paek · Keum-Yong Kim · Hong-Duck Ryu · Sang-Il Lee[†]

충북대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(2010년 2월 26일 접수, 2010년 8월 30일 채택)

Abstract : This study was aimed to propose La(III)-zeolite composite which can effectively and simultaneously remove ammonia and phosphate in confined water bodies such as lakes and ponds. The optimum ratio of La(III):zeolite for the simultaneous removal of ammonia and phosphate was 0.0048 La(III) g:1 zeolite g. The drying temperature of La(III)-zeolite composite severely affected phosphate adsorption showing optimum condition at room temperature. It was revealed that the optimum dosage of La(III)-zeolite composite was 4.052 g/L at adsorption time of 90 min. The presence of alkalinity in aqueous solution brought positive effect on phosphate adsorption. Detachment of La(III) from La(III)-zeolite composite, which was dried at room temperature, was not observed in aqueous solution. It indicates that La(III)-zeolite composite could effectively block phosphate released from sediment.

Key Words : Phosphate, Ammonia, La(III)-zeolite Composite, Adsorption, Alkalinity

요약 : 본 연구에서는 인 및 암모니아 흡착에 효과적인 La(III) 및 제올라이트를 적절히 결합하여 호소수 및 연못 등의 질소 및 인을 동시에 효과적으로 제거할 수 있는 La(III)-zeolite 복합체 개발을 목적으로 하였다. 연구 결과 La(III)-zeolite 복합체 제조 시 최적 결합 비는 0.0048 La(III) g:1 zeolite g 인 것으로 나타났다. 복합체 제조 시 건조 온도는 인 흡착에 결정적인 영향을 주는 것으로 나타났는데 상온 건조가 가장 적합한 것으로 관찰되었다. La(III)-zeolite 복합체 최적 주입량은 4.052 g/L로 나타났다. La(III)-zeolite 복합체 주입 시 최적 흡착 시간은 90 분으로 나타났다. 수용액상에서 알칼리도의 존재는 암모니아 및 인 흡착에 긍정적인 영향을 주는 것으로 관찰되었다. 상온에서 건조시킨 La(III)-zeolite 복합체는 용액 내에서 La(III)의 탈리 현상이 관찰되지 않았으며, 이는 La(III)-zeolite 복합체가 인을 흡착하여 바닥에 가라앉은 후 바닥으로부터 용출되는 인을 효과적으로 차단 할 수 있음을 의미한다.

주제어 : 인, 암모니아, La(III)-zeolite 복합체, 흡착, 알칼리도

1. 서론

우리나라에 존재하는 많은 호소들은 부영양화 현상과 더불어 매년 여름철이 되면 수온이 상승하여 조류들이 서식하기 좋은 환경이 조성 된다. 이로 인해 조류가 대량 번식하면서 독소를 발생시키고 호소의 투명도를 저하시켜 시각적으로도 좋지 못한 결과를 초래하게 된다. 또한 정수과정에서 조류로 인해 여과지의 막힘 현상이나 음용수 맛의 저하 및 냄새를 유발하기도 한다.¹⁾ 이렇게 과다하게 발생한 조류가 사멸하게 되면 세균에 의해 분해되면서 많은 산소를 소비하게 되어 결국에는 용존 산소량이 부족하게 된다. 이로 인해 호소 바닥의 철, 망간 등의 용출을 유발시키기도 하고 물고기의 폐죽음 같은 피해도 발생하게 된다.²⁾

이러한 부영양화는 호소로 유입되는 질소와 인이 원인이 다.³⁾ 부영양화를 억제하는 방법에는 호소로의 질소와 인의 유입을 억제하는 방법과 유입된 질소와 인을 호소 내에서 처리하는 방법이 있다.²⁾

