

# Enhanced removal of phosphate on modified ion exchanger with competing ion

음이온 교환수지를 이용한 인제거 향상

Ju-Hee Nam · Sang-Hyup Lee · Jae-Woo Choi · Seok-Won Hong · Byungryl An\*

남주희 · 이상협 · 최재우 · 홍석원 · 안병렬\*

한국과학기술연구원 물자원 순환 연구단

**Abstract :** The concern for dissolved phosphate in water/wastewater has been increasing because of the risk for eutrophication. A variety of conventional and advanced technologies were applied to meet the enforced new regulation of phosphate around the world. However, there still remained a lot of challenge because most introduced/developed method, for example, biological and physic-chemical treatment is not easy to satisfy the new regulation of phosphate in water. In order to meet the new regulation, the application of ion exchanger has been tried which showed that the removal efficiency for phosphate was strongly determined by in the presence of the competing ion, especially sulfate. As results, a new class of ion exchanger governed by ligand exchange was developed and investigated to increase the selectivity for phosphate. The current study using organic/inorganic anion exchanger developed with Lewis acid-base interaction confirms the selectivity for phosphate over sulfate. According to isotherm test and column test, the value of the maximum phosphate uptake (Q) showed 64 mg/g as  $po_4^{3-}$  and the breakthrough for phosphate occurs after 1000 min and completely finishes at 2500 min, respectively.

**Key words :** phosphate, organic/inorganic ion exchanger, selectivity

**주제어 :** 인산염, 이온교환 수지, 선택도

## 1. 서론

인은 수중에서 낮은 농도에도 불구하고 부영양화를 유발하는 물질로 잘 알려져 있다(Cornell, 2008). 특히 0.03 mg/L 이하의 낮은 농도에서도 부영양화를 일으킬 수 있기 때문에 인의 제거는 호수나 강 등의 지표수 관리에서 반드시 필요한 공정중 하나이다(Gachter and Imboden, 1985). 현재 한국의 하수처리장에서 인 농도 방류수 기준은 2012년 1월부터 제1지역(청정지역)을

기준으로 0.2 mg/L 강화되었다(환경부, 2010). 따라서 인의 제거율을 높이는 것은 수처리 공정에서 현재 가장 큰 이슈로 부각 되고 있다.

현재 인 제거를 위해 소개된 많은 기술들 중 생물학적 처리(Metcalf and Eddy, 1991; Stensel, 1991) 또는 응집 및 침전(Jenkins and Hermanowicz, 1991)을 이용한 방법이 널리 사용되고 있다.. 또한 음이온 교환수지를 이용한 수중의 음이온 제거 기술도 소개 되었다(Clifford, 1999; Kim et al., 2003)특정 오염물질 제거를 위한 이온교환 수지는 설비(필요한 곳에 적용이 가능)와 운전의 용이성(유입수의 농도에 따라 유량 조절이 가능) 그리고 유지 관리의 편리성(재생 및 교체)

\* Received 21 November 2012, revised 8 February 2013, accepted 13 February 2013.  
\* Corresponding author: Tel.: 02-958-5873 Fax: 02-958-5839 E-mail: as525@kist.re.kr

등의 여러 가지 장점 갖고 있다. 하지만 현재 상용화 되어 있는 음이온 교환수지를 이용한 수중의 인 제거 시 황산염에 대한 강한 선택도에 의해 인의 용출은 황산염 보다 빨리 이루어지게 된다. 결과적으로 인에 대한 약한 선택도에 의해서 상업용 음이온 교환 수지는 빈번한 재생이 요구되며 엄청난 양의 인을 함유한 재생수가 생산이 되어 추가적인 2차 3차의 처리가 요구 된다. 이로 인하여 운전비용의 상승을 야기 시킨다. 현재의 음이온 교환수지의 인산염에 대한 낮은 선택도를 극복하기 위하여 리간드 교환을 이용한 수지가 개발이 되었으며 인에 대해 상대적으로 높은 제거 효율을 보여줌과 동시에 방류수 허용기준(0.2 mg/L)을 만족 시킬 수 있다.

