

# 평형 및 칼럼 이온교환에서 $\text{ETAH}^+$ 에 대한 $\text{NH}_4^+$ 선택도 특성 연구

안현경, 이인형\*  
순천향대학교 에너지환경공학과

## A Study on Selectivity Characteristics of $\text{NH}_4^+$ for Equilibrium and Column Ion-Exchanges, Based on $\text{ETAH}^+$

Hyun Kyoung Ahn, In Hyoung Rhee\*  
Department of Energy & Environmental Engineering, Soonchunhyang University

**요약** 이온 교환은 화학, 전자 및 전력 산업에서 수질 및 부식 제어에 사용되고 있다. 원자력 발전소에서  $\text{ETAH}$  형 수지를 사용하는 이온교환수지탑의 아민 포화 운전은 H형 수지 사용에 비해 에탄올아민(ETA) 및 암모니아( $\text{NH}_3$ )와 같은 부식 억제제가 불필요하게 제거되지 않아 운전 및 경제적 측면에서 유리하다. 하지만 불순물 제거능이 감소할 수 있으므로 수지에 대한 이온 선택도의 특성 파악이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 평형 및 칼럼 이온교환에서 두 종류의 이온교환 수지에 대하여  $\text{ETAH}$ 형 이온교환 수지일 때  $\text{NH}_4^+$ 의 선택도를 조사하였고 선택도는 평형 이온교환의 Vaselow 식과 칼럼 이온교환의 파과곡선의 기울기로 결정하였다. 조사 결과  $\text{NH}_4^+$  및  $\text{ETAH}^+$ 의 경우, 두 종류의 이온교환 수지에 대한  $\text{NH}_4^+$ 의 선택도는 낮은 수화 반경으로 인해 더 높게 나타났고, 평형 이온교환에서 용액상의 물 분율이 증가하고 칼럼으로 유입되는  $\text{Na}^+$  농도가 증가함에 따라 감소하였다. 그리고  $\text{NH}_4^+$ 의 선택도는 평형 및 칼럼 이온교환, 그리고 두 수지 종류에 대해 동일하지 않은 것으로 조사되었다. 평형 이온교환에서의 선택도는 이온의 질량전달을 고려하지 않고 평형을 전제로 질량작용식을 이용해 결정된 값이므로 칼럼 이온교환에서의 선택도와 동일하지 않았다. 따라서 이온교환 수지탑 설계시 평형 이온교환에서 조사한 선택도를 이용하는 것보다 모사 조건에서 실시한 칼럼 수지탑 출구 농도로부터 얻어진 선택도를 이용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

**Abstract** Ion exchange (IX) is used for water quality and corrosion control in chemical, electronics, and electric power industries. Amine-saturated operation of an IX bed with  $\text{ETAH}$ -form resin in a nuclear power plant is beneficial in operational and economic aspects. This benefit is due to the absence of unnecessary removal of corrosion inhibitors such as ethanolamine (ETA) and ammonia ( $\text{NH}_3$ ) added, compared with an IX bed with H-form resin. This study investigated the selectivity of  $\text{NH}_4^+$  to two kinds of  $\text{ETAH}$ -form IX resins by batch and column IXs. Ion selectivity was determined with the Vaselow IX equation in batch IX and the slope of the breakthrough curve in column IX. Among  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{ETAH}^+$ , the selectivity of  $\text{NH}_4^+$  to both IX resins was higher due to its lower hydrated radius. The selectivity of  $\text{NH}_4^+$  to both IX resins was decreased with increasing mole fraction in the solution phase in batch IX and with increasing incoming  $\text{Na}^+$  concentration to the column inlet. The selectivity of  $\text{NH}_4^+$  was not identical for batch and column IXs and the two resins. Thus, ion selectivity needs to be determined to design an IX bed in the simulated water quality and with the same resin.

**Keywords** : Selectivity, Equilibrium Ion Exchange, Column Ion Exchange, Breakthrough, Resin,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{ETAH}^+$

본 논문은 순천향대학교 연구과제로 수행되었음.