호소로의 질소와 인의 유입을 억제하기 위해서는 자연계와 농업 및 축산, 생활계와 하천 저질 등 외적 오염원을 관

리해야 하는데 이런 면오염원의 관리는 많은 비용과 긴 시간을 필요로 하기 때문에 매우 어렵다.⁴⁾

호소 내에서 질소와 인을 처리할 경우 유입량과 경로가 다양한 질소보다는 자연계에서 순환이 잘 되지 않는 인을 처리하는 것이 용이한 것으로 알려져 있다. 수중의 인을 제거하는 방법 중에 정석탈인법은 수중의 정인산이온이 칼슘이온과 반응하여 난용성 $Ca_5(OH)(PO_4)_3$ 를 생성하는 방법이다. 하지만 이 방법은 약품비용이 많이 들고 고도의 운전관리 기술이 필요로 하기 때문에 지속적이고 안정적인 처리가 곤란하다.²⁾ 또한 Alum과 같은 무기응집제의 경우 적용 가능한 pH 범위가 제한되어 있고 무기금속염과 결합된 인이 호소 바닥으로 가라앉아 뒤덮을 경우 혐기성 상태가 되어 미생물 내에 축적되어 있던 인이 체외로 방출되는 문제점이 발생할 수 있다. La(III)을 단독으로 사용하게 되면 수중의 인을 흡착하고 나면 그대로 부유하게 되므로 바닥으로부터 용출되는 인에 대해 capping 능력이 없고, La(III)의 가격이 고가이므로 비용이 많이 드는 단점이 있다. 그리고 기타 EBPR법(Enhanced biological phosphate removal), HGMS법(High gradient magnetic separation) 등이 사용되고 있다.^{5,6)}

[†] Corresponding author E-mail: gatorlee@chungbuk.ac.kr Tel: 043-261-2469 Fax: 043-272-2469

본 연구에서는 호소내의 인뿐만 아니라 질소도 동시에 제거할 수 있는 복합체를 개발하려는 목적이 있다. PO_4^{3-} -P의 흡착능이 있는 La(III)을 NH_4^+ -N의 흡착능이 있는 제올라이트와 결합시키면 수중의 질소와 인을 동시에 제거할 수 있다. 또한 우리나라의 소양호와 같은 호수에서는 내적 인 부하량이 전체 인부하량의 50%를 넘는다고 한다.⁴⁾ 제올라이트를 지지체로 La(III)이 결합되어 있다면 호소수내에 용존되어 있는 질소 및 인뿐만 아니라 퇴적층에서 용출되는 영양염류를 지속적으로 흡착할 수 있을 것으로 판단된다.

La(III)은 3가 양이온으로서 넓은 pH 범위(4.5~8.5)에서 철이나 알루미늄염에 비해 PO_4^{3-} -P과의 결합력이 뛰어나고 수중의 PO_4^{3-} -P과 1:1의 몰비로 반응하여 난용해성의 $LaPO_4 \cdot nH_2O$ 을 형성한다.^{7,8)} 또한 생성된 $LaPO_4$ 침전물은 인의 재용출이 거의 일어나지 않는 장점이 있다($LaPO_4$ 의 $K_{sp} = -24.76$).⁹⁾

제올라이트는 정사면체 구조의 단위로 이루어진 복합 산화물로서 양이온 교환 성질이 있고 일반적인 상황에서 세공 내에 물을 포함하고 있는 특징이 있다. 골격구조나 조성(Si/Al 몰비)에 따라 종류가 다양하게 존재하고 세제 첨가제나 촉매, 흡착제 등으로 많이 사용되고 있다. 제올라이트의 결정 구조 중 금속성 이온은 다른 양이온과 교환될 수 있고 이온 간의 친화력이 다르기 때문에 양이온의 종류에 따라 이온교환이 선택적으로 나타나게 된다.¹⁰⁾ 제올라이트에 있어서 이온교환은 양이온의 종류, 이온교환 온도, 양이온의 농도, 용매의 종류 등의 인자에 영향을 받는데 2가 양이온보다 1가 양이온이 이온교환이 잘 일어난다.¹¹⁾

따라서 본 연구에는 La(III)-zeolite의 질소 및 인 흡착 효율을 극대화하기 위해 (1) La(III) 및 제올라이트의 최적 결합조건, (2) La(III)-zeolite 주입량, (3) 질소 및 인 흡착을 위한 최적 pH 및 알칼리도의 영향 등에 관한 연구 등을 수행하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험 재료 및 분석

인공수를 제조하기 위해 질소는 NH_4Cl , 인은 KH_2PO_4 를 사용하였다. 인공수의 질소와 인의 농도는 각각 10 mg/L, 1 mg/L로 제조하였다.

La(III)의 공급원으로는 $LaCl_3 \cdot 7H_2O$ 를 사용하였다. La(III) solution은 0.0132, 0.0164, 0.0192 및 0.0224 g/L로 제조하여 사용하였다.

본 연구에서 사용된 제올라이트는 일반적으로 시중에 판매되는 제올라이트 A type을 구입하여 사용하였다. 제올라이트 A type은 양이온교환능력(CEC)이 우수하기 때문에 세제용으로 사용되고 있으며, 균일한 입도분포를 가지고 있다. 사용된 제올라이트 A type의 물리, 화학적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristic of zeolite used in this study

Items	Characteristics
Appearance	Fine particle of white
Density	0.25~0.45 g/mL
Mean particle size (d_{50})	2.5~3.5 μ m
pH	< 11.0
Specific surface area (m^2/g)	> 500

Table 2. Analysis method and item in this experiment

Items	Test Method
NH_4^+ -N	Nessler Method (500-NH ₃ -B & C-HACH)
PO_4^{3-} -P	Ascorbic Acid Method (4500-P-B & E)
La(III)	ICP analysis (Perkinelmer 7300 DV)

본 연구에서 채취된 시료는 공극 크기가 1.2 μ m인 GF/C filter (Whatman 사, 직경 47 mm)로 여과하여 Standard Method,¹²⁾ HACH DR/4000 manual에 준하여 이루어졌으며, 측정 항목과 방법은 Table 2에 나타났다.

