

Research Article



CrossMark

Open Access

국내 토양오염물질 분포 특성 및 중금속 오염도 평가

이종철^{1†}, 강민우^{1†}, 최규혁¹, 오세진¹, 김동진², 이상수^{1*}

¹연세대학교 환경에너지공학과, ²강원대학교 환경연구소

Assessment of Soil Pollutant Distribution Characteristics and Heavy Metal Pollution in Korea

Jong Cheol Lee^{1†}, Min Woo Kang^{1†}, Gyu Hyuk Choi¹, Se Jin Oh¹, Dong Jin Kim² and Sang Soo Lee^{1*} (¹Department of Environmental & Energy Engineering, Yonsei University, Wonju 26493, Korea, ²Environmental Research Institute, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea)

Received: 17 February 2022/ Revised: 15 March 2022/ Accepted: 19 March 2022

Copyright © 2022 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Jong Cheol Lee
<https://orcid.org/0000-0002-0417-2155>

Min Woo Kang
<https://orcid.org/0000-0003-1638-9367>

Gyu Hyuk Choi
<https://orcid.org/0000-0001-9469-1380>

Se Jin Oh
<https://orcid.org/0000-0002-7953-6216>

Dong Jin Kim
<https://orcid.org/0000-0002-7784-4928>

Sang Soo Lee
<https://orcid.org/0000-0001-7096-898X>

Abstract

BACKGROUND: Heavy metals discharged from various sources contaminate the soil and water and the residuals can persistently be accumulated. In this study, the concentration of soil heavy metals was assessed over the whole regions of Korea based on the contamination factor and the geoaccumulation index.

METHODS AND RESULTS: The data of averaged concentrations of heavy metals and fluorine were collected from the Korean Statistical Information Service (KOSIS) and the research papers published. In order to classify the levels of heavy metal concentration, the contamination index, including the contamination factor and the geoaccumulation index, based on the relative ratio of the actual concentration of heavy metals in the soil to the back-

ground concentration was calculated. In addition, the distribution of heavy metals in soils was visualized by using the geographic information system (GIS). As a result, the Cd contamination in the soils was the most concerned.

CONCLUSION(S): This study very roughly indicated the outline of heavy metal concentration over the whole regions of Korea. The change in heavy metals' concentration over the time should further be monitored and the larger data of heavy metal contamination are needed for better understanding in the future.

Key words: Assessment, Contamination level, GIS, Heavy metal, Monitoring

서론

중금속에 의한 토양오염은 광산, 산업시설, 화력발전소 및 군사시설 등에서 배출되는 오염물질에 의해 광범위하게 발생하고 있으며, 토양 건전성, 농업 생산성 및 공중 보건에 악영향을 미치고 있다[1,2]. 환경 중의 높은 중금속 농도는 독성을

[†]These authors contributed equally this work.

* Corresponding author: Sang Soo Lee

Phone: +82-33-760-2457; Fax: +82-33-760-2571;

E-mail: cons@yonsei.ac.kr

나타내며, 비가역적 특성에 따라 주변 환경에 지속적으로 축적되기 때문에 환경부에서는 2011년부터 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr, Zn, 및 Ni를 포함한 총 8종을 토양오염 중금속으로 지정·관리하고 있다.

중금속과 같은 무기성 오염물질은 높은 이동성으로 인해 주변 수계로 쉽게 유입되기 때문에 주변 생태계에 끼치는 악영향이 매우 크다[3]. 또한, 토양 내 중금속은 거의 생분해가 되지 않고 잔류하여 축적되기 때문에 식물과 미생물에 영향을 미친다[4-6]. 중금속으로 오염된 농작물의 경우 섭취를 통해 쉽게 인체에 흡수·축적되어 발암, 신경독성, 고혈압, 유전자 변이 등 다양한 질환을 유발할 수 있다[5].

