

논 토양의 이화학적 특성 및 침출성 함량을 이용한 납과 카드뮴의 전함량 예측 모형식 개발

고우리 · 이지호 · 이은용 · 임성묵 · 류지혁 · 김지영 · 김계훈¹ · 임건재 · 김원일*

국립농업과학원 유해화학과, ¹서울시립대학교 환경원예학과

Model Development for Estimating Total Soil Contents of Pb and Cd Using Chemical Properties and Extractable Contents in Paddy Soil

Woo-Ri Go, Ji-Ho Lee, Eun-Yong Lee, Seong-Mook Lim, Ji-Hyock Yoo, Ji-Young Kim, Kye-Hoon Kim¹, Geon-Jae Im, and Won-Il Kim*

Chemical Safety Division, National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Korea

¹Department of Environmental Horticulture, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

Predictive model for estimating total contents of cadmium (Cd) and lead (Pb) was developed by stepwise multiple-regression analysis using chemical properties and extractable contents of metal in paddy soil adjacent to abandoned mines in 2009 and 2010. Soil properties, e.g. pH, electrical conductivity (EC), organic matter (OM), available phosphorus (P₂O₅), and exchangeable cations (i.e. Ca, Na, K, Mg) were measured. Total contents of Cd and Pb as well as extractable contents of metals were analyzed by ICP-OES. Results showed that the total and extractable contents were estimated to be 3.55 and 0.27 mg kg⁻¹ in Cd and 83.38 and 24.32 mg kg⁻¹ in Pb on the average. From stepwise analysis, it was found that the contents of extractable Cd, Zn, Cu, as well as exchangeable Na were significantly influenced on estimation of the total contents of Cd in soil. Moreover, it also showed that the contents of extractable Pb, Zn, and Cu significantly affected estimation of the total contents of Pb in soil. More significant relationship between estimated and measured value in total contents of Pb was observed than those of Cd (R²=0.87, p<0.0001). This demonstrates that extractable contents of metal are influenced more on estimation of total contents of Cd and Pb in soil than soil properties.

Key words: Abandoned mines, Cadmium, Extractable contents, Lead, Paddy soil, Soil properties, Total contents

서 언

토양 내 중금속 함량은 추출용매에 따라 중금속별 침출 특성과 이로 인한 형태별 함량 또한 다르게 나타난다 (Kim et al., 2010). 토양 내 중금속 침출률은 중금속 오염특성 및 토양 이화학적 특성에 따라 다양하며, 광범위한 토양의 화학성은 토양 내 전 함량 예측, 식물 유효도 및 독성연구를 수행하는 데 있어 유용하다 (Zeng et al., 2011). 또한 중금속 침출량은 추출용매의 종류, 농도, 온도, 시간 등의 조건에 따라 상이하다 (Jung et al., 2005).

기존 토양 내 중금속에 대한 오염공정시험법은 총 8개 성분에 대한 전 함량 및 침출성 함량을 분석하고 있다 (MOE, 2003). 토양 중 구리, 카드뮴, 납, 6가 크롬 시험방법은 0.1 N

염산으로, 비소는 1.0 N 염산을 이용한 침출성 분석을, 니켈, 아연 시험방법은 왕수분해, 수은은 질산 가열법을 적용한 전 함량 시험방법을 사용하고 있다. 이렇게 국내에서는 다양한 추출법을 적용하고 있는 반면, 외국에서는 중금속 전 함량을 추출하는 산분해법을 이용한 기준치를 적용하고 있다 (Bachmann et al., 1993; CCME, 2002; US EPA, 1996). 외국 전 함량 시험법은 유기물 및 점토광물에 함유된 중금속 모두를 추출할 수 있는 반면, 국내 침출법은 토양 흡착된 중금속 및 2차 점토광물 내 일부만 추출할 수 있으며 (Jung et al., 2005) 이에 따라 국내 침출법에 의한 중금속의 기준치가 국외의 전 함량 시험법을 이용한 기준치에 비해 비슷하거나 높게 설정되는 문제점이 있다 (Oh et al., 2001). 그러므로 국내의 중금속 기준을 상호 비교하는데 어려움이 있으며, 침출법은 중금속 오염정도, 토양 이화학적, 그리고 토양의 완충능력에 따라 크게 의존하여 부하량 개념의 전함량 분석으로 일원화할 필요가 있음을 보고하였다 (Jung et al.,