2.2. La(III)-zeolite 복합체 제조 시 최적 La(III):zeolite 비 결정 실험 방법

La(III)-zeolite 복합체 제조 시 최적의 결합 비 결정 실험은 NH_4^+ -N과 PO_4^{3-} -P를 10 mg/L, 1 mg/L로 제조한 인공수에 La(III) 0.0033, 0.0041, 0.0048 및 0.0056 g과 제올라이트 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5 g을 주입하여 200 rpm으로 120분 동안 흡착시킨 후 질소와 인에 대한 흡착능을 참고하여 최적 비율을 결정하였다. 이와 같이 실험을 수행한 이유는 La(III)과 제올라이트의 PO_4^{3-} -P과 NH_4^+ -N의 흡착능을 확인하여 최대 흡착능 지점에서 복합체를 제조하여 성능을 극대화시키기 위해서였다.

2.3. La(III)-zeolite 복합체 제조 시 최적 건조 온도 결정 실험 방법

La(III)-zeolite 복합체 제조 시 최적 건조 온도 결정 실험은 상온(25 $^{\circ}$ C), 100, 200, 300, 400 및 550 $^{\circ}$ C에서 1시간 동안 건조시켜 La(III)-zeolite 복합체를 제조한 후 탈리되는 정도를 조사하여 최적 온도를 도출하였다.¹³⁾

2.4. La(III)-zeolite 복합체 최적 주입량 결정 실험 방법

La(III)-zeolite 복합체의 최적 주입량을 결정 실험은 NH_4^+ -N 10 mg/L와 PO_4^{3-} -P 1 mg/L의 인공수 250 mL를 최적 비율로 제조된 La(III)-zeolite 복합체 0.5065, 1.013, 1.5195 및 2.026 g와 함께 삼각플라스크에 넣고 200 rpm으로 120분 동안 흡착시킨 후 질소와 인의 흡착능을 조사하였다.

2.5. La(III)-zeolite 복합체의 최적 흡착 시간 결정 실험 방법

La(III)-zeolite 복합체의 최적 흡착 시간 결정 실험은 NH_4^+ -N 10 mg/L와 PO_4^{3-} -P 1 mg/L의 인공수 250 mL를 La(III)-

Table 3. Recommended composition for reconstituted fresh water

Water type	Salts Required (mg/L)	Water Quality
Moderately hard	NaHCO ₃ 96	pH 7.4~7.8
	CaSO ₄ · 2H ₂ O 60	Hardness mg CaCO ₃ /L 80~100
	MgSO ₄ 60	
	KCl 4.0	Alkalinity mg CaCO ₃ /L 60~70

zeolite 복합체 0.5065, 1.013, 1.5195 및 2.026 g와 함께 삼각플라스크에 넣고 200 rpm으로 10, 20, 40, 60, 90 및 120 분 동안 흡착시킨 후 여과된 인공수의 질소와 인의 농도를 측정하여 시간에 따른 흡착능을 조사하였다.

2.6. La(III)-zeolite 복합체 주입 시 pH와 알칼리도에 따른 NH₄-N, PO₄-P 흡착 영향 및 흡착 후 pH 변화 실험 방법

중류수와 알칼리도를 60~70 (mg CaCO₃/L)으로 조절한 경수(Table 3)에 NH₄⁺-N와 PO₄³⁻-P를 각각 10 mg/L, 1 mg/L로 주입하고, pH를 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11 및 12로 각각 조절하였다. 그리고 제조된 인공수 250 mL와 La(III)-zeolite 복합체 1.013 g을 삼각플라스크에 넣고 200 rpm으로 90분 동안 흡착시킨 후 pH의 변화를 관찰하였다.

