

Research Paper

Study on Accuracy Improvement of Predictive Model of Arsenic Transfer from Contaminated Soil to Polished Rice

Seungha Jo, Hyeop-Jo Han*, Jong-Un Lee*

Department of Energy and Resources Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

*Corresponding author : antibioticjh@gmail.com, jongun@jnu.ac.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 5 August 2022
Received in revised form 25 August 2022
Manuscript accepted 25 August 2022
Available online 30 August 2022

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2022.55.4.389>

Research Highlights

- Predictive models of As transfer from soil to rice were created.
- Soil classification due to physicochemical properties increased predictive power.
- Correlation coefficient between measured and predicted As increased to 0.935.

ABSTRACT

Many studies have been conducted to accurately predict the correlations between As and heavy metals content in contaminated soil and cultivated crops; however, due to the low correlation between the two, few clear results were obtained to date. This study aimed to create statistical models that predict the As content transferred from soil to polished rice, considering the physicochemical properties of the soil, as well as the total content and the single-extracted content of As in the soil. Predictive models were derived through regression analysis while sequentially classifying soil samples according to pH, soluble As content by single extraction, and organic matter content of the soil. The correlation coefficients between the As content in 80 polished rice and total As content and Mehlich soluble As content in the soil were low, 0.533 and 0.493, respectively. However, the models derived after sequential classification of the soil by pH, a ratio of total As content to Mehlich soluble As content, and organic matter content greatly increased the predictive power; ① 0.963 for 13 soils with a pH higher than 6.5, ② 0.849 for 15 soils with pH lower than 6.5 and a high ratio of $As_{Tot}/As_{Mehlich}$, ③ 0.935 for 30 soils with pH lower than 6.5, a high ratio of $As_{Tot}/As_{Mehlich}$, and organic matter content lower than 8.5%. The suggested prediction model of As transfer from soil to polished rice derived by soil classification may serve as a statistically significant methodology in establishing a rice cultivation standard for arsenic-contaminated soil.

Keywords : arsenic, soil, polished rice, regression analysis, predictive model

Citation: Jo, S., Han, H.-J., Lee, J.-U. (2022) Study on Accuracy Improvement of Predictive Model of Arsenic Transfer from Contaminated Soil to Polished Rice. *Korea Economic and Environmental Geology*, v.55, p.389-398, doi:10.9719/EEG2022.55.4.389.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

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 original work is properly cited. pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2022 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

연구논문

오염토양으로부터 백미로 전이되는 비소함량 예측모델의 정확도 향상 연구

조승하 · 한협조* · 이종운*

전남대학교 에너지자원공학과

*책임저자 : antibioticj@gmail.com, jongun@jnu.ac.kr

요 약

비소 및 중금속으로 오염된 토양 내 함량과 농작물로 전이되는 함량 간의 관련성을 도출하기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있으나 두 함량 간의 낮은 상관성으로 인하여 명확한 결과가 도출되지 못하고 있다. 이 연구에서는 토양 내 비소 전함량과 단일용출 가용성 함량뿐만 아니라 토양의 물리·화학적 특성을 함께 고려하여 백미로 전이되는 비소 함량을 예측하는 통계학적 모델을 만들고자 하였다. 토양 특성 중 pH, 단일용출 가용성 함량, 유기물 함량에 따라 순차적으로 토양을 분류하며 회귀분석을 통한 예측 모델을 도출하였다. 80개의 백미 내 비소 함량과 토양 내 비소 전함량 및 Mehlich 가용성 함량 간의 상관계수는 각각 0.533과 0.493으로 낮았다. 그러나 토양을 pH, Mehlich 가용성 함량에 대한 전함량, 유기물 함량으로 순차적으로 분류하여 모델을 도출한 결과, ① pH가 6.5보다 높은 13개의 토양은 0.963, ② pH가 6.5 이하이고 $As_{Tot}/As_{Mehlich}$ 비가 높은 15개의 토양은 0.849, ③ pH가 6.5 이하이고 $As_{Tot}/As_{Mehlich}$ 비가 낮으며 8.5% 이하의 유기물을 함유한 30개의 토양은 0.935로 예측력이 크게 증가하였다. 이 연구에서 도출된 토양 분류에 따른 백미 전이 함량 예측 모델은 비소 오염 토양에 대해 신뢰성 있는 백미 재배 기준을 설정하는데 의미있는 방법론을 제안할 수 있을 것이다.

주요어 : 비소, 토양, 백미, 회귀분석, 예측모델

1. 서 론

국내 폐금속광산 1,536개소에 대한 토양오염실태조사 결과, 672개소의 토양이 비소(arsenic; As) 및 중금속으로 오염된 것으로 나타나는 등(MOE, 2017), 폐광산 주변 농경지의 비소 오염은 상당수 보고된 바 있다. 광산 주변에서 비소는 광산 폐기물 및 폐광산의 침출수에 의해 주로 유입되며(Kim *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2017), 이 외에 제련소, 비소함유 농자재, CCA(chromated copper arsenate) 처리 목재, 화석연료 소각, 관개용수 등 다양한 오염원을 갖는다(Kim *et al.*, 2010).

중금속(metalloid)인 비소는 US EPA에서 A 그룹 인체 발암물질로 분류한 독성물질이다(ATSDR, 2007). 비소는 작물에도 유해하며 식물체 내에 축적될 경우 줄기와 뿌리의 생장억제, 잎의 황화(chlorosis) 및 조위(wilting) 등의 생리대사 장애를 일으킨다(Lee *et al.*, 2012; 2017). 특히 쌀을 재배하는 논토양은 담수 상태의 혐기성 환경이므로 이동도가 높은 As(III) 형태로 주로 존재하며, 호기성 토양에서 재배되는 밀, 보리 등과 비교하였을 때 토양에서 작물로의 비소 흡수율은 50배 정도, 백미 중 무기비소 함량은 10배 이상 높은 것으로 알려져 있다(Yang

et al., 2016). 46개의 영유아식 제품 중 쌀로 제조한 제품 내 비소 함량은 다른 곡류 제품에 비하여 최대 6배 이상 높은 것으로 보고된 바 있다(HBBF, 2017). 쌀 내 비소 농축이 문제로 부각되며 2014년에 국제식품규격에서 백미 중 무기비소 기준을 0.2 mg/kg 이하로 설정하였고(CAC, 2014), 백미 내 납과 카드뮴 농도만 규제하던 우리나라도 2016년에 무기비소 기준을 0.2 mg/kg 이하로 설정한 바 있다(MFDS, 2016).

