

오염된 물로부터 이온교환수지를 이용한 방사성이온 제거

신도형 · 주고운 · 정성일 · 임지원[†]

한남대학교 대덕밸리캠퍼스 화공신소재공학과
(2016년 10월 26일 접수, 2016년 11월 4일 심사, 2016년 11월 8일 채택)

Removal of Radioactive Ions from Contaminated Water by Ion Exchange Resin

Do Hyoung Shin, Ko Woon Ju, Seong Ihl Cheong, and Ji Won Rhim[†]

Department of Advanced Materials and Chemical Engineering,
Hannam University, 1646 Yuseongdae-ro, Yuseoung-gu Daejeon 34054, Korea
(Received October 26, 2016; Revised November 4, 2016; Accepted November 8, 2016)

초 록

본 연구에서는 상용화된 양이온교환수지, 음이온교환수지, 혼합이온교환수지 각각 3종을 이용하여 Cs과 I 등의 방사성이온을 포함하고 있는 오염수 중 방사성 이온을 분리하는 연구를 하였다. 실험은 상온에서 회분식으로 진행하였으며, 이온교환수지의 양을 달리하여 각각의 이온교환수지에 대한 Cs와 I의 체염성능을 비교하였다. 이온크로마토그래피 기기로 농도분석을 한 결과, D사의 이온교환수지의 대체적으로 이온교환능력이 높은 결과 값을 가졌으며, 공통적으로 이온교환수지의 양이 적을 때, 이온교환수지 질량 대비 체염성능이 높은 것을 알 수 있었다. D사의 양이온교환수지의 질량이 적을 때, Cs 이온에 대한 이온교환용량은 0.199 meq/g, 음이온교환수지의 I 이온에 대한 이온교환용량은 0.344 meq/g의 결과 값을 확인할 수 있었으며, 혼합이온수지를 사용했을 때에는 I 이온에 대한 이온교환용량이 0.33 meq/g으로, D사의 이온교환수지가 다른 이온교환수지에 비해 특히 I에 대한 이온교환능력이 높은 것을 알 수 있었다.

Abstract

In this study, we used three kinds of commercially available cation, anion, and mixed-ion exchange resins to separate radioactive ions from a polluted water containing Cs, I, and other radioactive ions. The experiment was conducted at a room temperature with a batch method, and a comparative analysis on the decontamination ability of each resin for the removal of Cs and I was performed by using different quantities of resins. The concentration was analyzed using ion chromatography and the ion exchange resin product from company D showed an overall high ion exchange ability. However, for most of the experiments when the amount of ion exchange resin was decreased, the decontamination ability of the resins against mass increased. When the mass of company D's cation exchange resin was small, the ion exchange ability against Cs and I ions were measured as 0.199 and 0.344 meq/g, respectively. When the mixed ion exchange resin was used, the ion exchange ability against I ions was measured as 0.33 meq/g. All in all, company D's ion exchange resins exhibited a relatively higher ion exchange ability particularly against I ions than that of other companies' exchange ions.

Keywords: Cesium, Iodine, radioactive ions, ion exchange resin, water treatment

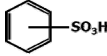
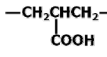
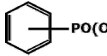
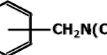
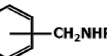
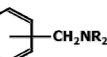
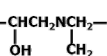
1. 서 론

이온교환수지는 19세기, H. S. Thompson과 J. T. Way에 의해 토양에서 이온교환 현상을 발견하였으며[1], 20세기 초반까지는 zeolite와 clay같은 광물들을 이온교환체로 주로 물을 처리하는데 사용하며 발전되어왔다. 1935년 Adams와 Holmes에 의한 폐놀수지를 이용한 최초의 이온교환수지 합성에 이어, 1939년 Olof Samuelson은 이온교환