2.7. La(III) 용출 실험 방법

La(III)-zeolite 복합체가 용액에 주입되어 PO₄³⁻-P를 흡착하고 바닥에 가라앉았을 때 La(III)이 용출된다면 바닥으로부터 용출되는 PO₄³⁻-P를 capping할 능력이 없는 것이므로 이를 검증하기 위한 실험을 수행하였다. La(III) 용출 실험은 NH₄⁺-N와 PO₄³⁻-P를 넣지 않고 pH를 5, 7, 10으로 조절한 인공수 250 mL에 상온(25℃), 100, 200, 300, 400 및 550℃에서 제조된 La(III)-zeolite 복합체를 1.013 g씩 주입하고 흡착시간과 동일하게 90분 동안 용출시킨 후 인공수에 La(III)의 농도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. La(III)-zeolite 복합체 제조 시 최적 La(III):zeolite 비 결정

La(III)-zeolite 복합체 제조 시 최적의 결합 비 결정 실험을 하였다. NH₄⁺-N와 PO₄³⁻-P를 각각 10 mg/L, 1 mg/L로 제조한 인공수에 La(III) 0.0033, 0.0041, 0.0048 및 0.0056 g과 제올라이트 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5 g을 주입하여 흡착 실험을 수행한 결과는 Fig. 1과 같다.

NH₄⁺-N의 경우에는 제올라이트가 2 g일 때 가장 좋은 제거율을 보였고 PO₄³⁻-P의 경우에는 La(III)이 0.0056 g일 때 가장 좋은 제거율을 보였다. 하지만 제올라이트의 양이 증가할수록 PO₄³⁻-P의 평형 농도가 증가하기 때문에 La(III)-zeolite 복합체의 최적 결합 비는 0.0048:1 (g base)로 결정

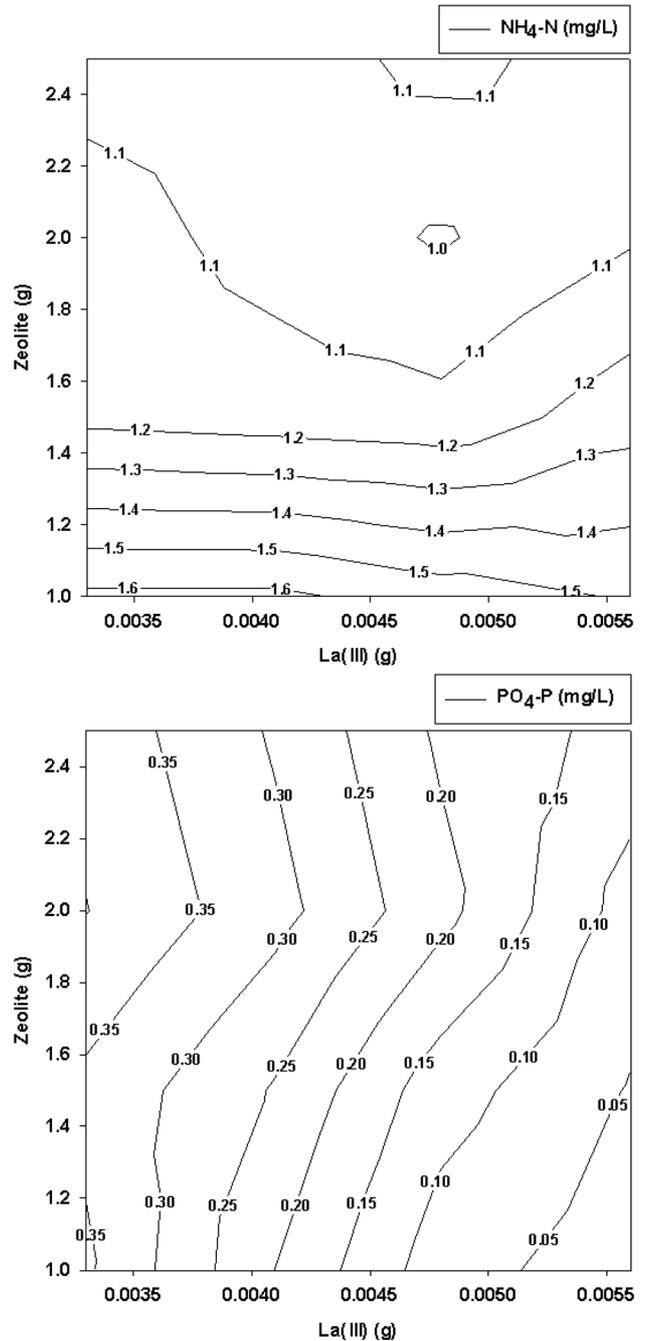


Fig. 1. Equilibrium concentration of NH₄⁺-N and PO₄³⁻-P on La(III) and zeolite dosage.

Table 4. Price comparison of La(III) and Alum

Items	LaCl ₃ · 7H ₂ O	Al ₂ (SO ₄) ₃ · 14~18H ₂ O
Purity	98%	51~57.5 %
Price	292 won/g	6.2 won/g

하였다. La(III)과 일반적으로 쓰이는 Alum의 가격을 비교하여 Table 4에 나타냈다.

