

녹차잎과 인삼잎의 중금속 흡착능 평가 연구

김소현¹ · 송진영¹ · 윤광석¹ · 강은미² · 송호철^{1*}

¹세종대학교 환경에너지융합학과
²주야다

Adsorption of Heavy Metals by Natural Adsorbents of Green Tea and Ginseng Leaves

Sohyun Kim¹ · Jinyoung Song¹ · Kwangsuk Yoon¹ · Eunmi Kang² · Hocheol Song^{1*}

¹Department of Environment & Energy, Sejong University

²YADAH corporation

ABSTRACT

This work presents the adsorption capability of green tea and ginseng leaves to adsorb heavy metals such as Cd(II), Cu(II), and Pb(II) in aqueous solution. FT-IR analysis indicates the presence of oxygen containing functional groups (carboxyl groups) in two kinds of leaves. High pH condition was favorable to the adsorption of heavy metal ions due to the enhanced electrostatic attraction and the precipitation reaction of metal ions. The adsorption of Cd(II), Cu(II), and Pb(II) reached equilibrium within 10 min, achieving high removal efficiencies of 80.3-97.5%. The adsorption kinetics data of heavy metal ions were fitted well with the pseudo-second-order kinetic model. The maximum adsorption amounts of Cd(II), Cu(II), and Pb(II) ions were 8, 3.5, and 15 mg/g, respectively, in the initial concentration range from 0.15 to 0.75 mM. Based on the fitting data obtained from isotherm models, heavy metal adsorption by green tea and ginseng leaves could occur via multi-layer sorption.

Key words : Green tea leaves, Ginseng leaves, Heavy metal, Adsorption, Oxygen containing functional groups

1. 서 론

산업화의 발달에 따라 중금속 배출량이 증가되고 있으며 그에 따른 환경오염 역시 증가하고 있다. 국내에서는 주로 폐광산 부지에서 Cd, Cu, Pb 및 Zn 등 중금속에 의한 환경오염이 발생하고 있다(Jung, 2008). 중금속은 미량원소로서 인체의 신진대사에 반드시 필요한 무기물질이다. 그러나 자연 환경에서 분해되지 않고 생물 농축되며 독성이 있기 때문에 체내에 축적된 고농도의 중금속은 뇌 및 신경계의 기능 저하와 폐, 신장 등 내부 장기에 관한 손상을 야기한다(Gupta et al., 2012, Raval et al., 2016, Carolin et al., 2017). 그러므로 인체와 환경에 유해한 중금속을 제거하기 위해 2차 환경오염을 발생시키지 않는 친환경적인 공법의 적용이 필요하다.

중금속으로 오염된 수질을 복원하기 위해 흡착이나 침전, 이온교환, 멤브레인 여과, 전기화학적 처리와 같은 다양한 정화공법들이 사용되고 있다. 최근에는 다른 공법들에 비해 공정이 간단하고 적은 비용이 소모되며 환경에 유해한 부산물을 생성하지 않는 흡착 공정이 중금속 제거에 가장 적합한 정화기법으로 대두되고 있다(Ahmed and Ahmaruzzaman, 2016, Kurniawan et al., 2006). 그러나 흡착 공정의 비용은 흡착제의 종류에 따라 차이가 발생하기 때문에 효율적인 정화를 위해서는 저렴하고 친환경적인 흡착제를 선택하는 것이 중요하다.

전통적이고 일반적으로 가장 많이 사용되는 흡착제는 활성탄이다. 그러나 가격이 상대적으로 비싸고 재생이 불가능하다는 단점 때문에 최근에는 활성탄을 대체할 수 있고 경제적이며 친환경적인 생흡착제(biosorbent)가 각광받

*Corresponding author : hcsong@sejong.ac.kr

Received : 2017. 10. 14 Reviewed : 2017. 10. 17 Accepted : 2017. 10. 26

Discussion until : 2017. 12. 31

고 있다(Farooq et al., 2010). 예를 들면, 농업폐기물(Kurniawan et al. 2006), 계란 껍질과 산호 분말(Ahmad et al., 2012), 해초(Kratochvil et al., 1988), 산림 폐기물(Cutillas-Barreiro et al., 2016), 조류(Kapoor and Viraraghavan, 1995) 등과 같은 폐기물 또는 부산물들을 흡착제로 사용하기 위한 연구들이 수행되고 있다.

