

Research Article



CrossMark

Open Access

## 중금속 오염 토양에서 재배한 주요 작물별 가식부 중금속 축적 농도 및 생물농축계수

임가희<sup>1</sup>, 김계훈<sup>1\*</sup>, 서병환<sup>2</sup>, 김권래<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>서울시립대학교 자연과학대학 환경원예학과, <sup>2</sup>경남과학기술대학교 생명과학대학 농학한약자원학부

### Heavy Metal Accumulation in Edible Part of Eleven Crops Cultivated in Metal Contaminated Soils and Their Bio-concentration Factor

Ga-Hee Lim<sup>1</sup>, Kye-Hoon Kim<sup>1\*</sup>, Byoung-Hwan Seo<sup>2</sup>, and Kwon-Rae Kim<sup>2\*</sup> (<sup>1</sup>Department of Environmental Horticulture, College of Natural Science, University of Seoul, Seoul 02504, Korea, <sup>2</sup>Department of Agronomy and Medicinal Plant Resources, College of Bioscience, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea)

Received: 6 October 2015 / Revised: 17 October 2015/ Accepted: 12 November 2015

Copyright © 2015 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.

#### Abstract

**BACKGROUND:** The current study was conducted to examine the species specific accumulation of Cd and Pb in 11 crop species (Soybean, Sesame, Corn, Polished rice, Carrot, Potato, Garlic, Spring onion, Chinese leek, Red pepper, Eggplant), through cultivating them under the same condition with metal contaminated soils.

**METHODS AND RESULTS:** Eleven crop species were cultivated in three different soils contaminated with Cd and Pb and harvested. Edible parts of each crop was pretreated and analyzed to determine Cd and Pb concentrations, and subsequently bioconcentration factors (BCFs) were calculated. In general, the crops of which seeds are used as food showed high concentrations of both Cd and Pb. For instance, Cd concentrations in crops cultivated in Soil A was in the order of soybean (0.432 mg kg<sup>-1</sup>) > sesame

(0.385) > polished rice (0.176) > carrot (0.116) > corn (0.060) > red pepper > (0.047) > potato (0.044) > egg plant (0.025) > garlic (0.023) > spring onion (0.016) > Chinese leek (0.011). BCFs showed the same order.

**CONCLUSION:** From this study, it can be conclude that seeds plants should not be cultivated in Cd and Pb contaminated soils to secure food safety from metal contaminated soils.

**Key words:** Abandoned Mining Areas, Agricultural soils, Cadmium, Heavy metals, Lead, Phytoavailability

#### 서론

토양 및 수계환경에 있어서 광산활동은 중금속 오염의 주요원인이다(Navarro *et al.*, 2008; Zhuang *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2014). 광미, 폐석, 광산폐수 등의 환경 유입으로 인해 광산인근 지역의 수생생물과 농작물의 중금속 노출 위험도가 일반지역 보다 높은 것으로 보고되고 있다(Yang *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2005; Kachenko and Singh, 2006; Cai *et al.*, 2015).

농작물의 근권으로부터 흡수된 중금속은 지상부로 전이되어 인간이 실제 섭취하는 가식부에 축적되고 이를 섭취함으로써 인간의 건강에 위험요소가 되고 있다(Zhuang *et al.*,

\*Corresponding author: Kwon-Rae Kim  
Phone: +82-55-751-3223; Fax: +82-55-751-3229;  
E-mail: kimkr419@gntech.ac.kr

\*Co-corresponding author: Kye-Hoon Kim  
Phone: +82-2-6490-2689; Fax: +82-2-6490-2681;  
E-mail: johnkim@uos.ac.kr

Table 1. Physico-chemical properties of the soils used in this study

Soils	pH (1:5)	EC (dS m <sup>-1</sup> )	DOC (mg kg <sup>-1</sup> )	CEC (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	Texture	Ex. cations (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )			
						Ca	Mg	K	Na
Soil A	6.4	0.8	31.3	17.7	Loam	15.7	2.4	0.4	0.06
Soil B	7.4	1.2	52.4	-	-	-	-	-	-
Soil C	7.8	0.4	28.5	15.1	Silt loam	23.0	0.7	0.1	0.04

2009). 우리나라에는 2,000여 개의 폐광산이 있으며 (MIRECO, 2013), 폐광산 인근 농경지 중 토양환경보전법에 제시된 제 1지역의 우려기준, 대책기준을 초과하는 곳이 논, 밭을 포함하여 200여 곳에 달하고 있다(MOE, 2012). 농림축산식품부에서는 이러한 농경지에서 재배된 농산물 중 식품의약품안전처에서 설정한 농산물 중금속 잔류기준(MFDS, 2009)을 초과한 농산물은 폐기시키는 조치를 취하고 있으나, 이는 기준치를 초과한 농산물의 유통을 일시적으로 막는 것일 뿐 근본적인 대책은 될 수 없다. 따라서 잠재적으로 오염 가능성이 있는 농산물 생산을 제어하고 모니터링 하는 관리 방안이 필요한데 이는 작물의 생산과정에서부터 이루어져야 한다(Kim *et al.*, 2012).

