

Identification of Transition Characteristics and Bio-concentration Factors of Heavy Metal (loid)s in the Selected Perennial Root Medicinal Plants

Won-Il Kim, Hyun Myung Noh, Chang-Oh Hong¹, Da-Young Kim², Kwon-Rae Kim², Kyeong-Seok Oh, Byeong-Churl Moon, and Ji-Young Kim^{3*}

Chemical Safety Division, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

¹Department of Life Science and Environmental Biochemistry, Pusan National University, Miryang 50463, Korea

²Department of Agronomy and Medicinal Plant Resources, GNTECH, Jinju 52725, Korea

³Imported Food Analysis Division, Seoul Regional Food and Drug Administration, Seoul 07978, Korea

*Corresponding author: jykim98@korea.kr

ABSTRACT

Received: April 13, 2017

Revised: August 23, 2017

Accepted: August 30, 2017

This study was conducted to identify transition characteristics of arsenic (As), cadmium (Cd), and lead (Pb) and to calculate bio-concentration factors (BCF) in the three perennial root medicinal plants, namely *Codonopsis lanceolata* (Deodeok), *Platycodon grandiflorum* (Balloon flower) and *Panax ginseng* (Korean ginseng) grown in major medicinal plant producing districts in Korea. Average BCF values ranged from 0.009~0.029 in As, 0.334~1.453 in Cd, and 0.021~0.023 in Pb in three perennial root medicinal plants. The BCF values increased in the order of ginseng (0.029) > deodeok (0.012) > balloon flower (0.009) for As, balloon flower (1.453) > deodeok (0.685) > ginseng (0.334) for Cd, and ginseng (0.023) > deodeok (0.022) > balloon flower (0.021) for Pb. The BCF values calculated in this study will be useful for predicting the uptake of heavy metal (loid)s. Further study on uptake and accumulation mechanism of toxic metal (loid)s by agricultural products is required to assess the human health risk associated with soil contamination.

Keywords: Arsenic, Cadmium, Lead, Bioconcentration factor, Perennial root medicinal plants

Bioconcentration-Factor (BCF) of As, Cd, and Pb by total form in soil to three perennial root vegetables.

Cultivated crops	As	Cd	Pb
	BCF _{tot.} [†]	BCF _{tot.}	BCF _{tot.}
Balloon flower	0.009 (0.000 - 0.035) [‡]	1.453 (0.000 - 5.738)	0.021 (0.004 - 0.066)
Deodeok	0.012 (0.001 - 0.042)	0.685 (0.149 - 2.235)	0.022 (0.004 - 0.115)
Ginseng	0.029 (0.000 - 0.215)	0.334 (0.018 - 1.374)	0.023 (0.009 - 0.049)

[†]BCF_{tot.}: Bioconcentration factor based on total content in soil.

[‡]Mean (Min-Max).



Introduction

농업환경에서 중금속은 비의도적 오염물질로서 광산 및 공단 등 오염원으로부터 유래하여 대기 및 용수 등을 통해 토양에 축적되고 작물에 흡수 이행된다. 이후 가식부위에 전이되어 인체에 축적된다. 작물의 중금속 전이계수는 토양에 존재하는 중금속이 작물 체에 흡수되어 가식부위로 전이, 농축되는 정도를 나타내는 지표이며 생물학적 흡수계수 또는 생물농축계수 (bioconcentration factor, BCF)로도 표현한다 (Cao et al., 2010; Lee et al., 2012). 토양 내의 중금속이 농산물로 전이되는 정도는 작물 종류, 작물체 부위에 따라 다르다. 그리고 토양 pH, 토성 유기물 함량, 유사원소의 존재와 같은 토양 조건에 따라서도 달라지는데, 그중 토양의 중금속 함량이 가장 큰 영향을 미친다 (Lee et al., 2009). 그러나 국내에서는 작물의 중금속 흡수 이행에 관한 연구가 미미하기 때문에, 인체 위해성 평가 시 외국의 기준에 따르고 있다. 하지만, 외국의 토양과 국내의 토양은 조성 및 특성이 다르고, 섭취하는 농산물의 종류와 양이 다르므로, 국내 재배지 토양의 중금속 함량 및 작물의 중금속 함량에 대한 연구가 필요한 실정이다 (Kim et al., 2012). 또한 과채류나 곡류, 엽채류에 대한 전이계수 산출에 대한 연구는 일부 수행되었으나 근채류에 대한 연구는 부족한 실정이다. 작물군의 종류를 확대하여 전이계수의 확인이 필요하다 (Lee et al., 2009). 식물체 내의 중금속은 토양으로부터 흡수된 경우가 대부분이므로 토양 내 중금속 추출방법에 따른 농산물 별 중금속 이행 정도를 파악하고자 하였다. 토양 중 전함량 시험법은 산분해법으로 유기물 및 점토광물에 함유된 중금속 모두를 추출할 수 있는데 반해, 침출법은 토양에 흡착된 중금속 및 2차 점토광물 내 일부만 추출할 수 있다 (Jung et al., 2005).