수지를 체계적으로 연구하기 시작[2], 현재까지 많은 종류의 이온교환수지가 연구, 생산되고 있다. 현재 사용되는 이온교환수지는 대부분 합성으로 제조한 이온교환수지이며, 스티렌을 지지체로 디비닐벤젠을 가교시킨 3차원 그물모양의 구조로 된 수지가 가장 널리 사용되고 있다[3]. 이온교환수지를 사용하는 이온교환법은 원수 내의 특정이온을 제거하는 방법 중 세계적으로 가장 널리 사용이 되는 방법이다[4]. 대표적인 이온교환반응으로는 중화반응, 복분해반응 및 중성염분해반응 등이 있다[5]. 이온교환 수지는 3차원 입체적 구조로써, 고분자 화합물에 이온교환능을 가진 이온교환기가 공유결합으로 결합, 고정, 분포되어 있다. 이온교환수지의 고분자 지지체로는 스티렌과 디비닐벤젠의 공중합체가 널리 이용되고 있다[6]. 대체적으로 이온교환수지의 근본적인 성질은 교환기의 종류, 성질, 교환용량, 디비닐벤젠의 첨가량에 많은 영향을 받는다. 이온교환체는 크게 무기질과 유기질로 대별

[†] Corresponding Author: Hannam University,
Department of Advanced Materials and Chemical Engineering, 1646
Yuseongdae-ro, Yuseoung-gu Daejeon 34054, Korea
Tel: +82-42-629-8839 e-mail: jwrhim@gmail.com

Table 1. Classification of Ion Exchange Resins

Classification	Active group	Typical configuration
Strong acid	Sulfonic acid	
	Carboxylic acid	
Weak acid	Phosphonic acid	
	Quaternary ammonium	
Strong base	Secondary amine	
	tertiary amine (aromatic)	
Weak base	tertiary amine (aliphatic)	

되며, 유기질의 이온교환체가 이온교환수지로 불린다. 이온교환수지는 또 양이온교환수지와 음이온교환수지로 나뉘고, 성질에 따라 강/약 산성, 염기성 등으로 나뉜다. 특정한 무기이온을 킬레이트반응을 통해 이온교환 하는 수지를 킬레이트 수지라고 한다. 일반적으로 양이온과 음이온 사이의 결합력 E 는 다음 식과 같이 표현된다[7-9].

$$E = \frac{q^+ q^-}{4\pi\epsilon r} \quad (1)$$

where, E = Interaction energy between two charged particles

q^+ = The charge of the cation

q^- = The charge of the anion

r = Distance between two charged particles

ϵ = The dielectric constant of the medium

양, 음이온교환수지의 종류는 다음 Table 1과 같이 대별할 수 있다.

특정 이온교환기에 의해 용액중의 양이온을 교환할 수 있는 이온교환수지인 양이온교환수지는 $-OH$, $-COOH$, $-OPO_3H_2$, $-SO_3H$, $-PO_3H$, AsO_3H_2 등의 작용기를 가지고 있다[10]. 작용기의 산도에 따라 강산성, 약산성 양이온교환수지로 분류한다[11]. 강산성 양이온교환수지가 가장 널리 사용되며, 그 분야는 경수의 연화, 순수제조 등에 있으며, 교환대상으로 하는 이온은 주로 Na^+ , H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 등이다[12]. 양이온교환수지의 경우, 일반적으로 이온선택성에 대한 순서는 $Ba^{2+} > Pb^{2+} > Sr^{2+} > Ca^{2+} > Ni^{2+} > Cd^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Ti^+ > Ag^+ > Cs^+ > Rb^+ > K^+ > NH_4^+ > Na^+ > H^+$ 순서로 알려져 있다[13].

용액 중의 음이온을 특정 이온교환기에 의해 교환할 수 있는 이온교환수지인 음이온교환수지는 고분자 지지체에 $-NR_3OH$, $-NH_3OH$, $-NH(CH_3)_2OH$, $=NH_2OH$, $\equiv NOH$ 등을 작용기로 갖고 있으며, OH^- , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} 의 형태의 음이온을 교환하는 것이 일반적이다. 작용기의 염기도에 따라 강염기성, 약염기성 음이온교환수지로 분류하며, 강염기성 음이온교환수지는 이온교환기로 주로 4급 암모늄을 가지고 있고 염기도가 강하여 산성, 염기성 용액 모두에서 전리하여 거의 전 pH 범위에서 이온교환을 할 수 있다[14]. 일반적인 음이온 선택성의

순서로는 $CrO_4^{2-} > SeO_4^{2-} > SO_4^{2-} > H_2SO_4^{2-} > HSO_4^- > I^- > NO_3^- > Br^- > HPO_4^{2-}$, $SeO_3^{2-} > HSO_3^{2-} > NO_2^- > Cl^- > H_2PO_4^-$, $HCO_3^- > OH^- > F^-$ 로 알려져 있다[15].

