

Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2017.50.5.383>

pISSN : 0367-6315 eISSN : 2288-2162

## Assessment of Heavy Metal Concentrations in Greenhouse Soils of Gyeongnam Province

Daniel Son, Hyeon-Ji Cho, Jae-Young Heo, Byeong-Jeong Lee, Kwang-Pyo Hong, and Young Han Lee\*  
Gyeongsangnam-do Agricultural Research and Extension Services, Jinju 52733, Korea

\*Corresponding author: lyh2011@korea.kr

### ABSTRACT

**Received:** September 29, 2017

**Revised:** October 25, 2017

**Accepted:** October 26, 2017

Heavy metal contamination of soil might be a cause of serious concern due to the potential health impacts of consuming contaminated products. In this study, the total content of heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, As, and Hg) in soils was analyzed, and the difference of heavy metal contents depending on crops, soil characteristics, and topography was compared in 169 greenhouse soils obtained from Gyeongnam Province. The concentrations of the heavy metals were 0.25 mg kg<sup>-1</sup> (ranged 0.01~0.44) for Cd, 28.94 (0.53~72.63) mg kg<sup>-1</sup> for Cr, 26.03 (0.5~166.13) mg kg<sup>-1</sup> for Cu, 14.91 (1.27~33.22) mg kg<sup>-1</sup> for Ni, 15.76 (0.43~57.1) mg kg<sup>-1</sup> for Pb, 119.72 (6.33~239.39) mg kg<sup>-1</sup> for Zn, 2.54 (0.01~23.57) mg kg<sup>-1</sup> for As, and 0.049 (0.012~0.253) mg kg<sup>-1</sup> for Hg in topsoils. The concentrations of Pb and As in topsoil were highest in green pepper and those of Cd, Cr, and Ni were highest in melon. In addition, the concentrations of Cr and Ni were highest in diluvial terrace compared with the other topographies. Higher concentrations of Cd, Cr, and Ni were found in silty clay loam and silt loam soils than sandy loam and loam soils.

**Keywords:** Greenhouse soil, Heavy metal, Soil texture, Soil topography

Correlation coefficient between heavy metals and soil organic matter of greenhouse top soils in Gyeongnam Province ( $n=169$ ).

	OM	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg
pH	-0.025	0.068	-0.006	-0.099	-0.054	-0.049	-0.076	0.027	-0.091
OM		0.012	-0.006	0.361***	-0.042	0.190*	0.488***	0.080	0.206***
Cd			0.545***	0.208***	0.550***	0.241***	0.308***	0.278***	0.076
Cr				0.207***	0.713***	0.192*	0.258***	0.230***	0.024
Cu					0.063	0.352***	0.521***	0.185*	0.186*
Ni						0.118	0.228***	0.315***	0.002
Pb							0.353***	0.738***	0.165*
Zn								0.227***	0.313***
As									0.045



## Introduction

최근 농축산물 식품 안전성에 대한 관심의 증가로 생산환경과 생산과정 중 발생하는 오염에 대한 면밀한 조사 또는 검사 요구가 확대되고 있다. 토양을 기반으로 하는 농작물의 경우 토양환경 영향이 지배적이어서, 잔류농약이나 중금속 등 오염원의 철저한 관리가 요구된다. 토양 중금속은 모암으로부터 파생되는 자연적인 유입원 (Baize and Sterckeman, 2001)과 가축분 퇴비 등 산업부산물 (Xue et al., 2003)에 의한 인위적인 오염원이 주요 발생 원인이다. 그리고 농약의 과다사용으로 농경지에서 Cu, As 및 Pb의 축적이 발생되기도 한다 (McLaughlin et al., 2000). 중금속은 토양 중 함량이 과잉되면 작물 생육을 저해할 뿐만 아니라 식물연쇄에 의해 인축에 영향을 미치고 (Gil et al., 2004) 토양에서 탈수소효소 등 미생물 활성을 저해시키며 토양이 지니고 있는 다양한 기능을 저해시키는 요인이 된다 (Deng et al., 2015). 토양에서 Cu, Pb, Zn, As 등의 중금속은 그 함량이 일정 수준 이상으로 축적되면 작물은 생육장애를 일으키고 Cd와 Hg 등은 작물체내에 집적되어 사람과 가축에 간접적인 피해를 유발한다 (Holmgren et al., 1993).

