Article

<https://doi.org/10.7745/KJSSF.2021.54.1.010>

pISSN : 0367-6315

eISSN : 2288-2162

Comparing Heavy Metal Pollution in Agricultural Field Located at the Industrial Complex with Calculation of Pollution Index

Young Kyu Hong¹, Jin Wook Kim², and Sung Chul Kim^{3*}

¹Ph.D. Candidate, Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Master's Degree, Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³Professor, Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*Corresponding author: sckim@cnu.ac.kr

ABSTRACT

Received: January 5, 2021

Revised: January 20, 2021

Accepted: January 20, 2021

ORCID

Sung Chul Kim

<https://orcid.org/0000-0002-2521-6516>

Heavy metal pollution in agricultural field has been concerned because of crop safety. The main purpose of this study was to evaluate heavy metal pollution in agricultural field by comparing two groups. The first group (A) was agricultural field where no industrial complex is located within 2 km radius and the second group (B) was that industrial complex is located within 2 km radius. A total of 330 soil samples in Chungbuk provinces of Korea. Heavy metal concentration was measured in both groups and pollution index was calculated based on measured heavy metal concentration and threshold value. Result showed that chemical properties of both groups were within optimum range of agricultural field set by national institute of agricultural science in Korea. Heavy metal concentration such as Cd and Pb was generally higher in group B compared to group A due to impact of industrial complex. However, concentration of As and Cu was higher in group A compared to B and we could assumed that abandoned mine located near at the sampling site in group A and over use of compost might be the source of higher heavy metal concentration in group A. Soil pollution index calculation showed that group B (0.21) was higher than group A (0.19) although no heavy metal species were exceeded threshold value in Korea. Among other chemical properties, soil organic matter and available phosphorus concentration were highly correlated with soil pollution index indicating that management of compost could be utilized to decrease heavy metal concentration in soil.

Keywords: Arable field, Compost, Heavy metals, Pollution index, Soil organic matter

Monitoring of heavy metal in agricultural field located near at the industrial complex.

Introduction

1960년대 이후 급진적인 산업성장으로 국내 많은 공업 및 산업단지가 들어서게 되었고, 산업단지 인근 농경지의 농작물 안전성에 대한 관심이 증대하였다. 이에 1996년, 정부차원의 친환경 농업육성정책을 추진하였으며, 같은 해 토양환경보전법을 제정하여 오염토양의 조사와 정화사업을 추진하여 왔다 (MOE, 1996). 그 후 1998년에는 친환경 농업 육성법을 제정하여 농업 자원 환경의 평가 및 실태조사를 실시하였다 (MAFRA, 1998).

농경지의 중금속 오염 발생 원인은 휴·폐광산에 의한 중금속 유입과 농업폐기물로 인한 토양오염 또는 과도한 농약의 사용 등 매우 다양하다. 또한 농산업단지로부터 유입되는 분진 또는 폐수 등이 주변 환경 내 중금속 오염의 원인으로 작용하기도 한다 (Oh et al., 2011; Ra et al., 2014). 한국산업단지공단 자료에 의하면 국내 산업단지 수는 2005년 전국 488개였으며, 2019년은 1,220개 산업단지가 지정 운영 중에 있다. 지정 면적은 2005년 670 km²에서 2019년 1,427 km²로 증가하였다 (KICOX, 2019).

농경지 중금속 오염에 관한 전국적인 모니터링은 1980년 Kim et al. (1982)의 한국 논토양 및 현미 중 중금속의 함량 연구를 시작으로 농경지 유형별로 조사가 지속되고 있다 (Kim et al., 1993; Jung et al., 1997, 2004a). 경기 북부 지역 산업단지 인근 농경지 중금속 함량 분석 결과 토양오염우려기준 (1 지역)을 초과하지 않았으며 (Park et al., 2017), 국내 주요 국가산업단지 주변 토양 분석 결과에서도 토양 우려 기준을 넘지 않는다고 보고되었다 (Jeong et al., 2015). 또한, 최근 경상도 (Kim et al., 2018), 강원, 충남, 전남, 경남 (Lee et al., 2019), 경기도 (Jeong et al., 2020)에 위치한 산업단지 인근 농경지에 대해 다양한 지수와 방법으로 중금속 오염도 조사 및 평가 결과가 보고되기도 하였다.

