

Determination of Bioconcentration Factor of Heavy Metal (loid)s in Rice Grown on Soils Vulnerable to Heavy Metal (loid)s Contamination

Seul Lee^{1†}, Dae-Won Kang^{1†}, Ji-Hyock Yoo¹, Sang-Won Park¹, Kyeong-Seok Oh¹, Jin-Ho Lee², Il Kyu Cho³,
Byeong-Churl Moon¹, and Won-Il Kim^{1*}

¹Chemical Safety Division, National Institute of Agricultural Science, Wanju 55365, Korea

²Department of Agricultural Chemistry, Chonbuk National University, Jeonju, 54896, Korea

³Bio Control Research Center, Jeonnam Bioindustry Foundation, Gokseong, 57509, Korea

*Corresponding author: wikim721@korea.kr

[†]These authors contributed equally to this work.

ABSTRACT

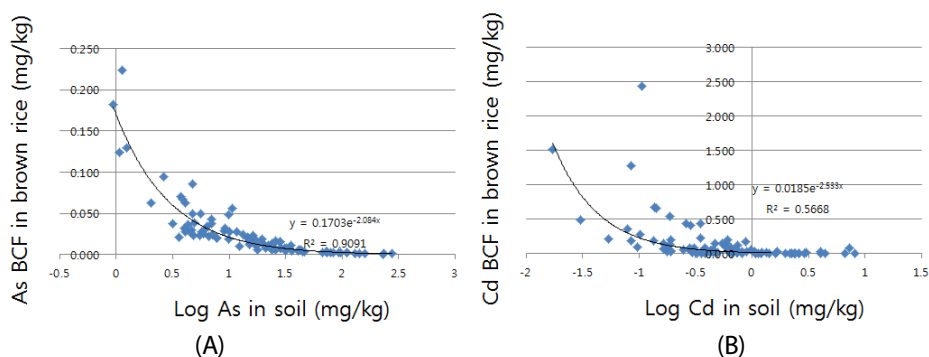
Received: February 9, 2017

Revised: May 2, 2017

Accepted: May 4, 2017

There is an increasing concern over heavy metal(loid) contamination of soil in agricultural areas including paddy soils. This study was conducted to determine the bioconcentration factor (BCF) for heavy metal(loid)s to brown rice grown in paddy soils vulnerable to heavy metal(loid)s contamination, for the quantitative health risk assessment to the residents living nearby the metal contaminated regions. The samples were collected from 98 sites nationwide in the year 2015. The mean and range BCF values of As, Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn in brown rice were 0.027 (0.001 ~ 0.224), 0.143 (0.001 ~ 2.434), 0.165 (0.039 ~ 0.819), 0.028 (0.005 ~ 0.187), 0.006 (0.001 ~ 0.048), and 0.355 (0.113 ~ 1.263), respectively, with Zn showing the highest. Even though the relationship between heavy metal(loid) contents in the vulnerable soils and metal contents in brown rice collected at the same fields was not significantly correlated, the relationship between log contents of heavy metal(loid)s in the vulnerable soils and BCF of brown rice was significantly correlated with As, Cd, Cu, and Zn in rice. In conclusion, soil environmental risk assessment for crop uptake should consider the bioconcentration factor calculated using both the initial and vulnerable heavy metal(loid) contents in the required soil and the crop cultivated in the same fields.

Keywords: Heavy metal(loid)s, Bioconcentration Factor (BCF), Brown Rice, Paddy soil



Correlation coefficients between log contents of As(A) and Cd(B) in the vulnerable paddy fields by arsenic contamination and bioconcentration factors of brown rice collected at the same fields.



Introduction

토양오염물질 중 중금속은 토양내 유입되면 이동성이 적고 장기간 축적되어 작물의 생육저해 및 농작물을 통하여 인체에 피해를 준다. 중금속에 의한 환경오염은 토양위해성 평가모델로서 그 정도를 파악하여 적절한 조치들을 수행하는데 국제적으로 미국 환경보호청 (US-EPA)의 Soil Screening Guidance, 영국환경청 (Environment Agency, UK)의 Soil Guideline value (The Contaminated Land Exposure Assessment model), 네덜란드 보건환경연구소 (National Institute of Public Health and the Environment)의 Evaluation and revision of the CSOIL parameter set 등이 있다(Environment Agency, 2002; Otte et al., 2001; US-EPA, 1996; KOSSGE, 2009). 국내에서도 환경부의 토양환경보전법 (MOE, 2006)에서는 오염물질의 종류 및 오염도, 주변 환경, 장래의 토지이용계획과 그 밖에 필요한 사항을 고려하여 해당 부지의 토양오염물질이 인체와 환경에 미치는 위해의 정도를 평가한 후 그 결과를 토양정화의 범위, 시기 및 수준 등에 반영한다. 환경 위해성평가는 오염물질의 오염범위 및 노출농도 결정, 노출평가, 독성평가 및 위해도 결정 순으로 수행되는데 이 중 노출평가에서 오염물질에 의한 인체 노출경로로 농작물 섭취, 음용수 섭취, 토양섭취, 토양 피부접촉, 음용수 피부접촉 및 비산먼지 흡입 등 6개의 경로를 통하여 이루어진다.