접수 : 2011. 11. 23 수리 : 2011. 12. 13

*연락처 : Phone: +82312900527

E-mail: wikim721@korea.kr

2005). 2010년에 환경부 토양오염공정시험법이 일부 개정되면서 전 함량 분석인 왕수 추출법 (HCl:HNO₃ = 1:3)으로 토양 중 중금속 전처리 시험방법이 변경되었다. 이로 인해 기존의 침출법으로 분석하여 얻은 토양의 많은 데이터들을 활용할 수 있는 방안을 모색하고자 본 연구를 수행하게 되었다. 본 연구의 목적은 폐광 인근 논 토양 내 침출성 중금속 함량 및 토양화학성분에 대한 자료를 활용하여 토양 내 카드뮴과 납의 전 함량을 추정하기에 적합한 모형식을 개발하는 것이다.

재료 및 방법

시료채취 분석용 토양은 국내 폐광산 인근 지역, 논토양에서 2009년 53점, 2010년 36점, 총 89점의 시료를 채취하였다. 토양시료는 표토 10~15 cm 깊이에서 각 지점별로 3개씩 채취하였고, 이를 혼합하여 복합시료를 만들었다.

시료 전처리 및 분석 토양시료는 풍건하면서 뭉쳐진 부분을 손이나 고무망치로 부순 후, 2 mm와 0.074 mm 체를 이용하여 순차적으로 체질한 후, 전처리 시료로 사용하였다. 침출법은 200 mL 삼각플라스크에 토양 5 g을 칭량하여 0.1 N HCl을 25 mL을 넣고 1시간 진탕한 후, No. 40 여과지 (Whatman, Buckinghamshire, UK)로 여과한 후, 그 여액을 ICP-OES (GBC Integra-XMP, Braeside, Australia)로 분석하였다. 전 함량법은 염산과 질산을 3:1 비율로 넣은 왕수 분해법으로 환류냉각장치 (Kjeldatherm) (C. Gerhardt GmbH & Co., Northants, UK)를 이용하여 분해하였다. 반응용기에 토양 3 g을 칭량하여 증류수 0.5~1 mL로 적셔준 후, 염산 21 mL과 질산 7 mL을 주입하여 30°C에서 2시간 침지시킨 후, 서서히 온도를 높여 90°C에서 2시간 가열하고 냉각하여 No. 40 여과지 (Whatman, Buckinghamshire, UK)로 여과한 후, 0.5 M 질산으로 정용하여 ICP-OES (GBC Integra-XMP, Braeside, Australia)를 이용하여 카드뮴과 납의 함량을 분석하였다. 토양 중 pH, 유기물함량, 유효인산, 양이온은 농촌진흥청 토양 및 식물체 분석법 (RDA, 2000)으로 분석하였다.

통계분석 토양 내 카드뮴과 납의 전 함량을 추정하기 위한 모형식을 개발하기 위해 SPSS 프로그램 ver 18.0 (SPSS Inc., Somers, NY, USA)을 이용하였다. 토양 내 카드뮴과 납의 침출성 함량과 전 함량의 상관성 분석은 단순상관분석을 수행하였다. 또한, 토양 중 카드뮴과 납의 침출성 함량 및 토양 화학성을 다중회귀분석의 stepwise 방법을 이용하여 $p \leq 0.05$ 는 영향요인을 진입시키고, $p \geq 0.10$ 은 제거시켜 토양 내 카드뮴과 납의 전 함량 추정 관계식을 산출하였다. 산출된 모형식의 신뢰도를 확인하기 위해, 전 함량 측정값과 모형식에서 얻은 추정값 간의 상관성 분석을 수행하였다.

