

Research Article

Open Access

## 농작물 재배지 토양 내 비소, 납 및 카드뮴의 농산물로의 전이계수 산출

김지영,<sup>1†</sup> 이지호,<sup>2†</sup> Anitha Kunhikrishnan,<sup>1</sup> 강대원,<sup>1</sup> 김민지,<sup>1</sup> 류지혁,<sup>1</sup> 김두호,<sup>1</sup> 이영자,<sup>1</sup> 김원일<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>국립농업과학원 농산물안전성부, <sup>2</sup>세만금지방환경청 측정분석과

### Transfer Factor of Heavy Metals from Agricultural Soil to Agricultural Products

Ji-Young Kim,<sup>1†</sup> Ji-Ho Lee,<sup>2†</sup> Anitha Kunhikrishnan,<sup>1</sup> Dae-Won Kang,<sup>1</sup> Min-Ji Kim,<sup>1</sup> Ji-Hyock Yoo,<sup>1</sup> Doo Ho Kim,<sup>1</sup> Young-Ja Lee<sup>1</sup> and Won Il Kim<sup>1\*</sup> (<sup>1</sup>Department of Agro-Food Safety, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Suwon 441-707, Korea, <sup>2</sup>Division of Monitoring and Analysis, Saemangeum Regional Environmental Office, National Institute Environment Research, Jeonju 560-870, Korea)

Received: 16 August 2012 / Revised: 21 November 2012 / Accepted: 18 December 2012

© 2012 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 Transfer Factor (TF) of heavy metals from soil to plant is important, because TF is an indicator of heavy metal in soils and a factor that quantifies bioavailability of heavy metals to agricultural products. This study was conducted to investigate the transfer ability of Arsenic (As), Cadmium (Cd), and Lead (Pb) from soil to agricultural products.

**METHODS AND RESULTS:** We investigated heavy metals (As, Cd and Pb) concentrations in 9 agricultural products (rice, barely, corn, pulse, lettuce, pumpkin, apple, pear, tangerin) and soil. TF of agricultural products was evaluated based on total and HCl-extractable soil concentration of As, Cd, and Pb. Regression analysis was used to predict the relationship of total and HCl-extractable concentration with agricultural product contents of As, Cd, and Pb. The result showed that TF was investigated average 0.006~0.309 (As), 0.002~6.185 (Cd), 0.003~0.602 (Pb). The mean TF value was the highest as rice 0.309 in As,

lettuce 6.185, pear 0.717, rice 0.308 in Cd, lettuce 0.602, pumpkin 0.536 in Pb which were dependent on the vegetable species and cereal is showed higher than fruit-vegetables in As.

**CONCLUSION(S):** Soil HCl-extractable concentration of As, Cd, and Pb had the larger effects on their contents in agricultural products than total soil concentrations. We suggests that TF are served as influential factor on the prediction of uptake. Further study for uptake and accumulation mechanism of toxic metals by agricultural products will be required to assess the human health risk and need TF of more agricultural products.

**Key Words:** Agricultural products, Heavy metals, Monitoring, Soils, Transfer-Factor (TF)

### 서론

중금속 중 비소, 카드뮴, 납, 수은 등은 생체 성분과의 친화성이 커 식품 등에 축적되기 쉽기 때문에 국내·외에서 매우 엄격히 관리되고 있다(Lee *et al.*, 2012). 중금속은 식물의 대사, 호흡, 합성 등과 같은 생화학적 과정에서 성장에 영향을 주는 중요한 요인이 되며, 토양 중 식물 영양성분과 함께 흡수되어 작물조직에 축적되어 생육 피해를 준다(Samical *et al.*, 2008). 특히, 토양에서 작물체로의 중금속 이동은 중금속

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

\*교신저자(Corresponding author),

Phone: +82-31-290-0527; Fax: +82-31-290-0506;

E-mail: wikim721@korea.kr

에 대한 인체 노출의 주요인이 되며, 축적된 중금속은 만성적인 위해성을 나타낸다(Nan *et al.*, 2002; Cui *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2012). 토양에서 농산물의 중금속 전이계수는 식물체의 중금속 축적과 더불어 농산물의 안전성에 직접적인 영향을 미치는 주요인자로 이용될 것이라는 보고가 있다(Greger *et al.*, 2007; Uchida *et al.*, 2007; Dudka *et al.*, 1996; Puschenreiter and Horak, 2000; Nan *et al.*, 2010). 전이계수는 농산물의 중금속 생물학적 이용도의 차이를 확인하는데 이용되며, 실제적으로 토양에서 중금속 이동의 측정 지표로 사용된다.

Lee(2012) 등은 토양 내 중금속이 농산물로 흡수되는 정도는 토양의 특성에 따라 다르지만 작물의 중금속 흡수에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 토양 중 중금속 함량이며, 토양 중 중금속 함량이 증가함으로써 작물 내 중금속 함량이 증가함을 확인하였다. 토양에서 농산물의 중금속의 전이계수는 토양 특성, 식물체 부위, 그리고 농산물 종류에 따라 다양하며, 카드뮴과 아연은 1~10, 구리와 납은 0.01~0.1로 산출되었다(Klocke *et al.*, 1984). Wang(2012)의 연구에 의하면 엽채류에서 비소는 0.01~0.87, 카드뮴은 0.06~4.69, 납은 0.00~0.50으로 Cd > Zn > Cu > Pb > As > Cr 순으로, 쌀의 경우, Zn > Cu, Cd > Hg > Cr > Pb 순으로 나타났다(Wang *et al.*, 2012; Cao *et al.*, 2010).

국내에서는 농산물과 토양 간 중금속 전이계수 연구가 미미하였다. 국내 재배토양에서의 농산물의 중금속 전이계수 산출에 관한 연구는 중금속의 작물별 흡수이행 패턴 및 인체 노출 평가 시 유용한 자료로 사용될 수 있을 것이다. 또한, 인체 위해성 평가 시 외국의 전이계수를 국내 자료로 활용하고 있기 때문에, 우리나라 토양 특성을 고려한 다양한 농산물의 중금속 전이계수 산출이 필요한 실정이다(Lee *et al.*, 2009). 또한 중금속의 경우, 토양으로부터 이행되는 경우가 대부분이므로 토양 내 중금속 추출방법 별 농도에 따라 농산물별 중금속 이행 정도를 파악하고자 하였다. 토양 중 전 함량 시험법은 유기물 및 점토광물에 함유된 중금속 모두를 추출할 수 있으며, 침출법은 토양에 흡착된 중금속 및 2차 점토광물 내 일부만 추출할 수 있다(Jung *et al.*, 2005). 본 연구에서는 농산물 내 축적농도와와의 상관분석을 통해서 유의성을 나타내는 시험법을 확인하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 곡류, 엽채류, 과실류 중 대표 농산물을 선정하여 이에 대한 토양 및 농산물의 중금속 함량을 확인하고 전이계수를 산출하고자 하였으며, 농산물 종류에 대한 중금속 이행율을 확인하여 추후 인체 위해성 평가 시 유용한 자료로 활용하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 실험재료

전국(서울, 경기, 강원, 충청 남·북도, 경상 남·북도, 전라 남·북도, 제주도) 주산지역 농경지를 선정하여, 2010년부터 2011년까지 각 농산물의 수확시기에 농가에서 생산한 농산물 및 토양을 수거하였다.

