

경남지역 논 토양 중금속 함량 변동조사

이영한 · 이성태 · 허재영 · 김민근 · 홍광표 · 김은석 · 송원두 · 노치웅 · 이진호¹ ·
전원태² · 고병구³ · 노기안³ · 하상건^{3*}

경상남도농업기술원, ¹전북대학교, ²국립식량과학원, ³국립농업과학원

Monitoring of Heavy Metal Contents from Paddy Soil in Gyeongnam Province

Young-Han Lee, Seong-Tae Lee, Jae-Young Heo, Min-Geun Kim, Kang-Pyo Hong,
Eun-Seok Kim, Won-Doo Song, Chi-Woong Rho, Jin-Ho Lee¹, Weon-Tai Jeon²,
Byong-Gu Ko³, Kee-An Roh³, and Sang-Keun Ha^{3*}

Gyeongsangnam-do Agricultural Research and Extension Services, Jinju 660-370, Korea.

¹Department of Bioenvironmental Chemistry, College of Agricultural and Life Sciences, Chonbuk National University,
Jeonju 561-756, Korea.

²National Institute of Crop Science, RDA, Suwon 441-857, Korea,

³National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Korea

Monitoring of the heavy metals at paddy rice agriculture is very important for environmental agriculture. A study was carried out of heavy metal concentrations in 260 paddy soil samples every four years from 1999 to 2007 in Gyeongnam Province. Heavy metals such as Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, and As in paddy soils were analyzed. Average concentrations of heavy metal were Cd 0.426 (ranged 0.003-1.379) mg kg⁻¹ for Cd, 1.189 (0.003-3.264) mg kg⁻¹, for Cr, 9.68 (0.05-22.38) mg kg⁻¹ for Cu, 2.64 (0.01-7.36) mg kg⁻¹ for Ni, 23.7 (0.7-54.1) mg kg⁻¹ for Pb, 20.8 (0.7-131.2) mg kg⁻¹ for Zn, and 1.054 (0.001-2.110) mg kg⁻¹ for As, respectively. Long-term changes of heavy metals were showed that Cd, Ni, and Zn were significantly increased whereas Cr, Cu, and As were significantly decreased. Principle component analysis (PCA) of heavy metals in paddy soils was obtained with eigenvalues > 1 summing 34.3% of variance for PC1, 17.5% of variance for PC2, and 51.8% of the total variance in soil heavy metals.

Key words: Paddy soil, Heavy metal, Monitoring, Soil texture, Soil type, Topography

서 언

중금속에 의한 주변환경의 오염은 중금속의 상호작용, 작물, 중금속 농도의 비율, 토양 특성 및 환경조건과 같은 많은 요인과 밀접한 관련이 있다 (Xia and Mu, 1984; Petruzzelli, 1989). 논 토양에서 중금속 오염은 인간의 활동에서 발생하는 매연, 먼지, 하수, 폐수 등의 오염물질과 유해 중금속이 포함된 부산물비료나 산업폐기물의 사용 및 금속광산 주변의 오염물질의 유입 등으로 발생된다 (Hyun and Yoo, 1991; Jung, 1995; Jung and Thornton, 1997; Jung et al., 2001; Jung et al., 2005; Kim and Lee, 1983; Kim et al., 1996; Kim et al., 2003; Lee and Song, 1985; Lee

et al., 1997; Yoo et al., 1996). 중금속은 토양에 유입되면 장기간 축적되고 Cu, Pb, Zn, As 등의 중금속은 함량이 일정 수준 이상이 되면 직접적인 피해로서 작물이 생육장애를 일으키거나 고사하며, Cd와 Hg 등은 작물생육에 비교적 피해가 적지만 작물에 집적되어 이를 섭취할 경우 사람과 가축에 간접적인 피해를 유발한다 (Holmgren et al., 1993; Kim, 1996; Vulava et al., 1997). 우리나라에서는 1996년 토양환경보전법에 의해 농경지의 중금속 함량에 대한 토양오염 우려 및 대책기준을 설정하였고, 2000년 식품의약품안전청 고시에 따른 쌀의 Cd 함량 허용기준을 0.2 mg kg⁻¹로 설정한 바 있으며 2006년에 Pb 함량 허용기준을 0.2 mg kg⁻¹으로 추가로 설정하였다 (Kim et al., 2008). Jung et al. (1996)은 42년간 동일비료 장기연용 논 토양 및 현미의 중금속 함량은 일반 논 토양 및 현미중의 중금속 함량과 유사하고 화학비료와 석회를 사용한 시험구보다 퇴비를 연용한 시험구에서 아연 등의 중금속이 높

