Journal of Environmental Science International
24(5); 671~678; May 2015

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2015.24.5.671

ORIGINAL ARTICLE

Polysulfone으로 제올라이트를 고정화한 새로운 PS-zeolite 비드에 의한 Sr 이온 및 Cs 이온의 흡착 특성

이창한 · 박정민[1)] · 감상규[2)] · 이민규[1)*]

부산가톨릭대학교 환경행정학과, [1)]부경대학교 화학공학과, [2)]제주대학교 환경공학과

Adsorption Characteristics of Sr ion and Cs ion by a Novel PS-zeolite Adsorbent Immobilized Zeolite with Polysulfone

Chang-Han Lee, Jeong-Min Park[1)], Sang-Kyu Kam[2)], Min-Gyu Lee[1)*]

Department of Environmental Adminstration, Catholic University of Pusan, Busan 609-757, Korea
[1)]Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
[2)]Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Abstract

The adsorption characteristics of Sr and Cs ions were investigated by using PS-zeolite beads prepared by immobilizing zeolite with polysulfone (PS). The adsorption kinetics of Sr and Cs ions by PS-zeolite beads was described well by the pseudo-second-order model. The maximum adsorption capacities of Sr and Cs ions calculated from Langmuir isotherm model were 65.0 mg/g and 76.4 mg/g, respectively. In the binary system of Sr ion and Cs ion, the adsorption capacities of each ion decreased with increasing mole ratio of mixed counterpart ion, and Cs ion showed the higher hinderance than Sr ion. We found that thermodynamic properties of Sr and Cs ions on absorption reaction were spontaneous and endothermic at 293 to 323 K.

Key words : Adsorption, Zeolite, Strontium, Cesium, Polysulfone

1. 서 론

최근에 발생한 일본의 원전 사고로 인해 액체 폐기물의 처리에 대한 관심이 증가하고 있으며, 방사능 폐기물에 포함된 오염물질 중 Sr 이온과 Cs 이온은 다른 방사능 오염 물질들에 비해 물에 대한 용해도가 높고 반감기가 긴 특징 때문에 생태계에 쉽게 유입되어 심각한 문제를 야기하고 있다(Bortun 등, 1997).

Sr 이온과 Cs 이온과 같은 방사능 물질을 제거하기 위해서 흡착법이 널리 사용되고 있다. 흡착법에 사용되는 흡착제 중에서 특히 제올라이트는 Sr 이온과 Cs 이온에 대한 우수한 흡착능을 가질 뿐만 아니라 열적/기계적으로 안정하고 방사능 저항이 높은 장점을 가지고 있기 때문에 제올라이트를 이용하여 수중의 방사능 물질을 제거하는 연구가 많이 되고 있다(El-Kamash, 2008; Lee 등, 2014). 그러나 제올라이트와 같은 흡착제는 일반적으로 미세한 분말의 형태로 사용되기 때문에 흡착이 끝난 후 분리와 회수가 어렵고, 컬럼에 충전하여 사용할 경우에

Received 27 January, 2015; **Revised** 30 March, 2015; **Accepted** 30 March, 2015
***Corresponding author** : Min-Gyu Lee, Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
Phone: +82-51-629-6435
E-mail: mglee@pknu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. 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.

는 압력강하를 일으키는 단점이 있다.

최근에는 수중에 존재하는 Sr 이온과 Cs 이온을 제거하기 위하여 다양한 흡착제를 고분자에 고정화하여 사용하는 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다. Park 등(2010)은 ammonium molybdophosphate를 고분자 물질 polyacrylonitrile(PAN)에 고정화하여 Sr 이온과 Cs 이온을 제거하는 연구를 하였으며, Nilchi 등(2011)은 copper hexacyanoferrate를 PAN에 고정화하여 Cs 이온을 제거하는 연구를 하였고, Valsala 등(2010)은 MnO_2를 poly methylmethacrylate(PMMA)에 고정화하여 Sr 이온을 제거하는 연구를 하였다. 또한, Faghihian 등(2013)은 제올라이트 A를 PAN에 고정화하여 Sr 이온과 Cs 이온을 제거하는 연구를 하였으며, 본 연구자들도 방사성 이온 제거를 위하여 선행연구(Lee 등, 2015)에서 제올라이트를 고분자 물질인 polysulfone에 고정화하여 PS-zeolite 비드를 제조하였다. 제조한 PS-zeolite 비드는 열적 안정성이 우수하였으며, 반복 사용시에도 비드가 손상되거나 제올라이트가 유출되지 않았고, Na^+, K^+, Mg^{2+} 및 Ca^{2+} 이온 등이 공존하는 경우에도 Sr 이온과 Cs 이온에 대한 높은 선택성을 보였다.