국내의 경우, 중금속에 의한 토양오염 여부는 왕수(*aqua regia*)를 이용한 전함량 측정에 의해 결정한다. 그러나 농경지의 경우, 작물에 흡수되는 중금속의 함량이 중요하므로 토양으로부터 작물로 용이하게 전이되는 식물유효태(phytoavailable) 중금속의 함량을 고려해야 한다(Han, 2020; Han *et al.*, 2021). Huang *et al.*(2006)은 17종의 식물 내 비소와 토양 내 비소 전함량 간의 상관성을 조사한 결과, 9종의 식물에서는 둘 사이의 상관성이 낮은 것을 밝혔다. 국내에서도 중금속 및 비소에 의한 토양 오염을 판단하는 추출제로 왕수를 사용하는 것에 대한 우려가 있어 왔다(Kim *et al.*, 2012). 외국의 경우 왕수보다 약한 추출제, 예를 들면, $CaCl_2$, NH_4NO_3 , $NaNO_3$ 등을 이용한 단일용출법(single extraction)으로 가용성 중금속

을 정량함으로써 토양 오염을 평가하기도 한다(Han *et al.*, 2020). 단일용출법은 유효태 중금속의 함량을 나타낼 뿐더러 간편하게 적용이 가능하므로 수많은 용출법이 제안되었다(Mehlich, 1984; Ure, 1996; Chojnacka *et al.*, 2005). 반면 연구 목적에 따른 적정 용출제를 선별하기 어렵고 추출된 함량이 지닌 과학적 의미를 명확히 파악하기 어렵다는 단점이 있다(Han *et al.*, 2020).

농경지 토양에서 중요한 것은 다양한 용출 방법으로 파악한 토양 내 비소 및 중금속 함량 중 어느 정도가 재배 작물로 전이되는가를 예측하는 것이다. 그간 토양 내 중금속의 단일용출 함량과 식물 전이 함량 간의 상관관계를 분석한 연구는 다수 수행되었으나(Seo *et al.*, 2013; Lim *et al.*, 2014; Chiou and Hsu, 2019), 작물로 전이되는 중금속 함량을 예측하기에는 부족한 실정이다. 이는 동일한 중금속 함량을 보이는 토양의 경우에도 작물로 전이되는 함량은 토양의 물리·화학적 특성에 따라 다르게 나타날 수 있기 때문이다. 즉 단일용출 결과 추출되는 유효태 중금속의 함량은 토양 내 중금속 전함량 외에도 토양 pH, 양이온교환능력(CEC; cation exchange capacity), 유기물(OM; organic matters) 함량 등의 특성에 크게 영향을 받는다(Han *et al.*, 2021). 물론 이외에도 작물의 특성 - 종류, 품종, 식용 부위, 경작방법 등 - 역시 작물 전이량에 영향을 미칠 것이다. 이러한 요인을 고려하지 않고 농경지 토양의 전함량 또는 단일용출 가용성 함량만으로 토양으로부터 농작물로 축적되는 비소 및 중금속 함량을 예측하는 것은 무리가 있다.

Lee *et al.*(2017)은 토양 내 비소 함량과 토양 특성을 고려하여 현미로 전이되는 비소 함량을 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 이용하여 예측하였다. 분석 결과, 비소 전함량, 토양 pH, 알루미늄 산화물, 유효태 인산, 유기물 함량이 현미 내 비소 함량에 영향을 미치는 주요 인자인 것을 확인하였으며 이를 통해 현미 내 비소 함량을 예측하는 식을 도출하였다. 그러나 예측 모델을 계산한 값과 실제 현미 내 비소 함량과의 상관성이 낮아 예측의 정확도가 높지 않았다. Xie *et al.*(2021)은 토양의 물리·화학적 특성과 더불어 강수량 및 경작에 사용된 비료의 양까지 고려하여 백미로 전이되는 중금속 함량에 대한 예측 모델을 만들었다. 많은 양의 변수를 처리하기 위하여 머신 러닝의 랜덤 포레스트(random forest) 기법을 적용한 결과, 백미로 전이되는 중금속의 함량을 매우 높은 확률로 예측할 수 있었다. 이 연구는 머신 러닝을 통하여 각 특성(변수)들의 기여도에 따라 다른 가중치를 주어 예측식을 만들었다는 점이 기존 연구와 차이점을 보였으나, 물리·화학적 특성 이외에도 연간 비료 사용량, 기후 등 다른 입력 조건이 너무 많아 실제로 적용하기에는

어려울 것으로 판단하였다. Yao *et al.*(2021)은 토양의 CEC, 총인, 총질소, 비소 전함량 및 유효태 함량 등을 고려하여 비소 흡수 예측 모델을 만들었다. 또한 토양을 pH에 따라 분류한 후 분류 전후 예측모델의 정확도를 비교한 결과, 분류 전에 비해 예측의 정확도가 증가함을 밝혔다.

이 연구에서는 토양 내 비소 전함량과 단일용출 가용성 함량뿐만 아니라 토양의 물리·화학적 특성을 함께 고려하여 백미(polished rice)로 전이되는 비소 함량을 예측하는 모델을 만들고자 하였다. 토양 특성 중 pH, 단일용출 가용성 함량, 유기물 함량에 따라 순차적으로 토양을 분류하여 변수를 최소화하며 예측 모델을 도출하였다. 이러한 방법으로 도출된 모델은 백미로 전이되는 비소 함량을 높은 정확도로 예측할 수 있을 것으로 판단하였다.

2. 연구방법

2.1. 토양 및 백미 분석

이 연구에서는 작물은 벼, 품종은 통일벼로 한정하여 작물 종류와 품종의 변수를 제거하며 시료 채취지역을 선정하였다. 전남 광양, 보성, 화순 내 비소로 오염되었을 가능성이 큰 폐광산 주변 2 km 이내의 농경지를 대상으로 토양 시료 및 해당 토양에서 성장한 벼 시료를 각각 80개씩 채취하였다. 채취한 토양은 직사광선이 들지 않는 곳에서 자연 건조하며 육안으로 불순물을 선별 및 제거하였다. 건조한 토양은 -80 mesh(<0.18 mm)로 체거름하여 충분히 교반한 후 플라스틱 백에 밀봉하여 실온에서 보관하였다. 채취한 작물은 풍건한 후 낱알을 분리하여 60 °C 드라이오븐에서 24시간 건조하였다. 건조한 낱알을 전기정미기(Mom's Mill, Korea)를 이용하여 10~12 분도(현미 중량의 92.0~90.4%)로 도정한 후, 분말로 만들어 코니칼 튜브에 담아 밀봉하여 4 °C에서 냉장 보관하였다.

토양 pH는 토양을 탈이온수로 1 시간 진탕한 후 60초 이내에 pH meter(Orion 230A, Thermo, USA)를 이용해 측정하였다. CEC는 Busenberg and Clemency(1973)를 따라 Na 치환법으로 수행하였다. OM은 105 °C와 550 °C 조건에서 각각 1시간 및 4시간 가열한 작열감량(LOI; loss-on-ignition) 측정을 통해 계산하였다(Boyle, 2004).

토양 내 비소와 철(Fe)의 전함량을 확인하기 위하여 왕수분해법을 적용하여 추출한 후 ICP-OES(Spectro Genesis, Spectro, Germany)를 이용하여 정량하였다. 분석의 신뢰성을 확인하기 위하여 ISO 인증 표준물질인 BAM-U110(CRM BAM-U110, BundesAnstalt für Materialforschung, Germany) 토양 시료를 같은 방법으로 용출한 후 분석하였으며 일부 중복시료(duplicate)를 삽입하여 정확도 및 정밀도를 검증하였다.

