

ORIGINAL ARTICLE

고체상 추출제로서 Polyvinyl Chloride에 D2EHPA를 고정화한 PVC-D2EHPA의 제조와 Cu(II) 제거 특성

감상규¹⁾ · 유해나 · 이동환²⁾ · 이민규*

부경대학교 화학공학과, ¹⁾제주대학교 환경공학과, 동의대학교 화학과

Preparation of PVC-D2EHPA beads by Immobilization of D2EHPA on Polyvinyl Chloride as Solid Phase Extractant and Removal Characteristics of Cu(II)

Sang-Kyu Kam¹⁾, Hae-Na You, Dong-Hwan Lee²⁾, Min-Gyu Lee*

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

²⁾Department of Chemistry, Dong Eui University, Busan 614-714, Korea

Abstract

The solid phase extractant (PVC-D2EHPA bead) was prepared by immobilizing di-2-ethylhexyl-phosphoric acid (D2EHPA) with polyvinyl chloride (PVC). The prepared PVC-D2EHPA beads were characterized by using fourier transform infrared spectrometer (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM). The removal experiments of Cu(II) by PVC-D2EHPA beads conducted batchwise. The removal kinetics of Cu(II) was found to follow the pseudo-second-order model. The equilibrium data fitted well with Langmuir isotherm model and the maximum removal capacity was 2.6 mg/g at 20°C. The optimum pH region was in the range of 3.5 to 6. and the standard free energy (ΔG°) was between -4.67 ~ -4.98 kJ/mol, indicating the spontaneous nature of Cu(II) removal by PVC-D2EHPA beads.

Key words : Di-2-ethylhexyl-phosphoric acid, Polyvinyl chloride, Solid phase extraction, Copper ion

1. 서론

산업의 발달과 인구증가로 인하여 발생되어 배출되는 유해 물질의 종류와 양이 크게 증가하고 있다. 국내의 경우 중금속 및 유해물질을 함유한 특정 폐수는 하루에 약 200만 톤 이상이 배출되고 있으며, Cu(II)와 같은 중금속이 하천에 유입되어 상수원 오염은 물론 인근 지하수

및 토양을 오염시킬 뿐 아니라 생태계에 미생물의 증식 및 대사 활동에 큰 영향을 미친다(Jung 등, 2011).

Cu(II)와 같은 중금속이온을 제거하기 위해서 이온교환, 흡착, 액-액 추출공정 등이 사용되고 있다. 이 중에서 액-액 추출공정은 금속이온에 대한 선택성이 높고 제거 능력이 우수하지만 많은 양의 유기용매를 필요하며, 용해도 때문에 액상으로 유기용매가 손실될 수 있다는 단점

Received 16 April, 2014; Revised 20 May, 2014;

Accepted 28 May, 2014

*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.

을 가지고 있다(Yang 등, 2005).

이런 단점을 보완하기 위해 지지액막(Alguacil 등, 2008), 이온교환수지(Trochimczuk 등, 2004), 탄소나노튜브(Vellaichamy 등, 2011) 등과 같은 다공성 물질에 추출제를 함침시켜 사용하는 연구가 많이 되고 있다. 그러나 다공성 물질에 추출제를 함침시켜 사용하는 경우에는 막이나 수지로부터 추출제가 유출되기 때문에 짧은 수명을 가지는 것으로 알려져 있다(Kabay 등 2010; Ozcan 등, 2010). 최근에는 추출제를 고분자 물질로 캡슐화하여 금속이온을 회수하거나 제거하는 연구가 많이 되고 있다(Yadav 등, 2013; Yang 등, 2004). 추출제를 캡슐화하여 사용하는 경우에는 추출제가 얇은 캡슐벽에 의해 주위로부터 격리되어 캡슐내부에 존재하기 때문에 추출제를 함침하여 사용하는 경우보다 용액의 접촉이 용이하고, 상의 분리 및 추출제의 손실을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 적은 양의 유기 용매를 사용할 수 있어 공정을 간편하게 설계 할 수 있는 장점을 가지고 있다(Yang 등, 2005).

