ISSN 0367-6315
Korean J. Soil Sci. Fert. 45(3), 399-403 (2012)
http://dx.doi.org/10.7745/KJSSF.2012.45.3.399

보문

경남지역 논토양의 중금속함량 조사

이영한† · 손연규[1]† · 옥용식[2]*

경상남도농업기술원, [1]국립농업과학원, [2]강원대학교

Investigation of Heavy Metal Concentrations in Paddy Soils of Gyeongnam Province

Young-Han Lee†, Yeon Kyu Sonn[1]†, and Yong Sik Ok[2]*

Gyeongsangnam-do Agricultural Research and Extension Services, Jinju 660-3703, Republic of Korea.
[1]National Academy of Agricultural Science, RDA, Suin-ro 150, Gwonseon-gu, Suwon 441-707, Republic of Korea.
[2]Biochar Research Center, Department of Biological Environment, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Republic of Korea.

The management of heavy metals in soil is important for environmental-friendly agriculture and keeping an ecosystem healthy. In this study, we examined the concentrations of heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, and As) in 260 paddy soils sampled from Gyeongnam Province. The concentrations of the heavy metals were 0.143 mg kg^{-1} (ranged 0.003-0.537) for Cd, 0.322 (0.002-0.986) mg kg^{-1} for Cr, 25.41 (6.03-76.19) mg kg^{-1} for Cu, 16.36 (2.63-32.94) mg kg^{-1} for Ni, 18.67 (4.16-87.02) mg kg^{-1} for Pb, 71.76 (22.99-153.58) mg kg^{-1} for Zn, and 3.516 (0.002-19.481) mg kg^{-1} for As, respectively. In addition, the concentration of Cd was highest in mountain foot-slope, Ni and As were highest in diluvial terrace, and Zn was highest in marine plains. Higher concentrations of Cd, Cu, and Zn were found in silty clay loam soils compared to silt loam, sandy loam, and loam soils.

Key words: Paddy soil, Heavy metal, Soil texture, Soil topography

서 언

중금속 오염은 농업, 광산업, 건설과 산업화 과정 등 주로 인간의 활동에 의해 발생된다 (Singh et al., 2004; Yap et al., 2009). 환경 내에서 중금속 오염은 중금속의 농도, 상호작용, 토양환경과 작물과의 관계 등 많은 요인과 관련이 있으며 (Xia and Mu, 1984; Petruzzelli, 1989) 식물, 동물 뿐만 아니라 인류에게도 많은 독성을 유발한다 (Sharma et al., 2005). 주로 우리나라의 일반적인 논토양은 중금속이 포함된 부산물비료나 산업폐기물의 과다시용과 금속광산 주변의 오염물질의 유입 및 매연, 먼지, 하수, 폐수 등의 오염물질 등으로 발생된다 (Jung et al., 2001; Jung et al., 2005; Kim et al., 2003; Lee et al., 2010). 토양에서 Cu, Pb, Zn, As 등의 중금속은 일정 수준 이상으로 축적되면 작물이 생육장애를 일으키거나 고사하며 Cd와 Hg 등은 작물에 집적되어 사람과 가축에 간접적인 피해를 유발한다 (Holmgren et al., 1993; Kim, 1996; Vulava et al., 1997). Andreu and Gimeno-Garcia (1999)는 논토양에서 Cd, Cu 및 Pb는 표토에서 높은 반면 Ni은 심토에서 높았다고 하였다. McLaughlin et al. (2000)은 호주와 뉴질랜드에서 농약의 과다시용으로 농경지에서 Cu, As 및 Pb의 축적을 보고하였으며 Yab et al. (2009)은 벼 식물체 부위에 따라 Cr과 Cu는 뿌리, Zn은 잎, Cd은 줄기에서 많이 축적되는 것으로 보고하였다. 우리나라는 논토양의 가용성 중금속 함량에 대하여 1999년 이후 As, Ni 및 Zn 함량은 증가된 반면 Cd와 Cu 함량은 다소 감소하는 경향이었다 (Kim et al., 2008). 경남지역은 논토양의 장기적인 변동조사 결과 Cd, Ni 및 Zn 함량은 1999년 이후 유의적으로 증가한 반면, Cr, Cu 및 As 함량은 유의적으로 감소하였고 Pb 함량은 큰 변화가 없었다 (Lee et al., 2010). 그러나 이러한 결과는 가용성 중금속 함량에 대한 결과이며 실제적인 환경부에서 적용하는 토양오염공정시험기준에 부합된 중금속 전함량에 대한 조사결과는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구는 경남지역 논토양 260개소를 대상으로 2011년에 토양 중금속 전함량을 분석하여 주성분 분석에 의

