

Research Article

Open Access

## 단일 및 복합중금속용액에서 제강급랭슬래그의 경쟁흡착특성

박종환<sup>1†</sup>, 김홍출<sup>2†</sup>, 김성현<sup>1</sup>, 이성태<sup>3</sup>, 강병화<sup>4</sup>, 강세원<sup>5</sup>, 서동철<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 응용생명과학부(BK21 농생명산업 글로벌 인재 육성 사업단) & 농업생명과학원,

<sup>2</sup>경남과학기술대학교 생명과학대학 제약공학과, <sup>3</sup>경상남도농업기술원 작물연구과, <sup>4</sup>(주) 효석, <sup>5</sup>국립한국농수산대학 특용작물학과

### Competitive Adsorption Characteristics of Rapid Cooling Slag in Single- and Multi-Metal Solutions

Jong-Hwan Park<sup>1†</sup>, Hong-Chul Kim<sup>2†</sup>, Seong-Heon Kim<sup>1</sup>, Seong-Tae Lee<sup>3</sup>, Byung-Hwa Kang<sup>4</sup>, Se-Won Kang<sup>5</sup> and Dong-Cheol Seo<sup>1\*</sup> (<sup>1</sup>Division of Applied Life Science (BK21 plus) & Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea, <sup>2</sup>Department of Pharmaceutical Engineering, College of Bioscience, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea, <sup>3</sup>Division of Crop Science, Gyeongnam Agricultural Research and Extension Services, Jinju 52733, Korea, <sup>4</sup>Hyoseok, co., LTD, Gwangyang 57803, Korea, <sup>5</sup>Department of Medicinal & Industrial Crops, Korea National College of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea)

Received: 24 February 2016 / Revised: 21 March 2016 / Accepted: 27 March 2016

Copyright © 2016 The Korean Society of Environmental Agriculture

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.

#### ORCID

Jong-Hwan Park

<http://orcid.org/0000-0001-7296-0439>

Hong-Chul Kim

<http://orcid.org/0000-0002-7541-1483>

Dong-Cheol Seo

<http://orcid.org/0000-0001-8515-0670>

#### Abstract

**BACKGROUND:** Heavy metal adsorption not only depends on rapid cooling slag(RCS) characteristics but also on the nature of the metals involved and on their competitive behavior for RCS adsorption sites. The goal of this study was to investigate the competitive adsorption characteristics of Cu, Cd and Zn in single- and multi-metal forms by RCS.

**METHODS AND RESULTS:** Both single- and multi-metal adsorption experiments were conducted to determine the adsorption characteristics of RCS for the heavy metals. Adsorption behaviors of the heavy metals by RCS were evaluated using both the Freundlich and Langmuir adsorption isotherm equations. The maximum adsorption capacities of metals by RCS were in the order of Cu(16.6

mg/g) > Cd(8.1 mg/g) > Zn(6.2 mg/g) in the single-metal adsorption isotherm and Cu(14.5 mg/g) >> Zn(1.3 mg/g) > Cd(0.6 mg/g) in the multi-metal adsorption isotherm. Based on data obtained from Freundlich and Langmuir adsorption models and three-dimensional simulation, multi-metal adsorption behaviors differed from single- metal adsorption due to competition. Cadmium and Zn were easily exchanged and substituted by Cu during multi-metal adsorption.

**CONCLUSION:** Results from adsorption experiments indicate that competitive adsorption among metals increases the mobility of these metals.

**Key words:** Competitive adsorption, Heavy metal, Langmuir isotherm, Rapid cooling slag, Three-dimension simulation

#### 서론

최근 급격한 산업화 및 도시화로 인하여 중금속 폐수에 의한 수질 및 토양 오염은 선진국과 개발도상국에서 가장 중요한 환경 문제 중 하나로 대두되기 시작하였다(Shi *et al.*,

<sup>†</sup>These authors equally contributed to this article.

\*Corresponding author: Dong-Cheol Seo

Phone: +82-55-772-1963; Fax: +82-55-772-1969;

E-mail: dcseo@gnu.ac.kr

2008). 특히, 토양 및 수계로 유입되는 중금속들은 자연적으로 생분해(biodegradation)되어 소멸되는 것이 아니라 생태계에 지속적으로 잔류하는 특성들을 가지고 있으며, 먹이사슬을 통한 만성적 섭취 시에는 인간의 생명까지도 위협하고 있는 실정이다(Romkens *et al.*, 2009; Frohne *et al.*, 2014).

중금속 폐수처리를 위한 다양한 방법이 개발되었으나 일반적으로 물리·화학적 처리 방법이 가장 많이 이용되고 있다. 물리적인 방법에는 침전법 및 막분리법 등이 있고, 화학적인 방법에는 응집침전법 및 이온교환법 등이 있다. 이들 공법들은 처리효율이 낮고, 운영 및 관리에 많은 비용이 소요되며, 폐수처리시 발생하는 슬러지 때문에 수계 및 토양에 2차오염을 유발할 수 있기 때문에 이를 대체 할 수 있는 새로운 처리 방법이 요구되고 있는 실정이다(Kim *et al.*, 2005; Kim and Yim, 2012; Choi *et al.*, 2013).