국외의 경우 나이지리아 Lagos city 공단 인근 지역과 주거지역 각각 3곳의 토양 내 중금속을 비교한 결과, 공단 인근 농경지의 토양 중금속 함량이 약 2배 가량 높았다 (Yusuf et al., 2002). 미국 Columbia에서는 농촌지역과 공단지역의 토양 중금속 오염도에 대한 연구를 실시하였으며, 공단지역 내 토양의 중금속 함량이 농촌지역보다 높다고 보고된 바 있다 (Aelion et al., 2009). 호주에서도 Port Kembla 공단 및 제련소 인근 토양 중금속 오염도에 대한 연구가 실시되었으며, 토양 내 중금속 농도가 공단 영향권 밖보다 공단 인근 토양에서 높게 나타났음을 보고 한 바 있다 (Martley et al., 2004).

중금속 오염 평가를 진행한 선행 연구들에서 총 중금속 분석을 통해 환경부에서 고시한 기준을 넘는지에 대해서 평가가 진행되어 왔으며, 다수의 지점에 대한 다양한 오염물질의 오염도를 평가하는데 한계가 있다 (Min et al., 2016). 반면에, 오염지표를 활용한 방법들은 토양의 위치적 특성들을 고려하여 유연한 오염도를 평가할 수 있으며, 단순 수치화 하여 비교 평가 할 수 있다는 장점이 있다 (Li and Yang, 2008; Lee et al., 2017)

본 연구에서는 복합적인 중금속 오염도를 평가하고 일반농경지와 취약농경지 간의 오염도를 비교하기 위해 Kloke 지수화 방법을 활용하였다 (Kloke, 1979). 2017년을 기준으로 충청북도에 위치한 일반 농경지와 산업단지 인근 취약 농경지를 대상으로 중금속 오염도 평가를 실시하였으며 지수화 방법을 활용하여 중금속 오염 우선 관리 지역을 선정 하였다.

Materials and Methods

시료 채취 충청북도에 위치한 일반농경지 (A) 토양 시료 채취 지점은 반경 2.0 km 이내에 산업단지가 없는 곳을 선정하였으며, 선정 지역은 Fig. 1-A에 나타내었다. 충청북도에 위치한 산업단지 인근 농경지인 취약농경지 (B) 시료

Fig. 1. Sample spot and example of site selection (A: non-industrial complex, B: industrial complex).

는 환경부와 농촌진흥청에서 진행하고 있는 중금속 오염도 조사 자료를 참고하여 15개 산업단지를 선정하였으며 (Fig. 1-A), 산업단지 반경 0.5, 1.0 km 이내에서 각 10 필지 채취하였다 (Fig. 1-B). 시료 채취 시기는 2017년 3 - 5월에 실시하였으며, 각 지점별 대표 시료는 한 필지에서 최소 5 - 10 개의 시료를 hand Auger를 사용하여 표토 (0 - 15 cm)를 채취하여 하나의 시료 백에 넣은 후 완전 혼합하여 분석에 사용하였다. 일반농경지는 논토양 1 필지, 밭토양 179 필지로 총 180 필지, 취약농경지는 논토양 83 필지, 밭토양 68 필지로 총 150필지를 채취하였다.

이화학적 특성 분석 토양의 화학적 특성 분석은 농촌진흥청 토양화학 분석법에 준하여 분석하였다 (NAAS, 2010). 채취한 시료는 풍건 (air dried) 후 2 mm (10 mesh) Sieve로 체거름 하여 사용하였다. 시료의 pH와 전기전도도 (EC)는 1:5 H₂O법을 이용하여 pH meter (MP220, METTLER TOLEDO)와 EC meter (Conductivity Meter S230, METTLER TOLEDO)를 이용하여 측정하였다. 토양유기물함량 (SOM)은 Walkley & Black법으로 하였고, 유효 인산 (Available P₂O₅)은 Bray No.1 방법으로 추출하여 몰리브덴 청법으로 발색시켜 UV spectrophotometer (UV-1800, SHIMADZU)로 측정하였다.

