

Distribution of Arsenic Fraction in Soil Around Abandoned Mining Area and Uptake by Rice

Hyuck-Soo Kim, Woo-Ri Go, Dae-Won Kang, Ji-Hyock Yoo, Kye-Hoon Kim¹, and Won-Il Kim*

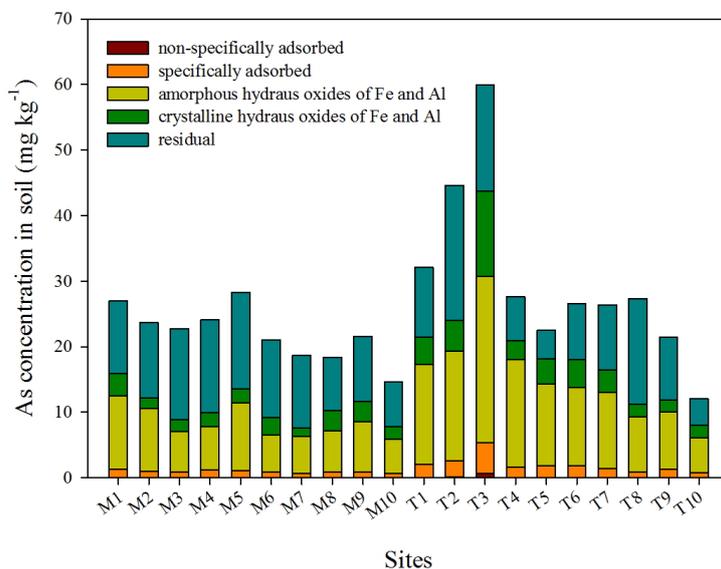
Department of Agro-Food Safety & crop Protection, National Academy of Agricultural Science, Wanju, 55365, Korea

¹Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

(Received: September 16 2015, Revised: October 20 2015, Accepted: October 20 2015)

Arsenic (As) contamination of agricultural soils resulting from mining activity has caused major concern due to the potential health risk. Therefore the current study was carried out to investigate the relationship between fractionation of As in soil and rice uptake and to provide a basic information for adequate management of As contaminated agricultural soil. Twenty agricultural soils and rice affected by the abandoned mining sites were collected. Soil chemical properties and As concentrations (total and sequential extracted) in soils were determined and As concentrations in polished rice were analyzed. The average concentration of As in non-specifically adsorbed (F1), specifically adsorbed (F2), amorphous hydrous oxides of Fe and Al (F3), crystalline hydrous oxides of Fe and Al (F4) and residual phase (F5) were 0.08, 1.38, 10.34, 3.26 and 10.98 mg kg⁻¹, respectively. Both soil pH and available phosphorus were positively correlated with the concentrations of As in F1 and F2. These results indicate that increasing the soil pH and available phosphorus can significantly increase the easily mobile fractions of As (F1 and F2). The average concentration of As in polished rice was 0.09 mg kg⁻¹. The concentrations of As in F1 and F2 showed a positive correlation with the concentrations of As in polished rice. Therefore soil pH and available phosphorus affect the distribution of As fractionation in soils and thus affect As bioavailability.

Key words: Arsenic, pH, Phosphorus, Fractionation, Polished rice



Distribution of As in sequentially extracted fractions of soils from the abandoned metal mine areas.

*Corresponding author : Phone: +82632383245, Fax: +82632383837, E-mail: wikim721@korea.kr

§Acknowledgement : This study was carried out with the support of the 'Research Program for Agricultural Science & Technology Development (PJ011161)', Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