원수를 처리하는 많은 공정에서 이온교환수지를 이용하지만, 그중에서도 방사성이온을 포함한 원수를 제염하는데도 널리 쓰인다. 보통 방사성 폐액을 처리할 때에는, 수지의 수명문제로 유기이온교환수지보다 무기이온교환수지를 더 많이 사용하고 있다[16]. 방사성 이온이 물속에 존재하게 되면 직접음용 뿐만 아니라 먹이사슬에 의한 간접적인 방법으로도 체내에 흡수될 수 있기에 큰 위험성을 안고 있다. 방사능 누출사고의 대표적인 사례로는 체르노빌, 키시탐 후쿠시마 원전사고가 있으며, 이로 인해 수많은 인류가 피폭을 당해 세계적으로 최악의 사고로 예를 들 수 있다. 한번 방사능 물질이 노출되어 오염되면 환경에 심각하게 영향을 미치며, 제염에도 수많은 시간이 걸릴 것으로 발표가 되기도 하였다. 이와 관련하여 이미 오염되어 버린 방사성 폐수를 처리하는 연구뿐만 아니라 추후에 또 있을 수 있는 사고와 재난상황에 대비하고, 위기에 대응하기 위해 심층적인 연구가 진행되고 있으며, 실리코타이타네이트, 암모늄 몰리브도 포스페이트, 핵사시아노페라이트 복합체, 천연 제올라이트 많은 종류의 이온교환체가 방사성 이온을 처리하기 위해 연구가 지금도 계속되고 있다[17-29].

하지만 방사성 폐수를 처리한 폐이온교환수지는 저준위 방사성 물질로서 집중적으로 관리가 필요한 폐기물이다. 폐수지는 감용화 처리가 어렵고 폐수지가 함유하고 있는 핵종 추출이 쉽지 않으므로 제염 처리 과정에서 발생하는 폐기물을 최소화 할 수 있는 기술이 필요하다. 현재로서는 폐수지를 영구 또는 임시로 저장하거나 분리, 추출, 분해, 탈수, 고화시키는 것이 일반적이며, 2차폐기물의 완벽한 처리기술은 미흡하다는 취약점을 갖고 있다[30-31].

본 실험은 저준위의 방사성 이온을 함유한 원수를 처리하는 목적을 갖고 있으며, 이에 대한 적용 가능성을 알아보기 위해 이온교환수지를 이용한 연구를 진행하였다. 시중에 판매하는 3개 회사의 양이온교환수지, 음이온교환수지, 혼합이온교환수지를 이용하여 각각의 이온교환수지에 대한 이온교환용량을 측정, 이들의 제염성능을 비교하였다.

2. 실험

2.1. 재료 및 시약

시판되는 이온교환수지의 제염성능을 비교하기 위한 실험을 실시하였다. 실험을 하기 위한 재료로는 양이온교환수지, 음이온교환수지, 혼합이온교환수지를 각각 3종씩 사용하였다. Rohm & Haas (Philadelphia, USA), Dow (Midland, USA), 삼양사(Seoul, Korea)의 제품을 구매하여 사용하였으며, 공급액 제조를 위한 cesium nitrate ($CsNO_3$, 99.8%, 194.91 g/mol)와 potassium iodide (KI, 99.9%, 166 g/mol)는 Alfa Aesar (Haverhill, USA)에서 구입하였으며, 사용한 자-테스터기는 Misung (Seoul, Korea)의 제품을 사용하였다. 각각의 수지의 제원은 다음 Tables 2-4와 같다.

2.2. 제염성능 비교실험

각 3개 회사의 수지 성능 비교실험을 진행하였다. 실험은 상온에서 회분식으로 진행하였으며, 이온교환수지의 양을 고중량, 저중량으로 나눠 각각의 이온교환수지를 1 mmol의 $CsNO_3$ 와 KI용액을 공급액으로 제염성능을 비교하였다. 각각의 이온교환수지를 2, 10 g을 비커에 넣고 1 L의 공급액을 채운 뒤 자-테스터기로 동일하게 150 rpm으로 5 min간 교반, 50 rpm에서 15 min 교반시킨 후에 30 min간 정지시키