접수 : 2010. 5. 19 수리 : 2010. 6. 8

*연락처 : Phone: +82312900337

E-mail: ha0sk@korea.kr

다고 보고한 바 있다. 토양의 중금속 수직분포에 관하여 Andreu and Gimeno-Garcia (1999)는 논 토양에서 토심별 중금속 총합량 및 가용성 함량이 Cd, Cu 및 Pb는 표토에서, Co 및 Ni은 심토에서 높았다고 하였다. 선진 외국의 경우 일반농경지를 대상으로 오염원인 하수오니 및 산업폐기물 등이 유입되지 않은 토양을 중심으로 중금속 함량을 조사하였고 (Holmgren et al., 1993; Ma et al., 1997) 또한, 도시하수 및 산업폐기물의 농경지 이용 측면과 위해성 측면 (Berti and Jacobs, 1996; Krebs et al., 1998; Sims and Kline, 1991)을 검토할 뿐만 아니라 오염원이 유입된 농경지에서 장기적인 조사와 중금속의 분포형태 및 가용화 등을 고려하여 작물과의 관계를 보고하였다 (Vulava et al., 1997). 우리나라는 Kim et al. (2008)이 전국 논 토양 2,010 지점의 토양 중 중금속 함량을 분석한 결과 As, Ni 및 Zn 함량은 증가하는 경향이었으나, Cd와 Cu 함량은 다소 감소하였고 Pb 함량은 큰 변화가 없다고 하였다. 그러나 경남지역 논 토양 중금속의 토양 내 유효도에 대한 조사는 전무하며 이에 따른 농민들의 요구가 많은 실정이다.

따라서 본 연구는 경남지역 논 토양 260개소를 대상으로 1999년부터 2007년까지 4년 주기로 토양 중금속 변동조사를 수행하였으며 주성분 분석법에 의한 연도, 유형, 토성 및 지형으로 구분하여 화학성분의 특성과 주요 변동요인을 해석하여 효율적인 토양 양분관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 수행하였다.

재료 및 방법

논 토양 지점 선정 및 시료채취 방법 경남지역 논 토양의 중금속 함량 변동을 주기적으로 파악하기 위하여 1999년에 토양 유형, 지형 및 토성 (RDA, 1983)과 분포

면적 비율을 기준으로 260개 지점을 선정하였고, 2007년까지 4년 주기로 동일한 지점을 조사하였다. 토양은 비료를 사용하기 전인 3월부터 4월 사이에 표토를 0-15 cm 깊이에서 500 g 정도를 3반복으로 채취하였다.

토양 시료조제 및 화학성분 분석방법 채취한 토양은 실험실에서 7일간 풍건하여 2 mm 체를 통과된 것을 유발에 미세하게 분쇄하여 중금속 분석에 사용하였다. 중금속 분석은 토양오염공정시험법 (MOE, 1999)에 의거 시료 10 g을 125 ml 삼각플라스크에 넣어 Cd, Cu, Ni, Pb 및 Zn은 0.1 M HCl 용액 50 ml를 가하여 30℃에서 60분간 진탕하고, As는 1 M HCl 용액 50 ml를 가하여 30℃에서 30분간 진탕한 후 여지 No. 2로 여과하여 여액을 유도결합 플라즈마 발광광도 분석기 (RENAISSANCE, Leco co., Joseph, USA)으로 측정하였다.

다변량 주성분 분석 및 통계분석 분석된 토양 중금속 함량은 SAS 프로그램 9.1.3 버전 (2006)을 사용하였다. 연도별 토양 중금속 함량은 5% 수준에서 LSD 검정을 하였고 유형, 지형 및 토성별 토양 중금속 함량은 5% 수준에서 Tukey's studentized range test를 하였다. 또한, 토양 중금속 함량은 주성분 분석을 통하여 연도, 유형, 지형 및 토성에 따른 차이를 비교 검토하였다.

결과 및 고찰

연도별 논 토양 중금속 함량 경남지역 논 토양의 조사연도에 따른 중금속 함량은 Table 1과 같다. 토양 Cd 함량은 1999년 0.122 (범위 0.005-0.349) mg

Table 1. Chemical properties of lowland paddy soils by sampling year.