따라서 본 연구에서는 선행연구(Lee 등, 2015)에서 제조한 PS-zeolite 비드를 이용하여 수중의 Sr 이온과 Cs 이온에 대한 흡착 특성을 알아보고자 하였다. 회분식 실험을 통해 흡착속도를 평가하였고, Sr 이온과 Cs 이온이 공존시에 상호간의 영향을 알아보기 위하여 Sr 이온과 Cs 이온의 혼합비를 달리한 경우의 흡착량을 비교하였다. 또한 온도 변화에 따른 흡착특성과 열역학적 특성을 평가하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1. 재료

Polysulfone(PS)과 제올라이트(Molecule sievers 4 Å: Cat. No. 688363, -325 mesh)는 Sigma-Aldrich에서 구입하여 사용하였으며, 용매는 1-methyl-2-pyrrolidone (NMP, Samchun, EP)를 사용하였다. Sr 이온과 Cs 이온 용액은 $Sr(NO_3)_2$ (Samchun, EP)와 CsCl(Samchun, EP)를 초순수(Milli-Q Millipore 18.2 Mcm^{-1} conduc-tivity)에 녹여 1,000 mg/L의 stock solution을 제조하여 사용하였다.

2.2. 흡착제의 합성

PS-zeolite 비드의 제조는 선행연구(Lee 등, 2015)와 동일한 방법으로 수행하였다. NMP 10 mL에 PS 1.25 g를 용해시킨 후 용해된 PS 용액에 합성한 제올라이트 분말 2.0 g을 추가로 넣고 균일한 슬러리가 되도록 충분히 혼합하였다. 제올라이트와 PS가 혼합된 슬러리를 직경 1 mm인 주사기를 이용하여 증류수에 떨어뜨려 PS-zeolite 비드를 합성하였으며, 이를 증류수로 수차례 세척한 후 실험에 사용하였다.

2.3. 실험 방법

회분식 실험은 500 mL 삼각플라스크에 일정 농도의 금속 이온 용액 200 mL와 PS-zeolite 2 g을 넣은 후 수평진탕기(Johnsam, JS-FS-2500)를 사용하여 180 rpm으로 교반하면서 일정시간 간격마다 1 mL의 시료를 채취하였으며, 원심분리기(Eppendorf, centrifuge 5415c)로 10,000 rpm에서 5 min동안 원심 분리한 후 상등액을 채취하여 원자흡수분광광도계(Shimadzu. AA-7000)로 분석하였다. Sr 이온과 Cs 이온이 공존하는 경우의 흡착 특성을 알아보기 위하여 Sr 이온과 Cs 이온의 몰비를 0, 0.5, 1.0, 2.0으로 변화시켜 실험을 행하였다.

PS-zeolite 비드에 흡착된 금속 이온의 흡착량(q_t)은 다음과 같이 계산하였다.