결과 및 고찰

토양 화학성 및 카드뮴 및 납 함량 89점 폐광산 인근 논 토양 시료의 화학성 및 카드뮴과 납의 함량을 Table 1에 제시하였다. pH 범위는 5.8 (5.2~7.0)로서, 약산성에서 중성의 범위를 보여주었다. 유기물 함량은 5.3~52.0 g kg⁻¹, 유효인산은 4.7~298.9 mg kg⁻¹, 교환성 칼슘, 칼륨, 마그네슘, 나트륨 함량은 평균적으로 0.2~4.2 cmol kg⁻¹의 넓은 범위를 보여주었다. Kim et al. (2010)은 폐광산 인근 논 토양 5지점에서 pH는 5.4~6.0, 유기물 함량은 14.5~42.0 g kg⁻¹, 유효인산은 175.7~436.9 mg kg⁻¹, 교환성 칼슘, 칼륨, 마그네슘, 나트륨 함량은 평균적으로 0.2~3.8 cmol kg⁻¹라 보고하였다. 이러한 광범위한 토양의 화학성은 토양 내 전함량 예측 및 식물 유효도 및 독성연구를 수행하는 데 있어 적절한 결과를 도출해낼 수 있을 것으로 판단된다.

침출성 함량은 카드뮴 0.27 mg kg⁻¹ (0.004~3.11), 납 24.32 mg kg⁻¹ (2.06~242.30)이었고, 전 함량은 카드뮴 3.55 mg kg⁻¹ (0.28~6.81), 납 83.38 mg kg⁻¹ (12.15~570.26)으로 조사되었다. 카드뮴과 납의 평균 전 함량은 현 토양오염 우려기준을 모두 초과하지 않았으나, 최대 함량은 초과하는 것으로 나타났다. 카드뮴과 납의 토양오염 우려기준을 초과한 비율은 각각 30%와 8%로 조사되었으나, 토양오염 대책기준에 비해서는 낮은 함량을 보여주었다. Lee et al. (2010)은 폐광인근 농경지 6지점의 28개 시료에서 측정된 카드뮴

Table 1. Chemical properties and total and extractable contents of Cd and Pb in paddy soil adjacent to abandoned mines.

	pH	EC [†]	OM [‡]	P ₂ O ₅ [§]	Exch. Cation				Cd		Pb	
					Ca	K	Mg	Na	Extractable	Total	Extractable	Total
(n=89)	(1.5)	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹				mg kg ⁻¹			
Mean	5.8	0.3	21.9	65.3	4.2	0.4	1.2	0.2	0.27	3.55	24.32	83.38
Min.	5.2	0.1	5.3	4.7	1.4	0.02	0.3	0.03	0.004	0.28	2.06	12.15
Max.	7.0	1.0	52.0	298.9	18.3	1.3	9.4	0.4	3.11	6.81	242.30	570.26

[†]Electrical conductivity, [‡]Organic matter, [§]Available phosphorus.

과 납의 평균 전 함량 범위가 각각 4.45~6.23 mg kg⁻¹와 25.8~53.6 mg kg⁻¹임을 보고하였는데 본 연구결과와 비교할 때 카드뮴은 유사한 농도 범위였지만, 납의 함량은 본 결과가 다소 높게 검출되는 것으로 나타났다. Kim et al. (2007)은 2000년과 2004년 폐광인근 논 토양 내 침출성 카드뮴과 납의 평균 함량범위를 각각 0.46~0.59 mg kg⁻¹와 14.81~22.61 mg kg⁻¹으로 보고하였는데, 이는 본 연구에서 검출된 평균 함량과 유사한 값이었다.