추출제중 하나인 di-2-ethylhexyl-phosphoric acid (D2EHPA)는 금속이온을 추출하거나 분리하는데 많이 사용되고 있다(Vellaichamy 등, 2011). Yang 등(2004)은 polysulfone을 이용하여 D2EHPA를 캡슐화하여 수중의 Cu(II)를 제거하는 연구를 하였고, Yadav 등(2013)은 polyethersulfone로 D2EHPA를 캡슐화하여 La(III), Sm(III), Y(III)를 제거하는 연구를 행하였다. 또한 Feklistov 등(2004)은 gelatin 등을 이용하여 D2EHPA를 캡슐화하여 Fe(III)를 제거하는 연구를 하였다. 이와 같이 많은 연구자들에 의해 다양한 고분자 물질을 사용하여 D2EHPA를 캡슐화하여 금속이온을 제거하는 연구가 이루어지고 있다.

고분자 물질인 polyvinyl chloride(PVC)는 높은 기계적 강도와 저렴한 가격, 산·알칼리, 그리고 용매에 대하여 내구성이 높은 물질로 알려져 있으며, 투과 플럭스가 높은 것으로 알려져 있다(Xu 등, 2002). 이에 따라 최근 Kolev 등(2009)과 Gherasim 등(2011)은 PVC를 사용하여 D2EHPA를 고정화하여 만든 멤브레인을 사용하여 각각 Zn(II)과 Pb(II)을 제거하는 연구를 수행하였다. 하지만 추출제를 멤브레인에 고정화하여 사용하는 경우에는 복잡한 공정설계가 요구되며, 공정을 대규모로 하는 경우에는 파울링 현상과 유지비용이 비싸다는 단점을 가

지고 있다(Kentish와 Stevens, 2001).

따라서 가격이 저렴하고 투과 플럭스가 높은 PVC를 이용하여 추출제를 캡슐화하면 간편한 공정설계와 추출제의 손실의 단점을 보완할 수 있을 것으로 기대되어 본 연구에서는 PVC를 사용하여 추출제인 D2EHPA를 캡슐화한 고체상 추출제를 제조하였다. SEM과 FTIR을 사용하여 제조한 고체상 추출제인 PVC-D2EHPA 비드의 특성분석을 하였으며, PVC-D2EHPA 비드의 Cu(II) 제거특성을 검토하기 위하여 속도해석, 등온식, 온도의 영향, pH의 따른 영향 등을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 재료

Poly vinyl chloride(PVC)는 국내 H사의 KCM-12를 사용하였으며, 추출제로는 D2EHPA(DP-8R, IS Chem. Co)을 사용하였고, 용매로는 N-Methyl-2-pyrrolidone(NMP, Samchun, EP)를 사용하였다. 구리 이온 용액은 CuSO₄·5H₂O(Junsei, EP)을 사용하여 1000 mg/L stock solution을 제조한 후 이를 희석하여 사용하였다.

2.2 고체상 추출제의 제조

용매인 NMP 10 mL에 PVC 1.5 g을 넣은 후 완전히 용해시킨 다음에 D2EHPA를 1 mL 넣고 1 hr 동안 혼합하였다. 이 혼합된 용액을 실린지를 이용하여 증류수에 한방울씩 떨어뜨려 24 hr 동안 경화시켰으며, 이를 증류수로 수차례 세척하여 고체상 추출제 PVC-D2EHPA 비드를 제조하였다. 제조한 PVC-D2EHPA 비드의 표면특성은 scanning electron microscopy(SEM, XL20, Philips)을 이용하여 관찰하였으며, FT-IR spectrometer (Bruker, Vertex 70)를 사용하여 FTIR 분석을 하였다.