조사 대상 시료는 곡류 3종(쌀, 보리, 옥수수), 채소류 3종(콩류, 상추, 호박), 과일류 3종(사과, 배, 감귤)으로 선정하였고, 농산물 종류별로 30 여건을 농산물의 통계청 2010년~2011년 생산량 및 재배현황 자료를 바탕으로 각 샘플당 2 kg 씩 채취하였으며, 전이계수 산출을 위하여 농산물 및 토양은 같은 농가에서 채취하였다.

수집한 시료는 일정량을 취해 믹서기로 곱게 갈아 균질화한 후 냉동 보관하고 곡류는 곱게 갈아 균질화 한 후, 2 mm로 체질하여 실험 재료로 사용하였다. 조사 항목은 비소, 카드뮴 및 납을 선정하였다. 채취된 농산물은 식품 공전 중금속 시험법에 따라 가식부를 균질화하고 폴리에틸렌 용기에 담아 냉동(-20°C 이하)보관하여 분석하였으며, 논, 밭 15 cm 깊이에서 균일하게 채취한 토양시료는 풍건, 2 mm로 체질한 후, 전처리 시료로 사용하였다.

### 시약 및 초자

본 연구에서 사용한 시약은 모두 특급시약을 구입하여 사용하였고, 증류수는 Milipore water purification system (Le Mont-sur-Lausanne, Switzerland)을 사용하였다. 비소, 카드뮴, 납의 표준품은 Merck (Merck KGaA, Darmstadt, Germany)에서 구입하여 사용하였다. 전처리에 사용한 62% 질산(Dong Woo Fine Chem. Co. Ltd., Iksan, Korea), 37% 염산(Dong Woo Fine Chem. Co. Ltd., Iksan, Korea)와 30% 과산화수소수는 Electronic grade를 사용하였으며, 모든 초자는 폴리테트라플로로에틸렌(PTFE) 재질을 사용하였다. 분석방법의 타당성을 확인하고자 표준인증물질은 Tomato Paste (ERM-BC084a), Rice Fluor (KRISS, 108-01-003, NIST 1680a), BAM Soil (BAM-U112)을 사용하였다. 모든 초자는 10% 질산에 24시간 이상 침지 후, 증류수로 세척하여 사용하였다.

### 농산물 및 토양 중 중금속 측정

채취된 농산물은 식품공전 중금속 시험법에 따라 콩류는 외피를 제거하고, 호박, 사과, 배, 감귤은 씨를 제거하여 껍질과 가식부를 균질화하여 시료로 사용하였다. 균질화한 시료는 약 2~3 g을 Microwave용 teflon vessel에 취하고 62% 질산 7~8 mL, 과산화수소 2~3방울을 넣고 Microwave digestion system (ETHOS, Milestone, Italy)으로 200 °C에서 20분간 분해하였으며, 분해 후, 증류수를 사용하여 볼륨 플라스크를 이용해서 20 mL 까지 정용하고 여과(0.45 μm)하여 시험용액으로 하였다. 비소, 카드뮴, 납은 ICP-MS (Agilent Technologies, 7500a)로 분석하였으며, 비소, 카드뮴, 납 각각 75, 111, 208이온을 분석이온으로 선정하였다. 토양 시료는 풍건하면서 멩쳐진 부분을 손이나 고무망치로 부순 후, 토양 입자의 크기가 작을수록 시료의 균질성 및 산분해 효율이 높기 때문에 2mm와 0.074mm 로 체질하여 사용하였다. 침출법은 시료 5 g을 칭량하여 0.1 N HCl 25mL 넣고 1시간 진탕, 여과 후 ICP-OES (GBC Integra-XMP, Braeside, Australia)로 분석하였고, 토양 중 전 함량 측정은

환류냉각장치 반응용기에 토양 3 g을 칭량하여 염산 21 mL, 질산 7 mL를 주입하여 환류냉각장치(Kjeldatherm) (C.Gerhardt GmbH & Co., Northants, UK)를 이용하여 분해하였다. 반응시간은 30 °C에서 2시간 침지시킨 후, 서서히 온도를 높여 90 °C에서 2시간 가열, 냉각, 여과하고 0.5 M 질산으로 100 mL 정용하여 ICP-OES를 이용하여 중금속을 분석하였다.

### 전이계수 산출

농산물 중 중금속 흡수 축적은 전이계수(Transfer factor, TF)로 평가하였다. 전이계수는 농산물의 중금속에 대한 흡수와 이동성을 고려하여 생물학적 흡수계수 또는 생물농축계수(BCF, Bioconcentration Factor)로도 표현하며 중금속의 상대적인 흡수비를 의미한다(Lee *et al.*, 2012). 전이계수 산출은 토양 중 중금속 총 함량과 침출성 함량으로 구분하여 제시하였으며, 이와 관련된 식은 다음과 같다.

$$\text{농산물 중 중금속 함량(mg/kg) / 토양 중 중금속 총 함량(mg/kg)} \quad (1)$$

$$\text{농산물 중 중금속 함량(mg/kg) / 토양 중 중금속 침출성 함량(mg/kg)} \quad (2)$$

### 통계처리

농산물과 토양 내 중금속 함량간의 상관성 분석과 농산물 내 중금속 함량에 영향을 주는 인자를 산출하기 위해 SPSS 프로그램 ver 18.0 (SPSS Inc., Somers, NY, USA)을 이용하였다. 농산물의 중금속 함량과 토양의 중금속 분석 방법에 따른 상관성 분석은 단순상관분석을 수행하였다. 또한, 농산물과 토양 간 중금속 함량에 유의한 영향을 주는 인자를 조사하기 위해 단순회귀분석의 stepwise방법을 이용하였다.  $p \leq 0.05$  이면 영향요인을 진입시키고,  $p \geq 0.10$ 이면 제거시켜 토양 및 농산물 간 중금속 함량 간 추정 관계식을 산출하였다.

