

## 국내 중금속 데이터를 이용한 지역별 배경농도 산정 및 오염도 평가

이예지<sup>1,2</sup> · 나이슬<sup>1,2</sup> · 손영규<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>국립금오공과대학교 환경공학과, <sup>2</sup>국립금오공과대학교 에너지공학융합전공

## Estimation of Regional Background Concentrations of Heavy Metals and Assessment of Soil Contamination in South Korea

Lee Yeji<sup>1,2</sup> · Na Iseul<sup>1,2</sup> · Son Younggyu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology

<sup>2</sup>Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology

### ABSTRACT

It is essential to use specific background concentrations that reliably represent the characteristics of the area under evaluation. In this study, we analyzed the concentrations of heavy metals using the results of the 2022 surveys of the actual state of soil contamination from 17 metropolitan governments. The overall national averages of natural background concentrations were obtained from the results of the 2021-2022 soil monitoring network and compared with that obtained in previous studies. In addition, the natural, anthropogenic, and natural/anthropogenic background concentrations were separately obtained for each of the 17 metropolitan governments. The contamination factor (CF), one of the most commonly used soil pollution indices, was selected and applied to evaluate the soil contamination levels for the 2022 survey results. Variations ranging from 0.3 to 1.4 times were obtained between the national average natural background concentrations from the 2021-2022 network and those from that commonly used in previous studies in Korea. Moreover, the natural and natural/anthropogenic background concentrations of each metropolitan government varied significantly. Compared to the cases using the national average background concentrations, the soil pollution level of the metropolitan governments could be overestimated or underestimated when using the regional average background concentrations.

**Key words :** Surveys of the actual state of soil contamination, Soil monitoring network, Heavy metals, Soil pollution indices, Contamination factor

### 1. 서 론

토양오염실태조사(Surveys of the actual state of soil contamination, SASSC)는 시·도지사 또는 시장·군수·구청장이 관할구역 안의 토양오염원 및 토지 사용이력 등을 고려하여 토양오염이 우려되는 지역에 대해 중금속 8항목(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr<sup>6+</sup>, Zn, Ni), 일반항목 14항목(불소, 유기인화합물, PCBs, CN, 페놀류, 벤젠, 톨루엔, 에틸

벤젠, 크실렌, TPH, TCE, PCE, 벤조(a)피렌, 1,2-디클로로에탄), 토양 산도(pH) 등 총 23항목을 조사하는 것으로, 2010년 이후로 매년 전국적으로 실시하고 있어 축적된 토양오염실태조사 데이터를 이용하여 국내 토양오염 현황을 직·간접적으로 평가할 수 있다. 일반적으로 대상 지역의 토양오염 여부는 토양환경보전법의 토양오염우려기준의 초과 여부를 바탕으로 평가하고 있는데, 최근 오염물질의 배경농도를 이용한 오염 지표 산정 및 이를 이용한 오염도 평가 연구가 국내·외적으로 활발하게 진행되고 있다.

기존 연구에서 다양한 오염 지표가 제안되어 이용되고 있는데, Contamination factor(CF), Geo-accumulation index(I<sub>geo</sub>), Enrichment factor(EF), Pollution load index(PLI), Potential ecological risk assessment(PERI) 등이 있다. 가장 직관적이며 널리 사용하고 있는 CF는 각 오염물질의

주저자: 이예지, 석사과정 대학원생; 나이슬, 박사과정 대학원생

공저자: 손영규, 교수

\*교신저자: 손영규 교수

E-mail: yson@kumoh.ac.kr

Received : 2024. 10. 25 Reviewed : 2024. 11. 25

Accepted : 2024. 12. 10 Discussion until : 2025. 02. 28

농도와 배경농도의 비율로 1~6 범위의 값을 4가지 등급으로 구분하여 오염 수준을 평가하는 지표로 pollution index라고도 표시한다(식 (1)) (Luo et al., 2007).  $I_{geo}$ 는 오염도를 로그스케일로 표현하는데, 1~5범위의 값을 7가지 등급으로 구분하여 오염 수준을 평가하는 지표이다(식 (2)) (Muller, 1969). 수식에서 1.5는 배경농도에 대한 불확실성을 보정하기 위한 계수이다. EF는 표토의 오염물질 농도와 기준 물질의 농도 비에 대한 배경 농도의 비율로, 2~40 범위의 값을 5가지 등급으로 오염 수준을 평가한다(식 (3)) (Sutherland 2000). 기준이 되는 물질은 철과 같이 토양에서 안정한 원소로 수직 이동성 또는 분해 현상이 없는 특징을 가진다. PLI는 여러 오염물질에 대한 CF의 기하 평균값으로, 1을 기준으로 두 가지 등급으로 구분한다(식 (4))(Tomlinson et al., 1980). PERI는 오염물질의 오염 수준과 생태적, 환경적 및 독성학적 효과를 결합하여 오염물질의 잠재적 위험 평가에 사용된다(식 (5) 및 (6)) (Hakanson, 1980). 150~600 범위의 값을 4가지 등급으로 구분하여 오염 수준을 평가한다. 수식에서  $T_r$ 는 중금속의 독성 반응 계수를 의미한다.

$$CF = \frac{C}{B} \quad (1)$$

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C}{1.5B}\right) \quad (2)$$

$$EF = \frac{\left(\frac{C}{C_{Fc}}\right)_{topsoil}}{\left(\frac{C}{C_{Fc}}\right)_{background}} \quad (3)$$

$$PLI = \left(\prod_{i=1}^n CF_i\right)^{1/n} \quad (4)$$

$$E_r = T_r \times CF \quad (5)$$

$$PERI = \sum_{i=1}^m E_r^i \quad (6)$$

여기에서  $C$ 는 대상 오염물질의 측정 농도,  $B$ 는 대상 물질의 배경농도,  $C_{Fc}$ 는 기준 물질(철)의 농도,  $E_r$ 은 오염 물질의 생태학적 위해도,  $T_r$ 는 오염물질의 독성 반응 계수를 의미한다.

이러한 오염 지표를 산출할 때 가장 중요한 인자가 오염물질별 배경농도이며, 배경농도로 인해 오염도가 과소 혹은 과대평가될 수 있다. 국내 연구에서는 토양측정망 자료 중 자연 배경농도를 선택하여 전국 평균값을 오염 지표 산정 등에 적용하고 있다(NIER 2004, 2005;

Yoon et al., 2009; Lee et al., 2021; Shin et al., 2021; Lee et al., 2022; Lim et al., 2023). 해외 연구에서도 대상 지역의 배경농도를 직접 측정하여 이용한 사례는 많지 않으며(Taghavi et al., 2024), 대부분 기존 연구 등에서 제시된 배경농도 혹은 전지구적 평균 데이터 등을 적용하고 있다(Memoli et al., 2019; Yang et al., 2021; Kahangwa, 2022; Khorshidi et al., 2022; He et al., 2024; Ogbeibu et al., 2014; Zhiyuan et al., 2021; Massas et al., 2013; Kowalska et al., 2016). 또한, 대부분의 연구들에서 사람의 활동이 거의 없는 지역의 농도를 이용하여 배경농도로 사용하고 있으나, 일부 연구에서는 사람의 활동이 충분히 있으나 적극적인 오염이 일어나지 않는 지역의 농도를 배경농도로 이용한 사례도 보고되고 있다(Xie et al., 2021; Mikkonen et al., 2018).