재배환경에서의 관리방안을 마련하기 위해서는 작물이 토양으로부터 흡수한 중금속을 지상부로 전이시키는 양상, 그리고 토양 내 중금속을 작물이 흡수, 전이되기 쉬운 형태로 전환시키는 데 있어 영향을 미치는 토양인자 등을 작물별로 파악하는 기초연구가 필요하다(Yang *et al.*, 2009). 미국EPA (Environmental Protection Agency)는 토양-작물-인체로의 중금속 전이를 고려하여 토양 중 중금속 기준(SSLs, Screening Levels)을 설정할 필요가 있고, 이를 위해서 식용작물의 생물농축계수(bioconcentration factor)를 적용할 것을 추천하고 있다(USEPA, 1996). 또한 국외연구 사례에서는 오염농경지에서 생산되는 농산물의 안전성확보를 위해 재배 가능한 작물의 우선순위를 제시하고 있기도 하다(Singh *et al.*, 2012). 반면 우리나라는 토양의 중금속 오염도 및 작물별 중금속 흡수를 차이를 고려하지 않고 관행작물을 지속적으로 재배하고 있다. 작물이 토양에서 중금속을 흡수하여 체내에서 이동 및 축적하는 기작은 식물종, 식물의 생육 단계, 토양과 중금속 형태의 유형, 토양 조건, 기후 등의 환경요소에 의해 좌우된다(Chang *et al.*, 1984; Khairiah *et al.*, 2004). 따라서 생산되는 작물의 중금속 안전성을 확보하기 위해서는 동일한 조건에서 생산된 작물별 가식부에 축적된 중금속 농도 순위와 토양-작물간의 중금속 전이계수인 생물농축계수 (Bioconcentration factor, BCF) 순위를 산정할 필요가 있다. 이와 같은 과정을 통해서 주요 작물별 중금속 흡수 및 이행을 파악할 수 있고 오염된 농경지에서도 재배가 가능한 추천작물 제시가 가능하다.

본 연구는 작물별 가식부에 축적되는 중금속 농도 및 각 작물의 생물농축계수를 비교·검토하여 오염 농경지에서 재배 가능한 작물의 우선순위를 제시하기 위해서 실시하였다. 이를 위해서 대표적인 11개 작물을 선정하였고, 동일한 중금속

오염 농경지 토양에서 재배실험을 진행하였다.

## 재료 및 방법

### 공시 토양 특성

카드뮴, 납 등으로 오염된 광산인근 농경지 토양 2 종류 (토양 A, C)를 채취하였고, 토양 A에 고토석회를 2%를 첨가하여 공시 토양B를 조제하였다. 토양 B를 조제한 목적은 중금속 총농도가 동일한 토양에 pH변화를 유도하여 식물유효태 중금속 농도가 서로 다른 시험토양(토양 A, B)을 구성하기 위함이었다. 토양 중금속 총농도는 같되 식물유효태 중금속 함량이 다른 두 토양을 가지고 재배실험을 진행한 후, 각 작물의 가식부 중금속 축적 농도를 비교하였다. 토양 C는 토양 A, B에 비해 카드뮴이 2배, 납이 9배 가량 많이 함유된 토양이었다. 공시 토양의 일반적인 화학성과 중금속 함량을 Table 1에 나타내었다.

### 공시 작물

고추(*Capsicum annuum* L.), 가지(*Solanum melongena* L.), 당근(*Daucus carota* subsp. *sativus*), 감자(*Solanum tuberosum* L.), 콩(*Glycine max* L.), 참깨(*Sesamum indicum* L.), 부추(*Allium tuberosum* L.), 파(*Allium fistulosum* L.), 옥수수(*Zea mays* subsp. *Mays* L.), 마늘(*Allium sativum* L.), 쌀(*Oryza sativa* L.) 등 우리나라 농경지에서 대표적으로 재배되고 있는 11개 작물을 공시작물로 선정하여 실험에 이용하였다.

### 처리 및 작물재배

공시 토양 A, B, C 를 8 L 화분에 각각 충전하고, 공시 작물 11종을 각 처리구 (토양 A, B, C) 당 3개의 Pot(3반복)에 각각의 작부시기에 맞추어 파종, 이식, 이앙 하였다. 각각의 작물은 작물별로 적합한 수확시기에 수확하였고, 작물 수확 후 토양시료도 채취하였다. 토양시료는 건조 후 2mm 체 거름하여 분석에 이용하였다.

### 토양 분석

토양 pH는 토양과 증류수를 1:5(w:v) 비율로 혼합하여 교반시키고 1시간 후 pH meter(MP220, Mettler Toledo, Switzerland)로 측정하였다. 토양 중 용존유기탄소 (dissolved organic carbon, DOC) 함량은 토양 10 g을 20 mL의 증류수로 2시간 진탕 후 여과하여 TOC 분석기

**Table 2. Total heavy metal concentrations and phytoavailable concentrations in the soils used in this study**

		Soil A	Soil B	Soil C	<sup>a</sup> Background value	<sup>b</sup> Standard limit
Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	Total	7.5	7.5	15.2	0.19	4.0
	Phytoavailable	0.022	0.006	0.019	-	-
Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	Total	156	156	1374	16.0	200
	Phytoavailable	0.006	0.004	0.014	-	-

a. Forest soil based natural background value reported by Yoon *et al.* (2009)

b. Standard limit registered in Soil Conservation Act 2009, Korea (MoE, 2015)

(2100S, Analytik Jena, Germany)로 측정하였다.

토양 중 중금속(Cd, Pb) 농도는 총농도와 식물유효태 농도로 구분하여 측정하였다. 중금속 총농도는 토양 1 g에 9 mL의 왕수(*aqua regia*)를 넣고 흑연블럭분해기(OD-98-001, ODLAB, Korea)로 분해한 후(NAAS, 2010), 분해 용액을 Whatman No. 42(pore size 2.5 μm) 여과지로 여과하여 용액 중 중금속 함량을 ICP-OES(8300DV, Perkin Elmer, USA)로 측정하였다. 토양 중 중금속의 식물유효태 함량을 측정하기 위해서 1 M NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 추출법(DIN, 1995)을 이용하였다. 토양 10 g을 20 mL 1 M NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>로 추출하여 여과한 후 중금속 함량을 ICP-OES(8300DV, Perkin Elmer, USA)로 측정하였다.