Table 2. Properties of Cation Ion Exchange Resins *

	Rohm & Haas	Dow	Samyang
Model name	Amberlite IRN 99	Marathon C	Trilite SCR-BH
Ionic form	H ⁺ form	H ⁺ form	H ⁺ form
Matrix	Styrene-DVB	Styrene-DVB	Styrene-DVB
Particle size (mm)	0.58~0.68	0.6 ± 0.5	0.3~1.2
Density (g/mL)	0.79*	1.2	1.2
Apparent density (g/mL)	0.84	0.8	0.78
Total exchange capacity (eq/L)	2.4	1.8	1.8
Moisture holding capacity (%)	37~43	50~56	50~60
Maximum operating temperature (°C)	60	120	120
pH range	0~14	0~14	0~14

* : Information was served by each company

** : Direct measurement in laboratory

Table 3. Properties of Anion Ion Exchange Resins *

	Rohm & Haas	Dow	Samyang
Model name	Amberite IRN 78	Marathon A	Trilite SAR20OH
Ionic form	OH ⁻ form	OH ⁻ form	OH ⁻ form
Matrix	Styrene-DVB	Styrene-DVB	Styrene-DVB
Particle size (mm)	0.58~0.68	0.6 ± 0.05	0.3~1.2
Density (g/mL)	1.10**	1.06	1.05
Apparent density (g/mL)	0.69	0.64	0.65
Total exchange capacity (eq/L)	1.2	1.0	0.9
Moisture holding capacity (%)	54~60	60~72	57~62
Maximum operating temperature (°C)	60	60	40
pH range	0~14	0~14	0~14

* : Information was served by each company

** : Direct measurement in laboratory

Table 4. Properties of Mixed Ion Exchange Resins *

		Rohm & Haas	Dow	Samyang
Model name		Amberite IRN 170	Marathon MR-3	Trilite SM210
Chemical form		H ⁺ /OH ⁻ (1 : 1)	H ⁺ /OH ⁻ (1 : 1)	H ⁺ /OH ⁻
Matrix		Styrene-DVB	Styrene-DVB	Styrene-DVB
Particle size (mm)	Cation	0.58~0.68	0.61 ± 0.05	0.3~1.2
	Anion	0.58~0.68	0.76 ± 0.05	0.3~1.2
Density (g/mL)	Cation	0.79**	1.22	1.2
	Anion	1.10**	1.06	1.05
Apparent density (g/mL)		0.69	0.67	0.7
Total exchange capacity (eq/L)	Cation	2.4	1.9	1.8
	Anion	1.2	1.0	1.05
Moisture holding capacity (%)	Cation	37~43	46~51	52~60
	Anion	54~60	60~72	
Maximum operating temperature (°C)		60	60	50
pH range		0~14	0~14	0~14

* : Information was served by each company

** : Direct measurement in laboratory

Table 5. Properties of Analysis Instrument

Model	Ion chromatography (Metrohm, Switzerland)
	ICS 2100 (Dionex, US)
Specifications	Flow rate : 0.01~9.9 mL/min
	Max pressure : 30 MPa
	Conductivity range : 0.1~1000 µs
	Packed-bed suppressor

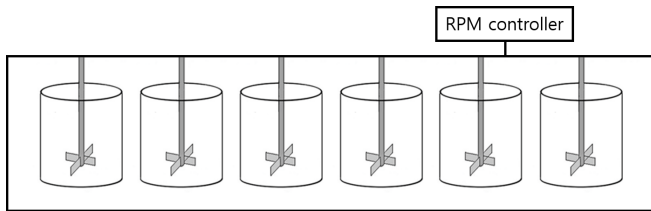


Figure 1. Diagram of the experimental apparatus used in this study.

고 상등액을 채수하여 시료 중의 Cs와 I 이온의 농도분석을 진행하였다. 농도분석은 이온크로마토그래피 기기로 진행하였으며, 기기의 제원 값은 Table 5에 기입, Figure 1은 자-테스터기의 모습이다.

3. 결과 및 고찰

시중에 판매되고 있는 이온교환수지의 제염성능을 서로 비교하였다. 수지의 가장 중요한 성질 중 하나인 이온교환용량을 비교하였고, 이는 이온교환수지 내의 counter ion에 대한 교환할 수 있는 능력을 정량적으로 나타내는 척도이다. 이온교환용량의 단위는 당량을 사용하며, meq/mL 혹은 meq/g의 단위를 사용하며, 이온교환용량이 높을수록 이온교환수지 양 대비 처리할 수 있는 당량이 높고, 이는 성능이 우수한 이온교환수지라고 할 수 있다[32]. Rohm & Haas, Dow, 삼양사의 이온교환수지를 본문에서 RH사, D사, S사라 하며, 이들의 이온교환용량을 비교하여 방사성 이온에 대한 이온교환수지의 제염성능을 서로 비교할 수 있도록 하였다.