환경부 조사 결과에 따르면 국내에는 약 5,200개 이상의 광산이 광범위하게 분포되어 있고, 이 중 약 2,000개가 휴폐 금속광산으로 구분된다. 현재는 금속 광산의 약 80% 이상이 운영을 중단한 상태이며, 광산 주변에는 Cd, Cu, Pb 및 Zn 등과 같은 중금속을 함유한 광산 폐기물이 다량 잔존하고 있어 광산 인근 주거지 및 농경지 오염으로 이어질 수 있다[7]. 군사시설의 경우 Cd, Pb, Cu 및 Cr 과 같은 중금속이 토양에 다량 축적되어 인근 지역의 토양 및 수질 오염의 원인이 되고 있다[8]. 또한, 화력발전소의 석탄 연소로 인해 PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) 및 중금속(Cd, Cu, Cr, Zn 및 Ni 등)과 같은 오염물질이 배출되고 있으며, 발전소 주변 수질 및 토양에 축적되어 환경 오염의 주요 원인으로 보고된 바 있다[9].

불소는 중금속과 마찬가지로 국내 토양오염의 원인이 되고 있다. 주로 광산, 산업시설, 석탄 생산 등 인위적인 원인으로 인해 발생하며, 불소가 풍부한 암석과 퇴적물의 풍화 과정에 의해 자연환경에서도 다량 발생한다. 불소는 토양에 축적되거나 지하수로 유입되어 농작물이나 식수 섭취를 통해 인체에 흡수되며, 장기간 불소를 섭취하게 되면 치아, 뼈, 연조직에 손상을 입히는 만성 중독이 발생할 수 있다[10].

수질 및 토양에 축적된 오염 물질 농도 감소를 위해 다양한 물리적, 화학적 및 생물학적 복원 방법이 사용되고 있다[5]. 그러나, 토양오염의 국지성과 지속성으로 인해 최근에는 지역별 중금속 농도에 따른 공간 분포 및 위험성 평가에 초점을 맞춘 연구가 증가하는 추세이다[11]. 현재 우리나라의 오염도 평가 방법은 토양에 함유된 오염물질 총량을 분석하여 토양오염우려기준에 따라 오염 여부를 평가하고 있으나, 기존 토양의 특성 반영이 되지 않아 정확한 오염도를 평가하기에는 한계가 있다. 반면, 토양 내 오염 농도와 배경 농도의 상대 비율로 산출된 값을 오염지수(contamination index)에 적용하여 해당 지역의 오염도를 산정하는 방법은 화학적 특성이 반영되어 보다 정확한 평가가 가능하다[12]. 지리정보시스템(Geographic Information System; GIS)을 통해 오염물질의 공간 분포 및 오염원 파악이 가능하며, 시각적 효과 및 지리학적 도출로 오염원 주변 토양의 오염도를 평가하고 있다[13,14].

본 연구는 토양오염을 유발할 수 있는 유해시설이 위치한 지역의 중금속 및 불소 농도를 조사하고, 중금속 오염 특성을

고찰하기 위해 오염지수(C_i , C_{deg} , I_{geo})를 사용하여 오염 수준을 산정 및 평가하고, 도식화하여 국내 토양오염 분포를 파악하기 위해 진행하였다.

재료 및 방법

데이터 수집

본 연구에서 사용된 국내 토양오염을 유발할 수 있는 유해시설이 위치한 지점별 중금속 및 불소 농도 데이터 2,512개는 국가통계포털(KOSIS)에서 제공하는 평균 토양오염농도를 사용하였고, 국내 산업단지 및 광산 등의 중금속 오염농도 330개는 통계자료와 발표된 연구논문에서 수집하여 사용하였다. 수집된 토양의 중금속 및 불소 농도는 토양환경보전법 상의 1 지역 기준과 비교하여 오염수준을 결정하였다.