이에 중금속 폐수 처리시 운전 및 유지관리비용이 적고, 중금속 폐수를 효율적으로 제거할 수 있는 흡착제에 대해 다양한 연구가 진행되고 있으며, 특히 키토산, Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), 슬래그 및 제올라이트 등 다양한 흡착제를 이용한 중금속 흡착에 관한 연구가 다양한 분야에서 시작되었다(Gupta *et al.*, 2003; Karami, 2013; Zhao *et al.*, 2014). 하지만 이러한 중금속 흡착 연구는 단일 중금속 이온상태에서 주로 이루어졌으며, 복합 중금속 용액에서 중금속들 간의 흡착특성에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

일반적으로 중금속 폐수는 단일 오염물질에 의한 오염보다는 2종 이상의 복합 오염물질로 오염되어 있으며, 복합중금속 용액에서의 각 중금속의 흡착은 흡착제의 흡착점을 두고 경쟁하기 때문에 단일 용액에서 각 중금속의 흡착 특성 결과만으로 복합용액에서의 흡착특성을 예측하는데 한계가 있다. 특히, 중금속 간의 흡착 경쟁을 체계적으로 이해하기 위해서는 중금속간의 경쟁흡착 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 실험에 사용된 제강급랭슬래그는 최근 철강회사에서 새롭게 도입한 BSSF(Baosteel Slag Short Flow)설비로 기존의 제강슬래그를 배제·냉각해 재처리하는 프로세스와는 달리 고온의 용융 슬래그를 기계적으로 냉각·분쇄·고형화 처리하고, 발생하는 철분은 별도로 회수해 재사용하며, 분리 처리된 슬래그는 별도로 재활용할 수 있도록 구성되어 있다.

하지만 현재까지 제강급랭슬래그의 재활용방안에 대한 연구는 미비한 실정으로 다양한 용도 모색으로 슬래그의 우수한 고유 특성을 발견하고 이를 부가가치가 높은 물질로 전환시키는 새로운 기술 개발이 필요하다.

이에 본 연구는 제강급랭슬래그의 중금속 폐수 처리에 대한 적용가능성을 평가하기 위한 선행연구로서 제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속 용액에 대한 경쟁 흡착특성을 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 시험재료

본 실험에 사용된 제강급랭슬래그는 BSSF설비에서 발생하는 제강급랭슬래그를 국내 철강회사인 P사로부터 수거하였

**Table 1. Physicochemical characteristics of rapid cooling slag used in the study**

Items	Value
<i>Physical properties</i>	
Porosity (%)	38
Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	1.70
d <sub>10</sub> (mm)	0.5
d <sub>60</sub> (mm)	1.6
Uniformity coefficient (d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub> )	3.20
Specific surface (m <sup>2</sup> /g)	0.21
<i>Chemical properties</i>	
pH (1:5H <sub>2</sub> O)	9.3
SiO <sub>2</sub> (%)	13.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	24.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.3
CaO (%)	36.7
Free CaO (%)	1.12
MgO (%)	6.4
Cd (mg/L)	ND <sup>‡</sup>
Cu (mg/L)	0.054
Zn (mg/L)	0.026

<sup>‡</sup> ND mean is non detected.

다. 수거한 제강급랭슬래그는 균등계수(여재를 입경 순으로 나열하였을 때 작은 입경으로부터 중량 60%되는 입경과 10% 되는 입경과의 비; d<sub>60</sub>/d<sub>10</sub>)가 3.20이었다. 제강급랭슬래그의 화학적인 특성은 Table 1에서 보는 것과 같다. Seo 등(2006)의 연구결과에 따르면 일반적인 제강슬래그의 경우 높은 유리칼슘 함량으로 인하여 여과제로 적용시 수중 pH가 증가하게 되고, 이로 인하여 수중 미생물의 생육저하를 야기시켜 인을 제외한 오염물질의 처리효율을 저하시킨다고 보고한 바 있다. 하지만 본 실험에서 사용된 제강급랭슬래그의 경우는 기존의 제강슬래그에 비해 유리칼슘의 함량이 낮고, 표면적 및 공극률이 높아 수질 여과제로 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.

제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속에 대한 경쟁흡착특성 조사에 사용한 중금속은 Cu, Cd 및 Zn으로 총 3종이며, 중금속 시약은 Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·2.5H<sub>2</sub>O, Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 및 Zn(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O(GR grade, Fisher Scientific, USA)를 사용하였다. 실험에 사용된 중금속용액의 농도를 Cu, Cd 및 Zn이 단일로 존재하는 단일용액(Single-metal)과 이들 중금속을 혼합한 복합용액(Multi-metal)으로 구분하였다.