우리나라는 토양오염의 사전예방과 오염된 토양의 개선 등에 관한 종합적인 관리체계를 마련하기 위해 1996년부터 토양환경보전법이 시행되어 2017년 현재에는 농경지의 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr<sup>6+</sup>, Zn, Ni에 대하여 토양오염 기준이 설정되어 있다 (MOE, 2017). 우리나라 일반농경지의 중금속 함량에 대한 연구는 Kim et al. (2008)이 논토양에 대하여 1999년, 2003년, 2007년 중금속 농도 변동을 조사하여 보고한 바 있고, Lee et al. (2012)은 2011년에 경남지역 논토양 260개소를 대상으로 토성 및 지형별 중금속 함량 차이를 비교하여 보고한 바 있다. 그러나 비교적 외부와 차단되어 있는 시설원에 토양에서는 오염원으로부터 노출이 적어 중금속에 관한 조사연구가 많지 않다. 그럼에도 불구하고 시설원에 토양도 지하수와 가축분 퇴비, 농약 등으로 중금속 유입 가능성이 존재한다. 실제 Phonsuwan et al. (2016)은 퇴비 부속도에 따른 시설원에 상추재배 토양의 중금속 집적에 관하여 보고한 바도 있다. 따라서 시설재배지는 유기물 공급원으로 가축분 퇴비에 대한 의존도가 높기 때문에 토양 중금속의 지속적인 조사가 필요하다.

본 연구는 경남지역 시설원에 토양 169개소를 대상으로 2016년에 토양 중금속 전함량분석으로 재배작물, 토성 및 지형별 중금속 함량 차이를 비교하여 토양관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 수행하였다.

## Materials and Methods

시설원예토양 선정 및 시료채취 경남지역 시설원예토양 중금속 전함량을 분석하기 위하여 2016년에 토양 유형, 지형 및 토성과 분포면적 비율을 기준으로 169개 지점을 선정하였다 (RDA, 1983). 토양은 4월부터 5월 사이에 표토는 0~15 cm, 심토는 15~30 cm 깊이에서 1 kg 정도를 3반복으로 채취하였다.

**시료조제 및 중금속 분석** 채취한 토양은 음지에서 7일간 풍건하여 2 mm 체를 통과된 것을 유발에 미세하게 분쇄하여 중금속 분석에 사용하였다. 중금속 분석은 토양오염공정시험기준 (MOE, 2016)에 의거하여 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, As, Cr은 전함량 분석으로 풍건토양 3 g을 진한 염산 (hydrochloric acid, HCl, 36.46)과 진한 질산 (nitric acid, HNO<sub>3</sub>, 63.01)을 3:1 비율로 혼합한 왕수로 추출하여 ICP (Optima 5300 DV, PerkinElmer co., Shelton, USA)로 분석하였다. Hg는 토양 시료 0.2 g을 취하여 Hg analyzer (DMA-80, Milestone)를 이용해 분석하였다.

**통계분석 및 상관계수 분석** 분석된 토양 중금속 함량의 통계적 분석 및 상관계수 분석은 SAS 프로그램 9.2

버전 (2008)을 사용하였다. 재배작물과 지형, 토성 및 배수등급에 따른 토양 중금속 함량은 5% 수준에서 Tukey's studentized range test를 하였으며 토양 중금속 함량과 유기물과의 상관관계 분석을 하였다.