오염계수 및 농집지수 산정

토양의 오염도는 지점별 농도값을 이용하여 오염도를 지수화할 수 있는 계산식을 이용하였다. 오염농도의 지수화는 Hakanson(1980)의 오염계수(contamination factor; C_f)와 Muller(1969)의 농집지수(geoaccumulation Index; I_{geo})를 참고하였고, 해당 지역의 배경 농도를 기반으로 외부에서 유입되는 중금속에 따라 오염도를 평가하는 방법이다.

토양 오염도 평가를 위한 오염계수는 식 (1)에 따라 산정하였다[15].

$$C_f = C_i / C_b \quad (1)$$

여기서, C_i 는 토양 내 특정 금속의 농도이고, C_b 는 금속 i 의 배경 농도이다. 금속 배경 농도는 2018년도 토양측정망 자연배경농도(Cd 0.13, Cu 17.57, As 5.38, Hg 0.04, Pb 18.53, Cr⁶⁺ 25.37 mg/kg)를 이용하였다[16]. 산출된 오염계수 값의 합으로 오염정도를 산정하기 위해 식 (2)에 대입된다[15].

$$C_{deg} = \sum C_f \quad (2)$$

C_f 와 C_{deg} (degree of contamination) 값에 따른 토양오염 수준의 분류는 Table 1과 같으며, 값이 클수록 토양의 오염 수준이 높다고 판단한다[16].

토양 금속 함량에 대한 농집지수는 식 (3)에 따라 산정하였다[17].

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{1.5 \times B_n} \quad (3)$$

여기서, C_n 은 토양 내 금속 농도를 나타내고, B_n 은 해당 금속의 배경 농도이다. 오염계수와 다르게 함수를 사용한 방법으로 0이하의 값이 산출되며 값이 1씩 증가할 때마다 오염도가 1단계씩 증가하고 7단계로 등급이 구분되어 있어 C_b

Table 1. Determination of soil quality using the contamination factor (C_f), the degree of contamination (C_{deg}), and the geoaccumulation index (I_{geo})(Hakanson, 1980; Muller, 1969)

Index	Class	Range	Soil quality
Contamination factor (C_f)	1	$C_f < 1$	Low contamination
	2	$1 < C_f < 3$	Moderate contamination
	3	$3 < C_f < 6$	Considerable contamination
	4	$C_f > 6$	Very high contamination
Degree of contamination (C_{deg})	1	$C_{deg} < 8$	Low contamination
	2	$8 < C_{deg} < 16$	Moderate contamination
	3	$16 < C_{deg} < 32$	Considerable contamination
	4	$C_{deg} > 32$	Very high contamination
Geoaccumulation index (I_{geo})	0	$I_{geo} \leq 0$	Practically uncontaminated
	1	$0 < I_{geo} < 1$	Uncontaminated to moderately contaminated
	2	$1 \leq I_{geo} < 2$	Moderately contaminated
	3	$2 \leq I_{geo} < 3$	Moderately to strongly contaminated
	4	$3 \leq I_{geo} < 4$	Strongly contaminated
	5	$4 \leq I_{geo} < 5$	Strongly to extremely contaminated
6	$I_{geo} \geq 5$	Extremely contaminated	

다 세분화된 평가가 가능하다[17]. I_{geo} 값에 따른 토양오염 수준의 분류는 Table 1과 같으며, 값이 클수록 토양의 오염 수준이 높다고 판단한다[18].

통계분석 및 분포 지도 작성

본 연구는 통계 소프트웨어 SAS 9.4 (SAS Institute Inc. Cary, NC, USA)를 사용하여 95% 오차범위에서 토양 중금속 농도 간의 상관관계를 분석하였으며, 국내 중금속 오염 지역의 공간적 분포 및 평가를 위한 지도는 ArcGIS pro 버전 2.8을 사용하여 작성하였다.

