Assessment of Heavy Metal Concentrations in the Arable Soils near Industrial Complexes in Gangwon, Chungnam, Jeonnam, and Gyeongnam Provinces of South Korea

Tae-Gu Lee, Myung-Suk Kong, Eun-Jin Lee, Ha-il Jung, Yihyun Kim, Goo-Bok Jung¹, Jae-E Yang², Sung-Chul Kim³, Gi-In Kim⁴, Gwon-Rae Kim⁵, and Mi-Jin Chae*

Division of Soil and Fertilizer, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

¹Division of Planning & Coordination, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Wanju 55365, Korea

²Department of Environment Convergence, College of Agriculture and Life Sciences, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

³Department of Biological Environment and Chemistry, College of Agriculture and Life Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

⁴Department of Horticulture Science, College of Natural Science, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

⁵Department of Agronomy and Medicinal Plant Resources, College of Bioscience, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea

*Corresponding author: chmj011@korea.kr

ABSTRACT

Received: October 29, 2019

Revised: November 19, 2019

Accepted: November 27, 2019

ORCID

Tae-Gu Lee

<https://orcid.org/0000-0002-3115-7516>

Mijin Chae

<https://orcid.org/0000-0002-0153-9919>

Heavy metal (HM) pollution in agricultural lands and waters, which is rapidly increasing due to social and industrial activities, such as mining and smelting. Moreover, HM contamination causes serious environmental problems and adversely influences on the safety of agricultural production. This study established the concentrations of HM on the arable lands near industrial complexes in Gangwon (GW), Chungnam (CN), Jeonnam (JN), and Gyeongnam (GN) in South Korea. Soil samples were collected and established from 600 sites of agricultural lands nearby 60 industrial complexes in the selected provinces. Eight HMs (Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Cr, As and Hg) were analyzed to compare degrees of the HM pollution using standard analytical methods. The average total concentration of all HMs from samples of the analyzed soils did not exceed the warning criteria as suggested by the Soil Environmental Conservation Law of Korea. The concentration of Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, As and Hg were mostly distributed below one half concentration of warning criteria, except for the Cr and Hg. Particularly, 99.2% of Hg concentrations among the assessed samples distributed below one-twentieth values of the warning criteria. Contamination degree (C_d) of GW and GN provinces were moderate degree, CN and JN province were low degree contamination. Four provinces were classified as “uncontaminated” by PI (Pollution index).

Keywords: Arable soil, Contamination, Heavy metal, Industrial complex

Contamination assessment using C_f^+ , C_d^* and $PI^§$.

Province	C_f					C_d	PI
	Cu	Pb	Zn	Ni	As		
GW	1.2	2.8	1.6	1.1	2.2	9.0	0.23
CN	1.0	1.3	1.3	1.2	1.5	6.4	0.17
JN	0.6	2.6	0.8	0.6	1.4	5.9	0.14
GN	2.8	1.4	1.8	1.6	1.7	9.4	0.24

GW, Gangwon; CN, Chungnam; JN, Jeonnam; GN, Gyeongnam.

⁺ C_f , Contamination factor.

^{*} C_d , Contamination degree.

[§] PI , Pollution index.

Introduction

우리나라는 과거 반세기 동안 성장 중심의 집약적인 산업정책을 기반으로 도시화된 산업단지들이 전국적으로 조성되어, 세계적으로 유례를 찾아보기 어려울 만큼 급속한 경제성장과 더불어 국민들의 식생활수준 또한 양적 및 질적으로 크게 향상되었다. 이러한 산업정책으로 인하여 국민들의 생활수준은 선진국 반열에 올라섰지만, 집적화 및 고도화된 산업발전은 환경오염물질들인 환경호르몬, 중금속 등 다양한 유해물질들 또한 전국토에 광범위한 확산을 가중하는 부정적인 영향을 끼치게 되었다 (Lee and Hoh, 2003). 작물은 토양 내에 존재하는 양수분을 흡수하여 생장, 개화 및 결실 등의 과정을 거치게 된다. 이러한 일련의 과정 중 이들 양분과 화학적 성질이 비슷한 중금속들이 작물체 내로 흡수 및 축적되어 작물의 생산성 및 질을 저해할 뿐만 아니라, 먹이사슬의 최상위단계에 위치한 인축의 건강에 심각한 악영향을 미치고 있다 (Nabulo et al., 2010; Dong et al., 2011).