인삼 등 다년생 근채류 약용작물도 타 식물과 마찬가지로 미량원소를 함유하고 있으며 특정 원소의 축적은 약용작물의 약리적인 효과를 높이는 면에서 중요한 의미를 가진다. 그러나, 식물이 직접적으로 이용하지 않는 유해원소인 카드뮴 (Cd), 코발트 (Co), 납 (Pb) 등 일부 성분은 인체 건강에 해로운 영향을 미친다. 또한, 수은 (Hg)과 비소 (As)도 소량 또는 낮은 농도에서 일부 약리적인 효과를 보이고 있으나, 과량의 존재에서 미나마타병 (Minamata disease) 및 오각병 (Black foot disease) 등 인체에 치명적인 영향을 미친다 (Baker and Brooks, 1989). 그동안 국내의 약용작물에 관한 연구는 재배지 선정, 비배관리 및 작물체의 유효성분과 무기성분과의 관계 등에 대한 연구가 수행되었고 (Jung et al., 1996; Park et al., 1989), 약용작물 재배토양의 토성별 중금속 함량분포와 흡수이행에 대하여 연구된 바 있으나 3~6년간 또는 그 이상 장기간 재배되는 일부 근채류에 대한 중금속 축적에 대하여 보다 면밀한 검토가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 인삼, 도라지 및 더덕의 주산단지에서 재배토양과 작물체를 수집하여 카드뮴, 납, 비소의 함량을 분석하여 흡수이행 특성을 조사하고, 이를 통해 인체 위해성을 평가하고 안전한 농산물 생산을 위한 관리 방안을 제시하고자 하였다.

Materials and Methods

도라지, 더덕, 인삼의 주산단지 재배토양과 작물을 같은 지점에서 수확기에 채취하였다. 도라지는 강원 횡성, 홍천, 경남 진주 등 28개 지점에서 2년근을, 더덕은 강원 횡성, 홍천 등 32개 지점에서 2년근을, 인삼은 강원 홍천, 횡성, 충남 금산, 충북 음성 등 28개 지점에서 수삼 6년근의 시료를 채취하였다. 채취한 토양은 음건 후 고무망치를 이용해 묻혀진 부분을 분리시켜 2 mm로 체질한 후 토양의 일반 화학성 분석시료로 사용하였다. 또한 2 mm로 체질한 시료 소량을 채취하여 막자사발로 곱게 마쇄한 다음, 0.074 mm로 다시 체질한 후 중금속 분석시료로 사용하였다. 침출법은 토양시료 5 g을 칭량하여 카드뮴과 납의 경우 0.1 N HCl, 비소의 경우 1 N HCl 용액 25 mL 넣고 1시간 진탕, 여과 후