결과 및 고찰

지역별 토양 중금속 및 불소 농도 분석

본 연구에서 사용한 지역별 토양 중금속 및 불소의 평균 농도는 Table 2과 같다. 중금속 8종(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺, Zn 및 Ni)의 분석 결과 모든 조사지점에서 토양환경보전법 1지역의 기준을 초과하는 중금속은 없는 것으로 나타났다. 불소에 대한 평균 농도를 분석한 결과 R6 지역의 불소 농도가 419.52 mg/kg으로 토양환경보전법 1지역의 토양오염 우려기준(400 mg/kg)을 초과하였고, 이 외 지역은 0.000~350.758 mg/kg의 범위로 기준치보다 낮은 수준으로 나타났다. R6 지역은 다른 조사지역에 비해 선행연구논문 인용 비율이 높았고, 특히 산업단지가 다수 포함된 지역으로 산업단지로부터 배출되는 불소가 주변 토양에 지속적으로 축적되어 기준치를 초과한 것으로 판단된다. 또한, 중금속 평균 농도는 기준치를 초과하지 않았으나 지역별로 상이한 결과가 나타났는데, 이는 산업단지, 폐광산, 군사시설과 같은 지역 특이성이 기인하여 농도 차이가 발생한 것으로 보인다.

지점별 토양 중금속 농도 분석 및 분포

선행연구 논문을 통해 조사한 330지점 토양의 중금속 오염농도에서 중금속 6종(Cd, Cu, As, Hg, Pb 및 Cr⁶⁺)의 평균 농도를 분석한 결과 카드뮴 3지점, 구리 2지점, 비소 5지점, 납 5지점, 6가크롬 5지점에서 토양오염우려기준치를 초과하였고, 이 외 지점은 기준치보다 낮은 수준으로 나타났다. 총 330개 지역의 중금속 농도 및 분포 시각화를 위해 토양오염 지도를 작성하였으며(Fig. 1), 기준치를 초과한 일부 지점에서는 산업단지, 폐광산 및 군사시설 등과 같은 유해시설이 위치하여 오염원의 영향으로 인해 중금속 농도가 다른 지점들보다 상대적으로 높은 수준인 것으로 판단되었다.

상관관계 분석

중금속 농도 간의 관계를 평가하기 위해 상관계수 검정을 수행하였고(Table 3), 본 논문에서 조사된 중금속이 서로 밀접한 상관성이 있음을 보여주었다. Pb과 Hg($r=0.978$)에 대해 유의한 상관관계가 나타났고, 이어서 Cd과 Hg($r=0.913$)의 관계가 뒤따랐다. Cd, Cu, Hg, Pb와 같은 중금속 농도는 대부분 인위적인 영향을 많이 받기 때문에 유의미한 상관관계는 인간의 활동 및 산업 오염으로 인한 것을 의미한다[19].

오염계수에 의한 토양 중금속 오염도 평가

지점별 토양 중금속 농도의 오염계수에 대한 등급(class)별 분류는 Table 4과 같다. 330개 지점의 데이터를 오염계수 산정식을 통해 중금속 오염도를 평가한 결과 오염계수의 범위는 Cd 0-853.85, Cu 0-274.96, As 0-10293.68, Hg 0-6.2, Pb 0-1133.29, Cr⁶⁺ 0-3.59로 나타났다. Cd, Cu, As, Hg, Pb에서 각각 38(11%), 8(2%), 11(3%), 1(1%), 13(4%)개

Table 2. Average concentration of heavy metals and fluorine in topsoils classified by regions (KOSIS, 2019)