#### 식물체 분석

수확한 11종의 식물체 중 고추, 가지, 당근, 감자, 부추, 파, 마늘의 가식부 시료는 수돗물과 증류수로 씻고 70°C 오븐에서 72시간 동안 건조한 후 분쇄하여 분석용 시료로 이용하였다. 건조하기 전, 가식부의 수분함량을 측정하기 위해서 세척 후 물기를 제거한 상태에서의 무게와 건조 후 무게를 측정하였다. 그 외 콩, 참깨, 옥수수, 쌀은 자연건조시킨 후 분쇄하여 분석에 이용하였다. 작물 가식부의 중금속 농도는 식물체 시료 0.5 g과 진한 질산(conc. HNO<sub>3</sub>) 10 mL를 분해관에 넣고 블럭분해기(OD-98-001, ODLAB, Korea)를 이용하여 완전 분해한 후 Whatman No. 42 여과지로 걸러서 분해액 중의 중금속을 ICP-OES(8300DV, Perkin Elmer, USA)로 측정하였다.

#### 데이터 분석

토양 처리구별, 작물별 가식부의 중금속 평균 농도는 식품의약품안전처에서 설정한 작물별 농산물 기준과 동일하게 비교하기 위하여 생중량을 기준으로 환산하였다. 작물별 생물농축계수(BCF)는 다음과 같은 수식으로 계산하였다(Cui *et al.*, 2004).

$$BCF = \frac{M_{crop} (mg kg^{-1}, \text{fresh weight or dry weight})}{M_{soil} (mg kg^{-1}, \text{dry weight})}$$

생물농축계수는 토양 내 중금속 농도에 대한 작물의 가식부에 축적된 중금속 농도의 비율로 정의되고, 이는 토양에서

작물로 중금속 전이 가능성을 평가하기 위한 지표이다(Chumbley and Unwin, 1982; Alloway *et al.*, 1990). 토양 내 중금속 농도는 왕수분해에 의한 총농도와 1 M NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>에 의한 유효태 농도로 구분하여 생물농축계수를 산정하였다. 또한 식물체 시료의 건조과정으로 인한 수분함량 변화를 고려하여 건물중 중금속 함량 측정 후 생체중 기준으로 환산(수분함량 보정)하여 수식에 적용하였다. 단, 종자이용 작물인 콩, 참깨, 옥수수, 쌀은 건물중(자연건조 후 무게)을 기준으로 생물농축계수를 산정하였다.

## 결과 및 고찰

### 시험토양의 이화학적 특성 및 중금속 함량

토양 내 중금속의 거동과 유효도에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 토양 pH로 알려져 있는데, 토양 A의 pH는 6.4로 약 산성 토양이었고, 토양 B는 석회 사용에 의해 pH가 토양 A에 비해 1단위 상승하여 7.4로 나타났다. 토양 C는 pH는 7.8로 측정되었다(Table 1).

토양 A, B의 카드뮴은 7.5 mg kg<sup>-1</sup>으로 토양환경보전법 제1지역의 카드뮴 우려기준 4 mg kg<sup>-1</sup> 보다 2배 가량 높은 수치였고, 납은 제 1지역의 우려기준 200 mg kg<sup>-1</sup>을 초과하지 않았으나 우리나라 배경농도 16.0 mg kg<sup>-1</sup> (Yoon *et al.*, 2009)의 10배에 근접한 수치를 나타냈다(Table 2). 토양 C는 카드뮴 농도가 15.2 mg kg<sup>-1</sup>으로 토양환경보전법 제 1지역의 카드뮴 우려기준 보다 3배 이상 높았고, 납은 우려기준보다 6배 이상, 대책기준(600 mg kg<sup>-1</sup>)보다 2배 이상 높은 수치를 보였다. 이와 같이 토양 C의 높은 카드뮴 총농도는 유효태 농도에 반영되어 3가지 토양 중 카드뮴 유효태 농도가 가장 높았다.

토양 B는 토양 A에 석회고토를 처리하여 토양 pH를 증가시키고 이로 인해서 중금속의 유효태 농도를 저감시킨 처리구로 중금속 유효도의 차이에 의한 작물의 중금속 흡수 변화를 확인할 수 있는 처리구이다. 토양 B는 토양 A에 비해 pH가 1단위 가량 상승한 것으로 나타나 이로 인하여 카드뮴의 유효태 농도는 약 73%, 납의 유효태 농도는 약 33% 낮아진 것을 확인할 수 있었다(Table 2). 이와 같이 2가지 시험토양의 유효태 중금속 함량의 차이 및 유효도 차이에 의해서 각 작물의 가식부에 축적되는 중금속의 농도가 서로 상이할 것으로 예상하였다.