폐광산 인근 농경지는 광업활동으로 발생한 광물 부산물의 비산, 유실 그리고 산성 광산배수 유입 등으로 중금속과 비소 등으로 오염되고 (Bech et al., 1997; Lee et al., 2001), 결국 토양 중 중금속과 비소는 농작물로 전이되어 인체에 악영향을 미칠 수 있다 (Lee et al., 2005; Liu et al., 2005). 현재 우리나라에는 2,089개의 폐광산 광산이 전국 각지에 위치하고 있는데 (MIRECO, 2015), 1995년 토양환경보전법이 제정된 이후 폐광산 인근 지역에 대해 지속적인 모니터링과 복원 사업이 진행 중이다. 또한 광해의 방지 및 훼손지 복구를 위해 '광산피해의 방지 및 복구에 관한 법률'에 의거 2006년 한국광해관리공단이 설립되어 복구 사업이 진행 중이지만 여전히 광산 하부의 농경지 오염은 심각한 문제이다. 한 예로 식품의약품안전처 (MFDS, 2006)는 전국 44 폐광산 주변 농경지에서 재배되는 쌀 757점의 중금속 및 비소를 분석하였는데 카드뮴과 납 함량 범위는 각각 0~3.51, 0~6.55 mg kg⁻¹를 나타냈고 전체 시료 중 납 202점, 카드뮴 57점이 codex 기준 0.2 mg kg⁻¹을 초과하였다. 또한 비소는 평균 0.27 mg kg⁻¹으로 0~4.35 mg kg⁻¹의 범위를 나타냈으며 이는 Choi et al. (2010)이 조사한 전국 10개 지역 쌀 평균 비소 함량 (average: 0.17 mg kg⁻¹, range: 0.08~0.26 mg kg⁻¹)보다 높은 수치였다.

폐광산에서 발행하는 오염물질 중 하나인 비소는 인체에 매우 유독한 발암물질로 국제암연구소 (International Agency for Research on Cancer)에서 1급 발암물질로 분류하고 있다. Lee et al. (2008)는 우리나라 폐광산 인근 비소 오염 농경지 토양 (As: 72 mg kg⁻¹)에서 재배한 쌀에 대해 비소 위해성 평가를 수행한 결과 쌀 섭취에 의한 비발암위해도 (non-carcinogenic risks)는 기준노출량 (Reference dose)보다 약 8배가 높았고, 발암위해도 (cancer risk)는 천명 중의 1.4명 (1.4 E-03)으로 나타나 허용발암위해도 (1.0 E-06)를 초과하는 것으로 나타났다. 또한 Lee et al. (2011)은 전국 15 지점 폐광산 주변 농경지에서 재배된 쌀의 비소 함량을 조사했는데 쌀 섭취에 의한 비발암위해도는 기준 이하였으나, 발암위해도는 허용범위를 다소 초과하는 것으로 나타났다.

이와 같이 폐광산 인근 비소로 오염된 농경지에서 재배된 농산물은 인체 건강에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 하지만 Huang et al. (2006)은 토양의 비소 총함량과 벼를 포함한 17 종의 식물 내 비소 함량 간의 상관성을 조사했을 때 9 종의 식물 내 비소 함량은 토양 비소 총함량과 상관성이 없는 것으로 나타났다. 따라서 토양의 비소 총함량 만으로는 식물 전이량을 예측할 수 없으므로 이를 위해 토양 내 비소가 흡착되어 있는 형태를 고려한 비소의 식물유효도에 대해 정밀 조사가 필요하다. 따라서 본 연구는 폐광산 인근 농경지에서 토양 및 벼를 채취하여 연속침출을 통해 토양 중

비소의 형태별 함량과 백미의 비소 함량의 상관성을 조사하였고, 이를 통해 폐광산 인근 농경지 토양의 적절한 관리 대책을 제시하고자 수행하였다.

Materials and Methods

시료 채취 본 연구는 환경부 후, 폐광산 토양오염실태 정밀조사 (MOE, 2007; MOE, 2008)를 참고하여 2개의 폐광산 (명봉광산, 탄천광산)을 선정한 후, 각각의 폐광산 인근에 위치한 10 지점 농경지 (총 20 지점)에서 벼 수확시기에 토양과 벼를 동시에 채취하였다. 토양은 풍건 후 2 mm 체로 친 후 분석 시료로 사용하였고, 수확한 벼는 60°C에서 건조한 후 현미기 (SYTH88, Ssangyong Instrument, Korea)를 이용하여 현미로 도정한 다음 실험용 도정기 (McGill miller, HT McGill Inc, USA)를 이용하여 10분도 백미로 도정한 후 분쇄하여 분말로 만들어 분석시료로 사용하였다.