### 실험방법 및 분석방법

#### 단일 및 복합 중금속 용액에 대한 제강급랭슬래그의 경쟁 흡착특성

제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속 대한 경쟁흡착특성

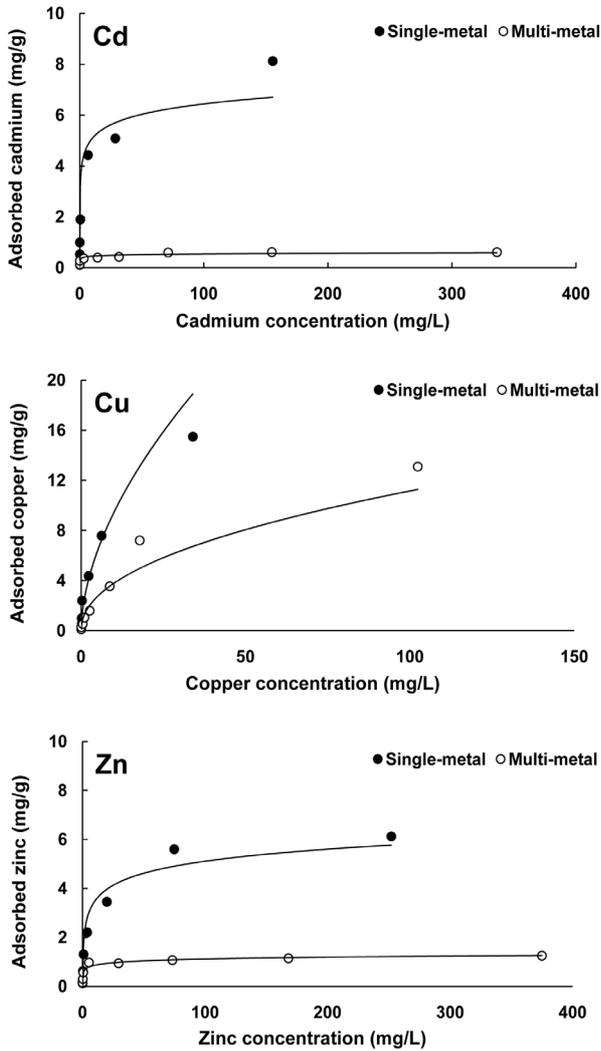


Fig. 1. Single- and multi-metal adsorption isotherms for the three metals (Cd, Cu and Zn) by rapid cooling slag.

조사는 제강급랭슬래그를 1.0 g씩 삼각플라스크에 주입하고 단일 및 복합 중금속용액을 2.5, 5, 10, 20, 40, 80, 160 및 320 mg/L되게 제조하였다.

제강급랭슬래그가 충전된 삼각플라스크에 단일 및 복합중금속 용액을 각각 50 mL되게 주입하여 밀봉한 후 삼각플라스크를 shaking incubator(KASI KSI-200L, Korea)에서 175 rpm으로 24시간 20°C 조건하에 항온시켜 침전시킨 후 Whatman GF/C filter로서 필터한 후 Standard Method에 의해 Inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy(ICP-OES, Perkin Elmer Optima 4300 DV, USA)를 이용하여 Cu, Cd 및 Zn의 농도를 측정하였다.

제강급랭슬래그의 단위 g당 흡착된 Cu, Cd 및 Zn의 양과 평형상태에서 용액 중 남아있는 Cu, Cd 및 Zn의 농도를 구하여 이를 Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식에 적용하였다. Freundlich 등온흡착식의 일반식은 다음(Eq. 1)과 같다(Bohn, 1979; Seo et al., 2008).

$$q = KCe^{1/n} \quad (\text{Eq. 1})$$

$q$ : 흡착제 단위 g당 흡착된 오염물질의 양(mg/g)

$C_e$ : 평형상태에서 용액중 남아 있는 오염물질농도(mg/L)

$K$ : 오염물질의 흡착능력

$1/n$ : 오염물질의 흡착강도

제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속에 대한 경쟁흡착특성 조사를 위한 Langmuir 등온흡착식의 일반식은 다음 (2) 식과 같다(Seo et al., 2008).

$$q = \frac{abCe}{1+bCe} \quad (\text{Eq. 2})$$

$q$ : 흡착제 단위 g당 흡착된 오염물질의 양(mg/g)

$C_e$ : 평형상태에서 용액중 남아 있는 오염물질농도(mg/L)

$a$ : 최대흡착량에 관한 상수 혹은 최대흡착능력(mg/g)

$b$ : 흡착에너지에 관한 상수

이상의 Langmuir 및 Freundlich의 직선식의 결과를 이용하여 제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속에 대한 최대흡착능을 조사하고, 본 실험에 적용된 두 흡착식과 실제 흡착량을 비교하여 제강급랭슬래그의 중금속 흡착능 예측을 위한 최적흡착식을 선정하였으며, 또한 각 조건에서의 흡착량 결과를 이용하여 3D simulation기법으로 흡착패턴을 조사하였다.

## 결과 및 고찰

### 제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속에 대한 경쟁흡착특성

제강급랭슬래그(흡착제)의 단위 g당 흡착된 Cd, Cu 및 Zn의 흡착량과 평형상태에서 용액 중 남아있는 Cd, Cu 및 Zn의 농도를 측정한 결과는 Fig. 1과 같다. 제강급랭슬래그의 단일 용액일 때의 흡착량이 복합 용액일 때의 흡착량에 비해 높았다. 특히 Cu의 경우 복합용액일 때가 단일용액에 비해 흡착능의 감소폭이 비교적 낮았으나, Cd와 Zn의 경우는 복합 용액일 때가 단일용액에 비해 흡착능이 현저하게 떨어졌다.