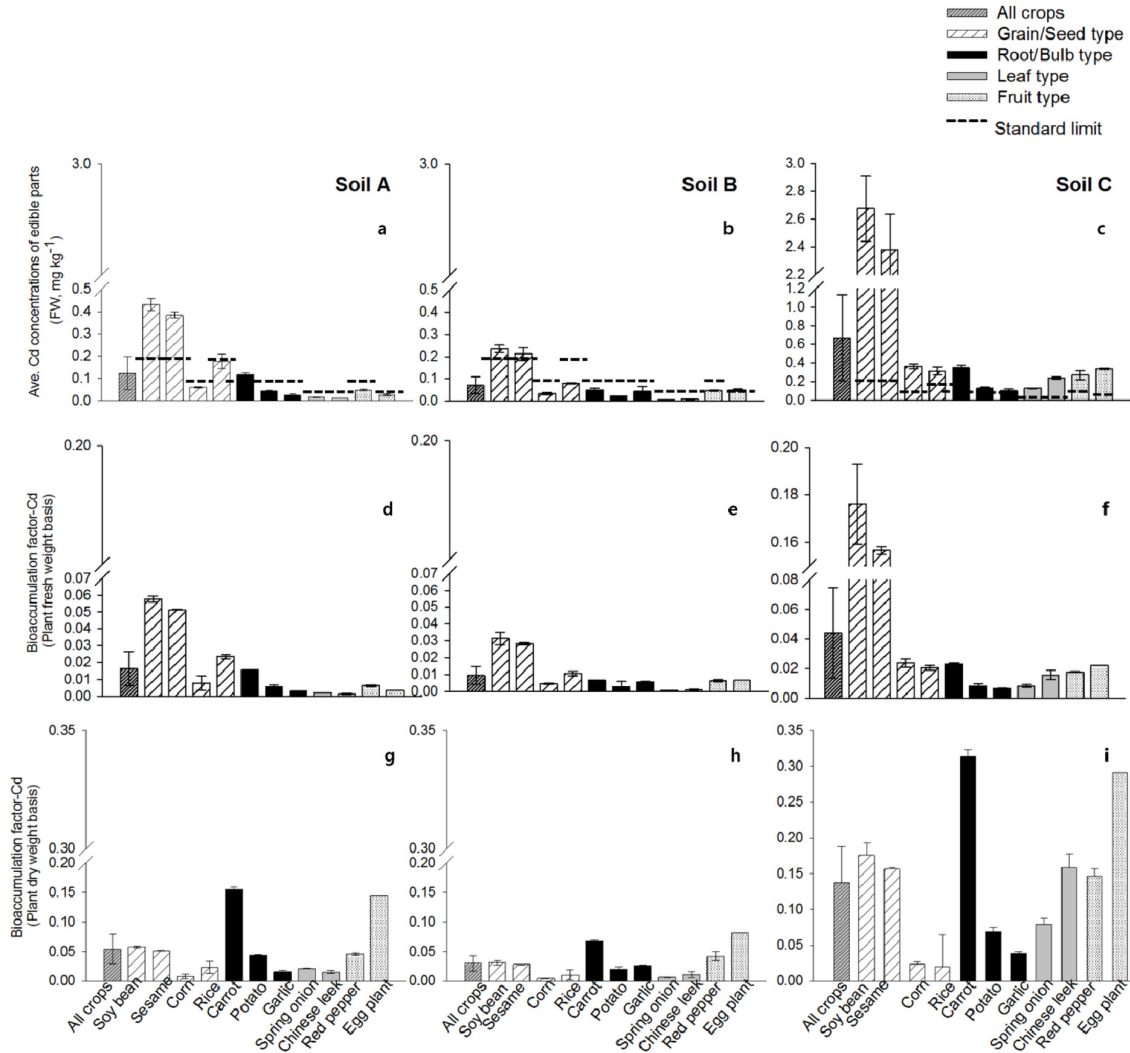


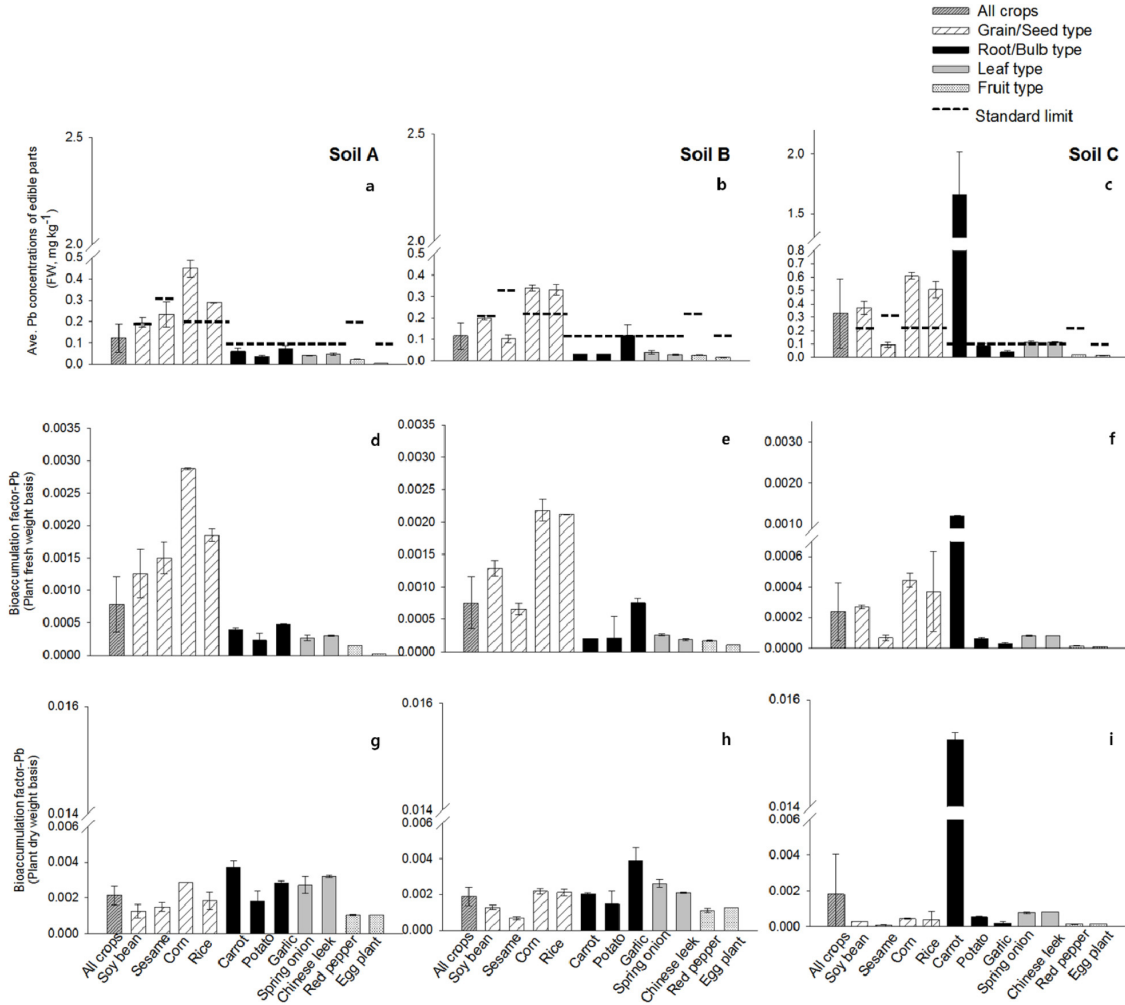
Fig. 1. Cadmium concentrations in edible part of crops and bioconcentration factors basis on fresh weight (FW) and dry weight (DW).