## 결과 및 고찰

### 농산물 재배 토양 중 비소, 카드뮴 및 납 오염도

각 농산물을 재배하는 토양 내 비소, 카드뮴, 그리고 납의 전 함량 및 침출성 함량을 Table 1에 제시하였다. 9개 농산물 재배 토양의 품목별 비소의 전 함량 범위는 콩류를 재배한 토양에서 평균 6.22 mg/kg으로 가장 높았으며, 콩류를 제외한 다른 농산물 재배 토양에서는 평균 3.38~5.93 mg/kg으로 조사되었다. 모든 농산물 재배 토양 내 비소 평균 함량은 토양 오염우려기준인 25 mg/kg을 초과하지 않았지만, 콩류는 27 지점 중 1 지점에서 기준을 초과하였다. 쌀 3.82(0.44~11.84), 보리 3.38(1.23~8.14), 옥수수 5.93(1.06~22.23), 콩류 6.22(0.95~45.16), 상추 3.84(0.12~9.33), 호박 4.66(1.22~9.76), 사과 4.32(1.06~9.57), 배 5.44(1.70~23.48) 그리고 귤 5.08(3.03~10.18) mg/kg으로 조사되었다.

카드뮴의 전 함량범위는 귤 재배 토양에서 평균 4.02 mg/kg으로 가장 높았고, 그 외 다른 농산물 재배토양에서는 평균 1.37~2.35 mg/kg로 유사하였다. 농산물 재배 토양 내 카드뮴의 평균 함량은 토양오염우려기준인 4 mg/kg을 초과하지는 않았지만, 상추에서 1지점, 귤에서 5지점이 우려기준을 초과하는 것으로 나타났다. 쌀 1.68(0.93~3.08), 보리 1.37(0.72~3.76), 옥수수 1.71(0.49~3.57), 콩 2.38(1.62~3.91), 상추 2.22(1.45~4.20), 호박 2.30(1.18~3.63), 사과 2.17(1.12~3.74), 그리고 배 2.35(1.50~3.38), 귤 4.02(2.69~6.20) mg/kg으로 조사되었다. 납의 전 함량은 30.57~39.28 mg/kg으로 대상 농산물 재배 토양에서 유사한 값을 보여주었고, 모든 농산물 재배 토양에서 납에 대한 토양오염 우려기준을 초과하지 않았다. 농산물 재배 토양별 납의 함량은 쌀 30.57(16.16~44.36), 보리 31.81(17.22~198.92), 옥수수 31.14(17.17~43.39), 콩 39.28(27.96~82.32), 상추 30.21(17.73~47.78), 호박 30.99(20.00~49.60), 사과 34.76(17.98~66.21), 배 36.00(25.05~62.78) 그리고 귤 38.58(25.05~50.75) mg/kg로 토양 함량이 모두 유사하게 검출되었다.

Table 1. Total and HCl-extractable contents of As, Cd, and Pb in nine kinds of agricultural products-cultivated soil (mg/kg)

Toxic element	Rice-soil (n=40)		Barley-soil (n=28)		Corn-soil (n=30)		Pulses-soil (n=27)		Lettuces-soil (n=30)		Pumpkins-soil (n=31)		Apples-soil (n=30)		Pears-soil (n=30)		Tangerines-soil (n=30)	
	Total	HCl-ext ractable	Total	HCl-ext ractable	Total	HCl-ext ractable	Total	HCl-ext ractable	Total	HCl-ext ractable	Total	HCl-ext ractable	Total	HCl-ext ractable	Total	HCl-ext ractable	Total	HCl-ext ractable
As	3.82* (0.44~11.84)	0.73 (0.04-1.74)	3.38 (1.23~8.14)	1.07 (0.20-1.97)	5.93 (1.06~22.23)	0.51 (0.03-1.44)	6.22 (0.95-45.16)	0.63 (0.05-4.56)	3.84 (0.12-9.33)	0.66 (0.05-1.73)	4.66 (1.22-9.76)	0.88 (0.12-2.15)	4.32 (1.06-9.57)	0.43 (0.06-1.20)	5.44 (1.70-23.48)	0.49 (0.07-3.46)	5.08 (3.03-10.18)	0.20 (0.00-0.73)
Cd	1.68 (0.93~3.08)	0.10 (0.04-0.22)	1.37 (0.72~3.76)	0.12 (0.03-0.38)	1.71 (0.49~3.57)	0.11 (0.01-0.36)	2.38 (1.62-3.91)	0.13 (0.05-0.38)	2.22 (1.45-4.20)	0.05 (0.00-0.27)	2.30 (1.18-3.63)	0.12 (0.03-0.40)	2.17 (1.12-3.74)	0.09 (0.01-0.16)	2.35 (1.50-3.38)	0.08 (0.03-0.30)	4.02 (2.69-6.20)	0.14 (0.04-0.29)
Pb	30.57 (16.16~44.36)	2.97 (0.04-6.34)	31.81 (17.22~168.92)	3.43 (1.81-8.17)	31.14 (17.17~43.39)	2.54 (0.15-7.61)	39.28 (27.96-82.32)	1.68 (0.07-2.94)	30.21 (17.73-47.78)	1.60 (0.05-6.64)	30.99 (20.00-49.60)	1.19 (0.07-2.25)	34.76 (17.98-66.21)	2.43 (0.63-8.65)	36.00 (25.05-62.78)	1.08 (0.06-2.97)	38.58 (28.01-50.75)	1.82 (0.27-2.81)

\* Mean (Min-Max)

대상 농산물 재배 토양 내 비소, 카드뮴, 그리고 납의 침출성 평균 함량은 0.43~1.07 mg/kg, 0.05~0.13 mg/kg, 그리고 1.08~3.43 mg/kg으로 검출되었다. 침출성 평균 함량은 쌀 재배 토양에서 비소(0.73 mg/kg), 카드뮴(0.10 mg/kg), 및 납(2.97 mg/kg)으로, 보리 재배 토양에서 비소 (1.07 mg/kg), 카드뮴(0.12 mg/kg), 및 납(3.43 mg/kg)으로, 옥수수 재배 토양에서 비소(0.51 mg/kg), 카드뮴(0.11 mg/kg), 및 납(2.54 mg/kg)으로, 콩 재배 토양에서 비소 (0.63 mg/kg), 카드뮴(0.13 mg/kg), 및 납(1.68 mg/kg)으로, 상추 재배 토양에서 비소(0.66 mg/kg), 카드뮴(0.05 mg/kg), 및 납(1.60 mg/kg)으로, 호박 재배 토양에서 비소 (0.88 mg/kg), 카드뮴(0.12 mg/kg), 및 납(1.19 mg/kg)으로, 사과 재배 토양에서 비소(0.43 mg/kg), 카드뮴 (0.09 mg/kg), 및 납(2.43 mg/kg)으로, 배 재배 토양에서 비소 (0.49 mg/kg), 카드뮴(0.08 mg/kg), 및 납(1.08 mg/kg)으로 조사되었다.