이들 평가모델에서 적용되는 노출평가에서 농산물에 의한 중금속의 인체섭취는 중금속별 생물농축계수 (BCF, Bioconcentration factor)로 산정하는데 Brooks (1983)는 식물체의 무기원소에 대한 흡수와 이동성을 고려하여 생물학적 흡수계수 (BAC, Biological Absorption Coefficient)를 제안하여 널리 이용되고 있다. 이는 다른 용어인 생물농축계수로도 사용되고 있는데 생물농축계수는 식물체내 중금속 함량을 토양내의 중금속 함량으로 나눈 값으로 토양으로부터 식물로 이동하는 중금속의 상대적인 흡수 비를 의미한다 (Kim et al., 2012; Liu et al., 2009; Satpathy et al., 2014). 토양오염 위해성평가 지침에서의 생물농축계수는 중금속류의 노출경로에서 농작물섭취에 고려되어 산정된다. 이 때, 농작물 내 오염물질농도는 가능한 한 실측하여야 하며 실측이 어려운 경우는 토양-식물 간 생물농축계수를 고려하여 계산할 수 있다고 언급하고 있다. 이는 중금속 오염지역의 거주 주민이 해당지역에서 생산된 농산물을 섭취할 경우 인체에 미치는 위해정도를 정량적으로 평가하기 위한 지표산정이 필요하다는 것을 의미한다. 현재까지 국내에서 통용되는 토양위해성 평가에 미국 환경보호청 (US-EPA) 등 국외 생물농축계수 자료를 활용하고 있고, 국내 자료는 없는 실정이다. 또한, 토양오염 위해성평가 지침에서는 농작물섭취에 의한 위해도 계산에서 곡류, 과일류, 엽채류 및 근채류로 구분하여 산정하고 있는데 이 중 중금속 오염지 재배작물 및 일일섭취량 등을 고려하여 쌀 (현미)에 대해 우선하여 조사하였다. 이에 본 연구에서는 국내 토양특성 및 농작물 특히 쌀 (현미)에 대하여 재배현황 등을 고려하여 토양오염 위해성평가 중 농작물을 통한 토양-식물간 생물농축계수를 산정하여 제안하고자 한다.

Materials and Methods

본 연구에서는 우리나라 중금속오염 취약농경지로서 기존의 연구결과에서 조사된 농경지 토양, 농업용수 및 현미 중 중금속 특히 비소함량이 상대적으로 높은 22지역을 대상으로 지역 당 3지점 ~ 5지점을 선정하여 총 98지점 농토양에서 재배토양을 채취하였고, 농산물 (현미)은 토양 채취와 동일한 지점에서 수확기에 채취하였다. 토양시료의 채취, 조제 및 중금속 전함량에 대한 분석은 환경부의 토양오염공정시험법 (MOE, 2010)에 따라 분석하였다.

수확한 쌀 시료를 풍건한 후, 드라이오븐에서 60°C 에서 하루 건조 후 현미기 (SYTH88, Ssangyong Instrument, Korea)를 이용하여 도정 한 뒤 1분 동안 자동 균질기를 사용하여 고운 가루로 빻아서 실온에 보관하였다. 건조한 쌀

시료 0.25 g을 고압 폴리테트라플로로에틸렌 (PTFE) vessel로 옮긴 후, 8 mL 70% HNO₃ (Sigma, USA), 1 mL H₂O₂ (Sigma, USA)를 각각 주입하였다. 모든 vessel은 screw cap으로 밀봉하여 설정된 프로그램에 의해 microwave digestion system (ETHOS, Milestone, Italy)를 이용하여 180°C에서 20분간 산 분해를 수행하였다. 산 분해 후, vessel용기를 상온에서 충분히 냉각시킨 후 얻은 분해액을 0.45 µm의 여과지로 여과한 다음 초순수 증류수로 25 mL 까지 정용하여 분석 시료로 사용하였다.