Freundlich 및 Langmuir 등온흡착식에 적용하여 Freundlich 등온흡착식으로부터 흡착능( $K$ ) 및 흡착강도( $1/n$ )를 구하였고, Langmuir 등온흡착식으로부터 최대흡착능( $a$ ) 및 결합세기( $b$ )를 구하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

Freundlich 등온흡착식을 이용한 Cd, Cu 및 Zn의 흡착능( $K$ )은 단일 용액일 때 각각 2.21, 2.56 및 0.89이었으며, 복합 용액일 때는 각각 0.31, 1.28 및 0.37로 단일 용액에 비해 복합 용액에서의 모든 금속의 흡착능이 감소하는 것을 알 수가 있었고, 특히 Cd의 경우는 복합용액에서 급격히 감소하였다(Fig. 2 및 Table 2).

제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속 용액에 대한 흡착강도( $1/n$ )는 0.11-0.57의 범위였다. Seo 등(2008)의 연구결과에 따르면, 흡착강도( $1/n$ )값이 1보다 클 경우에는 S형 등

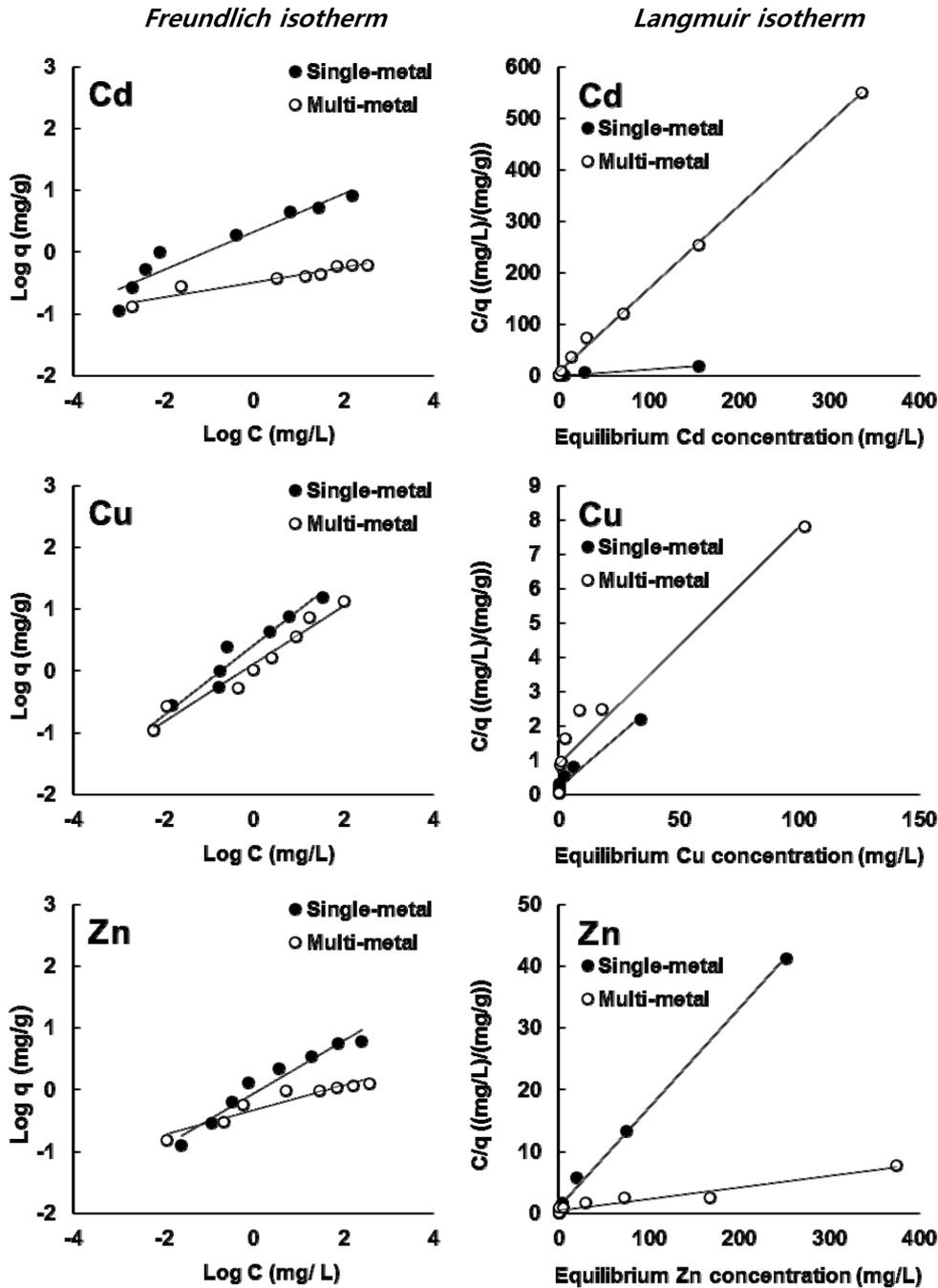


Fig. 2. Freundlich and Langmuir isotherm plots in single- and multi-metal adsorption isotherms for the three heavy metals (Cd, Cu and Zn) by rapid cooling slag.