3.2. La(III)-zeolite 복합체 제조 시 건조 온도에 따른 영향

Fig. 2는 La(III)-zeolite 복합체 제조 시 건조 온도에 따른

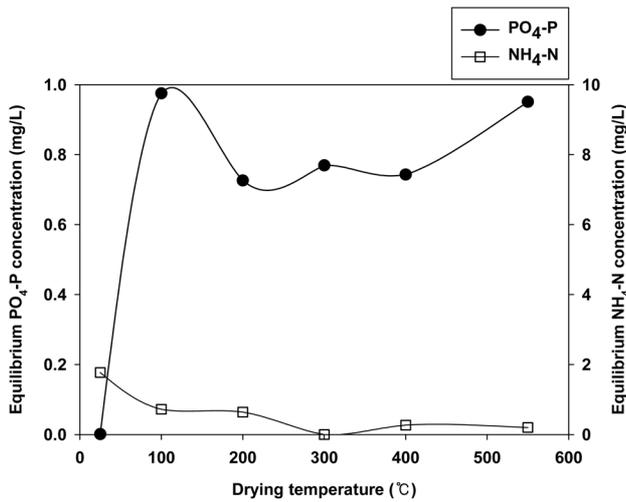


Fig. 2. Equilibrium concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ on drying temperature.

질소와 인의 흡착 특성을 나타내고 있다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 경우에는 전체적으로 80% 이상의 제거율을 보였는데 그 중에서도 300°C에서 약 100%로 가장 좋은 제거율을 보였다. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 경우에는 건조 온도 25°C에서 가장 좋은 제거율을 보였고 나머지 온도 범위에서는 40% 미만의 제거율을 보였다. 이에 따라 질소와 인의 제거율을 동시에 고려해 볼 때 상온 건조(25°C)가 최적의 건조 온도로 판단되었다.

3.3. La(III)-zeolite 복합체 최적 주입량 결정

La(III)와 제올라이트의 비율 0.0048:1 (g base)로 결합하여 자연 건조(25°C)를 거쳐 제조된 La(III)-zeolite 복합체의 최적 주입량을 알아보기 위해 복합체의 주입량을 달리하여 흡착 실험을 하였다. Fig. 3에서 보면 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 경우에는 주입량이 증가함에 따라 흡착 효율이 증가함을 알 수 있었으나, 1.013 g 이상에서는 큰 변화가 없었다. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 경우 역시 주입량이 1.013 g일 때부터 2.026 g일 때까지 100%에

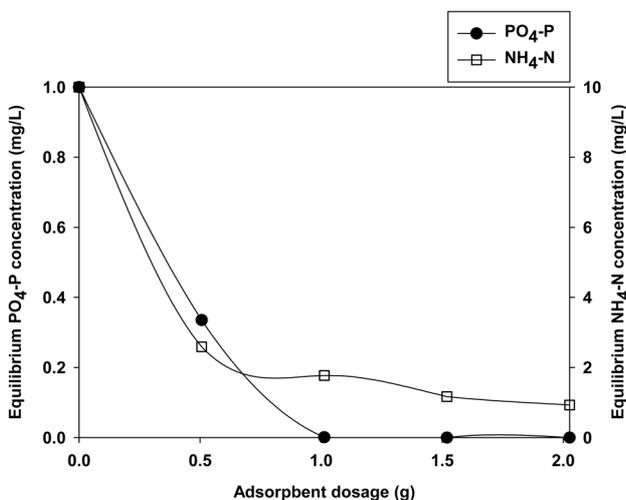


Fig. 3. Equilibrium concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ on La-zeolite complex dosage.

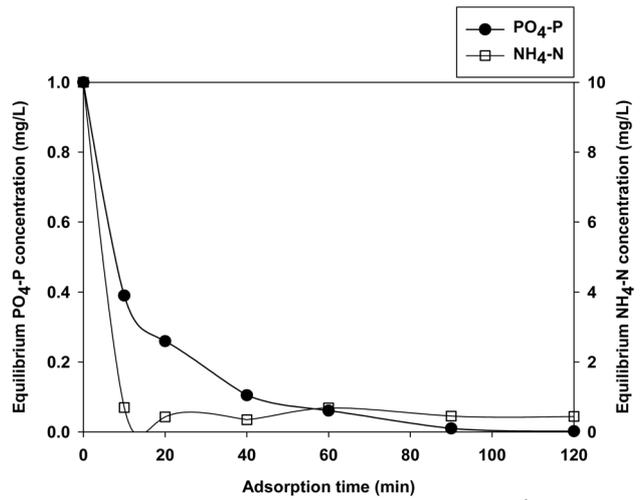


Fig. 4. Equilibrium concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ on adsorption time.