Helfferich (1962)에 의해 리간드 교환 개념이 소개 되었으며 1992년부터 유/무기 이온교환수지가 개발되어 수중의 특정 오염물질인 인과 비소 제거에 대한 연구가 진행 되었다(Ozmen et al., 2011; An et al., 2005; Zhu and Sen-Gupta, 1992; Zhao and SenGupta, 1998). 상업용 음이온 교환 수지는 정전기력에 의한 음이온의 선택도가 결정되기 때문에 인산염에 대한 선택성은 황산염보다 낮은 선택도를 보여주고 있다. 유/무기 이온교환 수지는 철 또는 구리 등의 전이금속을 모체 수지에 고정화를 이룬 후 전이금속 자체가 기능기의 역할을 한다. 이때 사용되는 모체 수지는 중금속 제거를 위해 개발된 킬레이팅(Chelating) 수지가 대부분의 경우 사용된다. 음이온 교환 수지와는 달리, 루이스 산-염기(Lewis acid-base)결합에 의한 기능기(전이 금속)는 리간드와 복합체를 이룬다(Helfferich, 1962). 또한 전이금속의 양전하는 정전기력을 통해 음이온과 결합한다. Fig.1은 유/무기 음이온 교환 수지에서 음이온 제거 반응을 보여준다. 모체 수지의 질소(nitrogen)는 전자 공급원으로 전이 금속(구리이온)과 배위 결합으로 강한 결합력을 가지고 있다. 기능기 역할을 하는 구리이온( $\text{Cu}^{2+}$ )은 정전기력과 루이스 산-염기 반응을 통해 수중의 음이온과 결합을 하게 된다.

리간드 교환에 의한 음이온 제거에 이용되어지는 유/무기 이온 교환수지는 음이온 교환수지와는 달리 리간드 결합을 하는 인산염에 대한 정전기력에 의해서만 결합하는 황산염보다 인산염의 선택도가 강함을 보여 주고 있다(Zhao and SenGupta, 1998).

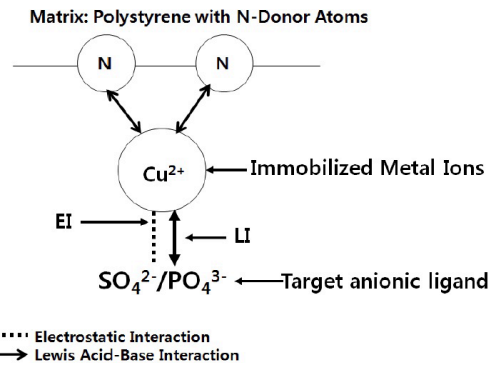


Fig.1 Conceptualized illustration of a new class of anion exchanger.

본 연구의 목표는 첫째 기존에 사용되었던 기능기 대신 폴리아민기를 가진 새로운 수지를 이용하여 유/무기 이온교환수지의 개발, 둘째 개발된 수지의 인 제거 효율을 회분식 실험 및 칼럼 실험을 통한 연구이다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 유무기 이온교환수지 합성

유/무기 음이온교환수지를 다음과 같이 제조하였다. 폴리아민기(polyamine group,  $\text{CH}_2\text{NH}(\text{C}_2\text{H}_4\text{NH})_n\text{H}$ )가 구비된 킬레이팅 수지 100 g을 준비한다. 상기 킬레이팅 수지의 모체는 스티렌(styrene)과 디비닐벤젠(DVB)의 혼성 중합체이다. 그런 다음, 상기 킬레이팅 수지를 500 mL 1 M HCl을 이용하여 3시간 동안 산세척하고, 이어 500 mL 1 M NaOH를 이용하여 3시간 동안 염기세척 한다. 산세척 및 염기세척 완료 후, 증류수를 이용하여 킬레이팅 수지를 수차례 세정한다. 500 mL의 증류수에 10 g의 염화제2구리수화물( $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )을 용해시켜 염

화제2구리수화물 수용액을 준비하고, 상기 염화제2구리수화물 수용액 내에 상기 세정 완료된 100 g의 킬레이팅 수지를 혼합한다. 킬레이팅 수지가 혼합된 혼합 용액을 2주간 교반하였다. 이 때, 주간에는 70 °C로 유지하였고, 야간에는 실험실 온도로 유지시켰다. 또한, 2주간의 혼합 과정 동안 0.1 M HCl 또는 0.1 NaOH를 이용하여 혼합 용액의 pH를 4~4.5로 유지시켰다. 2주간의 혼합 후, 킬레이팅 수지를 용액으로부터 분리하여 증류수로 수차례 세척 후 실험실 온도에서 건조시켜 구리 이온이 결합된 이온교환수지를 제조하였다. Counter 이온의 효과를 알아보기 위해서  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  등을 사용하여 합성하였으며 CR20에 구리를 합성한 수지를 CR20-Cu라고 명명한다.