접수 : 2012. 5. 16 수리 : 2012. 6. 4
*연락저자 : Phone: +82332506443
E-mail: soilok@kangwon.ac.kr
†공동 제1저자

한 토성 및 지형별 중금속 함량의 차이를 비교하여 토양관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

논토양 선정 및 시료채취 경남지역 논토양 중금속 전함량을 분석하기 위하여 2011년에 토양 유형, 지형 및 토성과 분포면적 비율을 기준으로 260개 지점을 선정하였다 (RDA, 1983). 토양은 비료를 시용하기 전인 3월부터 4월 사이에 표토 0–15 cm 깊이에서 500 g 정도를 3반복으로 채취하였다.

시료조제 및 중금속 분석 채취한 토양은 실험실에서 7일간 풍건하여 2 mm 체를 통과된 것을 유발에 미세하게 분쇄하여 중금속 분석에 사용하였다. 중금속 분석은 토양오염공정시험기준 (MOE, 2009)에 의거 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn 및 As는 전함량 분석으로 왕수로 추출하였고 Cr은 0.1N HCl로 추출하여 ICP (Optima 5300 DV, PerkinElmer co., Shelton, USA)로 분석하였다.

다변량 주성분 분석 및 통계분석 분석된 토양 중금속 함량은 SAS 프로그램 9.1.3 버젼 (2006)을 사용하였다. 지형 및 토성별 토양 중금속 함량은 5% 수준에서 Tukey's studentized range test를 하였다. 또한, 토양 중금속 함량은 주성분 분석을 통하여 지형 및 토성에 따른 차이를 비교검토하였다.

결과 및 고찰

지형별 논토양 중금속 함량 2011년도 경남지역 논토양의 지형별 중금속 함량은 Table 1과 같다. 토양 Cd 함량은 평균 0.143 mg kg^{-1}으로서 Lee et al. (2010)이 보고한 0.1 N HCl 가용성 평균 함량인 0.133 mg kg^{-1}과 차이가 없었다. 지형에 따라 Cd 평균 함량은 산록경사지가 0.220 mg kg^{-1}으로서 하성평탄지 0.116 mg kg^{-1}, 하해혼성평탄지 0.100 mg kg^{-1} 보다 높았다 ($p < 0.05$). Kim et al. (2008)은 2007년 전국 논토양 0.1 N HCl 가용성 Cd 함량이 0.08 mg kg^{-1} 로서 1999년 0.11 mg kg^{-1} 에 비해 감소되는 경향이라고 하였으며 경남지역의 Cd 함량은 이러한 결과보다 높은 경향이었다. 경남 논토양의 0.1 N HCl 가용성 평균Cr 함량은 2011년 0.322 mg kg^{-1}으로 1999년 0.652 mg kg^{-1}, 2003년 0.218 mg kg^{-1} 및 2007년 0.318 mg kg^{-1}과 큰 차이가 없었으며 (Lee et al., 2010) 지형적으로도 유의적인 차이가 없었다. 경남 논토양의 Cu 함량은 25.41 mg kg^{-1}으로 0.1 N HCl 가용성 함량인 1999년 4.32 mg kg^{-1}, 2003년 4.11 mg kg^{-1} 및 2007년 1.25 mg kg^{-1}보다 6–20배 높은 것으로 나타났다 (Lee et al., 2010). 그리고 해안평탄지의 Cu 함량은 32.37 mg kg^{-1}으로 하해혼성평탄지 16.61 mg kg^{-1} 보다 높았으며 ($p < 0.05$) 다른 지형과는 유의적인 차이가 없었다. 경남 논토양의 Ni 함량은 16.36 mg kg^{-1}으로 0.1 N HCl 가용성 함량인 1999년 0.685 mg kg^{-1}, 2003년 0.689 mg kg^{-1} 및 2007년 1.269 mg kg^{-1} 보다 13–24배 높은 것으로 나타났다 (Lee et al., 2010). 그리고 홍적대지의 Ni 함량은 21.87 mg kg^{-1}으로 해안평탄지 13.94 mg kg^{-1} 및 곡간 및 선상지 15.72 mg kg^{-1} 보다 높았다 ($p < 0.05$). 경남 논토양의 Pb 함량은 18.67 mg kg^{-1}으로 0.1 N HCl 가용성 함량인 1999년 9.2 mg kg^{-1}, 2003년 5.4 mg kg^{-1}, 2007년 9.1 mg kg^{-1} 보다 2–3배 높은 것으로 나타났다 (Lee et al., 2010). 경남 논토양의 Zn 함량은 71.76 mg kg^{-1}으로 0.1 N HCl 가용성 함량인 1999년 6.1 mg kg^{-1}, 2003년 5.9 mg kg^{-1},