가까운 제거율을 보였다. 암모니아성 질소와 인 흡착을 모두 고려할 때 La(III)-zeolite 복합체의 최적 주입량은 4.052 g/L으로 결정하였다.

3.4. La(III)-zeolite 복합체의 흡착 시간에 따른 영향

Fig. 4는 La(III)-zeolite 복합체의 흡착 시간에 따른 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 과 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 흡착에 따른 농도변화를 나타내고 있다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 경우에는 흡착이 시작되고 10분까지 평형 농도가 급격히 감소하여 120분에 이르기까지 큰 변화 없이 90% 이상의 제거율을 보였다. 하지만 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 경우에는 흡착이 시작되고 10분 이후에도 평형농도가 계속 감소하여 90분부터 약 100%의 제거율을 보였다. 이에 따라 흡착 시간은 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 제거율을 고려하여 90분으로 결정하였다.

3.5. 인공수의 알칼리도와 pH에 따른 영향과 흡착 후 pH 변화

Fig. 5는 알칼리도를 조절한 인공수와 조절하지 않은 인공수에서 초기 pH에 따른 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 과 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 흡착 특성 및 흡착 후 pH 변화를 나타내고 있다. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 경우에는 pH 4 이하에서는 급격히 흡착 효율이 떨어지고 pH 8 이상에서도 흡착 효율이 떨어지는 것으로 관찰되었는데, 이는 pH가 7 이상에서 일반적으로 암모니아는 암모니아 가스로 전환되어 이온교환이 이루어지지 않기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 pH 5에서 흡착 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 또한 알칼리도를 60~70 (mg $\text{CaCO}_3\text{/L}$)으로 조절한 경수가 pH 변화에 따라 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 흡착 효율의 변화가 증류수보다 작은 것으로 나타났다. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 경우에는 pH 4 이하에서 흡착 효율이 떨어지고 pH 8 이상에서 흡착 효율이 급격히 떨어지는 것으로 관찰되었다. 그리고 pH 7에서 흡착 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 또한 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 와 마찬가지로 알칼리도를 조절한 경수가 증류수보다 흡착 효율의 변화가 작게 나타났다. 이는 경수의 완충능 때문인 것으로 사

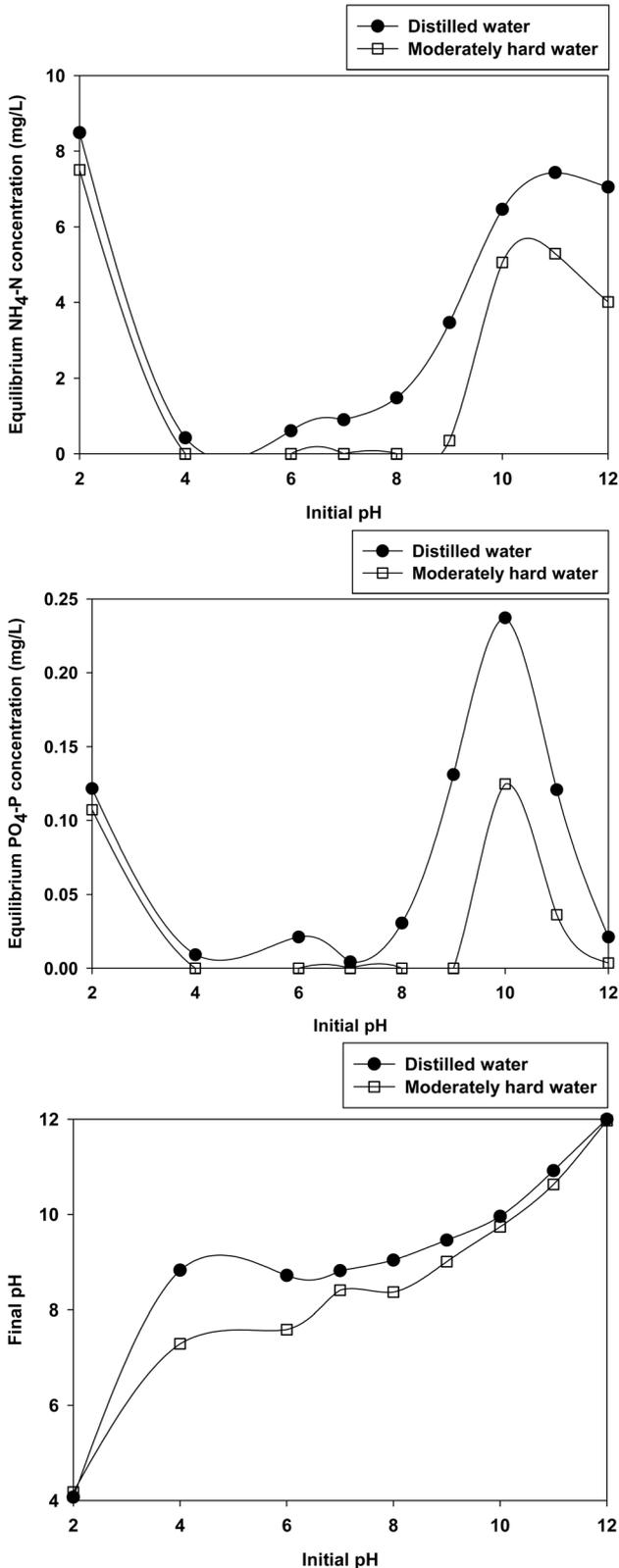


Fig. 5. Equilibrium concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ on initial pH and final pH.