## 2.2 등온 흡착

10개의 50 mL에 담겨진 서로 다른 농도(0 ~ 100 mg/L as  $\text{PO}_4^{3-}$ )를 갖는  $\text{PO}_4^{3-}$ 수용액을 2세트(제 1 세트, 제 2 세트) 준비하였다. 제 1 세트, 제 2 세트의 각  $\text{PO}_4^{3-}$ 수용액에는 인산염의 경쟁 이온으로 질산염과 황산염이 각각 100 mg/L의 농도로 포함되었다. 제 1 세트의 수용액 각각에 CR20-Cu 0.05 g을 넣고, 제 2 세트의 수용액 각각에는 음이온교환수지(AMP16) 0.05 g을 넣었다. 이와 같은 상태에서, 각 용기를 30 rpm으로 24시간 동안 교반시켰다. 또한, 일정한 pH를 유지시키기 위해 2시간, 6시간, 12시간, 20시간 시점에 0.1 M HCl과 0.1 M NaOH를 이용하여 pH를  $7.5 \pm 0.2$ 로 유지시켰다

## 2.3 칼럼 실험

인산염 및 경쟁 이온의 파과점을 보기 위해서 CR20-Cu와 AMP16에 대해서 칼럼 실험이 진행 되었다. 실험 장치는 아크릴 칼럼 (10 mm 직경과 100 mm 길이), MasterFlex L/S 펌프를 이용하여 1 mL/min의 유속을 유지 시켰고, 그리고 GILSON FC203B를 이용하여 일정 시간

을 두고 샘플 하였다. 칼럼 실험에 사용된 원수의 수질은 50 mg/L 염소, 10 mg/L 질산염, 20 mg/L 인산염, 50 mg/L 황산염을 목표로 설정하였으며 초기 pH는 7.5-8.0 범위 안에서 결정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 유/무기 이온 수지 특성변화

3종류의 구리 용액( $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ )을 사용하여 CR20-Cu를 합성 하였을 시 흡착된 구리의 양을 비교 하였다. Fig. 1에 소개된 것처럼 인산염의 제거는 모체 수지(CR20)에 고정된 구리이온에 의해 이루어진다. 즉 모체에 합성된 구리이온의 양이 인산염 제거율에 결정적인 영향을 미칠 수 있다. Table 1은 3가지 종류의 구리용액을 사용하여 합성한 CR20-Cu의 구리 함유량을 보여 주고 있다. 동일한 모체를 가졌음에도 불구하고  $\text{CuSO}_4$ 를 용액으로 사용하였을 때 가장 많은 양의 구리 (58.3 mg/g)를 흡착하였고,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  사용 시 47.7 mg/g으로 가장 적은 양의 구리가 흡착되었음을 보여주지만 그 차이는 크지 않다. 이는 충분한 농도의 구리이온 농도가 제조 과정에서 사용되었기 때문으로 여겨진다.

Table 1. Maximum copper-loading of CR20 chelating resin

Cu solution	Concentration (%)	Maximum Cu-loading capacity, mg/g
$\text{CuCl}_2$	2	50.0
$\text{CuSO}_4$	2	58.3
$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$	2	47.7

### 3.2 회분식 실험

#### 3.2.1 Counter 이온 영향

Table 1에서와 같이 CR20-Cu는 서로 다른 구리 용액에 담지 하여 준비 되었다. 또한 각각의 구리 함유량은 차이를 보여 주고 있다. Counter 이온의 종류와 구리 흡착량 변화에 의한 인산염