본 연구결과는 기존의 침출성 평균함량 연구결과와 비교하면 논토양의 경우, 비소 0.77(0.08~3.06) mg/kg, 카드뮴 0.16(0.01~0.37) mg/kg, 납 5.73(2.16~10.01) mg/kg으로 나타났으며, 밭토양의 경우, 비소 0.71(0.03~2.90) mg/kg, 카드뮴 0.07(0.00~0.20) mg/kg, 납 2.65(0.00~15.47) mg/kg으로 논토양 및 밭토양의 중금속 침출성 함량은 유사하게 나타났으나(RDA, 1999; RDA, 2001; RDA, 2003; RDA, 2005; RDA, 2007; RDA, 2009), 현행 환경부 토양오염공정시험법이 토양 전 함량 기준으로 개정되었기 때문에, 침출성 함량 결과를 상호 비교하기에는 어려움이 있다(MOE, 2010).

#### 농산물 내 비소, 카드뮴, 납 오염도 및 전이계수

아홉 품목의 농산물 중 비소, 카드뮴, 및 납의 오염도는 Table 2에 제시하였다. 비소함량은 과채류에 비해 곡류에서 비교적 높았다. 특히 쌀과 보리에서 0.10 mg/kg, 0.02 mg/kg으로 조사되었고, 과채류에서는 평균 0.003~0.008 mg/kg 수준이었다. 쌀 0.101(0.041~0.173) mg/kg, 보리 0.017(0.004~0.050) mg/kg, 옥수수 0.008(0.001~0.023) mg/kg, 콩 0.003(0.001~0.008) mg/kg, 상추 0.009(0.003~0.028) mg/kg, 호박 0.003(0.001~0.012) mg/kg, 사과 0.005(0.001~0.016) mg/kg, 배 0.003(0.000~0.010) mg/kg, 그리고

귤 0.004(0.002~0.007) mg/kg로 조사되었다. 카드뮴 함량은 쌀, 보리, 그리고 상추에서 0.02 mg/kg로 높았고, 타 농산물은 0.001~0.004 mg/kg으로 낮았다. 카드뮴의 함량은 쌀 0.020(0.000~0.105) mg/kg, 보리 0.018(0.005~0.051) mg/kg, 옥수수 0.003(0.000~0.007) mg/kg, 콩 0.003(0.001~0.009) mg/kg, 상추 0.015(0.002~0.063) mg/kg, 호박 0.001(0.000~0.005) mg/kg, 사과 0.001(0.0001~0.003) mg/kg, 배 0.004(0.0001~0.017) mg/kg, 그리고 귤은 0.001(0.000~0.002) mg/kg으로 조사되었다.

위 결과는 Kim 등(2011)이 보고한 6 품목 농산물의 평균 카드뮴 함량 결과와 유사하였다. 곡류, 콩류, 엽채류에 대한 국내 카드뮴 기준을 모두 초과하지 않았으며, 국내 과실류에는 카드뮴 기준이 현재 미설정 되어있지만, Codex, 유럽연합에서 제시한 카드뮴 기준은 0.05 mg/kg 으로 설정되어 있으며, 위 기준과 비교해보았을 때, 과실류에 대한 카드뮴 기준을 모두 초과하지 않은 것으로 나타났다.

납 함량도 동일하게 쌀 0.10 mg/kg, 보리 0.14 mg/kg로 비교적 높았고, 다른 농산물은 0.01~0.08 mg/kg으로 조사되었다. 납의 함량 또한 쌀 0.099(0.010~0.337) mg/kg, 보리 0.136(0.034~0.407) mg/kg, 옥수수 0.075(0.013~0.198) mg/kg, 콩 0.041(0.009~0.094) mg/kg, 상추 0.040(0.006~0.108) mg/kg, 호박 0.030(0.004~0.075) mg/kg, 사과 0.019(0.0001~0.075) mg/kg, 배는 0.013(0.002~0.030) mg/kg, 그리고 귤은 0.013(0.006~0.036) mg/kg로 나타났다. Kim 등(2011)이 보고한 6 품목 농산물의 평균 납 함량 결과와 유사하였다. 국내 곡류, 엽채류, 과실류 기준인 0.2, 0.3, 0.1 mg/kg을 평균적으로는 모두 초과하지는 않았으나 쌀에서 4종, 보리에서 6종에서 국내 기준을 초과하였다. 특히 쌀과 보리에서 비소는 약 10 배, 카드뮴은 약 20 배, 그리고 납은 약 2~10배 높게 검출되었다. 또한 다른 농산물 품목에 비해 상추류에서 비소는 약 2~3 배, 카드뮴은 약 4.5~17배, 그리고 납은 약 1.3~3배 높게 검출되었고, 콩류에서도 평균 함량이 높게 나타났다. 이는 몇 지점에서 높은 함량이 검출됨으로 인해, 평균 함량이 증가한 것으로 판단된다. 상추 내 카드뮴 평균 함량이 다른 농산물에 비해 최대 17배까지 높게 나타나는 것은 토양 표면에 인접한 농산물이어서 중금속 흡수율이 높은 것으로 보고되었다(Zeng *et al.*, 2008; Fergusson, 1990).