2.3 실험 방법

Cu(II)의 제거 실험은 회분식으로 진행하였다. 500 ml 삼각플라스크에 일정 농도의 Cu(II)용액 200 ml에 PVC-D2EHPA 비드를 15 g을 넣은 다음에 수평진탕기(Johnsam, Js-Fs-2500)를 사용하여 120 rpm에서 교반하였다. 일정시간 간격으로 시료를 채취하여 원심분리기(Eppendorf, Centrifuge 5415c)로 10,000 rpm에서 5분간 원심 분리한 후 상등액을 분석에 사용하였다. Cu(II)

의 농도는 원자흡광도계(Shimadzu, AA-7000)를 사용하여 분석하였다. 용액의 pH는 0.1M NaOH와 0.1M HCl를 사용하여 조절하였으며, pH meter(Istek, AJ-7724)를 이용하여 pH를 측정하였다.

PVC-D2EHPA 비드의 Cu(II) 제거량은 다음과 같이 계산하였다.

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

여기서 q_t 는 시간 t 에서의 Cu(II)의 제거량 (mg/g), C_0 는 Cu(II)의 초기농도 (mg/L), C_t 는 시간 t 에서 Cu(II)의 농도 (mg/L), V 는 Cu(II)의 용액의 부피 (mL), 그리고 W 는 사용한 PVC-D2EHPA 비드의 양 (g)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고체상 추출제의 특성 분석

Fig. 1은 PVC-D2EHPA 비드의 외형과 절단면을 SEM 촬영하여 나타낸 것이다. Fig. 1(a)에서 보이는 바와 같이 제조한 PVC-D2EHPA 비드는 직경이 약 2.5 mm인 구형의 형태를 가졌다. Fig. 1(b)는 PVC-D2EHPA 비드의 절단면을 SEM 촬영한 결과를 나타낸 것으로 캡슐의 중앙부분에는 직경이 약 1 mm인 공간이 존재하며, 캡슐 외부는 다공성 구조를 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 PVC-D2EHPA 비드 제조시에 D2EHPA가 분산된 고분자 용액이 물과 접촉하여 접

촉한 면이 먼저 경화되면서 물에 용해되지 않는 D2EHPA는 비드 내부에 남게 되므로 Fig. 1(b) 중앙의 빈공간에는 추출제가 존재하는 것으로 사료된다. 또한 비드가 경화되는 동안에 경화된 외벽을 통해 물이 유입되고 내부의 NMP는 물에 용해되어 나감에 따라 PVC-D2EHPA 비드의 내부는 용액의 유통이 원활한 다공성 구조가 형성된 것으로 생각되었다.

Fig. 2는 D2EHPA, PVC 및 PVC-D2EHPA 비드의 FT-IR spectra를 나타낸 것이다. Fig. 1(a)의 D2EHPA spectra에서는 D2EHPA에 존재하는 P-O-C와 P=O가 각각 1014 cm^{-1} 와 1223.48 cm^{-1} 에서 확인(Vellaichamy와 Palanivelu, 2011)되었으며, Fig. 1(b)의 PVC spectra에서는 C-H가 1239.41 cm^{-1} 에서 관측되었다. PVC로 D2EHPA를 고정화한 Fig. 1(c)의 PVC-D2EHPA 비드에서는 PVC의 C-H가 1239.41 cm^{-1} 와 추출제인 D2EHPA의 P-O-C와 P=O가 각각 1032 cm^{-1} 와 1231.16 cm^{-1} 로 관측됨으로써 고상추출제인 PVC-D2EHPA 비드가 성공적으로 합성되었음을 알 수 있었다.