은 흡착특성을 갖게 되며, 1보다 적을 경우 L형의 등온흡착 특성을 갖게 되고, 1일 경우에는 C형의 등온흡착특성을 갖는 것으로 알려져 있다. 본 연구결과에서 제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속 용액에 대한 흡착강도는 1이하로 모두 L형의 등온흡착식으로 판단할 수 있었다. Na 등(2011)과 Park 등(2014)의 연구에 따르면, L형 흡착등온선은 일반적으로 흡착제의 흡착지점에 대해 용매와 흡착질간의 경쟁이 강하지 않고 흡착질이 흡착제의 표면에 단층(monolayer)으로 흡착하

는 경우에 나타나는 것으로 보고하였다.

Langmuir 등온흡착식을 이용한 제강급랭슬래그의 단일 및 복합 중금속 용액에서 최대흡착능(a)은 단일 용액일 때 Cu(16.6 mg/g) > Cd(8.1 mg/g) > Zn(6.2 mg/g)순이었으며, 복합 용액일 때 Cu(14.5 mg/g) >> Zn(1.3 mg/g) > Cd(0.6 mg/g)순으로 복합 용액일 때 최대흡착능은 단일 용액에 비해 모든 금속이 감소하는 경향이 있었다(Fig. 2 및 Table 2). 특히 Cu의 최대흡착능은 다른 금속에 비해 단일용액에

**Table 2. Determination of the parameters for the Freundlich and Langmuir adsorption isotherm by test fit approach in batch experiment of single- and multi-metal adsorption to rapid cooling slag**

Metals	Treatments	Freundlich adsorption isotherm			Langmuir adsorption isotherm		
		Equation	$K^{\dagger}$	$1/n^{\ddagger}$	Equation	$a^{\S}$	$b^{\parallel}$
Cd	Single-metal	$y = 0.2974x + 0.3267(r=0.954^{**})$	2.21	0.30	$y = 0.1228x + 0.3783(r=0.994^{**})$	8.1	0.33
	Multi-metal	$y = 0.1116x - 0.5066(r=0.954^{**})$	0.31	0.11	$y = 1.6100x + 11.9120(r=0.995^{**})$	0.6	0.14
Cu	Single-metal	$y = 0.5658x + 0.4098(r=0.977^{**})$	2.57	0.57	$y = 0.0601x + 0.2069(r=0.977^{**})$	16.6	0.29
	Multi-metal	$y = 0.4689x + 0.1098(r=0.978^{**})$	1.29	0.47	$y = 0.0692x + 0.8870(r=0.968^{**})$	14.5	0.08
Zn	Single-metal	$y = 0.4261x - 0.0504(r=0.972^{**})$	0.89	0.43	$y = 0.1608x + 0.8932(r=0.998^{**})$	6.2	0.18
	Multi-metal	$y = 0.2088x - 0.4320(r=0.918^{**})$	0.37	0.21	$y = 0.7933x + 12.8120(r=0.983^{**})$	1.3	0.06

<sup>†</sup> K: adsorption capacity of heavy metal.  
<sup>‡</sup> 1/n: an empirical parameter related to the intensity of sorption.  
<sup>§</sup> a: maximum adsorption capacities of heavy metal(mg/g).  
<sup>||</sup> b: binding strength constant of heavy metal.  
 (\*\* denote significance at 1.0% levels).

비해 복합용액에서 감소폭이 작으나 Cd 및 Zn의 최대흡착능은 큰 폭으로 감소하였다. 또한 Cd의 최대흡착능은 단일 용액에서는 Zn에 비해 높은 반면, 복합 용액에서는 Zn에 비해 낮은 최대흡착능을 보였다.

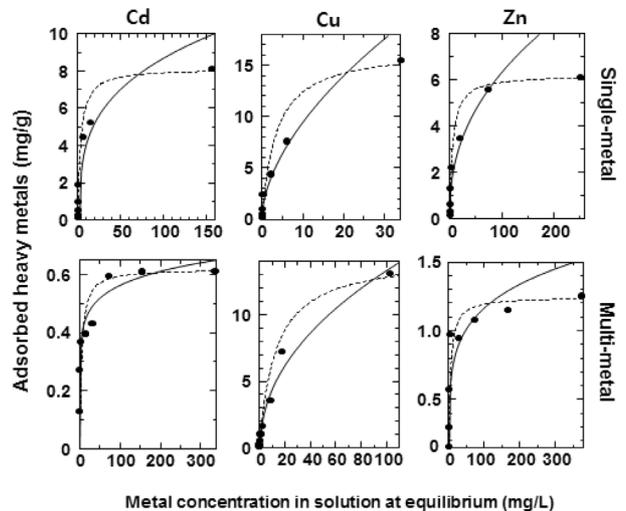
제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속 용액에서 최대흡착능 결과를 이용하여 복합용액에서의 Cd, Cu 및 Zn의 저감 효율을 비교한 결과 Cu는 12.6% 감소하였고, Cd는 92.6% 감소하였으며, Zn은 79.0% 감소하였다.