Table 2. Contents of As, Cd, and Pb in different agricultural products (mg/kg)

Toxic element	Rice (n=40)	Barley (n=28)	Corn (n=30)	Pulses (n=27)	Lettuces (n=30)	Pumpkins (n=31)	Apples (n=30)	Pears (n=30)	Tangerines (n=30)
As	0.101±0.038 (0.041~0.173)*	0.017±0.009 (0.004~0.050)	0.008±0.005 (0.001~0.023)	0.003±0.002 (0.001~0.008)	0.009±0.005 (0.003~0.028)	0.003±0.002 (0.001~0.012)	0.005±0.004 (0.001~0.016)	0.003±0.002 (0.001~0.010)	0.004±0.002 (0.002~0.007)
Cd	0.020±0.020 (0.000~0.105)	0.018±0.010 (0.005~0.051)	0.003±0.002 (0.000~0.007)	0.003±0.002 (0.001~0.009)	0.015±0.014 (0.002~0.063)	0.001±0.001 (0.000~0.005)	0.001±0.001 (0.000~0.003)	0.004±0.003 (0.001~0.017)	0.001±0.000 (0.000~0.002)
Pb	0.099±0.083 (0.010~0.337)	0.136±0.090 (0.034~0.407)	0.075±0.044 (0.013~0.198)	0.041±0.023 (0.009~0.094)	0.040±0.025 (0.006~0.108)	0.030±0.018 (0.004~0.075)	0.019±0.017 (0.000~0.075)	0.013±0.008 (0.002~0.030)	0.013±0.009 (0.006~0.036)

\* Min-Max

Table 3. Transfer Factors (TFs) of As, Cd, and Pb from total and HCl-extractable in soil to nine kinds of agricultural products

Toxic element	Rice		Barley		Corn		Pulses		Lettuces		Pumpkins		Apples		Pears		Tangerines	
	TF <sub>tot.</sub>	TF <sub>ext.</sub>																
As	0.051*	0.309	0.007	0.023	0.019	0.242	0.006	0.063	0.046	0.219	0.010	0.046	0.012	0.132	0.006	0.107	0.006	0.255
	(0.014 -0.211)	(0.068 -3.156)	(0.001 -0.020)	(0.003 -0.100)	(0.002 -0.070)	(0.010 -2.169)	(0.001 -0.015)	(0.005 -0.200)	(0.005 -0.479)	(0.029 -1.299)	(0.002 -0.094)	(0.008 -0.147)	(0.003 -0.078)	(0.023 -0.510)	(0.001 -0.025)	(0.014 -1.223)	(0.002 -0.017)	(0.028 -0.576)
Cd	0.019	0.308	0.017	0.254	0.013	0.235	0.008	0.198	0.068	6.185	0.005	0.114	0.004	0.177	0.013	0.717	0.002	0.066
	(0.000 -0.106)	(0.005 -1.593)	(0.004 -0.046)	(0.044 -0.853)	(0.001 -0.034)	(0.005 -1.075)	(0.002 -0.019)	(0.013 -0.533)	(0.011 -0.219)	(0.331 -47.987)	(0.000 -0.014)	(0.014 -0.338)	(0.000 -0.014)	(0.004 -1.806)	(0.004 -0.011)	(0.068 -4.306)	(0.000 -0.004)	(0.000 -0.187)
Pb	0.005	0.198	0.006	0.048	0.018	0.366	0.008	0.279	0.013	0.602	0.010	0.536	0.005	0.097	0.003	0.247	0.003	0.069
	(0.000 -0.020)	(0.003 -2.766)	(0.000 -0.021)	(0.010 -0.207)	(0.004 -0.053)	(0.023 -3.269)	(0.002 -0.023)	(0.025 -1.459)	(0.003 -0.030)	(0.033 -6.217)	(0.001 -0.022)	(0.037 -4.376)	(0.000 -0.014)	(0.001 -0.368)	(0.000 -0.008)	(0.027 -2.807)	(0.001 -0.008)	(0.027 -0.243)

<sup>a</sup>TF<sub>tot.</sub> : Transfer factor based on total soil concentrations.  
<sup>a</sup>TF<sub>ext.</sub> : Transfer factor based on HCl-extractable soil concentrations.  
 \* Mean (Min-Max)

농산물 재배 토양 내 비소, 카드뮴, 및 납에 대한 농산물의 전이계수는 Table 3에 제시하였다. 비소의 전이계수는 토양 내 비소의 전 함량으로부터 평균 0.006~0.051이었고, 침출성 함량에 대해서는 평균 0.063~0.309로 산정되었다. 카드뮴의 전이계수 또한 전 함량 대비 평균 0.002~0.068, 침출성 함량 대비 평균 0.066에서 최대 6.185까지 나타났다. 납의 전이계수는 전 함량 대비 평균 0.003~0.018, 침출성 함량 대비 평균 0.048~0.602로 조사되었으며, 위 결과를 통해 비소, 카드뮴, 및 납의 농산물의 전이는 토양 내 이들의 침출성 함량에 크게 의존하는 것으로 증명되었다. 토양 내 침출성 중 금속 함량이 전 함량에 비해 생물 유효도(bioavailability) 및 독성에 대한 예측지표로 활용할 수 있다(McLaughlin *et al.*, 2000; Brun *et al.*, 1998; Savie *et al.*, 1996). 토양 내 비소, 카드뮴, 및 납의 침출성 함량에 대한 농산물의 전이능 순서는 다음과 같다. 비소는 쌀(0.309) > 귤(0.255) > 옥수수(0.242) > 상추류(0.219) > 사과(0.132) > 배(0.107) > 두류(0.063) > 호박(0.046) > 보리(0.023)의 순이었다. 상추류에서의 비소 전이능은 Huang *et al.*(2006)에서 제시한 전이계수에 비해 약 10배 정도 높은 수치를 나타내었다. 카드뮴은 상추(6.185) >> 배(0.717) > 쌀(0.308) > 보리(0.254) > 옥수수(0.235) > 두류(0.198) > 사과(0.177) > 호박(0.114) > 귤(0.066)의 순이었으며, 납은 상추(0.602) > 호박(0.536) > 옥수수(0.366) > 배(0.247) > 쌀(0.198) > 사과(0.097) > 귤(0.069)의 순으로 나타났다.