토양 화학적 특성 및 비소 함량 분석 토양의 pH, 유기물함량, 치환성 양이온 (Ca, K, Mg)은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (NIAS, 2000)에 따라 시료를 조제하여 분석하였다. 토양 pH는 토양 5 g에 증류수 25 ml을 넣고 유리막대로 저어 주면서 1시간 방치 후 pH meter (Thermo, Orion star series)로 측정하였고, 유기물 함량은 0.4 M 중크롬산칼륨 (K₂Cr₂O₇)을 넣고 Tyurin 법으로 분석하였다. 치환성 양이온은 1 M NH₄OAc (pH 7.0)로 추출하여 ICP-OES (GBC XMP, Australia)로 분석하였다. 유효인산은 Bray No.1 방법으로 (Bray and Kurtz, 1945) 정량하였다. 토양 내 비소의 형태별 함량은 Wenzel et al. (2001) 제안한 연속 추출법을 이용하여 토양 중 비소를 비특이적 흡착태 (non-specifically adsorbed), 특이적 흡착태 (specifically adsorbed), 비결정형 철/알루미늄 수산화물태 (amorphous hydrous oxides of Fe and Al), 결정형 철/알루미늄 수산화물태 (crystalline hydrous oxides of Fe and Al), 잔류태 (residual phase) 비소의 함량을 구분하여 측정하였다. 연속 추출법 각 단계의 추출 용액과 추출 방법은 Table 1에 나타났다.

쌀 비소 함량 분석 쌀의 총 비소 함량 분석은 쌀 0.25 g을 마이크로웨이브 (Mars 5, CEM, USA) 분해용기에 넣고 진한 질산 8 ml와 30% 과산화수소 1 ml를 첨가한 후 1시간 정치시켜 발생하는 가스를 제거하고, 180°C에서 20분 동안 분해하여 분해액 중 비소의 함량을 ICP-MS (Agilent 7700)로 분석하였다. 분석신뢰도를 확인하기 위해 쌀 표준물질 IRMM-208 (rice)을 함께 분석하였고, 80~120% 범위 내의 회수율을 만족하였다.

데이터 분석 토양 및 식물체 분석은 3반복으로 수행하

Table 1. Sequential extraction methods of arsenic in soil (Wenzel et al., 2001).

Fraction	Chemical form	Extractant	Extraction condition
1	Non-specifically adsorbed	0.05 M (NH ₄) ₂ SO ₄	1:25 ¹ , 4-hr shaking, 20°C
2	Specifically adsorbed	0.05 M (NH ₄)H ₂ PO ₄	1:25, 16-hr shaking, 20°C
3	Amorphous hydrous oxides of Fe and Al	0.2 M NH ₄ C ₂ O ₄	1:25, 4-hr shaking, 20°C
4	Crystalline hydrous oxides of Fe and Al	0.2 M NH ₄ C ₂ O ₄ + 0.1 M ascorbic acid	1:25, 30-min shaking, 96°C
5	Residual	HCl + HNO ₃ (3:1)	1:11, 2-hr shaking, 90°C

¹ Soil to liquid ratio

Table 2. Chemical properties and total As concentrations in soils.

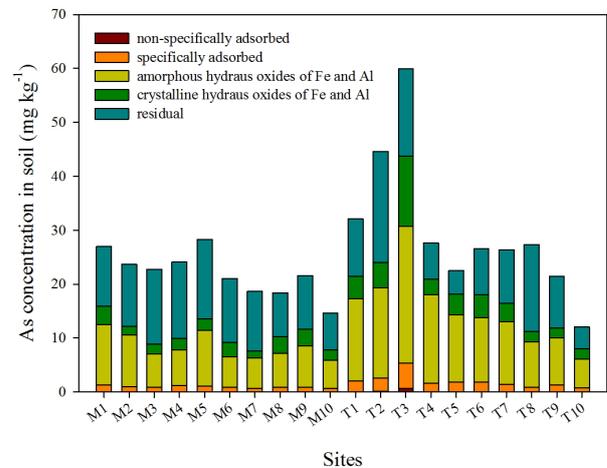
		pH	O.M	Avail.P	Exchangeable			Total-As
					Ca	Mg	K	
			g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	-----	cmol _c kg ⁻¹	-----	mg kg ⁻¹
Myeongbong mine	Ave.	5.5	24.5	99.3	3.7	0.63	0.91	23.1
	Min.	5.1	14.2	36.4	2.6	0.36	0.66	15.3
	Max.	5.9	28.9	199.2	4.8	0.98	1.64	29.9
Tancheon mine	Ave.	5.6	23.6	257.2	4.1	0.57	0.98	30.6
	Min.	5.2	10.7	47.9	2.4	0.34	0.78	13.2
	Max.	6.7	36.2	1013.2	8.0	0.89	1.66	60.6
All samples	Ave.	5.6	24.0	178.2	3.9	0.60	0.94	26.9

였고 처리별 유의성 분석은 SAS 9.3 software (SAS Institute, Cary, NC, U.S.A.)를 이용한 ANOVA 검정으로 수행하였다.