단일용출제로서 Mehlich3(이하 Mehlich), 0.1 N 염산, 1 N 염산을 이용하였다. Mehlich 용액은 아래와 같이 제조하였다.

i) Stock solution M-3

: 55.56 g NH_4F + 29.23 g EDTA(F.W. 292.24) in 1 L DIW

ii) Mehlich solution

: 200.1 g NH_4NO_3 + 100 mL stock solution M-3 + 115 mL CH_3COOH + 82 mL 10% HNO_3 in 10 L deionized water

Mehlich 용출은 체거름한 토양시료 0.5 g을 15 mL 코니칼 튜브에 정량한 후, Mehlich 용출액 5 mL을 주입하고 120 rpm으로 5분간 교반하여 비소를 용출하였다. 0.1 N 염산 용출법은 토양시료 1 g에 5 mL의 0.1 N 염산을 주입하여 1시간 동안 100 rpm에서 교반하였고, 1 N 염산 용출법은 토양시료 1 g에 5 mL의 1 N 염산을 주입하여 30분간 100 rpm으로 교반하였다. 용출 후 원심분리(4000 rpm, 5 min)하여 상등액을 취해 0.45 μm 필터로 여과하였다. 여과된 용액은 ICP-OES를 이용하여 비소를 정량하였다.

백미 내 비소 함량은 식품의약품안전처에 명시된 용출법 중 질산-과산화수소법에 따라 수행하였다(MFDS, 2021). 분말로 만든 백미 시료 1 g을 15 mL 코니칼 튜브에 정량한 후 질산 10 mL을 주입하여 가열 블록에서 서서히 가열하였다. 격렬한 반응이 지난 후 과산화수소(H_2O_2) 1 mL을 주입하여 2시간 동안 색이 변화할 때까지 반응시켰다. 반응 후 원심분리(4000 rpm, 5 min)하여 상등액을 취해 0.45 μm 필터로 여과하였다. 여과된 용액은 ICP-MS(Agilent Technologies, USA)로 비소를 정량하였다.

2.2. 비소 전이의 예측 모델식 도출

토양을 pH, 단일용출 가용성 함량, 유기물 함량에 따라 순차적으로 분류한 후 다중회귀분석을 통해 예측 모델식을 도출하였다. 토양 pH의 경우, 미국 농림부와 호주 퀸즈랜드의 토양분류 기준을 참고하여 pH 6.5 이상인 중성토 및 알칼리토(A 그룹)와 pH 6.5 미만인 산성토(B 그룹)의 두 그룹으로 분류한 후 회귀분석을 수행하였다(USDA, 1993; Queensland Government, 2016). 모델 예측의 정확도는 실제 백미 내 비소 함량(measured As)과 도출된 회귀식으로 예측한 비소 함량(predicted As) 간의 상관관계로 판단하였다.

두 번째 단계에서는 위 A, B 그룹 중 상관관계가 희박한, 즉 예측력이 낮은 그룹 내 토양 시료에 대하여 비소 전함량을 Mehlich 가용성 비소 함량으로 나눈 값을 기준으로 다시 두 그룹으로 구분하였다. 이 값이 낮은 집단(B1 그룹)은 유효태 비소 함량이 상대적으로 높고, 이 값이 높은 집단(B2 그룹)은 유효태 비소 함량이 상대적으로 낮은 것으로 보았다. 두 그룹에 대해 각각 회귀분석

을 수행하여 예측 모델을 도출한 후 위와 같이 예측의 정확도를 검증하였다.

세 번째 단계에서는 위 B1, B2 그룹 중 예측력이 낮은 그룹 내 토양 시료를 대상으로 토양 OM 함량을 기준으로 다시 두 그룹으로 구분하였다. OM은 비소를 흡착하여 이동도를 감소시키므로 토양 내 비소 거동에 영향을 미친다(Lund and Fobian, 1991). 연구 대상 토양의 OM 평균인 8.5%를 기준으로 이보다 높은 집단(B1-a 그룹)과 낮은 집단(B1-b 그룹)으로 구분하여 회귀분석 및 상관분석을 수행하였다.

통계학적 분석은 Pearson 상관분석과 다중회귀분석을 사용하였으며 SPSS(IBM SPSS Statistics 27)를 이용하여 수행하였다. 모든 변수가 양의 왜도를 보여 대수(log)로 치환하여 적용하였으며 대수로 치환할 때 불검출(not determined)인 시료는 최저측정한계의 1/2 값으로 표시하였다. 회귀분석 시 종속변수는 백미 내 비소 함량, 독립변수는 pH, OM, CEC, 토양 내 비소 전함량(As_{Tot}), 철 전함량(Fe_{Tot}), Mehlich 가용성 비소 함량($\text{As}_{\text{Mehlich}}$), 0.1 N 염산 가용성 비소 함량($\text{As}_{0.1\text{N HCl}}$), 1 N 염산 가용성 비소 함량($\text{As}_{1\text{N HCl}}$), $\text{Fe}_{\text{Tot}}/\text{As}_{\text{Tot}}$ 로 하였다. 다중회귀분석은 모든 독립변수를 동시에 투입하는 동시입력 회귀분석 방식으로 수행하였다.

3. 결과 및 해석

3.1. 토양 및 백미 분석 결과

총 80개의 토양시료를 분석한 결과, 토양 pH의 평균(범위)은 6.1(3.8~8.0), CEC는 21.9(10.8~38.2) cmol_e/kg , OM은 8.5(3.5~16.4)%로 다양한 범위를 나타내었다(Table 1). 토양 pH는 국내 농경지 평균 pH인 6.2(MOE, 2016), 범위 4.1~8.4(Kang *et al.*, 2012)와 비슷하였으나, CEC와 OM은 국내 농경지 평균인 10.0 cmol_e/kg , 2.3%보다 두 배 이상 높았다(Song *et al.*, 2019). 이 연구의 대상이 점토 함량이 높은 논토양이므로 논과 밭토양을 망라하는 농경지 토양에 비하여 CEC 및 OM 값이 더 높게 나타난 것으로 보인다.