Sampling years	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Number of sample
	----- mg kg ⁻¹ -----							
1999 Mean value	0.122	0.652	4.32	0.685	9.2	6.1	0.283	260
Min value	0.005	0.019	1.02	0.022	0.1	1.0	0.001	
Max value	0.349	3.264	15.72	7.360	54.1	63.0	2.110	
2003 Mean value	0.114	0.218	4.11	0.689	5.4	5.9	0.579	260
Min value	0.003	0.003	0.05	0.008	0.1	0.7	0.184	
Max value	1.379	1.604	22.38	4.075	33.4	45.6	1.670	
2007 Mean value	0.190	0.318	1.25	1.269	9.1	8.8	0.192	260
Min value	0.010	0.024	0.26	0.047	1.0	0.8	0.008	
Max value	1.143	2.122	4.68	5.285	52.2	131.2	0.864	
LSD [†] (p<0.05)	0.0214	0.0566	0.413	0.1289	1.63	1.50	0.0537	

[†] LSD: Least significant difference; [‡] NS: Not significant.

kg⁻¹, 2003년 0.114 (0.003-1.379) mg kg⁻¹ 및 2007년 0.190 (0.010-1.143) mg kg⁻¹을 나타냈다. 이러한 결과는 논 토양 Cd 평균함량이 0.133 (0-0.90) mg kg⁻¹로서 일본 논 토양 0.40 mg kg⁻¹ 보다 낮다고 보고한 Kim et al. (1995)과 일치하였다. 그러나 Kim et al. (2008)은 2007년 전국 논 토양 Cd 함량이 0.08 (tr.-1.25) mg kg⁻¹로서 1999년 0.11 (tr.-1.10) mg kg⁻¹에 비해 감소되는 경향으로 보고하였으나, 경남지역의 Cd 함량은 유의적으로 높아지는 경향이였다.

Mench et al. (1997)은 토양 pH값은 가용성 Cd 함량과 유의적인 부의 상관성이 있다고 하였고, de Matos et al. (2000)은 토양 pH는 토양에서 중금속의 흡수, 이동 및 지연과 관련하여 가장 큰 인자라고 하였다. 따라서 경남지역의 논 토양 유기물 함량이 30 g kg⁻¹으로 전국 평균 값 24 g kg⁻¹보다 높아 부산물비료 등에 포함된 Cd의 영향을 받았고, 전국 논 토양 pH 평균 값 5.8 보다 경남지역은 5.6으로서 pH가 낮아 상대적으로 가용성 Cd 함량이 높아진 것으로 판단되었다 (Lee et al., 2010; NIAST 2008). 논 토양의 Cr 함량은 1999년 0.652 (0.019-3.264) mg kg⁻¹, 2003년 0.218 (0.003-1.604) mg kg⁻¹ 및 2007년 0.318 (0.024-2.122) mg kg⁻¹을 나타냈다. 이러한 결과는 Kim et al. (1995)이 보고한 논 토양 Cr 평균함량 0.36 (0-1.16) mg kg⁻¹과 유사하였으며 2003년과 2007년은 1999년에 비해 유의적으로 감소하였다. 논 토양의 Cu 함량은 1999년 4.32 (1.02-15.72) mg kg⁻¹, 2003년 4.11 (0.05-22.38) mg kg⁻¹ 및 2007년 1.25 (0.26-4.68) mg kg⁻¹을 나타냈으며 Kim et al. (1995)이 보고한 4.52 (0-60.80) mg kg⁻¹과 Kim et al. (2008)이 보고한 3.33 (tr-25.0) mg kg⁻¹과 유사하였다. 특히, 2007년의 Cu 함량은 1999년과 2003년에 비해 유의적인 감소를 나타냈으며 Kim et al. (2008)이 보고한 결과와 일치하였다. 논 토양의 Ni 함량은 1999년 0.685 (0.022-7.360) mg kg⁻¹과 2003년 0.689 (0.008-4.075) mg kg⁻¹보다 2007년 1.269 (0.047-5.285) mg kg⁻¹으로 증가하