Table 1. Heavy metal contents of paddy soils by soil topography in Gyeongnam Province.

Topography	Cd	Cr†	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Sample
	mg kg^{-1}							
Fan & valley	0.150ab‡	0.299a	26.29ab	15.72b	19.90a	71.20b	3.440ab	132
Mountain foot-slope	0.220a	0.376a	23.12ab	19.13ab	19.70a	61.84bc	5.978a	9
Alluvial plains	0.116b	0.351a	23.83ab	16.46ab	16.26a	70.97b	2.973b	88
Fluvio-marine plains	0.100b	0.251a	16.61b	19.31ab	13.73a	45.46c	2.666b	4
Marine plains	0.184ab	0.306a	32.37a	13.94b	21.78a	95.60a	3.781ab	14
Diluvial terrace	0.179ab	0.354a	23.87ab	21.87a	20.00a	72.14b	6.243a	13
Minimum	0.003	0.002	6.03	2.63	4.16	22.99	0.002	
Maximum	0.537	0.986	76.19	32.94	87.02	153.58	19.481	
Average	0.143	0.322	25.41	16.36	18.67	71.76	3.516	
Critical level	4.0	5.0	150	100	200	300	25	

†Extract 0.1N HCl.

‡Values within a column followed by the same letter are not significantly different at 5% level by Tukey's studentized range test.

2007년 8.8 mg kg^{-1} 보다 8-12배 높은 것으로 나타났다 (Lee et al., 2010). 그리고 해안평탄지의 Zn 함량은 95.60 mg kg^{-1}으로 하해혼성평탄지 45.46 mg kg^{-1}, 산록경사지 61.84 mg kg^{-1}, 하성평탄지 70.97 mg kg^{-1}, 곡간 및 선상지 71.20 mg kg^{-1}, 및 홍적대지 72.14 mg kg^{-1} 보다 유의적으로 높았다 ($p < 0.05$). 경남 논토양의 As 함량은 3.516 mg kg^{-1}으로 1N HCl 가용성 함량인 1999년 0.283 mg kg^{-1}, 2003년 0.579 mg kg^{-1} 및 2007년 0.192 mg kg^{-1}을 보다 6-18배 높은 것으로 나타났다 (Lee et al., 2010). 그리고 홍적대지의 As 함량은 6.243 mg kg^{-1}으로 하해혼성평탄지 2.666 mg kg^{-1} 및 하성평탄지 2.973 mg kg^{-1} 보다 유의적으로 높았다 ($p < 0.05$). 토양 중금속 함량은 토양 pH와 밀접한 관계가 있으며 산성토양에서는 토양 중금속이 유효태로 전환되어 식물체 내부로 흡수가 증가된다 (Nicholson et al., 1997; Page et al., 1981). Lee et al. (1984)은 논에서 소석회를 시용하여 Cd와 Pb의 흡수를 경감시킨다고 하였다. 따라서 경남 논토양에서 산록경사지나 해안평탄지 등에서 쌀의 중금속 함량을 경감시킬 수 있는 화학적인 방법으로 석회 시용이 필요할 것으로 판단된다.