## Results and Discussion

**재배작물별 시설토양 중금속 함량** 2016년도 경남지역 시설토양의 재배작물별 중금속 함량은 Table 1과 같다. 토양 Cd 함량은 표토에서 평균  $0.25 \text{ mg kg}^{-1}$ , 심토에서 평균  $0.26 \text{ mg kg}^{-1}$ 이었다. 이는 Jung et al. (1997)이 1996년 전국 시설재배지를 대상으로 0.1 N HCl로 추출하여 조사한 바와 유사하게 나타났다. 재배작물에 따라 Cd 평균 함량은 멜론 재배지 표토와 심토 모두  $0.29 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로서 당근, 토마토 재배지  $0.24 \text{ mg kg}^{-1}$  보다 높았다 ( $p < 0.05$ ). 경남 시설토양의 Cr 함량은 표토에서 평균  $28.94 \text{ mg kg}^{-1}$ , 심토에서 평균  $29.22 \text{ mg kg}^{-1}$ 이었다. Cr 평균 함량은 표토에서는 멜론 재배지가  $36.11 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로서 가장 높았고, 딸기 재배지가  $0.24 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 낮았으며, 심토에서도 비슷한 양상을 보였으나 호박과 수박 재배지에서  $33.95 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $33.34 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 높은 경향을 보였다 ( $p < 0.05$ ). 그리고 Cu

**Table 1.** Heavy metal concentrations in greenhouse soils by crops in Gyeongnam Province.

Depth	Crop (site)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg
		----- $\text{mg kg}^{-1}$ -----							
Top	Geen pepper (28)	0.25ab <sup>†</sup>	28.92abc	31.53a	14.32bc	24.05a	128.63ab	5.29a	0.048a
	Carrot (10)	0.24b	28.62abc	16.52b	16.31bc	14.02b	97.44b	2.42b	0.034a
	Strawberry (43)	0.25ab	24.22c	23.21ab	12.78c	12.30b	108.37ab	2.11b	0.059a
	Melon (7)	0.29a	36.11a	19.63ab	22.06a	15.55b	109.49ab	3.51ab	0.056a
	Lettuce (10)	0.26ab	32.94abc	29.57a	13.43bc	14.69b	123.79ab	0.96b	0.044a
	Watermelon (34)	0.25ab	31.88abc	24.4ab	15.62bc	13.92b	121.57ab	1.71b	0.045a
	Tomato (22)	0.24b	25.96bc	27.75ab	14.61bc	16.10b	132.78a	1.78b	0.045a
	Squash (15)	0.27ab	34.49ab	31.93a	17.62b	15.86b	129.14ab	2.34b	0.045a
	Mean	0.25	28.94	26.03	14.91	15.76	119.72	2.54	0.049
	Min.	0.01	0.53	0.5	1.27	0.43	6.33	0.01	0.012
	Max.	0.44	72.63	166.13	33.22	57.1	239.39	23.57	0.253
Sub	Geen pepper	0.26ab	30.13ab	22.49ab	14.83bc	24.65a	115.58ab	5.76a	0.048ab
	Carrot	0.24b	29.12ab	14.03bc	16.33bc	14.4b	89.83b	2.30b	0.036b
	Strawberry	0.25ab	23.91b	21.23abc	12.65c	12.27b	101.22ab	2.24b	0.058ab
	Melon	0.29a	35.39a	16.79bc	22.01a	15.28b	94.96b	3.62ab	0.067a
	Lettuce	0.27ab	30.48ab	20.23abc	12.69c	14.5b	93.23b	1.07b	0.044ab
	Watermelon	0.27ab	33.34a	21.68abc	16.82bc	13.99b	109.96ab	1.88b	0.040ab
	Tomato	0.24ab	26.4ab	25.13a	14.54bc	15.44b	116.70ab	1.86b	0.042ab
	Squash	0.27ab	33.95a	27.95a	17.81b	16.77b	127.44a	2.21b	0.047ab
	Mean	0.26	29.22	21.97	15.16	15.86	108.29	2.69	0.048
	Min.	0.01	0.55	0.75	5.07	0.85	7.95	0.01	0.012
	Max.	0.5	65.46	75.35	39.13	57.63	224.13	22.11	0.282
Concern level		4	-	150	100	200	300	25	4

<sup>†</sup>Means by the same letter within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