중금속 함량 분석을 위해 각각의 중금속 표준원액 (Merck, Germany) 1,000 mg L⁻¹ stock solution을 구입하여, 2% HNO₃ 용액으로 희석하여 0.1 ~ 50 µg L⁻¹ 농도범위로 조제하였고, 토양은 ICP-OES (GBC Integra-XMP, Braeside, Australia)로, 농산물은 ICP-MS (Agilent technologies, 7500a)로 분석하였다. 분석법 검증을 위해 시료를 분석하는 동안 certified reference material (CRM)인 토양 (BAM-U112a)와 standard reference material (SRM)인 쌀 가루 (NIST 1568a)를 이용하여 정확도를 검증하였고, 80 ~ 120% 사이의 결과를 확인하였다. 또한, 생물농축계수 (Bioconcentration factor, Eq. 1)는 작물체내 중금속 (HM) 함량을 토양 중 중금속 함량으로 나눈 값으로 토양으로부터 작물로 이동하는 중금속의 상대적인 흡수 비를 의미하며 생물농축계수가 높을수록 토양 중의 중금속이 작물로의 이동이 높다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 토양 중 중금속함량과 현미 중 중금속 함량을 이용하여 생물농축계수를 산출하였다.

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

토양과 농산물 내 중금속 함량간의 상관성 분석은 SPSS 프로그램 ver 18.0 (SPSS Inc., Somers, NY, USA)를 이용하여 단순상관분석으로 수행하였다.

Results and Discussion

우리나라 비소오염 취약 농토양 중 조사된 98점의 비소, 카드뮴, 구리, 니켈, 납, 아연의 평균함량 및 범위는 각각 33.58 (0.95 ~ 274.76) mg kg⁻¹, 1.05 (0.017 ~ 8.12) mg kg⁻¹, 24.40 (4.55 ~ 90.46) mg kg⁻¹, 20.60 (4.72 ~ 59.89) mg kg⁻¹, 28.39 (5.14 ~ 239.0) mg kg⁻¹, 70.18 (25.83 ~ 147.69) mg kg⁻¹이었다 (Table 1). 이는 토양환경보전법에서 정하는 토양오염우려기준에 비하여 비소의 평균함량이 1.3배, 최대함량이 11배로서 높은 수준을 확인하였고, 일부 시료는 토양오염대책기준을 초과하였다. 카드뮴의 경우 일부 시료가 토양오염우려기준을 초과하였으나 대책기준을 초과한 지점은 확인되지 않았다. 그외, 구리, 니켈, 납, 아연의 평균함량은 토양오염우려기준의 1/4 ~ 1/7수준으로 조사되었으며 최대함량도 우려기준을 초과하지 않는 것으로 확인되었다. 또한 2015년 보고된 우리나라 비오염 농토양의 평균 함량과 비교하여 비소는 8배, 카드뮴은 4배 높은 수치였으나 타 원소의 경우 2배 이하의 오염 농도를 보여 금번 조사된 지역은 일반적으로 비소와 카드뮴이 높은 경향을 보였다 (Kunhikrishnan et al., 2015). 토양오염 기준 설정에 대한 과학적 근거를 마련하고자 수행된 우리나라 토양의 자연배경농도 모니터링 결과와 비교하여도 본 조사에서는 비소는 6배, 카드뮴은 4배 높은 수치로 앞서의 결과와도 유사하였다 (Yoon et al., 2009).

Table 1. Heavy metal (loid) concentrations in the paddy fields vulnerable to arsenic contamination in Korea (n = 98).

| Parameters | Heavy metal (loid) content (mg kg ⁻¹) | | | | | |
|-------------------------------------|---|------|------|------|-------|-------|
| | As | Cd | Cu | Ni | Pb | Zn |
| Average | 33.58 | 1.05 | 24.4 | 20.6 | 28.4 | 70.2 |
| Min. | 0.95 | 0.02 | 4.6 | 4.7 | 5.1 | 25.8 |
| Max. | 274.76 | 8.12 | 90.5 | 59.9 | 239.0 | 147.7 |
| Median | 15.28 | 0.50 | 23.4 | 20.4 | 17.9 | 68.9 |
| 95% P | 131.16 | 4.06 | 45.4 | 38.6 | 116.9 | 109.7 |
| Non-contaminated soil ¹⁾ | 4.41 | 0.25 | 13.2 | 13.6 | 21.3 | 54.1 |
| Concern level ²⁾ | 25 | 4 | 150 | 100 | 200 | 300 |
| Countermeasure level ²⁾ | 75 | 12 | 450 | 300 | 600 | 900 |

¹⁾ : Total concentration of heavy metal(loid) in non-contaminated paddy soils in Korea (Kunhikrishnan et al., 2015)

²⁾ : Korean regulation of soil contamination was changed from weak acid extractable content to total content basis in 2010 (MOE, 2010).