Results and Discussion

토양 특성 및 비소의 형태별 함량 명봉 광산과 탄천 광산 인근 농경지에서 채취한 토양 pH는 평균 5.6으로 나타났다, 평균 유기물 함량과 유효인산 함량은 각각 24 g kg⁻¹, 198 mg kg⁻¹으로 나타났다 (Table 2). Kang et al. (2012)이 보고한 우리나라 논토양의 평균 화학적 특성 (pH: 5.9; O.M: 26 g kg⁻¹; Avail. P₂O₅: 131 mg kg⁻¹)과 본 결과를 비교해 볼 때 연구 대상 폐광산 인근 논토양의 화학적 특성은 일반 논토양 특성과 비슷한 수준임을 확인할 수 있었다. 이 외 치환성 양이온 함량은 Table 2에 나타났다.

왕수로 분해하여 측정된 토양의 총비소 함량은 13.2~60.6 mg kg⁻¹으로, 20 지점 폐광산 인근 토양 모두 우리나라 논 토양 평균 비소함량 (4.4 mg kg⁻¹)보다 높았고 (RDA, 2013), 그 중 10 지점 토양은 토양오염우려기준 (25 mg kg⁻¹)을 초과하였다 (Table 2). 각 농경지 토양의 연속추출에 의한 형태별 비소 함량은 Fig. 1에 나타났다. 우선 비소의 형태별 함량에 대한 정확도를 확인하기 위해 연속추출 5단계의 함량을 합한 함량 (Sum)과 토양 중 비소의 총함량 (Total)을 비교해보면 Sum/Total은 96.5 (90.3~99.9)% 수준을 나타냈다. 비소의 평균 형태별 함량 비율은 비특이적 흡착 0.2%, 특이적 흡착 5.1%, 비결정형 철/알루미늄 수산화물태 39.1%,

**Fig. 1. Distribution of As in sequentially extracted fractions of soils (M: Myeongbong mine, T: Tancheon mine).**

철/알루미늄 수산화물태 12.1%, 잔류태 43.5%로 잔류태가 가장 많은 부분을 차지하였고, 비특이적 흡착 형태가 가장 낮은 순이었다. 각각의 광산 인근 농경지를 구분해서 보면 잔류태를 제외한 나머지 형태의 비소 함량은 모두 탄천광산에서 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 명봉 광산과 탄천 광산 인근 농경지 토양의 평균 비소 총함량이 각각 23.1, 30.6 mg kg⁻¹으로 비슷한 수준임을 감안할 때, 명봉광산 인근 농경지 토양 중 잔류태 비소 함량이 상대적으로 높다는 것은 그만큼 토양 내 비소가 안정화되어 있다는 것으로 추정되므로 (Kim et al., 2014; Lee et al., 2004), 탄천광산

인근 지역에서 재배된 쌀의 비소 함량이 명봉광산보다 높을 것으로 예상된다.

토양의 특성과 형태별 비소 함량 간의 상관성을 보면 토양 pH는 비특이적 흡착 ($r=0.7462$, $p<0.0005$), 특이적 흡착 ($r=0.5544$, $p<0.05$), 철/알루미늄 수산화물태 ($r=0.6990$, $p<0.001$) 비소 함량과 양의 상관성을 나타냈으며, 그 중 이동성이 가장 높은 비특이적 흡착 형태 비소와 가장 높은 유의성을 나타냈다. 그 외 비결정형 철/알루미늄 수산화물태와 잔류태 비소 함량은 토양 pH와 유의성이 없는 것으로 나타났다. 토양 pH는 토양 중 비소 이동성에 영향을 주는 중요한 인자로 토양 pH 상승 시 음이온 형태의 비소 용해도가 증가하게 된다 (Moreno-Jiménez et al., 2012). 한 예로 Beesley et al. (2014)는 광산 인근 농경지 토양을 채취하여 과수원 전정가지 biochar를 10% (v/v) 비율로 처리한 후 4주간 incubation 하였는데, 강산성을 띠던 토양 pH는 biochar 처리로 3.0 이상 상승하였고, 토양 중 수용태 비소 함량은 무처리구 (1.2 mg kg^{-1})보다 약 12배 증가한 14 mg kg^{-1} 를 나타냈다. 이와 같은 결과를 볼 때 토양 pH의 상승은 결합력이 약해 이동성이 높은 형태의 비특이적 흡착과 특이적 흡착 형태의 비소 함량을 증가시키므로 토양 pH와 이동성이 높은 형태의 비소 함량이 서로 상관성을 나타낸 것으로 보인다.