이상의 기존 연구 결과를 살펴본 결과, 대부분의 연구에서 넓은 대상 지역에 대해 특정 배경농도를 일괄 적용하는 방식이 주를 이루고 있는 것을 확인하였다. 앞서 언급한 바와 같이 배경농도에 의해 오염도가 과소 혹은 과대 평가가 될 수 있기 때문에, 지역 특성을 보다 반영한 배경농도의 산정 및 이용이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 2021~2022년 토양측정망 자료를 이용하여 배경농도를 지역별로 산정하고, 이를 이용하여 2022년 토양오염 실태조사 결과와 연계하여 오염도를 평가하였다. 대상 오염물질로는 측정망 및 토양오염실태조사 데이터에서 가장 많은 부분을 차지하는 중금속 7항목(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Zn, Ni)을 선정하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 토양오염실태조사 데이터

본 연구의 토양오염실태조사 데이터는 토양지하수정보 시스템(<https://sgis.nier.go.kr/web>)에서 제공하는 데이터 중 가장 최신 데이터인 2022년도의 데이터를 이용하였다(총 3,206개 데이터셋 중 유류 오염 등을 제외한 2,971개 데이터셋 이용). 토양오염실태조사 데이터는 개인정보 보호를 위하여 광역자치단체로만 구분되어 공개되고 있어 본 연구에서는 가나다 순으로 17개 광역자치단체[강원특별자치도(GW); 경기도(GG); 경상남도(GN); 경상북도(GB); 광주광역시(GJ); 대구광역시(DG); 대전광역시(DJ); 부산광역시(BS); 서울특별시(SU); 세종특별자치시(SJ); 울산광역시(US); 인천광역시(IC); 전라남도(JN); 전북특별자치도(JB); 제주특별자치도(JJ); 충청남도(CN); 충청북도(CB)]로 구분하여 연구를 수행하였다. 광역자치단체별 및 1/2/3지

**Table 1.** Soil monitoring network sites in 17 metropolitan governments in Korea

	NB+AB	NB*	AB**
GW	154	55	99
GG	168	55	113
GN	168	69	99
GB	180	73	107
GJ	25	5	20
DG	31	4	27
DJ	32	5	27
BS	32	6	26
SU	48	9	39
SJ	8	3	5
US	21	5	16
IC	32	13	19
JN	161	63	98
JB	120	41	79
JJ	23	6	17
CN	114	43	71
CB	102	39	63
Total	1,419	494	925

\*NB: Natural background

\*\*AB: Anthropogenic background

역별 수집된 데이터 현황을 Table 1에 나타내었다. 광역 자치단체 중에서 경기에서 457개로 가장 많은 데이터가 제공되었으며, 경북 288개, 전남 285개, 서울 254개, 충남 222개, 강원 203개 순이었으며, 세종이 14개로 가장 적었다. 또한, 1지역은 924개, 2지역은 759개, 3지역은 1,288개의 중금속 데이터가 확보되었다.

## 2.2. 토양측정망 데이터

본 연구의 토양측정망 데이터는 토양지하수정보시스템 (<https://sgis.nier.go.kr/web>)에서 제공하는 데이터 중 가장 최신 데이터인 2021년 및 2022년도의 데이터를 이용하였는데, 이는 2,000개의 측정망이 격년으로 운영되기 때문이다. 2,000개의 데이터셋 중 배경농도 측정 목적의 1,419개 데이터셋만을 본 연구에 이용하였다. 수집된 측정망 데이터는 토양의 교란이 일어나지 않았으며, 오염 영향이 적은 지역인 “자연” 배경농도 지점과 사람활동이 있으나 오염의 영향이 적은 “사람활동” 배경농도 지점으로 구분하였다. 광역자치단체별 자연 및 사람활동 배경농도지점 현황을 Table 2에 나타내었다.

전국 1,419개 배경농도 측정망 중 경북에서 180개의 가장 많은 측정망 자료가 확보되었으며, 세종이 8개로 가장 적었다. 자연 배경농도지점은 2021년 254개, 2022년 240개로

**Table 2.** Monitoring numbers of SASSC classified by regional classification in 17 metropolitan governments in Korea

	Region 1	Region 2	Region 3
GW	69	59	75
GG	67	110	280
GN	68	43	58
GB	101	68	119
GJ	46	18	36
DG	67	20	29
DJ	65	20	25
BS	46	64	50
SU	80	125	49
SJ	0	0	0
US	25	10	45
IC	18	22	77
JN	62	69	154
JB	33	35	84
JJ	26	22	51
CN	73	55	100
CB	83	18	54
Total	929	758	1,286

총 494개이며, 사람활동 배경농도지점은 2021년 459개, 2022년 466개로 총 925개였다. 자연 배경농도지점은 경북이 73개, 경남이 69개, 전남이 63개, 강원과 경기도가 55개 등의 순으로 많았으며, 사람활동 배경농도지점은 경기 113개, 경북 107개, 강원과 경남이 99개, 전남이 98개 등의 순으로 많았다.

## 2.3. 오염 지표 산정

기존 연구에서 제시된 다양한 오염 지표 중 직관적이며, 많은 연구자에 의해 적용된 CF를 본 연구에서 사용하였다(식 (1)). 수집된 8개의 중금속 데이터 중  $\text{Cr}^{6+}$ 의 경우 측정 사례가 다른 중금속과 비교하여 현저하게 적어(전체 데이터셋 중 20%에서만  $\text{Cr}^{6+}$  농도 제공), 본 연구에서는  $\text{Cr}^{6+}$ 을 제외한 Cd, Cu, As, Hg, Pb, Zn, Ni의 7개 중금속을 대상으로 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 토양오염실태조사

오염 지표를 이용하여 오염도를 분석하기에 앞서 2022년 토양오염실태조사 자료 중 중금속 농도에 대한 기본 통계 분석을 수행하여 17개 광역자치단체별 평균 및 표준편차를 다음 Table 3에 나타내었다.