작물별 가식부 중금속 농도분포

카드뮴

토양 A 실험구에서 전체 작물의 카드뮴 농도는 0.123 mg kg<sup>-1</sup>으로 작물별 가식부 카드뮴 농도의 평균값은 콩(0.432 mg kg<sup>-1</sup>, 이후 단위 생략)>참깨(0.385)>쌀(0.176)>당근(0.116)>옥수수(0.060)>고추>(0.047)감자(0.044)>가지(0.025)>마늘(0.023)>파(0.016)>부추(0.011) 순으로 나타났다(Fig. 1a). 카드뮴을 가장 많이 흡수하는 작물은 콩이었으며, 식품의약품안전처에서 설정한 작물별 농산물 카드뮴 기준(MFDS, 2009) 보다 높은 농도를 나타낸 작물은 콩, 참깨, 당근이었다. 반면에 카드뮴 평균값이 기준치 이하를 나타낸 작물은 옥수수, 쌀, 감자, 마늘, 파, 부추, 고추, 가지였다(Fig. 1a). 토양 B 실험구에서 전체작물의 카드뮴 농도는 0.071 mg kg<sup>-1</sup>으로 토양 A 실험구의 전체작물 카드뮴 평균 축적 농도보다 약 42% 감소된 수치를 보여 토양 내 중금속 유효태 감소에 따른 작물의 중금속 흡수 저감을 확인할 수 있었다. 토양 B에서 작물별 가

식부 카드뮴 농도 평균값은 콩(0.235 mg kg<sup>-1</sup>, 이후 단위 생략)>참깨(0.211)>쌀(0.079)>당근(0.049)>가지(0.049)>고추(0.047)>마늘(0.044)>옥수수(0.034)>감자(0.021)>부추(0.008)>파(0.005) 순으로 나타났다(Fig. 1b). 유효태 농도를 저감시킨 토양 B에서도 토양 A에서와 마찬가지로 카드뮴을 가장 많이 흡수하는 작물은 콩이었으며, 콩과 참깨의 카드뮴 축적 농도는 식품의약품안전처에서 설정한 작물별 농산물 카드뮴 기준을 여전히 초과 하였다(Fig. 1b). 토양 C는 토양 A, B에 비해 토양 카드뮴 전함량과 유효태 함량이 모두 높았다 (Table 2). 따라서 작물의 카드뮴 농도 또한 전체작물 평균이 0.67 mg kg<sup>-1</sup>으로 3가지 토양 처리구 중 가장 높게 나타났다. 또한 11종 모든 작물의 카드뮴 농도가 식품의약품안전처에서 설정한 작물별 농산물 카드뮴 기준보다 높은 농도를 나타냈다. 그 중 콩, 참깨는 기준치보다 10배 이상의 높은 축적 농도를 보였다. 토양 C에서 작물별 가식부 카드뮴 농도 평균값은 콩(2.675 mg kg<sup>-1</sup>, 이후 단위 생략)>참깨(2.378)>옥수수(0.362)>당근(0.349)>가지(0.335)>쌀(0.310)>고추(0.268)>



**Fig. 2.** Lead concentrations in edible part of crops and bioconcentration factors basis on fresh weight (FW) and dry weight (DW).

부추(0.239)>파(0.126)>감자(0.126)>마늘(0.100) 순으로 나타났다(Fig. 1c). 콩, 참깨, 옥수수는 토양 A 처리구보다 6배 가량 높은 축적 농도를 보였고, 특히 파, 부추, 고추, 가지가 각각 8배, 22배, 6배, 13배의 축적 농도를 보여 엽채류, 과채류가 토양 중 카드뮴 전함량 변이에 따른 작물의 축적 농도 변화가 큰 것을 알 수 있었다.

**납**

토양 A의 전체작물 납 농도 평균값은 0.122 mg kg<sup>-1</sup>으로 나타났고, 작물별 가식부 납 농도의 평균값은 옥수수(0.448)>쌀(0.289)>참깨(0.233)>콩(0.196)>마늘(0.074)>당근(0.061)>부추(0.047)>파(0.041)>감자(0.036)>고추(0.023)>가지(0.004)순으로 나타났(Fig. 2a). 전체 작물 중 옥수수, 쌀의 납 농도가 기준치 0.2 mg kg<sup>-1</sup>(MFDS, 2009)보다 높은 수치를 나타냈으며, 중자를 가식부로 이용하는 곡류, 두류, 유지방 작물군이 타작물보다 높은 수치를 나타냈다. 반면 고추, 가지 등의 과채류에는 타작물에 비해 낮은 농도를 나타냈다. 토양 B의 전체작물 납 농도 평균값은 0.118 mg kg<sup>-1</sup>으로 나타났

으며, 카드뮴에 비하여 토양 중 중금속 유효도 저감에 따른 작물의 중금속 흡수 저감 효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 토양 중 식물유효태 함량을 측정된 결과에서도 마찬가지로 나타났다. 토양 중 유효태 카드뮴 농도에서 토양 A와 B의 농도 차이가 72%인 반면, 납은 33% 차이로 카드뮴에 비해 유효도 감소율이 작았다(Table 2). 토양B에서의 작물별 가식부 납 농도는 옥수수(0.340)>쌀(0.330)>콩(0.200)>마늘(0.118)>참깨(0.103)>파(0.041)>감자(0.032)>당근(0.031)>부추(0.029)>고추(0.026)>가지(0.016)순으로 나타났다(Fig. 2b). 이 중 옥수수, 쌀, 콩, 마늘이 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 토양 C에서 전체작물의 납 평균 농도는 0.329 mg kg<sup>-1</sup>으로 나타났으며, 토양 A와 B 처리구의 전체작물 납 농도에 비해 3배 가까운 수치를 보였다. 이는 토양 중 납 전함량 및 유효태함량의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 토양 C는 토양 A, B에 비해 납 전함량이 9배 높고, 식물유효태 함량은 2~3배 높았다(Table 2). 높은 전함량과 유효태함량은 작물의 중금속 축적에 영향을 미치는 직접적인 요소이다. 식물에 의해 흡수되고 축적되는 중금속 농도는 토양 중 유효태 중