료된다. 흡착 전과 후의 pH 변화를 살펴본 결과 pH 2~7 범위에서는 경수와 증류수 모두 흡착 후 pH가 상승했다. 하지만 흡착 전 pH 7 이상에서는 경수의 pH 변화가 거의 없는

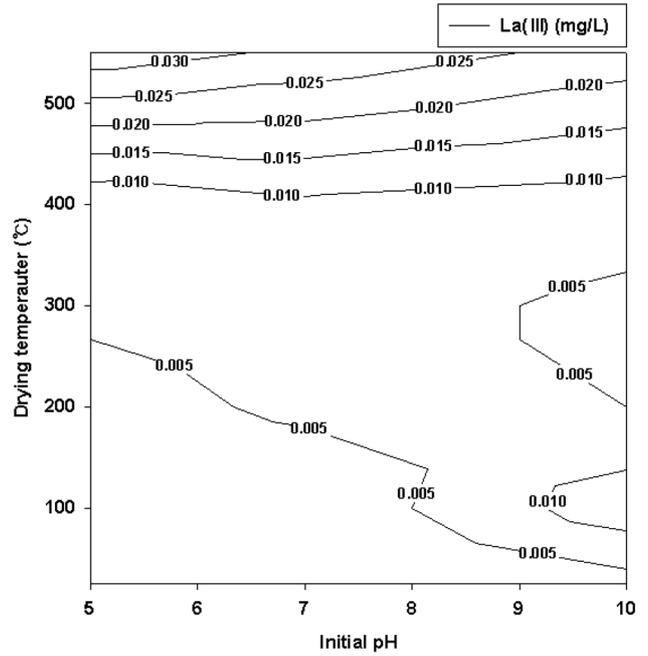


Fig. 6. Elution of La(III) on initial pH and drying temperature.

반면에 증류수는 흡착 후 pH가 상승하였다. 이 또한 경수의 완충능 때문인 것으로 사료되고, La(III)-zeolite 복합체가 알칼리도가 있을 경우에도 적용이 가능하다고 판단된다.

3.6. La(III)-zeolite 복합체의 La(III) 용출 실험

Fig. 6은 건조 온도 25, 100, 200, 300, 400 및 550°C서 제조된 La-zeolite 복합체가 pH 5, 7, 10의 용액에 주입되었을 때 복합체로부터의 La(III) 용출 특성을 나타냈다. 건조 온도와 pH가 감소할수록 La(III)의 용출 농도가 조금씩 감소하는 것으로 나타났다. 전체 건조 온도와 pH 범위의 용출 농도를 살펴보면 La(III)-zeolite 복합체의 La(III) 농도 19.2 mg/L와 비교했을 때 매우 적은 양이므로 거의 용출되지 않는 것으로 사료된다.

4. 결론

호소수의 질소와 인을 제거하기 위해 제조한 La(III)-zeolite 복합체에 관한 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) La(III)-zeolite 복합체 제조 시 제올라이트의 양을 증가시킬 경우 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거율도 증가하지만 이에 따라 감소하는 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 제거율을 고려하여 La-zeolite 복합체의 최적 결합비는 0.0048:1 (g base)로 결정하였다.
- 2) La(III)-zeolite 복합체 제조 시 25, 100, 200, 300, 400 및 550°C의 건조 온도 중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 흡착의 경우 온도 영향을 거의 받지 않았으나, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 의 경우에는 온도가 증가함에 따라 흡착 효율이 급격히 감소하였으며, 25°C에서 가장 좋은 제거율을 나타냈다. 따라서, 질소와 인의 제거율을 동

시에 고려해 볼 때 자연 건조(25°C)가 최적의 건조 온도로 관찰되었다.

3) NH_4^+ -N의 경우에는 주입량이 증가함에 따라 흡착 효율이 증가함을 알 수 있었으나, 1.013 g 이상에서는 큰 변화가 없었다. PO_4^{3-} -P의 경우 역시 주입량이 1.013 g일 때부터 2.026 g일 때까지 100%에 가까운 제거율을 보였다. 암모니아성 질소와 인 흡착을 모두 고려할 때 La(III)-zeolite 복합체의 최적 주입량은 4.052 g/L으로 결정하였다.