**Table 3.** Average concentrations of heavy metals for SASSC samples (mg/kg) in 17 metropolitan governments in Korea

	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr <sup>6+</sup>	Zn	Ni
GW	0.26 ± 0.33	17.92 ± 25.79	4.55 ± 4.56	0.06 ± 0.09	19.55 ± 22.95	0.02 ± 0.17	117.53 ± 174.42	14.89 ± 22.97
GG	0.25 ± 0.31	53.29 ± 470.94	6.39 ± 6.00	0.05 ± 0.03	30.66 ± 30.49	0.04 ± 0.17	121.56 ± 338.02	24.29 ± 16.75
GN	0.27 ± 0.39	30.25 ± 41.01	6.82 ± 8.43	0.04 ± 0.12	29.53 ± 39.99	0.02 ± 0.13	116.92 ± 118.19	11.79 ± 16.41
GB	0.22 ± 0.48	29.98 ± 92.43	7.58 ± 16.02	0.07 ± 0.13	26.83 ± 58.80	0.00 ± 0.07	149.18 ± 239.57	14.92 ± 17.18
GJ	2.40 ± 1.12	17.38 ± 31.92	2.09 ± 2.88	0.05 ± 0.05	28.35 ± 83.55	0.15 ± 0.36	152.98 ± 489.67	7.51 ± 7.06
DG	0.12 ± 0.06	13.75 ± 10.75	3.41 ± 3.02	0.06 ± 0.20	17.52 ± 14.57	0.18 ± 0.36	67.60 ± 80.75	8.92 ± 5.70
DJ	0.75 ± 0.31	34.61 ± 62.43	7.01 ± 9.85	0.05 ± 0.02	35.78 ± 67.53	0.06 ± 0.31	157.22 ± 118.86	12.71 ± 10.13
BS	1.85 ± 1.05	35.28 ± 57.96	7.22 ± 5.86	0.08 ± 0.31	47.41 ± 66.44	0.01 ± 0.10	185.18 ± 250.43	12.03 ± 9.16
SU	2.52 ± 1.10	78.10 ± 383.75	6.59 ± 5.55	0.12 ± 0.30	91.19 ± 521.90	0.03 ± 0.19	438.80 ± 4479.13	26.84 ± 18.83
SJ	0.17 ± 0.23	23.33 ± 15.50	4.77 ± 3.39	0.04 ± 0.02	18.01 ± 15.33	0.00 ± 0.00	110.31 ± 100.55	22.92 ± 16.39
US	1.08 ± 1.95	43.56 ± 96.88	8.67 ± 21.38	0.10 ± 0.13	58.85 ± 97.56	0.13 ± 0.45	192.52 ± 237.97	13.32 ± 12.04
IC	0.34 ± 0.36	80.69 ± 236.47	6.16 ± 11.35	0.07 ± 0.15	51.30 ± 71.90	0.06 ± 0.45	215.57 ± 427.91	22.74 ± 17.15
JN	3.28 ± 3.33	18.21 ± 22.17	3.92 ± 9.05	0.04 ± 0.03	30.89 ± 56.71	0.09 ± 0.26	168.75 ± 726.16	12.24 ± 10.52
JB	2.68 ± 1.11	41.86 ± 167.11	7.31 ± 12.31	0.03 ± 0.03	25.81 ± 35.49	0.00 ± 0.00	131.61 ± 149.40	11.61 ± 11.05
JJ	0.16 ± 0.10	38.27 ± 26.19	5.10 ± 1.40	0.07 ± 0.04	16.72 ± 20.36	0.34 ± 0.55	110.84 ± 99.92	39.67 ± 14.15
CN	0.99 ± 0.38	19.19 ± 14.25	3.43 ± 8.14	0.05 ± 0.05	18.91 ± 10.48	1.83 ± 1.62	91.50 ± 53.02	18.19 ± 17.61
CB	0.61 ± 0.26	16.70 ± 17.65	3.25 ± 2.38	0.07 ± 0.15	23.55 ± 34.45	0.00 ± 0.04	118.05 ± 160.75	13.02 ± 13.23
Total	1.13 ± 1.66	36.63 ± 225.65	5.66 ± 9.22	0.06 ± 0.14	34.66 ± 159.00	0.18 ± 0.67	161.86 ± 1335.13	17.21 ± 16.85

토양오염 우려기준을 초과한 데이터셋은 전국적으로 총 39개였으며, 서울(12), 경북(6), 전남(6), 부산(4), 경기(3), 인천(3), 강원(2), 대전(2), 광주(1) 순으로 확인되었다. 중금속별로 살펴보면, Zn이 24개로 가장 많았으며, As, Cd 이 7개, Pb, Cu는 6개, Ni는 1개로 확인되었다.

우려기준을 초과한 상위 3개 광역자치단체를 살펴보면, 서울은 총 12개의 우려기준 초과 데이터셋에서 Cd(3), Cu(3), As(2), Pb(3), Zn(4), Ni(1) 항목이 우려기준을 초과하였다. Pb의 기준 초과 수준이 다른 중금속 대비 높게 나타났다는데, 2지역 대상 지역의 경우(2지역: 400 mg/kg), 2106.6 mg/kg, 1,643 mg/kg으로 상대적으로 높은 오염 농도가 나타났으며, 3지역 대상 지역의 경우, 7605.8 mg/kg로 약 34배를 초과하였다. 경북에서는 6개 데이터셋 중 Cd(1), As(2), Pb(2) Zn(3) 항목이 우려기준을 초과하였으며, As(2지역)가 251.38 mg/kg으로 우려기준(50 mg/kg)보다 약 5배 높은 것을 확인하였다. 전남의 경우 6개 데이터 모두 Zn이 우려기준을 초과하였으며, 1지역 대상지역에서 Cd이 우려기준을 초과하였다. 특히 3지역 대상지역의 Zn이 12,009 mg/kg으로 우려기준(2,000 mg/kg)의 6배를 초과하는 사례도 나타났다.

산정된 평균 농도값을 기준으로 살펴보면, 중금속에 대한 전국 평균 오염농도는 Cd 1.13 mg/kg, Cu 36.2 mg/kg, As 5.88 mg/kg, Hg 0.06 mg/kg, Pb 35.0 mg/kg, Cr<sup>6+</sup> 0.19 mg/kg, Zn 159 mg/kg, Ni 17.4 mg/kg으로 우려기준보다

충분히 낮은 수치를 확인하여 토양오염실태조사 대상지역에 대한 오염 수준이 대부분의 경우 안심할 수 있는 수준이었다. 광역자치단체별 평균 오염농도 또한 우려기준을 대부분 초과하지 않았으나, 서울의 경우 Zn의 평균 오염농도가 1지역 우려기준(300 mg/kg)보다 높은 것을 확인하였다.

Ni, Cd을 제외한 중금속들에 대해서 광역자치단체의 오염농도의 표준편차가 대부분 평균값과 비슷하거나 크게 나타났는데, 이는 측정된 오염농도가 광역자치단체별로 큰 차이가 있음을 의미한다. Cu의 경우, 경기의 표준편차(470.9 mg/kg)가 평균값(53.3 mg/kg)의 8.8배로 측정농도별 가장 큰 농도 변화가 있었으며, 다음으로 서울의 표준편차(383.8 mg/kg)가 평균 농도(78.1 mg/kg) 대비 4.9배 컸다. 또한, Pd의 경우, 서울의 표준편차(521.9 mg/kg)가 평균 농도(91.2 mg/kg)의 5.7배로 가장 큰 차이를 보였다. Zn도 서울의 표준편차(4,479 mg/kg)가 평균(438.8 mg/kg)의 10.2배로 큰 차이를 확인하였다.