우리나라 중금속오염 취약 농토양에서 생산된 현미 중 비소, 카드뮴, 구리, 니켈, 납, 아연의 평균함량 및 범위는 각각 0.237 (0.076 ~ 0.604) mg kg⁻¹, 0.040 (0.002 ~ 0.597) mg kg⁻¹, 3.26 (0.65 ~ 7.24) mg kg⁻¹, 0.526 (0.109 ~ 3.104) mg kg⁻¹, 0.111 (0.013 ~ 0.76) mg kg⁻¹, 21.76 (10.57 ~ 34.89) mg kg⁻¹이었다 (Table 2). 이 결과는 2009년 보고된 탑라이스 생산지역 농토양에서 생산된 현미 중 중금속 함량에 비해 비소와 카드뮴은 높게 나타났으나 구리의 경우 낮게 조사되었고 납 함량은 유사하였다 (Park et al., 2008; Park et al., 2009). 또한, 2015년 보고된 중금속 비오염 벼주산단지 일반 농토양에서 재배된 현미 중 중금속 모니터링 결과와 비교하여 비소, 카드뮴 및 니켈함량은 각각 162.3%, 166.7%, 152.4%로 높게 나타났으나 구리, 납 및 아연 함량은 각각 76.3%, 98.2%, 96.1%로 유사하였다 (Kunhikrishnan et al., 2015). 이러한 결과를 종합해 볼 때 우리나라 중금속오염 취약 농경지에서 생산되는 쌀의 주요 오염은 카드뮴 및 비소이고, 이는 토양의 카드뮴 및 비소 오염으로부터 기인함을 확인할 수 있다. 반면에 납의 경우에는 토양에 오염이 심할 경우에도 낮은 이행성으로 현미 중 축적이 높게 나타나지 않았다. 한편, 우리나라의 쌀 중 중금속

Table 2. Heavy metal (loid) concentrations in brown rice collected at the same paddy fields vulnerable to arsenic contamination in Korea (n = 98).

| Parameters | Heavy metal (loid) content (mg kg ⁻¹) | | | | | |
|--|---|--------|-------|-------|--------|-------|
| | As | Cd | Cu | Ni | Pb | Zn |
| Average | 0.237 | 0.0402 | 3.26 | 0.526 | 0.111 | 21.8 |
| Min. | 0.0763 | 0.0024 | 0.648 | 0.109 | 0.0128 | 10.6 |
| Max. | 0.604 | 0.597 | 7.24 | 3.10 | 0.760 | 34.9 |
| Median | 0.237 | 0.0177 | 3.14 | 0.337 | 0.0545 | 22.2 |
| 95% P | 0.410 | 0.124 | 5.31 | 1.89 | 0.407 | 29.0 |
| Non-contaminated soil ¹⁾ | 0.146 | 0.024 | 4.27 | 0.345 | 0.113 | 22.64 |
| Maximum permitted level ²⁾ (mg/kg FW) | 0.2 (inorganic As) | 0.2 | | | 0.2 | |

¹⁾ : Concentration of heavy metal(loid) in brown rice collected at the non-contaminated paddy soils in Korea (Kunhikrishnan et al., 2015)

²⁾ : Maximum permitted level of heavy metal(loid) in polished rice in Korea (KFDA, 2016). Arsenic is on an inorganic As basis.

기준은 백미를 기준으로 하여 카드뮴, 납 및 무기비소가 설정되어 있고 현미 중 중금속 기준은 아직 설정되지 않은 관계로 조사된 현미 중 중금속의 오염 정도를 평가할 수는 없으나 현미와 백미의 가공계수 (As : 0.64, Cd : 0.82, Pb : 0.59)를 고려할 경우 일부 시료에서 기준을 초과할 시료가 있을 것으로 추정되어 이 후 백미를 이용한 안전성 조사가 이루어져 할 필요성이 있다 (Park et al., 2009).

Fig. 1은 토양 중 중금속 전함량과 현미 중 중금속 함량과의 관계를 보여준다. 1차적으로 농산물 중 중금속 함량은 오염된 토양으로부터 유래하여 농작물을 통하여 전이됨으로써 토양 중 중금속의 증가는 농산물 중 중금속의 증가를 유도하는 것으로 추정되는데 본 결과에서는 대부분 중금속에서는 유의적인 상관성이 확인하지 못했다. 이러한 결과는 토양 중 중금속 함량과 더불어 토양산도, 토양화학적, 기후조건 및 작물의 유전적 특성 등 다양한 요인에 의해 이행정도가 다르게 나타나기 때문인 것으로 추정된다. Lin et al. (2015)은 쌀 중 비소 함량과 표층 및 하부 논토양 중 비소함량과의 관계에서 낮은 상관성을 보였는데 본 결과와 유사하였다. 그럼에도 뿌리 및 벚짚 중 비소함량은 토양 중 비소함량과 각각 ($r^2 = 0.93$) 및 ($r^2 = 0.56$)의 높은 상관성을 보여 작물체 중의 비소함량에 토양 중 비소 함량이 크게 기여함이 추정된