제거에 미치는 영향을 보기 위한 실험이 진행되었다. 세 종류의 counter이온, 즉  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ 가 사용되었다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 인산염의 제거율은 세 종류의 CR20-Cu에서 50 %정도의 값으로 큰 차이를 보이지 않는다. 구리의 흡착량은 사용된 용액에 차이를 보이고 있으나 인산염 제거율 차이는 보이지 않는 것은 counter이온의 영향으로 보여진다. 즉  $CuSO_4$ 를 이용하여 구리 이온을 고정 시켰을 경우 최대 구리 흡착량을 보여 주고 있으나 counter이온인 황산염에 의해 이온 교환 반응이 다른 두 counter이온,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ 보다 감소하였다고 보여진다. 이후 모든 실험에서는  $CuCl_2$ 를 이용하여 만든 CR20-Cu를 이용하였다.

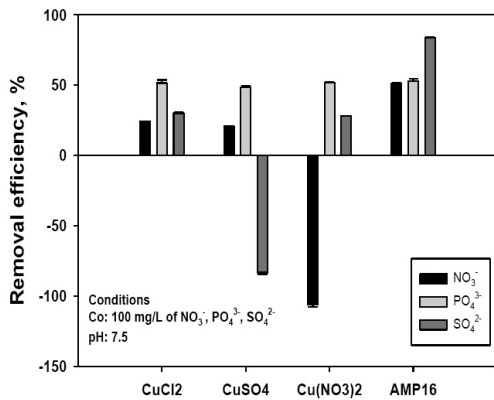


Fig. 2. Removal efficiency using three different CR20-Cu loading with three copper solutions.

### 3.2.2 인산염 제거 효율 결정

개발된 유/무기 음이온교환 수지의 인산염 제거 효율을 보기 위해서 실험 조건의 변화를 통해 회분식 실험이 실험실에서 이루어졌다. 또한 대표적인 상업용 음이온 교환 수지인 AMP 16을 사용하여 비교 실험을 하였다. 모든 회분식 실험은 재현성을 위해 2회 반복 실험 하였으며 그림에서는 에러바(error bar)를 사용하여 표시하였다. Fig. 3은 CR20-Cu를 사용하여 인산염 제거 실험 결과를 보여 준다. 인산염의 초기 농도는 100 mg/L으로 하였으며 수중에 존재하는

경쟁 이온인 질산염과 황산염의 영향을 확인하기 위해서 각각 100 mg/L의 초기 농도로 실험하였다. 또한 수중의 pH가 인산염 제거에 미치는 영향을 확인하기 위해 pH 농도를 7, 8, 그리고 9에서 각각 실험을 하였다. Fig. 3의 결과에서 AMP16의 경우, 질산염과 인산염의 제거율은 50 %정도인데 반해 황산염의 제거율은 85 %에 이르고 있다. 이는 음이온 교환수지의 음이온 제거는 정전기력에 의해서만 이루어지므로 황산염의 선택도는 질산염과 인산염의 선택도를 능가하여 결과적으로 황산염의 제거 효율이 다른 두 음이온에 비해 월등히 높음을 보여 주고 있다. 이와는 달리 CR20-Cu의 경우는 완전히 상반된 결과를 보여준다. 질산염과 황산염의 제거효율은 급격히 감소함을 보여주고 있다. 특히 황산염의 제거율은 85 %에서 급격히 감소하여 35 %까지 낮아졌다. 하지만 인산염의 경우는 50 %의 제거 효율을 보여 주고 있다. 이는 구리 이온과 인산염과의 루이스 산-염기 반응에 의해 인산염의 제거가 이루어짐을 보여 주고 있다. 즉 인산염의 선택도는 유/무기 이온교환수지를 사용하였을 경우 음이온 교환 수지보다 향상됨을 보여 준다. 용액의 pH를 7, 8, 그리고 9로 하였을 경우 인산염의 제거 효율은 50 %를 유지 하고 있으나 황산염의 제거율은 20 %까지 감소한다.