토양 내 중금속오염은 대기 또는 수질오염과 달리 이동성이 상대적으로 낮기 때문에 농경지 유입시 장기간에 걸친 먹거리 안전성 문제를 야기할 수 있고, 오염정화에 막대한 인적 및 물적 자원이 소모되고 있다 (Kang et al., 2008; Lim et al., 2015). 또한 중금속은 유기오염물질과 달리 토양 내에서 분해가 되지 않고 축적되므로 생물농축 (Bio-concentration)으로 인한 피해가 다른 오염물질에 비해 큰 특징이 있다. 따라서 안전한 먹거리 생산을 위해서는 농경지 내 중금속오염에 대한 장기적인 모니터링이 필요하다. 중금속오염원들은 광물 자원 개발, 금속 가공 및 제련 등과 같은 인위적인 산업활동이 주원인으로 알려져 있다 (Chen et al., 2014; Zhang et al., 2015). 따라서 광산이나 산업공단 인근에 위치한 취락농경지는 일반농경지 (광산 또는 산업공단으로부터 지리적으로 오염원 유입이 없거나 적은 농경지)에 비해 중금속오염으로 인한 피해가 크게 우려된다 (Yang et al., 2001).

우리나라는 1996년 토양환경보전법으로 토양오염 우려기준과 대책기준이 설정된 이후로 1999년부터 매년 생활하수 유입지, 공단 또는 광산인근 농경지에 대한 중금속 8종 (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)을 집중적으로 모니터링하고 있다. Jeon et al. (2010)은 경남에 위치한 광산인근 농경지에 대한 토양 및 농작물 오염을 평가하였고, Yom et al. (2009)은 충남 제철소 주변 토양의 중금속 오염도와 분포형태에 관한 연구를 보고하였다. 또한 Jung et al. (2004)은 우리나라 중부지역의 과수원 토양 내 중금속함량에 대해 보고한 바 있다. 다수 연구들을 통하여 광산 또는 공단인근 토양 내 중금속함량과 작물체 내 중금속함량 간의 정비례적 상호관계가 밝혀졌음에도 불구하고 (Kwon et al., 2015), 전국단위 규모의 모니터링 사례는 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 2018년 우리나라 강원 (GW), 충남 (CN), 전남 (JN) 그리고 경남 (GN) 지역의 공단인근 농경지 내 중금속 8종에 대해 전함량을 조사하여 분포상태 및 오염상태를 평가하고, 최종적으로 안전한 먹거리 생산을 위한 취락농경지 관리의 기초자료로 활용하고자 연구를 수행하였다.

Materials and Methods

필지 선정 및 시료 채취 2018년 강원 (GW), 충남 (CN), 전남 (JN), 경남 (GN) 지역에서 지역별로 각 15개씩 총 60개 공단 (Fig. 1)을 선정하였다. 공단 선정은 유형과 지목, 농경지의 분포, 주변 환경 등을 감안하여 수행하였다. 공단으로부터 500 m 내에서 5개 지점, 500 m - 1 km 부근에서 5개 지점, 각 공단별 총 10개 지점에서 표토 (0 - 15 cm)를 채취하였다. 토양시료의 채취개수는 60개의 공단에서 표토와 심토를 10개씩 채취하여 총 1,200개였다.

Fig. 1. Location of investigated provinces in Republic of Korea and name of investigated industrial complexes. GW, Gangwon; CN, Chungnam; JN, Jeonnam; GN, Gyeongnam.

토양시료 전처리 및 분석 토양시료는 국립농업과학원에서 발간한 『토양화학분석법』 (NAAS, 2010)을 따라 해당 필지를 대표할 만한 곳 임의지점 5개를 선정하여 토양을 채취 한 후 혼합하였다. 채취한 토양은 풍건시킨 후 2 mm 체에 통과시켜 중금속 분석을 위한 토양시료로 사용하였다. 분석한 중금속 항목은 환경부 (Ministry of Environment) 에서 고시한 8종 (수은, 비소, 니켈, 아연, 구리, 카드뮴, 크롬, 납)이다. 토양의 중금속 분석은 토양오염 공정시험법에 준하여 왕수환류냉각 분해법 (MOE, 2013)으로 전처리 한 후에 ICP 발광광도법으로 중금속 전 함량을 측정하였다.