ICP-OES (GBC Intergra-XMP, Braeside, Australia)로 분석하였고, 토양 중금속 전함량은 토양오염공정시험법 (MOE, 2010)에 따라 환류냉각장치를 이용하여 전처리한 후 ICP-OES를 이용하여 분석하였다. 시험방법은 반응 용기에 토양 3 g을 칭량하여 왕수 (염산 21 mL, 질산 7 mL / 3:1 비율)와 섞은 후 환류냉각장치 (Kjeldatherm) (C. Gerhardt GmbH & Co., Northants, UK)를 이용하여 분해하였다. 반응시간은 30°C에서 2시간 침지, 서서히 온도를 높여 90°C에서 2시간 가열한 후 냉각시켰다. 분해된 시료를 여과하고 0.5 M 질산으로 100 mL 정용하여 기기분석 시료로 사용하였다. 다년생 근채류 시료는 뿌리부위를 깨끗한 물로 세척하여 60°C에서 건조한 후 분말로 만들어 분석시료로 사용하였다. 다년생 근채류 중 비소, 카드뮴, 납 분석을 위해 건조한 시료 약 0.25~0.5 g을 Microwave용 teflon vessel에 취하고 62% 질산 7~8 mL, 과산화수소 2~3 방울을 넣고 Microwave digestion system (ETHOS, Milestone, Italy)으로 200°C에서 20분간 분해하였으며, 분해 후, 증류수를 사용하여 볼륨 플라스크를 이용해서 20 mL까지 정용하고 여과 (0.45 µm)하여 ICP-MS (Agilent Technologies, 7500a)로 분석하였다. 중금속 분석결과에 대한 유효성 검증을 위해 측정된 원소분석용 인증표준물질 (한국표준과학원)의 회수율은 81.4~100.3%를 얻었고, 매 분석시료에 10, 50 µg kg⁻¹을 첨가하여 회수율을 확인한 결과 81~86%의 회수율을 얻었다.

또한, 생물농축계수 (Bioconcentration factor, Eq. 1)는 토양 중 오염물질에 대한 농산물의 흡수와 이동성을 고려하여 작물체내 중금속 함량을 토양 중 중금속 함량으로 나눈 값으로서, 토양으로부터 작물로 이동하는 중금속의 상대적인 흡수비를 의미한다 (Kim et al., 2012). 즉 생물농축계수가 높을수록 토양 중의 중금속이 작물로 쉽게 이동한다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 토양 중 중금속함량을 다년생 근채류의 중금속 함량으로 나누어 생물농축계수를 산출하였다.

$$\text{Bioconcentration factor (BCF)} = \frac{\text{Total HE content in plant (mg/kg)}}{\text{Total HE content in soil (mg/kg)}} \quad (\text{Eq. 1})$$

본 실험에서 조사한 인삼, 도라지, 더덕 중 비소, 카드뮴, 납 함량의 인체 위해성을 파악하기 위하여 이들 물질의 일일평균노출량 (Average daily dose, ADD)을 산출하고 (Eq. 2), 발암위해도 (Cancer risk probability, CR)와 비발암위해도 (Hazard Quotient, HQ)를 평가하였다 (Eqs. 3 and 4) (Kim et al., 2009; Kim et al., 2015; Lee et al., 2011; Mondal and Polya, 2008).

$$\text{ADD} = C \times \text{IR} \times \text{ED} \times \text{EF} / (\text{BW} \times \text{AT} \times 365) \quad (\text{Eq. 2})$$

C = Concentration of As, Cd, Pb in crop (작물 중 As, Cd, Pb 함량, mg kg⁻¹)

IR = Intake rate of crop (작물 섭취량, kg day⁻¹)

ED = Exposure duration (노출기간, year)

EF = Exposure frequency (노출빈도, day year⁻¹)

BW = Body weight (평균체중, kg)

AT = Averaging time (평균수명, year)

$$\text{CR} = \text{ADD} \times \text{SF} \quad (\text{Eq. 3})$$

SF = Slope factor (발암잠재력, mg kg⁻¹ day⁻¹)

$$HQ = ADD / RfD \quad (\text{Eq. 4})$$

RfD = Reference dose (참고섭취량, $\text{mg kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$)