이온 교환을 이용하여 수중의 음이온을 제거할 때, 음이온의 선택도와 제거율은 각각의 음이온 농도에 영향을 받는다. 이런 현상을 설명하기 위해서 질산염과 황산염의 농도는 100 mg/

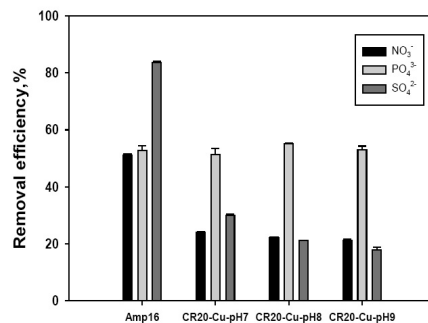


Fig. 3. Removal efficiency of AMP16 and CR20-Cu.

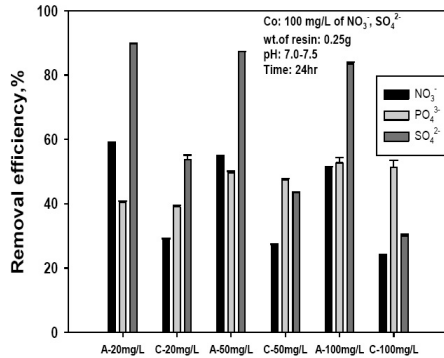


Fig. 4. Removal efficiency with different initial phosphate concentration.

L로 일정하게 유지 하고 인산염의 초기 농도를 20, 50, 그리고 100 mg/L으로 변화를 주어 인산염의 제거 실험을 하였다. Fig. 4는 인산염의 농도 변화에 따른 인산염 및 경쟁 이온의 제거율을 비교 하였다 (A: AMP 16, C: CR20-Cu). 황산염의 경우 인산염의 농도가 5배 감소되었을 경우(초기 농도: 20 mg/L) 황산염의 제거율은 30 %에서 55 %로 거의 2배 가까운 제거율 증가를 보여 주고 있다. 하지만 인산염의 경우는 50 %에서 40 %로 10 %의 감소를 보여 주고 있다. 이는 인산염 농도의 감소를 통해 황산염의 제거율은 가파르게 증가함에도 인산염의 제거에는 큰 변화를 보여 주지 않는다. 따라서 저농도의 인산염과 상대적으로 고농도의 황산염의 존재에서도 CR20-Cu에서 구리이온과 인산염은 루이스 산-염기 반응에 의해 이루어지고 있음을 보여 준다.

### 3.2.3 분리 지수(Separation factor)

Table 2는 CR20-Cu와 AMP 16의 분리지수를 나타내고 있다. 분리 지수는 선택도를 나타내는 지표로서 1을 기준으로 1보다 클 경우, 1과 같은 경우, 그리고 1보다 작은 경우로 나타낸다. 예를 들면  $\alpha_{p/n}$ 이 1보다 크면 인산염의 선택도는 질산염을 능가함을 나타내고, 1보다 작으면 반대로 질산염의 선택도가 인산염의 선택도를 능가한다. 분리지수를 바탕으로 인산염은 질산염과 황산염과의 비교에 있어서 모든 실험 조건에서 CR20-Cu는 AMP16 보다 큰 값을 가진다. 즉 CR20-Cu을 사용하였을 경우, 인산염은 다른 경쟁 음이온 보다 강한 흡착능을 가질 수 있다는 것을 나타낸다.

### 3.3 등온 흡착 실험

회분식 실험을 통해 유/무기 이온 교환수지를 이용할 경우 인산염의 선택도가 음이온 교환수지 보다 향상되는 결과를 얻었다. 이것을 증명하기 위한 방법으로 CR20-Cu를 이용하여 인산염 등온 흡착 실험이 황산염과 질산염이 각각 100 mg/L 존재할 경우에 이루어 졌다. 비교를 위해서 AMP16 등온 흡착 실험도 동일한 조건에서 진행 되었다. Fig. 5와 Fig.6은 인산염과 황산염에 대한 등온 흡착 실험 결과이다. Langmuir 등온 흡착식을 이용하여 실험결과를 선형화하여 최대 흡착량(Q)값을 구하였다.