결과적으로, 각 광역자치단체별 평균 농도값만으로 해당 광역자치단체의 토양 오염 수준을 판단하는 것은 적절하지 않을 수 있을 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 대부분의 경우에 평균 농도가 우려기준을 초과하지 않는 것으로 나타났으나, 각 평균 농도 대비 큰 표준편차를 가지는 경우가 일부 확인되기 때문이다(전체 데이터셋 중 1.3%의 케이스에서 우려기준을 초과하는 것을 확인).

**Table 4.** Average natural background concentrations in the 17 metropolitan governments (mg/kg)

	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr <sup>6+</sup>	Zn	Ni
GW	0.04 ± 0.1	12.15 ± 6.99	3.76 ± 2.18	0.04 ± 0.04	17.91 ± 7.36	0.09 ± 0.4	84.33 ± 40.56	8.46 ± 4.66
GG	0.17 ± 0.12	28.71 ± 18.3	4.91 ± 2.71	0.02 ± 0.02	21.13 ± 8.55	0.04 ± 0.21	117.6 ± 52.3	19.64 ± 8.92
GN	0.01 ± 0.07	14.79 ± 13.88	5.16 ± 2.7	0.01 ± 0.04	15.27 ± 8.06	0.0 ± 0.0	99.27 ± 46.02	10.74 ± 6.59
GB	0.23 ± 0.13	20.63 ± 15.37	4.09 ± 2.26	0.03 ± 0.02	18.39 ± 9.56	0.0 ± 0.0	96.91 ± 34.18	10.84 ± 5.82
GJ	0.0 ± 0.0	10.04 ± 12.81	4.73 ± 1.71	0.01 ± 0.02	9.42 ± 3.63	0.0 ± 0.0	49.32 ± 27.78	7.49 ± 5.71
DG	0.31 ± 0.14	23.74 ± 9.89	5.63 ± 3.14	0.05 ± 0.04	20.92 ± 9.28	0.0 ± 0.0	99.81 ± 44.35	12.28 ± 4.54
DJ	0.16 ± 0.16	16.1 ± 12.86	3.63 ± 2.24	0.04 ± 0.04	27.79 ± 33.4	0.0 ± 0.0	110.13 ± 46.13	10.63 ± 6.81
BS	0.13 ± 0.25	28.36 ± 24.64	6.92 ± 3.25	0.02 ± 0.05	35.41 ± 22.66	0.0 ± 0.0	150.93 ± 53.86	10.32 ± 5.38
SU	0.13 ± 0.13	30.54 ± 17.35	3.86 ± 2.66	0.06 ± 0.07	25.88 ± 13.88	0.09 ± 0.23	101.99 ± 36.74	19.13 ± 12.19
SJ	0.05 ± 0.12	12.46 ± 4.88	4.21 ± 2.28	0.02 ± 0.01	12.46 ± 4.76	0.0 ± 0.0	89.5 ± 19.58	16.06 ± 7.45
US	0.15 ± 0.35	30.01 ± 25.69	8.29 ± 4.04	0.0 ± 0.0	23.97 ± 13.82	0.0 ± 0.0	126.01 ± 67.64	10.26 ± 6.62
IC	0.21 ± 0.24	28.17 ± 10.14	3.21 ± 2.02	0.08 ± 0.15	28.82 ± 16.41	0.27 ± 0.56	130.26 ± 51.0	12.89 ± 6.11
JN	0.0 ± 0.0	8.36 ± 7.43	6.66 ± 2.58	0.05 ± 0.14	12.5 ± 9.6	0.0 ± 0.0	37.92 ± 27.63	8.59 ± 5.92
JB	0.23 ± 0.32	12.15 ± 12.68	5.69 ± 3.15	0.02 ± 0.02	14.19 ± 9.13	0.0 ± 0.0	55.04 ± 19.56	9.19 ± 6.73
JJ	0.0 ± 0.0	22.96 ± 14.09	4.25 ± 1.86	0.05 ± 0.03	9.7 ± 3.91	0.0 ± 0.0	78.36 ± 53.97	28.64 ± 17.0
CN	0.12 ± 0.17	15.41 ± 13.57	5.97 ± 3.91	0.03 ± 0.02	18.53 ± 14.82	0.0 ± 0.0	80.66 ± 70.35	12.54 ± 7.6
CB	0.12 ± 0.28	15.71 ± 9.48	3.99 ± 2.68	0.04 ± 0.04	16.75 ± 4.88	0.05 ± 0.21	86.93 ± 52.57	11.66 ± 8.23
Avg.	0.09 ± 0.17	17.97 ± 13.20	6.13 ± 4.09	0.06 ± 0.14	19.79 ± 13.44	0.03 ± 0.16	73.63 ± 35.3	14.65 ± 10.30