토양 내 중금속 전 함량 분석 토양의 중금속 분석은 토양오염 공정 시험법 (MOE, 2016)에 준하여 중금속 전 함량 분석법으로 왕수 분해 (Aqua regia)를 실시하였다. 분석 항목은 비소 (As), 카드뮴 (Cd), 구리 (Cu), 니켈 (Ni), 납 (Pb), 아연 (Zn) 총 6개 중금속 원소를 대상으로 실시하였다. 분석 전처리 과정으로 풍건한 토양시료를 0.15 mm (100 mesh)로 체 거름 한 후 토양 시료 3 g에 추출 용액 (HCl 21 mL와 HNO₃ 7 mL)을 넣은 후 2시간 정치하였다. 정치된 시료는 흑연 가열 판 (Block Heating Sample Preparation System, Ctrl-M Science)을 이용하여 105°C에서 2시간동안 가열하여 분해하였다. 분해된 시료는 Whatman No. 2 여과지를 이용하여 100 mL Vol-flask에 여과한 후 0.5 N HNO₃로 mess up 후 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer, ICAP 7000series, THERMO FISHER, USA)를 이용하여 측정하였다.

토양 오염도 평가 지수화 방법 토양 오염도 평가를 위해 Kloke (1979)가 제안한 오염도를 표현하는 soil pollution index (SPI)를 산출하여 중금속 오염도를 비교 평가하였다 (Eq. 1). 중금속 오염도의 기준 농도는 환경부의 제1지역

토양오염 우려 기준을 바탕으로 평가하였고, Table 1에 나타내었다.

$$SPI = \frac{\sum \frac{\text{Heavy metal concentration} \in \text{soil}}{\text{Korean soil warning standard}}}{\text{Number of heavy metal}} \quad (\text{Eq. 1})$$

통계분석 일반농경지와 취약농경지의 화학적 특성 분석 결과는 평균값과 표준편차 값을 제시하였다. 중금속 함량을 비교하기 위해 box plot을 이용하여 제시하였으며, 유의성 검증은 $p < 0.05$ 수준에서 t-test로 비교 분석하였다. 토양 이화학적 특성과 두 그룹 농경지의 중금속 함량에 대한 상관 관계를 Pearson's correlation coefficient를 구하였으며, 통계 분석은 SPSS 26.0 (Statistical package for social science, IBM)를 활용하여 비교하였다.

Results and Discussion

화학적 특성 일반 농경지 및 취약농경지에 대한 화학적 특성 결과는 Table 1에 나타내었다. 일반 농경지 180필지에 대한 분석 결과 pH는 평균 6.48, EC는 1.05 dS m^{-1} , 유기물 함량 2.37%, 유효 인산은 510.3 mg kg^{-1} 로 평가되었다. 산업단지 15개 지점에서 채취한 시료 총 150필지의 이화학적 특성 결과 pH는 평균 6.04, EC는 0.61 dS m^{-1} 이었고, 유기물 함량은 2.58%, 유효 인산 함량은 575.3 mg kg^{-1} 로 국내 논토양 및 밭토양의 적정 범위와 비교하였을 때, 두 농경지 모두 적정 범위 수준인것으로 평가되었다. pH, EC의 경우 일반 농경지보다 취약 농경지가 낮게 나타났으며, 유기물함량과 유효 인산의 경우 일반 농경지보다 취약 농경지 평균 함량이 높게 측정되었다.

중금속 오염도 분석 토양 내 잔류 중금속 분석의 정도 관리 (QA/QC)를 위해 표준 물질 (BAM-U112a, German)을 사용하여 회수율 검증을 하였다 (Table 2). 각 원소 별로 모든 원소에서 86.1 - 98.1%의 회수율을 보였으며, 이는 환경부의 표준 공정 시험법에서 고시한 70 - 130%의 범위를 충족하였다. 일반 농경지 180개 필지와 취약 농

Table 1. The result of soil chemical analysis (A: non-industrial complex, B: industrial complex).

	pH (1:5)		EC dS m^{-1}		SOM %		Av. P_2O_5 mg kg^{-1}	
	Range	mean $\pm$ SD	Range	mean $\pm$ SD	Range	mean $\pm$ SD	Range	mean $\pm$ SD
A	4.47 - 8.30	6.48 ± 0.78	0.10 - 7.15	1.05 ± 1.11	0.19 - 5.34	2.37 ± 1.06	9.81 - 2368.8	510.3 ± 401.1
B	4.51 - 7.85	6.04 ± 0.76	0.04 - 2.82	0.61 ± 0.51	0.24 - 6.64	2.58 ± 1.32	6.95 - 3162.4	575.3 ± 731.8
Paddy soil [†]	5.5 - 6.5		≤ 2.0		2.5 - 3.0		80 - 120	
Upland soil [†]	6.0 - 7.0		≤ 2.0		2.0 - 3.0		300 - 550	

[†]Optimum range of soil chemical properties set by National Institute of Agricultural Science, 2016.