함량은 표토에서 평균 26.03 mg kg<sup>-1</sup>으로 평균 21.97 mg kg<sup>-1</sup>인 심토의 분석치보다 높았다. 이러한 결과는 표토에서 가축분 퇴비가 심토에 비해 상대적으로 많이 사용된 결과로 판단된다 (Kang et al., 2013). 실제로 축분 퇴비와 액비의 연속 사용으로 토양과 식물체의 Cu와 Zn의 함량이 증가되는 결과가 보고되어 왔다 (Lim et al., 2004; Lloveras et al., 2004; Moreno-Caselles et al., 2005). 작물별로 Cu 평균 함량은 표토에서 호박, 고추, 상추 재배지 순으로 31.93 mg kg<sup>-1</sup>, 31.53 mg kg<sup>-1</sup>, 29.57 mg kg<sup>-1</sup>의 수치를 나타내었고 당근 재배지가 16.52 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 낮았다. 심토는 호박과 토마토 재배지에서 27.95 mg kg<sup>-1</sup>, 25.13 mg kg<sup>-1</sup>으로서 가장 높았고, 당근과 멜론 재배지가 14.03 mg kg<sup>-1</sup>, 16.79 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 낮았다 ( $p < 0.05$ ). 경남 시설토양의 Ni 함량은 표토에서 평균 14.91 mg kg<sup>-1</sup>, 심토에서 평균 15.16 mg kg<sup>-1</sup>이었다. Ni 평균 함량은 멜론 재배지가 표토와 심토 모두 22.06 mg kg<sup>-1</sup>, 22.01 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 높았고, 가장 낮은 수치는 표토에서 딸기 재배지가 12.78 mg kg<sup>-1</sup>, 심토는 딸기와 상추 재배지에서 12.65 mg kg<sup>-1</sup>, 12.69 mg kg<sup>-1</sup>이었다 ( $p < 0.05$ ). 그리고 Pb의 경우에 표토가 평균 15.76 mg kg<sup>-1</sup>, 심토는 평균 15.86 mg kg<sup>-1</sup>이었으며 고추 재배지는 표토가 24.05 mg kg<sup>-1</sup>, 심토가 24.64 mg kg<sup>-1</sup>으로 다른 작물들 보다 높게 나타났다 ( $p < 0.05$ ). 이러한 결과는 Jung et al. (1997)이 1996년에 전국 시설재배지의 토양을 0.1 N HCl로 추출하여 조사한 결과와 유사하였다. 시설 토양의 Zn 함량은 다른 중금속 함량과 유사한 결과로 표토가 평균 119.72 mg kg<sup>-1</sup>로 심토의 평균 108.29 mg kg<sup>-1</sup> 보다 높았다. 시설 토양의 Zn 평균 함량은 표토에서 토마토 재배지가 132.78 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 높았고, 당근 재배지는 97.44 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 낮았으며 심토에서는 호박 재배지가 127.44 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 높았다 ( $p < 0.05$ ). 그리고 As의 경우 표토에서 평균 2.54 mg kg<sup>-1</sup>이었으며, 심토는 평균 2.69 mg kg<sup>-1</sup>이었다. 고추 재배지 토양의 As 함량은 표토가 5.29 mg kg<sup>-1</sup>이었고 심토는 5.76 mg kg<sup>-1</sup>으로 다른 작물 보다 높게 나타났다 ( $p < 0.05$ ). 시설 토양의 Hg 함량은 표토가 평균은 0.049 mg kg<sup>-1</sup>로 재배작물간의 차이가 없었고 심토는 평균 0.048 mg kg<sup>-1</sup>으로 멜론 재배지에서 0.067 mg kg<sup>-1</sup>로 가장 높게 나타났고 당근 재배지에서 0.036 mg kg<sup>-1</sup>으로 가장 낮았다.

**지형별 시설토양 중금속 함량** 경남지역 시설재배 토양의 지형별 중금속 함량은 Table 2와 같다. 관수가 용이하고 시설을 설치하기 위해 넓고 평평한 지형이 선호되는 시설재배 특성상 하성평탄지가 가장 많았다. 표토에서 중금