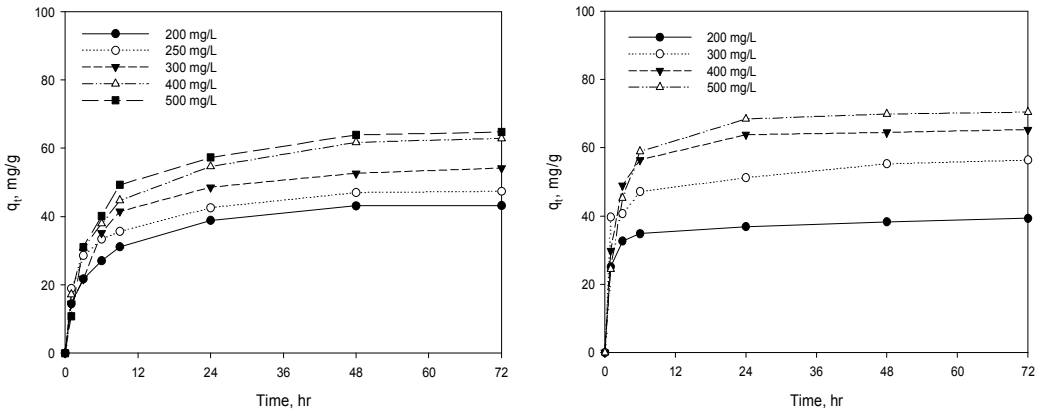
$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (1)$$

여기서 q_t는 시간 t에서 흡착량(mg/g), C_0는 초기 농도(mg/L), C_t는 시간 t에서 용액중의 농도(mg/L), V는 용액의 부피(L), m는 흡착제의 양(g)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 시간에 따른 흡착량 변화

Fig. 1은 Sr와 Cs 이온의 농도를 각각 200~500 mg/L와 100~500 mg/L로 변화시킨 경우 시간에 따른 각 이온의 흡착량 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 보듯이 PS-zeolite 비드에 의한 Sr 이온과 Cs 이온의 흡착은 초기에는 빠르게 증가하다가 시간에 지날수록 서서히 증가하여 72 hr 이후에 모든 농도에서 평형에 도달하였다. 한



(a) Sr (b) Cs

Fig. 1. Effect of contact time for the adsorption capacities of (a) Sr ion and (b) Cs ion by PS-zeolite beads (PS-zeolite = 2 g/0.2 L, temperature =20 ℃).

편, Sr 이온과 Cs 이온의 흡착은 초기 농도가 높아질수록 흡착 구동력인 농도차가 증가하여 흡착량은 증가하였다.

3.2. 속도식

PS-zeolite 비드에 의한 Sr 이온과 Cs 이온의 흡착 실험결과를 유사 1차 속도식과 유사 2차 속도식에 적용하여 검토하였다.

유사 1차 속도식은 다음과 같다(Ho와 McKay, 1999).

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \tag{2}$$

여기서 k_1은 유사 1차 속도상수(1/hr)이다.

또한 유사 2차 속도식은 다음과 같다(Ho와 McKay, 1999).

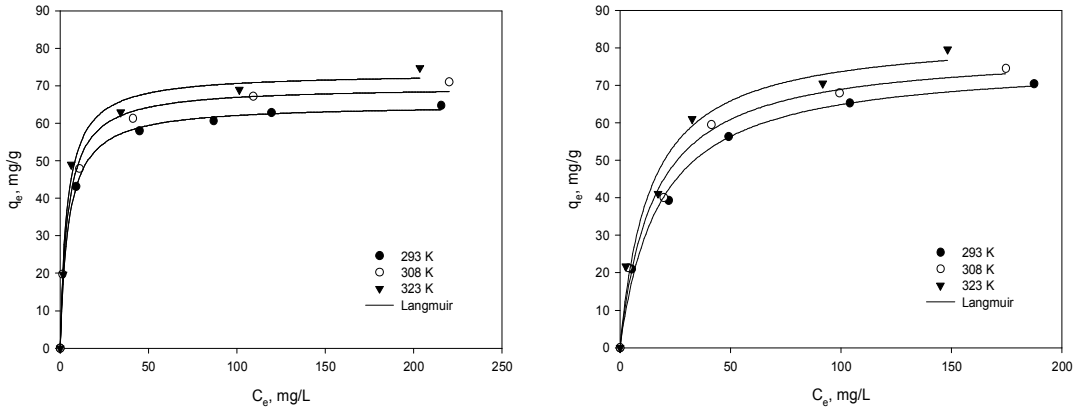
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \tag{3}$$

여기서 k_2는 유사 2차 속도상수(g/mg·hr)이다.