왕수를 이용하여 토양 내 비소 전함량을 측정한 결과, 비소의 평균 함량(범위)은 15.7(4.5~38.1) mg/kg 이었으며(Table 1), 80개의 시료 중 13개의 시료가 토양환경보전법에서 정하는 1지역 토양오염우려기준(25 mg/kg)을 초과하였다. 최저 함량인 4.5 mg/kg 은 국내 논토양 내 비소의 평균 함량(4.41 mg/kg)보다도 높았으며(Kunhikrishnan *et al.*, 2015), 비소의 평균 전함량은 Kim *et al.*(2010)이 조사한 5개 폐광산 인근 논토양의 평균 비소 전함량(13.24 mg/kg)보다 높게 나타나 연구 토양이 비소로 심각하게

Table 1. Summary of physicochemical properties of soil and polished rice samples. nd = not determined

Properties	Mean	Median	Standard deviation	Range	
pH	6.1	6.1	0.6	3.8 ~ 8.0	
CEC (cmol _c /kg)	21.9	20.7	6.5	10.8 ~ 38.2	
OM (%)	8.5	8.7	2.9	3.5 ~ 16.4	
Fe (%)	2.9	2.9	0.9	1.0 ~ 4.5	
As in soil (mg/kg)	<i>aqua regia</i>	15.7	14.4	8.3	4.5 ~ 38.1
	Mehlich	2.3	1.5	1.6	nd ~ 7.0
	0.1 N HCl	2.8	2.0	3.9	nd ~ 21.5
	1 N HCl	2.6	1.8	2.8	nd ~ 19.0
As in polished rice (mg/kg)	0.15	0.14	0.07	0.05 ~ 0.35	

오염되어 있는 것을 확인하였다. 한편 ISO 인증 표준물질인 BAM-U110 토양 시료를 총 30회 삽입하여 SPSS 통계 프로그램을 이용한 일표본 t 검정을 실시한 결과, 비소 분석값 평균(12.9 mg/kg)은 BAM-U110 내 비소 전 함량(13 mg/kg)과 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타나 분석의 신뢰성을 확인하였다.

단일용출 가용성 비소의 평균 함량(범위)은 Mehlich 용출법이 2.3(nd~7.0) mg/kg, 0.1 N HCl 용출법이 2.8(nd~21.5) mg/kg, 1 N HCl 용출법이 2.6(nd~19.0) mg/kg으로 나타났다(Table 1). 0.1 N HCl 용출법에서 1 N HCl 용출법에 비하여 더 많은 양의 비소가 용출된 것은 특징적이지만 정도관리(quality control) 중 큰 오차가 나타나지 않았다는 점을 고려하면, 0.1 N HCl 용출법(1시간 반응)과 1

N HCl 용출법(30분 반응)의 반응 시간이 결과에 영향을 미친 것으로 보였다.

백미 내 비소의 평균 함량(범위)은 0.15(0.05~0.35) mg/kg으로(Table 1) 16개의 시료가 백미 허용기준치인 0.2 mg/kg을 초과하였다. 이 연구 대상인 백미 내 비소 평균 함량은 경상북도 전 지역에 걸쳐 생산된 137개의 백미 내 평균 비소 함량인 0.083 mg/kg보다 2배 가까이 높은 것으로 나타났다(An *et al.*, 2018).

3.2. 비소 전이의 예측 모델식 도출

전체 80개의 토양 시료를 대상으로 토양의 물리·화학적 특성 9개(pH, OM, CEC, As_{Total} , Fe_{Total} , $As_{Mehlich}$, $As_{0.1N HCl}$, $As_{1N HCl}$, Fe_{Total}/As_{Total})와 백미 내 비소 함량(As_{rice}) 간의 상

Table 2. Correlation coefficients (R) between arsenic concentrations in rice and physicochemical properties of soil. Only R values with $p < 0.05$ are presented. Numbers in brackets indicate p values.

Classification	Total	Soil pH		$As_{Total}/As_{Mehlich}$		Organic Matter	
		> 6.5	< 6.5	< 10	> 10	> 8.5%	< 8.5%
Group name	Total	A	B	B1	B2	B1-a	B1-b
Sample number	80	13	67	52	15	30	22
pH	-0.330 (0.003)		-0.267 (0.029)				
OM	0.313 (0.005)		0.250 (0.041)				
CEC							
As_{Total}	0.533 (<0.001)		0.608 (<0.001)	0.713 (<0.001)			0.893 (<0.001)
Fe_{Total}	0.243 (0.030)	0.758 (0.003)					
Fe_{Total}/As_{Total}	-0.386 (<0.001)		-0.512 (<0.001)	-0.567 (<0.001)			-0.778 (<0.001)
$As_{Mehlich}$	0.493 (<0.001)		0.555 (<0.001)	0.761 (<0.001)		0.483 (0.023)	0.908 (<0.001)
$As_{0.1N HCl}$	0.296 (0.008)		0.377 (0.002)	0.455 (0.001)			0.761 (<0.001)
$As_{1N HCl}$	0.299 (0.007)	0.784 (0.002)					

관분석을 실시한 결과, 상관계수(R) 값이 모두 0.6 미만으로 상관성이 높지 않은 것을 확인하였다(Table 2). As_{rice} 와 As_{Tot} 간의 상관계수는 0.533으로 다른 변수에 비하면 가장 높았으나 두 함량 간에 유의한 상관성이 존재한다고 할 수 없었다. 이는 9종의 식물과 토양 내 비소 함량 간에 상관성이 낮았다는 Huang *et al.*(2006)의 연구결과와 유사하다. 두 번째로 높은 상관계수는 $As_{Mehlich}$ 와의 상관계수이며 $R = 0.493$ 으로 낮은 값을 보였다. 이러한 결과는 현재 토양오염을 평가하는 방법인 전함량 또는 단일용출 가용성 함량을 이용하여 백미로 이동하는 비소 함량을 예측하는 것은 신뢰하기 어렵다는 의미이다.

동시입력 회귀분석을 수행할 때 As_{Total} 은 Fe_{Total}/As_{Total} 과 Fe_{Total} 에 의해 결정될 수 있으므로 독립변수에서 제외하였다. 회귀분석 결과 아래와 같은 모델이 도출되었다(Eq. 1). 회귀식을 통해 계산한 예측값과 실제 백미 내 비소 함량과의 상관계수(R)는 $0.682(p < 0.001)$ 로 토양 내 비소 전함량과의 상관계수(0.533)보다 다소 증가하였다(Fig. 1(a)).

$$\log As_{rice} = 0.104 \log OM - 0.747 \log pH - 0.099 \log CEC + 0.282 \log As_{Mehlich} + 0.010 \log As_{0.1N\ HCl} + 0.066 \log As_{IN\ HCl} + 0.390 \log Fe_{Total} - 0.172 \log (Fe_{Total}/As_{Total}) - 0.617 \quad (Eq. 1)$$

전체 토양(80개)을 pH 6.5보다 높은 A 그룹(13개)과 6.5 이하인 B 그룹(67개)으로 구분하여 상관분석 및 다중회귀분석을 실시하였다. A 그룹의 상관분석 결과, 백미 내 비소 함량과 $As_{IN\ HCl}$ 및 Fe_{Tot} 간 상관계수가 각각 0.784, 0.758로 좋은 양의 상관관계를 나타내었다(Table 1). pH > 6.5인 토양에 대해서는 개정 전 우리나라 비소 용출시험법이었던 1 N 염산 용출법을 통해 백미로 전이되는 비소 함량을 일정 부분 예측할 수 있을 것으로 보였다. A 그룹의 동시입력 회귀분석을 진행한 결과 Eq. 2와 같은 회귀식이 도출되었으며, 모델을 통해 계산한 예측값과 실제 백미 내 비소 함량과의 상관계수는 $0.963(p < 0.001)$ 으로 매우 강한 양의 상관관계를 나타내었다(Fig. 1(b)).