아래의 Figure 2는 3개 회사의 양이온교환수지의 이온교환용량을 비교한 그림이다. RH사, D사, S사의 이온교환수지 세 가지 모두 이온교환수지의 양이 2 g일 때, 이온교환용량이 높은 것을 확인할 수 있으며, 특히 D사 이온교환수지의 이온교환용량이 RH사, S사의 이온교환수지에 비해 월등히 높은 경향을 보였다. 증량을 고려하지 않은 이온교환수지 RH사, D사, S사의 이온교환수지의 방사성 이온에 대한 제거율은 2 g일 때 각각 17.8, 39.9, 24.5%이었으며, 10 g일 때 각각 42.9, 55.2, 47.2%로 측정되었다. 증량을 고려한 각 이온교환수지의 이온교환용량에 대한 결과로는, 이온교환수지의 양이 2 g일 때의 Cs 이온에 대한 RH사, D사, S사의 이온교환수지의 이온교환용량은 0.089, 0.199, 0.123 meq/g이었고, 이온교환수지의 양이 10 g일 때의 이온교환용량은 각각 0.043, 0.055, 0.047 meq/g으로 측정되었다.

아래의 Figure 3은 3개 회사의 음이온교환수지의 I 이온에 대한 이온교환용량을 비교한 그림이며, 이 또한 양이온교환수지의 결과와 마찬가지로 모든 이온교환수지가 저증량일 때, 이온교환용량이 높았다. 증량을 고려하지 않은 RH사, D사, S사의 이온교환수지의 방사성 이온에 대한 제거율은 2 g일 때 각각 25.7, 68.8, 45.9%이었으며, 10 g일 때 각각 93, 99, 93.9%로 측정되었다. 이온교환수지의 양이 2 g일 때,

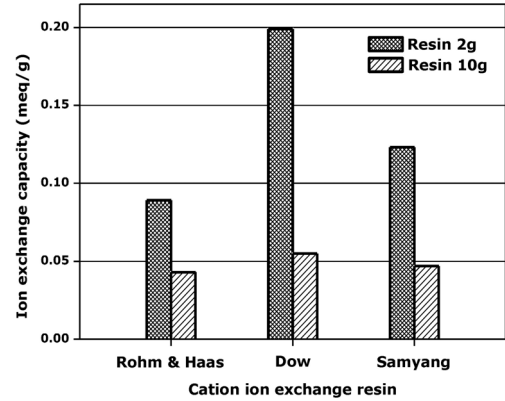


Figure 2. Ion exchange capacity of the cation exchange resin used in this study.

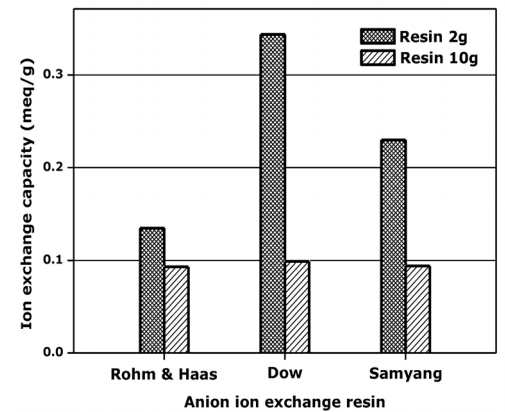


Figure 3. Ion exchange capacity of the anion exchange resin used in this study.

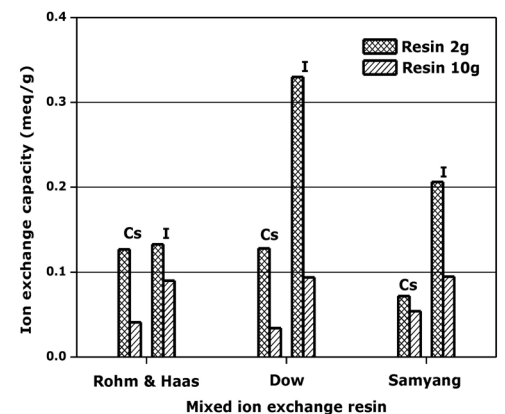


Figure 4. Ion exchange capacity of the mixed exchange resin used in this study.