Table 1은 Fig. 1의 실험값을 식 (2)와 (3)에 적용하여 구한 매개변수 값들을 나타낸 것이다. Table 1에서 보듯이 PS-zeolite 비드에 의한 Sr 이온과 Cs 이온의 흡착 실

Table 1. Kinetic data calculated for the adsorption of Sr ion and Cs ion by PS-zeolite beads

Ions	C_0	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
		k_1 (1/hr)	q_e (mg/g)	r^2	k_2 (g/mg· hr)	q_e (mg/g)	r^2
Sr	200	0.1401	42.15	0.9577	0.0065	45.39	0.9991
	300	0.0904	45.01	0.9771	0.0046	67.69	0.9996
	400	0.0767	45.99	0.9806	0.0039	66.18	0.9992
	500	0.0841	48.38	0.9749	0.0034	68.89	0.9994
Cs	100	0.0533	5.28	0.5965	0.0720	20.98	0.9996
	200	0.0587	13.10	0.7445	0.0278	39.48	0.9996
	300	0.0665	25.06	0.8970	0.0119	57.12	0.9992
	400	0.0843	27.16	0.8422	0.0139	66.22	1.0000
	500	0.0955	37.24	0.9212	0.0085	72.15	0.9999



(a) Sr (b) Cs

Fig. 2. Isotherm plots for the adsorption of (a) Sr ion and (b) Cs ion by PS-zeolite beads at different temperatures.

험결과를 유사 1차 속도식에 적용한 경우에 결정계수(r^2)는 각각 0.9577~0.9806 및 0.5965~0.9212이고, 유사 2차 속도식에 적용한 경우에 r^2는 각각 0.9991~0.9996 및 0.9992~1.0000로 유사 1차 속도식보다는 2차 속도식에 잘 만족하였다.

3.3. 온도의 영향

용액의 온도를 293 K, 308 K 및 323 K로 변화시켜 PS-zeolite 비드에 의한 Sr 이온과 Cs 이온의 등온 흡착 실험을 수행하였으며, 얻어진 결과를 다음의 Langmuir 등온식에 적용하여 검토하였다.

$$q_e = \frac{k_L q_m C_e}{1 + k_L C_e} \tag{4}$$

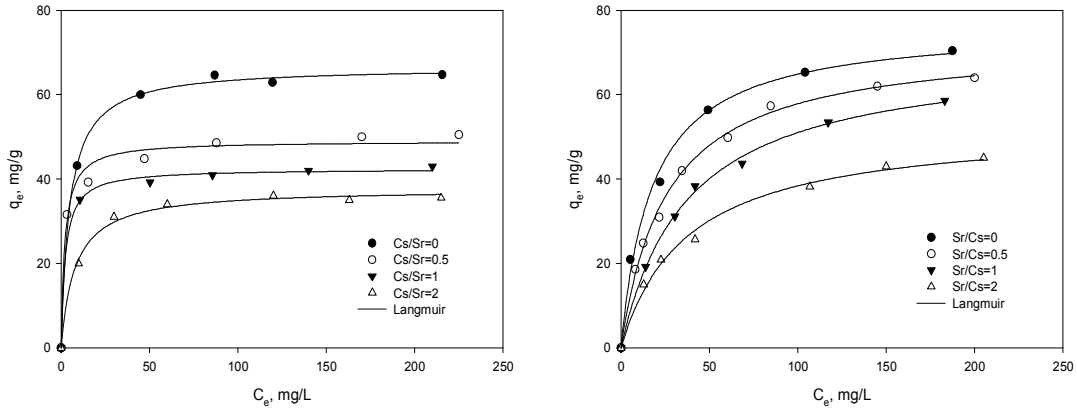
여기서 q_m은 최대 흡착량(mg/g), k_L는 Langmuir 상수(L/mg)이다.