\*Corresponding Author : In Hyoung Rhee(Soonchunhyang Univ.)

email: ihrhee@sch.ac.kr

Received December 7, 2021

Revised January 7, 2022

Accepted March 4, 2022

Published March 31, 2022

## 1. 서론

이온교환은 용수 및 폐수처리 등 환경 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 물의 연수화, 탈염, 암모니아 제거, 폐수의 중금속 처리 및 방사성 폐기물 처리 등에서 사용되고 있고, 물의 연수공정은 스케일 형성이온을 제거하며, 탈염공정은 고순도의 순수 생산 및 해수의 담수화에 필수적이다. 하수의 고도처리에서 암모늄이온 제거는 환경규제 기준 강화로 중요하게 되었으며, 원자력발전소 방사성 폐액에 존재하는 세슘은 제올라이트를 이용하여 선택적 제거를 하고 있는 것으로 알려져 있다. 뿐만 아니라 정밀화학, 제약, 반도체 및 전력 산업 등에서 불순물을 제거하기 위해 활용되고 있으며[1-3], 특히 원자력발전소 2차 계통은 이온교환수지를 이용하여 양, 음이온 불순물을 제거하고 있다. 원자력발전소 물-증기 순환계통은 유체 수송관 및 증기발생기 등 설비의 부식을 억제하기 위해 아민계 화학약품인 암모니아( $\text{NH}_3$ ) 및 에탄올아민(ETA)을 주입하여 염기성 분위기를 유지하고 있고, 이온교환 수지탑을 이용하여 불순물을 제거하고 있다[4]. 반대이온이  $\text{H}^+$ 인(H형) 이온교환수지를 사용하는 경우 이온교환 수지는 불순물뿐만 아니라 부식 억제제인 아민도 함께 제거하므로 매 순환주기마다(수십 초) 약품의 주입과 제거를 반복하고 있다. 그러나 반대전하가 아민인(ETAH형) 이온교환수지를 사용하게 되면(아민포화 운전) 약품 주입과 수지 재생에 따른 경제 및 운영 측면에서 많은 이득이 예상된다. 하지만 ETAH형 이온교환수지를 사용하면 불순물 제거능이 감소할 수 있으므로 수지에 대한 이온 선택도의 특성 파악이 필요하다.

이온교환수지의 선택도는 정전기 또는 단거리 힘에 의해 고체 표면 전하자리에 있는 반대이온이 용액상에 존재하는 같은 전하의 이온과 치환하는 정도의 크기를 나타낸다. 이온교환의 선택도는 이온교환수지의 특성과 용액의 조건, 전해질 이온의 성질에 의해 결정되며, 이온교환수지 특성은 형상과 표면성질, 용액의 조건은 이온 세기와 성분, 전해질 이온의 성질은 원자가, 크기, 편극능 등이 해당된다. 선택도는 보통 원자가가 클수록, 수화반경이 작을수록 증가하지만, 이온 치환능을 나타내는 일반적인 순서는 존재하지 않는다[5]. 일반적으로 이온교환수지의 선택도는 회분식(평형) 이온교환의 경우 수지가 분산된 이온용액의 평형농도로부터, 칼럼 이온교환의 경우 파과곡선의 기울기 또는 파과구간의 크기 및 파과순서로부터 결정된다[6].

따라서 본 연구에서는 아민포화 운전 적용시 불순물

제거 성능을 조사하기 위해 평형 및 칼럼 이온교환을 이용하여 ETAH형 수지에 대한  $\text{NH}_4^+$ 의 선택도를 조사하였다. 이온교환수지 종류에 따른 성능 파악을 위해 2종의 이온교환 수지에 대하여 선택도를 조사하였고, 칼럼 이온교환의 경우 소량의  $\text{NaCl}$ (20, 200, 1,000 ppb)을 주입하여  $\text{Na}^+$ 가  $\text{NH}_4^+$ 의 선택도에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 본론