**Table 5.** Average anthropogenic background concentrations in 17 metropolitan governments in Korea (mg/kg)

	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr <sup>6+</sup>	Zn	Ni
GW	0.03 ± 0.06	18.32 ± 11.82	5.62 ± 2.6	0.09 ± 0.11	22.26 ± 6.48	0.0 ± 0.0	78.95 ± 22.86	15.89 ± 12.2
GG	0.12 ± 0.09	23.92 ± 9.4	6.57 ± 3.21	0.05 ± 0.03	22.09 ± 9.91	0.0 ± 0.0	82.47 ± 11.72	22.95 ± 10.56
GN	0.02 ± 0.09	18.95 ± 11.15	5.52 ± 2.64	0.02 ± 0.07	15.62 ± 8.15	0.0 ± 0.0	78.86 ± 25.49	16.39 ± 10.71
GB	0.26 ± 0.28	18.87 ± 20.79	4.29 ± 2.63	0.04 ± 0.03	17.37 ± 11.21	0.0 ± 0.0	83.04 ± 38.91	11.1 ± 8.76
GJ	0.0 ± 0.0	18.86 ± 7.42	6.07 ± 1.2	0.2 ± 0.37	21.42 ± 6.63	0.0 ± 0.0	74.6 ± 20.16	27.52 ± 5.94
DG	0.22 ± 0.06	18.55 ± 5.51	4.9 ± 1.93	0.06 ± 0.04	15.6 ± 3.23	0.0 ± 0.0	73.32 ± 23.36	12.28 ± 4.82
DJ	0.21 ± 0.29	18.24 ± 6.58	10.8 ± 12.96	0.04 ± 0.03	14.64 ± 8.47	0.0 ± 0.0	83.02 ± 7.36	19.02 ± 5.27
BS	0.07 ± 0.16	16.48 ± 14.3	5.23 ± 1.07	0.0 ± 0.0	31.08 ± 7.66	0.0 ± 0.0	124.4 ± 38.66	4.3 ± 3.95
SU	0.17 ± 0.23	32.18 ± 9.12	4.09 ± 2.75	0.14 ± 0.08	33.93 ± 14.91	0.22 ± 0.67	113.69 ± 68.08	15.18 ± 9.47
SJ	0.0 ± 0.0	9.03 ± 11.4	3.45 ± 2.09	0.1 ± 0.16	16.17 ± 1.99	0.0 ± 0.0	84.43 ± 17.52	15.17 ± 17.01
US	0.17 ± 0.37	28.14 ± 12.87	9.46 ± 5.01	0.05 ± 0.05	43.72 ± 22.61	0.0 ± 0.0	117.94 ± 50.72	12.62 ± 9.29
IC	0.03 ± 0.06	22.52 ± 7.98	4.18 ± 2.87	0.07 ± 0.04	21.95 ± 11.55	0.11 ± 0.26	76.66 ± 15.38	16.55 ± 6.19
JN	0.0 ± 0.0	10.44 ± 5.64	6.38 ± 2.0	0.05 ± 0.06	16.15 ± 5.65	0.0 ± 0.0	52.18 ± 20.71	18.98 ± 8.1
JB	0.21 ± 0.29	13.69 ± 13.33	5.96 ± 4.47	0.04 ± 0.02	17.06 ± 5.01	0.0 ± 0.0	47.72 ± 18.17	10.22 ± 6.96
JJ	0.0 ± 0.0	20.22 ± 22.45	4.28 ± 2.07	0.15 ± 0.05	11.05 ± 4.58	0.0 ± 0.0	45.98 ± 16.65	35.45 ± 18.03
CN	0.15 ± 0.19	16.29 ± 11.34	7.47 ± 5.36	0.07 ± 0.06	18.54 ± 14.17	0.0 ± 0.0	63.44 ± 25.75	17.49 ± 11.92
CB	0.06 ± 0.11	15.44 ± 7.31	5.03 ± 2.65	0.07 ± 0.08	15.73 ± 5.25	0.0 ± 0.0	58.92 ± 23.41	16.24 ± 12.7
Avg.	0.12 ± 0.19	18.92 ± 15.69	4.94 ± 3.3	0.03 ± 0.05	19.64 ± 14.16	0.03 ± 0.16	91.19 ± 50.05	12.07 ± 8.87

### 3.2. 배경농도 설정

2021-2022년 토양측정망 자료를 이용하여 광역자치단체별 자연 배경농도와 사람활동 배경농도의 평균값과 표준편차를 Table 4와 Table 5에 각각 나타내었다. 자연 배경농도지점과 사람활동 배경농도지점을 같이 고려한 자연/사람활동 배경농도를 산정하기도 하였는데, 이는 오염의

영향이 적은 사람활동을 자연 배경농도에 대한 추가적인 영향으로 고려함을 의미한다(Xie et al., 2021; Mikkonen et al., 2018). 광역자치단체별 해당 결과를 Table 6에 나타내었다.

전국 자연 배경농도의 평균값은 Cd 0.09 mg/kg, Cu 17.97 mg/kg, As 6.13 mg/kg, Hg 0.06 mg/kg, Pb 19.79 mg/kg, Cr<sup>6+</sup>

**Table 6.** Average natural/anthropogenic background concentrations in the 17 metropolitan governments (mg/kg)

	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr <sup>6+</sup>	Zn	Ni
GW	0.04 ± 0.09	14.25 ± 9.29	4.39 ± 2.47	0.06 ± 0.08	19.38 ± 7.32	0.06 ± 0.33	82.51 ± 35.41	10.99 ± 8.69
GG	0.16 ± 0.11	27.25 ± 16.22	5.42 ± 2.96	0.03 ± 0.02	21.42 ± 8.96	0.03 ± 0.17	106.86 ± 46.87	20.65 ± 9.53
GN	0.01 ± 0.08	16.65 ± 12.81	5.32 ± 2.66	0.02 ± 0.05	15.43 ± 8.04	0.0 ± 0.0	90.13 ± 39.31	13.27 ± 9.06
GB	0.25 ± 0.21	19.84 ± 17.88	4.18 ± 2.42	0.03 ± 0.02	17.93 ± 10.27	0.0 ± 0.0	90.72 ± 36.77	10.96 ± 7.22
GJ	0.0 ± 0.0	11.8 ± 12.33	5.0 ± 1.69	0.05 ± 0.17	11.82 ± 6.46	0.0 ± 0.0	54.37 ± 28.03	11.5 ± 9.93
DG	0.3 ± 0.13	23.05 ± 9.52	5.53 ± 2.99	0.05 ± 0.04	20.21 ± 8.87	0.0 ± 0.0	96.28 ± 42.85	12.28 ± 4.49
DJ	0.17 ± 0.18	16.44 ± 12.04	4.75 ± 5.73	0.04 ± 0.04	25.74 ± 31.12	0.0 ± 0.0	105.89 ± 43.5	11.94 ± 7.22
BS	0.12 ± 0.24	26.13 ± 23.34	6.6 ± 3.02	0.01 ± 0.05	34.6 ± 20.66	0.0 ± 0.0	145.95 ± 51.88	9.19 ± 5.62
SU	0.13 ± 0.15	30.85 ± 16.06	3.9 ± 2.65	0.08 ± 0.08	27.39 ± 14.27	0.12 ± 0.35	104.19 ± 43.61	18.39 ± 11.74
SJ	0.03 ± 0.1	11.18 ± 7.34	3.92 ± 2.09	0.05 ± 0.1	13.85 ± 4.22	0.0 ± 0.0	87.6 ± 17.71	15.72 ± 10.7
US	0.15 ± 0.34	29.56 ± 22.99	8.57 ± 4.18	0.01 ± 0.03	28.67 ± 17.88	0.0 ± 0.0	124.09 ± 62.92	10.82 ± 7.15
IC	0.13 ± 0.21	25.88 ± 9.6	3.6 ± 2.41	0.08 ± 0.12	26.02 ± 14.83	0.21 ± 0.47	108.48 ± 48.13	14.38 ± 6.31
JN	0.0 ± 0.0	9.09 ± 6.87	6.56 ± 2.38	0.05 ± 0.12	13.79 ± 8.54	0.0 ± 0.0	42.94 ± 26.13	12.25 ± 8.36
JB	0.22 ± 0.31	12.61 ± 12.78	5.77 ± 3.55	0.03 ± 0.02	15.05 ± 8.18	0.0 ± 0.0	52.85 ± 19.29	9.5 ± 6.75
JJ	0.0 ± 0.0	22.24 ± 16.14	4.26 ± 1.87	0.07 ± 0.05	10.05 ± 4.04	0.0 ± 0.0	69.92 ± 48.92	30.41 ± 17.13
CN	0.13 ± 0.18	15.76 ± 12.68	6.57 ± 4.58	0.05 ± 0.05	18.53 ± 14.5	0.0 ± 0.0	73.81 ± 57.38	14.51 ± 9.81
CB	0.09 ± 0.23	15.6 ± 8.53	4.43 ± 2.69	0.05 ± 0.06	16.32 ± 4.99	0.03 ± 0.16	75.13 ± 44.57	13.59 ± 10.44
Avg.	0.11 ± 0.18	18.59 ± 14.87	5.35 ± 3.64	0.04 ± 0.09	19.69 ± 13.91	0.03 ± 0.16	85.08 ± 46.23	12.97 ± 9.47