Results and Discussion

본 조사에서 수행한 인삼, 도라지, 더덕의 재배지 토양 중 비소, 카드뮴, 납의 전함량과 침출성 중금속 함량을 Table 1에 제시하였다. 조사된 밭토양 중 비소, 카드뮴, 납의 전함량 범위는 각각 $\text{tr}-19.48$, $\text{tr}-0.86$, $4.3\sim 36.02 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 토양오염우려기준인 25, 4, 200 mg kg^{-1} 을 초과하지 않았다. 더덕을 재배한 토양의 평균 비소 함량은 7.25 mg kg^{-1} 으로 가장 높았고 인삼 및 도라지 재배토양은 평균 4.11 과 3.73 mg kg^{-1} 으로 2013년 조사된 우리나라 밭토양 비소 평균함량인 3.8 mg kg^{-1} 과 유사한 결과를 보였다 (NIAS, 2013). 또한, 보리 등 5개 밭작물을 재배한 밭토양 비소의 평균함량 3.38 , 5.93 , 6.22 , 3.84 , 4.66 mg kg^{-1} 으로 조사된 결과와도 유사하였다 (Kim et al., 2012). 환경부에서 조사한 토양측정망 및 토양오염 실태조사 결과에서 언급한 밭토양 중 비소 평균함량인 6.55 mg kg^{-1} 과도 유사한 경향을 보였다 (MOE, 2012). 카드뮴의 경우 인삼, 더덕, 도라지 재배토양 중 평균함량이 각각 0.19 , 0.31 , 0.15 mg kg^{-1} 으로 2013년 우리나라 일반농경지 밭토양 함량 0.35 mg kg^{-1} 보다 약간 낮은 경향을 보였다 (NIAS, 2013). 그러나, 우리나라 도라지 재배토양에서 조사한 카드뮴의 토양 중 농도인 0.13 mg kg^{-1} ($\text{tr}-0.36 \text{ mg kg}^{-1}$)인 결과와는 유사하였다 (Bae et al., 2014). 납의 경우도 평균 함량이 $20.47\sim 22.78 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로서 카드뮴과는 달리 높은 경향을 보였으나 환경부 조사의 밭토양 중 납 평균 함량인 31.87 mg kg^{-1} 보다 낮은 경향을 보였다 (MOE, 2012; NIAS, 2013). 우리나라 도라지 재배 토양에서 조사한 납의 토양 중 농도인 11.81 mg kg^{-1} ($\text{tr}-45.6 \text{ mg kg}^{-1}$)인 결과보다 높게 조사되었다 (Bae et al., 2014).

다년생 근채류의 각각 재배지 토양에 함유되어 있는 침출성 중금속의 평균함량 범위는 비소의 경우 흔적 (tr)- 1.58 mg kg^{-1} , 카드뮴의 경우 $\text{tr}-0.14 \text{ mg kg}^{-1}$, 납의 경우 $0.11\sim 4.90 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 전함량에 비해 6~26% 수준의 함량을 보였다. 이는 2009년 조사된 우리나라 밭토양 비소, 카드뮴, 납의 침출성 평균함량인 각각 0.67 , 0.08 , 1.89 mg kg^{-1} 과 유사한 결과를 보였다 (NIAS, 2009). 본 연구의 토양 침출성 연구 결과는 현행 환경부 토양오염공정시험기준 (MOE,

Table 1. Total and HCl-extractable contents of As, Cd, and Pb in soil grown three perennial root vegetables.

Cultivated soil	As		Cd		Pb	
	Total	HCl-extractable	Total	HCl-extractable	Total	HCl-extractable
Balloon flower	3.73 (1.18 - 7.39) [†]	0.77 (0.00 - 1.37)	0.15 (0.03 - 0.38)	0.04 (0.00 - 0.09)	20.47 (12.65 - 29.12)	1.62 (0.11 - 4.90)
Deodeok	7.25 (1.53 - 19.48)	0.64 (0.00 - 1.41)	0.31 (0.02 - 0.86)	0.05 (0.00 - 0.14)	22.78 (14.30 - 36.02)	1.42 (0.30 - 2.37)
Ginseng	4.11 (0.42 - 10.35)	0.80 (0.03 - 1.58)	0.19 (0.00 - 0.44)	0.03 (0.01 - 0.05)	22.74 (10.95 - 30.79)	1.69 (0.46 - 4.17)
2013 data [‡]	3.8		0.35		16.9	
2009 data [‡]		0.67		0.08		1.89
Concern level [§]	25		4		200	

[†] Mean (Min-Max).

[‡] Average content of heavy metal (loid)s in non-contaminated upland soil in Korea. 2013 and 2009 data were collected by National Institute of Agricultural Sciences (NIAS, 2009; NIAS, 2013).