Fig. 2는 온도를 293 K, 308 K 및 323 K로 달리한 경우에 PS-zeolite 비드에 의한 Sr 이온과 Cs 이온의 흡착 등온 실험결과를 나타낸 것이며, 이로부터 구한 Langmuir 매개변수 값들은 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 보듯이 용액의 온도가 293 K, 308 K 및 323 K로 증가할수록 Sr 이온의 최대 흡착량(q_m)은 65.0 mg/g, 69.8 mg/g 및 73.4 mg/g, 그리고 Cs 이온의 q_m은 76.4 mg/g, 79.4 mg/g 및 83.6 mg/g으로 증가하였다. 이러한 결과는 Yadav 등(2013)이 제시한 결과와 유사하게 용액의 온도가 증가할수록 수중 이온들의 유동성 증가에 의한 물질 전달과 흡착 및 이온교환에 필요한 활성화 에너지가 증가하여 흡착량이 증가한 것으로 판단된다.

또한, 같은 온도에서 Cs 이온의 흡착량이 Sr 이온보다 높은 결과를 보였는데, 이는 Sr과 Cs 이온의 이온반지름이 각각 1.13 Å 및 1.67 Å으로 Sr 이온이 Cs 이온의 반

Table 2. Langmuir isotherm parameters for the adsorption of Sr ion and Cs ion by PS-zeolite beads

Ion	Temperature (K)	k_L (L/mg)	q_m (mg/g)	r^2
Sr	293	0.2128	65.0	0.9989
	308	0.2327	69.8	0.9995
	323	0.2531	73.4	0.9988
Cs	293	0.0561	76.4	0.9988
	308	0.0656	79.4	0.9971
	323	0.0740	83.6	0.9934



(a) Sr (b) Cs

Fig. 3. Binary component isotherm for the adsorption of (a) Sr ion and (b) Cs ion by PS-zeolite beads (PS-zeolite = 0.1 g/0.2 L, temperature = 20 ℃).

지름 보다 더 작아 4 Å의 기공을 가지는 제올라이트에 기공에 근접하는 Cs 이온의 흡착량이 Sr 이온의 흡착량 보다 더 큰 것으로 판단된다. 이 결과는 Liu 등(2014)이 제시한 흡착제(bentonite형 Spanish clay)상에서 이온반경이 상대적으로 작은 Ca(0.99 Å)와 Na(1.02 Å) 이온에 비해 이온반경이 큰 Cs(1.67 Å) 이온이 흡착량이 높다고 결과와 유사한 경향이었다.

3.4. Sr 이온과 Cs 이온의 혼합비에 따른 영향

Sr 이온과 Cs 이온의 혼합비를 달리한 경우에 각 이온에 미치는 상호간의 영향을 알아보기 위하여 Sr 이온과 Cs 이온의 혼합비율을 각각 0(단일성분), 0.5, 1.0, 2.0의 몰비로 달리한 경우에 대해 흡착등온실험을 수행하였으며, 이로부터 얻은 결과를 Fig. 3에 나타내었으며 식 (4)에 적용하여 구한 매개변수 값들은 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보듯이 혼합된 각 이온의 비율이 0(단일성분), 0.5, 1.0 및 2.0으로 증가함에 따라 Sr 이온은 흡착량이 65 mg/g(단일성분), 49 mg/g, 42.4 mg/g, 37.7 mg/g, Cs 이온의 흡착량은 76.4 mg/g (단일성분), 72.8 mg/g, 70.1 mg/g, 52.7 mg/g로 감소하였다. 따라서 Sr 이온과 Cs 이온이 혼합된 이성분계에서 대상이온에 대해 경쟁이온이 미치는 영향을 알아보기 위하여 단일 성분계에서의 흡착량($q_{e,single}$)과 이성분계에서의 흡착량($q_{e,binary}$)의 비를 Fig. 4에 나타내었다. 이 때 얻어진 $q_{e,binary}/q_{e,single}$ 값이 0~1인 경우에는 경쟁이온에 의해 방해를 받으며, 1인 경우에는 경쟁이온에 아무런 영향을 받지 않