증량을 고려한 RH사 이온교환수지의 이온교환용량의 경우 0.135 meq/g, D사 이온교환수지의 경우 0.344 meq/g, S사 이온교환수지의 경우 0.23 meq/g의 이온교환용량이 측정되었고, 10 g일 때에는 세 가지 이온교환수지에서 큰 차이를 보이지 않았다. 이때의 RH사, D사, S사 이온교환수지의 이온교환용량은 각각 0.093, 0.099, 0.094 meq/g으로 측정되었다. 동일한 농도의 Cs 용액에 대한 결과보다 I 용액에 대한 결과가 더 좋은 것을 볼 수 있는데, 이는 Cs 이온과 I 이온의 분자

량이 각각 133 g/mol, 126 g/mol로 I 이온의 분자량이 더 작기 때문에 흡착 성능과 밀접한 관련이 있기 때문이라고 사료된다.

위의 Figure 4는 Cs와 I가 모두 포함된 혼합용액을 원수로 하여 실험을 한 결과이다. 동일한 방법으로 실험을 하되, 따로 채수를 하여 각각의 Cs, I 이온농도를 분석하였다. 중량을 고려하지 않은 RH사, D사, S사의 이온교환수지의 Cs 이온에 대한 제거율은 2 g일 때 각각 25.5, 25.6, 14.5%이었으며, 10 g 일 때 각각 41.1, 41.1, 53.9%로 측정되었다. 이온교환수지가 저중량일 때, Cs에 대한 이온교환용량은 RH사의 이온교환수지와 D사의 이온교환수지가 각각 0.127, 0.128 meq/g으로 큰 차이를 보이지 않았지만 S사의 이온교환수지는 0.072 meq/g으로 비교적 낮은 이온교환용량을 나타냈다. 중량을 고려하지 않은 RH사, D사, S사의 이온교환수지의 I 이온에 대한 제거율은 2 g일 때 각각 26.36, 65.9, 41.2%이었으며, 10 g일 때 각각 90.4, 93.8, 94.63%로 측정되었다. 이온교환수지의 양이 2 g일 때, I에 대한 이온교환용량은 RH사, S사, D사의 이온교환수지 순으로 각각 0.133, 0.206, 0.33 meq/g의 이온교환용량 값을 가졌다. 이온교환수지의 양이 고중량일 때는 Cs의 경우, 이온교환수지 D사가 0.034 meq/g으로 다른 이온교환수지에 비해 낮은 이온교환용량을 가졌다. I에 대한 이온교환용량은 RH사의 이온교환수지가 0.09 meq/g, D사의 이온교환수지가 0.094 meq/g, S사의 이온교환수지가 0.095 meq/g으로 세 가지 이온교환수지에서 큰 차이를 보이지 않았다.

공통적으로 이온교환수지 D사의 이온교환수지가 Cs, I 이온에 대한 이온교환능력이 높은 것을 확인할 수 있는데 이는 각 이온교환수지의 제원 값에서 누락되어있는 가교도가 결과 값에 대해 큰 인자로 작용했다고 보여진다. 이온교환수지를 제조할 시에 Divinyl benzene과 공중합하게 되는데, 제조 시에 형성된 미세공의 크기는 가교도가 결정하고, 이는 이온교환수지의 성능과 밀접한 관련이 있기 때문에 곧 이온교환용량과 직결되기 때문이라고 판단된다.

4. 결 론

1) 방사성 이온을 함유한 원수에 적용하기 위해, 시중에 판매되고 있는 3개 회사의 이온교환수지를 사용하여 이들의 이온교환용량 측정을 통해 제염성능을 비교하였다.

2) Styrene-DVB를 matrix로 하지만 이온교환수지의 제원이 모두 다른 양이온교환수지 3종을 이용해 Cs를 포함한 1 mmol의 원수에 대한 이온교환용량을 측정한 결과, 이온교환수지의 양이 많을 때에는 세 가지 이온교환수지의 이온교환용량 차이가 크지 않았으며, 특히 저중량일 때, D사의 이온교환수지가 높은 이온교환용량을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

3) Styrene-DVB를 matrix로 하는 음이온교환수지 3종 역시, 동일한 실험 조건에서 I에 대한 이온교환용량을 측정하였다. 이 역시 앞선 결과와 마찬가지로 고중량일 때에는 세 가지 모델에서 큰 차이가 없었으며, 이온교환수지의 양이 적을 때, D사의 이온교환수지가 다른 이온교환수지에 비해서 큰 이온교환용량을 갖는 결과를 나타내었다.