$$q_e = \frac{bQC_e}{1 + bC_e} \quad (1)$$

Table 2. The value of phosphate/nitrate or sulfate separation factor

Separation Factor	AMP16 $\alpha_{p/N}$	CR20-Cu $\alpha_{p/N}$	AMP16 $\alpha_{p/S}$	CR20-Cu $\alpha_{p/S}$
PO4: 20 mg/L (100 mg/L of NO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> )	0.48	1.60	0.078	0.55
PO4: 50 mg/L (100 mg/L of NO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> )	0.80	2.39	0.14	1.17
PO4: 100 mg/L (100 mg/L of NO <sub>3</sub> , SO <sub>4</sub> )	1.07	3.35	0.22	2.47
PO4:100 mg/L NO <sub>3</sub> :100 mg/L	2.74	4.04		
PO4: 100 mg/L SO <sub>4</sub> : 100 mg/L			0.25	2.18

인산염 선택도에 대한 등온 흡착 실험 결과는 회분식 실험과 동일한 결과를 얻었다. 즉 유/무기 이온교환 수지의 인산염 제거량은 평형농도 전범위에서 음이온 교환수지 보다 높게 나타난다. 결과적으로 최대 인산염 흡착량은 CR20-Cu와 AMP16 에서 각각 64.4 mg/g와 48.3 mg/g이 계산되었다. 이는 고정화된 구리이온과 인산염 사이에 정전기력에 의한 인산염 결합력을 능가 하는 루이스 산-염기 결합력이 작용한다는 것을 보여 주고 있다.

황산염에 대한 등온 흡착의 결과는 명백하게 인산염과 황산염의 선택도를 보여주고 있다. CR20-Cu의 경우는 20 mg/g의 흡착량을 보여 주고 있는 반면 AMP16은 152 mg/g이 계산되었다. 결론적으로 CR20-Cu는 인산염에 대

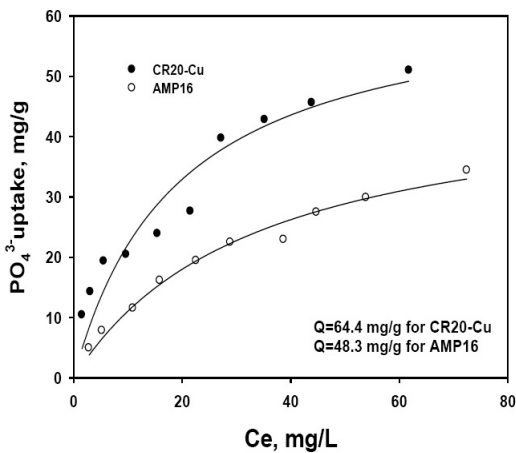


Fig. 5. Phosphate sorption isotherm for CR20-Cu and AMP16.

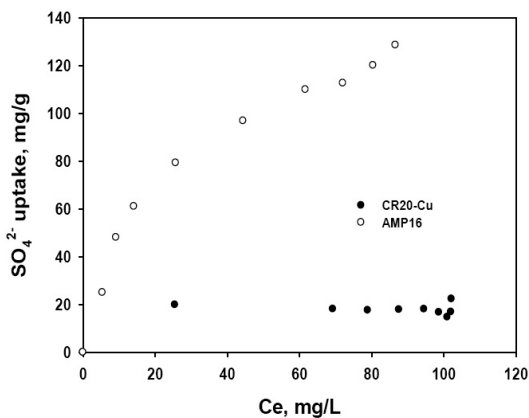
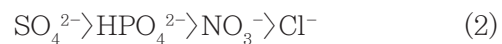


Fig. 6. Sulfate sorption isotherm for CR20-Cu and AMP16.

한 선택도와 흡착량에서 음이온 교환 수지보다 황산염을 능가함을 보여 주고 있다(Tao et al., 2011).