Table 3. Isotherm parameters for the adsorption of Sr ion and Cs ion by PS-zeolite beads

Ion	Ratio	k_L (L/mg)	q_m (mg/g)	r^2
Sr	Cs/Sr=0	0.2128	65.0	0.9989
	Cs/Sr=0.5	0.4692	49.0	0.9960
	Cs/Sr=1.0	0.4282	42.4	0.9999
	Cs/Sr=2.0	0.1259	37.7	0.9953
Cs	Sr/Cs=0	0.0561	76.4	0.9988
	Sr/Cs=0.5	0.0386	72.8	0.9970
	Sr/Cs=1.0	0.0266	70.1	0.9981
	Sr/Cs=2.0	0.0267	52.7	0.9942

고, 1보다 큰 경우에는 흡착이 촉진되는 것을 의미한다. Fig. 4에서 보듯이 이성분 혼합계의 경우에 Sr 이온과 Cs 이온의 $q_{e,binary}/q_{e,single}$ 값은 각각 0.58~0.75 및 0.69~0.95로 Sr 이온과 Cs 이온이 혼합된 용액에서 Sr 이온과 Cs 이온 모두 흡착에 방해를 받지만 Sr 이온의 경우가 Cs 이온에 비해 상대적으로 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. Clinoptilolite를 이용한 금속이온 흡착시 각 이온에 대한 선택도가 $Cs^{+}>NH_4^{+}>Pb^{2+}>Na^{+}>Sr^{2+}>Cd^{2+}>Zn^{2+}\approx Cu^{2+}$로 나타난다는 Caputo와 Pepe(2007)의 결과와 유사하게 PS-zeolite는 낮은 음성도를 가지는 1가 이온에 대한 선택도가 높아 Cs 이온이 상대이온이 Sr 이온에 영향을 덜 받는 것으로 판단되었다.

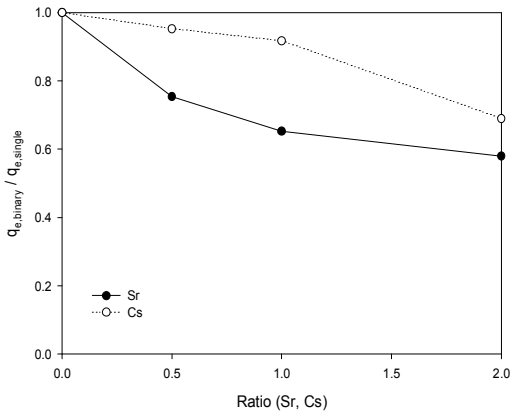


Fig. 4. Comparison of $q_{e,binary}/q_{e,single}$ of mixed components.

3.5. 열역학적 해석

일반적으로 열역학적 파라미터인 엔탈피($\triangle H$)와 엔트로피($\triangle S$)는 다음과 같은 관계를 갖는다(Sekar 등, 2004).

$$\ln k_L = \frac{\triangle S}{R} - \frac{\triangle H}{RT} \quad (5)$$

여기서 k_L는 Langmuir 상수(L/mg), T는 절대 온도(K), R은 이상기체 상수(J/mol·K)이다.

그리고 Gibbs 자유에너지($\triangle G$)는 다음과 같다.

$$\triangle G = \triangle H - T\triangle S \quad (6)$$

Fig. 5는 각 온도에서 구해진 Langmuir 상수를 식 (7)에 적용하여 $\ln k_L$과 1/T를 도시한 그래프를 나타낸 것이고, 이 그래프와 식 (6)으로부터 구한 ΔG, ΔH 및 ΔS를 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 보듯이 Sr 이온의 경우에 ΔH는 4.55 kJ/mol, ΔS는 39.84 J/mol·K, ΔG는 -7.13 kJ/mol, -7.72 kJ/mol 및 -8.32 kJ/mol이고, Cs 이온의 경우에 ΔH는 7.27 kJ/mol, ΔS 값은 41.55 J/mol·K, ΔG는 -4.90 kJ/mol, -5.53 kJ/mol, -6.15 kJ/mol 이었다. 따라서 본 연구에서 제조한 PS-zeolite 비드에 의한 Sr 이온과 Cs 이온의 흡착과정은 ΔH가 양의 값을 가지므로 흡착 과정이 흡열반응이고, ΔG가 음을 값을 가지므로 흡착이 자발적인 과정임을 알 수 있었다. Nibou 등(2010)과 Lee와 Matthew(2013)도 Na-A와 Na-X 제올