### 2.1 실험 재료 및 방법

#### 2.1.1 이온교환수지

이온교환수지는 특별히 원자력 산업용으로 제작된 2종의 양이온교환수지와 음이온교환수지를 사용하였다. 양이온교환수지는 2종 모두 Gel 형이고, sulfonate 작용기를 가지고 있으며, 유사한 양이온교환용량(~2.4 eq/L)과 Shipping density(840 g/L)를 가지고 있다. 습분함량은 H형 일 때 Resin 1이 36 ~ 43 %, Resin 2가 37 ~ 43 %, 양이온교환수지의 입자 크기는 Resin 1이 600  $\mu\text{m}$  이상, Resin 2가 300  $\mu\text{m}$  이상으로 Resin 2의 크기가 Resin 1의 크기보다 작은 것으로 조사되었다. 음이온교환수지는 4차 ammonium 작용기를 가지고 있으며 이온교환용량은 0.8 eq/L, Shipping density 660 g/L, 습분함량은 OH형 일 때 66 ~ 75 %, 입자 크기는 580  $\mu\text{m}$  이상 이다[7].

#### 2.1.2 이온교환수지 제조

H형 양이온교환수지는 다음과 같은 방법 및 절차를 이용하여 제조하였다. 500 mL 폴리에틸렌(PE) 용기에 양이온교환수지와 0.1 N HCl 용액을 넣고 교반을 수행한 후, 수지를 초순수 0.5 L로 채워진 1 L 칼럼에 넣고 수지 층의 팽창률 50 %를 유지하는 유속으로 pH 7이 될 때까지 역 세척하였다. 역 세척이 끝난 후 배수하고, 이온교환 수지를 여과장치로 옮겨 진공 여과하였다. 완성된 수지는 마개가 있는 병에 담아 수분이 날아가지 않도록 보관하였다. ETAH형 양이온교환수지의 제조는 앞에서 제조한 H형 양이온교환수지를 500 mL PE 용기에 넣고 ETA(99.0 %, SAMCHUN) 용액과 함께 교반한 후 H형 양이온교환수지 제조와 동일하게 역 세척하여 마개가 있는 병에 담아 수분이 날아가지 않도록 하여 보관하였다. 음이온교환수지는 양이온교환수지와 마찬가지로

역 세척하고, 수분이 날아가지 않도록 하여 보관하였다.

### 2.1.3 평형 이온교환

평형 이온교환 실험은 총 농도가 0.05 N(ETAH<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 포함, 농도 비율 5가지)인 100 mL 용액에 0.05 N 농도에 해당하는 ETAH형 수지를 투입하여 16시간 교환하여 평형에 도달시킨 후 용액상 및 수지상의 농도를 측정하였다. 이 때 평형도달 시간은 1시간 마다 용액의 농도를 측정하여 평형에 도달하는 시간을 측정하였고, 평형에 도달하는 시간은 12시간으로 조사되었다. 본 실험에서는 조사된 평형시간보다 더 긴 16시간을 선정하여 평형 이온교환실험을 수행하였다. ETAH<sup>+</sup> 농도는 TOC 분석기 (TOC-L, Shimadzu)를 이용하여 측정된 총 유기탄소 (Total Organic Carbon, TOC) 값을 ETAH<sup>+</sup> 농도로 환산하여 결정하였다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도는 자동적정기 (848 Titrino plus, Metrohm)를 이용하여 산-염기 역 적정방법으로 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>와 ETAH<sup>+</sup>의 총 농도를 측정된 후 TOC로부터 구한 ETAH<sup>+</sup> 농도를 제외하여 결정하였다.