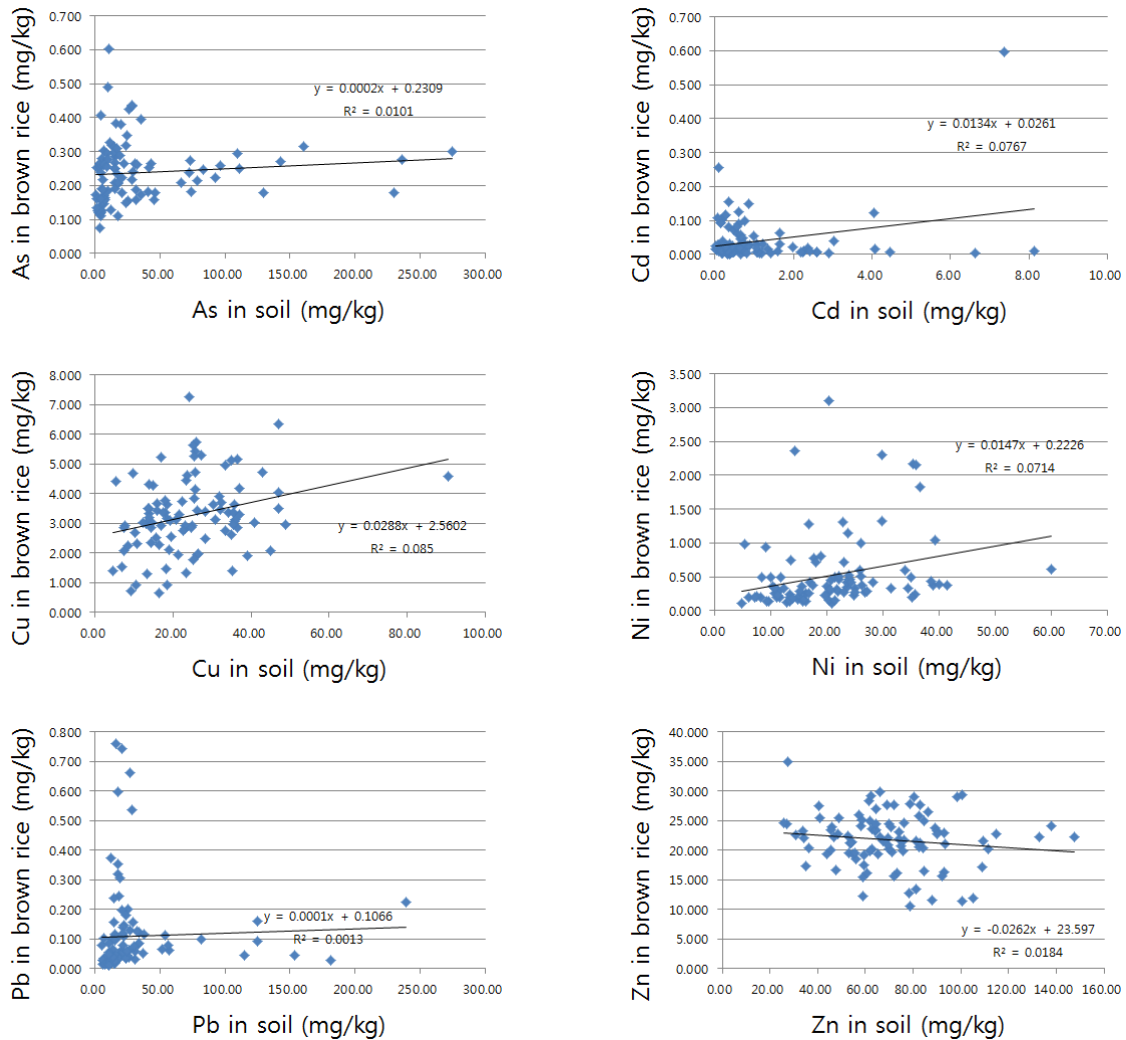


Fig. 1. Correlation coefficients between heavy metal(loid) content in the paddy fields vulnerable to arsenic contamination and heavy metal content in brown rice collected at the same fields.

다.