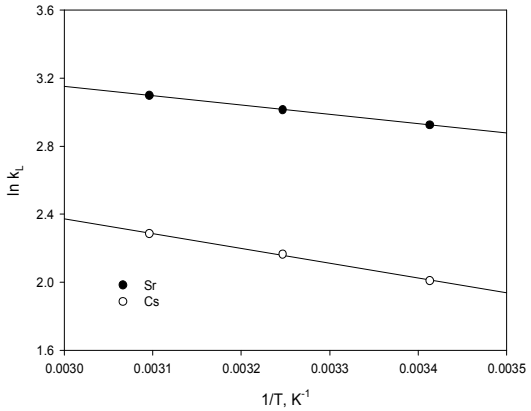


Fig. 5. Plot of ln k^L vs. 1/T.

Table 4. Thermodynamic parameters for the adsorption of Sr ion and Cs ion by PS-zeolite beads

Ion	$\triangle H$ (kJ/mol)	$\triangle S$ (J/mol·K)	$\triangle G$(kJ/mol)		
			293 K	308 K	323 K
Sr	4.55	39.84	-7.13	-7.72	-8.32
Cs	7.27	41.55	-4.90	-5.53	-6.15

라이트를 이용한 Zn 이온의 흡착 과정의 열역학적 특성 평가에서 ΔG는 음의 값을 가지며 흡착이 자발적인 과정이며, 석탄계 비산재로 합성한 Na-A 제올라이트의 Cu와 Zn의 흡착결과에서도 ΔG은 음의 값을 가지는 자발적인 과정이라고 보고하였다. 또한, Malamis와 Katsou (2013)는 천연 및 합성 제올라이트 상에 Ni과 Zn 이온의 흡착시 온도의 증가에 따라 ΔG는 음의 값이 커지는 방향으로 변화하며, 자발성(spontaneity)도 증가하다는 결과와 일치하였다.

4. 결론

본 연구에서는 분말 제올라이트를 polysulfone(PS)에 고정화한 PS-zeolite 비드를 이용하여 수중의 Sr 이온과 Cs 이온의 실험을 수행하였다. PS-zeolite 비드에 의한 Sr 이온과 Cs 이온의 흡착 결과는 유사 2차 속도식과 Langmuir 등온식에 잘 부합하였다. Langmuir 등온식으로 계산된 Sr 이온의 최대 흡착량은 65.0 mg/g, Cs 이온의 최대 흡착량은 76.4 mg/g이었다. 또한 PS-zeolite 비드에 의한 Sr 이온과 Cs 이온의 흡착과정에서 △H는 각각 4.55 kJ/mol 및 7.27 kJ/mol이고, △G는 각각 -7.13~-8.32 kJ/mol 및 -4.90~-6.15 kJ/mol으로, 흡착과정이 흡열반응이고, 자발적으로 일어나는 것을 알 수 있었다. Sr 이온에 첨가되는 Cs 이온의 혼합비가 0에서 2.0으로 증가할수록 Sr 이온의 흡착량은 65.0 mg/g에서 37.7 mg/g으로 감소하였으며, Cs 이온에 첨가되는 Sr 이온의 혼합비에서도 0에서 2.0으로 증가할수록 Cs 이온의 흡착량은 76.4 mg/g에서 52.7 mg/g으로 감소하였다. Sr 이온과 Cs 이온이 혼합된 이성분계에서 상대이온에 의한 저해 영향은 Sr 이온이 Cs 이온에 비해 상대적으로 더 많이 받는 것으로 나타났다.