농업폐기물은 접근성이 용이하고 저렴하기 때문에 대체 흡착제로써 가장 적합한 원료이다. 그 중 녹차와 인삼잎은 국내에서 흔히 발생하는 농업폐기물이다. 녹차의 어린 잎과 새싹은 녹차 생산에 이용되고 수확시기를 놓쳐 상품성이 없는 잎들과 줄기는 폐기되었다. 그러나 최근 들어 비타민 C와 비타민 E, 폴리페놀 성분이 풍부하여 항산화 및 항암, 항염증 등의 약리작용이 주목받고 있어 녹차는 의약품이나 화장품등의 원료로도 사용되고 있다(Sandeep et al., 2012). 인삼의 뿌리는 과거부터 우수한 약리작용을 인정받아 약재로 사용되었으나 잎과 줄기는 거의 사용되지 않고 폐기되었다. 그러나 최근 향균, 항산화 효과를 나타내는 사포닌이 뿌리보다 더 풍부한 것으로 조사되어 화장품이나 사료 등에 이용되고 있다(Choi et al., 2009).

따라서, 본 연구에서는 농업폐기물인 녹차와 인삼잎을 흡착제로 사용하여 중금속(Cd, Cu, Pb)을 제거하기 위한 흡착능을 비교평가하는 것이 목적이다. 이를 위해 동역학적인 흡착실험(Kinetic adsorption)과 등온흡착평형 실험(Adsorption isotherm)을 수행하였다. 또한, 최근 화장품 원료로 녹차와 인삼잎의 사용 빈도가 증가하고 있으므로 계면활성제 조건에서의 흡착실험을 통해 화장품 내에 흡착제로의 적용 가능성을 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에서 흡착제로 쓰인 녹차는 전남 보성에서 수확한 잎과 잔가지 부분을 사용하였으며, 인삼잎은 수경 재배한 인삼의 잎과 가지를 사용하였다. 녹차와 인삼잎은 이 물질 제거를 위해 3차 증류수로 세척하고 80°C에서 72시간 동안 건조시킨 다음 데시케이터에 방냉보관하였다. 흡착제는 건조시킨 시료를 분쇄기로 파쇄한 후 100 mesh 체에 걸러 균질한 입자들로 구성하였다.

2.2. 흡착제 특성분석

흡착제 표면의 작용기를 확인하기 위해 Fourier transform infrared spectroscopy(FT-IR, Perkinelmer Spectrum 100, USA) 분석을 실시하였고, 흡착제의 형상을 알

아보기 위해 field emission scanning electron microscopy (FE-SEM, Hitachi S-4700, Japan)을 사용하였다.

2.3. 실험방법

녹차와 인삼잎의 흡착능 평가를 위한 흡착실험은 동역학적인 흡착실험(Kinetic sorption)과 등온흡착평형 실험(Adsorption isotherm)을 진행하였다. 모든 실험은 실온(25 ± 2°C)에서 수행하였고, 용액의 초기pH를 조정하기 위해 5 M HNO₃와 5 M NaOH를 사용하였다. 또한, 흡착 반응을 일정하게 교반시키기 위해 Orbital shaker(Stuart, UK)를 사용하였으며, 흡착 반응 후 시료는 0.45 μm syringe filter(Whatman, USA)로 여과한 후 ICP-OES(ICAP 6000 series, Thermo Scientific, USA)을 사용하여 중금속 농도를 측정하였다.

동역학적 흡착실험은 흡착제 0.1 g을 0.2 mM의 중금속(Cd, Cu, Pb) 용액 20 ml에 주입한 후 최대 360분까지 시간경과에 따라 반응시켰다. 등온흡착평형 실험은 Cd, Cu, Pb의 초기 농도를 각각 0.15~0.75 mM 범위에서 일정한 양으로 변화시킨 용액에 흡착제 0.2 g을 주입한 다음 6시간 동안 반응시켰다.

마지막으로 계면활성제의 존재 여부에 따른 녹차와 인삼잎의 중금속 흡착능 평가실험을 실시하였다. 10%의 계면활성제와 0.2 mM Cd, Cu, Pb를 포함한 용액 20 ml에 흡착제 0.1 g을 주입한 후 6시간 동안 반응시켰으며, 이때, 계면활성제는 sodium lauryl sulfate(SLS)와 cocamidopropyl betamine(CAB)를 사용하였다.

2.4. 데이터 분석

동역학적 흡착실험의 결과를 분석하기 위해 유사1차(pseudo-first-order, PFO) 및 유사2차(pseudo-second-order, PSO) 모델을 사용하였다.