$$\log As_{rice} = -1.307 \log OM - 6.835 \log pH + 0.157 \log CEC + 0.522 \log As_{Mehlich} - 0.069 \log As_{0.1N\ HCl} + 0.622 \log As_{IN\ HCl} - 0.439 \log Fe_{Total} - 0.391 \log (Fe_{Total}/As_{Total}) + 5.622 \quad (Eq. 2)$$

토양 pH가 6.5보다 낮은 B 그룹의 경우 백미로 전이되는 비소 함량은 As_{Tot} ($R = 0.608$)과 $As_{Mehlich}$ ($R = 0.555$)와 유의한 양의 상관관계를 나타내었으나(Table 1), 낮은

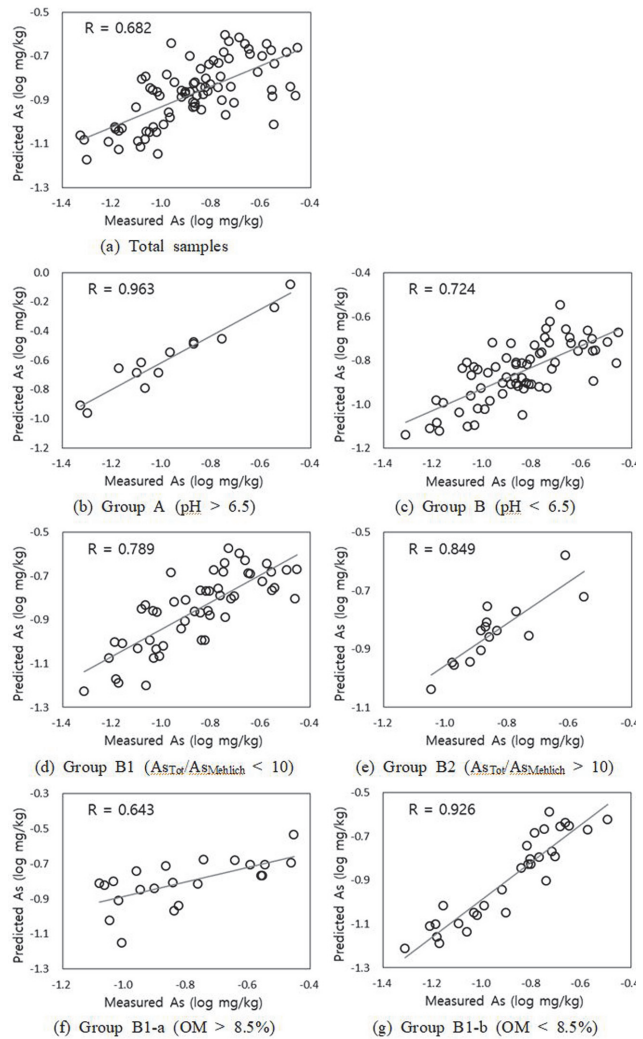


Fig. 1. Correlation between measured and predicted arsenic concentrations in rice.

R 값은 이들만으로는 백미에 축적되는 비소 함량을 예측하기 어려움을 의미한다. B 그룹에 대한 동시입력 회귀분석 결과 회귀식을 도출하였으며(Eq. 3), 이 회귀식을 통한 예측값과 백미 내 비소 함량과의 상관계수는 $0.724(p < 0.001)$ 로 전체 토양을 대상으로 한 경우에 비해 다소 향상된 값을 보였다(Fig. 1(c)).

$$\log As_{rice} = 0.224 \log OM - 1.385 \log pH + 0.020 \log CEC + 0.195 \log As_{Mehlich} - 0.016 \log As_{0.1N\ HCl} - 0.052 \log As_{IN\ HCl} + 0.385 \log Fe_{Total} - 0.374 \log (Fe_{Total}/As_{Total}) - 0.498 \quad (Eq. 3)$$

이상의 결과는 토양을 pH에 따라 분류한 후 각 그룹에 해당하는 예측 모델식을 유도할 경우, pH 6.5 이상 토양에 대해서는 Eq. 2 모델에 의해 백미로 전이되는 비소

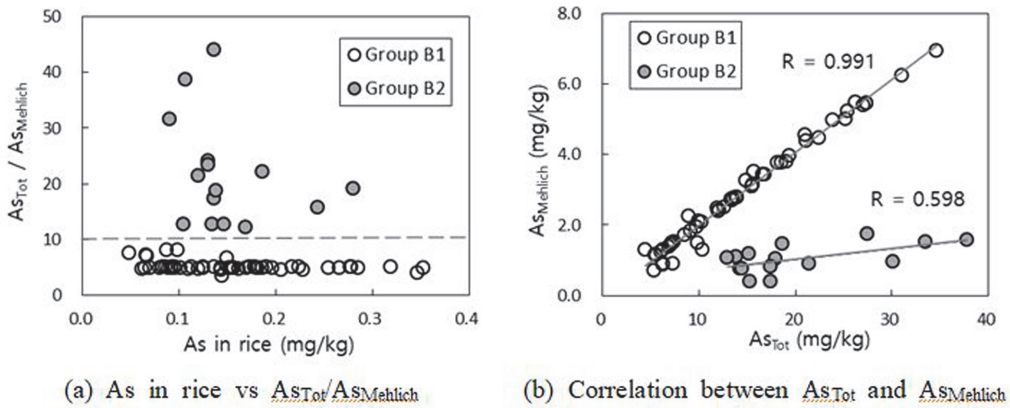


Fig. 2. (a) Classification of group B soil by ratio of $As_{Tot}/As_{Mehlich}$ and (b) Correlation between As_{Tot} and $As_{Mehlich}$ for group B soil.

함량을 예측하는 정확도가 상당히 증가할 수 있음을 나타낸다. 반면 pH 6.5 이하의 토양에 대해서는 추가적인 모델을 도출하여 정확도를 향상시킬 필요가 있었다.

두 번째 단계에서는 예측력이 낮은 B 그룹에 대해 비소의 유효태 비율을 나타내는 $As_{Tot}/As_{Mehlich}$ 값에 의해 토양을 구분한 후 위와 같은 방법으로 백미에 농축되는 비소 함량을 예측하려 하였다. 적절한 $As_{Tot}/As_{Mehlich}$ 구분 기준을 설정하기 위하여 산포도를 도시한 결과, B 그룹 토양 구분의 기준으로 10이 적절한 것으로 판단하였다 (Fig. 2(a)). $As_{Tot}/As_{Mehlich}$ 값이 10보다 낮아 상대적으로 비소 유효태 함량이 높을 것으로 여겨지는 52개 토양을 B1 그룹, 10보다 높아 비소 유효태 함량이 낮은 15개 토양을 B2 그룹으로 분류하였다. 이 두 그룹에 대하여 비소 전함량과 Mehlich 함량에 대한 산점도를 나타내면 뚜렷한 차이가 생기는 것을 확인하였다(Fig. 2(b)). 특히 B1 그룹의 경우 왕수로 용출되는 전함량과 Mehlich 단일용출 함량 간의 상관계수가 0.991로 매우 강한 양의 상관관계를 나타내었다.