### 2.1.4 칼럼 이온교환

Fig. 1과 같이 이온교환수지를(양이온교환수지 7.5 g, 음이온교환수지 6.3 g) 채운 칼럼과 계측기 전극 셀(pH sensor, GST-5841C, TOADKK)을 연결하여 칼럼 후단에서 pH를 측정하였다. 초순수로 바탕실험을 진행하여 pH 안정화를 진행한 후 주입용액 탱크를 연결하고 펌프를 이용하여 100 mL/min의 유속으로 용액을 주입하였다. 이 때 주입용액의 조건은 pH 10, NH<sub>3</sub> 2.45×10<sup>-4</sup> N, ETA 2.90×10<sup>-4</sup> N 로 하였고, Na<sup>+</sup>는 3.42×10<sup>-7</sup> N(20 ppb), 3.42×10<sup>-6</sup> N(200 ppb), 1.71×10<sup>-5</sup> N(1,000 ppb) 세 가지 농도로 하였다. 이 때 칼럼 유출수의 pH는 연속적, 실시간으로 측정하였고, ETAH<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 농도는 일정시간 단위 (2~4시간)로 유출수를 채취하여 분석하였다.

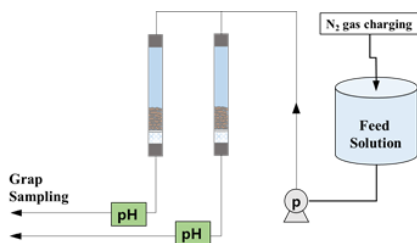


Fig. 1. Experimental apparatus for column ion-exchange

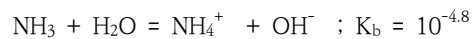
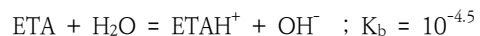
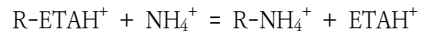
## 2.2 선택도 결정

### 2.2.1 평형 이온교환

이온교환은 고체상에 존재하는 이온과 액체상에 존재하는 이온이 자리를 바꾸는 현상으로 정의되며, 치환되는 정도는 일반적으로 이온의 수화반경과 전하의 크기에 주로 영향을 받는 것으로 알려져 있다[6]. 치환되는 정도를 일반적인 화학반응식으로 간주하여 질량작용 법칙을 적용할 때 평형상수 값은 선택도 상수가 아닌 계수로 정의하며, 이 값은 고상 및 액상의 조건에 따라 변화한다[5,6].

ETAH<sup>+</sup> 기준으로 할 때 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도는 평형 후 용액상에서 두 이온 농도, 수지상에서 두 이온의 몰 비(당량비)를 결정하고 Eq. (1)과 같이 Vanselow 질량작용식을 이용하여 계산한다[8,9].

#### • 이온교환반응



#### • Vanselow 질량작용식의 선택도 계수

$$k_v = \frac{X_{R-NH_4^+} \times \{ETAH^+\}}{X_{R-ETAH^+} \times \{NH_4^+\}} = \frac{X_{R-NH_4^+} \times \gamma_{ETAH^+} \times [ETAH^+]}{X_{R-ETAH^+} \times \gamma_{NH_4^+} \times [NH_4^+]} \quad (1)$$

Where,  $k$  denotes selectivity coefficient, brace{ } denotes activity, bracket [ ] denotes concentration,  $X$  denotes mole fraction,  $\gamma$  denotes the activity coefficient in the solution phase

### 2.2.2 칼럼 이온교환

칼럼 이온교환의 선택도는 파과곡선의 기울기 값으로 정의하고 Fig. 2와 같이 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 선택도를 결정하였다. 파과곡선의 기울기는 파과 시작점과 파과 종료점에 해당하는 (수직축) 농도의 중간 값에서 파과곡선에서 그린 점선의 기울기를 말하며, 이에 해당하는 값이 이온 선택도로 정의된다. Fig. 2와 같이 파과 시작점은 출구의 농도가 처음 증가하기 시작하여 본격적으로 증가하는 구간에서, 각각을 연장한 직선이 교차하는 지점이다. 파과 종료점은 출구의 농도가 증가하여 입구 농도와 같아지는 구간에서, 증가하는 곡선의 연장선과 입구 농도에 해당하는 수평선이 교차하는 지점이다.