4) 흡착 시간은 NH_4^+ -N의 경우에는 흡착이 시작되고 10분부터 120분까지 큰 변화 없이 90% 이상의 제거율을 보였고 PO_4^{3-} -P의 경우에는 흡착이 시작되고 10분 이후에도 평형농도가 계속 감소하여 90분부터 약 100%의 제거율을 보였다. 이에 따라 흡착 시간은 PO_4^{3-} -P의 제거율을 고려하여 90분으로 결정하였다.

5) NH_4^+ -N의 경우 pH 4 이하, pH 8 이상에서 흡착 효율이 떨어졌고, pH 5에서 흡착 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. PO_4^{3-} -P의 경우 pH 4 이하, pH 8 이상에서 흡착 효율이 떨어졌고, pH 7에서 흡착 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다. 그리고 NH_4^+ -N과 PO_4^{3-} -P 모두 경수가 pH 변화에 따른 흡착 효율의 변화가 증류수보다 작은 것으로 나타났는데, 이는 경수의 완충능 때문인 것으로 사료된다.

6) 흡착 전·후 pH 변화를 살펴본 결과 초기 pH 2~7 범위에서 경수와 증류수 모두 흡착 후 pH가 상승했다. 하지만 초기 pH 7 이상에서는 경수의 pH 변화가 거의 없는 반면에 증류수는 pH가 상승하였다. 이는 경수의 완충능 때문인 것으로 사료되고, La(III)-zeolite 복합체가 알칼리도가 있을 경우에도 적용이 가능하다고 판단된다.

7) La(III) 용출은 건조 온도에 따라 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났는데 건조 온도와 pH가 감소할수록 용출되는 La(III)의 농도가 조금씩 감소하는 것으로 나타났고, 건조 온도와 pH 전체 범위를 살펴보았을 때 용출 농도는 La(III)-zeolite 복합체의 La(III) 농도 19.2 mg/L와 비교했을 때 매우 적은 양이므로 거의 용출되지 않는 것으로 사료된다.

KSEE

참고문헌

1. 허우명, 김범철, 조규송, “소양호 부영양화에 따른 N/P비의 변화와 남조류 Bloom,” 한국육수학회지, **24**(4), 283~288 (1991).
2. 윤명희, 김소연, 왕창근, “부영양화 방지를 위한 정석탈인법의 응용성 제고 연구,” 충남대학교 환경문제연구소, **20**, 85~93(2002).
3. 김창원, 윤봉일, “환경미생물학,” 동화기술, p. 24(1992).
4. 류재근, “호소 부영양화 방지기술의 현황과 전망,” 대한환경위생공학회지, **7**(1), 35~44(1992).
5. Jenkins, D. and Tandoi, V. “The applied microbiology of enhanced biological phosphate removal accomplishments and needs,” *Water Res.*, **25**(12), 1471~1478(1991).
6. Ahamad M., Shaikh, H. and Dixit, S. G., “Removal of phosphate from waters by precipitation and high gradient magnetic separation,” *Water Res.*, **25**(6), 845~852(1992).
7. Firsching, F. H., “Solubility products of the trivalent Rare-Earth arsenates,” *J. Chem. Eng. Data*, **37**(4), 497~499(1992).
8. Rodd, M., Greenop, B., Goss, Z., Douglis, G. and Adeney, J., “Application of Phoslock™, and innovative phosphorus binding clay, to two Western Australian waterways: Preliminary findings,” *Hydrobiologia, The Interactions between Sediments and Water*, **494**, 237~243(2003).
9. F. Haghseresht, Shaobin Wang, D. D. Do, “A novel lanthanum-modified bentonite, Phoslock, for phosphate removal from wastewaters,” *Appl. Clay Sci.*, **46**(4), 369~375(2009).
10. Sherry, H. S. and Walton, H. F., “The ion exchange properties of zeolites,” *J. Phys. Chem.*, **71**, 1457(1975).
11. Pebalan, R. T. and Bertetti, F. P., “Cation-exchange properties of natural zeolites,” *Geochemical Society*, 453~518(2001).
12. Andrew, D. E., Lenore, S. C., Eugene, W. R. and Arnold, E. G., “Standard methods for the examination of water & wastewater,” 21st Edition., APHA, AWWA, WEF(2005).
13. Zhigalkina, I. A., Nikolaeva, T. D., Suponitskii, Yu. L. and Polyak, B. I., “Synthesis of lanthanum chromite using the sol-gel method,” *Glass and Ceramics*, **55**, Nos 5-6(1998).