비소 유효태 함량이 높은 B1 그룹에 대하여 상관분석을 수행한 결과, 백미 내 비소 함량은 $As_{Mehlich}$ ($R = 0.761$)와 As_{Tot} ($R = 0.713$)과 양호한 상관관계를 보였다(Table 1). 이는 Mehlich 가용성 비소의 비율이 높을 뿐만 아니라 토양 내 비소 전함량과 유효태 비소의 상관계수 값이 0.991로 매우 높기 때문이다(Fig. 2(a),(b)). 그러나 B1 그룹의 동시입력 회귀분석 결과 도출된 회귀모델식(Eq. 4)에 의한 예측값과 실제 백미 내 비소 함량과의 상관계수는 0.789($p < 0.001$)로 계산되었다(Fig. 1(d)). 이는 분류 전인 B 그룹 전체를 대상으로 한 결과($R=0.724$)보다는 증가한 값이나 회귀모델을 실질적으로 적용하기에는 예측력이 크다고 할 수 없다.

$$\log As_{rice} = 0.190 \log OM - 1.022 \log pH - 0.050 \log CEC + 0.779 \log As_{Mehlich} - 0.010 \log As_{0.1N\ HCl} - 0.028 \log As_{1N\ HCl} - 0.229 \log Fe_{Total} + 0.171 \log (Fe_{Total}/As_{Total}) - 0.263 \quad (Eq. 4)$$

한편 상대적으로 유효태 비소 함량이 적어 이동도가 낮은 형태로 존재할 것이라 예상되는 B2 그룹에 대하여 상관분석을 실시한 결과, p 값이 모두 0.05를 초과하여 백미 내 비소 함량과 통계적으로 유의한 상관관계를 보이는 토양의 물리·화학적 특성은 존재하지 않았다(Table 1). 특히 As_{Tot} 과 $As_{Mehlich}$ 는 상호 매우 낮은 상관관계($R = 0.598$)를 보임으로써 B2 그룹 토양 내 유효태 비소 함량은 전함량으로는 설명이 불가능한 것으로 나타났다(Fig. 2(b)).

그러나 모든 독립변수를 활용한 동시입력 회귀분석을 수행하여 회귀 모델식을 얻은 결과(Eq. 5), 예측값과 백미 내 비소 함량 사이의 상관계수는 0.849($p < 0.001$)로, 분류 전 B 그룹 전체와의 상관계수($R = 0.724$)에 비해 크게 증가하였다(Fig.1(e)). 이는 pH가 6.5 미만이며 $As_{Tot}/As_{Mehlich}$ 값이 10 이상인 토양에 대해서는 Eq. 5에 의해 백미로 전이되는 비소 함량을 상당 부분 예측할 수 있음을 나타낸다.

$$\log As_{rice} = 1.071 \log OM - 2.172 \log pH + 0.410 \log CEC + 0.191 \log As_{Mehlich} - 0.083 \log As_{0.1N\ HCl} + 0.027 \log As_{1N\ HCl} - 2.209 \log Fe_{Total} + 0.540 \log (Fe_{Total}/As_{Total}) + 0.795 \quad (Eq. 5)$$

B2 그룹의 경우, 백미로 전이되는 비소 함량과 높은 상관관계를 갖는 토양 내 비소 함량 - As_{Tot} , $As_{Mehlich}$, $As_{0.1N\ HCl}$, $As_{1N\ HCl}$ - 은 존재하지 않으나 다른 다양한 물리적 변수

들 - pH 및 OM 등 - 과 결합하여 작용할 때 작물 전이 함량을 효과적으로 예측할 수 있는 경우로 보인다.

세 번째 단계는 예측력이 낮은 B1 그룹에 대해 OM 함량 평균인 8.5%를 기준으로 토양을 구분한 후 위와 같은 방법으로 백미에 농축되는 비소 함량을 예측하였다. 8.5% 이상의 OM을 함유한 22개 토양을 B1-a 그룹, 이보다 낮은 30개 토양을 B1-b 그룹으로 분류하였다.

상대적으로 OM 함량이 높은 B1-a 그룹에 대하여 상관분석을 실시한 결과, 통계적으로 유의한($p < 0.05$) 상관관계를 가진 토양 특성은 오직 Mehlich 용출 함량 뿐이었으며 상관계수도 0.483으로 매우 낮았다(Table 1). 또한 B1-a 그룹을 대상으로 동시입력 회귀분석을 수행하여 도출된 회귀 모델식(Eq. 6)을 이용하여 계산한 백미 전이 예측값과 실제 백미 내 비소 함량 간의 상관계수는 0.643($p = 0.001$)으로, B1 그룹 전체 상관계수($R = 0.789$)에 비하여 도리어 크게 감소한 것을 확인하였다(Fig. 1(f)). 이는 토양 내 OM이 흡착 등의 메커니즘을 통하여 전함량 또는 단일용출 가용성 비소의 거동을 조절하며 백미로 전이되는데 영향을 미치기 때문으로 짐작된다(Lund and Fobian, 1991). 낮은 pH, 높은 $As_{Tot}/As_{Mehlich}$, 높은 OM 함량을 갖는 토양을 대상으로 하여 백미 전이량을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

$$\log As_{rice} = 0.169 \log OM - 4.603 \log pH + 0.680 \log CEC + 1.126 \log As_{Mehlich} - 0.010 \log As_{0.1N\ HCl} - 0.102 \log As_{1N\ HCl} - 0.390 \log Fe_{Total} + 0.387 \log (Fe_{Total}/As_{Total}) + 1.616 \quad (Eq. 6)$$

8.5% 이하의 OM 함량을 갖는 B1-b 그룹에 대하여 상관분석을 실시한 결과, 백미 내 비소 함량은 $As_{Mehlich}$ ($R = 0.908$), As_{Tot} ($R = 0.893$), $As_{0.1N\ HCl}$ ($R = 0.761$)과 높은 상관성을 나타내었다(Table 1). 상대적으로 유효태 비소 함량이 높은 B1 그룹 토양 중에서도 OM 함량이 적어 흡착 등의 영향을 적게 받으므로 백미로 전이되는 비소 함량을 더욱 잘 설명할 수 있는 것으로 보인다. 동시입력 회귀분석을 수행하여 백미 내 비소 함량을 예측하는 식을 도출하였으며(Eq. 7), 이 회귀식을 이용하여 계산한 예측값과 실제 백미 내 비소 함량과의 상관계수는 0.926($p < 0.001$)으로 매우 높은 값을 나타내었다(Fig. 1(g)).

$$\log As_{rice} = -0.080 \log OM - 0.758 \log pH - 0.004 \log CEC + 0.024 \log As_{Mehlich} + 0.072 \log As_{0.1N\ HCl} - 0.028 \log As_{1N\ HCl} + 0.620 \log Fe_{Total} - 0.618 \log (Fe_{Total}/As_{Total}) - 0.937 \quad (Eq. 7)$$

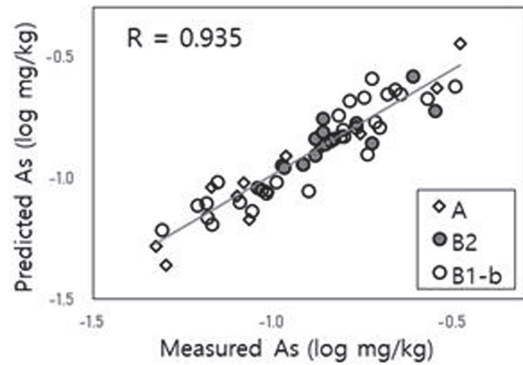


Fig. 3. Correlation between predicted and measured arsenic in rice for groups A, B2, and B1-b.