또한 토양 중 유효인산 함량은 잔류태 비소 함량을 제외한 비특이적 흡착 ($r=0.9530$, $p<0.0001$), 특이적 흡착 ($r=0.8508$, $p<0.0001$), 비결정형 철/알루미늄 수산화물태 ($r=0.7252$, $p<0.0005$), 철/알루미늄 수산화물태 ($r=0.8974$, $p<0.0001$) 비소 함량과 양의 상관성을 나타냈으며, 비특이적 흡착 형태의 비소 함량과 가장 높은 상관성을 보였다. 인산염 (phosphate)은 비산염 (arsenate)과 유사한 물리 화학적 이동 양상을 지녔으며, 이로 인해 토양 입자 흡착 부위에서 경쟁적이다. 따라서 토양 중에 인산염 함량이 높아지게 되면 토양에 흡착되어 있던 비소가 교환, 유출되어 이동성이 높아지게 된다 (Moreno-Jiménez et al., 2012). Cao et al. (2003)은 CCA (chromated copper arsenate) 방부제로 오염된 토양 ($\text{As}: 135 \text{ mg kg}^{-1}$)에 인광석을 15 g kg^{-1} 비율로 처리하고 *Pteris vittata* L.를 12주간 재배하였는데, 재배 후 인광석을 처리한 방부제 오염 토양은 인과 비소의 교환 작용에 의해 무처리구의 수용성 비소 함량 5.7 mg kg^{-1} 보다 30% 증가한 7.4 mg kg^{-1} 를 나타냈다.

결과적으로 토양 중 이동성이 높아 주변 환경 및 작물에 영향을 미칠 수 있는 비특이적 흡착과 특이적 흡착 형태의 비소 함량을 제어하기 위해서는 토양 pH와 유효인산 함량의 적절한 관리가 필요할 것으로 사료된다.

쌀 비소 함량 쌀 (백미) 중 비소의 총함량 평균은 0.09 ($0.03\sim 0.23$) mg kg^{-1} 으로 나타났다 (Table 3). 현재 우리나라에는 쌀의 비소 기준이 설정되어 있지 않지만 2014년 codex는 무기비소에 대해 쌀 (백미) 함량 기준을 0.2 mg kg^{-1} 로 규정하였다. 식품의약품안전처 (NIFDS, 2009)에 따르면 쌀을 포함한 국내 20개 품목 329건의 농산물 중 무기 비소 함량은 총함량의 1.9~44.8%로 총함량의 절반 이하 수준으로 나타나 본 연구에서 측정된 전체 쌀 시료의 총 비소 함량, 0.09 mg kg^{-1} 은 codex의 무기비소 기준 이하인 것으로 판단된다. 또한 본 연구 대상 농경지 토양의 비소 함량은 일반 농경지보다 상대적으로 높았지만 Choi et al. (2010)이 조사한 전국 10개 지역 쌀 평균 비소 함량 (average: 0.17 mg kg^{-1}) 보다도 낮은 함량을 나타냈다.

앞서 설명한 바와 같이 토양 잔류태 비소 함량을 제외한 이동성이 높은 형태의 비소 함량이 명봉광산 보다 높았던 탄천광산 인근 농경지에서 재배된 쌀의 평균 비소 함량은 명봉광산 인근 농경지 재배 쌀보다 약 9% 높은 것으로 나타났다. 쌀 중 비소 함량은 각각의 토양 형태별 비소 함량 중 잔류태 비소 함량을 제외한 모든 형태별 비소 함량과 높은 양의 상관성을 나타냈고 (Table 4), 특히, 이동성이 높은 비특이적 흡착/특이적 흡착 형태의 비소 함량과는 매우 높은 상관성을 보였다 (Fig. 2). 또한 총 비소 함량 중 각각의 형태별 비소 분포비율 (%)과 비교해보면 총 함량 중 비특이적 흡착 형태가 차지하는 비율이 높을수록 쌀의 비소 함량이 높아지는 것으로 나타났다 ($r=0.7213$, $p<0.0005$). 이는 토양의 비소 총함량 중 비특이적 흡착 형태 비소가 차지하는

Table 3. Concentrations of As in polished rice from the abandoned metal mine areas.