**Table 2.** Heavy metal concentrations in greenhouse soils by soil topography in Gyeongnam Province.

Depth	Topography (site)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg
----- mg kg <sup>-1</sup> -----									
Top	Alluvial plain (124)	0.25a <sup>†</sup>	29.40a	24.60a	15.04a	14.77a	119.29a	2.01a	0.049a
	Diluvial terrace (3)	0.28a	37.52a	23.21a	19.63a	12.61a	128.84a	3.07a	0.041a
	Fluvio-marine plain (4)	0.26a	29.71a	24.51a	15.43a	15.88a	135.76a	2.10a	0.035a
	Mountain foot slope (7)	0.28a	33.88a	28.40a	16.00a	19.86a	133.31a	2.47a	0.042a
	Valley & fan (31)	0.23a	25.10a	31.65a	13.61a	19.11a	115.38a	4.68a	0.05a
Sub	Alluvial plain	0.26a	29.57ab	21.57a	15.34ab	14.88a	108.43a	2.09a	0.049a
	Diluvial terrace	0.32a	40.36a	18.56a	20.95a	12.91a	107.82a	3.49a	0.037a
	Fluvio-marine plain	0.27a	29.82ab	21.87a	16.11ab	16.43a	117.23a	2.2a	0.029a
	Mountain foot slope	0.29a	32.45ab	24.10a	15.10ab	18.75a	113.50a	2.64a	0.044a
	Valley & fan	0.25a	25.96b	23.41a	13.77b	19.37a	105.45a	5.09a	0.047a
Concern level		4	-	150	100	200	300	25	4

<sup>†</sup>Means by the same letter within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

속 함량은 지형별로 차이가 없었으며 심토는 토양 Cr과 Ni 함량이 차이가 나타났다. 심토에서 홍적대지는 Cr 함량이  $40.36 \text{ mg kg}^{-1}$ , Ni 함량은  $20.95 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났고, 곡간 및 선상지에서 각각  $25.96 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $13.77 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 낮았다. 이러한 결과는 Lee et al. (2012)이 2011년에 경남지역 지형별 논토양 중금속의 함량과는 다르게 나타났다. Lee et al. (2012)은 논토양의 중금속 함량은 강우나 평탄화를 위한 경운배수를 통해서 용탈 및 운반으로 하해환경 평탄지가 상대적으로 높다고 하였으나 시설재배지는 강우에 차단되기 때문에 지형에 따른 중금속 함량 차이가 없는 것으로 판단된다.

**토성 및 배수등급별 시설토양 중금속 함량** 토성별 경남지역의 시설재배 토양 중금속 평균함량은 Table 3과 같다. 경남지역 시설재배지 토양의 Cd 함량은 표토에서 가장 높은 토성은 미사질식양토가  $0.29 \text{ mg kg}^{-1}$ 이었고, 심토에서는 미사질식양토와 미사질양토가  $0.31 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $0.28 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 높았다. 시설토양의 Cr 함량도 Cd와 비슷한 유형을 보였으며 표토에서 가장 높은 토성은 미사질식양토로서  $34.15 \text{ mg kg}^{-1}$ 가 검출되었고 심토에서는 미사질식양토와 미사질양토가 각각  $33.31 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $31.98 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 가장 높았다. 그리고 Ni 함량은 표토에서 미사질식양토와 미사질양토에서 각각  $18.63 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $16.50 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 높았고, 심토에서도 미사질식양토에서  $18.86 \text{ mg kg}^{-1}$ , 미사질양토에서  $16.95 \text{ mg kg}^{-1}$ 로 가장 높았다. 일반적으로 경남지역 시설토양의 Cd, Cr, Ni 함량은 사질토양 보다 점질 함량이 많은 토양에서 높은 경향을 보였다 (Holmgren et al., 1993; Jung et al., 1996; Kim et al., 2008). 그 이외 Cu, Pb, Zn, As, Hg 함량은 표토와 심토에서 토성별 차이는 보이지 않았다.