오염도 평가 지역별 공단인근 농경지 토양의 중금속 오염도를 평가하기 위하여 Hakanson (1980)이 제안한 오염계수 (C_f)와 오염도 (C_d) 및 Kloke (1979)가 고안한 상대적인 지수로 오염도를 표현하는 오염지수 (Pollution index, PI)를 산출하여 지역별 중금속 오염도를 비교 평가하였다.

$$C_f = \frac{\text{중금속 평균 농도}}{\text{배경토양의 중금속 농도}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{오염지수 (PI)} = \frac{\sum \left(\frac{\text{토양의 중금속 농도}}{\text{중금속 허용한계치}} \right)}{\text{분석 중금속 항목의 개수}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Table 1. Assessment method of heavy metal contamination and classification by contamination level.

Method	Classification	Contamination level
$C_f^\dagger$	$C_f < 1$	Low
	$1 \leq C_f < 3$	Moderate
	$3 \leq C_f < 6$	Considerable
	$C_f \geq 6$	Very high
$C_d^\ddagger$	$C_d < 8$	Low degree
	$8 \leq C_d < 16$	Moderate degree
	$16 \leq C_d < 32$	Considerable degree
$PI^\S$	$PI < 1$	Uncontaminated
	$PI \geq 1$	Contaminated

[†] C_f , Contamination factor.

[‡] C_d , Contamination degree.

[§] PI , Pollution index.

상관분석 공단인근 농경지 토양 내 중금속 항목 간 상관분석을 위하여 SAS 9.4의 “Proc corr”을 사용하여 상관 계수 (r) 값을 산출하고, 유의수준 (significance level, α) 0.05에서 검정하였다. p-value가 0.05 미만인 것은 *, 0.01 미만은 **, 0.0001 미만은 ***로 표기하였다.

Results and Discussion

조사지역의 중금속 함량 강원, 충남, 전남, 경남지역의 공단인근 농경지 표토와 심토의 중금속 함량 및 대한민 국 농토양 (일반농경지)의 중금속 5종 (Cu, Pb, Zn, Ni, As)의 평균 중금속 함량을 Table 2에 나타내고 비교하였다. 전 남 지역에서 Cu, Zn, Ni 평균함량은 일반농경지에 비해 낮았지만, 다른 3지역은 모두 높은 것으로 나타났다. Pb와 As 는 4개 지역에서 평균함량이 일반농경지에 비해 모두 높게 나타났다. 공단인근 농경지에 토양 중금속 항목 중 Cd, Cu, Pb, Ni, Hg는 농경지에서의 중금속의 토양오염 우려기준 (토양환경보전법) 이하 수준이었다. 그러나 전체 600지점 중에서 Pb은 1개 지점 (심토: 213 mg kg⁻¹), Zn은 1개 지점 (표토: 376.4 mg kg⁻¹, 심토: 325.9 mg kg⁻¹), As는 6개 지점 (표토: 73.53, 29.56, 27.72, 47.24 mg kg⁻¹, 심토: 27.78, 34.02, 31.13, 47.76, 47.45 mg kg⁻¹)에서 우려기준을 초과하 였고, 1개 지점에서 Zn (표토: 374.3 mg kg⁻¹, 심토: 321.1 mg kg⁻¹)와 As (표토: 35.15 mg kg⁻¹, 심토: 31.85 mg kg⁻¹)가 동시에 우려기준을 초과하였다. Pb과 Zn의 우려기준 초과지점을 포함하는 산업단지의 주요 업종은 전기·전자였으 며, As의 우려기준 초과지점을 포함하는 산업단지의 주요 업종은 전기·전자뿐만 아니라 섬유, 제조, 기계, 운반 등이 포함되어 있었다. 우려기준을 초과한 9개 지점 중 7개 지점의 공단 주요 업종은 전기·전자를 포함하고 있었다.