0.03 mg/kg, Zn 73.63 mg/kg, Ni 14.65 mg/kg이며, 선행 연구에서 사용되는 우리나라 자연 배경 농도(Cd 0.29 mg/kg, Cu 15.3 mg/kg, As 6.83 mg/kg, Hg 0.04 mg/kg, Pb 18.4 mg/kg, Zn 54.3 mg/kg, Ni 17.7 mg/kg) 대비 최저 0.32배(Cd)에서 최대 1.40배(Hg)까지 차이가 나는 것을 확인하였다(Yoon et al., 2009). 전국 사람활동 배경농도의 평균값은 Cd 0.121 mg/kg, Cu 18.9 mg/kg, As 4.9 mg/kg, Hg 0.028 mg/kg, Pb 19.6 mg/kg, Cr<sup>6+</sup> 0.026 mg/kg, Zn 91.2 mg/kg, Ni 12.1 mg/kg 이었으며, 자연 배경농도와 비교하였을 때 최저 0.5배(Hg)부터 최대 1.32배(Cd)까지 차이가 있었다. 전국 자연/사람활동 배경농도의 평균값은 Cd 0.111 mg/kg, Cu 18.6 mg/kg, As 5.4 mg/kg, Hg 0.038 mg/kg, Pb 19.7 mg/kg, Cr<sup>6+</sup> 0.027 mg/kg, Zn 85.1 mg/kg, Ni 13 mg/kg이었으며, 선행연구에서 사용된 우리나라 자연 배경농도 대비 최저 0.38배(Cd)부터 최대 1.56배(Zn)까지 차이가 있었다(Yoon et al., 2009). 앞서 산정한 자연 배경농도와 비교하였을 때 최저 0.68배(Hg)부터 최대 1.21배(Cd), 사람활동 배경농도와 비교하였을 때 최저 0.92배(Cd)부터 최대 1.38배(Hg)까지 차이를 보였다.

광역자치단체별로 산정된 자연, 사람활동, 자연/사람활동에 대한 배경농도는 지역에 따라 큰 차이를 보였다. 자연 배경농도의 경우, Cd 농도가 가장 높은 경북(0.238 mg/kg)은 농도가 가장 낮은 전남(0.012 mg/kg)과 약 19.83배의 차이를 보였으며, Ni는 가장 높은 제주(35.5 mg/kg)가

농도가 가장 낮은 부산(4.3 mg/kg)과 약 8.26배, Hg는 광주(0.196 mg/kg)가 전북(0.032 mg/kg)과 약 6.13배의 차이를 보였다. Zn의 경우, 부산(124.4 mg/kg)은 제주(46 mg/kg)와 약 2.70배 차이가 나타나는 것을 확인하였다.

사람활동 배경농도의 경우, Cd 농도가 가장 높은 대구(0.297 mg/kg)는 농도가 가장 낮은 전남(0.007 mg/kg)과 약 42.43배, Cr<sup>6+</sup> 농도가 가장 높은 인천(0.274 mg/kg)이 가장 농도가 낮은 충남(0.007 mg/kg)과 약 39.14배의 차이를 보였다. Hg는 인천(0.083 mg/kg)이 광주(0.009 mg/kg)와 약 9.22배의 차이가 나타났으며, As는 울산(8.3 mg/kg)이 인천(3.2 mg/kg)과 약 2.59배의 차이를 보였다.

자연/사람활동 배경농도의 경우, Cr<sup>6+</sup> 농도가 가장 높은 인천(0.206 mg/kg)은 농도가 가장 낮은 충남(0.004 mg/kg)과 약 51.5배, Cd는 가장 농도가 높은 대구(0.287 mg/kg)가 가장 농도가 낮은 전남(0.009 mg/kg)과 약 31.89배의 차이를 보였다. Hg는 서울(0.078 mg/kg)이 울산(0.011 mg/kg)과 약 7.09배의 차이가 나타났으며, As는 울산(8.6 mg/kg)이 인천(3.6 mg/kg)과 약 2.39배의 차이를 보였다.

기존 연구(Yoon et al., 2009)에서 사용된 자연 배경농도는 측정망 위치에 기반하여 92개 지점에서 산림토양을 채취하여 분석한 것으로 2004년 및 2005년에 조사되어 본 연구에서 계산한 배경농도들과 시간적으로 약 17년의 차이가 있어 배경농도 데이터의 업데이트가 필요할 것으로 생각된다. 또한 산정된 모든 유형의 배경농도에서 광역자

치단체별 배경농도의 차이가 큰 중금속 항목이 다수 존재하여 전국 평균 배경농도를 이용해 해당 지역의 오염도를 평가할 때, 과대 혹은 과소 평가될 우려가 충분히 있을 수 있다.

대부분의 선행연구에서는 자연 배경농도만을 이용하였으나, 인구밀도가 높은 우리나라 특성상 자연 배경농도지점에 인간의 영향이 전혀 없다고 생각하기 어려우며, 사람활동 배경농도지점은 직접적인 오염보다는 간접적이고 소극적인 오염이 발생할 것으로 생각되어 사람활동 배경농도를 같이 고려하여 토양의 오염도를 판단하는 것도 고려할 필요가 있다(Xie et al., 2021; Mikkonen et al., 2018).

### 3.3. 지역별 오염 지표

과대 혹은 과소 평가될 우려가 높은 광역자치단체를 각각 두 지역씩 선정하여 오염 지표를 산출하여 Table 7에 나타내었으며, 이를 바탕으로 오염 수준을 비교평가하였다. 본 연구에서 산정된 전국 평균 배경농도를 기준으로 각 광역자치단체별 배경농도의 비율을 계산하여 중금속별로 상위에 속하는 지역인 서울과 울산은 과대 평가 지역으로, 하위에 속하는 지역인 강원과 충북을 과소 평가 지역으로 선정하였다. 비교평가에 활용된 배경농도는 선행연구의 배경농도(Yoon et al., 2009)와 2021-2022년 전국 평균 자연 배경농도, 광역자치단체별 평균 자연 배경농도, 평균 자연/사람활동 배경농도이다.