4) 혼합이온교환수지의 결과, 위와 동일한 조건에서 Cs, I 혼합용액에 대한 이온교환용량을 비교하였다. Cs의 경우, 저중량일 때 RH사와 D사의 이온교환수지에 비해 S사 이온교환수지의 이온교환용량이 낮게 측정되었으며, 고중량일 때엔 세 가지 이온교환수지에서 큰 차이를 보이지 않았다. I의 경우 역시, 고중량일 때, RH사, D사, S사의 이온교환수지의 이온교환용량이 큰 차이가 없었고 특히 저중량일 때, D사의 이온교환수지가 RH사, S사의 이온교환수지에 비해 월등히 높은

이온교환용량 값을 가졌다.

감 사

본 연구는 2015년도 산업통상부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20151510300330).

References

- H. F. Walton and Roy D. Rocklin, Ion exchange in analytical chemistry, *J. Chem. Educ.*, **42**, 111-115 (1990).
- O. Samuelson and Lars O. Wallenius, Anion exchange separations of aldobionic and aldonic acids, *J. Chromatogr. A*, **12**, 236-241 (1963).
- G. J. Millar, S. J. Couperthwaite, M. de Bruyn, and C. W. Leung, Ion exchange treatment of saline solutions using Lanxess S108H strong acid cation resin, *Chem. Eng. J.*, **280**, 525-535 (2015).
- C. S. Lee, The current of ultrapure water system, *Membr. J.*, **6**, 127-140 (1996).
- J. Wang and Zh. Wan, Treatment and disposal of spent radioactive ion-exchange resins produced in the nuclear industry, *Prog. Nucl. Energy*, **78**, 47-55 (2015).
- G. J. Jeong, K. W. Lee, B. S. Kim, S. W. Lee, J. G. Lee, and A. M. Koo, Study on removal of artificial radionuclide (I-131) in water, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**, 747-752 (2014).
- T. A. Todd and V. N. Romanovskiy, A comparison of crystalline silicotitanate and ammonium molybdophosphate-polyacrylonitrile composite sorbent for the separation of cesium from acidic waste, *Radiochemistry*, **47**, 398-402 (2005).
- F. Sebesta and V. Stefura, Composite ion exchanger with ammonium molybdophosphate and its properties, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **140**, 15-21 (1990).
- T. A. Todd, N. R. Mann, T. J. Tranter, F. Sebesta, J. John, and A. Motl, Cesium adsorption from concentrated acidic tank wastes using ammonium molybdophosphate-polyacrylonitrile composite sorbents, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **254**, 47-52 (2002).
- Y. Park, W. S. Shin, and S. J. Choi, Ammonium salt of heteropoly acid immobilized on mesoporous silica (SBA-15): An efficient ion exchanger for cesium ion, *Chem. Eng. J.*, **220**, 204-213 (2013).
- A. M. El-Kamash, Evaluation of zeolite A for the sorptive removal of Cs⁺ and Sr²⁺ ions from aqueous using batch and fixed bed column operations, *J. Hazard. Mater.*, **151**, 432-445 (2008).
- A. Nilchi, R. Saberi, M. Moradi, H. Azizpour, and R. Zarghami, Adsorption of cesium on copper hexacyanoferrate-PAN composite ion exchanger from aqueous solution, *Chem. Eng. J.*, **172**, 572-580 (2011).
- Y. Park, Y. C. Lee, W. S. Shin, and S. J. Choi, Removal of cobalt, strontium and cesium from radioactive laundry wastewater by ammonium molybdophosphate-polyacrylonitrile (AMP-PAN), *Chem. Eng. J.*, **162**, 685-695 (2010).
- T. J. Tranter, R. S. Herbst, T. A. Todd, A. L. Olson, and H. B. Eldredge, Evaluation of ammonium molybdophosphate-polyacrylonitrile (AMP-PAN) as a cesium selective sorbent for the removal of ¹³⁷Cs from acidic nuclear waste solutions, *Adv. Environ. Res.*, **6**, 107-121 (2002).
- A. V. Panov, R. M. Alexakhin, P. V. Prudnikov, A. A. Novikov, and A. A. Muzalevskaia, Influence of protective activity on ¹³⁷Cs