쌀과 상추 재배 토양 내 비소, 카드뮴, 및 납의 침출성 함량에 대한 전이계수가 타 농산물에 비해 높았다. 농산물 품목별로 상이한 전이계수는 각 농산물을 재배하는 토성, 토양의 이화학적 특성, 토양 내 중금속 함량, 존재형태, 결합능, 그리고 각 농산물의 생리적인 특징에 따라 전이계수가 결정된다(Zeng *et al.*, 2012). 대부분 전이계수는 USEPA, UKEA, RIVM에서 조사된 값으로 사용하고 있으며, 국내에서도 외국 결과를 이용하여 위해성 평가 시 적용하고 있다. USEPA에서는 곡류 중 비소는 0.026, 카드뮴은 0.36으로 적용하고 있으며, 본 연구결과와 비교하면 곡류의 경우, 비소의 토양 총

함량을 사용하여 전이계수를 산출한 값과 유사하였으며, 카드뮴 역시 토양 추출함량을 사용하여 전이계수를 산출한 값과 유사하게 조사되었다. USEPA의 과일류 중 비소의 전이계수는 0.002, 카드뮴은 0.09로 본 연구에서 조사된 토양 총함량을 사용하여 전이계수를 산출한 값과 유사하게 조사되었다. 또한, 엽채류의 경우, 비소는 USEPA 0.036, UKEA 0.009, RIVM 0.03, 카드뮴은 USEPA 0.364, UKEA 0.155~4.06, RIVM 0.7으로 적용하고 있으며, 본 연구결과와 비교하면 본 연구결과에서 제시한 값들이 모두 각국에서 적용하고 있는 전이계수 내에 포함된 결과를 나타내었다(Lee *et al.*, 2009)

**농산물 재배 토양의 전 함량과 침출성 함량이 농산물 내 비소, 카드뮴, 및 납 오염에 미치는 영향**

이후 품목의 농산물 내 비소, 카드뮴 및 납의 함량과 각 농산물을 재배하는 토양 내 이들의 전 함량과 침출성 함량간의 상관성을 조사하였다(Table 4).

쌀의 비소 함량은 토양 내 비소 전 함량과 유의한 양의 상관관계를 보여주었고( $r = 0.41, p < 0.05$ ), 쌀의 납 함량은 토양 내 침출성 납의 함량과 양의 상관관계를( $r = 0.34, p < 0.05$ ) 보여주었다. 콩류 내 카드뮴 함량은 토양 내 카드뮴 전 함량과 유의한 양의 상관관계를 보여주었으며( $r = 0.44, p < 0.05$ ), 호박류 비소 함량은 침출성 토양 비소함량과 양의 상관관계( $r = 0.37, p < 0.05$ )를 보여주었고, 카드뮴 함량은 토양 내 침출성 카드뮴 함량과 양의 상관관계를 나타내었다( $r = 0.38, p < 0.05$ ). 이 결과를 통해 호박류 내 비소와 카드뮴은 재배 토양 내 침출성 함량에 크게 의존하는 것을 알 수 있었다. 사과 내 비소 함량은 재배 토양 내 비소, 카드뮴, 및 납의 침출성 함량과 유의한 양의 상관성을 보여주었고( $r = 0.38 \sim 0.49, p < 0.05$  또는  $p < 0.01$ ), 카드뮴 전 함량과도 유의한 양의 상관관계를 나타내었다( $r = 0.47, p < 0.05$ ). 배는 비소와 카드뮴 함량이 재배 토양 내 이들의 전 함량과 양의 상관관계가 있었다( $r = 0.37 \sim 0.45, p < 0.05$ ). 배의 카드뮴 함량은 토양 내 납의 전 함량과 유의한 양의 상관성을 보여주었고( $r = 0.49, p < 0.05$ ), 납 함량은 토양 내 납의 침출성 함량과

Table 4. Correlation coefficients of total contents in nine kinds of agricultural products with total and HCl-extractable concentrations in soil

Total contents ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) in agricultural products		As, Cd, and Pb contents in soil ( $\text{mg}/\text{kg}$ )					
		$\text{Log}_{10}^{(\text{Tot.As})}$	$\text{Log}_{10}^{(\text{Tot.Cd})}$	$\text{Log}_{10}^{(\text{Tot.Pb})}$	$\text{Log}_{10}^{(\text{Ext.As})}$	$\text{Log}_{10}^{(\text{Ext.Cd})}$	$\text{Log}_{10}^{(\text{Ext.Pb})}$
Rice	$\text{Log}_{10}^{(\text{As})}$	0.41*	0.02	-0.15	0.09	0.26	-0.21
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Cd})}$	-0.12	-0.09	-0.05	-0.03	0.02	0.33*
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Pb})}$	-0.07	0.18	-0.04	-0.22	0.14	0.34*
Barely	$\text{Log}_{10}^{(\text{As})}$	0.22	-0.10	-0.14	0.08	0.26	0.18
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Cd})}$	0.18	0.07	0.15	-0.13	-0.28	0.13
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Pb})}$	-0.19	-0.35	-0.20	0.35	0.24	0.14
Corn	$\text{Log}_{10}^{(\text{As})}$	0.08	0.44*	0.01	0.11	0.04	-0.16
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Cd})}$	0.08	0.34	0.09	0.05	0.19	-0.22
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Pb})}$	0.34	0.30	0.18	-0.27	-0.17	0.08
Pulses	$\text{Log}_{10}^{(\text{As})}$	0.26	-0.14	-0.09	0.25	0.11	0.12
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Cd})}$	0.29	0.44*	0.20	0.02	0.10	-0.02
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Pb})}$	-0.04	0.06	-0.02	0.10	-0.03	0.26
Lettuces	$\text{Log}_{10}^{(\text{As})}$	0.05	-0.21	0.13	0.24	0.25	0.04
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Cd})}$	-0.22	0.17	0.34	0.18	-0.10	0.25
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Pb})}$	0.01	0.12	0.35	-0.17	-0.18	0.31
Pumpkins	$\text{Log}_{10}^{(\text{As})}$	-0.29	-0.25	-0.40*	0.37*	-0.55**	-0.06
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Cd})}$	0.27	0.27	0.26	0.07	0.38*	0.21
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Pb})}$	0.19	-0.11	0.15	0.03	0.03	-0.02
Apples	$\text{Log}_{10}^{(\text{As})}$	0.24	-0.11	0.47*	0.44*	0.38*	0.49**
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Cd})}$	-0.04	0.23	0.06	-0.24	-0.38*	-0.14
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Pb})}$	0.29	0.08	0.05	0.23	0.00	-0.08
Pears	$\text{Log}_{10}^{(\text{As})}$	0.45*	-0.14	0.26	0.20	0.32	0.03
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Cd})}$	0.00	0.37*	0.49*	-0.14	0.24	0.28
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Pb})}$	0.23	0.31	0.32	-0.04	-0.08	0.37*
Tangerines	$\text{Log}_{10}^{(\text{As})}$	-0.20	0.20	-0.23	-0.37	-0.09	-0.11
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Cd})}$	-0.88	-0.32	-0.65	-0.63	-0.44	0.86
	$\text{Log}_{10}^{(\text{Pb})}$	-0.07	-0.45	-0.02	0.34	-0.29	0.45

<sup>Tot.</sup> and <sup>Ext.</sup> mean total and HCl-extractable concentrations in soil.