Table 2. Recovery ratio of certified reference material (BAM-U122a).

Elements	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Concentration (mg kg^{-1})	10.1(10.3 [†])	3.91(4.12)	75.7(80.1)	8.7(10.1)	191.2(198.0)	178.7(198.0)
Recovery ratio (%)	98.1	94.9	94.5	86.1	96.6	90.3

[†]BAM-U122a certified values.

경지 150개 필지에 대한 총 중금속 함량에 대해 box plot으로 비교 평가하였다 (Fig. 2). 일반농경지의 토양 내 원소별 중금속 함량 분석 결과 일반 농경지 및 취약농경지 모두 우리나라 농경지 우려 기준 (As, 25; Cd, 4; Cu, 150; Ni, 100; Pb, 200; Zn, 300 mg kg^{-1})을 초과하지 않았으며 이는 충청도, 경기북부 산업단지 인근 농경지에 대한 중금속 함량 분석 결과 우려 기준을 초과하지 않았다는 선행연구와 같은 결과를 나타냈다 (Min et al., 2016; Choi et al., 2017; Park et al., 2017). 하지만 또 다른 선행연구에서는 산업단지 인근 농경지의 중금속 분석 결과 6필지에서 As, Cu가 우려 기준을 초과한 것으로 보고 (Kim et al., 2018)가 되어 지역별 중금속 오염도는 상이한 것으로 사료된다. Cd, Pb의 경우 취약농경지가 일반 농경지 보다 2.2배 (Cd), 1.5배 (Pb) 높게 측정되었으며, As, Cu, Ni, Zn의 경우 일반농경지가 취약 농경지 보다 1.6배 (As), 1.9배 (Cu), 1.1배 (Ni), 1.1배 (Zn) 높게 측정되었다. 취약농경지의 경우 국립농업과학원에서 2015년에 실시한 2,070점의 일반 농경지토양의 중금속 함량 분석값 (As, 3.68; Cd, 0.22; Cu, 14.9; Ni, 14.1; Pb, 16.7;

Fig. 2. The results of heavy metal concentration in agricultural soil. Dot mean is outliers that 1st quartile passing value (A: non-industrial complex, B: industrial complex).

Zn, 56.8 mg kg⁻¹)과 비교하였을 때 As는 1.1배, Cd 6.1배, Pb는 3.6배, Zn는 1.4배로 높게 측정되어 여전히 취약 농경지의 토양 내 중금속 함량이 일반 농경지에 비해 높은 것으로 조사되었다.

중금속 원소 별 일반농경지와 취약농경지의 통계적 유의성을 검정한 결과 As, Cd, Cu, Pb에서 통계적으로 유의미한 차이 ($p < 0.01$)를 보였으며, Ni ($p = 0.125$) 와 Zn ($p = 0.109$)에서는 통계적 유의성이 없는 것으로 평가되었다 (Fig. 2). As, Cu의 경우 일반농경지보다 취약농경지가 통계적으로 낮게 평가되었으며, Cd, Pb의 경우 일반농경지보다 취약농경지가 통계적으로 높게 평가되었다 ($p < 0.01$). 이는 As의 경우 지형적 특징에 의해 취약 농경지 보다 일반 농경지에서 높은 것으로 사료되며 Cu의 경우 높은 퇴비 시비에 따라 취약 농경지에 비해 일반 농경지에서 높은 것으로 판단된다(Ko and Kim, 2016).

본 연구에서 시료를 채취한 일반 농경지 중 As가 높은 16 필지 중 15필지가 0.2 - 3.0 km 이내에 폐광산이 위치한 지역이었으며, 이 중 10 필지는 1.5km 이내에 폐광산이 위치해 있었다. 이로 인해 취약농경지에 비해 As의 농도가 높은 것으로 판단된다. 주변에 위치한 폐광산 중 청원 광산의 경우 주로 금, 은을 채굴하였으며, 어상천 광산의 경우 동, 망간, 아연, 은을 채취, 백석, 부국석회, 석교석회, 적성, 울산리, 소백 광산 등은 비금속 채취가 이루어졌던 것으로 파악되었다. 금속 광산 인근 농경지는 주로 As, Cu, Pb 등으로 오염되어 있으며 국내외의 많은 선행 연구들이 광산 지역 중금속 오염에 대해 보고하고 있다 (Jung et al., 2004b; Liu et al., 2005, 2010; Kim et al., 2005, 2008; Lee et al., 2006; Zhuang et al., 2009; Shin et al., 2016).