[§] Concern levels for soil contamination described in Soil Environmental Conservation Act (MOE, 2011).

2010)에 고시된 토양 중금속 함량이 전 함량 기준으로 개정되었기 때문에 실험결과에 따른 농산물 재배지 토양 내 중금속의 침출성 함량 결과와 직접 비교하기에는 적절하지 않다.

다년생 근채류 중 비소, 카드뮴, 납의 함량은 Table 2에 제시하였다. 약용작물내 비소 오염현황을 보면, 인삼건물 중 평균함량이 0.062 mg kg^{-1} 으로 가장 높았고 더덕 0.053 , 도라지 0.034 mg kg^{-1} 로 각각 조사되었다. 이는 우리나라 유통 약용작물 중 비소 함량 모니터링 결과인 도라지, 인삼 및 더덕의 평균함량 0.025 , 0.024 , 0.022 mg kg^{-1} 으로 보고된 결과와 비교하여 다소 높게 조사되었다 (Kim et al., 2015). 그러나, 현재 국내에는 비소에 대한 기준으로 생약기준이 건물 중 3.0 mg kg^{-1} 으로 설정되어 있어 조사 약용작물 중 최대치를 보인 0.207 mg kg^{-1} 에 미치지 않는 안전한 수준을 확인하였다 (KFDA, 2010). 조사된 약용작물 중 카드뮴 평균함량은 더덕에서 0.168 mg kg^{-1} 으로 가장 높았고 도라지 0.144 , 인삼 0.062 mg kg^{-1} 순으로 각각 조사되었다. 이는 우리나라 유통 약용작물 중 카드뮴 함량 모니터링 결과인 더덕, 도라지 및 인삼의 평균함량 0.26 , 0.13 , 0.06 mg kg^{-1} 으로 보고된 Kim et al. (2015)의 결과와 일치하였다. 또한 카드뮴의 함량 범위는 더덕, 도라지, 인삼이 각각 $\text{tr}-0.401$, $0.018\text{--}0.425$, $0.006\text{--}0.192 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 조사되었다. 이러한 결과로서 카드뮴에 대한 생약기준이 건물중으로 0.3 mg kg^{-1} 으로 설정되어 있어 더덕 및 도라지의 일부 시료가 기준치를 초과하고 있고 관리가 필요한 것으로 사료되나, 더덕 및 도라지를 포함한 근채류의 카드뮴 기준이 생체 중으로 0.2 mg kg^{-1} 이 설정되어 있어 더덕 및 도라지의 수분함량인 81.5% 와 75.7% 인 점을 고려하면 이들 수준 역시 안전한 수준으로 추정된다 (KFDA, 2010; KFDA, 2011). 그러나 이러한 차이는 생약과 농산물 중 카드뮴 기준에 대한 불일치로 추후 검토되어야 할 것이다. 우리나라 재배 도라지 중 카드뮴의 함량과 범위인 0.35 mg kg^{-1} ($0.20\text{--}0.88 \text{ mg kg}^{-1}$)인 기존의 결과와 유사하였다 (Bae et al., 2014). 조사된 약용작물 중 납 평균함량은 건물 중으로 인삼에서 0.567 mg kg^{-1} 으로 가장 높았고 더덕 0.482 , 도라지 0.434 mg kg^{-1} 순으로 각각 조사되었다. 이는 우리나라 유통 약용작물 중 납 함량 모니터링 결과인 더덕, 도라지 및 인삼의 평균함량 0.44 , 0.30 , 0.20 mg kg^{-1} 으로 보고된 결과와 더덕의 경우 유사하였으나 도라지 및 인삼의 함량은 높게 조사되었다 (Kim et al., 2015). 그러나 이들 약용작물의 납 함량 범위는 인삼, 더덕, 도라지 각각 $0.111\text{--}1.304$, $\text{tr}-2.227$, $0.085\text{--}1.515 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 조사되어 기존의 유사한 범위를 보였다 (Kim et al., 2015). 또한 우리나라 재배 도라지 중 납의 함량과 범위인 0.67 mg kg^{-1} ($0.30\text{--}1.10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ DW}$)인 결과와도 유사하였다 (Bae et al., 2014).