양의 상관성을 나타내었다( $r = 0.37$ ,  $p < 0.05$ ). 위 결과는 단순회귀분석을 이용하여 얻은 결과와 유사하였다. 쌀의 카드뮴 함량은 토양 내 카드뮴 전함량 간( $R^2 = 0.01$ ), 납 함량은 토양 내 납 전함량 간( $R^2 = 0.11$ ), 콩류의 카드뮴 함량은 토양 내 카드뮴 전 함량 간( $R^2 = 0.20$ ), 호박류 내 비소와 카드뮴 함량은 토양 내 침출성 비소 및 카드뮴 함량 간( $R^2 = 0.14$ ,  $R^2 = 0.15$ ), 사과류 내 비소와 카드뮴 함량 또한 재배 토양 내 침출성 비소 및 카드뮴 함량 간( $R^2 = 0.19$ ,  $R^2 = 0.15$ ), 그리고 배류의 비소와 카드뮴은 토양 내 이들의 전 함량이 유의한 영향을 주었고( $R^2 = 0.21$ ,  $R^2 = 0.13$ ), 납의 함량은 토양 내 침출성 납 함량이 유의한 영향을 주는 것을 조사되었다( $R^2 = 0.14$ ).

농산물 재배 토양 내 비소, 카드뮴, 및 납의 전 함량과 침출성 함량을 결합한 다중회귀분석을 이용하여, 농산물 중 비소, 카드뮴, 및 납의 함량에 미치는 주 영향 인자를 도출하였

다(Table 5). 쌀의 경우, 토양 내 비소는 작물 중 비소에, 토양 내 납은 작물 중 납에 영향을 미치는 주 요인이었으며, 콩류 내 카드뮴 함량은 재배 토양 내 카드뮴 전 함량이 영향을 미치는 주 요인으로 작용하였다. 호박류의 비소와 카드뮴 함량은 토양 내 침출성 카드뮴과 음과 양의 관련성이 있었다. 사과류의 비소 함량은 재배 토양 내 침출성 납과 카드뮴이 통계적으로 유의한 관련성을 보여주었다. 배의 비소 함량은 재배 토양의 비소 전 함량과, 카드뮴 함량은 토양 내 납의 전 함량과 유의한 관계가 성립되었다. 본 연구 결과 농산물 종류에 따른 전이계수는 다르지만 농산물 군별 전이계수를 확인하였으며, 토양의 중금속 함량에 따라 유의한 상관성이 있음을 확인하였다. 추후 국내 생산되는 농산물에 대한 전이계수를 산출하여 토양 및 농작물별 흡수이행 패턴을 확인한다면 농산물에 대한 안전성 및 인체 노출 평가 시 유용한 자료로

Table 5. Summary of multiple regression equation between As, Cd, and Pb contents in nine kinds of agricultural products and total and HCl-extractable concentrations in soil (stepwise regression criteria: probability of F to enter  $p \leq 0.05$ , probability of F to remove  $p \geq 0.10$ ).

Contents	Equation	R <sup>2</sup>	p-value
Rice			
Log <sub>10</sub> <sup>(As)</sup>	= 1.1953 + 0.2266 Log <sub>10</sub> <sup>(Tot.-As)</sup>	0.16	0.012
Log <sub>10</sub> <sup>(Pb)</sup>	= 1.1104 + 0.2167 Log <sub>10</sub> <sup>(Ext.-Pb)</sup>	0.11	0.04
Corn			
Log <sub>10</sub> <sup>(As)</sup>	= 1.299 + 0.6691 Log <sub>10</sub> <sup>(Tot.-Cd)</sup>	0.20	0.018
Pulses			
Log <sub>10</sub> <sup>(Cd)</sup>	= -2.979 + 0.990 Log <sub>10</sub> <sup>(Tot.-Cd)</sup>	0.20	0.02
Pumpkins			
Log <sub>10</sub> <sup>(As)</sup>	= 1.499 - 0.534 Log <sub>10</sub> <sup>(Ext.-Cd)</sup>	0.30	0.002
Log <sub>10</sub> <sup>(Cd)</sup>	= -1.066 + 0.517 Log <sub>10</sub> <sup>(Ext.-Cd)</sup>	0.15	0.04
Apples			
Log <sub>10</sub> <sup>(As)</sup>	= -1.360 + 0.574 Log <sub>10</sub> <sup>(Ext.-Pb)</sup>	0.24	0.007
Log <sub>10</sub> <sup>(As)</sup>	= 0.8028 - 0.524 Log <sub>10</sub> <sup>(Ext.-Cd)</sup>	0.15	0.04
Pears			
Log <sub>10</sub> <sup>(As)</sup>	= -1.913 + 0.624 Log <sub>10</sub> <sup>(Tot.-As)</sup>	0.21	0.02
Log <sub>10</sub> <sup>(Cd)</sup>	= -5.849 + 1.387 Log <sub>10</sub> <sup>(Tot.-Pb)</sup>	0.24	0.01

Tot and Ext. mean total and HCl-extractable concentrations in soil.

Contents in soil and five agricultural products were Log<sub>10</sub>-transformed to make the homogeneous variances.

활용될 수 있을 것이다.

## 요약

본 연구에서는 농산물 중 중금속 함량과 토양 중 중금속 함량을 확인하여 이들의 상관성 및 전이계수를 확인하고자 하였다. 대상 농산물은 곡류(쌀, 보리, 옥수수), 과채류(콩류, 상추류, 호박류, 사과류, 배류, 감귤류) 9종에 대한 주산단지를 중심으로 비소, 카드뮴 및 납의 함량을 조사하였다. 농산물 및 토양 중 중금속 함량을 조사한 결과 비소, 카드뮴, 납의 농산물로의 전이는 토양 내 이들의 침출성 함량이 주 영향 요인으로 작용하였다. 비소의 전이계수는 평균 0.006~0.309, 카드뮴의 전이계수는 평균 0.002~6.185, 납은 평균 0.003~0.602로 카드뮴의 침출성 함량이 다른 금속에 비하여 전이계수가 높게 산정되었다. 토양 내 중금속 침출성 함량에 대한 농산물의 전이능 순서는 비소는 쌀(0.309), 카드뮴은 상추(6.185), 배(0.717), 납은 상추(0.602), 호박(0.536)순으로 비소의 경우 쌀에서, 카드뮴 및 납의 경우, 과채류에서 높게 나타났다. 쌀의 비소 함량은 토양 내 비소 전 함량과 높은 상관성( $r=0.41$ ,  $p < 0.05$ )을, 콩류 내 카드뮴 함량은 토양 내 카드뮴 전 함량과 높은 상관성( $r=0.44$ ,  $p < 0.05$ )을, 호박의 카드뮴 함량은 토양 내 카드뮴 전 함량과 높은 상관성( $r=0.38$ ,  $p < 0.05$ )을 나타내었으며, 영향을 미치는 주 요인으로 작용하였다. 본 연구 결과, 농산물 군에 따라 전이율이 다르나 본