3.2 PVC-D2EHPA에 의한 Cu(II) 제거특성

Fig. 3은 Cu(II)의 초기 농도를 10~200 mg/L로 달리하여 운전한 경우에 Cu(II)의 제거량 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 Cu(II)의 제거는 초기 30 min 동안에는 매우 빠르게 진행되며, 30 min 이후부터 점차 느리게 제거되다가 180 min에서 평형에 도달하였

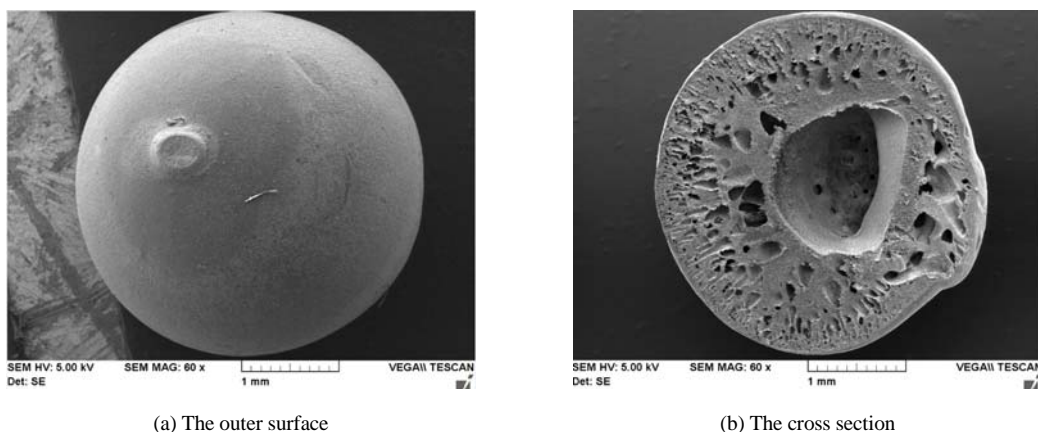


Fig.1. SEM images of (a) the outer surface and (b) cross section of PVC-D2EHPA bead.

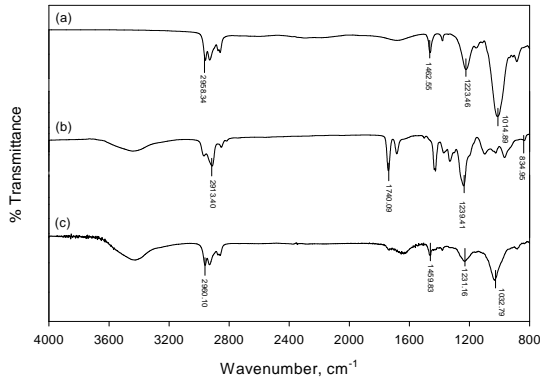


Fig. 2. FT-IR spectra of (a) D2EHPA, (b) PVC, and (c) PVC-D2EHPA bead.

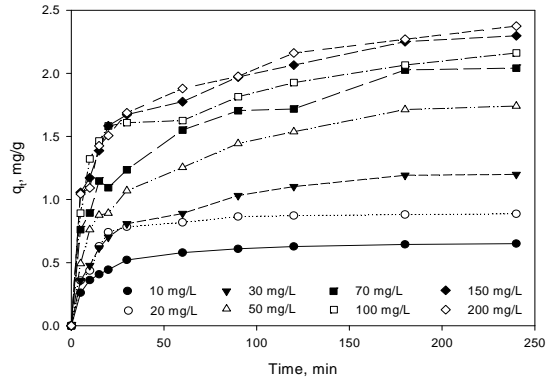


Fig. 3. Effect of contact time and initial concentration on Cu(II) removal capacity (PVC-D2EHPA beads = 15 g/0.3 L, agitation speed = 150 rpm).

다. 한편 Cu(II)의 초기 농도가 10~200 mg/L으로 증가함에 따라 Cu(II)의 제거량도 0.65~2.37 mg/g으로 증가하였는데, 이는 초기 농도가 증가함에 따라 물질전달의 구동력인 농도차가 증가함에 의한 것으로 생각된다.