Cu의 경우 취약 농경지에 비해 일반 농경지가 통계적으로 높게 나타났다. 이는 퇴비 시비량이 비교적 높은 밭토양의 시료 비율이 일반 농경지 99.4% (179 개), 취약 농경지 44.6% (67 개)로 퇴비에 함유된 Cu의 함량에 의해 일반 농경지의 Cu 함량이 취약 농경지에 비해 높은 것으로 판단된다. 최근 연구에 의하면 농경지 토양의 퇴비 시비량이 증가함에 따라 토양 내 Cu의 농도가 증가하였으며 이는 퇴비 내 함유된 Cu의 농도가 증가한 것으로 보고되고 있다 (Brock et al., 2006; Berenguer et al., 2008; Ko and Kim, 2016).

Cd과 Pb의 경우 일반농경지보다 취약농경지에서 높은 농도를 나타냈으며 이는 인근 산업단지의 영향으로 판단되었다. 취약 농경지 인근 산업단지 내 업종 조사 결과 기계 및 전자 업종 10 곳, 석유화학 5곳, 금속 및 비금속, 철강이 4 곳으로 조사되었으며 선행연구의 결과에서도 업종에 따라 다양한 중금속이 인근 토양이나 하천으로 유입될 수 있다고 보고 되었다 (Acosta et al., 2011; Hu et al., 2013). 특히 화학공장의 경우 인근 토양에서 Cd, Pb, As의 농도가 높았으며 (Nadal et al., 2009), 금속공장 인근에서는 Zn의 농도가 높았고 (Vousta et al., 1996), 다양한 업종과 도로가 밀집한 곳에서는 Cd, Pb의 농도가 높은 것으로 보고된 바 있다 (Acosta et al., 2011).

중금속 함량과 화학적 특성 상관관계 일반 농경지와 취약 농경지의 중금속 함량 분석 결과와 토양의 화학적 특성 간 상관관계를 분석하여 Table 3에 나타내었다. 취약농경지보다 일반농경지에서 높은 함량을 보였던 As, Cu의 경우 As는 유기물함량과 0.208 ($p < 0.01$)로 양의 상관 관계를 나타냈으며, Cu는 유기물과 유효 인산 함량이 각각 0.389, 0.314 ($p < 0.01$)로 양의 상관 관계를 보였다. Cu의 함량이 일반농경지에서 취약농경지보다 높은 양의 상관관계가 나타났다. 이는 많은 퇴비 시용으로 인해 토양 내 Cu의 함량이 높아지고, 양분(유기물, 유효 인산)의 함량이 높아지는 것이 원인으로 판단된다. 취약농경지의 Cd, Pb은 토양의 화학적 특성과 명확한 상관 관계를 보이지 않았으나, As, Cu, Zn 함량의 경우 As는 유기물의 함량이 0.230, Cu는 유기물 함량과 유효 인산 함량이 0.219, 0.288 ($p < 0.01$), Zn는 pH, 유효 인산이 0.335, 0.492 ($p < 0.01$), EC가 0.161 ($p < 0.05$)의 양의 상관관계를 보였다. 토양 내 pH 증가는 토양 내 양이온 흡착능이 증대되고, 이로 인해 pH와 유효태 중금속 원소 간의 음의 상관관계를 나타내는 연구 결과가

Table 3. Correlation of chemical properties of soils with heavy metal concentration (A: non-industrial complex, B: industrial complex).

	As		Cd		Cu		Ni		Pb		Zn	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
pH	0.094	0.042	-0.034	-0.090	0.046	0.098	0.003	-0.122	0.058	-0.125	0.180*	0.335**
EC	0.096	0.057	0.028	0.037	0.048	0.149	0.035	0.096	-0.085	0.001	0.112	0.161*
SOM	0.208**	0.230**	0.087	-0.033	0.389**	0.219**	0.231**	0.131	0.112	-0.022	0.381**	0.097
Av. P ₂ O ₅	0.091	0.121	0.096	0.125	0.314**	0.288**	0.040	-0.060	-0.038	0.121	0.297**	0.492**

*Significant at $p < 0.05$, **Significant at $p < 0.01$.