**Table 3.** Heavy metal concentrations in greenhouse soils by soil texture in Gyeongnam Province.

Depth	Soil texture (site)	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Hg
----- mg kg <sup>-1</sup> -----									
Top	Sandy loam (29)	0.22b <sup>†</sup>	28.32ab	24.11a	12.49b	16.47a	116.53a	2.30a	0.047a
	Loam (40)	0.23b	23.09b	25.16a	12.41b	15.67a	112.8a	2.59a	0.048a
	Silt loam (95)	0.26ab	31.33ab	27.19a	16.50a	15.32a	124.41a	2.56a	0.050a
	Silty clay loam (5)	0.29a	34.15a	21.89a	18.63a	20.72a	104.42a	3.25a	0.033a
Sub	Sandy loam	0.23b	27.63ab	21.34a	12.49b	16.50a	105.09a	2.54a	0.046a
	Loam	0.23b	23.31b	21.56a	12.38b	16.20a	104.21a	2.90a	0.048a
	Silt loam	0.28a	31.98a	22.47a	16.95a	15.57a	111.63a	2.62a	0.050a
	Silty clay loam	0.31a	33.31a	19.22a	18.86a	14.87a	96.10a	3.27a	0.030a
Concern level		4	-	150	100	200	300	25	4

<sup>†</sup>Means by the same letter within a column are not significantly different at 0.05 probability level according to Tukey's studentized range test.

경남 시설재배지 토양 배수등급별 중금속 평균함량은 Table 4와 같다. 시설재배는 지형과 마찬가지로 관수와 배수가 양호한 곳이 작물 생육에 유리하다. 경남지역 시설재배지 조사지점의 배수등급은 Hyun et al. (2011)이 시설오이 재배의 경우 배수등급이 약간 양호 내지 약간 불량인 토양이 좋다고 보고한 결과와 유사한 분포를 나타냈다. 그러나 시설토양의 배수등급에 따른 표토와 심토의 중금속 함량은 차이가 없는 것으로 나타났다.



## Conclusions

경남지역 시설재배 토양의 중금속 함량에 대한 기초 자료를 제공하고자 169지점을 대상으로 2016년에 Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, As 및 Hg의 전함량을 분석하였다. 시설재배 토양의 중금속 평균 함량은 Cd 0.25 (0.01-0.44) mg kg<sup>-1</sup>, Cr 28.94 (0.53-72.63) mg kg<sup>-1</sup>, Cu 26.03 (0.5-166.13) mg kg<sup>-1</sup>, Ni 14.91 (1.27-33.22) mg kg<sup>-1</sup>, Pb 15.76 (0.43-57.1) mg kg<sup>-1</sup>, Zn 119.72 (6.33-239.39) mg kg<sup>-1</sup>, As 2.54 (0.01-23.57) mg kg<sup>-1</sup>, Hg 0.049 (0.012-0.253) mg kg<sup>-1</sup>이었다. 시설재배 표토에서 고추 재배지의 경우 Pb와 As 함량이 다른 작물 재배지에 비해 높았고 수박 재배지는 Cd, Cr, Ni 함량이 높았다. 시설재배 토양의 Cr과 Ni 함량은 홍적대지 심토에서 가장 높았다. 그리고 Cd, Cr, Ni 함량은 미사질식양토와 미사질양토에서 사양토와 양토보다 높은 경향이었다. 지속가능한 토양환경을 관리하고 안전한 농산물을 생산하기 위해서는 시설재배 토양의 중금속에 대한 면밀한 조사와 관리가 요구된다.

## Acknowledgement

This study was conducted with the support of the Research Cooperating Program for Agricultural Science & Technology Development (Project No. PJ012505212017), RDA, Republic of Korea.