### 3.4 Column test

인산염의 파과점을 확인하기 위해 경쟁 음이온(염소이온, 질산염, 황산염)과 같이 칼럼 실험이 CR20-Cu를 이용하여 진행 되었다. AMP16 또한 동일한 조건으로 이루어 졌다. Fig. 7과 Fig. 8은 AMP 16과 CR20-Cu 각각의 칼럼 실험을 통한 음이온 파과점 곡선을 나타내고 있다. 두 실험 결과 모두 염소이온의 경우는 실험과 동시에 용출이 이루어지며 유출수의 농도는 초기 농도를 3배 이상 증가한다. 이는 염소이온의 경우 가장 약한 결합력을 가지고 있으며 또한 두 이온교환수지의 counter이온이 염소이온으로 존재하기 때문이다. AMP16의 경우(Fig. 7), 인산염은 1400 min에서 파과점이 시작이 되어 급격히 빠른 시간에 안에 포화가 진행되어 1600 min에서 초기 농도의 절반(0.5)에 도달하고 1700 min에서 포화 상태에 이르게 된다. 또한 질산염과 인산염의 경우는 크로마토 그래픽 현상으로 인해 초기 농도보다 높은 농도가 용출됨을 보여 주고 있다. 이런 현상은 음이온의 선택도의 차이에 의해서 발생이 된다. 이와는 달리 황산염의 경우는 2300 min에서 파과점이 시작이 되어 서서히 용출이 되어 3500 min에 이르러 포화 상태에 도달 한다. 따라서 음이온 파과점 곡선을 통해서 음이온 교환수지의 선택도는 식(2)와 같이 나타낸다.



음이온 교환 수지와는 달리 유/무기 음이온 교환 수지를 이용한 칼럼 실험(Fig. 8)에서는 완전히 다른 형태의 파과점 곡선을 보여 주고 있다. 황산염의 경우 500 min에서 파과점이 인산염 보다 먼저 발생하고 질산염과 같이 크로마토

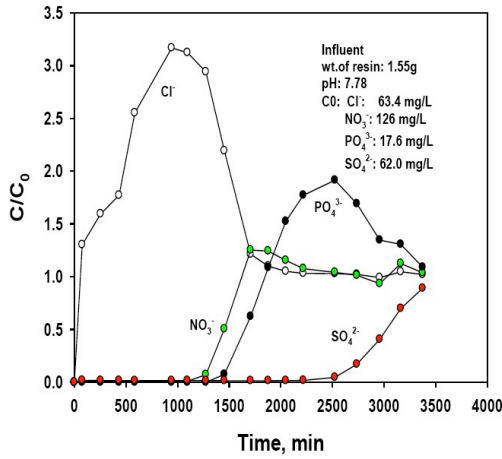


Fig.7. Breakthrough histories of phosphate and other anion (chloride, nitrate, and sulfate) using AMP16.

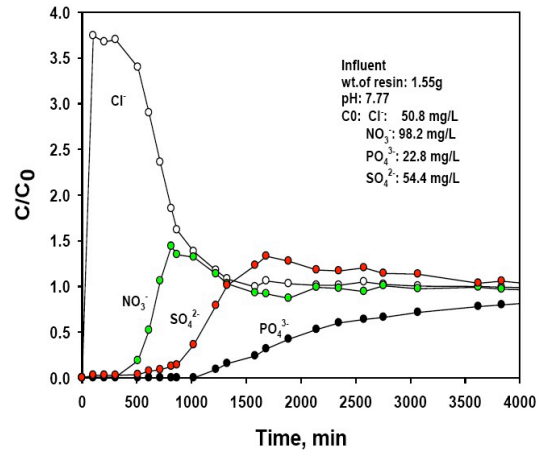
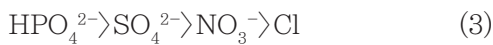


Fig.8. Breakthrough histories of phosphate and other anion (chloride, nitrate, and sulfate) using CR20-Cu.

그래픽 현상을 보여 주고 있다. 하지만 인산염의 경우는 1000 min 이후에 파과점이 나타나고 있으며 아주 서서히 용출 농도의 증가를 보여 주면서 4000 min에 이르러 CR20-Cu는 인산염에 의한 포화 상태에 이르게 된다. 칼럼 실험을 통해 보여진 2가지 현상으로 음이온 교환수지와는 다른 인산염에 대한 선택도가 황산염을 능가한다는 것을 보여 준다. 식(3)은 파과점 곡선을 통해서 유/무기 음이온교환수지의 선택도를 나타낸다. 이런 칼럼 실험을 통한 선택도의 결정은 Zhao and SenGupta (1998)와 An et al (2005)의 결과와 같이 유/무기 음이온교환수지는 인산염의 선택도를 증가 시킨다.