Fig. 3. The calculation of soil pollution index (A: non-industrial complex, B: industrial complex).

보고 된 바 있으나 (Naidu et al., 1994; Hong et al., 2007; Kim et al., 2018), 본 연구에서는 총 중금속 함량으로 비교하여 상이한 결과가 나타난 것으로 판단된다.

중금속 오염도 지수화 평가 토양 시료의 총 중금속 함량에 대한 지수화 평가 결과는 Fig. 3에 정리하였다. 일반 농경지의 경우 평균 0.19 (range, 0.08 - 0.51) 였으며, 이러한 결과는 Lee et al. (2017)의 관행 과수 농가의 토양 중금속 오염도 평가 실시 결과 평균이 0.14 (0.03 - 0.34)로 평가된 결과와 비슷하게 나타났다. 취락농경지의 지수화 평가 결과 평균 0.21로 나타났으며, 범위는 0.10 - 0.41로 나타났다. 이는 국내 산업단지 인근 농경지에 대한 중금속 오염도 지수화 평가를 실시한 선행 연구 결과 Min et al. (2016)은 충청도에서 0.03 - 0.27 범위로 나타났으며, Lee et al. (2019)은 강원, 충남, 전남, 경남 지역에 대해 0.23, 0.17, 0.14, 0.24로 나타났다. 또한, Kim et al. (2018)은 경상도 10 지역에서 0.5 이하로 본 연구 결과와 비슷한 결과로 보고 된 바 있다. 본 연구 결과에서 취락농경지가 일반 농경지보다 평균적으로 높은 지수화 값을 보였으며, 총 중금속 함량으로 비교 평가하는 것 보다 지수화를 통해 비교 평가 후 취락 농경지에 대한 관리가 필요하다는 것을 시사한다.

Conclusion

본 연구에서는 일반농경지와 산업단지 인근 농경지인 취락농경지에 대해 중금속에 대한 총 중금속 함량을 분석하고, 지수화 방법을 활용하여 오염도를 비교 평가하였다. As, Cu의 경우 일반농경지보다 취락농경지가 통계적으로 낮

게 평가되었으며, Cd, Pb의 경우 일반농경지보다 취약농경지가 통계적으로 높게 평가되었다 ($p < 0.01$). As의 경우 인근 폐광산으로 인해 취약 농경지 보다 일반 농경지에서 높게 나타난 것으로 파악되며, Cu의 경우 많은 퇴비 시비로 인해 취약농경지에 비해 일반 농경지에서 높은 것으로 판단된다. 취약농경지에서 Cd와 Pb 함량이 높은 원인으로 산업단지 내 업종 조사 결과 기계 및 전자 업종 10 곳, 석유화학 5곳, 금속 및 비금속, 철강이 4곳으로 조사되었으며 업종에 따라 다양한 중금속이 인근 토양이나 하천으로 유입으로 인한 것으로 사료된다. 지수화를 통한 오염도 비교 평가 결과 일반 농경지 (0.19)보다 취약 농경지 (0.21)가 높은 것으로 평가되었다. 지수화 결과를 통해 비교하였을 때 취약 농경지가 일반농경지보다 SPI 지수가 높은 것으로 나타났다. 본 연구결과를 통해 산업단지 인근 취약농경지에 대한 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 사료되며, 관리 방안의 기초 자료로 활용할 수 있다고 판단된다.

Acknowledgment

This study was supported financially by a grant from the research project (PJ01250527) of National Institute of Agricultural Sciences, Republic of Korea.