	As (mg kg^{-1})		
	Ave.	Min.	Max.
Myeongbong mine	0.085	0.044	0.125
Tancheon mine	0.093	0.031	0.233
All samples	0.089		

Table 4. Relationships between As fractions in the soils and As concentrations in polished rice.

	Non-specifically adsorbed	Specifically adsorbed	Amorphous hydrous oxides of Fe and Al	Crystalline hydrous oxides of Fe and Al	Residual	Total
Polished rice	0.77**	0.78**	0.66*	0.83**	0.31 ^{n.s.}	0.73*

* $p<0.005$, ** $p<0.0001$, ^{n.s.} not significant

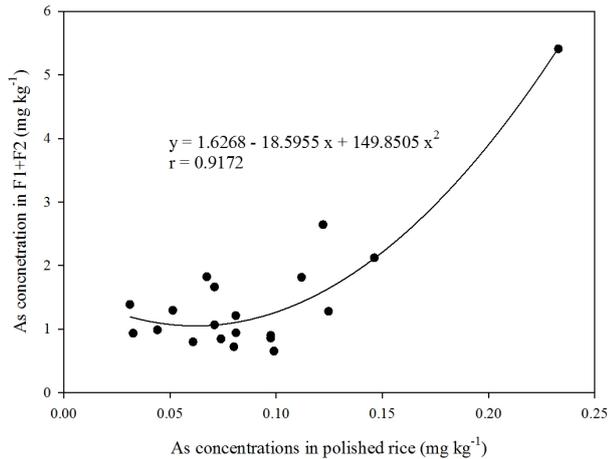


Fig. 2. The correlations between the concentrations of As in polished rice and As fractions (F1+F2) in soil. F1: non-specifically adsorbed; F2: specifically adsorbed.

부분은 매우 낮지만 이들 형태의 변화가 벼의 비소 흡수에 직접적인 영향을 미친다는 것을 의미한다. 따라서 일반 농경지보다 상대적으로 비소 함량이 높은 토양 환경에서 쌀이 재배되었어도 비소 함량이 일반 농경지에서 재배된 쌀과 비슷한 수준을 보인 것은 비특이적 흡착 형태의 비소 함량이 낮았기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 비특이적 흡착 형태의 비소 함량을 적절히 관리한다면 작물의 비소 흡수량을 지속적으로 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

Conclusion

폐광산 인근 20 지점 농경지 토양의 평균 비소 함량은 일반 농경지 평균 비소 함량보다 높았고, 그 중 10 지점 토양의 비소 함량은 토양오염우려기준을 초과하는 것으로 나타났다. 토양에 존재하는 비소 중 토양 결합력이 약해 이동성이 높은 비특이적 흡착 형태와 특이적 흡착 형태의 분포 비율은 다른 형태의 비소 함량보다 낮았지만 토양 pH와 유효인산 함량의 직접적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 폐광산 인근 농경지에서 재배된 쌀의 비소 함량은 일반 농경지에서 재배한 쌀과 비슷한 수준을 보였고, 쌀의 비소 함량과 토양 중 비특이적 흡착 형태의 비소 함량은 양의 상관성이 있는 것으로 나타났다. 따라서 폐광산과 같은 비소 오염원으로부터 지속적이고 안전한 쌀을 재배하기 위해서는 적절한 토양 pH 및 유효인산 함량 관리를 통해 토양 중 비특이적 흡착 형태의 비소 함량을 저감해야 할 것으로 판단된다.