Region	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁶⁺	Zn	Ni	F
	mg/kg								
R1	0.247	37.29	5.966	0.093	33.75	0.091	123.1	22.61	276.9
R2	0.880	41.10	6.641	0.033	65.06	0.539	274.7	12.99	276.9
R3	0.952	14.42	2.820	0.027	16.42	0.401	62.69	9.962	0.000
R4	0.275	58.91	4.677	0.052	64.08	0.000	203.1	22.99	227.5
R5	2.322	30.37	0.239	0.039	29.99	0.000	157.6	11.52	243.9
R6	0.142	30.82	2.621	0.003	27.41	0.212	102.4	10.03	419.5
R7	2.350	43.84	3.020	0.145	47.34	0.078	201.9	18.38	350.8
R8	1.094	20.07	1.704	0.000	19.17	0.000	91.69	17.22	261.7
R9	0.304	48.51	5.842	0.070	46.54	0.102	140.1	27.59	267.9
R10	0.060	16.03	4.025	0.032	17.77	0.012	91.19	11.67	294.9
R11	1.077	16.71	3.761	0.002	18.79	0.000	84.29	10.43	233.1
R12	0.652	18.71	3.140	0.033	27.47	0.000	115.2	15.16	0.000
R13	1.690	23.68	8.655	0.032	29.12	0.000	109.1	12.16	231.4
R14	0.099	20.08	4.014	0.024	24.68	1.351	85.12	12.46	237.4
R15	0.057	24.43	3.769	0.113	19.69	0.039	152.4	12.63	171.5
R16	0.240	32.23	5.321	0.003	25.52	0.022	105.6	12.37	80.65
R17	0.564	57.25	4.231	0.090	27.33	0.293	161.9	51.64	0.000

의 지점이 등급 4로 평가되어 오염도가 매우 높은 수준으로 나타났다. 반대로 오염도가 낮은 수준인 등급 1 지역은 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺에서 각각 278(84%), 288(88%), 302(92%), 325(98%), 284(86%), 323(97%)개로 나타났다. 오염도 평가 결과 국내 토양오염우려지역의 중금속 오염은 Cd로 인한 영향이 가장 크고, Hg로 인한 영향이 가장 낮은 것으로 평가되었다.

지점별 오염계수의 합(C_{deg})으로 산정한 오염정도를 등급별로 분류한 결과 등급 1은 283개(85%), 등급 2는 11개(4%), 등급 3은 17개(5%), 등급 4는 19개(6%)로 330개의 지점 중 283개의 지점이 낮은 오염, 19개의 지점이 매우 높은 오염 수준으로 평가되었다.

농집지수에 의한 토양 중금속 오염도 평가

지점별 토양 중금속 농도의 농집지수에 대한 등급별 분류는 Table 5와 같다. 330개 지점의 데이터를 농집지수 산정식을 통해 중금속 오염도를 평가한 결과 농집지수의 범위는 Cd -7.61-9.15, Cu -14.69-7.52, As -12.98-12.75, Hg -5.91-2.05, Pb -11.44-9.56, Cr⁶⁺ -15.22-1.26으로 나타났다. Cd, Cu, As, Pb에서 각각 8(2%), 2(1%), 5(2%), 5(2%)개의 지점이 등급 6으로 평가되어 오염도가 극도로 오염된 수준으로 나타났다. 반대로 오염도가 낮은 수준인 등급 0 지역은 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺에서 각각 281(85%), 304(91%), 301(90%), 327(98%), 293(88%), 324(97%)개로 나타났다. 오염도 평가 결과 국내 토양오염우려지역의 중금속 오염은 오염계수와 동일하게 Cd으로 인한 영향이 가장 크고, Hg로

인한 영향이 가장 낮은 것으로 평가되었다.