토양 중 카드뮴과 납의 전 함량 추정 카드뮴 및 납에 대한 전 함량에 유의한 영향을 주는 중금속 침출성 함량 및 토양 화학성을 조사하기 위해 단순회귀분석을 이용한 결과를 Table 2에 제시하였다. 토양 내 카드뮴 전 함량에 영향을 주는 통계적으로 유의한 요인으로서, 침출성 카드뮴, 납,

구리, 아연함량, 그리고 토양화학성인 유기물함량과 나트륨 함량으로 조사되었는데, 이 모든 요인들과의 관련성은 전반적으로 낮게 나타났다. 이 중 침출성 카드뮴 함량은 토양 중 카드뮴 전 함량과는 다소 높은 상관관계를 보여주었지만 ($R^2=0.22$), 그 외 다른 요인들과는 관련성이 거의 없는 것으로 조사되었다. 한편 Jung et al. (2004)은 0.1 N 염산으로 침출할 수 있는 카드뮴 양이 제한적이거나, 토양 내 화학적 결합상태에 기인한 것으로 해석하였다. 또한, 유기물함량 및 교환성 나트륨 함량은 통계적인 유의성은 있었지만 ($p < 0.05$), 관련성이 매우 낮았다.

토양 내 납의 전 함량은 침출성 카드뮴, 납, 구리, 아연 함량, 그리고 전기전도도와 유기물 함량과 통계적으로 유의한 상관성을 보여주었다 ($p < 0.05$, $p < 0.01$). 침출성 카드뮴, 납, 그리고 아연함량이 토양 내 납의 전 함량과 비교적

Table 2. Fitted simple linear regression of total soil contents of Cd and Pb and soil properties, and extractable soil contents of metals in the form of $y = a + bx$.

y	x	a	b	R ²	p-value
Total Cd content in soil	Extractable Cd	3.271	1.054	0.219	< 0.001**
	Extractable Pb	3.319	0.010	0.133	< 0.001**
	Extractable Ni	3.289	0.343	0.031	0.100
	Extractable Cu	3.309	0.030	0.108	0.002**
	Extractable Zn	3.276	0.034	0.102	0.002**
	Extractable As	3.572	-0.005	0.000	0.840
	pH (1:5)	3.848	-0.051	0.000	0.869
	EC (dS m ⁻¹)	3.399	0.565	0.011	0.334
	OM (g kg ⁻¹)	2.951	0.028	0.068	0.014*
	P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	3.512	0.001	0.001	0.750
	Ca (cmol _c kg ⁻¹)	3.386	0.039	0.008	0.391
	Na (cmol _c kg ⁻¹)	2.935	3.184	0.054	0.028*
	K (cmol _c kg ⁻¹)	3.495	0.190	0.002	0.700
	Mg (cmol _c kg ⁻¹)	3.515	0.031	0.001	0.737
Total Pb content in soil	Extractable Cd	48.101	131.930	0.429	< 0.001**
	Extractable Pb	30.956	2.155	0.835	< 0.001**
	Extractable Ni	89.914	-8.483	0.002	0.652
	Extractable Cu	61.548	2.696	0.108	0.002**
	Extractable Zn	36.896	5.670	0.357	< 0.001**
	Extractable As	83.049	0.080	0.000	0.969
	pH (1:5)	-198.206	48.465	0.036	0.077
	EC (dS m ⁻¹)	46.376	136.261	0.078	0.008**
	OM (g kg ⁻¹)	33.875	2.275	0.057	0.024*
	P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	79.556	0.059	0.001	0.740
	Ca (cmol _c kg ⁻¹)	51.184	7.580	0.039	0.062
	Na (cmol _c kg ⁻¹)	49.454	174.739	0.020	0.183
	K (cmol _c kg ⁻¹)	106.444	-52.604	0.034	0.082
	Mg (cmol _c kg ⁻¹)	84.269	-0.735	0.000	0.929