PVC-D2EHPA 비드에 의한 Cu(II) 제거 실험자료를 유사 1차 속도 모델식과 유사 2차 속도 모델식에 적용하여 비교하였다. 유사 1차 속도 모델식은 다음과 같다.

$$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (2)$$

여기서 k_1 은 유사 1차 속도상수(1/min)이며, q_e 는 평형 제거량(mg/g)을 나타낸다.

유사 2차 속도식은 다음과 같다.

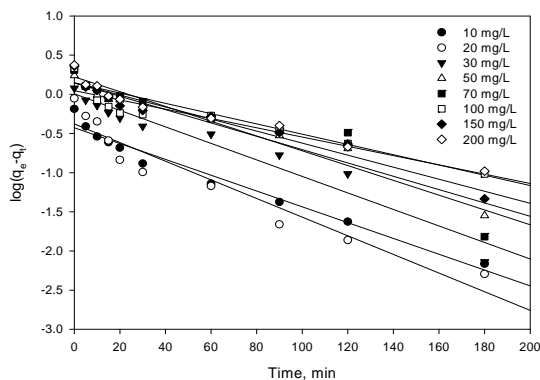


Fig. 4. Pseudo-first-order kinetics for Cu(II) removal by PVC-D2EHPA beads.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (3)$$

여기서 k_2 은 유사 2차 속도상수(g/mg·min)이다.

Fig. 3에 주어진 실험결과를 각각 식 (2)와 식 (3)에 적용하여 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었으며, 이로부터 얻어진 파라미터 값들을 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 결정계수(r^2)의 값을 비교해 보면, 유사 1차 속도식은 0.8794~0.9673이고, 유사 2차 속도식의 경우는 0.9928~0.9999으로, Cu(II)의 제거 속도는 유사 2차 속도식에 잘 만족하였다.

일정한 온도에서 용액의 평형농도와 평형제거량의 관계를 나타내는 등온식은 물질의 성능을 평가하기 사용되고

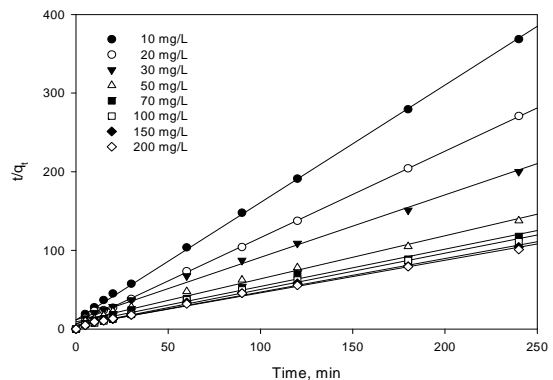


Fig. 5. Pseudo-second-order kinetics for Cu(II) removal by PVC-D2EHPA beads.

Table 1. Comparison of kinetic parameters obtained from Cu(II) removal by PVC-D2EHPA beads

C ₀ (mg/L)	q _{e, exp} (mg/g)	Pseudo-first-order			Pseudo-second-order		
		q _e (mg/g)	k ₁ (1/min)	r ²	q _e (mg/g)	k ₂ (g/mgmin)	r ²
10	0.65	0.3744	0.0233	0.9673	0.6763	0.1579	0.9999
20	0.88	0.4197	0.0274	0.9236	0.9156	0.1589	0.9995
30	1.19	1.0164	0.0243	0.9476	1.2833	0.0434	0.9976
50	1.74	1.3982	0.0196	0.9595	1.8635	0.0264	0.9955
70	2.04	1.6704	0.0217	0.8892	2.1556	0.0256	0.9928
100	2.16	1.1106	0.0137	0.8794	2.1953	0.0407	0.9948
150	2.29	1.3986	0.0177	0.9498	2.3736	0.0340	0.9965
200	2.37	1.4070	0.0151	0.9413	2.4485	0.0306	0.9969

있다. Langmuir 등온식은 흡착이 단분자층으로 일어나는 경우의 식으로, 아래와 같이 표현된다.

$$q_e = \frac{q_m k_L C_e}{1 + k_L C_e} \quad (4)$$

여기서 q_m은 Cu(II)의 최대 제거량(mg/g), k_L는 Langmuir 상수(L/mg)이다.