이상의 결과를 종합하면, 토양을 그 물리·화학적 특성에 따라 분류하여 각각 회귀모델을 도출한 후 백미 전이 비소 함량을 예측한 결과, 분류 전 전체 토양을 대상으로 하였을 때에는 실제 백미 내 함량과 0.682의 상관성을 보였으나, ① pH가 6.5보다 높은 13개의 토양(A 그룹)은 0.963, ② pH가 6.5 이하이고 $As_{Tot}/As_{Mehlich}$ 비가 높은 15개의 토양(B2 그룹)은 0.849, ③ pH가 6.5 이하이고 $As_{Tot}/As_{Mehlich}$ 비가 낮으며 8.5% 이하의 OM을 함유한 30개의 토양(B1-b 그룹)은 0.935로 예측력이 크게 증가하였다(Fig. 3).

토양 pH, 단일용출 가용성 함량, 유기물 함량 이외에도 CEC, 철 이동도, 다른 단일용출(0.1 및 1 N HCl) 가용성 함량 등을 이용한 분류를 시도하였으나, 통계적으로 유의한 결과가 도출되지 않았다. 또한, 토양 pH, 단일용출 가용성 함량, 유기물 함량에 따른 분류의 순서를 변화하여 적용한 경우 예측 개선도가 저하되었으며, 이 연

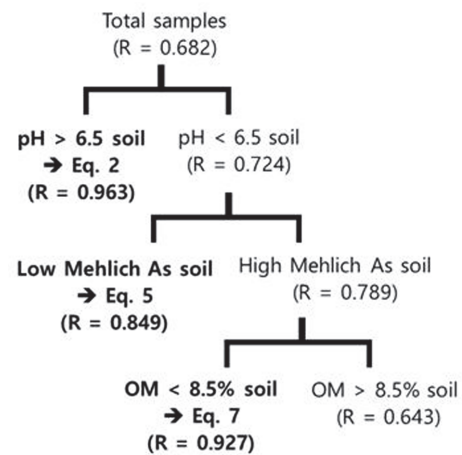


Fig. 4. Suggested application for prediction of As concentrations in polished rice from soil.

구에서 제시한 기준의 순서에 따라 순차적으로 토양을 분류한 경우에만 높은 예측력을 얻을 수 있었다.

Fig. 4와 같이 토양을 순차적으로 분류한 후 예측 모델을 적용하면 토양으로부터 백미로 전이되는 비소의 함량을 더욱 정확하게 예측할 수 있다. pH가 6.5 미만이고 $As_{Tot}/As_{Mehlich}$ 비가 낮으며 8.5% 이상의 OM을 함유한 22개의 토양(B1-a 그룹)의 경우에만 상관관계수 0.643으로 모델 예측력이 낮은 것으로 나타났다(Fig. 1(f)). B1-a 그룹의 경우, 더욱 많은 토양시료를 이용하여 다양한 물리·화학적 특성을 기준으로 토양을 분류한 후 동일한 방식의 모델을 도출하면 비소로 오염된 농경지 토양으로부터 백미로 전이하는 비소 함량을 통계적으로 유의하게 예측할 수 있을 것이다.

4. 결 론

우리나라의 토양 오염은 왕수를 이용하여 추출하는 전함량 결과를 기준으로 평가한다. 그러나 전함량은 쉽게 용출될 수 없는 형태의 비소 및 중금속 함량도 포함하고 있으므로 농경지 토양에서 작물로 전이되는 유효태 함량을 나타내지 못한다. 80개 농경지 토양을 대상으로 수행한 이 연구에서도 토양 내 비소 전함량과 백미 내 비소 함량 간에는 $R = 0.533$ 의 낮은 상관관계를 보였다. 이는 비소 전함량이 토양 오염 여부는 지시할 수 있으나 작물로 전이되는 비소 함량을 예측하기에는 무의미한 자료임을 나타낸다. 또한 이 연구에서는 전함량에 비하여 유효태 비소 함량을 더욱 잘 나타낼 것으로 여겨지는 Mehlich, 0.1 N 염산, 1 N 염산 등의 단일용출법의 경우 역시 전함량보다 낮은 백미 전이 상관관계를 보여 역시 효과적인 예측 수단은 아닌 것으로 나타났다.

농작물로 전이되는 비소 함량은 토양의 물리·화학적 특성에 큰 영향을 받으므로 이를 고려하지 않은 채 토양과 작물 내 중금속 함량의 관련성을 모색할 경우 유의미한 결과를 도출하기 어렵다. 이 연구에서는 토양을 pH, $As_{Tot}/As_{Mehlich}$, OM에 따라 순차적으로 분류한 후 다중회귀분석을 수행한 결과, 백미 내 비소 함량의 예측력이 크게 증가함을 보였다.

중금속 오염이 의심되는 농지에서 안심하고 작물을 재배할 수 있는지 또한 그 기준은 무엇인지에 대한 현장 요구가 높다. 그간 이에 대한 많은 연구가 이루어졌으나 아직 뚜렷한 안전한계값의 설정은 이루어진 바 없다. 이 연구의 결과는 비소 오염 의심 토양에 대해 현장 적용 가능하며 보다 신뢰성 있는 백미 재배 기준을 설정하는데 의미있는 방법론을 제안할 수 있을 것으로 기대한다.