REFERENCE

Bortun, A. I., Bortun, L. N., Clearfield, A., 1997, Evaluation of synthetic inorganic ion exchangers for cesium and strontium removal from contaminated groundwater and wastewater, Solvent Extr. Ion Exch., 15(5), 909-929.

Caputo, D., Pepe, F., 2007, Experiments and data processing of ion exchange equilibria involving Italian natural zeolites: a review, Micro. Meso. Mater., 105(3), 222-231.

El-Kamash, A. M., 2008, Evaluation of zeolite A for the sorptive removal of Cs^{+} and Sr^{2+} ions from aqueous solutions using batch and fixed bed column operations, J. Hazard. Mater., 151(2), 432-445.

Faghihian, H., Iravani, M., Moayed, M., Ghannadi-Maragheh, M., 2013, Preparation of a novel PAN–zeolite nanocomposite for removal of Cs^{+} and Sr^{2+} from aqueous solutions: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies, Chem. Eng. J., 222, 41-48.

Ho, Y. S., McKay, G., 1999, Psuedo-second order model for sorption processes, Process Biochem., 34, 451-465.

Lee, C. H., Matthew, S. A., 2013, Kinetics and thermo-dynamic properties related to the adsorption of copper and zinc onto zeolite synthesized from coal fly ash, J. Environ. Sci. Int., 22(10), 1327-1335.

Lee, C. H., Park, J. M., Lee, M. G., 2014, Adsorption characteristics of Sr(II) and Cs(I) ions by zeolite synthesized from coal fly ash, J. Environ. Sci. Int., 23(12), 1987-1998.

Lee, C. H., Park, J. M., Lee, M. G., 2015, Preparation of a novel PS-zeolite adsorbent by immobilizing zeolite with polysulfone for radioactive ions, J. Korean Society Environ. Eng., Submitted.

Liu, X., Chen, G. R., Lee, D. J., Kawamoto, T., Tanaka, H., Chen, M. L., Luo, Y. K., 2014, Adsorption removal of cesium from drinking waters: A mini review on use of biosorbents and other adsorbents, Biores. Tech., 160, 142-149.

Malamis, S., Katsou, E., 2013, A review on zinc and nickel adsorption on natural and modified zeolite, bentonite and vermiculite: Examination of process parameters, kinetics and isotherms, J. Hazard. Mater. 252–253(15) 428-461.

Nibou, D., Mekatel, H., Amokrane, S., Barkat, M., Trari, M., 2010, Adsorption of Zn^{2+} ions onto NaA and NaX zeolites : Kinetic, equilibrium and thermo-dynamic studies, J. Hazard. Mat., 173(1-3), 637-646.

Nilchi, A., Saberi, R., Moradi, M., Azizpour, H., Zarghami, R., 2011, Adsorption of cesium on copper hexacyanoferrate–PAN composite ion exchanger

from aqueous solution, Chem. Eng. J., 172(1), 572-580.

Park, Y., Lee, Y. C., Shin, W. S., Choi, S. J., 2010, Removal of cobalt, strontium and cesium from radioactive laundry wastewater by ammonium molybdophosphate – polyacrylonitrile (AMP – PAN), Chem. Eng. J., 162(2), 685-695.

Sekar, M., Sakthi, V., Rengaraj, S., 2004, Kinetics and equilibrium adsorption study of lead (II) onto activated carbon prepared from coconut shell, Journal of colloid and interface science, 279(2), 307-313.

Valsala, T. P., Joseph, A., Sonar, N. L., Sonavane, M. S., Shah, J. G., Raj, K., Venugopal, V., 2010, Separation of strontium from low level radioactive waste solutions using hydrous manganese dioxide composite materials, J. Nucl. Mater., 404(2), 138-143.

Yadav, K. K., Singh, D. K., Anitha, M., Varshney, L., Singh, H., 2013, Studies on separation of rare earths from aqueous media by polyethersulfone beads containing D2EHPA as extractant, Sep. Purif. Technol., 118, 350-358.