본 연구에서 제조한 PVC-D2EHPA 비드에 의한 Cu(II)의 제거실험 결과를 식 (4)에 적용하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 Langmuir 등온식의 r²는 0.9744~0.9801로 실험자료는 Langmuir 등온식을 잘 만족하는 것으로 나타났으며, Langmuir 등온식에서

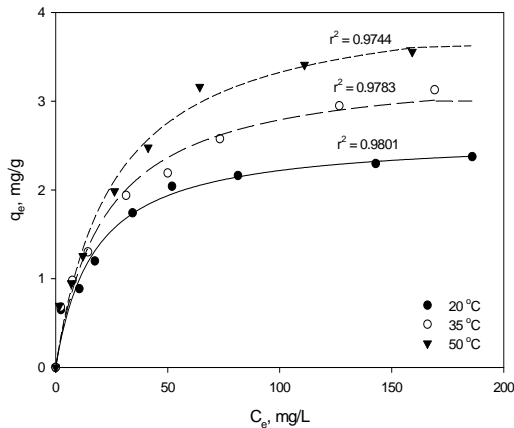


Fig. 6. Plot of C_e vs. q_e for different temperatures (PVC-D2EHPA beads = 15 g/0.3 L, agitation speed = 150 rpm).

구한 최대 제거량은 20 °C에서 2.6 mg/g, 35 °C에서 3.4 mg/g, 그리고 50 °C에서 4.18 mg/g으로 온도가 증가함에 Cu(II)의 제거량이 증가하였다. 또한 Langmuir 상수 k_L의 값은 20 °C에서 0.058 L/mg, 35 °C에서 0.046 L/mg, 그리고 50 °C에서 0.039 L/mg으로 나타났다.

PVC-D2EHPA 비드에 의한 Cu(II) 제거의 용이성을 판단할 수 있는 무차원 상수인 분리 계수(R_L)는 다음과 같이 정의된다(Wanngah 등, 2002).

$$R_L = \frac{1}{1 + k_L C_0} \quad (5)$$

여기서 R_L값이 1보다 클 때에는 제거가 일어나지 않으며, R_L값이 1인 경우에는 제거가 선행적으로 일어나며, R_L값이 0과 1 사이에 존재할 경우에는 제거가 잘 일어난다는 것을 의미한다.

Fig. 7은 식 (5)로부터 계산한 R_L을 나타낸 것으로, 그림에서 보듯이 R_L값이 0과 1 사이의 값을 가지므로 본 연구에서 제조한 PVC-D2EHPA 비드는 의해 Cu(II)의 제거에 적합한 것으로 사료되었다.

자유에너지 ΔG°는 다음과 같이 정의된다(Liu, 2006).

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_L \quad (6)$$

여기서 R은 기체 상수 (8.314 J/mol K), T는 절대 온도(K) 그리고 K_L은 k_L과 q_m의 곱이다. 식 (6)으로부터 구한 ΔG°의 값은 20 °C에서 -4.67 kJ/mol, 35 °C에서 -4.85 kJ/mol 그리고 50 °C에서 -4.98 kJ/mol로 모두 (-)의 값으로 나타나 PVC-D2EHPA 비드에 의해 Cu(II)의 제거가 자발적으로 이루어짐을 알 수 있었다.