*** Correlation is highly significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

높은 양의 관계를 보여주었고 ($R^2=0.36\sim0.84$), 특히 침출성 납 함량은 회귀계수 0.84로서 가장 높은 관련성이 있는 것으로 조사되었다. 이는 토양 내 침출성 카드뮴, 구리, 납, 그리고 아연 함량이 납의 전 함량과 높은 상관성을 보여주었다는 ($p < 0.05$) Andreu and Gimeno-García (1999)의 연구결과와 유사한 것이었다. 위 결과는 토양 카드뮴과 납의 전 함량에 영향을 주는 요인으로서, 토양 화학성에 비해 토양 내 중금속 침출성 함량 간에 높은 관련성을 보여주는 것으로 조사되었다.

침출성 중금속 함량 및 토양 화학성 요인을 추가시키는 다중회귀분석으로 토양 내 카드뮴과 납의 전 함량과 높은 관련성을 보여주는 모형식을 제시하였다 (Table 3). 토양 내 카드뮴과 납 전 함량에 대해 중금속의 침출성 함량 및 토양 화학성 영향인자의 결합은 단순회귀분석을 이용한 회귀계수에 비해 높아지는 것으로 조사되었다. 그러나, 토양 내 카드뮴과 납 전 함량은 토양 화학성에 비해 중금속 침출성 함량에 의한 영향이 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 이는 단순회귀분석에서 얻은 결과에 따라, 토양 내 카드뮴과 납의 전 함량이 토양 화학성에 비해 각 중금속 침출성 함량과의

관련성이 크게 나타난 것으로 판단된다 (Table 2). 이는 토양 내 침출성 중금속 함량이 카드뮴과 납의 전 함량을 추정하는데 더 강한 영향 요인으로 작용하고 있음을 제시한다. 이와 더불어, 토양 화학성은 높은 관련성은 없었지만, 유기물 함량, 전기전도도, 그리고 교환성 나트륨 함량이 통계적으로 유의한 관계를 보여주고 있기 때문에, 토양 화학성에 의한 토양 내 카드뮴과 납 전 함량에 영향을 줄 가능성이 있음을 시사한다.

폐광인근 토양 화학성 및 침출성 중금속 함량인자들을 결합하여 얻은 토양 내 카드뮴과 납의 전 함량 추정식의 적용 가능성을 검증하였다. 토양 내 카드뮴과 납의 전 함량 추정식은 침출성 중금속 함량 및 토양 화학성 요인을 추가시켜 가장 높은 회귀계수를 얻은 모형식을 적용하여 산정하였다. 토양 내 카드뮴 전 함량 추정식은 $2,702 + 2,079 \text{ extractable Cd} + 3,399 \text{ exchangeable Na} - 0,066 \text{ extractable Zn} + 0,022 \text{ extractable Cu}$ 로 적용하였고, 토양 내 납의 전 함량 추정식은 $13,342 + 1,891 \text{ extractable Pb} + 2,309 \text{ extractable Zn} + 2,309 \text{ extractable Cu}$ 을 적용하여 예측하였다. 이와 같이 추정된 토양 내 카드뮴과 납의 전 함량과 이들의 실측값 간의

Table 3. Summary of multiple regression equation between total soil contents of Cd and Pb and extractable soil contents of metals and soil properties (stepwise regression criteria: probability of F to enter $p \leq 0.05$, probability of F to remove $p \geq 0.10$).