였다. 이러한 결과는 Kim et al. (1995)이 보고한 논 토양 Ni 평균함량 1.38 (0-4.14) mg kg⁻¹ 보다 낮았으며 Kim et al. (2008)이 보고한 결과와 일치하였다. 논 토양의 Zn 함량은 1999년 6.1 (1.0-63.0) mg kg⁻¹, 2003년 5.9 (0.7-45.6) mg kg⁻¹였으나 2007년 8.8 (0.8-131.2) mg kg⁻¹으로 증가하였다. Kim et al. (1995)은 우리나라 논 토양 Zn 함량은 3.90 (0.30-43.03) mg kg⁻¹ 이라고 하였고 Kim et al. (2008)도 1999년에서 2007년 평균 값이 4.47-4.67 mg kg⁻¹ 이라고 보고한 결과와 비교해 볼 때 경남지역 논 토양의 Zn 함량은 대체적으로 높은 함량을 보였다. 논 토양의 As 함량은 1999년 0.283 (0.001-2.110) mg kg⁻¹, 2003년 0.579 (0.184-1.670) mg kg⁻¹ 및 2007년 0.192 (0.008-0.864) mg kg⁻¹을 나타냈다.

경남지역의 논 토양 중금속 함량은 Nakai (2007)가 보고한 일본 논 토양 232지점의 침출성 중금속 함량 조사결과인 Cd 0.30 mg kg⁻¹, Cu 6.39 mg kg⁻¹, Ni 1.27 mg kg⁻¹, Pb 3.92 mg kg⁻¹, Zn 9.40 mg kg⁻¹ 및 As 1.42 mg kg⁻¹과 비교할 때 Pb를 제외한 대부분의 중금속 함량이 낮은 수준을 보였다. 일반적으로 토양 pH가 낮아지면 토양 중금속의 형태가 유효태로 전환하여 식물 흡수가 증가된다 (Nicholson et al., 1997; Page et al., 1981). 실제 Lee et al. (1984)과 Kim et al. (1986)은 논에서 소식회 시용으로 토양 pH를 증가시켜 Cd와 Pb의 흡수를 경감시킨다고 하였다. 따라서 논 토양에서 쌀의 중금속 함량을 경감시킬 수 있는 화학적인 방법으로 석회 사용을 고려할 필요가 있다 (Kim et al., 2008).

논 토양 유형, 토성 및 지형에 따른 중금속 함량 비교 논 토양 유형은 토지생산력, 지형, 토양배수, 토성, 토색, 유효토심, 경도, 지하수위, 석력함량, 염농도 등의 요인을 고려하여 보통답, 미숙답, 사질답, 습답, 특이 산성답 및 염해답 등의 6개로 분류되고 있다 (RDA, 1983). 경남지역 논 토양 유형에 따른 중금속 함량은 Table 2와 같다. 논 토양 유형에 따라 Ni 함량은 특이

Table 2 . Chemical properties of lowland paddy soils by soil type.

Soil types	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Number of sample
	----- mg kg ⁻¹ -----							
Unmatured	0.137a [†]	0.405a	3.18a	0.809b	7.2a	7.1a	0.346a	345
High yield	0.161a	0.410a	3.20a	1.036ab	8.9a	7.3a	0.364a	267
Sandy	0.122a	0.367a	3.18a	0.771b	8.0ab	5.8a	0.365a	117
Wet	0.128a	0.339a	3.83a	0.712b	7.9ab	5.7a	0.301a	36
Saline	0.129a	0.246a	3.97a	0.545b	9.0a	5.4a	0.359a	6
Acid sulfate	0.094a	0.384a	3.43a	1.365a	3.8b	10.4a	0.209a	9

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

Table 3. Chemical properties of lowland paddy soils by soil texture.

Soil textures	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Number of sample
	----- mg kg ⁻¹ -----							
Silty clay loam	0.109a [†]	0.434ab	4.34a	1.339a	4.4a	12.4b	0.226a	15
Silt loam	0.151a	0.431ab	3.30a	0.950ab	8.3a	6.9bc	0.365a	363
Clay loam	0.192a	0.631a	2.51a	0.877ab	8.6a	18.5a	0.173a	6
Sandy loam	0.112a	0.346b	3.30a	0.758b	6.1a	5.9c	0.318a	93
Loam	0.140a	0.363b	3.08a	0.813ab	8.2a	6.8bc	0.355a	303

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

Table 4. Chemical properties of lowland paddy soils by soil topography.