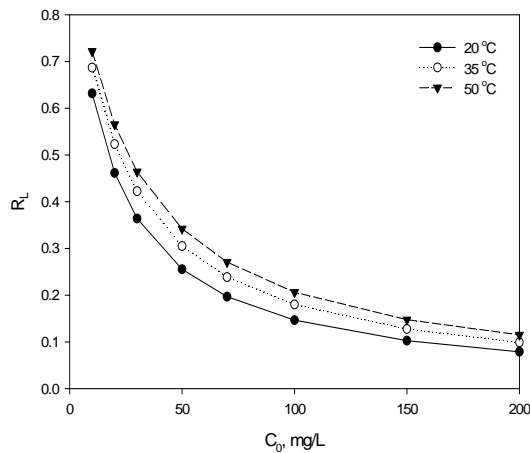


Fig. 7. Plot of R_L vs. C_0 .

Fig. 8은 pH 변화가 Cu(II)의 제거량에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Cu(II)용액의 초기농도를 10 mg/L로 일정하게 하고서 pH를 2~6으로 조절하여 실험을 행한 결과를 나타낸 것이다. pH 3.5이하에서는 수소양이온이 Cu(II)에 대하여 경쟁 이온으로 작용하여 pH가 낮아짐에 따라 제거량이 낮아지는 것으로 나타났다. 이에 반해 pH 3.5-6의 범위에서 Cu(II)의 제거량은 약 0.6 mg/g으로 일정하게 나타나 pH 3.5-6에서 Cu(II)의 제거가 최적임을 알 수 있었다.

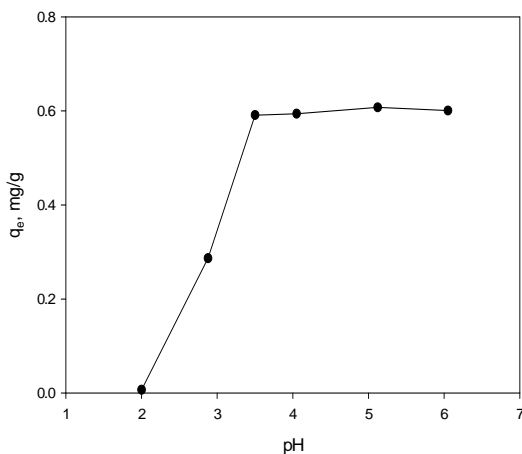


Fig. 8. Effect of pH on Cu(II) removal capacity (PVC-D2EHPA beads = 5 g/0.1 L, agitation speed = 150 rpm, concentration = 10 mg/L).

4. 결론

본 연구에서는 PVC를 이용하여 추출제 D2EHPA를 고정화한 고체상 추출제 PVC-D2EHPA 비드를 제조하였으며, FT-IR 분석과 SEM 분석을 통하여 D2EHPA가 PVC-D2EHPA 비드내에 잘 고정화되었음을 확인하였다. PVC-D2EHPA 비드의 Cu(II)의 제거는 약 180 min에 평형에 도달하였으며, Cu(II)의 제거 속도는 유사 2차 속도식에 잘 부합하였다. 평형 실험결과는 Langmuir에 잘 적용되었으며, 온도가 20 °C, 35 °C 및 50 °C에서 최대 제거량은 2.6 mg/g, 3.4 mg/g 및 4.18 mg/g으로 온도가 증가할수록 최대 제거량은 증가하였다. ΔG° 의 값이 -4.67 kJ/mol ~ -4.98 kJ/mol로 (-)의 값을 가지므로 PVC-D2EHPA 비드의 Cu(II)의 제거는 자발적으로 잘 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 분리 계수 R_L 의 값은 0과 1 사이에 값이 존재하여 제조한 PVC-D2EHPA 비드는 의해 Cu(II)의 제거가 잘 이루어짐을 알 수 있었으며, 적정 pH 범위는 pH 3.5-6이었다. 그러나, 제조된 PVC-D2EHPA 비드를 실제적으로 적용하기 위해서는 PVC-D2EHPA 비드의 재사용 가능성에 관한 후속 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