금속 함량에 의해 좌우되고(Ruby *et al.*, 1993; Kim *et al.*, 2012), 식물에 의해 흡수되어 감소한 토양수 속 중금속(식물 유효태 중금속)을 전함량 내 중금속으로부터 보충시켜 식물 유효태 중금속 함량이 지속적으로 증가되는 현상이 나타나 토양 A, B에 비해 높은 납 축적 농도를 보인 것으로 판단된다. 특히 당근은 토양 A처리구에 비해 27배 높은 축적 농도를 보여 토양 중 납 전함량 변화에 가장 영향을 많이 받은 작물로 조사되었다. 토양 C에서의 작물별 가식부 납 농도는 당근(1.662)>옥수수(0.610)>쌀(0.508)>콩(0.372)>파(0.113)>부추(0.112)>참깨(0.093)>감자(0.087)>마늘(0.041)>고추(0.020)>가지(0.014)순으로 나타났다(Fig. 2c). 이 중 당근, 콩, 옥수수, 쌀, 파, 고추, 부추는 기준치를 초과하였으며, 과채류인 고추와 가지는 11가지 작물 중 가장 낮은 축적 농도를 보였다.

11가지 작물의 카드뮴과 납 축적 농도에서 공통적으로 옥수수, 참깨, 쌀, 콩과 같은 곡류, 두류, 유지류, 즉 가식부 부위가 종자인 작물의 중금속 축적농도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 가식부 부위가 종자인 작물은 중금속 오염토양에서 재배하는 것을 지양해야 할 것으로 판단되었다. 또한 일반적으로 작물의 중금속 흡수 부위인 지하부는 지상부에 비해 중금속 축적 농도가 높아(Liao, 1993) 뿌리>잎>지상부(줄기)>과실 순으로 축적 농도가 높은 것으로 알려져 있는데(Cheng *et al.* 2002), 본 연구에서 역시 가식부가 뿌리인 근채류(당근, 감자) 및 마늘(인경채류) 중 당근은 납의 중금속 전함량 변화에 가장 민감한 작물로 판단되었다. 따라서 콩, 참깨, 옥수수, 쌀, 당근은 중금속 오염 농경지에서 재배가 지양되어야 할 작물로 판단되었다.

근권에서 지상부로의 금속 전이는 Heavy metal transporting ATPase(HMAs)가 ATP 가수분해를 통해 전이금속이온을 전기화학적 구배에 역행하여 전송하는데 중요한 역할을 하는데(Verbruggen *et al.*, 2009), 이 때 전송하는 금속이온에 따라 HMAs가 두 그룹으로 나누어지게 되고, 아연, 코발트, 카드뮴, 납이 2개의 금속이온으로 같은 그룹으로 분류된다(Axelsen and Palmgren, 2001). 따라서 카드뮴과 납 모두에서 동일한 작물들이 타작물에 비해 축적 농도가 높았던 것으로 판단된다.

반면 엽채류(파, 부추)와 과채류(가지, 고추)는 상대적으로 중금속 축적 농도가 낮은 것으로 조사되어 중금속으로 오염된 농경지에서 이들 작물을 재배하는 것이 농산물 안전성 측면에서 유리할 것으로 판단되었다.

### 작물별 생물농축계수(BCFs)

생물농축계수는 각 식물종(plant species)이 주변환경으로부터 식물 조직 내로 중금속을 축적하는 효율을 의미한다(Ladislav *et al.*, 2012). 즉, 작물 중금속 농도에 대한 토양 중 중금속 농도의 비를 나타낸 것으로 이 수치는 각 중금속에 대한 작물별 흡수/축적 정도를 나타내고, 토양에서 식물로의 중금속 전이는 먹이사슬 내에서 인체 노출의 주원인이다(Zhuang *et al.*, 2009). 미국 EPA(Environmental Protection

Agency)에서는 토양, 작물, 인체의 유기적인 관계를 고려하여 토양 중 중금속 기준(SSLs, Screening Levels)을 설정하였는데, 이 때 기준 산출을 위해서 작물의 생물농축계수(bioconcentration factor)를 변수로 이용한다(USEPA, 1996).

본 연구에서는 토양 종류별, 각 작물별로 생물중 기준과 건물중 기준으로 구분하여 각각의 생물농축계수를 산정하였다. 건물중 기준의 생물농축계수를 별도로 계산한 이유는 건물중으로 산정한 생물농축계수(USEPA, 1996)를 토양 중 중금속 기준 설정에 이용하는 미국 EPA 데이터와 비교하기 위함이었다(Fig. 1, 2).

토양 A, B에서 생중량 기준 카드뮴의 생물농축계수는 주요 변수가 작물의 중금속 농도이다. 두 토양의 토양 중금속 함량이 동일하므로 유효도 변화에 따른 작물 내 축적 중금속 함량 차이에 따라 생물농축계수가 변화 한다. 따라서 작물별 카드뮴 생물농축계수는 작물별 카드뮴 농도와 동일하게 콩(0.058)>참깨(0.051)>쌀(0.024)>당근(0.016)>옥수수(0.008)>고추>(0.006)감자(0.006)>가지(0.003)>마늘(0.003)>파(0.002)>부추(0.001) 순으로 높았다(Fig. 1d). 토양 B에서 작물별 카드뮴 생물농축계수는 콩(0.031)>참깨(0.028)>쌀(0.011)>당근(0.007)>가지(0.007)>고추(0.006)>마늘(0.006)>옥수수(0.004)>감자(0.003)>부추(0.001)>파(0.001) 순으로 높았다(Fig. 1f). 토양 중 카드뮴 유효도 감소로 인한 생물농축계수는 전체작물 기준으로 42% 감소하였고, 각 작물별로 콩, 참깨, 옥수수, 쌀, 당근, 감자, 파, 부추의 생물농축계수가 31~67% 감소한 결과를 보였다(Fig. 1d, 1e).