Soil topographies	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As	Number of sample
	----- mg kg ⁻¹ -----							
Fan & valley	0.146ab [†]	0.372ab	3.21a	0.81a	7.9ab	6.6bc	0.356ab	417
Hill areas	0.192a	0.631a	2.51a	0.88a	8.6ab	18.5a	0.173b	6
Inclined piedmont	0.104ab	0.375ab	2.36a	0.71a	4.6b	4.0c	0.365ab	21
River sider plain	0.144ab	0.442ab	3.34a	0.97a	8.0ab	7.4bc	0.354ab	249
River & coastal plain	0.179a	0.327b	2.49a	1.21a	14.3a	5.0c	0.443a	18
Coastal plain	0.142ab	0.377ab	4.19a	1.21a	7.5b	11.4b	0.281ab	30
Diluvial soil	0.085b	0.391ab	2.85a	0.76a	5.9b	4.9c	0.314ab	39

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

산성답에서 1.365 mg kg⁻¹, Pb 함량은 염해답에서 9.0 mg kg⁻¹으로 유의적으로 높았다. 특히, 특이산성답의 경우 Cd, Pb 및 As 함량이 낮았으며 이것은 sulfate 화합물로 전환되어 이들 중금속의 용해도가 크게 저하되는 것으로 판단되었다 (Jung et al., 1999; Iimura, 1981). 토성별 경남지역의 논 토양 중금속 평균함량은 Table 3과 같다. 논 토양 Cd, Cr, Pb 및 Zn 함량은 식양토에서 각각 0.192 mg kg⁻¹, 0.631 mg kg⁻¹, 8.6 mg kg⁻¹, 18.5 mg kg⁻¹으로 가장 높았고 Cu 및 Ni 함량은 미사질식양토에서 각각 4.34 mg kg⁻¹, 1.339 mg kg⁻¹으로 높았으며 As 함량은 미사질양토에서 0.365 mg kg⁻¹으로 가장 높았다. 반면에 사양토와 양토는 Cr, Ni 및 Zn 함량이 유의적으로 낮은 함량을 나타냈다. 토성에 따른 중금속 함량은 사질 토양보다 식질 토양에서 중금속 함량이 높은 경향을 보였으며 대체적으로 점질 함량이 증가할수록 중금속의 농도가 증가하였다 (Holmgren et al., 1993; Jung et al., 1996; Kim et al., 2008). 지형에 따른 경남지역의 논 토양 중금속 평균함량은 Table 4와 같다. 논 토양의 Cd, Cr 및 Zn 함량은 구릉지에서 각각 0.192 mg kg⁻¹, 0.631 mg kg⁻¹, 18.5 mg kg⁻¹으로 가장 높았고 Cu 및 Ni 함량은 해안 평탄지에서 각각 4.19 mg kg⁻¹, 1.21 mg kg⁻¹으로 가장 높았으며 Pb 및 As 함량은 하해혼성 평탄지에서 각각 14.3 mg kg⁻¹, 0.443 mg kg⁻¹으로 가

장 높았다. 반면, 산록경사지는 다른 지형에 비해 Cu, Ni, Pb 및 Zn 함량이 낮았다. 위의 결과로 산록경사지는 강우로 인한 토양 침식이나 용탈에 의해 낮은 중금속 함량을 보였으며 물의 이동에 따라 중금속이 운반, 퇴적되어 하해혼성 평탄지나 해안 평탄지에서 중금속 함량이 높아진 것으로 추정되었다 (Kim et al., 2008).

논 토양 중금속 상관관계 및 주성분 분석 경남지역 논 토양 중금속 함량의 상관관계는 Table 5와 같다. 논 토양 Cd 함량은 Cr, Cu, Ni, Pb 및 Zn 함량과 고도로 유의적인 정의상관을 보였다. 논 토양의 Cr 함량은 Cd, Cu, Ni, Pb 및 Zn 함량과 유의적인 정의상관을 보였으나 As 함량과는 고도로 유의적인 부의상관을 나타냈다. 논 토양의 Cu 함량은 Cd, Cr, Pb, Zn 및 As 함량과 고도로 유의적인 정의상관을 보였다. 논 토양 As 함량은 Cu 및 Pb와 고도로 유의적인 정의상관을 보인 반면, Cr 및 Ni 함량과는 유의적인 부의상관을 나타냈다. 토양 중금속 함량의 변동을 간략하게 몇 가지의 성분으로 추출하여 설명하고 예측할 수 있는 통계기법으로 주성분 분석방법이 유용하다 (Cho et al., 2005; Choi et al., 2010; Koo et al., 2005; Lee et al., 2010; Yoon et al., 2004). 경남지역 논 토양 중금속의 주성분 분석결과는 고유값이 1.0 이상인 주성분은 3개였고 제 1주성분 (PC1)에 속하는 토양 중금속은 Cd

Table 5. A correlation coefficient between heavy metals contents in paddy soil ($n=780$).