유사1차 모델식(PFO)은 다음과 같이 표현된다.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \tag{1}$$

여기서, q_t 는 시간 t (min)에서 흡착된 양(mg g⁻¹)이고, k_1 (min⁻¹)은 유사1차 속도상수를 의미한다. $\ln(q_e - q_t)$ 는 동역학적 흡착실험을 통해 얻어진 결과로부터 계산한 값이다.

또한, 유사2차 모델식(PSO)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, k_2 는 유사2차 속도상수(g mg⁻¹ min⁻¹)를 의미한다.

등온흡착평형의 특성을 분석하기 위해 Langmuir, Freundlich 및 Redlich-Peterson 모델을 적용하였다. Langmuir 모델은 단분자층의 흡착을, Freundlich 모델은 다분자층의 흡착을 전제로 한 경험식이다. Redlich-Peterson 모델은 Langmuir와 Freundlich 모델의 특징을 포함하는 흡착 모델로 3개의 변수를 가진 경험적 흡착식이다.

Langmuir 모델식과 Freundlich 모델식은 다음과 같이 표현된다(Langmuir, 1918, Freundlich, 1906).

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{k_L C_e q_m} + \frac{1}{q_m} \tag{3}$$

$$q_e = k_f C_e^n \tag{4}$$

여기서, C_e 는 오염물질의 농도(mg L^{-1})이며 q_m 은 최대 흡착량(mg g^{-1})을 의미한다.

k_L 은 Lanmuir 상수(L mg^{-1})이고 k_f 는 freundlich 상수(mg^{-1})이며 n 은 흡착강도를 나타내는 상수이다.

Redlich-Peterson 모델식은 다음과 같다(Redlich and

Peterson, 1959).

$$q_e = \frac{k_R C_e}{1 + \alpha_R C_e^\beta} \tag{5}$$

여기서, k_R 은 흡착용량과 관련된 Redlich-Peterson 상수이고 α_R 은 화학친화력과 관련된 상수, β 는 흡착강도와 관련된 상수이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 흡착제 특성분석

녹차와 인삼잎의 표면 형태를 확인하기 위해 FE-SEM 분석을 시행하였다. Fig. 1를 보면, 녹차는 계단식 판형 구조를 하고 있는 반면, 인삼잎은 비교적 매끄럽고 균일한 원기둥형 구조를 하고 있다. 녹차와 인삼잎의 작용기를 확인하기 위해 FT-IR 분석한 결과(Fig. 2), 녹차는 1031, 1231, 1368, 1516, 1627, 2853, 2922 및 3303 cm^{-1} 에서, 인삼잎은 1023, 1238, 1371, 1536, 1625,

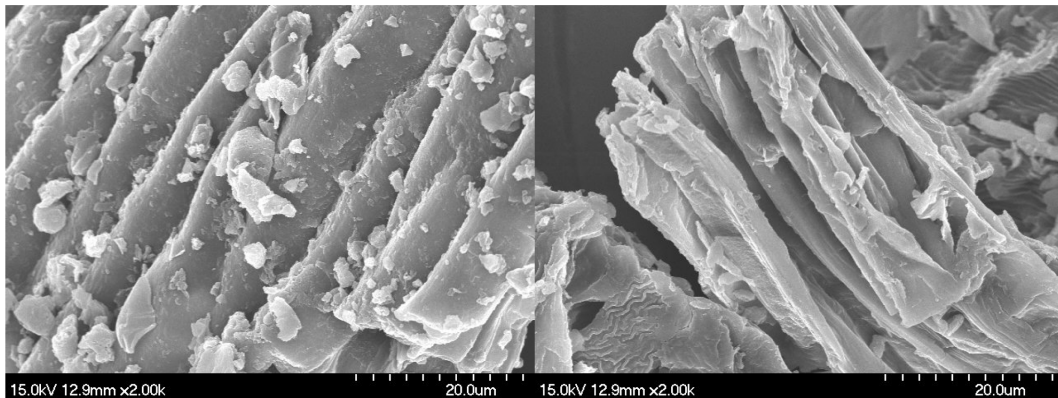


Fig. 1. FE-SEM images of green tea (left side) and ginseng leaves (right side).