- Alguacil, F. J., Alonso, M., Lopez, F., Lopez-Delgado, A., 2008, Uphill permeation of Cr(VI) using Hostarex A327 as ionophore by membrane-solvent extraction processing, *Chemosphere*, 72, 684 - 689.
- Feklistov, D., Laguntsov, N., Penkina, Y., Kim, V., 2004, Encapsulated di-2- ethylhexylphosphoric acid : synthesis, dispersity, and extraction properties, *Ars Sep. Acta*, 3, 40-50.
- Gherasim, C. V., Bourceanu, G., Olariu, R. I., Arsene, C., 2011, Removal of lead(II) from aqueous solutions by a polyvinyl-chloride inclusion membrane without added plasticizer, *J. Membr. Sci.*, 377, 167-174.
- Gong, X. C., Luo, G. S., Yang, W. W., Wu, F. Y., 2006, Separation of organic acids by newly developed polysulfone microcapsules containing triethylamine, *Sep. Purif. Technol.*, 48, 235 - 243.
- Jung H. S., Lee, G. H., 2011, Effect of operating parameters on the removal performance of copper ion

- by electro dialysis (in korean), J, Korean Soc, Water Qual., 27, 54-60.
- Kabay, N., Cortina, J. L., Trochimczuk, T., Streat, M., 2010, Solvent-impregnated resins(SIRs) - Methods of preparation and their applications, React. Funct. Polym., 70, 484 - 496.
- Kentish, S. E., Stevens, G. W., 2001, Innovations in separations technology for the recycling and re-use of liquid waste streams, Chem. Eng. J., 84, 149-159.
- Kobayashi, T., Yoshimoto, M., Nakao, K., 2010, Preparation and characterization of immobilized chelate extractant in PVA gel bead for an efficient recovery of copper(II) in aqueous solution, Ind. Eng. Chem. Res., 49, 1652 - 1660.
- Kolev, S. D., Baba, Y., Cattrall, R. W., Tasaki, T., Pereira, N., Perera, J. M., Stevens, G. W., 2009, Solid phase extraction of zinc (II) using a PVC-based polymer inclusion membrane with di (2-ethylhexyl) phosphoric acid (D2EHPA) as the carrier, Talanta, 78, 795-799.
- Liu. Y., 2006, Some consideration on the Langmuir isotherm equation, Colloids Surf. A: Physicochem. Eng., 274, 34 - 36.
- Trochimczuk, A. W., Kabay, N., Arda, M., Streat, M., 2004, Stabilization of solvent impregnated resins (SIRs) by coating with water soluble polymers and chemical crosslinking, React. Funct. Polym., 59, 1 - 7.
- Vellaichamy, S. and Palanivelu, K., 2011, "Preconcentration and separation of copper, nickel and zinc in aqueous samples by flame atomic absorption spectrometry after column solid-phase extraction onto MWCNTs impregnated with D2EHPA-TOPO mixture", J. Hazard. Mater., Vol. 185, 1131 - 1139.
- Wannagah, W. S., Endud, C. S., Mayanar, R. 2002, Removal of copper (II) ions from aqueous solution onto chitosan and cross-linked chitosan beads, React. Funct. Polym., 50, 181-190.
- Xu, J., Xu, Z. L., 2002, Poly(vinyl chloride) (PVC) hollow fiber ultrafiltration membranes prepared from PVC/additives/solvent, J. Membr. Sci., 208, 203-212.
- 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.
- Yang, W. W., Luo, G. S., Gong, X. C., 2005, Extraction and separation of metal ions by a column packed with polystyrene microcapsules containing Aliquat 336, Sep. Purif. Technol., 43, 175-182.
- Yang, W. W., Luo, G. S., Wu, F. Y., Chen, F., Gong, X. C., 2004, Di-2-ethylhexyl phosphoric acid immobilization with polysulfone microcapsules, React. Funct. Polym., 61, 91-99.