금번 연구에서 조사된 우리나라 중금속오염 취약 농토양과 동일토양에서 생산된 현미 중 중금속의 농도를 산정하여 우리나라 비소오염 취약 농토양에서 생산된 현미 중 비소, 카드뮴, 구리, 니켈, 납, 아연의 생물농축계수를 산정한 결과 각 중금속의 평균과 범위는 각각 0.027 (0.001 ~ 0.224), 0.143 (0.001 ~ 2.434), 0.165 (0.039 ~ 0.819), 0.028 (0.005 ~ 0.187), 0.006 (0.001 ~ 0.048), 0.355 (0.113 ~ 1.263)를 보였다. 이 중 작물 필수원소 중의 하나이기도 한 아연과 구리의 계수가 높은 수준을 보였고, 카드뮴도 높은 수준을 보였다. 반면에 납, 니켈 및 비소는 이동성이 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다 (Table 3). 또한, 토양 중 중금속이 상대적으로 낮은 쌀 주산단지 농토양에서 얻어진 2015년 생물농축계수와 비교해서도 전반적으로 낮은 계수를 보였다 (Kunhikrishnan et al., 2015). 2012년 보고된 쌀 중 비소, 카드뮴 및 납의 생물농축계수인 각각 0.051, 0.019 및 0.005와 비교한 결과 비소의 경우는 낮게 나타났으나 카드뮴은 높은 경향을 보였다 (Kim, et al., 2012). 이 결과들은 토양 잔류 중금속 함량과 백미 중 중금속 함량간의 유의한 1차 회귀식을 얻지 못하나 토양 중 카드뮴과 구리는 쌀로 쉽게 이행될 가능성이 크고, 비소와 납은 거의 쌀로 이행되지 않음을 보고한 기존의 결과와도 일치함을 보여준다 (Park et al., 2009). 또한, 본 조사에서 산정된 현미 중 비소, 카드뮴, 니켈 및 아연의 생물농축계수가 각각 0.027, 0.143, 0.028 및 0.355로서 기존의 토양오염 위해성평가에서 활용중인 미국 EPA의 경험적인 곡류의 생물농축계수인 0.026, 0.36, 0.01 및 0.1로서 카드뮴과 아연은 높게 비소와 니켈은 낮게 조사되어 두 자료간에 유사한 경향을 보였다 (US-EPA, 1996). 본 조사로 산정된 현미의 생물농축계수는 우리나라 토양환경보전법에 의거한 ‘토양오염 위해성평가지침’의 농작물 섭취로 인한 발암 및 비발암 위험도 산정에 국내자료로 활용될 수 있으며 나아가 유해물질 토양오염 기준설정 및 오염지 정화 우선순위 선정 등에 활용할 수 있다.

Table 3. Bioconcentration factor (BCF) of heavy metal(loid) in brown rice collected at the same paddy fields vulnerable to arsenic contamination in Korea (n = 98)

| Parameters | Bioconcentration factor | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | As | Cd | Cu | Ni | Pb | Zn |
| Average | 0.0267 | 0.143 | 0.165 | 0.0285 | 0.0058 | 0.355 |
| Min. | 0.0008 | 0.0008 | 0.0392 | 0.0052 | 0.0002 | 0.113 |
| Max. | 0.224 | 2.43 | 0.819 | 0.187 | 0.0477 | 1.26 |
| Median | 0.0165 | 0.0348 | 0.142 | 0.0185 | 0.0025 | 0.322 |
| 95% P | 0.0880 | 0.566 | 0.309 | 0.0766 | 0.0212 | 0.682 |
| Non-contaminated soil ¹⁾ | 0.101 | 0.121 | 0.399 | 0.033 | 0.005 | 0.473 |

¹⁾: BCF of heavy metal(loid) in brown rice collected at the non-contaminated paddy soils in Korea (Kunhikrishnan et al., 2015)

Fig. 2는 토양 중 중금속 전함량의 로그함수와 현미로의 중금속 생물농축계수와와의 관계를 보여준다. 토양 중 중금속의 함량증가에 따라 현미로의 생물농축계수가 지수함수적으로 감소함을 나타내는데 비소, 카드뮴, 구리 및 아연에서 높은 상관성을, 니켈과 납에서 낮은 상관성을 보여준다. 이는 중금속의 생물농축계수가 토양오염 정도가 높아질수록 점점 감소하는 결과로써 토양 중 중금속 함량에 따른 생물농축계수는 차이가 있음을 확인해 준다. 이들 경향은 2015년 카드뮴과 납의 농도가 다른 두 토양에서 재배된 쌀의 생물농축계수가 이들 농도가 높은 토양에서 재배된 쌀의 생물농축계수보다 낮다는 결과와 일치하였다 (Lim, et al., 2015). 이러한 결과는 환경위해성평가에서 농작물 섭취에 따른 인체노출량 산정에 고정된 BCF를 이용하는 영국의 CLEA 모델보다 평가지점에서 생산된 작물의 중금속 농도로 산정되는 생물농축계수 값을 이용하여 인체에 미치는 위해정도를 정량적으로 평가하는 미국의 SSG 및 네덜란드의

CSOIL모델이 보다 더 타당성이 있음을 보여준다.