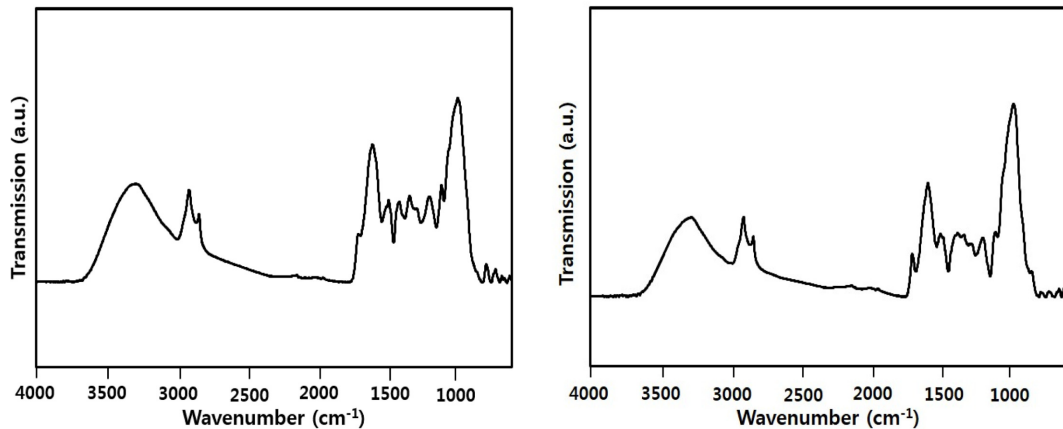


Fig. 2. FT-IR spectrum of green tea (left side) and ginseng leaves (right side).

2921, 2852 및 3288 cm^{-1} 에서 피크가 관찰되었으며 두 물질의 피크는 매우 유사한 형태를 보인다. 3200-3600 cm^{-1} 에서 측정된 광범위하고 강한 피크는 O-H의 신축 진동(stretching vibration)을, 2850-2960 cm^{-1} 과 1200-1400 cm^{-1} 에서 측정된 피크는 C-H의 신축 진동을 나타낸다. 1600-1680 cm^{-1} 에서 측정된 강한 흡수 피크는 방향족 고리의 신축 진동에 기인한 것이며, 1000-1200 cm^{-1} 에서 측정된 피크는 C-O-H와 C-O-C의 글리코시드 신축 진동에 해당한다. 이는, 녹차와 인삼잎을 FT-IR 분석한 기존의 문헌들과도 상당히 유사한 양상을 보였다(Cai et al.,

2013, Wang et al., 2014, Wu et al., 2011). 따라서, 중금속 제거를 위한 흡착반응은 녹차와 인삼잎을 구성하고 있는 페놀기, 아민기, 카르복실기 및 카르보닐기 그룹들 중 산소를 포함하는 작용기(-COOH, -OH, -C=O)에 의해 발생하였다(Gaballah et al., 1997).

3.2. 동역학적 흡착실험

반응시간 변화에 따른 흡착능을 평가하기 위해 0.2 mM Cd, Cu, Pb을 포함하는 용액에 흡착제 5 g L⁻¹를 주입하는 실험을 수행하였다(Fig. 3) 초기pH를 5.8로 설정하여