Metals	Equation	R^2	p -value
Total Cd	= 3.271 + 1.054 extractable Cd	0.219	< 0.001
Total Cd	= 2.698 + 1.038 extractable Cd + 2.974 exchangeable Na	0.267	< 0.001
Total Cd	= 2.749 + 2.050 extractable Cd + 3.620 exchangeable Na - 0.055 extractable Zn	0.325	< 0.001
Total Cd	= 2.702 + 2.079 extractable Cd + 3.399 exchangeable Na - 0.066 extractable Zn + 0.022 extractable Cu	0.371	< 0.001
Total Pb	= 30.956 + 2.155 extractable Pb	0.835	< 0.001
Total Pb	= 15.933 + 1.896 extractable Pb + 2.603 extractable Zn	0.898	< 0.001
Total Pb	= 13.342 + 1.891 extractable Pb + 2.309 extractable Zn + 2.309 extractable Cu	0.903	< 0.001

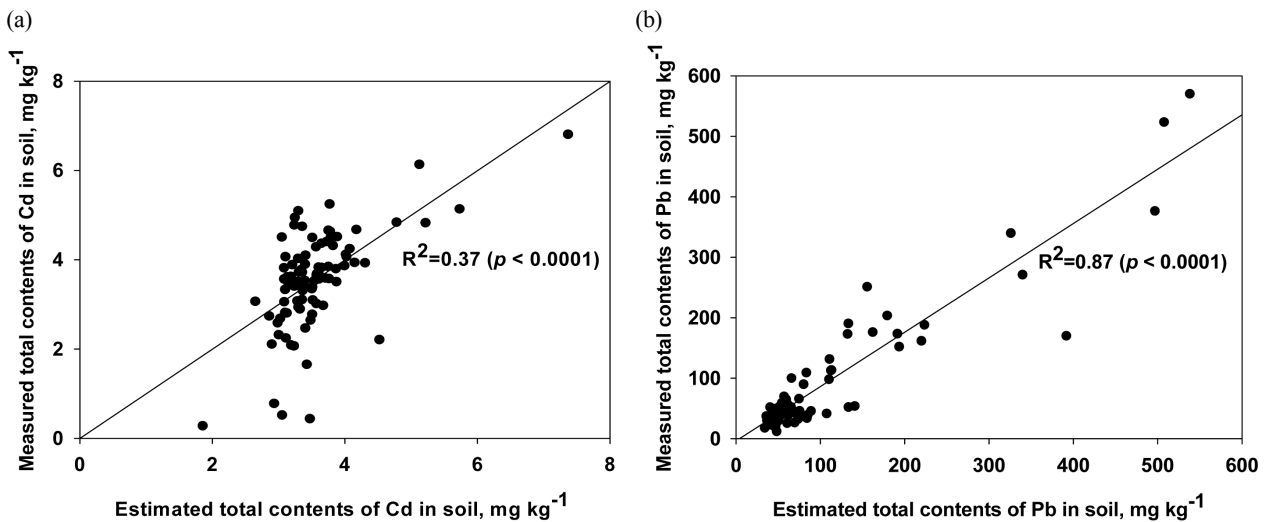


Fig 1. Relationship between estimated and measured contents of total Cd (a) and total Pb (b) in soil.

상관성을 확인하였다 (Fig. 1). 토양 내 납의 전 함량에 대한 이들의 상관성이 카드뮴에 비해 높게 나타났다 ($R^2=0.87$). 침출성 함량으로 전 함량을 추정할 때 납은 높은 관련성을 보여주었고, 이에 반해 카드뮴은 주 영향인자로 작용하지 않았다 (Table 2, 3). 토양 중 납의 전 함량과 0.1 N HCl 침출성 함량 간 상관계수는 0.914로서 통계적으로 유의한 높은 양의 상관관계를 보여주었다 (Han, 2009).