#### 4. 결론

개발된 유/무기 음이온교환수지의 경우 기존의 음이온 교환수지와 차이점을 각각의 실험을 통해서 결론을 얻었다.

- 1) 3종류의 구리용액( $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ )으로 유/무기 음이온교환수지 합성 시, 최대 20%의 구리 이온 흡착량의 변화를 보여주고 있다. 하지만, 모체 수지에 흡착된

구리이온양의 차이에도 불구하고 인 제거에 사용 될 경우 제거율의 차이는 나타나지 않았다.

- 2) 회분식 실험을 통해서 얻은 분리 계수의 값은 CR20-Cu를 이용한 인산염 제거 시 AMP16을 이용하였을 경우 보다 높은 값을 가진다. 이는 인산염에 대한 선택도가 황산염 또는 질산염에 비해서 월등함을 보여주고 있다.
- 3) 등온 흡착 실험을 통해 인산염의 최대 흡착량(Q)은 CR20-CU와 AMP16에서 각각 64.4 mg/g, 48.3 mg/g이 계산되어진다. 33%이상의 최대 흡착량 향상을 보여준다.
- 4) 칼럼 실험을 통해서 각각의 음이온 파과점 곡선은 음이온 교환수지의 선택도가 결정된다. 염소와 질산염의 선택도는 변화가 없으나, 황산염과 인산염의 파과점 순서는 유/무기 음이온의 경우는 인산염 > 황산염 순서이고, 음이온 교환수지는 황산염 > 인산염 순서이다.

#### 사 사

본 연구는 삼양사의 지원을 받아 시행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- An, B. Steinwinder, T.R., Zhao, D. (2005) "Selective removal of arsenate from drinking water using a polymeric ligand exchanger.", *Water Research*, **39**, pp.4993-5004.
- Clifford, D. (1998) "Ion exchange and inorganic adsorption in water quality and treatment", *A Handbook of Community Water Supplies*, American Water Works Association, 9.1-9.91, McGraw-Hill, New York, NY.
- Cornell, D.L (1998) "The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review", *Journal of Environmental Quality*, **27**(2), pp.261-266.
- Gachter, R. Imboden, D.M. (1985) "Lake restoration, In *Chemical Processes in lakes* (Edited by Stumm W.)", pp.365-388, John Wiley and Sons, New York, NY.
- Helfferich, F. (1962) "Ion exchange.", McGraw-Hill, New York, NY.
- Jenkins D. and Hermanowicz S.W. (1991) "Principles of chemical phosphate removal, In *phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater: Principles and practice* (Edited by Sedlak R.I.), 2<sup>nd</sup> ed.", pp91-108, Lewis Publishers, New York, NY.
- Kim, J., Benjamiin, M.M., Kwan, P., (2003) "A novel ion exchange process for As removal", *Journal of America Water Works Association* **95**(3), 77-85.
- Metcalf and Eddy Inc. (1991) "Advanced wastewater treatment, In *Wastewater engineering: Treatment, Disposal, Reuse, Chap. 11.*" McGraw-Hill, Inc. New York, NY.
- Ozmen, F. Kavakli, P.A. Guven, O. (2011) "Removal of Phosphate by Using Copper-Loaded Poly(N-vinylimidazole) Hydrogels as Polymeric Ligand Exchanger", *Journal of Applied Polymer Science* **119**(1) 613-619.
- Tao, WH, Li, AM, Long, C, Fan, ZC, Wang, WW. (2011) "Preparation, characterization and application of a copper (II)-bound polymeric ligand exchanger for selective removal of arsenate from water", *Journal of Hazardous Materials* . **193**, 149-155.
- The Ministry of Environment of Republic of Korea. (2010) "Wastewater effluent standards up to 20 times stricter" A press release.
- Zhao, D., SenGupta, A.K. (1998) "Ultimate removal and recovery of phosphate from wastewater using a new class of polymeric exchangers.", *Water Research*, **32**, pp.1613-1625.
- Zhu, Y. and SenGupta, A.K. (1992) "Sorption enhancement of some hydrophilic solutes through polymeric ligand exchange.", *Environmental Science & Technology*, **26**, pp.1990-1997.