Table 2. Mean and range of As, Cd, and Pb concentrations in three perennial root vegetables grown at the chief producing districts in Korea.

Cultivated crops	As	Cd	Pb
	mg kg ⁻¹ DW		
Balloon flower	0.034 ± 0.053 (0.000 - 0.207) [†]	0.144 ± 0.091 (0.018 - 0.425)	0.434 ± 0.309 (0.085 - 1.515)
Deodeok	0.053 ± 0.050 (0.000 - 0.205)	0.168 ± 0.090 (0.000 - 0.401)	0.482 ± 0.410 (0.000 - 2.227)
Ginseng	0.062 ± 0.029 (0.000 - 0.117)	0.062 ± 0.052 (0.006 - 0.192)	0.567 ± 0.317 (0.111 - 1.304)
Criteria [‡]	-	0.2	2.0
Criteria [§]	3.0	0.3	5.0

[†] Mean \pm SD (Min-Max).

[‡] Root vegetable criteria (FW basis) of heavy metal (loid)s enforced by Food Sanitation Law (KFDA, 2011).

[§] Herb medicinal plant regulation (DW basis) of heavy metal (loid)s enforced by Pharmaceutical Affairs Act (KFDA, 2010).

농산물 재배지 토양에서 다년생 근채류로의 비소, 카드뮴, 납의 생물농축계수는 Table 3에 제시하였다. 비소의 평균 생물농축계수 범위는 토양 전함량을 이용한 생물농축계수에서 평균 0.006~0.029이었다. 카드뮴의 평균 생물농축계수 범위는 토양 전함량에 대해서 평균 0.334~1.453이었다. 납의 평균 생물농축계수 범위는 전함량에 대해서 평균 0.021~0.023이었다. 이들 약용작물의 유해원소별 토양 중 전함량에 대한 생물농축계수의 순서를 보면 카드뮴 > 납 > 비소 순으로 엽채류의 생물농축계수를 카드뮴 > 아연 > 구리 > 납 > 비소 > 크롬 순으로 보고한 기존의 결과와 유사하였다 (Wang et al., 2012).

Table 3. Bioconcentration-Factor (BCF) of As, Cd, and Pb by total form in soil to three perennial root vegetables.

Cultivated crops	As	Cd	Pb
	BCF _{tot.} [†]	BCF _{tot.}	BCF _{tot.}
Balloon flower	0.009 (0.000 - 0.035) [‡]	1.453 (0.000 - 5.738)	0.021 (0.004 - 0.066)
Deodeok	0.012 (0.001 - 0.042)	0.685 (0.149 - 2.235)	0.022 (0.004 - 0.115)
Ginseng	0.029 (0.000 - 0.215)	0.334 (0.018 - 1.374)	0.023 (0.009 - 0.049)

[†]BCF_{tot.}: Bioconcentration-Factor based on total content in soil.

[‡]Mean (Min-Max).

비소, 카드뮴, 납의 토양 전함량에 대한 토양에서 농산물로의 중금속 생물농축계수의 순서를 보면 다음과 같다. 비소의 경우, 인삼 (0.029) > 더덕 (0.012) > 도라지 (0.009)의 순으로 감소하였다. 타 작물과의 비교에서 조사작물 중 가장 높은 계수를 보인 쌀 (0.051)과 낮은 계수를 보인 두류 (0.006), 배 (0.006), 감귤 (0.006) 등의 결과와 뚜렷한 차이를 확인할 수 없었다 (Kim et al., 2012). 카드뮴의 경우에는 도라지 (1.453) > 더덕 (0.685) > 인삼 (0.334)의 순으로 감소하였고, 납의 경우에는 인삼 (0.023) > 더덕 (0.022) > 도라지 (0.021)의 순으로 감소하였다. 이 결과는 쌀 등 9개 작물의 평균 생물농축계수인 카드뮴의 0.002~0.068, 납의 0.003~0.018을 보고한 결과에 비해 크게 높았는데 이는 작물의 생리적인 특성 및 부위, 재배기간, 토양의 이화학적 특성 및 토양 내 중금속의 함량 및 존재형태 등 다양한 요인에 의해 농작물의 가식부위로 전이되는 정도가 결정되는 결과라고 추정된다 (Kim et al., 2012; Lee et al., 2009).