논토양 토성별 중금속 함량 토성별 경남지역의 논토양 중금속 평균함량은 Table 2와 같다. 경남지역 논토양의 Cd, Cu 및 Zn 함량은 미사질식양토에서 각각 0.198 mg kg^{-1}, 31.51 mg kg^{-1} 및 88.19 mg kg^{-1}으로 미사질양토 0.144 mg kg^{-1}, 25.10 mg kg^{-1} 및 71.27 mg kg^{-1}, 사양토 0.100 mg kg^{-1}, 23.16 mg kg^{-1} 및 66.48 mg kg^{-1}, 그리고 양토 0.145 mg kg^{-1}, 25.30 mg kg^{-1} 및 70.94 mg kg^{-1}보다 유의적으로 높았다 ($p < 0.05$). 그리고 경남 논토양의 Ni 함량은 미사질식양토가 17.96 mg kg^{-1}, 미사질양토에서 18.06 mg kg^{-1}으로 사양토 14.86 mg kg^{-1} 및 양토 14.62 mg kg^{-1} 보다 유의적으로 높았다 ($p < 0.05$). 경남 논토양의 Pb 함량은 미사질식양토에서 21.77 mg kg^{-1}, 미사질양토가 19.22 mg kg^{-1}으로 사양토 14.37 mg kg^{-1} 보다 유의적으로 높았다 ($p < 0.05$). 또한, 경남 논토양의 As 함량은 미사질식양토가 5.018 mg kg^{-1}으로 사양토 2.525 mg kg^{-1} 및 양토 3.348 mg kg^{-1} 보다 유의적으로 높은 경향이었다 ($p < 0.05$). 경남 논토양에서 중금속 함량은 식질 토양이 사질 토양에 비해 중금속 함량이 높은 경향을 보였다 (Holmgren et al., 1993; Jung et al., 1996; Kim et al., 2008).

논토양 중금속 상관관계 및 주성분 분석 경남지역 논토양 중금속 함량의 상관관계는 Table 3과 같다. 논토양 Cd 함량은 Cu, Ni, Pb, Zn 및 As 함량과 고도로 유의적인 정의상관을 보였다. 논토양의 Cr 함량은 Ni 함량과 고도로 유의적인 정의상관을 보였고 Zn 및 As 함량과 유의적인 정의상관을 보였다. 논토양의 Cu 함량은 Cd, Ni, Pb, Zn 및 As 함량과 고도로 유의적인 정의상관을 보였다. 그리고 Ni 함량은 Cd, Cr, Cu 및 As 함량과 고도로 유의적인 정의상관

Table 2. Heavy metal contents of paddy soils by soil texture in Gyeongnam Province.

Soil texture	Cd	Cr†	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Sample
	mg kg^{-1}							
Silty clay loam	0.198a‡	0.347a	31.51a	17.96a	21.77a	88.19a	5.018a	18
Silt loam	0.144b	0.319a	25.10b	18.06a	19.22a	71.24b	3.684ab	112
Sandy loam	0.100b	0.347a	23.16b	14.86b	14.37b	66.48b	2.525b	29
Loam	0.145b	0.313a	25.30b	14.62b	18.75ab	70.94b	3.348b	101
Critical level	4.0	5.0	150	100	200	300	25	

†Extract 0.1N HCl.

‡Values within a column followed by the same letter are not significantly different at 5% level by Tukey's studentized range test.

Table 3. Correlation coefficient between heavy metals in paddy soil ($n = 260$).

Heavy metal	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As
Cd	0.071	0.559***†	0.161**	0.625***	0.545***	0.791***
Cr		0.092	0.314***	-0.058	0.144*	0.148*
Cu			0.233***	0.430***	0.642***	0.325***
Ni				0.017	0.035	0.421***
Pb					0.609***	0.286***
Zn						0.177**

†*, **, and ***, significant at α = 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