중금속은 식물 영양성분과 함께 작물조직에 축적되어 생육 피해를 보일 뿐만 아니라 섭취할 경우 인체에 축적되어 만성적인 위해성을 나타내는 특징이 있다 (Lee et al., 2012). 벼에서 As는 비필수 금속이온이지만 농도가 높을 경우 필수 금속이온인 Cu의 뿌리 흡수를 저해한다고 보고된 바 있고 (Jung et al., 2015), 콩 생육과 관련하여 Pb, Zn, As, Cu, Cd의 토양 내 농도와 유의미한 부의 상관관계가 있다고 보고된 바 있다 (Lee et al., 1996). Pb은 인체 필수요소는 아니지만 과다 섭취 시 신경계, 골격계, 내분비계, 면역체계 등을 손상시킬 수 있으며 (Zhang et al., 2012), As는 급성

Table 2. Heavy metal concentration of total soil sample (topsoil & subsoil)[†] around industrial complexes.

Province	Elements	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Cr	As	Hg
----- mg kg ⁻¹ -----									
GW	Mean	0.54	18.0	47.5	90.9	16.0	29.0	8.21	0.046
	SD	0.24	11.4	25.1	46.2	8.9	16.4	7.95	0.049
	Max	2.22	66.8	213.8	376.4	62.1	136.4	73.53	0.525
	Min	0.15	0.6	11.4	35.0	2.7	4.9	0.00	0.002
	Median	0.54	15.6	45.6	79.1	14.4	26.3	6.41	0.034
CN	Mean	0.50	15.1	21.3	76.6	17.3	63.9	5.65	0.006
	SD	0.27	8.9	14.5	32.3	12.7	45.8	3.27	0.054
	Max	1.47	54.3	114.1	264.8	90.4	284.2	22.73	0.920
	Min	0.05	0.3	6.2	19.7	1.3	6.3	0.09	0.000
	Median	0.41	13.4	15.9	68.3	15.2	59.1	5.46	0.000
JN	Mean	0.14	8.6	43.9	43.5	8.2	19.8	5.06	0.005
	SD	0.19	5.6	11.5	19.2	5.1	11.7	3.66	0.017
	Max	1.61	49.1	113.9	197.0	34.9	79.8	20.54	0.150
	Min	0.02	1.4	6.2	19.7	0.0	3.6	1.08	0.000
	Median	0.10	7.6	43.0	39.4	6.8	16.8	3.84	0.003
GN	Mean	0.25	41.8	24.1	100.6	22.4	38.2	6.40	0.040
	SD	0.39	26.2	23.3	47.6	11.1	16.6	6.89	0.030
	Max	2.88	138.0	175.8	275.3	88.6	98.0	47.45	0.237
	Min	0.00	7.3	3.4	18.5	4.4	7.8	0.00	0.000
	Median	0.12	34.4	17.8	94.6	19.7	33.1	3.36	0.034
Paddy land [‡]			14.9	16.7	56.8	14.0		3.68	
Warning criteria [§]		4	150	200	300	100		25	4

GW, Gangwon; CN, Cungnam; JN, Jeonnam; GN, Gyeongnam; SD, Standard deviation; Max, Maximum; Min, Minimum.

[†] Sample soil numbers are 1,200.

[‡] Average concentration of heavy metal in Korea paddy land (sample number 2,070). (2015).

[§] Ministry of environment, 2010.

및 만성적인 노출에 의해 심혈관이나 다른 체내 시스템에 대해 문제를 일으키며 나아가서는 암을 유발할 수도 있다 (Mazumder et al., 2000; Huang et al., 2015)고 보고된 바 있다. 하지만 작물 내 중금속 함량은 총 함량보다 유효태 함량에 따라 결정되기 (Kim et al., 2012) 때문에 우려기준을 초과한 농경지는 향후 중금속 유효태 함량 분석 및 식물체 분석이 필요할 것으로 판단된다.