토양 C에서의 각 작물별 카드뮴 생물농축계수는 콩, 참깨에서 가장 높은 농축계수를 나타내었고, 토양 A, B에 비해 평균 3.5배 높은 수치를 보였다(Fig. 1d, 1e, 1f). 이는 토양 C처리구가 토양 A, B처리구에 비하여 작물 내 카드뮴 축적 농도의 증가 비율이 토양 중 카드뮴 농도가 증가 비율보다 더 높았기 때문이다.

토양 A, B의 납 생물농축계수 역시 카드뮴 생물농축계수와 동일하게 토양 중금속 함량이 동일하므로 유효도 변화에 따른 생물농축계수가 차이가 있는 것으로 확인되었다(Fig. 2d, 2e). 콩, 옥수수, 쌀, 당근, 감자, 파, 부추에서 유효도 변화에 따른 생물농축계수 감소를 보였고, 토양 중 중금속 유효도 감소에 따른 생물농축계수가 전체 작물 기준 3.6% 감소하였다. 토양 A에서 작물별 납 생물농축계수는 옥수수(0.0029)>쌀(0.0019)>참깨(0.0015)>콩(0.0013)>마늘(0.0005)>당근>(0.0004)>부추(0.0003)>파(0.0003)>감자(0.0002)>고추(0.0001)>가지(0.0000) 순으로 높았다(Fig. 2d). 토양 B에서 작물별 납 생물농축계수는 옥수수(0.0022)>쌀(0.0021)>콩(0.0013)>마늘(0.0008)>참깨(0.0007)>파(0.0003)>당근(0.0002)>감자(0.0002)>부추(0.0002)>고추(0.0002)>가지(0.0001) 순으로 높았다(Fig. 2e). 토양 A, B에서 모두 옥수수와 쌀이 생물농축계수가 가장 높았으며, 과채류인 고추와 가지가 가장 낮은 생물농축계수를 나타냈다.

토양 C 처리구에서 납 생물농축계수는 납 축적 농도와 동일한 순서로 당근이 가장 높은 생물농축계수(0.0012)를 나타

냈으며, 과채류인 고추(0.00001)와 가지(0.00001)가 가장 낮은 생물농축계수를 나타냈다(Fig. 2f).

미국 EPA에서 설정한 토양 중 중금속 기준에서 이용한 변수인 건물중 기준의 생물농축계수와 본 연구결과의 건물중 기준 생물농축계수를 비교한 결과 미국 EPA에서 제시한 콩의 카드뮴 생물농축계수는 0.004, 옥수수는 0.118, 곡류는 0.008, 근채류는 0.064, 엽채류는 0.364이고(USEPA, 1996), 본 연구결과에서는 콩의 평균 카드뮴 생물농축계수가 0.088, 옥수수가 0.012, 곡류(쌀)가 0.018, 근채류가 0.112인 것으로 나타나 옥수수를 제외한 3가지 작물은 미국 EPA에서 제시한 생물농축계수에 비해 높은 수치를 보였다. 또한 국내의 타 연구에서의 콩의 카드뮴 생물농축계수는 생물기준으로 0.056, 낱 생물농축계수는 0.012인 것으로 조사되었고, 옥수수의 생물농축계수는 카드뮴 0.002, 낱 0, 쌀은 카드뮴 0.099, 낱 0.007, 파의 생물농축계수는 카드뮴 0.019, 낱 0.001인 것으로 나타났는데(Korea Univ., 2013), 본 연구결과에서는 콩의 카드뮴 생물농축계수는 생물기준으로 0.088, 낱 생물농축계수는 0.001, 옥수수의 생물농축계수는 카드뮴 0.012, 낱 0.002, 쌀의 생물농축계수는 카드뮴 0.018, 낱 0.001, 파의 생물농축계수는 카드뮴 0.004, 낱 0인 것으로 나타나 작물별로 상이한 수치를 보였다. 이와 같이 생물농축계수가 각 연구마다 상이하게 나타나는 원인은 토양 내 중금속 전함량 및 유효태함량의 차이와 작물이 재배되는 토양의 이화학적 특성, 토양 내 중금속의 존재형태 및 결합능, 작물의 생리적인 차이에서 기인하는 것으로 볼 수 있다(Zeng et al., 2012). 따라서 토양환경 차이에 따라 작물별 생물농축계수는 각기 다르게 산정될 수 있으며, 안전한 농산물 생산을 위한 작물 선발시 해당 토양에 대한 작물의 생물농축계수를 산정하는 것이 필요하다.

## 결론

본 연구는 우리나라 주요작물 가식부의 중금속 축적 농도 및 생물농축계수를 확인하고 그 결과를 토대로 중금속 오염농경지에서 재배하기에 적합한 작물을 선발하고자 수행하였다.