이 연구에서는 백미와 비소를 대상으로 하였으나 다른 작물 및 중금속에 대해서도 추가 연구가 이루어진다면 다양한 작물로 전이되는 유독성 원소 함량의 예측에 높은 정확도를 확보할 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 한국연구재단(과제번호 2020R1H1A1A01073355) 및 농촌진흥청(과제번호 PJ015053032022)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- An, J.-M., Park, D.-H., Hwang, H.-R., Chang S.-Y., Kwon, M.-J., Kim, I.-S., Kim, I.-R., Lee, H.-M., Lim, H.-J., Park, J.-O. and Lee, G.-H. (2018) Risk analysis of arsenic in rice using by HPLP-ICP-MS. *Korean J. Environ. Agric.*, v.37, p.291-301. doi: 10.5338/kjea.2018.37.4.35
- ATSDR (2007) Toxicology profile for arsenic. Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry, US DHHS, Atlanta, Georgia.
- Boyle, J. (2004) A comparison of two methods for estimating the organic matter content of sediments. *J. Paleolimn.*, v.31, p.125-127. doi: 10.1023/b:jopl.0000013354.67645.df
- Busenberg, E. and Clemency, C.V. (1973) Determination of the cation exchange capacity of clays and soils using an ammonia electrode. *Clays and Clay Miner.*, v.21, p.213-217. doi: 10.1346/ccmn.1973.0210403
- CAC (2014) Joint FAO/WHO food standards programme. 37th Session Report. Codex Alimentarius Commission.
- Chiou, W.-Y. and Hsu, F.-C. (2019) Copper toxicity and prediction models of copper content in leafy vegetables. *Sustainability*, v.11, p.6215. doi: 10.3390/su11226215
- Chojnacka, K., Chojnacki, A., Gorecka, H. and Gorecki, H. (2005) Bioavailability of heavy metals from polluted soils to plants. *Sci. Tot. Environ.*, v.337, p.175-182. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.06.009
- Han, H.-J. (2020) A study on the potential mobility assessment of heavy metals in contaminated soil in Korea. Ph.D thesis, Chonnam National University, Korea.
- Han, H.-J., Ko, M.-S., Ko, J.I. and Lee, J.-U. (2020) Study on soil extraction methods for contamination assessment of heavy metals in soil. *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, v.57, p.471-482. doi: 10.32390/ksmer.2020.57.5.471
- Han, H.-J., Song, C.-W. and Lee, J.-U. (2021) The statistical study on the effects of physicochemical properties of soil on single extraction methods for heavy metals. *Econ. Environ. Geol.*, v.54, p.259-269. doi: 10.9719/eeg.2021.54.2.259
- HBBF (2017) Arsenic in 9 brands of infant cereal. Healthy Babies Bright Futures. <https://www.healthybabycereals.org/>
- Huang, R.Q., Gao, S.F., Wang, W.L., Staunton, S. and 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.*, v.368, p.531-541. doi: 10.1016/j.scitotenv.2006.03.013
- Kim, J.-Y., Lee, J.-H., Kunhikrishnan, A., Kang, D.-W., Kim, M.-J., Yoo, J.-H., Kim, D.-H., Lee, Y.-J. and Kim, W.I. (2012) Transfer factor of heavy metals from agricultural soil to agricultural products. *Korean J. Environ. Agric.*, v.31, p.300-307. doi: 10.5338/kjea.2012.31.4.300
- Kim, W.-I., Kim, J.-J., Yoo, J.-H., Kim, J.-Y., Lee, J.-H., Paik, M.-K., Kim, R.-Y. and Im, G.-J. (2010) Arsenic fractionation and bioavailability in paddy soils near closed mines in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, v.43, p.917-922.
- Kim, K.-W., Ko, M.-S., Kim, A.-Y., Kim, J., Kim, J.-Y., Lee, B.-T., Lee, J.-S. and Lee, J.-U. (2012) The 2010 Korean soil preservation act: Will stabilization techniques still be feasible? *Geochem., J.*, v.46, p.e17-e19. doi: 10.2343/geochemj.1.0162
- Kunhikrishnan, A., Go, W.-R., Park, J.-H., Kim, K.-R., Kim, H.-S., Kim, K.-H., Kim, W.-I. and Cho N.-J. (2015) Heavy metal(loid) levels in paddy soils and brown rice in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, v.48, p.515-521. doi: 10.7745/kjssf.2015.48.5.515
- Lee, J.-H., Kim, J.-Y., Go, W.-R., Jeong, E.-J., Kunhikrishnan, A., Jung, G.-B., Kim, D.-H. and Kim, W.-I. (2012) Current research trends for heavy metals of agricultural soils and crop uptake in Korea. *Korean J. Environ. Agric.*, v.31, p.75-95. doi: 10.5338/kjea.2012.31.1.75
- Lee, S., Kang, D.-W., Kim, H.-S., Yoo, J.-H., Park, S.-W., Oh, K.-S., Cho, I.K. Moon, B.-C. and Kim, W.-I. (2017) Prediction of arsenic uptake by rice in the paddy fields vulnerable to arsenic contamination. *Korean J. Soil Sci. Fert.*, v.50, p.115-126. doi: 10.7745/kjssf.2017.50.2.115
- Lim, G.H., Kim, K.H., Seo, B.H. and Kim, K.R. (2014) Transfer function for phytoavailable heavy metals in contaminated agricultural soil. *Korean J. Environ. Agric.*, v.33, p.271-281. doi: 10.5338/kjea.2014.33.4.271
- Lund, U. and Fobian, A. (1991) Pollution of two soils by arsenic, chromium and copper, Denmark. *Geoderma*, v.49, p.83-103. doi: 10.1016/0016-7061(91)90093-9
- Mehlich, A. (1984) Mehlich No. 3 soil test extractant: A modification of Mehlich No. 2 extractant. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, v.15, p.1409-1416. doi: 10.1080/00103628409367568
- MFDS (2016) White paper. Ministry of Food and Drug Safety. ISBN 9791170098164
- MFDS (2021) Food standards and specifications. Ministry of Food and Drug Safety, v.79, 1056p.
- MOE (2016) Report on soil measurement network and soil contamination actual condition in 2015. Ministry of Environment. 11-1480000-000669-10
- MOE (2017) Environment white paper. Ministry of Environment. 11-1480000-000586-10
- Queensland Government (2016) Soil pH. Queensland Department of Environment and Heritage Protection. <https://www.qld.gov.au>.
- Seo, B.-H., Lim, G.-H., Kim, K.-H., Kim, J.-E., Hur, J.-H., Kim, W.-I. and Kim, K.-R. (2013) Comparison of single extractions from evaluation of heavy metals phytoavailability in soil. *Korean J. Environ. Agric.*, v.32, p.171-178. doi: 10.5338/kjea.2013.32.3.171
- Song, C.-W., Han, H.-J. and Lee, J.-U. (2019) Investigation on heavy metal distribution in soils around Boryeong coal-fired power plant. *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, v.56, p.10-22. doi: 10.32390/ksmer.2019.56.1.010
- Ure, A.M. (1996) Single extraction schemes for soil analysis and related applications. *Sci. Tot. Environ.*, v.178, p.3-10. doi: 10.1016/0048-9697(95)04791-3
- USDA (1993) Examination and description of soil profiles. U.S. Department of Agriculture Handbook. <https://www.nrcs.usda.gov>.
- Xie, M., Li, H., Zhu, Y., Xue, J., You, Q., Jin, B. and Shi, Z. (2021) Predicting bioaccumulation of potentially toxic element in soil-rice systems using multi-source data and machine learning methods: a case study of an industrial city in southeast China. *Land*, v.10, p.558-574. doi: 10.3390/land10060558
- Yang, S.-H., Park, J.-S., Cho, M.-J. and Choi, H. (2016) Risk analysis of inorganic arsenic in foods. *J. Food Hyg. Saf.*, v.31, p.227-249. doi: 10.13103/jfhs.2016.31.4.227
- Yao, B.-M., Chen, P., Zhang, H.-M. and Sun, G.-X. (2021) A predictive model for arsenic accumulation in rice grains based on bioavailable arsenic and soil characteristics. *J. Hazard. Mater.* v.412, p.125-131. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125131