이상의 결과를 미루어 볼 때, Cd는 경쟁 이온이 없는 단일 용액에서는 흡착제에 대해 높은 흡착능을 보였으나, 복합 용액에서는 경쟁관계인 Cu에 의해 상대적으로 흡착능이 감소한 것으로 판단된다.

Mohapatra와 Anand(2010) 및 McBride 등(2000)은 흡착제의 중금속에 대한 선택성은 몇 가지 요소에 의해 결정된다고 보고하였다. 흡착물질로의 흡착에 있어 중금속 성분의 상대적인 선택성은 이온반경, 원자량, 전기음성도, 가수분해상수, softness 등의 중금속 특성과 흡착물질의 물리·화학적 특성에 영향을 받는 것으로 보고하였다.

중금속 흡착실험에서 Cu에 대한 흡착의 선택성은 Cd, Ni 및 Zn에 비해 뚜렷하게 높은 것으로 보고하였으며(Covelo et al., 2007; Usman, 2008), Veeresh 등(2003)은 토양으로 중금속 흡착의 선택성은 중금속 성분의 가수분해상수(hydrolysis constant)와 밀접하게 관련되어 있는 것으로 보고하였다. 즉, 중금속의 흡착특성은 중금속의 가수분해 생성물(MOH<sup>+</sup>)의 흡착에 영향을 받으며 이러한 착화합물은 금속 양이온들보다 더 강하게 흡착되므로 가수분해가 잘 일어나는 중금속일수록 흡착에 대한 선택성이 커지게 된다. 본 연구에 사용된 중금속인 Cu, Cd 및 Zn의 pKa 값은 각각 7.7, 9.0 및 9.2이었으며, 전기음성도의 경우 Cu(1.90)가 Cd(1.69) 및 Zn(1.65)에 비해 높았다.

Saha 등(2002) 연구결과에 따르면, 복합 중금속 용액에서 각 중금속의 농도가 낮을 때에는 흡착제에 대해 복합용액내



**Fig. 3. Experimental and calculated values from the Freundlich and Langmuir adsorption isotherms for the single- and multi-metal conditions. ●: Experimental data; —: Freundlich equation [equation (2)]; ---:Langmuir equation [equation (3)].**

의 중금속 모두가 흡착능이 높으나, 각 중금속의 농도가 높을 때에는 흡착제에 대한 각 중금속의 흡착능은 경쟁관계에 의해 중금속의 흡착능이 떨어진다고 보고하였다. Fontes와 Comes(2003)의 연구결과에 따르면 중금속 복합 용액내에 Cu와 Cd가 공존할 경우 Cd의 흡착능은 단일 용액에서의 흡착능에 비해 떨어진다고 보고하였는데, 본 연구결과와 동일한 경향이였다.

**제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속에 대한 최적흡착식 선정**

제강급랭슬래그의 Cd, Cu 및 Zn에 대한 흡착능력을 예측하기에 적합한 최적 등온흡착식을 선정하기 위해 Table 2

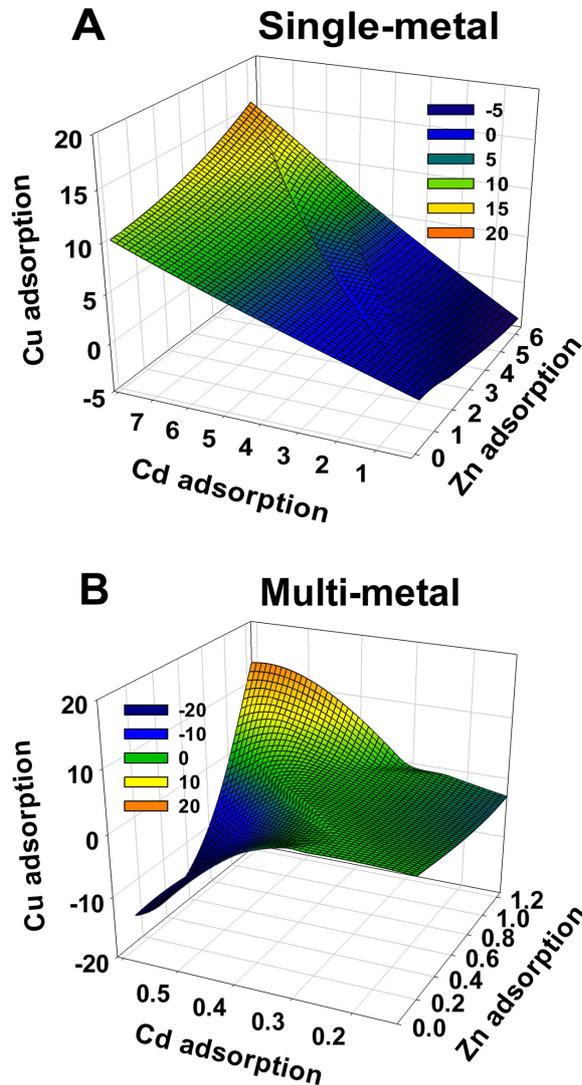


Fig. 4. Simulation (three-dimensional diagram) for relationship of adsorbed metals (mg/g) in the single-metal (A) and multi-metal (B) adsorption systems.