- accumulation by farming plants from soil after Chernobyl accident, *Pedology J.*, **4**, 484-497 (2009).
16. A. A. Odintsov, A. D. Sazhenyuk, and V. A. Satsyuk, Association of ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{240}Pu , ^{241}Am , and ^{244}Cm with soil absorbing complex in soils typical of the vicinity of the Chernobyl NPP, *Radiochem.*, **46**, 95-101 (2005).
 17. I. G. Teplyakov, G. N. Romanov, and D. A. Spirin, Returning of lands in East-Ural radioactive trace to farming use, *Radiat. Saf. Quest.*, **3**, 33-41 (1997).
 18. H. Kato, Y. Onda, and M. Teramage, Depth distribution of ^{137}Cs , ^{134}Cs , and ^{131}I in soil profile after Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, *J. Environ. Radioact.*, **111**, 59-64 (2012).
 19. M. Nakano and R. N. Yong, Overview of rehabilitation schemes for farmlands contaminated with radioactive cesium released from Fukushima power plant, *Eng. Geol.*, **155**, 87-93 (2013).
 20. S. Samatya, N. Kabay, U. Yuksel, M. Arda, and M. Yusel, Removal of nitrate from aqueous solution by nitrate selective ion exchange resins, *React. Funct. Polym.*, **66**, 1206-1214 (2006).
 21. F. Helfferilch, *Ion Exchange*, Chaps. 1, 4, 5, 6, McGraw-Hill Book Company Inc., NY, USA (1990).
 22. I. M. Abrams and J. R. Millar, A history of the origin and development of macroporous ion-exchange resins, *Funct. Polym.*, **35**, 7-22 (1997).
 23. C. W. Han, G. In, J. M. Choi, S. T. Kim, and Y. S. Kim, Preconcentration and determination of trace cobalt and nickel by the adsorption of Metal-PDC complexes on the Anion-exchange resin suspension, *Anal. Sci. Technol.*, **13**, 608-661 (2000).
 24. N. Imchuen, Y. Lubphoo, J. M. Chyan, S. Padungthon, and C. H. Liao, Using cation exchange resin for ammonium removal as part of sequential process for nitrate reduction by nanoiron, *Sustain. Environ. Res.*, **26**, 156-160 (2016).
 25. G. J. Millar, A. Schor, S. J. Couperthwaite, A. Shilling, K. Nuttall, and M. de Bruyn, Equilibrium and column studies of iron exchange with strong acid cation resin, *J. Environ. Chem. Eng.*, **3**, 373-385 (2015).
 26. G. J. Millar, S. Papworth, and S. J. Couperthwaite, Exploration of the fundamental equilibrium behaviour of calcium exchange with weak acid cation resins, *Desalination*, **351**, 27-36 (2014).
 27. D. S. Stefan and I. Meghea, Mechanism of simultaneous removal of Ca^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} and Al^{3+} ions from aqueous solutions using Purolite[®] S930 ion exchange resin, *C. R. Chim.*, **17**, 496-502 (2014).
 28. A. Zaggia, L. Conte, L. Falletti, M. Fant, and A. Chiorboli, Use of strong anion exchange resins for the removal of per-fluoroalkylated substances from contaminated drinking water in batch and continuous pilot plants, *Water Res.*, **91**, 137-146 (2016).
 29. Z. Zhu, M. Zhang, F. Liu, C. Shuang, C. Zhu, Y. Zhang, and A. Li, Effect of polymeric matrix on the adsorption of reactive dye by anion-exchange resins, *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, **62**, 98-103 (2016).
 30. H. Tavakoli, H. Sepefrian, F. Semnani, and M. Samadfam, Recovery of uranium from UCF liquid waste by anion exchange resin CG-400: Breakthrough curves, elution behavior and modeling studies, *Ann. Nucl. Energy*, **54**, 149-153 (2013).
 31. C. Long, J. D. Lu, A. Li, D. Hu, F. Liu, and Q. Zhang, Adsorption of naphthalene onto the carbon adsorbent from waste ion exchange resin: Equilibrium and kinetic characteristics, *J. Hazard Mater.*, **150**, 656-661 (2008).
 32. E. W. Berg, *Physical and Chemical Methods of Separation*, Chaps. 10, 11, McGraw-Hill Book Company, Inc., NY, USA (1963).