연구 대상 농산물 중 비소의 경우 과채류에 비하여 곡류 중 쌀의 전이율이 높았으며, 이에 대한 기준 설정 및 추가 연구가 필요하며, 카드뮴 및 납은 토양과 근접한 상추 등과 같은 작물에서 높은 전이율을 나타내었다. 또한, 토양 중 중금속 함량이 증가함으로써 작물 내 중금속 함량이 증가함을 확인하였다. 추후 농산물에 대한 전이계수를 산출하면 토양에 따른 농산물의 흡수이행 함량을 예측할 수 있으며, 토양과 농산물간 위해성 평가 및 흡수이행 연구에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

This study was carried out with the support of "Research Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No.PJ00865002)", National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

## 참고문헌

- Brun, L.A., Maillet, J., Richarte, J., Herrmann, P., Remy, J.C., 1998. Relationships between extractable copper, soil properties and copper uptake by wild plants in vineyard soils, *Environmental Pollution*. 102, 151-161.
- Cao, H., Chen, J., Zhang, J., Zhang, H., Qiao, L., Men, Y.

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. Environmental Sciences*. 22(11), 1792-1799.
- Cui, Y.J., Zhu, Y.G., Zhai, R.H., Chen, D.Y., Hung, Y.Z., Qui, Y., 2004. Transfer of metals from soil to vegetables in an areas near a smelter in Nanning, *China Environ. Int.* 30 (6), 785-791.
- Dudka, S., Piotrowska, M., Telerak, H., 1996. Transfer of cadmium, lead and Zinc from industrially contaminated soil to crop plants: a field study, *Environ. Pollut.* 94(2), 181-188.
- Fergusson, J.E., 1990. *The Heavy elements. Chemistry, Environmental Impact and Health Effect*, Pergamon Press, Oxford, UK.
- Greger, M., Malm, T., Kautsky, L., 2007. Heavy metal transfer from composted macroalgae to crops, *Eur. J. Agron.* 26, 257-265.
- Huang, R., Gao, S., Wang, W., Staunton, S., Wang, G., 2006. Soil arsenic availability and the transfer of soil arsenic to crops in suburban areas in Fujian Province, southeast China, *Sci Total Environ.* 368, 531-541.
- Jung, G.B., Kim, W.I., Lee, J.S., Shin, J.D., Kim, J.H., Yun, S.G., 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.
- Kim, J.Y., Choi, N.G., Yoo, J.H., Lee, J.H., Lee, Y.G., Jo, K.K., Lee, C.H., Hong, S.M., Im, G.J., Hong, M.K., Kim, W.I., 2011. Monitoring and Risk Assessment of Cadmium and Lead in Agricultural Products, *Korean J Environ Agric.* 30(3), 330-338.
- Klocke, A., Sauerbeck, D.R., Vetter, H., 1984. The contaminations of plant and soils with heavy metals, and the transport of metals in terrestrial food chain. in: Nriagu, J.O. (Ed.), *Changing Metal Cycles and Human Health: report of the Dahlem Workshop on Changing Metal Cycles and Human Health*, Germany, pp. 113-114.
- Lee, M.H., Kim, T.S., Lee, M.S., Ahn, Y.J., Lee, M.H., Lee, J.Y., Yang, J.Y., Lee, H.M., Kim M.J., Park, J.W., Lee, K.G., Jeung, S.W., Nam, K.P., Ryu, H.L., Choi, S.I., Ko, I.W., 2009. *Risk Assessment of Soil*, pp. 116-118, Dongwha Technology, Korea.
- Lee, J.H., Kim, J.Y., Go, W.R., Jeong, E.J., Kunhikrishnan, A, Jung, G.B, Kim D.H., Kim W.I., 2012. Current research trends for heavy metals of agricultural soils and crop uptake in Korea, *Korean J Environ Agric.* 31(1), 75-95.
- McLaughlin, M.J., Hanmon, R.E., MacLaren, R.G., Speir, T.W. & Rogers, S.L. 2000. Review: a bioavailability-based rationale for controlling metal and metalloid contamination of agricultural land in Australia and New Zealand, *Aust. J. Soil Res.* 38, 1037-1086.
- Nan, Z., Li, J., Zhang, G., Cheng, G., 2002. Cadmium and zinc interaction and their transfer in soil crop system under actual field conditions, *Sci. Total Environ.* 285, 187-195.
- Nan, Z., Zhao, C., Liu, X., Saha, U.K., Lena, Q., Ma and Abigail, R., Clarke-Sather, R., 2010. The uptake and translocation of selected elements by Cole (Brassica) grown using oasis soils in pot experiments 2010, *Toxicol. Environ. Chem.* 92 (8), 1541-1549.
- Samical, A.I., Hotea, V., Oros, V., Juhasz, J., Pop, E., 2008. Studies on transfer and bioaccumulation of heavy metals from soil into lettuce, *Environ. Eng. Manage. J.* 7 (5), 609-615.
- Savie, S., Cook, N., Hendershot, W.H., McBride, M.B. McBride., 1996. Linking plant tissue concentrations and soil copper pools in urban contaminated soils, *Environmental Pollution.* 94, 153-157.
- Puschenreiter, M., Horak, O., 2000. Influence of different soil parameters on the transfer factor soil to plant of Cd Cu and Zn for wheat and rye Die, *Bodenkultur*, 51 (1), 3-10.
- Uchida, S., Tagami, K., Hirai, I., 2007. Soil to plant transfer factors of stable elements and naturally occurring radionuclides in upland field crops collected in Japan, *J. Nucl. Sci. Technol.* 44, 628-640.
- Wang, Y., Qiao, M., Liu, Y., Zhu, Y., 2012. Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from wastewater irrigated area, Beijing-Tianjin city cluster, *China J. Environmental Sciences*, 24(4), 690-698.
- Zeng X.B., Li, L.F., Mei, X.R., 2008. Heavy metal content in Chinese vegetable plantation land soils and related source analysis, *Agric. Sci. China*, 7(9), 1115-1126.
- Zeng, F., Ali, S., Zhang, H., Ouyang, Y., Qiu, B., Wu, F., Zhang, G., 2012. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants, *Environ. Pollut.* 59(1), 84-91.