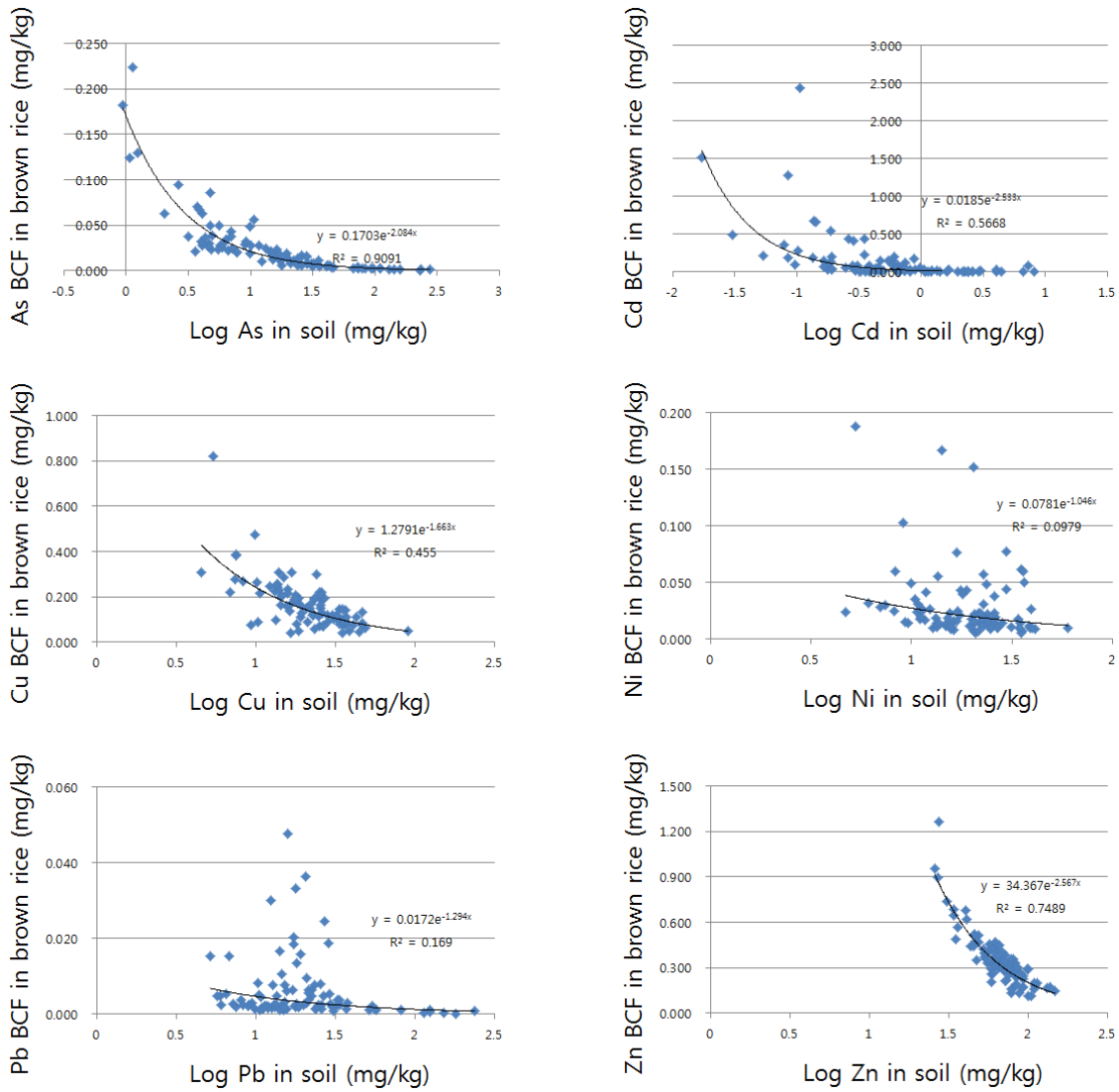


Fig. 2. Correlation coefficients between log contents of heavy metal(loid) in the paddy fields vulnerable to arsenic contamination and bioconcentration factors of brown rice collected at the same fields.