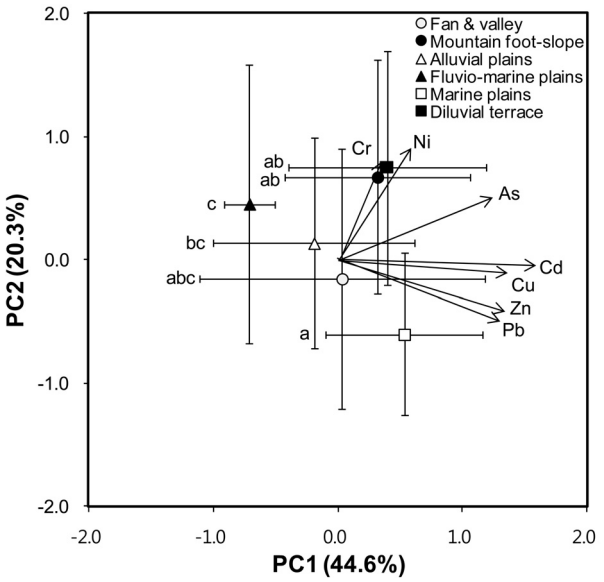

Fig. 1. Principal components analyses of heavy metals contents from soil topographies in paddy soils. The variance explained by the each principal component (PC) axis is shown in parentheses. Bars present standard error (*n*=260). Values within a column followed by the same letter are not significantly different at 5% level by Tukey's studentized range test.

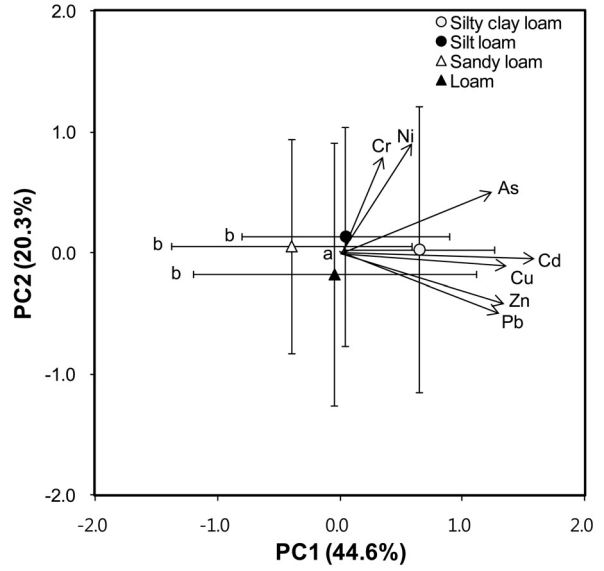

Fig. 2. Principal components analyses of heavy metals contents from soil textures in paddy soils. The variance explained by the each principal component (PC) axis is shown in parentheses. Bars present standard error (*n*=260). Values within a column followed by the same letter are not significantly different at 5% level by Tukey's studentized range test.

을 보였고 Pb 함량은 Cd, Cu, Zn 및 As 함량과 고도로 유의적인 정의상관을 보였다.

경남 논토양 중금속 함량을 몇 가지의 성분으로 추출하여 지형과 토성에 따른 변동사항을 주성분 분석방법으로 검토하였다 (Lee et al., 2010; Yang et al., 2012). 경남지역 논 토양 중금속의 주성분 분석결과는 고유값이 1.0 이상인 주성분은 2개였고 제 1주성분 (PC1)에 속하는 토양 중금속은 Cd (0.510), Cu (0.433), Zn (0.424) 및 Pb (0.412) 등 4개였으며 제 2주성분 (PC2)에 속하는 토양 중금속은 Cr (0.517), Ni (0.633) 및 As (0.347) 등 3였다. 논 토양 중금속 함량의 특성은 제 1주성분이 44.6%, 제 2주성분이 20.3%로서 전체 64.9%의 자료를 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 위와 같은 주성분 분석결과를 적용하여 지형 (Fig. 1)과 토성 (Fig. 2)에 따른 논 토양 중금속 변동과 특성을 간편하게 비교할 수 있었다.

요 약

경남지역 논 토양의 중금속 관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 260 지점을 대상으로 2011년에 Cd, Cu, Ni, Pb, Zn 및 As 전함량과 0.1N HCl 가용성 Cr 함량을 분석하였다. 논토양의 중금속 평균 함량은 Cd 0.143 (범위 0.003–0.537) mg kg^{-1}, Cr 0.322 (0.002–0.986) mg kg^{-1}, Cu 25.41 (6.03–76.19) mg kg^{-1}, Ni 16.36 (2.63–32.94) mg kg^{-1}, Pb 18.67 (4.16–87.02) mg kg^{-1}, Zn 71.76 (22.99–153.58) mg kg^{-1}, As 3.516 (0.002–19.481) mg kg^{-1} 였다. 논토양에서 Cd 함량은 산록경사지에서 가장 높은 반면 Ni과 As 함량은 홍적대지, Zn 함량은 해안평탄지에서 가장 높았다. 또한, Cd, Cu 및 Zn 함량은 미사질식양토에서 미사질양토, 사양토 및 양토 보다 높은 경향이었다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ006906202012)의 지원에 의해 이루어진 것 임.