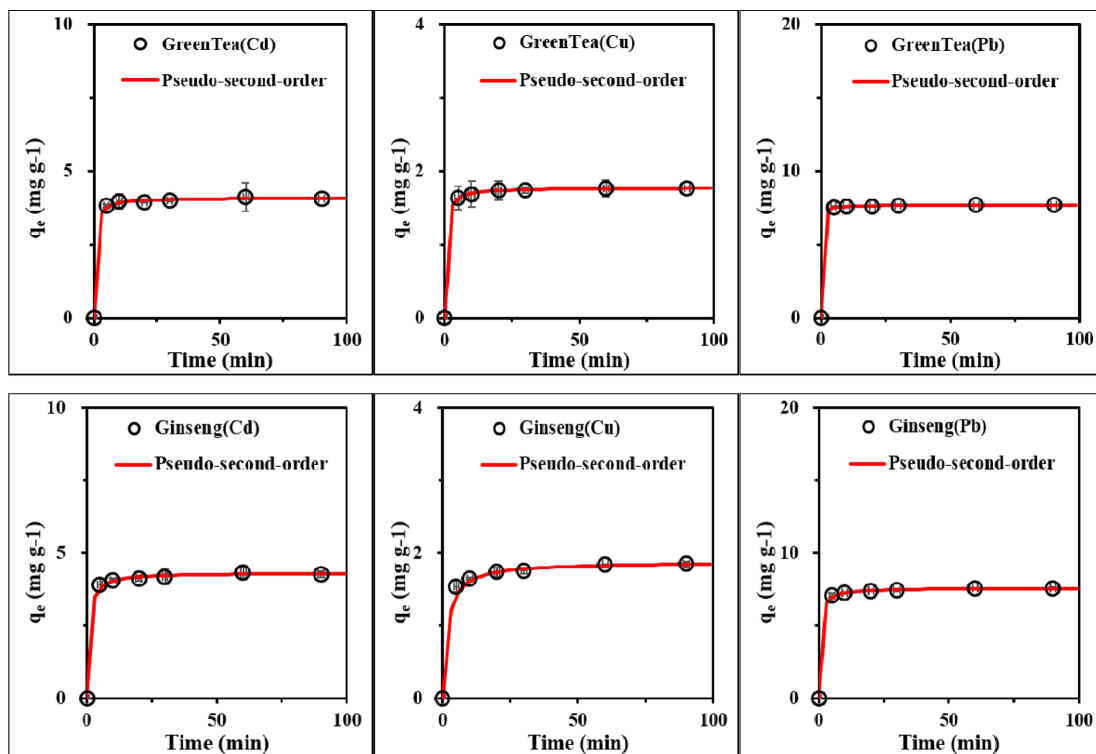


Fig. 3. Adsorption kinetics of Cd, Cu, and Pb by green tea and ginseng leaves.

Table 1. Kinetics parameters obtained from pseudo-first order kinetics (PFO) and pseudo-second order kinetics (PSO) models for the adsorption of heavy metals by green tea and ginseng leaves

흡착제	흡착물질	q_e (exp)	유사1차 모델식			유사2차 모델식		
			k_1 (L min ⁻¹)	q_e (cal) (mg g ⁻¹)	R^2	k_2 (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	q_e (cal) (mg g ⁻¹)	R^2
녹차잎	Cd	4.143	0.0212	0.238	0.4784	0.553	4.102	0.9998
	Cu	1.773	0.0417	0.098	0.6399	1.229	1.777	1.0000
	Pb	7.679	0.0385	0.123	0.9528	1.010	7.686	1.0000
인삼잎	Cd	4.446	0.0140	0.441	0.7644	0.321	4.323	0.9999
	Cu	1.998	0.0124	0.386	0.8427	0.322	1.879	0.9999
	Pb	7.678	0.0175	0.478	0.8455	0.273	7.593	1.0000

실험한 결과, 두 흡착제의 최종 pH는 5.4~5.7로 나타났다. 또한, 두 흡착제 모두 흡착반응시간이 10 분일 때, 흡착 평형에 도달했으며 녹차는 약 80.3~97.5%, 인삼잎은 약 81.9~90.4%의 제거율을 보였다.

흡착데이터는 PFO와 PSO 모델을 적용하여 평가하였으며 모델식을 통해 얻은 동역학적 변수들은 Table 1에 나타내었다. 실험값과 이론값의 일치 정도를 나타내는 R² (상관계수)을 비교해 볼 때, 녹차의 경우 PSO를 적용한 상관계수(R²=0.9998, 1.0000, 1.0000)가 PFO를 적용한 상관계수(R²=0.4784, 0.6399, 0.9528)보다 더 높게 나타났다. 또한, 인삼잎 역시 PSO를 적용한 상관계수(R²=0.9999, 0.9999, 1.0000)이 PFO를 적용한 상관계수(R²=0.7644, 0.8427, 0.8455)에 비해 더 높게 나타났다. 따라서, 녹차와 인삼잎에 의한 Cd, Cu, Pb의 흡착은 유사1차 모델식보다 유사2차 모델식에 더 부합하며 화학적 흡착에 기인한다(Dinu and Dragan, 2010).