작물의 가식부에 축적된 중금속 농도 및 생물농축계수로 보아 콩, 참깨, 옥수수, 쌀 등의 종자를 이용하는 작물이 카드뮴과 납에 대하여 고축적 작물군으로 나타났고, 반면에 엽채류인 파와 부추, 과채류인 고추, 가지가 저축적 작물군으로 나타났다. 따라서 우리나라 중금속 오염 농경지에서는 곡류, 두류, 유지류 등의 작물을 재배하는 것은 지양해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 안전한 작물 생산을 위한 관리방안으로 작물별 생물농축계수를 산정하는데 있어, 재배환경 중 토양의 특성을 파악하는 것이 중요하다고 판단하였다. 각기 다른 토양환경 및 중금속 유효도에 따라 작물의 중금속 축적 농도 및 생물농축계수가 상이하기 때문이다. 본 연구에서는 11가지 작물에 국한되어 조사하였으나 이와 같은 시험 연구를 다른 작물로 확대하여 동일한 조건에서 축적 농도 순위 및 생물농

축계수를 산정한 후 데이터베이스를 구축할 필요가 있다. 또한 앞으로 작물의 생물농축계수, 토양의 중금속 유효도 결정요인(토양특성인자 등)을 종합적으로 조사하여 관리기준을 정하고, 작물 가식부의 중금속 축적 농도 및 전이계수와 토양특성인자와의 상관성을 바탕으로 재배환경 관리방안이 마련되어야 할 것이다.

## Acknowledgment

This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ01143503)", National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea and this work was also supported by Gyeongnam National University of Science and Technology Grant in 2015.

## References

- Alloway, B. J., Jackson, A. P., & Morgan, H. (1990). The accumulation of cadmium by vegetables grown on soils contaminated from a variety of sources. *Science of the Total Environment*, 91, 223-236.
- Axelsen, K. B., & Palmgren, M. G. (2001). Inventory of the superfamily of P-type ion pumps in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 126(2), 696-706.
- Cai, L. M., Xu, Z. C., Qi, J. Y., Feng, Z. Z., & Xiang, T. S. (2015). Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near Tonglushan mine in Hubei, China. *Chemosphere*, 127, 127-135.
- Chang, A. C., Page, A. L., Warneke, J. E., & Grgurevic, E. (1984). Sequential extraction of soil heavy metals following a sludge application. *Journal of Environmental Quality*, 13(1), 33-38.
- Cheng, S., Grosse, W., Karrenbrock, F., & Thoennessen, M. (2002). Efficiency of constructed wetlands in decontamination of water polluted by heavy metals. *Ecological Engineering*, 18(3), 317-325.
- Chumbley, C. G., & Unwin, R. J. (1982). Cadmium and lead content of vegetable crops grown on land with a history of sewage sludge application. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 4(3), 231-237.
- Cui, Y. J., Zhu, Y. G., Zhai, R. H., Chen, D. Y., Huang, Y. Z., Qiu, Y., & Liang, J. Z. (2004). Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China. *Environment International*, 30(6), 785-791.

- DIN. (1995). *Soil Quality Extraction of Trace Elements with Ammonium Nitrate Solution*, DIN (Deutsches Institut für Normung) 19730. Germany.
- Kachenko, A. G., & Singh, B. (2006). Heavy metals contamination in vegetables grown in urban and metal smelter contaminated sites in Australia. *Water, Air, and Soil Pollution*, 169(1-4), 101-123.
- Khairiah, J. (2004). The uptake of heavy metals by fruit type vegetables grown in selected agricultural areas. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 7(8), 1438-1442.
- Kim, K. R., Kim, J. G., Park, J. S., Kim, M. S., Owens, G., Youn, G. H., & Lee, J. S. (2012). Immobilizer-assisted management of metal-contaminated agricultural soils for safer food production. *Journal of Environmental Management*, 102(15), 88-95.
- Ladislav, S., El-Mufleh, A., Gérente, C., Chazarenc, F., Andrès, Y., & Béchet, B. (2012). Potential of aquatic macrophytes as bioindicators of heavy metal pollution in urban stormwater runoff. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(2), 877-888.
- Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T. J., Yuan, Z., & Huang, L. (2014). A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment. *Science of The Total Environment*, 468-469, 843-853.
- Liao, Z. (1993). *Environmental chemistry and biological effects of microelements*. China Environmental Science Press, Beijing, China (in Chinese).
- Liu, H., Probst, A., & Liao, B. (2005). Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China). *Science of The Total Environment*, 339(1), 153-166.
- Navarro, M. C., Pérez-Sirvent, C., Martínez-Sánchez, M. J., Vidal, J., Tovar, P. J., & Bech, J. (2008). Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: a case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration*, 96(2), 183-193.
- Ruby, M. V., Davis, A., Link, T. E., Schoof, R., Chaney, R. L., Freeman, G. B., & Bergstrom, P. (1993). Development of an in vitro screening test to evaluate the in vivo bioaccessibility of ingested mine-waste lead. *Environmental Science & Technology*, 27(13), 2870-2877.
- Singh, S., Zacharias, M., Kalpana, S., & Mishra, S. (2012). Heavy metals accumulation and distribution pattern in different vegetable crops. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 4(4), 75-81.
- USEPA, M. (1996). *Soil screening guidance technical background document*. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC EPA/540, 95.
- Verbruggen, N., LeDuc, D., & Vanek, T. (2009). Potential of plant genetic engineering for phytoremediation of toxic trace elements. *Phytotechnologies Solutions for Sustainable Land Management*, 1-24
- Yang, Q. W., Shu, W. S., Qiu, J. W., Wang, H. B., & Lan, C. Y. (2004). Lead in paddy soils and rice plants and its potential health risk around Lechang Lead/Zinc Mine, Guangdong, China. *Environment International*, 30(7), 883-889.
- Yang, Y., Zhang, F. S., Li, H. F., & Jiang, R. F. (2009). Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 1117-1122.
- Yoon, J. K., Kim, D. H., Kim, T. S., Park, J. G., Chung, I. R., Kim, J. H., & Kim, H. (2009). Evaluation on natural background of the soil heavy metals in Korea. *Journal of Soil and Groundwater Environment*, 14(3), 32-39.
- Zeng, F., Ali, S., Zhang, H., Ouyang, Y., Qiu, B., Wu, F., & Zhang, G. (2011). The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants. *Environmental Pollution*, 159(1), 84-91.
- Zhuang, P., McBride, M. B., Xia, H., Li, N., & Li, Z. (2009). Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. *Science of The Total Environment*, 407(5), 1551-1561.