지역 간 농도 비교 우려기준이 명시되어 있지 않은 Cr은 제외하고, 지역별 표토와 심토의 중금속 함량 그래프로 나타내었다 (Fig. 2). Cd는 강원과 충청이 전남과 경남에 비해 2배 이상 높은 함량을 보였으며, Cu의 경우에는 다른 지역에 비해 경남에서 높은 함량을 보였다. Pb는 강원과 전남 지역이 충청과 경남 지역에 비해 2.5배 수준 높았고, Zn과 Ni는 전남이 가장 낮은 것으로 나타났다. 경남지역의 경우 Cu와 Zn이 다른 지역에 비해 높은 농도를 보였는데, Cu와 Zn은 인공적으로 투입된 물질에 의한 영향을 받을 수 있고, 또한 비료와 농약의 과다사용으로 인해 농도가 올라갈 수 있다고 보고된 바 있다 (Yang et al., 2019). As는 전남에서 제일 낮고 강원이 높은 함량을 보였다. Hg는 강원과 경

Fig. 2. Comparison of heavy metal concentration for each province. The error bar above the bar is standard deviation. GW, Gangwon; CN, Chungnam; JN, Jeonnam; GN, Gyeongnam.

남이 충남과 전남에 비해 높은 것으로 나타났다. 섬유공장 인근의 토양의 경우 Pb와 Cu가 높고 (Deepali et al., 2010), 금속공장의 경우 Zn의 농도가 높다고 보고 (Vousta et al., 1996) 된 바 있는데, 본 연구에서는 Pb 우려기준을 초과한 지점에서 공단의 주 업종은 전기·전자, 기계였고, Zn, As의 경우 전기·전자, 섬유공장을 주 업종으로 하는 공단 인근에서 우려기준을 초과하였다. 본 연구에서 중금속 항목별 표토와 심토 간의 농도 차이는 크지 않았는데, 이는 Kim et al. (2016)의 연구결과와도 같은 결과로 지속적인 농업활동으로 인한 경운의 영향으로 판단된다.

조사지역의 중금속 함량 분포 토양환경보전법에 명시되어 있는 토양오염 우려기준을 근거로 조사지역의 공단 인근 농경지 토양에 중금속별 농도의 분포상태를 평가하였다. 공단인근 농경지 표토 600점과 심토 600점에 대해

Table 3. Distribution rate of heavy metal concentration in comparison with warning criteria in soil around industrial complexes.

Elements	Distribution rate							Warning Criteria
	1/20 >	1/15 >	1/10 >	1/5 >	1/2 >	WC > [†]	WC <	
	----- % -----							mg kg ⁻¹
Cd	42.4 [‡]	7.3	14.7	27.1	8.0	0.5	0.0	4
Cu	19.4	12.2	21.3	28.2	15.6	3.3	0.0	150
Pb	3.4	12.0	18.6	28.8	36.0	1.1	0.1	200
Zn	0.0	0.3	5.3	33.0	55.4	5.7	0.3	300
Ni	10.7	9.4	12.6	41.0	24.9	1.4	0.0	100
As	9.3	3.8	9.2	29.6	37.2	10.0	0.9	25
Hg	99.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	4

[†]WC, Warning criteria.[‡]Heavy metal concentration in soil/warning criteria × 100.

조사한 토양 중금속 농도를 토양오염 우려기준을 기준으로 1/5 미만, 1/10 미만, 1/15 미만, 그리고 1/20 미만 수준으로 구분 (Yoon et al., 2018)하고 각 시료의 농도 값에 해당되는 범위의 분포 비율을 Table 3에 나타내었다. 우려기준이 명시되어 있지 않은 Cr은 제외하였다. 공단 인근 농경지 토양에서 Cd은 우려기준 대비 1/20보다 작은 수준서 42.4%, 1/5 미만 수준에서 27.1%로 대부분 우려기준의 1/5 (0.8 mg kg⁻¹) 수준보다 낮은 것으로 나타났다. Cu는 1/5 미만과 1/10 미만 수준에서 각각 28.2%, 21.3%였고, Pb은 1/2 미만 과 1/5 미만 수준에서 각각 36.0%, 28.8%로 나타났다. Zn은 조사지점의 50% 이상이 우려기준 (300 mg kg⁻¹)의 1/5 수준 (60 mg kg⁻¹)보다 크고 1/2 수준 (150 mg kg⁻¹)보다 작은 범위에 분포되어 있었다. Ni은 조사지점의 약 40%가 10 - 20 mg kg⁻¹ 수준이었다. As는 Cr을 제외한 7종의 중금속 항목 중 우려기준에 근접한 농도 분포가 10.0%로 가장 높았으며, 1/2 미만 농도 수준에서도 37.2% 차지하였다. Hg은 다른 중금속 항목과 달리 대부분 우려기준 대비 1/20보다 작은 수준에서 99.2%로 나타나 토양 및 식물체에 미치는 영향은 가장 적을 것으로 판단된다.