단순 중금속 총량 분석에서는 토양오염우려기준치를 기준으로 오염 수준을 평가하는 반면에 오염도 평가 방법은 배경 농도를 적용하여 오염원에 의한 실제 오염농도를 파악할 수 있고, 오염농도의 등급화를 통해 세분화된 오염도 분류와 정확한 오염도 파악이 가능하다. 오염계수와 농집지수를 통한 오염도 분석 결과는 Cd > Pb > As > Cu > Cr⁶⁺ > Hg 순으로 동일한 결과가 나타났으며, 국내 토양 중금속 오염은 Cd으로 인한 오염이 가장 많은 것으로 평가되었다. 특정 지점에서만 높은 농도를 보여 중금속 오염은 인위적인 오염원에 의한 것으로 판단된다. 오염도 평가를 위해 사용한 2개의 산정식에 동일한 데이터를 적용하였으나 오염계수보다 농집지수의 오염도가 다소 낮게 평가되었다. 이는 농집지수 식에서 지질 기원에 의한 변수 보정을 위해 적용되는 보정계수 1.5와 등급 분류 세분화로 인해 농집지수가 상대적으로 낮은 오염도를 보인 것으로 판단된다. 오염도는 배경 농도 설정에 따라 평가 결과가 상이하게 나타날 수 있으며, 산정식의 종류에 따라 차이가 발생한다. 배경 농도 및 토양오염지역의 오염농도는 주변 환경에 따라 변할 수 있으며, 국내 기후 특성상 많은 강우량으로 토양 내 함유된 중금속이 용출되기 쉬운 조건을 갖추고 있다. 특히, 여름철 집중 강우로 인해 발생하는 토사와 유거수를 통해 중금속이 유출될 수 있으며, 이는 주변 지역 및 수계로 오염물질이 유입되어 환경오염의 원인이 되고 있다[20]. 이와 같은 문제를 예방 및 파악하기 위해 본 연구 결과를 바탕으로 토양 오염원 및 오염 취약 지역 중금속 농도 현황 파악을 위해 지속적인 모니터링과 평가가 필요하다.