이는 토양 내 카드뮴 전 함량을 추정하는 경우, 침출성 카드뮴 함량 자료는 비교적 적합하지 않는 것으로 증명되었다. 이와 반대로, 납은 토양 전 함량과 침출성 함량간의 높은 관련성을 가지고 있기 때문에, 납의 침출성 함량 자료를 활용한다면 전 함량 예측 기여도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

폐광 인근 논 토양 내 침출성 중금속 함량 및 토양화학성을 결합한 다중회귀분석을 적용한 토양 내 카드뮴과 납의 전 함량을 추정할 수 있는 모형식을 제시하였다. 토양 내 카드뮴과 납의 전 함량을 예측하는 데는 토양 화학성에 비해서 침출성 중금속 함량이 주 영향인자로 작용하는 것으로 증명되었다. 침출성 카드뮴, 아연, 구리, 그리고 교환성 나트륨 함량이 토양 내 카드뮴 전 함량을 추정하는 데 있어 높은 관련성을 가진 주 영향인자로 조사되었다 ($R^2=0.37$, $p < 0.0001$). 또한, 토양 내 납의 전 함량은 침출성 납, 아연, 그리고 구리 함량이 유의한 영향 요인으로 나타났다 ($R^2=0.90$, $p < 0.0001$). 폐광인근 토양 화학성 및 침출성 중금속 함량인자들을 결합하여 얻은 토양 내 납의 전 함량 추정값과 실측값간의 관계는 카드뮴에 비해 통계적인 유의성을 가진 높은 관련성을 보여주었다 ($R^2=0.87$, $p < 0.0001$). 따라서 납, 구리, 및 아연 침출성 함량 자료를 잘 활용한다면 토양 내 납의 전 함량 예측에 대한 기여도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호: PJ0074482011) 및 국립농업과학원 농업과학기술 연구개발사업 (과제번호: PJ0064462011)의 지원에 의해 이루어진 것임.

인 용 문 헌

- Andreu, V., and E. Gimeno-Garcia, 1999. Evolution of heavy metals in marsh areas under rice farming. *Environ. Pollut.* 104:271-282.
- Bachmann, G. 1993. Soil values in German soil protection paper, presented at the conference: "Developing cleanup standards for contaminated soil, sediment and ground water: how clean is clean?" *Wat. Environ. Fed.*, Washington D.C. CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). 2002. Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health.
- Han, H.S. 2009. Correlation between heavy metal contents in paddy soil and rice nearby abandoned smelting factory. Master. Thesis, The University of Seoul, Seoul, Korea.
- Jung, G.B., W.I. Kim, J.S. Lee, J.D. Shin, J.H. Kim, and S.G. Yun. 2005. Availability of heavy metals in soils with different characteristics and controversial points for analytical methods of soil contamination in Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 19(2):128-133.
- Jung, M.C., M.Y. Jung, and Y.W. Choi. 2004. Environmental assessment of heavy metals around abandoned metalliferous mine in Korea. *Econ. Environ. Geol.* 37:21-33.
- Kim, W.I., J.J. Kim, J.H. Yoo, J.Y. Kim, J.H. Lee, M.K. Paik, R.Y. Kim, and G.J. Im. 2010. Arsenic Fractionation and Bioavailability in Paddy Soils Near Closed Mines in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6):917-922.
- Kim, W.I., J.E. Yang, G.B. Jung, B.J. Park, S.W. Park, J.K. Kim, O.K. Kwon, and G.H. Ryu. 2007. Bioavailability and safety issues of heavy metals in paddy soil-rice continuum in Korea. *Food & fertilizer technology center extension bulletin* 597.
- Lee, J.S., Y.N. Kim, and K.H. Kim. 2010. Suitability assessment for agriculture of soils adjacent to abandoned mining areas using different human risk assessment models. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5):552-561.
- Ministry of Environment. 2003. Soil Environmental Conservation Act.
- Oh, C.W., Y.H. Yu, P.K. Lee, and Y.U. Lee. 2003. The controversial points and a remedy on evaluation of heavy metal contamination in standard method for examination of soil in Korea. *J. of KoSSGE.* 6:63-83.
- RDA (Rural Development Administration). National Institute Agricultural Science and Technology. 2000. Analytical method of soil and plant.
- US EPA. 1996. Microwave assisted acid dissolution of sediments, sludges, soils and oils. 2nd ed. US EPA Office of Soil and Water and Emergency Response, Washington, D.C.