선행 연구의 자연 배경농도를 이용한 CF와 본 연구에서 구한 전국 평균 자연 배경농도를 이용한 CF를 비교하였을 때, 강원의 CF는 Cd가 0.88(낮음)에서 2.76(중간)으로 오염도가 상승하였으며, Cu, Pb는 각각 1.14(중간)에서 0.97(낮음), 1.05(중간)에서 0.97(낮음)로 오염도가 낮아졌다. 충북의 CF는 Cd가 2.15(중간)에서 6.74(매우 높음)로 오염도가 크게 변화하였으며, Cu는 1.12(중간)에서 0.95(낮음)로 오염도가 낮아졌다. 서울의 CF는 Cd가 8.69(높음)에서 27.26(매우 높음)으로 오염도의 변화가 매우 높은 것으로 확인되었다. 울산의 CF는 Cd가 3.78(높음)에서 11.87(매우 높음)로 1단계 상승하였으며, Zn은 3.65(높음)에서 2.69(보통)로 오염도가 낮아졌다.

전국 평균 자연 배경농도와 광역자치단체별 자연 배경농도를 이용한 CF를 비교하였을 때, 강원과 충북은 전반적으로 전국 평균 자연 배경농도를 적용했을 때보다 광역자치단체별 자연 배경농도를 적용하였을 때 CF 값이 증가하였고, 서울과 울산의 경우 감소하는 경향을 보였다. 전국 평균 적용 대비 광역자치단체 평균 적용 시, 강원은 Cd의 CF 값의 차이가 약 5.3배로 큰 차이를 보였으며, 나머지 항목들은 0.9 – 1.1배의 차이를 보였다. 서울은 0.5 – 1.2배의 차이를 보이는데, Cd의 경우 CF 값의 차이가 12.15로 변화가 컸다. 광역자치단체별 자연 및 자연/사람활동 배경농도를 이용한 CF를 비교했을 때 강원과 충북은 0.8 – 1.4배의 차이를, 서울은 0.8 – 1.8배의 차이를 보였다. 울

**Table 7.** Regional average CF values by applied background concentration types

		< 1 low		1 ~ 3 moderate		3 ~ 6 considerable		≥ 6 very high	
		Cd	Cu	As	Hg	Pb	Zn	Ni	
National average	(Yoon et al., 2009)	GW	0.88 ± 1.13	1.14 ± 1.66	0.65 ± 0.66	1.40 ± 2.14	1.05 ± 1.23	2.13 ± 3.16	0.82 ± 1.28
		CB	2.15 ± 1.01	1.12 ± 1.19	0.49 ± 0.37	1.73 ± 3.63	1.25 ± 1.80	2.15 ± 2.84	0.74 ± 0.75
		SU	8.69 ± 3.74	4.9 ± 24.19	0.97 ± 0.81	3.03 ± 7.19	4.74 ± 27.35	7.66 ± 79.52	1.50 ± 1.04
		US	3.78 ± 6.71	2.98 ± 6.41	1.28 ± 3.11	2.44 ± 3.14	3.28 ± 5.31	3.65 ± 4.46	0.76 ± 0.68
	This study ('21-'22)	GW	2.76 ± 3.54	0.97 ± 1.41	0.73 ± 0.73	1.00 ± 1.53	0.97 ± 1.15	1.57 ± 2.33	0.99 ± 1.54
		CB	6.74 ± 3.17	0.95 ± 1.01	0.55 ± 0.42	1.23 ± 2.59	1.16 ± 1.67	1.58 ± 2.09	0.90 ± 0.91
		SU	27.26 ± 11.75	4.17 ± 20.59	1.08 ± 0.90	2.16 ± 5.14	4.41 ± 25.42	5.65 ± 58.64	1.82 ± 1.26
		US	11.87 ± 21.06	2.54 ± 5.45	1.43 ± 3.47	1.74 ± 2.24	3.05 ± 4.94	2.69 ± 3.29	0.92 ± 0.82
Average by metropolitan government	NB	GW	14.76 ± 18.93	1.10 ± 1.60	0.77 ± 0.78	0.94 ± 1.43	1.06 ± 1.24	1.72 ± 2.54	1.12 ± 1.74
		CB	8.23 ± 3.88	1.16 ± 1.24	0.60 ± 0.46	1.18 ± 2.47	1.40 ± 2.01	1.72 ± 2.28	0.86 ± 0.87
		SU	15.11 ± 6.52	2.33 ± 11.50	1.62 ± 1.35	0.84 ± 2.01	2.57 ± 14.83	3.66 ± 37.98	1.75 ± 1.22
		US	6.61 ± 11.72	1.62 ± 3.48	0.92 ± 2.25	2.04 ± 2.61	1.38 ± 2.24	1.68 ± 2.05	1.07 ± 0.96
	NB/AB ('21-'22)	GW	12.00 ± 15.40	1.26 ± 1.83	0.96 ± 0.97	1.36 ± 2.08	1.15 ± 1.36	1.62 ± 2.39	1.43 ± 2.22
		CB	7.85 ± 3.70	1.11 ± 1.18	0.70 ± 0.53	1.65 ± 3.47	1.37 ± 1.96	1.42 ± 1.87	0.93 ± 0.94
		SU	18.95 ± 8.17	2.43 ± 12.00	1.70 ± 1.42	1.55 ± 3.67	3.19 ± 18.37	3.99 ± 41.44	1.45 ± 1.00
		US	7.20 ± 12.77	1.54 ± 3.32	1.02 ± 2.48	8.55 ± 10.98	2.10 ± 3.41	1.60 ± 1.95	1.25 ± 1.12

산은 Hg의 경우 4.19배의 큰 차이를 보였으며 나머지 항목에 대해서는 0.9 – 1.5배의 차이를 보였다.

결과적으로, 배경농도의 선정에 따라 오염 정도가 크게 변화하게 되기 때문에, 보다 신뢰성 높은 배경농도의 산정 및 지속적인 업데이트가 필요할 것으로 판단되었다. 또한, 지역별 다양한 토양 특성을 고려하여 전국 평균 배경농도를 이용하는 것보다 광역자치단체별 평균 배경농도를 이용하는 것이 해당 자치단체의 오염 수준 평가에 적합하다고 생각된다. 지질학적 데이터를 참고하여 지질 단위별 배경농도를 산정하는 연구가 있으나(Yoon et al., 2009; Massas et al., 2013; Kowalska et al., 2016), 본 연구의 오염도 평가에 사용된 토양오염실태조사 데이터는 개인정보보호를 위하여 정확한 주소가 제공되어 있지 않다. 따라서 배경농도지점을 지질학적으로 구분하여 산출하더라도 그 적용에 어려움이 있다. 본 연구에서는 토양오염실태조사 데이터에 맞추어 배경농도를 광역자치단체 수준으로 구분하여 산정하였으나, 추후 지질도 등의 데이터를 활용해 지역의 지질학적 특성을 반영하여 배경농도 구역을 선정하면 더욱 신뢰도 있는 배경농도 산정이 가능할 것이다.