본 조사에서 수행한 도라지, 더덕, 인삼의 비소, 납, 카드뮴의 모니터링 한 결과에 대한 비발암 (HQ) 및 발암 (CR) 위험도 결과는 Table 4와 같다. 비발암 위험도 산출 결과는 연구대상 작물인 도라지, 더덕, 인삼에서 모두 1 이하로

Table 4. Mean and maximum value of HQ and CR for As, Cd, and Pb concentrations in three perennial root vegetables grown at the chief producing districts in Korea.

Cultivated crops	Hazard quotients (HQ)				Cancer risk (CR)
	As	Cd	Pb	Total	
Balloon flower	1.93×10^{-4} (1.17×10^{-3}) [†]	2.45×10^{-4} (7.23×10^{-4})	1.85×10^{-4} (2.58×10^{-3})	6.22×10^{-4}	8.68×10^{-8} (5.28×10^{-7})
Deodeok	4.01×10^{-4} (1.55×10^{-3})	3.81×10^{-4} (9.10×10^{-4})	2.73×10^{-4} (5.05×10^{-3})	1.06×10^{-3}	1.80×10^{-7} (6.98×10^{-7})
Ginseng	1.19×10^{-3} (2.00×10^{-3})	3.39×10^{-4} (1.12×10^{-3})	8.65×10^{-4} (7.62×10^{-3})	2.39×10^{-3}	5.34×10^{-7} (9.02×10^{-7})

[†]Maximum value of HQ.

이들 작물을 통한 비발암위해 가능성은 매우 낮았다. 또한 합산의 결과도 도라지, 더덕, 인삼 각각 평균 6.22×10^{-4} , 1.06×10^{-3} , 2.39×10^{-3} 로 1 이하였다. 발암 위해도 또한 도라지, 더덕, 인삼 각각 평균 8.68×10^{-8} , 1.80×10^{-7} , 5.34×10^{-7} 로 허용 수준인 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 보다 낮은 수준을 보여 안전한 수준으로 확인되었다.

Conclusion

본 연구는 다년생 근채류에서 비소, 카드뮴, 납의 토양-식물체로의 흡수이행 특성을 파악하고 이에 따라 안전한 농산물 생산을 위한 적절한 관리방안을 도출하기 위하여 수행되었다. 주산단지를 중심으로 도라지 28지점, 더덕 32지점 및 인삼 28지점의 토양과 작물 시료를 채취하여 중금속 3종의 함량을 조사하였다. 도라지, 더덕, 인삼 재배지 토양의 비소, 카드뮴 및 납의 전함량 범위는 각각 $tr-19.48$, $tr-0.86$, $4.3 \sim 36.02 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 토양오염우려기준을 초과하지 않았다. 다년생 근채류 중 비소, 카드뮴 및 납의 함량 조사 결과는 비소의 경우 타 작물군과 유사한 함량을 보이고 있으나, 카드뮴 및 납의 경우 높은 경향을 보이고 있다. 특히, 더덕 및 도라지 중 일부 시료가 카드뮴에 대한 생약기준을 초과하고 있고 이는 토양 중의 해당 중금속이 낮은 조건에서 다른 요인으로부터 유입되었을 가능성이 추정되어 불량 농작물 또는 중금속의 작물흡수에 영향을 미치는 토양의 특정 물리화학적 특성과 관련된 연구가 수행되어야 하며 이를 통한 적절한 토양 관리대책을 수립하고 시행해야 할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This study was financially supported by “Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ 010896)” National Institute of Agricultural Sciences, Rural Development Administration, Korea.