Heavy metals	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	As
Cd	0.100**	0.152**	0.509**	0.532**	0.408**	-0.046
Cr	-	0.123**	0.120**	0.073*	0.169**	-0.159**
Cu		-	-0.024	0.103**	0.176**	0.133**
Ni			-	0.323**	0.425**	-0.072*
Pb				-	0.094**	0.159**
Zn					-	-0.057

† A significant values reported as ** $p \leq 0.01$, and * $p \leq 0.05$.

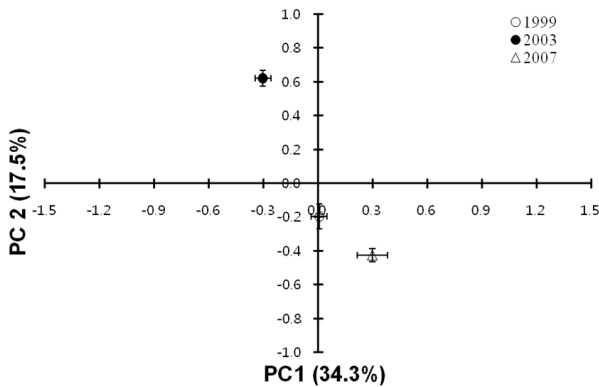


Fig. 1. Principal components analyses of heavy metals contents from sampling times in paddy soils. The variance explained by the each principal component (PC) axis is shown in parentheses. Bars present standard error ($n=780$).

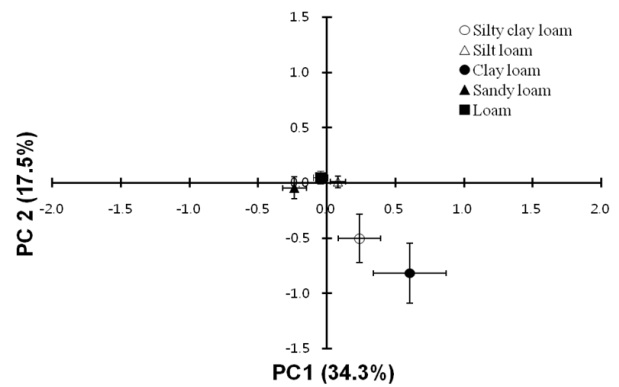


Fig. 3. Principal components analyses of heavy metals contents from soil textures in paddy soils. The variance explained by the each principal component (PC) axis is shown in parentheses. Bars present standard error ($n=780$).

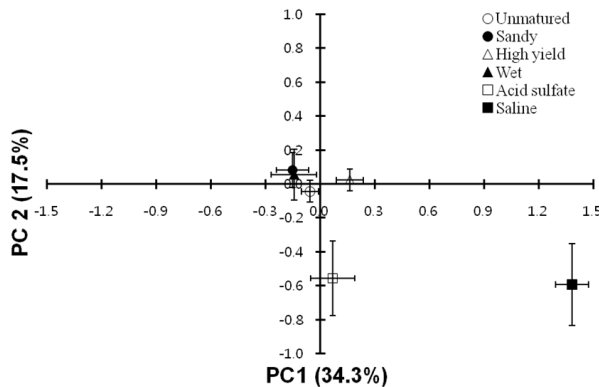


Fig. 2. Principal components analyses of heavy metals contents from soil types in paddy soils. The variance explained by the each principal component (PC) axis is shown in parentheses. Bars present standard error ($n=780$).