조사지역의 중금속 오염지수 강원·충남·전남·경남지역의 산업단지 인근 중금속 오염도를 비교 파악하기 위하여 오염도 평가에 사용되는 여러 방법 중 오염계수 (Contamination factor, C_f)를 이용한 오염도(Contamination degree, C_d) 오염지수 (Pollution index, PI)를 선정하여 산출하였다. C_f 와 C_d 는 배경토양의 중금속 함량과 비교하여 조사 토양의 중금속 오염상태를 나타내는 방법 (Hakanson, 1980)으로 오염도 평가에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서의 배경토양은 국내 농경지의 중금속 농도 데이터 (Table 2)를 활용하였으며, 따라서 Cd과 Cr, Hg을 제외한 5가지 항목에 대하여 C_f 를 계산하고, PI (Kloke, 1979)도 같은 항목에 대하여 계산하여 비교하였다 (Table 4). 4개 지역의 중금속 항목별 C_f 값은 대부분 1이상 3이하로 중간오염계수 (Moderate contamination factor)를 나타내었다. 그 중 전남 지역은 Cu, Zn, Ni 항목에서 1미만의 값 (Low contamination factor)을 나타내어 산업단지 인근 농경지에서 다른 3지역에 비해 중금속 오염의 영향을 덜 받는 것으로 판단된다. 오염계수를 바탕으로 종합적인 오염도를 나타낸 C_d 로 비교하였을 경우, 강원과 경남은 중간오염 (Moderate degree of contamination) 수준이었고, 충남과 전남은 8미만의 값을 나타내어 낮은 오염 (Low degree of contamination) 수준이었다. 또한, 조사지역의 총 중금속 함량과 허용한 계치를 근거로 PI 산출 결과도 4개 지역 모두 1보다 작은 값을 나타내어 중금속에 오염되지 않은 지역으로 분류되었다.

Table 4. Contamination assessment using C_f^+ , C_d^+ and $PI^§$.

Province	C_f					C_d	PI
	Cu	Pb	Zn	Ni	As		
GW	1.2	2.8	1.6	1.1	2.2	9.0	0.23
CN	1.0	1.3	1.3	1.2	1.5	6.4	0.17
JN	0.6	2.6	0.8	0.6	1.4	5.9	0.14
GN	2.8	1.4	1.8	1.6	1.7	9.4	0.24

GW, Gangwon; CN, Cungnam; JN, Jeonnam; GN, Gyeongnam.

 $^+ C_f$, Contamination factor. $^+ C_d$, Contamination degree. $§ PI$, Pollution index.**Table 5.** Correlation matrix among 7 heavy metal in total soil samples.

	Cu	Pb	Zn	Ni	As	Hg
Cd	0.2588***	0.2497***	0.4774***	0.3556***	0.4173***	0.2169***
Cu		0.0387 ^{ns}	0.5856***	0.5928***	0.3955***	0.2081***
Pb			0.1442***	-0.0209 ^{ns}	0.3515***	0.1085**
Zn				0.3360***	0.3055***	0.2486***
Ni					0.3546***	0.1031**
As						0.2332***

ns, not significant; **, p -value < 0.01; ***, p -value < 0.0001.