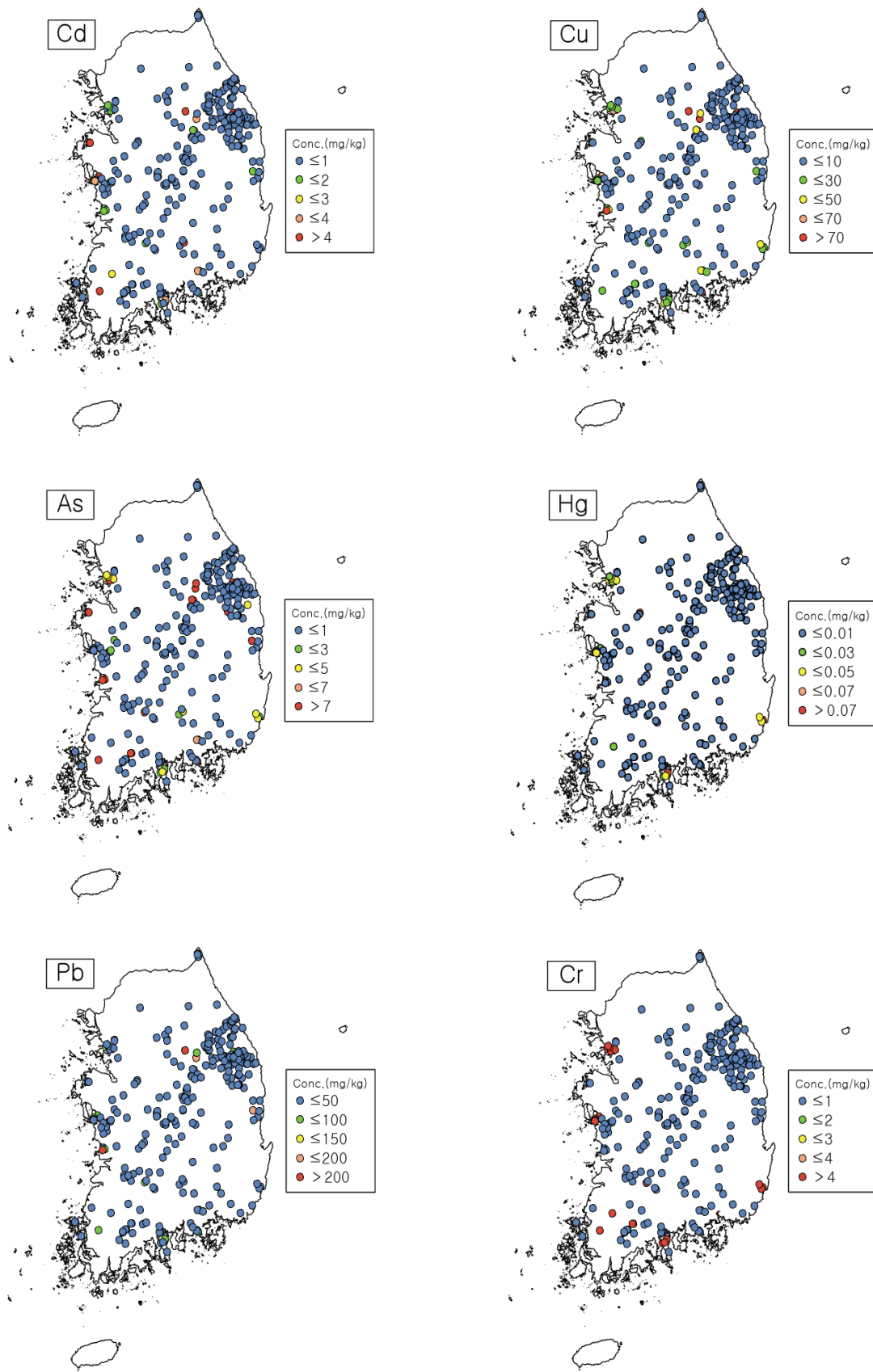


Fig. 1. Average concentration of soil heavy metals in the area.

Table 3. The correlation coefficient(*r*) of heavy metals concentration by 330 points

	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁶⁺
Cd	1					
Cu	0.776	1				
As	-0.013	0.022	1			
Hg	0.913	0.875	-0.001	1		
Pb	0.811	0.863	-0.043	0.978	1	
Cr ⁶⁺	-0.011	0.003	0.344	-0.004	-0.012	1

Table 4. Classification of heavy metals contaminated soils by the contamination factor (*C_i*)

Heavy metals	Contamination factor (<i>C_i</i>)			
	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Cd	278 (84%)	5 (2%)	9 (3%)	38 (11%)
Cu	288 (88%)	26 (8%)	8 (2%)	8 (2%)
As	302 (92%)	11 (3%)	6 (2%)	11 (3%)
Hg	325 (98%)	4 (1%)	-	1 (1%)
Pb	284 (86%)	25 (8%)	8 (2%)	13 (4%)
Cr ⁶⁺	323 (97%)	6 (2%)	1 (1%)	-

Table 5. Classification of heavy metals contaminated soils by the geoaccumulation index (*I_{geo}*)

Heavy metals	Geoaccumulation index (<i>I_{geo}</i>)						
	Class 0	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5	Class 6
Cd	281 (85%)	2 (1%)	9 (3%)	12 (3%)	9 (3%)	9 (3%)	8 (2%)
Cu	304 (91%)	10 (3%)	8 (2%)	4 (1%)	1 (1%)	1 (1%)	2 (1%)
As	301 (90%)	8 (2%)	6 (2%)	6 (2%)	3 (1%)	1 (1%)	5 (2%)
Hg	327 (98%)	2 (1%)	-	1 (1%)	-	-	-
Pb	293 (88%)	16 (5%)	8 (2%)	3 (1%)	3 (1%)	2 (1%)	5 (2%)
Cr ⁶⁺	324 (97%)	5 (2%)	1 (1%)	-	-	-	-

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This subject is supported by Korea Ministry of Environment as "The SS(Surface Soil conservation and management) projects; 2019002820004".

References

- Ok YS, Oh SE, Ahmad M, Hyun SH, Kim KR, Moon DH, Lee SS, Lim KJ, Jeon WT, Yang JE (2010) Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils. *Environmental Earth Sciences*, 61, 1301-1308. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0674-4>.
- Lu Y, Song S, Wang R (2015) Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. *Environment International*, 77, 5-15. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.12.010>.
- Ahmad M, Usman A, Lee SS, Kim SC, Joo JH, Yang JE, Ok YS (2012) Eggshell and coral wastes as low cost sorbents for the removal of Pb²⁺, Cd²⁺ and Cu²⁺ from aqueous solutions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18, 198-204. <https://doi.org/10.7745/KJSS F.2011.44.5.717>.
- Ahmad M, Rajapaksha A, Lim JE, Zhang M, Bolan N, Mohan D, Vithanage M, Lee SS, Ok YS (2014) Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>.
- Rai PK, Lee SS, Zhang M, Tsang YF, Kim KH (2019) Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environment International*, 125, 365-385. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>.