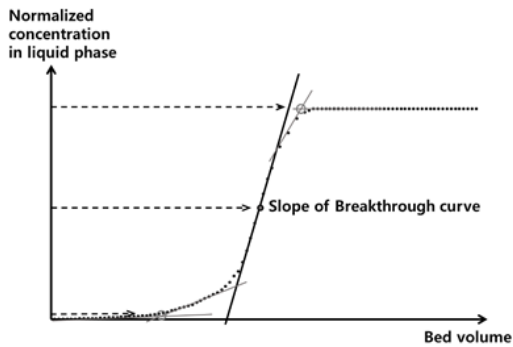


Fig. 2. Slope of breakthrough curve in column ion-exchange

### 2.3 실험 결과

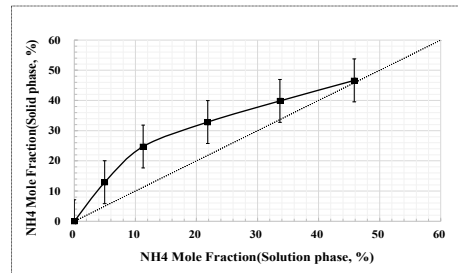
#### 2.3.1 평형 이온교환의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도

Table 1과 Fig. 3은 2종의 이온교환 수지에 대한 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도 결과이다. Fig. 3과 같이 평형에서 용액상 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 몰 비율이 0.35 ~ 0.45 이하 일 때 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도는 ETAH<sup>+</sup> 보다 높았다(1보다 크므로). 또한 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도는 Resin 2 보다 Resin 1에서 더 높았고, 주어진 수지의 경우 용액상의 몰 비율이 증가하면 감소하는 것으로 나타났다.

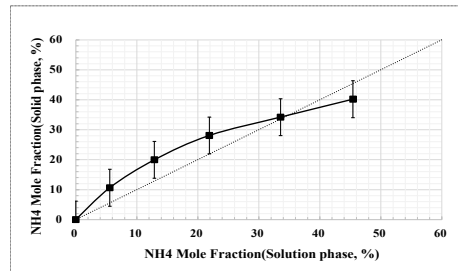
Table 1. Selectivity of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> to R-ETAH for five different mole fractions between NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and ETAH<sup>+</sup> in the solution phase

Number of solutions		1	2	3	4	5
Initial mole fraction of NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		0.2	0.4	0.6	0.8	1
Resin 1	Mole fraction at equilibrium	0.13	0.25	0.33	0.40	0.47
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> selectivity	2.83	2.59	1.75	1.30	1.03
Resin 2	Mole fraction at equilibrium	0.11	0.20	0.28	0.34	0.40
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> selectivity	2.02	1.69	1.39	1.03	0.81

양이온교환수지의 음전하 자리에 대한 이온 선택도는 양이온의 전하밀도에 비례한다. Fig. 4와 같이 ETAH<sup>+</sup>는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 H가 ethanol 분자로 치환된 구조를 가지므로, 수화반경은 ETAH<sup>+</sup>보다 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 작다. 따라서 양전하 밀도 관점에서 보면 양이온교환수지에 대한 선택도는 ETAH<sup>+</sup>보다 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 더 클 것이다.



(a)



(b)

Fig. 3. Binary cation exchanges of ETAH /NH<sub>4</sub><sup>+</sup> on Resin 1&2 (a) Resin 1 (b) Resin 2

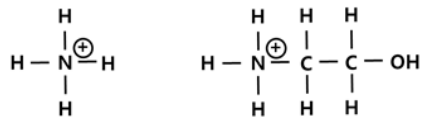


Fig. 4. The Lewis structure of ETAH<sup>+</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