3.3. 등온흡착 실험

녹차와 인삼잎을 흡착제로 사용하여 등온 흡착 실험을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 초기 pH를 6~6.5로 설정하여 실험한 결과, 두 흡착제의 최종 pH는 5.2~5.7로

나타났다. 전반적으로 중금속 흡착량은 초기 중금속 농도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 카드뮴 흡착의 경우에는 녹차와 인삼잎 모두 주어진 조건에서 최대 흡착량이 약 8 mg/g 인 것으로 나타났으며, 구리 이온 흡착은 상대적으로 낮은 흡착량인 3-3.5 mg/g 범위를 보였다. 또한, 납 이온은 15 mg/g을 상회하는 가장 높은 흡착량을 보였다. Freundlich 모델식을 적용하여 피팅(fitting)한 결과, Langmuir 모델식에 비해 모든 중금속 흡착에서 녹차와 인삼잎 모두 0.9586-0.9932 범위의 높은 상관계수 값(R²)을 보이는 것으로 나타났다. 이는 중금속 흡착이 주로 다층흡착(multilayer sorption)반응에 의해 일어난 것으로 판단된다. Redlich-Peterson 모델 피팅 결과, 전반적으로 Freundlich 모델 피팅 곡선과 거의 일치된 피팅 곡선을 보이며 흡착제에 의한 중금속 흡착이 Freundlich 모델식을 따르는 것을 뒷받침하였다.

3.4. 계면활성제에 따른 흡착능 비교

계면활성제에 따른 흡착능을 비교하기 위해 10%의 계면활성제와 0.2 mM Cd, Cu, Pb를 포함한 용액에 흡착제 5 g L⁻¹를 주입하는 실험을 수행하였다. 또한, 대조군으로 계면활성제를 미포함한 0.2 mM Cd, Cu, Pb를 용액에 등

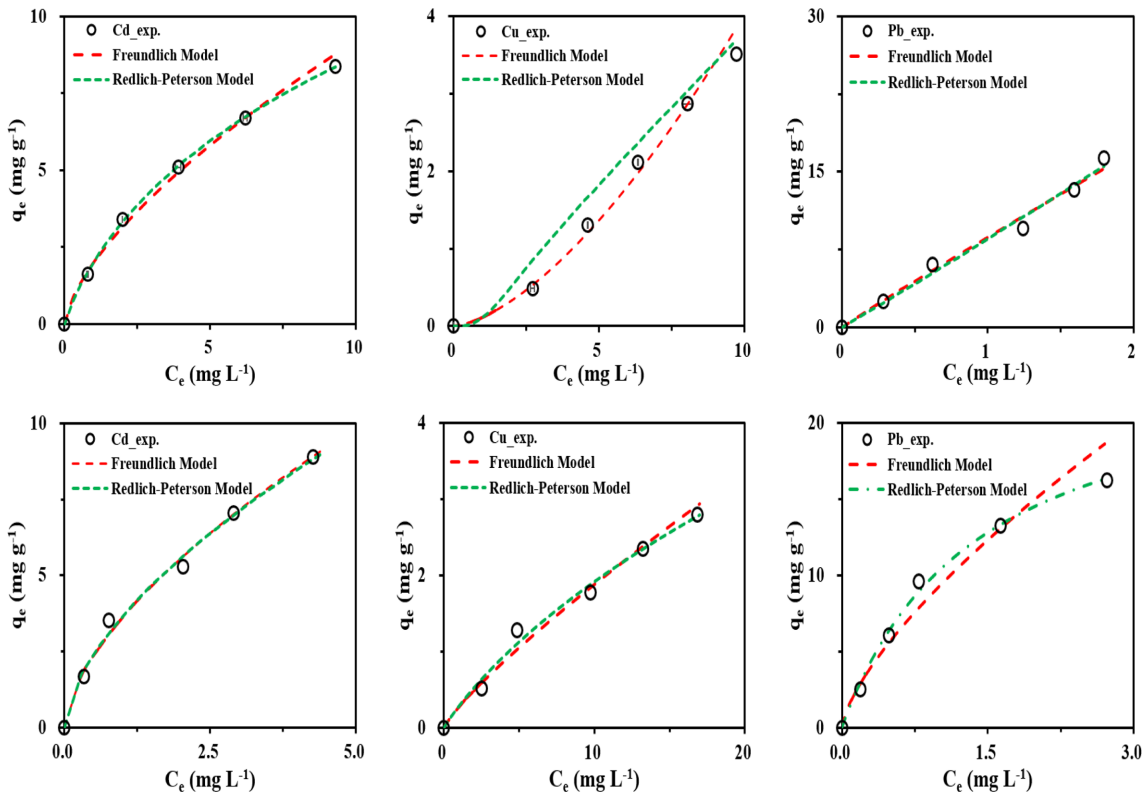


Fig. 4. Adsorption isotherm of Cd, Cu, and Pb by green tea and ginseng leaves.