로부터 도출한 Freundlich와 Langmuir 등온흡착 일반식을 실제 흡착결과에 적용하였다. 제강급랭슬래그의 실제 흡착량과 Freundlich와 Langmuir 등온흡착 일반식을 Fig. 3에 나타내었다. 제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속 용액에서 Cd, Cu 및 Zn의 흡착량은 전반적으로 Langmuir 등온흡착식이 Freundlich 등온흡착식에 비해 잘 일치하였다. 일반적으로 두 등온흡착식을 비교하면 Langmuir 등온흡착식의 경우는 표면전하의 영향을 고려하지 못할 뿐만 아니라 그 복잡성으로 인하여 Freundlich 등온흡착식에 비하여 선호성이 떨어진다. 하지만 Langmuir 등온식은 흡착제의 물리·화학적 특성, 흡착능 및 적용성 등의 인자를 포함하고 있다는 이론적인 측면에서는 Freundlich 등온흡착식 보다 더 선호된다고 보고하였다(Lee and Jang, 2004; Choi *et al.*, 2013). Kim 등(2011) 및 Yadav 등(2014)의 연구결과에서도 본 연구결과와 동일한 경향으로 제강슬래그의 중금속에 대한 흡착모델은

Langmuir 등온흡착식이 Freundlich 등온흡착식에 비해 일치한다고 보고된 바 있다.

#### 제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속에 대한 흡착패턴

제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속용액에 대한 흡착패턴 연구결과는 제강급랭슬래그의 단일 및 복합 중금속 표준용액에서 단위 g당 흡착량의 결과를 이용하여 3D simulation으로 조사되었으며, 그 결과는 Fig. 4에서 보는 것과 같다. 단일 용액에서 Cu 및 Cd는 Zn에 비해 상대적으로 흡착능이 증가하는 패턴을 보였으나 복합 용액에서는 Cd는 Cu와의 경쟁으로 인하여 흡착능이 현저하게 감소하는 패턴을 확인할 수 있었다. 이와 같이 단일 및 복합 중금속 용액에서 각각의 금속은 서로 다른 패턴을 보이는 것을 알 수 있었고, 각 금속간의 경쟁관계는 흡착패턴에 지배적인 영향을 주는 것으로 판단된다.

#### 요약

본 연구는 산업폐기물의 일종인 제강급랭슬래그의 중금속 폐수처리를 위한 여재로서의 활용도를 높이고자 단일 및 복합 중금속용액에 대한 제강급랭슬래그의 경쟁흡착특성을 조사하였다. Freundlich 등온흡착식을 이용한 Cd, Cu 및 Zn의 흡착능은 단일 용액일 때 각각 2.21, 2.56 및 0.89이었으며, 복합 용액일 때는 각각 0.31, 1.28 및 0.37이었으며, Langmuir 등온흡착식을 이용한 제강급랭슬래그의 최대흡착능은 단일 용액일 때 Cu(16.6 mg/g) > Cd(8.1 mg/g) > Zn(6.2 mg/g)순이었으며, 복합 용액일 때 Cu(14.5 mg/g) >> Zn(1.3 mg/g) > Cd(0.6 mg/g)이었다. Freundlich와 Langmuir 등온흡착식은 모두 동일한 경향으로 단일 용액에서 최대흡착능에 비해 복합 용액일 때 흡착능은 감소하는 경향이었다. 특히 Cu의 경우는 단일 용액에 비해 복합용액일 때 흡착능이 12.6% 정도로 약간 감소하였으나, Cd 및 Zn의 경우는 단일 용액에 비해 복합 용액일 때 흡착능이 각각 92.6% 및 79.0% 정도로 현저하게 감소함을 알 수 있었다. 이상의 결과를 미루어 볼 때, Cd 및 Zn은 경쟁 이온이 없는 단일 용액에서는 흡착제에 대해 높은 흡착능을 보였으나, 복합 용액에서는 경쟁관계인 Cu에 의해 상대적으로 흡착능이 감소한 것으로 판단된다.

제강급랭슬래그의 단일 및 복합중금속 용액에서 Cd, Cu 및 Zn의 흡착량은 전반적으로 Langmuir 등온흡착식이 Freundlich 등온흡착식에 비해 잘 일치하였으며, 또한 단일 및 복합중금속 용액에서 각 금속의 흡착패턴은 각 금속의 경쟁으로 인하여 서로 다른 패턴을 가지는 것을 알 수 있었다.

따라서 제강급랭슬래그는 중금속 폐수처리를 위한 여재로 충분히 활용이 가능할 것으로 판단된다.

#### Acknowledgment

This work was supported by Gyeongnam National University of Science and Technology Grant 2015.