수지에 대한 이온선택도는 용액상 몰 비율이 작을수록 이온교환 자리와 접촉할 빈도가 높으므로 더 증가한다. 그러나 수지에 대한 주어진 이온의 흡착률이 높아지게 되면, 해당 이온이 흡착할 수 있는 자리수가 감소하므로 해당 이온의 선택도는 감소한다[5,6]. 따라서 수지에 대한 높은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 흡착률에서, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>선택도는 Fig. 3과 같이 ETAH<sup>+</sup> 보다 낮아지는 것으로 판단된다. 동일한 작용기를 가진 Resin 1과 2에 대한 이온선택도는 수지 구조, 공극 등 복잡한 수지 고유의 특성에 따라 다르므로 설명하기 어렵다[5,6]. 평형 이온교환에서 주입용액의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 몰 비율은 0.5 이하이고, 이것은 Table 1과 같이 평형에서의 몰 비율이 0.2 이하의 범위에 해당하므로 두 수지에 대한 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도는 1 이상이 된다. 따라서 주입용액 성분 조건에서 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 ETAH<sup>+</sup> 보다 선택도가 높으므로, 이온교환 칼럼에 채워진 ETAH형 수지에 잘 포획될 것으로 판단된다.

### 2.3.2 칼럼 이온교환의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도

농도가 높은 주요 화학종인 ETAH<sup>+</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 소량의 Na<sup>+</sup>(20, 200, 1000 ppb)를 포함하는 주입 용액을 ETAH형 양이온 교환수지와 OH형 음이온 교환수지가 혼합된 혼상 칼럼에 주입하면 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 양이온교환수지에 포획되고 양이온교환수지에 있던 ETAH<sup>+</sup>는 수증으로 방출된다. 수지탑 출구에서 초기에는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 거의 없고 대신 ETAH<sup>+</sup> 농도가 높으나, 운전시간이 경과함에 따라 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도는 증가하고 ETAH<sup>+</sup> 농도는 반대로 감소하여 결국 유입수 농도와 같아진다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도가 증가하는 파과구간에서 파과곡선은 대칭에 가까운 S형을 나타내며 이 구간에서 기울기는 수지에 대한 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도를 나타낸다.

파과가 시작되면서 ETAH<sup>+</sup> 대신 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 누출되므로 Fig. 5와 같이 출구 pH는 파과가 진행되면서 다소 감소 경향을 보였다. 파과 진행 중 유출수에는 알칼리도가 높은 ETAH<sup>+</sup>(K<sub>b</sub>=10<sup>-4.5</sup>)가 감소하고, 대신 알칼리도가 낮은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(K<sub>b</sub>=10<sup>-4.8</sup>)가 동일량 방출되므로 유출수 중 pH는 다소 감소 경향을 나타낸다. 염기도 상수 차이가 10<sup>-0.3</sup>(1/2) 감소하나, 두 화학종 모두 약 알칼리성이므로 pH 변화는 크지 않은 것으로 조사되었다.

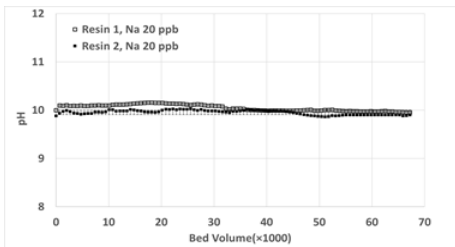


Fig. 5. pH in effluents of ion-exchange column with Resin 1&2

Fig. 6과 같이 파과가 시작되면 칼럼 출구의 ETAH<sup>+</sup> 농도는 감소하고 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도는 증가하며, 파과가 종료되면 출구에서 ETAH<sup>+</sup> 및 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도는 유입수의 농도와 같아진다. 파과곡선을 이용하여 선정한 이온선택도는 파과시점이 빠를수록, 파과곡선의 기울기가 클수록 증가하는 것으로 나타났다. 특히 유입수 내 Na<sup>+</sup>가 포함되어 있을 때 이온선택도는 Na<sup>+</sup> 농도가 20, 200, 1,000 ppb로 증가할수록 파과시점이 빨라지고, 파과곡선의 기울기가 완만해지는 것으로 조사되었다. Table 2와 같이 Na<sup>+</sup> 농도가 증가하여 이온강도가 높아지면 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도는 최대 20 % 감소하는 것으로 나타났다. 또한 2종의 이온교환수지 파과곡선은 모양은 비슷하게 관찰되었으나 Resin

1의 파과시점이 Resin 2보다 빠른 것으로 나타났고, Resin 1의 파과곡선 기울기는 Resin 2보다 완만한 것으로 나타났다. Table 2와 같이 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도는 Resin 2가 Resin 1보다 10 % 더 높은 것으로 조사되었다.