Table 2. Removal efficiencies of Cd, Cu, and Pb by green tea and Ginseng leaves in the presence of two surfactants (SLS & CAB)

흡착제	계면활성제	Cd		Cu		Pb	
		q_e (mg g ⁻¹)	제거율 (%)	q_e (mg g ⁻¹)	제거율 (%)	q_e (mg g ⁻¹)	제거율 (%)
녹차잎	-	3.682	80.1	3.923	85.3	4.527	98.5
	SLS	1.005	21.9	3.422	74.4	3.996	86.9
	CAB	1.778	38.7	3.046	66.3	4.238	92.2
인삼잎	-	4.094	89.1	4.08	88.8	4.515	98.2
	SLS	0.878	19.1	3.088	67.2	3.254	85.8
	CAB	1.863	40.5	3.015	65.6	4.327	94.1

일양의 흡착제를 주입하는 실험도 수행하였다. 계면활성제는 음이온성 계면활성제(ionic surfactant)인 sodium lauryl sulfate(SLS)와 양성(amphoteric) 계면활성제인 cocamidopropyl betaine(CAB)를 사용하였다.

계면활성제가 없는 용액에서 녹차와 인삼잎의 Cd, Cu, Pb 제거율은 80.1~98.5%인데 반해, SLS를 주입한 용액에서의 제거율은 19.1~86.9%, CAB를 주입한 용액에서는 38.5~94.1%로 낮아지는 경향을 보였다. 이는, 임계농도(critical micelle concentration, CMC)를 초과한 계면활성제가 교질입자(micelle)들을 형성하여 흡착제와 오염물질 간의 반응을 저해한 것으로 추정된다(Marcolongo and Mirenda, 2011). SLS 계면활성제의 경우에는 10% 고농도 대신 적정량을 찾아 사용할 경우, 음이온성 SLS가 흡착제에 붙어 중금속 흡착에 유리할 것으로 추정된다. 그러나 화장품 내에 존재하는 고농도의 계면활성제들이 사용된다는 점에서 계면활성제들의 중금속 흡착에 대한 부정적인 영향은 불가피할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 흡착제로서의 녹차와 인삼잎의 중금속 제거 흡착능을 평가하였다. 또한, 계면활성제 조건에서 흡착능을 평가하여 화장품 내 흡착제 활용 가능성을 확인하였다. 중금속(Cd, Cu, Pb)은 녹차와 인삼잎에 존재하는 카르복실기 및 하이드록실기와 착화물을 형성하는 흡착반응을 통해 제거되었으며, 용액의 초기 pH 변화에 따른 최종 pH는 두 흡착제에서 비슷한 양상을 나타내었다. 녹차와 인삼잎 모두 흡착반응시간이 10분일 때, 흡착평형에도달했으며 제거율은 각각 약 80.3~97.5%, 약 81.9~90.4%이었다. 또한, 흡착 속도를 평가하기 위해 PFO 및 PSO 모델을 적용한 결과, 두 흡착제 모두 PFO보다 PSO에 더 부합하였다. 또한, 계면활성제가 존재할 때 흡착제의 흡착능은 비교적 낮게 측정되었으나 38.5~94.1%의 중

금속 제거율을 보이므로 화장품 내에 흡착제로의 적용가능성을 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 중소벤처기업부의 창업성장기술개발사업 여성참여활성화과제 일환으로 수행하였음(S2440265, 모공내 잔류된 PM2.5 속의 중금속 및 PAHs의 흡착 세정에 효과적인 천연물질 발굴과 이를 활용한 제품 개발).

References

Ahmad, M., Usman, A.R.A., Lee, S.S., Kim, S.-C., Joo, J.-H., Yang, J.E., and Ok, Y.S., 2012, Eggshell and coral wastes as low cost sorbents for the removal of Pb²⁺, Cd²⁺ and Cu²⁺ from aqueous solutions, *J. Ind. Eng. Chem.*, **18**, 198-204.

Ahmed, M.J.K. and Ahmaruzzaman, M., 2016, A review on potential usage of industrial waste materials for binding heavy metal ions from aqueous solutions, *J. Water Proc. Eng.*, **10**, 39-47.

Cai, W., Xie, L., Chen, Y., and Zhang, H., 2013, Purification, characterization and anticoagulant activity of the polysaccharides from green tea, *Carbohydrate Polymers*, **92**, 1086-1090.

Carolin, C.F., Kumar, P.S., Saravanan, A., Joshiba, G.J., and Naushad, M., 2017, Efficient techniques for the removal of toxic heavy metals from aquatic environment: A review, *J. Environ. Chem. Eng.*, **5**, 2782-2799.