References

Bech, J., C. Poschenrieder, M. Llugany, J. Barceló, P. Tume, F.J. Tobias, J.L. Barranzuela, and E.R. Vázquez. 1997. Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation

- around a copper mine in Northern Peru. *Sci. Total Environ.* 203:83-91.
- Beesley, L., O.S. Inneh, G.J. Norton, E. Moreno-Jimenez, T. Pardo, R. Clemente, and J.J.C. Dawson. 2014. Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil. *Environ. Pollut.* 186:195-202.
- Cao, X., L.Q. Ma, and A. Shiralipour. 2003. Effects of compost and phosphate amendments on arsenic mobility in soils and arsenic uptake by the hyperaccumulator, *Pteris vittata* L.. *Environ. Pollut.* 126:157-167.
- Choi, H., S.K. Park, D.S. Kim, and M.H. Kim. 2010. Risk assessment of arsenic in agricultural products. *Korean J. Environ. Agric.* 29(3):266-272.
- Huang, R.Q., S.F. Gao, W.L. Wang, S. Staunton, and G. Wang. 2006. Soil arsenic availability and the transfer of soil arsenic to crops in suburban areas in Fujian Province, south-east China. *Sci. Total Environ.* 368:531-541.
- Kang, S.S., A.S. Roh, S.C. Choi, Y.S. Kim, H.J. Kim, M.T. Choi, B.K. Ahn, H.W. Kim, H.K. Kim, J.H. Park, Y.H. Lee, S.H. Yang, J.S. Ryu, Y.S. Jang, M.S. Kim, Y.K. Son, C.H. Lee, S.G. Ha, D.B. Lee, and Y.H. Kim. 2012. Status and changes in chemical properties of paddy soil in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45(6):968-972.
- Kim, E.J., J.C. Yoo, and K. Baek. 2014. Arsenic speciation and bioaccessibility in arsenic-contaminated soils: sequential extraction and mineralogical investigation. *Environ. Pollut.* 186:29-35.
- Lee, C.G., H.T. Chon, and M.C. Jung. 2001. Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au-Ag-Pb-Zn mine in Korea. *Appl. Geochem.* 16:1377-1386.
- Lee, J.H., W.I. Kim, E.J. Jeong, J.H. Yoo, J.Y. Kim, M.K. Paik, B.J. Park, G.J. Im, and M.K. Hong. 2011. Arsenic contamination of polished rice produced in abandoned mine areas and its potential human risk assessment using probabilistic techniques. *Korean J. Environ. Agric.* 30(1):43-51.
- Lee, J.S., H.T. Chon, and K.W. Kim. 2005. Human risk assessment of As, Cd, Cu and Zn in the abandoned metal mine site. *Environ. Geochem. Health* 27:185-191.
- Lee, J.S., S.W. Lee, H.T. Chon, and K.W. Kim. 2008. Evaluation of human exposure to arsenic due to rice ingestion in the vicinity of abandoned Myungbong Au-Ag mine site, Korea. *J. Geochem. Explor.* 96:231-235.
- Lee, P.K., Kang, M.J., Choi, S.H. and S.C. Shin. 2004. Chemical speciation and potential mobility of heavy metals in tailings and contaminated soils. *Econ. Environ. Geol.* 37(1):87-98.
- Liu, H., A. Probst, and B. Liao. 2005. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China). *Sci. Total Environ.* 339:153-166.
- MFDS (Ministry of Food and Drug Safety). 2006. Research about heavy metal contamination in produce cultivated in

- mining area. Ministry of Food and Drug Safety, Seoul, Korea.
- MIRECO (Mine Reclamation Corp.). 2015. Yearbook of MIRECO statistics. MIRECO, Seoul, Korea.
- MOE (Ministry of Environment). 2007. Annual report on the detailed survey of soil contamination near closed metal mine. MOE, Gwacheon, Korea.
- MOE (Ministry of Environment). 2008. Annual report on the detailed survey of soil contamination near closed metal mine. MOE, Gwacheon, Korea.
- Moreno- Jiménez, E., E. Esteban, and J.M. Peñalosa. 2012. The fate of Arsenic in the soil-plant system, p.1-37. In: Whitacre DM (ed.) Reviews of environmental contamination and toxicology. Springer, New York, USA.
- NIFDS (National Institute of Food and Drug Safety Evaluation). 2009. A study on the organic and inorganic arsenic in agricultural products. NIFDS, Cheongju, Korea.
- RDA (Rural development administration). 2013. Monitoring project on agro-environmental quality. RDA, Jeonju, Korea.
- Wenzel, W.W., N. Krichbaumer, T. Prohaska, G. Stingeder, E. Lombi, and D.C. Adriano. 2001. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Anal. Chim. Acta* 436:309-323.