본 연구에서 사용한 CF 외에도  $I_{geo}$ , EF, PLI, PERI 등을 산출하여 오염 지표 간의 비교평가가 이루어지면 더욱 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

국내 토양오염 및 그에 따른 악영향에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있어, 단순하게 토양환경보전법의 기준농도 초과 여부에 따른 오염 수준 평가 이외에도 다양한 오염 지표를 활용한 토양오염평가 연구가 국내외적으로 활발하게 진행되고 있다. 오염 지표를 산정하는 다양한 방식이 제안되고 있는데, 대상 지역 토양의 배경농도와 비교하는 기법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그러므로 어떤 배경농도를 적용하는지에 따라 오염 수준이 크게 변화할 수 있어 대상 지역 특성을 반영한 합리적인 배경농도의 산정 및 적용이 필요하다. 기존 연구에서는 최근까지 2004–2005년의 자료로 산정된 배경농도를 이용하고 있어 이에 대한 업데이트가 필요한바, 본 연구에서는 최신의 토양 측정망 자료를 이용하여 자연 배경농도 및 자연/사람활동 배경농도를 산정하였고, 이를 이용하여 2022년 토양오염실태조사 결과에 대한 오염 수준을 평가하였다. 연구 결과, 기존 전국 평균 배경농도와 본 연구 결과인 최신 자료의 배경농도에서 유의미한 차이가 확인되었으며, 특히 17개 광역자치단체별 배경농도를 산정한 결과는

전국 평균값과 크게 다른 것으로 나타났다. 광역자치단체별 배경농도 적용 시 전국 평균 배경농도 적용 시와 비교하여 서울과 울산은 토양 오염 수준이 과대 평가되는 지역으로, 강원과 충북은 과소 평가되는 지역으로 확인되었다. 향후 관련 토양환경데이터의 확장 및 지속적인 축적과 함께 AI 기법의 폭발적 성장을 고려할 때, 지역 특성을 보다 정확하게 고려할 수 있는 배경농도 산정 및 적용에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

#### 사 사

본 연구는 환경부 한국환경산업기술원의 지중환경오염·위해관리기술개발사업(RS-2021-KE001466) 및 과학기술정보통신부 한국연구재단의 지원(RS-2024-00350023)을 받아 수행되었습니다.

#### References

- Håkanson, L., 1980, An ecological risk index for aquatic. Pollution control: A sedimentological approach, *Water Res.*, **14**, 975-1001.
- He, Y., Wang, W., Chen, Y., Hua, J., Deng, C., and Li, H., 2024, Source-sink response analysis of heavy metals and soil pollution assessment in non-ferrous metal industrial agglomeration areas based on decision unit, *Sci. Total Environ.*, **906**, 167437.
- Kahangwa, C. A., 2022, Application of principal component analysis, cluster analysis, pollution index and geoaccumulation index in pollution assessment with heavy metals from gold mining operations, *Tanzania, J. Geosci. Environ. Protect.*, **10**(4), 303-317.
- Khorshidi, N., Parsa, M., Lentz, D. R., and Sobhanverdi, J., 2021, Identification of heavy metal pollution sources and its associated risk assessment in an industrial town using the K-means clustering technique, *Appl. Geochem.*, **135**, 105113.
- Kowalska, J., Mazurek, R., Gąsiorek, M., Setlak, M., Zaleski, T., and Waroszewski, J., 2016, Soil pollution indices conditioned by medieval metallurgical activity—A case study from Krakow (Poland), *Environ. Pollut.*, **218**, 1023-1036.
- Lim, J. E., Ahn, M. C., Choi, W., Kim, I. G., Lee, J. E., Kim, H., Shin, S. J., Kim, S. H. and Jung, Y. J., 2023, Application of Heavy Metal (loid) Pollution Indices for Urban Park Soils in Gangwon Province, *J. Agric. Life Environ. Sci.*, **35**(2), 139-147.
- Liu, W., Xu, Y., Liu, W., Liu, Q., Yu, S., Liu, Y., Wang, X., Tao, S., 2018, Oxidative potential of ambient PM<sub>2.5</sub> in the coastal cities of the Bohai Sea, northern China: seasonal variation and source apportionment, *Environ. Pollut.*, **236**, 514-528.



- Massas, I., Kalivas, D., Ehaliotis, C., and Gasparatos, D., 2013, Total and available heavy metal concentrations in soils of the Thriassio plain (Greece) and assessment of soil pollution indexes, *Environ. Monit. Assess.*, **185**, 6751-6766.
- Memoli, V., Esposito, F., Panico, S. C., De Marco, A., Barile, R., and Maisto, G., 2019, Evaluation of tourism impact on soil metal accumulation through single and integrated indices, *Sci. Total Environ.*, **682**, 685-691.
- Mikkonen, H. G., Dasika, R., Drake, J. A., Wallis, C. J., Clarke, B. O., and Reichman, S. M., 2018, Evaluation of environmental and anthropogenic influences on ambient background metal and metalloid concentrations in soil, *Sci. Total Environ.*, **624**, 599-610.
- Müller, G., 1969, Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River, *GeoJournal*, **2**, 108-118.
- Ogbeibu, A. E., Omoigberale, M. O., Ezenwa, I. M., Eziza, J. O., and Igwe, J. O., 2014, Using pollution load index and geoaccumulation index for the assessment of heavy metal pollution and sediment quality of the Benin River, Nigeria, *Nat. Environ.*, **2**(1), 1-9.
- Shin, D., Park, S. J., Jo, Y. T., Bong, J. E., and Park, J. H., 2021, Risk assessment for Soil Contamination Warning Standard and Soil Background Concentration, *J. Soil Groundwater Environ.*, **26**(3), 37-49.
- Sutherland, R. A., 2000, Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii, *Environ. Geol.*, **39**, 611-627.
- Taghavi, M., Bakhshi, K., Zarei, A., Hoseinzadeh, E., and Gholizadeh, A., 2024, Soil pollution indices and health risk assessment of metal (loid)s in the agricultural soil of pistachio orchards, *Sci. Rep.*, **14**(1), 8971.
- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., and Jeffrey, D. W., 1980, Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index, *Helgol. Meeresunters.*, **33**, 566-575.
- Xie, T., Lu, F., Wang, M., Zhang, Y., Liu, C., and Chen, W., 2021, The application of urban anthropogenic background to pollution evaluation and source identification of soil contaminants in Macau, China, *Sci. Total Environ.*, **778**, 146263.
- Yang, H., Wang, F., Yu, J., Huang, K., Zhang, H., and Fu, Z., 2021, An improved weighted index for the assessment of heavy metal pollution in soils in Zhejiang, China, *Environ. Res.*, **192**, 110246.
- Yoon, J. K., Kim, D. H., Kim, T. S., Park, J. G., Chung, I. R., Kim, J. H., and Kim, H., 2009, Evaluation on natural background of the soil heavy metals in Korea, *J. Soil Groundwater Environ.*, **14**(3), 32-39.
- Zhiyuan, W., Dengfeng, W., Huiping, Z., and Zhiping, Q. I., 2011, Assessment of soil heavy metal pollution with principal component analysis and geoaccumulation index, *Procedia Environ. Sci.*, **10**, 1946-1952.