Conclusion

본 연구에서는 중금속의 토양오염이 인체에 미치는 위해영향을 정량적으로 평가하기 위한 토양환경 위해성평가 중 농작물 즉 주식인 쌀(현미)에 대한 중금속의 토양-식물간 생물농축계수를 산정하여 제안하고자 하였다. 우리나라 비소오염 취약 농토양 98지점의 토양 및 동일지점에서 생산된 농산물(현미)을 채취하여 화학분석을 실시하였고 분석 결과로서 생물농축계수를 산정하였다. 우리나라 비소오염 취약 농토양에서 생산된 현미 중 비소, 카드뮴, 구리, 니켈, 납, 아연의 생물농축계수의 평균과 범위는 각각 0.027 (0.001 ~ 0.224), 0.143 (0.001 ~ 2.434), 0.165 (0.039 ~ 0.819),

0.028 (0.005 ~ 0.187), 0.006 (0.001 ~ 0.048), 0.355 (0.113 ~ 1.263)를 보였다. 이는, 중금속의 생물농축계수가 토양 오염 정도가 높아질수록 점점 감소한다는 결과를 보임으로서 토양 중 중금속 함량에 따라 생물농축계수의 차이가 있음을 확인하였다. 따라서 오염토양에 대한 환경위해성평가는 평가지점의 토양오염 정도를 파악한 후 인체에 미치는 위해정도를 정량적으로 평가하는 것이 타당하다. 그러나, 이러한 결론을 확인하기 위해서는 비오염토양에서 얻은 BCF를 사용한 위해도 평가에서 위해정도가 어느 정도인지 평가되어야 할 것이다.

Acknowledgement

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

References

- Brooks, R.R. 1983. Biological Methods of Protecting for Minerals. John Wiley & Sons, NY, USA.
- Environment Agency. 2002. The Contaminated Land Exposure Assessment(CLEA) Model : Technical Basis and Algorithms. Report prepared for the department of environment, food and rural affairs. R&D publication CLR 10.
- Kim, J.Y., J.H. Lee, A. Kunhikrishnan, D.W. Kang, M.J. Kim, J.H. Ryu, 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.
- Korean Society of Soil and Groundwater Environment (KOSSGE). 2009 Soil Risk Assessment. Donghwa Pub.
- Kunhikrishnan, A. W.R. Go, J.H. Park, K.R. Kim, H.S. Kim, K.H. Kim, W.I. Kim, and N.J. Cho. 2015. Heavy metal(loid) levels in paddy soils and brown rice in Korea. Korean J. Soil Sci. Fert. 48(5):515-521.
- Lim, G.H., K.H. Kim, B.H. Seo, and K.R. Kim. 2015. Heavy metal accumulation in edible part of eleven crops cultivated in metal contaminated soils and their bio-concentration factor. Korean J. Environ. Agric. 34(4):260-267.
- Lin, S.C., T.K. Chang, W.D. Huang, H.S. Lur, and G.S. Shyu. 2015. Accumulation of arsenic in rice plant: a study of an arsenic-contaminated site in Taiwan. Paddy Water Environ. 13:11-18.
- Liu, W.X., J.W. Liu, M.Z. Wu, Y. Li, Y. Zhao, and S.R. Li. 2009. Accumulation and translocation of toxic heavy metals in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) growing in agricultural soil of Zhengzhou, China. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 82:343-347.
- Minister of Environment (MOE). 2006. Soil Risk Assessment Guidebook. Minister of Environment. Korea.
- Minister of Environment (MOE). 2010. Standard Test Method for Soil Pollution. Ministry of Environment.
- Otte, P.F., J.P.A. Lijzen, J.G. Otte, F.A. Swartjes, and C.W. Versluijs. 2001. Evaluation and Revision of the CSOIL Parameter Set, RIVM report 711701021.
- Park, S.W. J.S. Yang, S.W. Ryu, D.Y. Kim, J.D. Shin, W.I. Kim, J.H. Choi, S.L. Kim, and A.F. Saint. 2009. Uptake and translocation of heavy metals to rice plant on paddy soils in “Top-rice” cultivation areas. Korean J. Environ. Agri. 28(2):131-138.
- Park, S.W. M.Y. Yun, J.K. Kim, B.J. Park, W.I. Kim, J.D. Shin, O.K. Kwon, and D.H. Chung. 2009. Rice safety and heavy metal contents in the soil on “Top-rice” cultivation areas. J. Fd. Hyg. Safety 23(3):239-247.
- Satpathy, D., M.V. Reddy, and S.P. Dhal. 2014. Risk assessment of heavy metals contamination in paddy soil, plants, and grains (*Oryza sativa* L.) at the east coast of India. BioMed Res. Internat. Article ID 545473, 11.
- US-EPA. 1996. Soil Screening Guidance: Technical Background Document Table Content.

Yoon, J.K., D.H. Kim, T.S. Kim, J.G. Park, I.R. Chung, J.H. Kim, and H. Kim. 2009. Evaluation on natural background of the soil heavy metals in Korea. *J. Soil Groundwater Env.* 14(3):32-39.