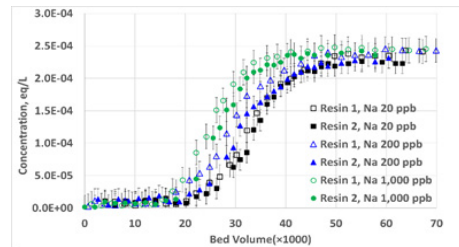


Fig. 6. Concentrations of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> in effluents of ion-exchange column with Resin 1&2 (Error bar : Standard Error of Mean, SEM)

Table 2. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> selectivity of Resins 1&2 with Na<sup>+</sup> concentration

Resin	1			2		
Na(ppb)	20	200	1,000	20	200	1,000
Selectivity	1.60	1.56	1.51	2.08	1.81	1.66

평형 이온교환과 달리 칼럼 이온교환에서 이온선택도는 Resin 1보다 Resin 2가 높은 것으로 조사되었다. 반면 평형 이온교환과 동일하게 칼럼 이온교환의 파과곡선 기울기로부터 얻어진 이온선택도 역시 이온세기 즉, 다른 이온의 존재 여부 및 농도의 크기에 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 이온교환 수지탑 설계 시 예상되는 유입수의 성분 및 농도에 해당하는 모사 수질 조건에서 칼럼 이온교환의 결과를 이용하여 이온선택도를 결정하는 것이 필요하다.

## 3. 결론

본 연구에서는 평형 및 칼럼 이온교환으로부터 ETAH형 수지에 대한 이온교환수지 2종의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도를 조사하였다.

평형 이온교환으로부터 결정된 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도는 총 이온농도가 0.05 N에서 몰 비율이 50% 미만인 경우 양전하 밀도가 낮은 ETAH<sup>+</sup>보다 높았으나, 용액상 몰 비율이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 주입용액 성분의 회분식 평형조건에서 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 선택도는

$\text{ETAH}^+$  보다 높으므로  $\text{ETAH}$ 형 수지탑에 잘 포획될 것이다. 작용기가 동일한 2종의 양이온교환수지 선택도는 Vanselow 질량작용식을 이용하여 계산한 결과 Resin 1이 Resin 2보다 높은 것으로 조사되었다.

$\text{ETAH}$ 형 수지로 채워진 칼럼 이온교환에서  $\text{NH}_4^+$ 의 선택도는 수지탑 출구농도의 파과곡선에서 파과시점이 빠를수록, 곡선의 기울기가 클수록 높게 나타났다. 그러나 파과곡선의 파과시점은 대부분 수지의 이온교환용량에 비례하므로 파과시점이 늦어진다고 해서 이온선택도가 높다고 할 수는 없다. 또한 파과곡선 기울기를 이용하여 결정한  $\text{NH}_4^+$  선택도는  $\text{Na}^+$ 농도가 20 ppb에서 1,000 ppb로 증가하면 최대 20 % 감소하였다. 이온교환 수지탑의 파과곡선 기울기를 이용하여 결정한 2종의 양이온교환수지 선택도는 평형 이온교환에서의 조사결과와 달리 Resin 1이 Resin 2 보다 낮은 것으로 나타났다. 이는 이온교환수지 입자의 크기 차이(Resin 1 > Resin 2)로 인해 그에 따른 공극의 차이, 총 이온교환용량의 차이 등 종합적인 영향에 기인한다고 판단된다.