References

- Acosta, J.A., A. Faz, S. Martínez-Martínez, and J.M. Arocena. 2011. Enrichment of metals in soils subjected to different land uses in a typical Mediterranean environment (Murcia city, southeast Spain). *Applied Geochemistry*. 26(3):405-414.
- Aelion, C.M., H.T. Davis, S. McDermott, and A.B. Lawson. 2009. Soil metal concentrations and toxicity: associations with distances to industrial facilities and implications for human health. *Sci. Total Environ.* 407:2216-2223.
- Berenguer, P., S. Cela, F. Santiveri, J. Boixadera, and J. Lloveras. 2008. Copper and zinc soil accumulation and plant concentration in irrigated maize fertilized with liquid swine manure. *Agronomy Journal*. 100(4):1056-1061.
- Brock, E.H., Q.M. Ketterings, and M. McBride. 2006. Copper and zinc accumulation in poultry and dairy manure-amended fields. *Soil Science*. 171(5):388-399.
- Choi, W.S., Y.K. Hong, K.J. Min, K.J. Kim, and S.C. Kim. 2017. Evaluating soil respiration as indicator of heavy metal pollution in agricultural field. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50(5):472-481.
- Hong, C.O., J. Gutierrez, S. W. Yun, Y. B. Lee, C. Yu, and P. J. Kim. 2007. Heavy metal contamination of arable soil and corn plant in the vicinity of a zinc smelting factory and stabilization by liming. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 56:190-200.
- Hu, Y., X. Liu, J. Bai, K. Shin, E.Y. Zeng, and H. Cheng. 2013. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization. *Environmental Science and Pollution Research*. 20(9):6150-6159.
- Jeong, S.S., H.S. Kim, S.P. Lee, S.Y. Choi, J.E. Lee, S.C. Kim, and J.E. Yang. 2020. Comparison of pollution indices in assessing the heavy metal(loid)s pollution of arable soils adjacent to industrial complex in Gyeonggi-do. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 53(4):614-625.
- Jeong, T.U., E.J. Cho, J.E. Jeong, H.S. Ji, K.S. Lee, P.J. Yoo, G.G. Kim, J.Y. Choi, J.H. Park, S.H. Kim, J.S. Heo, and D.C. Seo. 2015. Soil contamination of heavy metals in national industrial complexes, Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 34(2):69-76.
- Jung, G.B., W.I. Kim, J.S. Lee, J.D. Shin, J.H. Kim, and S.G. Yun. 2004a. Assessment on the content of heavy metal in orchard soils in middle part of Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 23(1), 15-21.

- Jung, M.C., M.Y. Jung, and Y.W. Choi. 2004b. Environmental assessment of heavy metals around abandoned metalliferous mine in Korea. *Korea Soci. of Econ. and Environ. Geol.* 37(1):21-33.
- 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.
- KICOX. 2019. National industrial complex status statistical table(19.4 Quarter). Korea Industrial Complex Corporation, Korea.
- Kim, B.Y., K.S. Kim, and J.K. Cho. 1982. Survey on heavy metals in paddy soil and brown rice in Korea. *Ann. Report of Agr. Exp. Research* 24, 51-57.
- Kim, B.Y., K.S. Kim, J.S. Lee, and S.H. Yoo. 1993. Survey on the natural heavy metal contents in fruits and orchard soils in Korea, *Korean J. Soil Sci. Fert.* 35(2), 280-290.
- Kim, J.Y., K.W. Kim, J.S. Ahn, I. Ko, and C.H. Lee. 2005. Investigation and risk assessment modeling of As and other heavy metals contamination around five abandoned metal mines in Korea. *Environ. Geochemistry and Health.* 27:193-203.
- Kim, S., H.J. Kwon, H.K. Cheong, K. Choi, J.Y. Jang, W.C. Jeong, D.S. Kim, S. Yu, Y.W. Kim, K.Y. Lee, S.O. Yang, I.J. Jhung, W.H. Yang, and Y.C. Hong. 2008. Investigation on health effects of an abandoned metal mine. *Korean J. Medical Sci.* 23:452-458.
- Kim, Y.G., H.H. Lee, H.J. Park, and C.O. Hong. 2018. Assessment of heavy metal(loid)s pollution in arable soils near industrial complex in Gyeongsang provices of South Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 51(2):128-141.
- Kloke, A. 1979. Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, and nickel in plants grown on contaminated soils, United Nations-ECE symposium, Geneva. 51-53.
- Ko, H.J. and K.Y. Kim. 2016. Heavy metals contents and chemical characteristics in compost from animal manures. *Korean J. Soc. Occupational and Environ. Hygiene.* 26(2):170-177.
- Lee, H.H., K.K. Kim, Y.B. Lee, Y.S. Kwak, B.G. Ko, S.B. Lee, C.K. Shim, and C.O. Hong. 2017. Comparison of heavy metal(loid)s contamination of soil between conventional and organic fruit farms. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50(5):401-408.
- Lee, S.W., B.T. Lee, J.Y. Kim, K.W. Kim, and J.S. Lee. 2006. Human risk assessment for heavy metals and As contamination in the abandoned metal mine areas, Korea. *Environmental Monitoring and Assessment.* 119:233-244.
- Lee, T.G., M.S. Kong, E.J. Lee, H.I. Jung, Y.H. Kim, G.B. Jung, J.E. Yang, S.C. Kim, G.I. Kim, G.R. Kim, and M.J. Chae. 2019. Assessment of heavy metal concentrations in the arable soils near industrial complexes in Gangwon, Chungnam, Jeonnam, and Gyeongnam provinces of South Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 52(4):541-550.
- Li, M.S. and S.X. Yang. 2008. Heavy metal contamination in soils and phytoaccumulation in a manganese mine wasteland, South China. *Air Soil Water Res.* 1:31-41.
- Liu, C.P., C.L. Luo, Y. Gao, F.B. Li, L.W. Lin, C.A. Wu, and X.D. Li. 2010. Arsenic contamination and potential health risk implications at an abandoned tungsten mine, southern China. *Environ. Pollution.* 158:820-826.
- Liu, H., A. Probst, and B. Liao. 2005. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China). *Sci. Total Environ.* 339:153-166.
- MAFRA. 1998. Fostering eco-friendly agriculture. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Korea.
- Martley, E., B.L. Gulson, and H.-R. Pfeifer. 2004. Metal concentrations in soils around the copper smelter and surrounding industrial complex of Port Kembla, NSW, Australia. *Sci. of the total Environ.* 325:113-127.
- Min, K.J., Y.K. Hong, W.S. Choi, D.B. Kim, and S.C. Kim. 2016. Assessment of heavy metal (loid) pollution using pollution index in agricultural field adjacent to industrial area. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(6):768-775.
- MOE. 1996. Soil environment conservation act. Ministry of Environment, Korea.
- MOE. 2016. Standard analysis methods for soil pollution. Ministry of Environment, Korea.