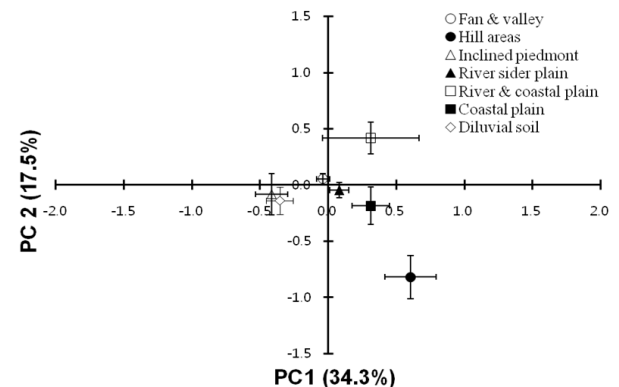


Fig. 4. Principal components analyses of heavy metals contents from soil topographies in paddy soils. The variance explained by the each principal component (PC) axis is shown in parentheses. Bars present standard error ($n=780$).

(0.550), Ni (0.490), Zn (0.452) 및 Pb (0.422) 등 4개였으며 제 2주성분 (PC2)에 속하는 토양 중금속은 As (0.760) 및 Cr (-0.375) 등 2개였고 제 3주성분 (PC3)에 속하는 토양 중금속은 Cu (0.740) 였다. 논 토양 중금속 함량의 특성은 제 1주성분이 34.3%, 제 2주성분이 17.5%로서 전체 51.8%의 자료를 설명할 수

있는 것으로 나타났다. 위와 같은 주성분 분석결과를 적용하여 조사연도 (Fig. 1), 토양 유형 (Fig. 2), 토성 (Fig. 3) 및 지형 (Fig. 4)에 따른 논 토양 중금속 변동과 특성을 간편하게 비교할 수 있었다. 따라서, 향후 이와 유사한 토양 모니터링 자료는 주성분 분석을 통하여 간편하게 정보를 요약할 수 있을 것으로 생각된다.

요 약

경남지역 논 토양의 중금속 관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 260 지점을 대상으로 1999년부터 2007년까지 4년 주기로 분석하였다. 논 토양의 중금속 평균 함량은 Cd 0.426 (범위 0.003-1.379) mg kg⁻¹, Cr 1,189 (0.003-3.264) mg kg⁻¹, Cu 9.68 (0.05-22.38) mg kg⁻¹, Ni 2.64 (0.01-7.36) mg kg⁻¹, Pb 23.7 (0.7-54.1) mg kg⁻¹, Zn 20.8 (0.7-131.2) mg kg⁻¹, As 1.054 (0.001-2.110) mg kg⁻¹ 였다. 장기적인 변동조사 결과 경남지역 논 토양의 Cd, Ni 및 Zn 함량은 유의적으로 증가한 반면, Cr, Cu 및 As 함량은 유의적으로 감소하였고 Pb 함량은 큰 변화가 없었다. 논 토양 As 함량은 Cu 및 Pb와 고도로 유의적인 정의상관을 보인 반면, Cr 및 Ni 함량과는 유의적인 부의상관을 나타냈다. 경남지역 논 토양 중금속의 주성분 분석결과 고유값이 1.0 이상인 주성분은 3개였고 제 1주성분 (PC1)에 속하는 토양 중금속은 Cd (0.550), Ni (0.490), Zn (0.452) 및 Pb (0.422) 등 4개였으며 제 2주성분 (PC2)에 속하는 토양 중금속은 As (0.760) 및 Cr (-0.375) 등 2개였고 제 3주성분 (PC3)에 속하는 토양 중금속은 Cu (0.740) 였다. 논 토양 중금속 함량의 특성은 제 1주성분이 34.3%, 제 2주성분이 17.5%로서 전체 51.8%의 자료를 설명할 수 있는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ00-6906200920)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.
- Berti. W.R. and L.W. Jacobs. 1996. Chemistry and Phytotoxicity of Soil Trace Elements from Repeated Sewage Sludge Applications. *J. Environ. Qual.* 25: 1025-1032.
- Cho, I.H., Y.S. Kim, and K.D. Zoh. 2005. A case study on the comparison and assessment between environmental impact assessment and post-environmental investigation using principal component analysis. *Kor. J. Env. Hlth.* 31:134-146.
- Choi, M.T., J.I. Lee, Y.U. Yun, J.E. Lee, B.C. Lee, E.S. Yang, and Y.H. Lee. 2010. Relationship between fertilizer application level and soil chemical properties for strawberry cultivation under greenhouse in Chungnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:153-159.
- de Matos, A.T., M.P.F. Fontes, L.M. da Costa, and M.A. Martinez. 2000. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. *Environmental Pollution*. 111:429-435.
- 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, H.N. and S.H. Yoo. 1991. Effects of soil chemical properties on the distribution and forms of heavy metals in paddy soils near zine mines. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 24:183-191.
- Iimura, K. 1981. Heavy metal problems in paddy soils: heavy metal pollution in soils of Japan, Japan Scientific Societies, Tokyo, Japan.
- Jung, G.B., J.S. Lee, W.I. Kim, and B.Y. Kim. 1999. The effect of irrigation control and the application of soil ameliorators on cadmium uptake in paddy rice. *Korean J. Environ. Agric.* 18:355-360.
- 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, 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.
- Jung, K.Y. 1995. Practice of application of organic matter and by-product compost. p. 17-45. Symposium of problem and measures about make a fertilizer with organic waste, Korean J. Soil Sci. Fert., Suwon, Korea.
- Jung, M.C. and I. Thornton. 1997. Environmental contamination and seasonal variation of metals in soils, plants and waters in the paddy fields around a Pb-Zn mine in Korea. *Sci. Total Environ.* 198:105-121.
- 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. p.27-53.
- Kim, B.Y., B.K. Jung, J.W. Choi, E.S. Yun, and S. Choi. 1995. Heavy metals in paddy soil of Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 28:295-300.
- Kim, B.Y. and K.S. Kim. 1986. Studies on uptake by crops of lead and reduction of it's damage, III. Effect of