평형 이온교환에서 이온교환 평형에 대한 선택도는 이온의 질량전달을 고려하지 않고 평형을 전제로 질량작용식을 이용해 결정된 값이므로 칼럼 수지층의 동적 이온교환에서 이온과 수지 사이의 선택도와 동일하지 않을 것이다. 따라서 이온교환 수지탑 설계 시 현장과 유사한 조건에서 실시한 칼럼 이온교환의 파과곡선을 이용하여 결정한 선택도를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 원자력 및 화력발전소 복수탈염기의 아민포화온전 기초자료로 활용될 수 있다.

## References

- [1] C. Calmon, "Recent developments in water treatment by ion exchange", *Reactive Polymers, Ion Exchangers, Sorbents*, Vol.4, Issue2, pp.131-146, April. 1986.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-6989\(86\)90008-5](https://doi.org/10.1016/0167-6989(86)90008-5)
- [2] I. Ali, V. K. Gupta, "Advances in water treatment by adsorption technology", *Nature Protocols*, 1, 2661-2667, January. 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.370>
- [3] P. M. Luciana, A. P. Tatiana, A. M. Diego, A. R. Rui, J. P. Vitor, "Design of a fixed-bed ion-exchange process for the treatment of rinse waters generated in the galvanization process using *Laminaria hyperborea* as natural cation exchanger", *Water Research*, Vol.90, 1 pp.354-368, March. 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.027>

- [4] Y. B. Lee, J. M. Lee, D. H. Hur, J. H. Lee, S. H. Jeon, "Effects of Advanced Amines on Magnetite Deposition of Steam Generator Tubes in Secondary System", *Coatings*, 11, 514, pp.1-19, April. 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings11050514>
- [5] M. B. Richard, K. Jacek, "Ion-exchange Selectivity and Electrolyte Concentration", *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, 70, pp.2080-2091, March. 1974.  
DOI: <https://doi.org/10.1039/F19747002080>
- [6] W. Bashir, E. Tyrrell, O. Feeney, B. Paull, "Retention of alkali, alkaline earth and transition metals on an itaconic acid cation-exchange column: Eluent pH, ionic strength and temperature effects upon selectivity", *Journal of Chromatography A*, Vol.964, No.1-2, pp.113-112, July. 2002.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(02\)00652-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(02)00652-0)
- [7] Dupont., Ion Exchange Resin Product Data Sheet [cited 2021 November 1]. Available From: <https://www.dupont.com> (accessed Nov. 1, 2021)
- [8] A. M. Elprince, A. P. Vanselow, G. Sposito, "Heterovalent, Ternary Cation Exchange Equilibria:  $\text{NH}_4^+$ - $\text{Ba}^{2+}$ - $\text{La}^{3+}$  Exchange on Montmorillonite", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, Issue.5, pp.964-969, September. 1980.  
DOI: <https://doi.org/10.2136/sssai1980.03615995004400050018x>
- [9] I. H. Rhee, D. A. Dzombak, "Binary and Ternary Cation Exchange on Strong Acid Cation Exchange Resin Involving Na, Mg, and Zn in Single and Binary Backgrounds of Chloride, Perchlorate, and Sulfate", *Langmuir*, Vol.15, pp.6875-6883, July. 1999.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/la970031g>

안 현 경(Hyun Kyoung Ahn)

[정회원]



- 2003년 2월 : 순천대학교 화학공학과 (공학석사)
- 2011년 8월 : 순천대학교 화학·환경공학과 (공학박사)
- 2015년 9월 ~ 2018년 5월 : (사)환경과문명 책임연구원
- 2010년 3월 ~ 현재 : 순천대학교 에너지환경공학과 강사

<관심분야>

용수 및 폐수 처리, 수질관리

이 인 형(In Hyoung Rhee)

[정회원]



- 1982년 2월 : 고려대학교 화학과 (이학사)
- 1990년 8월 : Cornell University 토목환경공학과 (공학석사)
- 1996년 11월 : Carnegie Mellon University 토목환경공학과 (공학 박사)

• 1998년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 에너지환경공학과 교수

〈관심분야〉

용수 및 폐수 처리, 수질관리