## References

- Baize, D. and T. Sterckeman. 2001. Of the necessity of knowledge of the natural pedo-geochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements. *Sci. Total Environ.* 264(1-2):127-139.
- Deng, L., G. Zeng, C. Fan, L. Lu, X. Chen, M. Chen, H. Wu, X. He, and Y. He. 2015. Response of rhizosphere microbial community structure and diversity to heavy metal co-pollution in arable soil. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 99:8259-8269.
- Gil, C., R. Boluda, and J. Ramos. 2004. Determination and evaluation of cadmium, lead and nickel in greenhouse soils of Almeria (Spain). *Chemosphere* 55:1027-1034.
- Holmgren, G.G.S., M.W. Meyer, R.L. Chaney, and R.B. Daniels. 1993. Cadmium, lead, zinc, copper, and nickel in agricultural soils of the United States of America. *J. Environ. Qual.* 22:335-348.
- Hyun, B.K., S.J. Jung, Y.J. Jung, J.Y. Lee, J.K. Lee, B.C. Jang, and N.D. Chio. 2011. Soil management techniques for high quality cucumber cultivation in plastic film greenhouse. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44:(5)717-721.
- Jung, G.B., B.Y. Kim, K.H. So, J.S. Lee, B.Y. Yeon, and Y.K. Chung. 1996. Content of heavy metal in paddy soil and brown rice under long-term fertilization. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 29:150-157.
- Jung, G.B., K.Y. Jung, G.H. Cho, B.G. Jung, and K.S. Kim. 1997. Heavy metal contents in soils and vegetables in the plastic film house. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 30(2):152-160.
- Kang, S.S., A.S. Roh, S.C. Choi, Y.S. Kim, H.J. Kim, M.T. Choi, B.G. Ahn, H.K. Kim, S.J. Park, Y.H. Lee, S.H. Yang, J.S. Ryu, Y.G. Sohn, M.S. Kim, M.S. Kong, C.H. Lee, D.B. Lee, and Y.H. Kim. 2013. Status and change in chemical properties of polytunnel soil in Korea from 2000 to 2012. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 46(6):641-646.
- Kim, W.I., M.S. Kim, K.A. Roh, J.S. Lee, S.G. Yun, B.J. Park, G.B. Jung, C.S. Kang, K.R. Cho, M.S. Ahn, S.C. Choi, H.J. Kim, Y.S. Kim, Y.K. Nam, M.T. Choi, Y.H. Moon, B.K. Ahn, H.K. Kim, H.W. Kim, Y.J. Seo, J.S. Kim, Y.J. Choi, Y.H. Lee, S.C. Lee, and J.J. Hwang. 2008. Long-term monitoring of heavy metal contents in paddy soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41:190-198.

- Lee, Y.H., Y.K. Sonn, and Y.S. Ok. 2012. Investigation of heavy metal concentrations in paddy soils of Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 45:399-403.
- Lim, D.K., S.B. Lee, S.I. Kwon, S.H. Lee, K.H. So, K.S. Sung, and M.H. Koh. 2004. Effect of pharmaceutical byproduct and cosmetic industry waste water sludge as raw materials of compost on damage of red pepper cultivation. *Korean J. Environ. Agric.* 23:211-219.
- Lloveras, J., M. Aran, P. Villar, A. Ballesta, and A. Arcaya. 2004. Effect of swine slurry on alfalfa production and on tissue and soil nutrient concentration. *Agron. J.* 96:986-991.
- McLaughlin, M.J., R.E. Hamon, R.B. Mc Laren, T.W. Speir, and S.L. Rogers. 2000. Effect of chloride in soil solution on the plant availability of biosolid-borne cadmium. *Aust. J. Soil Res.* 38:1037-1086.
- MOE (Minister of Environment). 2016. Standard test method for soil pollution. Gwacheon, Korea.
- MOE (Minister of Environment). 2017. Standard test method for soil pollution. Gwacheon, Korea.
- Moreno-Caselles, J., R. Moral, M.D. Perez-Murcia, A. Perez-Espinosa, C. Paredes, and E. Agullo. 2005. Fe, Cu, Mn, and Zn input and availability in calcareous soils amended with the solid phase pig slurry. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36:525-534.
- Phonsuwan M., M.H. Lee, B.E. Moon, Y.B. Kim, N. Kaewjampa, Y.C. Yoon, and H.T. Kim. 2016. Effect of immature compost on available nutrient capability and heavy metal accumulation in soil for lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation. *Protected Horticulture and Plant Factory.* 25(4):343-350.
- RDA (Rural development administration). 1983. Soil in Korea. RDA, Suwon, Korea.
- SAS Institute. 2006. SAS Version 9.1.3. SAS Inst., Cary, NC.
- Xue, H., P.H. Nhat, R. Gachter, and P.S. Hooda. 2003. The transport of Cu and Zn from agricultural soils to surface water in a small catchment. *Adv. Environ. Res.* 8(1):69-76.