6. Mehmood A, Mirza MA, Choudhary MA, Kim KH, Raza Waseem, Paza Nadeem, Lee SS, Zhang M, Lee JH, Sarfraz M (2019) Spatial distribution of heavy metals in crops in a wastewater irrigated zone and health risk assessment. *Environmental Research*, 168, 382-388. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.020>.
7. Lim JE, Ahmad M, Usman A, Lee SS, Jeon WT, Oh SE, Yang JE, Ok YS (2013) Effects of natural and calcined poultry waste on Cd, Pb and As mobility in contaminated soil. *Environmental Earth Sciences*, 69, 11-20. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1929-z>.
8. Vithanage M, Herath I, Almaroai Y, Rajapaksha A, Huang L, Sung JK, Lee SS, Ok YS (2017) Effects of carbon nanotube and biochar on bioavailability of Pb, Cu and Sb in multi-metal contaminated soil. *Environmental Geochemistry and Health*, 39, 1409-1420. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9941-6>.
9. Khillare P, Jyethi D, Sarkar S (2012) Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals via dietary intake of vegetables grown in the vicinity of thermal power plants. *Food and Chemical Toxicology*, 50, 1642-1652. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.01.032>.
10. Lu J, Qiu H, Lin H, Yuan Y, Chen Z, Zhao R (2016) Source apportionment of fluorine pollution in regional shallow groundwater at You'xi County southeast China. *Chemosphere*, 158, 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.05.057>.
11. Yang Y, Yang X, He M, Christakos G (2020) Beyond mere pollution source identification: Determination of land covers emitting soil heavy metals by combining PCA/APCS, GeoDetector and GIS analysis, 185, 104297. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104297>.
12. Tume P, Roca N, Rubio R, King R, Bech J (2018) An assessment of the potentially hazardous element contamination in urban soils of Arica, Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 184, 345-357. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.011>.
13. Jin Y, O'Connor D, Ok YS, Tsang D, Liu A, Hou D (2019) Assessment of sources of heavy metals in soil and dust at children's playgrounds in Beijing using GIS and multivariate statistical analysis. *Environment International*, 124, 320-328. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.024>.
14. Pathak A, Kumar R, Kumar P, Yadav S (2015) Sources apportionment and spatio-temporal changes in metal pollution in surface and sub-surface soils of a mixed type industrial area in India. *Journal of Geochemical Exploration*, 159, 169-177. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.09.004>.
15. Hakanson L (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Research*, 14, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
16. ME (Ministry of Environment) (2019) Soil monitoring network and soil pollution survey. p.8.
17. Muller G (1969) Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118. <https://doi.org/10.5026/jgeography.118.1205>.
18. Jeong SS, Kim HS, Lee SP, Choi SY, Lee JE, Kim SC, Yang JE (2020) Comparison of pollution indices in assessing the heavy metal(loid)s pollution of arable soils adjacent to industrial complex in Gyenggi-do. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 53, 614-625. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2020.53.4.614>.
19. Hwang HM, Green PG, Higashi RM, Young TM (2006) Tidal salt marsh sediment in California, USA. Part 2: Occurrence and anthropogenic input of trace metals. *Chemosphere*, 64, 1899-1909. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.053>.
20. Ra KT, Kim JK, Lee JM, Lee SY, Kim ES, Kim KT (2014) Characteristics and risk assessment of heavy metals in the stormwater runoffs from industrial region discharged into Shihwa Lake. *Journal of the Korean Society*, 17, 283-296. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2014.17.4.283>.