References

- Bae, J.S., B.H. Seo, S.W. Lee, W.I. Kim, and K.R. Kim. 2014. Heavy metal uptake by balloon flower together with investigating soil properties and heavy metal concentrations in the cultivated soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47(3):172-178.
- Baker, A.J.M. and R.R. Brooks. 1989. Terrestrial higher plants, which hyperaccumulate metallic elements-A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1:81-126.
- Cao, H., J. Chen, J. Zhang, H. Zhang, L. Qiao, and Y. Men. 2010. Heavy metals in rice and garden vegetables and their potential health risks to inhabitants in the vicinity of an industrial zone in Jiangsu, China. *J. Environ. Sci.* 22(11):1792-1799.
- Jung, G.B., B.Y. Kim, K.S. Kim, J.S. Lee, and I.S. Ryu. 1996. Chemical properties of medicinal plant cultivated soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 29(1):20-25.
- Jung, G.B., W.I. Kim, J.S. Lee, J.D. Shin, J.H. Kim, and S.G. Yun. 2005. Availability of heavy metals in soils with different characteristics and controversial points for analytical methods of soil contamination in Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 19(2):128-133.
- KFDA. 2010. Regulation and analytical methods of residual contaminants in a herb medicine. *Korean Food Drug Administration Notification* 2010-75.
- KFDA. 2011. Food sanitation law. *Korean Food Drug Administration*.

- Kim, H.S., K.R. Kim, C.O. Hong, W.R. Go, S.H. Jeong, J.H. Yoo, N.J. Cho, J.H. Hong, and W.I. Kim. 2015. Monitoring of Cd, Hg, Pb, and As and risk assessment for commercial medicinal plants. *Korean J. Environ. Agric.* 34(4):282-287.
- Kim, J.Y., J.H. Lee, A. Kunhikrishnan, D.W. Kang, M.J. Kim, J.H. Yoo, D.H. Kim, Y.J. Lee, and W.I. Kim. 2012. Transfer factor of heavy metals from agricultural soil to agricultural products. *Korean J. Environ. Agric.* 31(4): 300-307.
- Kim, W.I., J.K. Kim, J.H. Yoo, M.K. Paik, S.W. Park, O.K. Kwon, M.K. Hong, J.E. Yang, and J.G. Kim. 2009. Risk assessment of As, Cd, Cu and Pb in different rice varieties grown on the contaminated soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(1):53-57.
- Lee, J.H., J.Y. Kim, W.R. Go, E.J. Jeong, A. Kunhikrishnan, G.B. Jung, D.H. Kim, and W.I. Kim. 2012. Current research trends for heavy metals of agricultural soils and crop uptake in Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 31(1):75-95.
- Lee, J.H., W.I. Kim, E.J. Jeong, J.H. Yoo, J.Y. Kim, J.B. Lee, G.J. Im, and M.K. Hong. 2011. Assessment of health risk associated with arsenic exposure from soil, groundwater, polished rice for setting target cleanup level nearby abandoned mines. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(1):38-47.
- Lee, M.H., T.S. Kim, M.S. Lee, Y.J. Ahn, M.H. Lee, J.Y. Lee, J.Y. Yang, H.M. Lee, M.J. Kim, J.W. Park, K.G. Lee, S.W. Jeung, K.P. Nam, H.L. Ryu, S.I. Choi, and I.W. Ko. 2009. Risk Assessment of Soil, Dongwha Technology, Korea, pp. 116-118.
- MOE. 2010. Standard test method for soil pollution. Ministry of Environment.
- MOE. 2011. Soil environmental conservation act. Ministry of Environment.
- MOE. 2012. 2011 Annual report on the monitoring of soil contamination at the designated sites in Korea. Ministry of Environment.
- Mondal, D. and D. Polya. 2008. Rice in a major exposure route for arsenic in Chakdaha block, Nadia district, West Bengal, India: A probabilistic risk assessment. *Appl. Geochem.* 23:2987-2998.
- NIAS. 2009. Annual report 2009: The monitoring project on agro-environmental quality. National Institute of Agricultural Science.
- NIAS. 2013. Annual report 2013: The monitoring project on agro-environmental quality. National Institute of Agricultural Science.
- Park, B.Y., S.M. Chang, S.J. Park, and J. Choi. 1989. Effects of the soil properties and N, P, K application on the contents of inorganic constituents in the rhizoma and leaf of *Rehmannia glutinosa*. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 22(1):45-52.
- Wang, Y., M. Qiao, Y. Liu, and Y. Zhu. 2012. Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from wastewater irrigated area, Beijing-Tianjin city cluster, China. *J. Environ. Sci.* 24(4):690-698.