- NAAS (National Institute of Agricultural Sciences). 2010. Soil chemical analysis method. National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon, Korea.
- Nadal, M., M. Mari, M. Schugmacher, and J.L. Domingo. 2009. Multi-compartmental environmental surveillance of a petrochemical area: levels of micropollutants. *Environment International*. 35(2):227-235.
- Naidu, R., N.S. Bolan, R.S. Kookana, and K.G. Tiller. 1994. Ionic strength and pH effects on the adsorption of cadmium and the surface charge of soils. *Eur. J. Soil Sci.* 45:419-429.
- Oh, S.J., S.C. Kim, T.H. Kim, K.H. Yeon, J.S. Lee, and J.E. Yang. 2011. Determining kinetic parameters and stabilization efficiency of heavy metals with various chemical amendment. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 44(6):1064-1070.
- Park, J.H., K.A. Kwon, E.H. Jung, J.K. Kim, J.Y. Kim, and J.K. Oh. 2017. A study on soil contamination investigation of farmland around industrial areas in northern Gyeonggi province. *J. Environ. Health Sci.* 43(5):393-400.
- Ra, K.T., J.K. Kim, J.M. Lee, S.Y. Lee, E.S. Kim, and K.T. Kim. 2014. Characteristics and risk assessment of heavy metals in the stormwater runoffs from industrial region discharged into Shihwa lake. *Korean J. Marine Environ. and Energy*. 17(4):283-296.
- Shin, J.H., J.H. Yu, Y.S. Jeong, S.Y. Kim, S.M. Koh, and G.S. Park. 2016. Spectral characteristics of heavy metal contaminated soils in the vicinity of Boksu mine. *J. Miner. Soc. Korea*. 29(3):89-101.
- Vousta, D., A. Grimanis, and C. Samara. 1996. Trace elements in vegetables grown in an industrial area in relation to soil and air particulate matter. *Environmental Pollution*. 94(3):325-335.
- Yusuf, A.A., T.O. Arowolo, and O. Bamgbose. 2002. Cadmium, copper and nickel levels in vegetables from industrial and residential areas of LAGOS city, Nigeria. *Global J. Environ. Sciences*. 1(1):1-6.
- Zhuang, P., M.B. McBride, H. Xia, N. Li, and Z. Li. 2009. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, south China. *Sci. Total Environ.* 407:1551-1561.