중금속 항목 간 상관분석 조사시료의 중금속 항목 간 상관관계를 분석하여 Table 5에 나타내었다. 본 연구에서는 중금속 항목 간 대부분 양의 상관관계를 보였다. Cd은 다른 모든 중금속 항목과 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다는데, 특히 Zn (0.4774) 및 As (0.4173)와 상관관계가 다른 항목에 비해 더 강한 것으로 나타났다. Cu는 Pb를 제외한 모든 항목과 양의 상관관계가 있었고, 그 중 Zn (0.5856) 및 Ni (0.5928)과 강한 양의 상관관계를 보였다. 기존의 연구결과에서 Cu와 Zn은 강한 양의 상관관계가 있으며 인공적인 투입에 의한 영향이 크기 때문이라고 보고된 바 있는데 (Yang et al., 2019), 본 연구에서 Cu와 Zn이 강한 양의 상관관계가 나타난 것도 자연적으로 유입된 것이 아니라 공단으로부터 인공적으로 투입되었기 때문으로 판단된다.

Conclusions

우리나라 강원, 충남, 전남, 경남 지역의 공단 인근 농경지 중금속 농도 현황을 파악하고 오염도를 평가하기 위하여 공단인근 농경지 600지점의 토양시료를 채취하여 중금속 전함량 분석을 수행하였다.

지역별 공단 인근 농경지의 표토와 심토의 중금속 평균 농도 차이는 크지 않았으며, 우려기준보다 모두 낮게 나타났다. 중금속 오염도 평가 결과 우리나라 강원과 경남 지역의 오염도는 중간오염 수준, 충남과 전남 지역은 낮은 오염 수준인 것으로 나타났고, PI (Pollution index) 산출 결과 조사 지역 모두 중금속 비오염 (Uncontaminated) 지역으로 분류되었다.

조사지역의 중금속 항목 간 상관분석을 수행한 결과 대부분 항목 간 통계적으로 유의한 양의 상관관계가 있었으며, 다른 항목에 비해 Cu와 Zn 사이에서 좀 더 강한 양의 상관관계 ($r = 0.5856$)가 있는 것으로 나타났다. 본 연구결과는공단인근 농경지 관리의 기초 자료로 활용될 수 있다.

Acknowledgement

This study was supported financially by “Monitoring project on agri-environmental quality in Korea (Project No. PJ012505)”, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Chen, K., L. Huang, B. Yan, H. Li, H. Sun, and J. Bi. 2014. Effect of lead pollution control on environmental and childhood blood lead level in Nantong, China: an interventional study. *Environ. Sci. Tech.* 48(21):12930-12936.
- Deepali, K.K. and K. Gangwar. 2010. Metals concentration in textile and tannery effluents, associated soils and ground water. *NY Sci. J.* 3(4):82-9.
- Dong, J., Q.W. Yang, L.N. Sun, Q. Zeng, S.J. Liu, J. Pan, and X.L. Liu. 2011. Assessing the concentration and potential dietary risk of heavy metals in vegetables at a Pb/Zn mine site, China. *Environ. Earth Sci.* 64(5):1317-1321.
- Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Res.* 14:975-1001.
- Huang, L., H. Wu, and T.J. van der Kuijp. 2015. The health effects of exposure to arsenic-contaminated drinking water: a review by global geographical distribution. *Int. J. Environ. Health Res.* 25(4):432-452.
- Jeon, J.W., Y.S. Hong, and Y.H. Kim. 2010. Heavy metal contamination in soils and crops in the Daejeong mine area. *J. of the Korean Society for Environmental Technology.* 11(2):76-85.
- Jung, G.B., W.I. Kim, J.S. Lee, J.D. Shin, J.H. Kim, and S.G. Yun. 2004. Assessment on the content of heavy metal in orchard soils in middle part of Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 23(1):15-21.
- Jung, H.I., M.J. Chae, S.J. Kim, M.S. Kong, S.S. Kang, D.B. Lee, H.J. Ju, and Y.H. Kim. 2015. Effects of cadmium and arsenic on physiological responses and copper and zinc homeostasis of rice. *Korean J. Soil Sci. Fer.* 48(5):397-403.
- Kang, M., J.M. Park, and K.T. Kim. 2008. Diffusion characteristics of heavy metal pollution depend on distance from abandoned mines. *Journal of Engineering Geology.* 18(3):257-262.
- Kim, D.J., J.H. Park, and J.H. Lee. 2016. Assessment of selected heavy metal concentrations in agricultural soils around industrial complexes in southwestern areas of Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(5):524-530
- Kim, K.R., J.G. Kim, J.S. Park, M.S. Kim, G. Owens, G.H. Youn, and J.S. Lee. 2012. Immobilizer-assisted management of metal contaminated agricultural soils for safer food production. *J. Environ. Manage.* 102:88-95.
- Kloke, A. 1979. Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, and nickel in plants grown on contaminated soil: paper presented at United Nations-ECE Symposium.
- Kwon, J.C., H.J. Park, and M.C. Jung. 2015. Correlation of arsenic and heavy metals in paddy soils and rice crops around the Munmyung Au-Ag mines. *Econ. Environ. Geol.* 48(4):337-349.
- Lee, B.K. and I.H. Hoh. 2003. Analysis on heavy metal contamination in soils of the Ulsan area. *J. Korean Soc. Environ. Eng.* 25(11):1436-1447.