인 용 문 헌

Andreu, V. and E. Gimeno-Garcia. 1999. Evolution of heavy metals in marsh areas under rice farming. Environmental Pollution. 104:271-282.

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.

Jung, G.B., J.S. Lee, W.I. Kim, J.H. Kim, J.D. Shin, and S.G. Yun. 2005. Fractionation and potential mobility of heavy metals in tailings and paddy soils near abandoned metalliferous mines. Korean J. Soil Sci. Fert. 38:259-268.

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., W.I. Kim, K.L. Park, and S.G. Yun. 2001. Vertical distribution of heavy metals in paddy soil near abandoned metal mines. Korean J. Environ. Agric. 20:297-302.

Kim, B.Y. 1996. Real condition and countermeasure of the environmental pollution. Symposium of Problem and improvement of the agricultural environment in Korea, Korean J. Environ. Agric. pp.27-53.

Kim, M.J., K.H. Ahn, and Y. Jung. 2003. Vertical distribution and mobility of arsenic and heavy metals in mine tailings and nearby paddy fields. J. KSEE 25:544-553.

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, M.H., K.S. Kim, B.Y. Kim, and K.H. Han. 1984. Effect of lime application on growth and Cd uptake of paddy rice. Korean J. Soil Sci. Fert. 17:258-264.

Lee, Y.H., S.T. Lee, J.Y. Heo, M.G. Kim, K.P. Hong, E.S. Kim, W.D. Song, C.W. Rho, J.H. Lee, W.T. Jeon, B.G. Ko, K.A. Roh, and S.K. Ha. 2010. Monitoring of heavy metal contents from paddy soil in Gyeongnam Province. Korean J. Soil Sci. Fert. 43(3):289-295.

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). 2009. Standard test method for soil pollution. Gwacheon, Korea.

Nicholson, F.A., B.J. Chambers, and B.J. Alloway. 1997. Effect of soil pH on heavy metal bioavailability. Proceedings of 4th Int. Conf. on the Biogeochemistry of Trace Elements.

Page, A.L., F.T. Bingham, and A.C. Chang. 1981. Cadmium. In Lepp, N.W. (ed) Effect of heavy metal pollution on plants. Vol 1, Effects of trace metals on plant function. Applied Science, London, UK.

Petruzzelli, G. 1989. Recycling wastes in agriculture: heavy metal bioavailability. Agr. Ecosyst. Eviron. 27:493-503.

RDA (Rural development administration). 1983. Soil in Korea. RDA, Suwon, Korea.

SAS Institute. 2006. SAS Version 9.1.3. SAS Inst., Cary, NC.

Sharma, P.K., M. Agrawal, and F. Marshall. 2005. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. Ecotox. Environ. Safe. 66:258-266.

Singh, S., S. Sinha, R. Saxena, K. Pandey, and K. Bhatt. 2004. Translocation of metals and its effects in the tomato plants grown on various amendments of tannery waste: evidence for involvement of antioxidants. Chemosphere 57:91-99.

Vulava, V.M., B.R. James, and A. Torrents. 1997. Copper solubility in Myersville B horizon soil in the presence of DTPA. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:44-52.

Xia, Z.L. and C.R. Mu. 1984. The effects to tobacco and corn by interactive effects of Cd, Zn, Pb. J. Ecol. 4:231-235.

Yang, S.K., M.K. Kim, Y.W. Seo, K.J. Choi, S.T. Lee, Y.S. Kwak, and Y.H. Lee. 2012. Soil microbial community analysis of between no-till and tillage in a controlled horticultural field. World J Microbiol. Biotechnol. 28:1797-1801.

Yap, D.W., J. Adezrian, J. Khairiah, B.S. Ismail, and R. Ahmad-Mahir. 2009. The uptake of heavy metals by paddy plants (Oryza sativa) in Kota Marudu, Sabah, Malaysisa. American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 6(1):16-19.