## References

- Bohn, H., McNeal, G., & O'connor, G. (1979). *Soil Chemistry*. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Choi, I. W., Seo, D. C., Kang, S. W., Lee, S. G., Seo, Y. J., Lim, B. J., Heo, J. S., & Cho, J. S. (2013). Adsorption characteristics of heavy metals using sesame waste biochar. *Korean Journal Soil Science Fertilizer*, 48(1), 8-15.
- Covelo, E. F., Vega, F. A., & Andrade, M. L. (2007). Simultaneous sorption and desorption of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in acid soils I. Selectivity sequences. *Journal of Hazardous Materials*, 147(3), 852-861.
- Fontes, M. P. F., & Gomes, P. C. (2003). Simultaneous competitive adsorption of heavy metals by the mineral matrix of tropical soils. *Applied Geochemistry*, 18(6), 795-804.
- Frohne, T., Rinklebe, J., & Diaz-Bone, R. A. (2014). Contamination of floodplain soils along the Wupper River, Germany, with As, Co, Cu, Ni, Sb, and Zn and the impact of pre-definite redox variations on the mobility of these elements. *Soil and Sediment Contamination*, 23(7), 779-799.
- Gupta, V. K., Jain, C. K., Ali, I., Sharma, M., & Saini, V. K. (2003). Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste. *Water Research*, 37(16), 4038-4044.
- Karami, H. (2013). Heavy metal removal from water by magnetite nanorods. *Chemical Engineering Journal*, 219, 209-216.
- Kim, D. H., & Yim, S. B. (2012). Removal characteristics of heavy metals in acid wastewater by ceramics using natural zeolite and converter slag. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 34(4), 239-246.
- Kim, E. H., Rhee, S. S., Lee, G. H., Kim, Y. W., Park, J. B., & Oh, M. H. (2011). Assessment of the sorption characteristic of cadmium onto steel-making slag simulated sea water using batch experiment. *Journal of Korean Geotechnical Society*, 27(4), 43-50.
- Kim, S. U., Choi, I. W., Seo, D. C., Han, M. H., Kang, B. H., Heo, J. S., Sohn, B. K., & Cho, J. S. (2005). Biosorption of heavy metal in aqueous solution by heavy metal tolerant microorganism isolated from heavy metal contaminated soil. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 24(4), 379-385.
- Lee, S. H., & Jang, J. H. (2004). Preliminary Study on the development of phosphorus removal process by converter and furnace slags. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 18(2), 137-144.
- McBride, M. B., Martinez, C. E., Topp, E., & Evans, L. (2000). Trace metal solubility and speciation in a calcareous soil 18 years after no-till sludge application. *Soil Science*, 165(8), 646-656.
- Mohapatra, M., & Anand, S. (2010). Synthesis and applications of nano-structure iron oxides/hydroxides-a review. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(8), 127-146.
- Na, C. K., Han, M. Y., & Park, H. J. (2011). Applicability of theoretical adsorption models for studies on adsorption properties of adsorbents[I]. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 33, 606-616.
- Park, J. H., Seo, D. C., Kim, S. H., Park, M. G., Kang, B. H., Lee, S. W., Lee, S. T., Choi, I. W., & Cho, J. S. (2014). Phosphorus adsorption characteristic of ferronickel and rapid cooling slags. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 33(3), 176-184.
- Romkens, P. F. A. M., Guo, H. Y., Chu, C. L., Liu, T. S., Chiang, C. F., & Koopmans, G. F. (2009). Characterization of soil heavy metal pools in paddy fields in Taiwan: chemical extraction and solid-solution partitioning. *Journal of Soils and Sediments*, 9(3), 216-228.
- Saha, U. K., Taniguchi, S., & Sakurai, K. (2002). Simultaneous adsorption of cadmium, zinc, and lead on hydroxyaluminum- and hydroxyaluminosilicate-montmorillonite complexes. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), 117-128.
- Seo, D. C., Jang, B. I., Jo, I. S., Lim, S. C., Lee, H. J., Cho, J. S., Kim, H. C., & Heo, J. S. (2006). Selection of optimum water plant in constructed wetland by natural purification method for municipal sewage treatment. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 25(1), 25-33.
- Seo, D. C., Yu, K., & DeLaune, R. D. (2008). Comparison of monometal and multimetal adsorption in Mississippi River alluvial wetland sediment: Batch and column experiments. *Chemosphere*, 73(11), 1757-1764.
- Shi, G., Chen, Z., Xu, S., Zhang, J., Wang, L., Bi, C., & Teng, J. (2008). Potentially toxic metal contamination of urban soils and roadside dust in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 156(2), 251-260.
- Usman, A. R. A., (2008). The relative adsorption selectivities of Pb, Cu, Zn, Cd and Ni by soils developed on shale in New Valley, Egypt. *Geoderma*, 144(1), 334-343.
- Veeresh, H., Tripathy, S., Chaudhuri, D., Hart, B. R., & Powell, M. A. (2003). Competitive adsorption behavior of selected heavy metals in three soil types of India amended with fly ash and sewage sludge.

- Environmental Geology, 44(3), 363-370.
- Yadav, S., Srinvastava, V., Banerjee, S., Gode, F., & Sharma, Y. C. (2013). Studies on the removal of nickel from aqueous solutions using modified reverbed sand. Environmental Science and Pollution Research, 20(1), 558-567.
- Zhao, X. Y., Zhu, Y. J., Zhao, J., Lu, B. Q., Chen, F., Qi, C., & Wu, J. (2014). Hydroxyapatite nanosheet-assembled microspheres: Hemoglobin-templated synthesis and adsorption for heavy metal ions. Journal of Colloid and Interface Science, 416, 11-18.