- Lee, J.H., J.Y. Kim, W.R. Go, E.J. Jeong, A. Kunhikrishnan, G.B. Jung, D.H. Kim, and W.I. Kim. 2012. Current research trends for heavy metals of agricultural soils and crop uptake in Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 31(1):75-95.
- Lee, J.P., N.K. Park, S.D. Park, B.S. Choi, and B.J. Kim. 1996. Effect of heavy metal contents in soils near old zinc-mining sites on the growth of and their uptake by soybean. *Korean J. Environ. Agric.* 15(3):275-281.
- Lim, G.H., K.H. Kim, B.H. Seo, and K.R. Kim. 2015. Heavy metal accumulation in edible part of eleven crops cultivated in metal contaminated soils and their bio-concentration Factor. *Korean J. Environ. Agric.* 34(4):260-267.
- Mazumder, D.N.G., R. Haque, N. Ghosh, B.K. De, A. Santra, D. Chakraborti, and A.H. Smith. 2000. Arsenic in drinking water and the prevalence of respiratory effects in West Bengal, India. *Int. J. Epidemiol.* 29(6):1047-1052.
- MOE (Ministry of Environment). 2013. Standard analytical methods for soil pollution. Ministry of Environment, Korea.
- NAAS, 2010. Methods of soil chemical analysis. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- Nabulo, G., S.D. Young, and C.R. Black. 2010. Assessing risk to human health from tropical leafy vegetables grown on contaminated urban soils. *Sci. Total Environ.* 408(22):5338-5351.
- Voutsas, D., A. Grimanis, and C. Samara. 1996. Trace elements in vegetables grown in an industrial area in relation to soil and air particulate matter. *Environ. Pollut.* 94(3):325-335.
- Yang, D., M. Wang, H. Lu, Z. Ding, J. Liu, and C. Yan. 2019. Magnetic properties and correlation with heavy metals in mangrove sediments, the case study on the coast of Fujian, China. *Mar. Pollut. Bull.* 146:865-873.
- Yang, J.E., H.J. Kim, and S.H. Jun. 2001. Fractionation and pollution index of heavy metals in the sangdong tungsten mine tailings. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 34(1):33-41.
- Yom, Y.K., S.K. Ji, S.H. Li, T.J. Cho, H.L. Jeon, B.K. Jang, and B.S. Son. 2009. Concentration of heavy metals in air and soil around the D iron-manufacturing company area in Chungnam, Korea. *J. of Environmental and Sanitary Engineering.* 24(1):25-32.
- Yoon, S.G., M.J. Chae, Y.H. Kim, M.S. Kong, H.I. Jung, S.C. Kim, M.S. Kim, S.J. Park, C.H. Lee, J.E. Yang, S.C. Kim, G.I. Kim, G.R. Kim, and G.B. Jung. 2018. Evaluation on heavy metal contents in agricultural soils around industrial complexes in Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 37(2):141-145.
- Zhang, X., L. Yang, Y. Li, H. Li, W. Wang, and B. Ye. 2012. Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China. *Environ. Monit. Assess.* 184(4):2261-2273.
- Zhang, X., T. Zhong, L. Liu, and X. Ouyang. 2015. Impact of soil heavy metal pollution on food safety in China. *PLoS One.* 10(8):e0135182.