- water management and lime application on lead uptake in paddy rice. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 19:147-151.
- 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, M.K. and K.S. Lee. 1983. Heavy metal contents of the drainage-basin soil in Daejeon area. *Korean J. Environ. Agric.* 2:78-82.
- Kim, S.J., S.H. Baek, and K.H. Moon. 1996. Fractionation of heavy metals and correlation with their contents in rice plant grown in paddy near smelter area. *Korean J. Environ. Agric.* 15:1-10.
- 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.
- Koo, J.Y., M.J. Yu, S.G. Kim, M.H. Shim, and A. Koizumi. 2005. Estimation of long-term water demand by principal component and cluster analysis and practical application. *J. KSEE* 27:870-876.
- Krebs, R., S.K. Gupta, G. Furrer, and R. Schulin. 1998. Solubility and uptake of metals with and without liming of sludge amended soils. *J. Environ. Qual.* 27:18-23.
- Lee, J.H., K.W. Han, and J.Y. Cho. 1997. Content of heavy metals in paddy soils and brown rice from Kunsan industrial complex area. *Agric. Chem. Biotechnol.* 40:342-346.
- 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, S.R. and K.J. Song. 1985. A survey on the heavy metal concentration of soil samples around Onsan industrial complex. *Korean J. Environ. Agric.* 4:88-94.
- Lee, Y.H., S.T. Lee, J.Y. Heo, M.G. Kim, K.P. Hong, 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 chemical properties from paddy soil in Gyeongnam Province. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43:140-146.
- Ma, L.Q., F. Tan, and W.G. Harris. 1997. Concentrations and distribution of eleven metals in Florida soils. *J. Environ. Qual.* 26:769-775.
- Mench, M., D. Baize, and B. Mocquot. 1997. Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne District, Burgundy, France. *Environmental Pollution.* 95:93-103.
- MOE (Minister of Environment). 1996. Standard test method for soil pollution. Gwacheon, Korea.
- Nakai, M. 2007. Development of soil-crop inventory on heavy metals in Japan. International workshop draft proceedings of ESAFS 8.
- 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.
- NIAS (National Institute of Agricultural Science and Technology). 2008. Annual report of the monitoring project on agro-environmental quality in 2007. NIAS, RDA, Suwon, Korea.
- 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. Environ.* 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.
- Sims, J. T. and J.S. Kline. 1991. Chemical fractionation and uptake of heavy metals in soils amended with co-composted sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 20:387-395.
- 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.
- Yoo, S.H., K.J. Ro, S.M. Lee, M.E. Park, and K.H. Kim. 1996. Distribution of cadmium, copper, lead, and zinc in paddy soils around an old zinc mine. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 29:424-431.
- Yoon, J.H., B.G. Jung, H.J. Jun, and H.K. Kwak. 2004. Soil quality assessment method of paddy and upland. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37:357-364.