Choi, J.E., Li, X., Han, Y.H., and Lee, K.T., 2009, Changes of Saponin Contents of Leaves, Stems and Flower-buds of Panax ginseng C. A. Meyer by Harvesting Days, *Korean J. Medicinal Crop Sci.*, **17**(4), 251-256.

Cutillas-Barreiro, L., Paradelo, R., Igrexas-Soto, A., Núñez-Delgado, A., Fernández-Sanjurjo, M.J., Álvarez-Rodríguez, E., Garrate, G., Nóvoa-Muñoz, J.C., and Arias-Estévez, M., 2016, Valorization of biosorbent obtained from a forestry waste: Competitive adsorption, desorption and transport of Cd, Cu, Ni, Pb *J. Soil Groundwater Environ.* Vol. **22**(5), p. 128~134, 2017

- and Zn, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **131**, 118-126.
- Dinu, M.V. and Dragan, E.S., 2010, Evaluation of Cu²⁺, Co²⁺ and Ni²⁺ ions removal from aqueous solution using a novel chitosan/clinoptilolite composite: Kinetics and isotherms, *Chem. Eng. J.*, **160**(1), 157-163.
- Farooq, U., Kozinski, J.A., Khan, M.A., and Athar, M., 2010, Biosorption of heavy metal ions using wheat based biosorbents - A review of the recent literature, *Bioresource Technol.*, **101**, 5043-5053.
- Freundlich, H.M.F., 1906, Over the adsorption in solution, *J. Phys. Chem.*, **57**, 21-27.
- Gaballah, I., Goy, D., Allain, E., Kilbertus, G., and Thauront, J., 1997, Recovery of copper through decontamination of synthetic solutions using modified barks, *Metall. Mater. Trans. B*, **28**(1), 13-23.
- Gupta, V.K., Ali, I., Saleh, T.A., Nayak, A., and Agarwal, S., 2012, Chemical treatment technologies for waste-water recycling-an overview, *RSC Advances*, **2**, 6380-6388.
- Jung, M.C., 2008, Contamination by Cd, Cu, Pb, and Zn in mine wastes from abandoned metal mines classified as mineralization types in Korea, *Environ. Geochem. Health*, **30**, 205-217.
- Kapoor, A. and Viraraghavan, T., 1995, Fungal biosorption - an alternative treatment option for heavy metal bearing wastewaters: a review, *Bioresource Technology*, **53**, 195-206.
- Kratochvil, D., Pimentel, P., and Volesky, B., 1988, Removal of trivalent and hexavalent chromium by seaweed biosorbent, *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 2693-2698.
- Kurniawan, T.A., Chan, G.Y.S., Lo, W.-H., and Babel, S., 2006, Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals, *Chem. Eng. J.*, **118**, 83-98.
- Langmuir, I., 1918, The adsorption of gases on plane surface of glass, mic and platinum, *J. Am. Chem. Soc.*, **40**, 1361-1403.
- Marcolongo, J.P. and Mirenda, M., 2011, Thermodynamics of Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) Micellization: An Undergraduate Laboratory Experiment, *J. Chem. Educ.*, **88**, 629-633.
- Raval, N.P., Shah, P.U., and Shah, N.K., 2016, Adsorptive removal of nickel(II) ions from aqueous environment: A review, *J. Environ. Manage.*, **179**, 1-20.
- Redlich, O. and Peterson, D.L., 1959, A Useful adsorption isotherm, *J. Phys. Chem.*, **63**, 1024-1026.
- Sandeep, K., Nisha, S., Shweta and Archana, 2012, Green Tea Polyphenols: Versatile Cosmetic Ingredient, *Int. J. Adv. Res. Pharm. Bio Sci.*, **1**(3), 348-362.
- Wang, T., Lin, J., Chen, Z., Megharaj, M., and Naidu, R., 2014, Green synthesized iron nanoparticles by green tea and eucalyptus leaves extracts used for removal of nitrate in aqueous solution, *J. Cleaner Prod.*, **83**, 413-419.
- Wu, Y., Zheng, Y., Li, Q., Iqbal, J., Zhang, L., Zhang, W., and Du, Y., 2011, Study on difference between epidermis, phloem and xylem of Radix Ginseng with near-infrared spectroscopy coupled with principal component analysis, *Vibrational Spectroscopy*, **55**, 201-206.