

통계분석을 활용한 경기도 내 토양오염 우려지역의 오염도 특성 연구

임주희·김세광·김균희·김재광·이현경·손영금·정윤하·김동완·성연국

토양분석팀

Pollution Characteristics of the Areas Concerned about Soil Contamination in Gyeonggi Province Using Statistical Analysis

Ju-Hee Lim, Se-Kwang Kim, Kyun-Hee Kim, Jae-Kwang Kim, Hyun-Kyung Lee,
Yeong-Geum Son, Yun-Ha Jeong, Dong-Wan Kim and Yeon-Kook Sung

Soil Analysis Team

Abstract: It explained that the types of heavy metals that have a major impact on areas concerned about soil contamination and areas with high levels of heavy metal contamination, using statistical analysis of heavy metal concentrations of soil contamination surveys in Gyeonggi Province from 2010 to 2021. The average of soil pollution scores (SPS) were the highest in the 'Metal-related industries in areas of waste treatment and recycling businesses' which is 210.5, followed by the 'Areas of storage and use for ores and scrap metals' 189.5, and the 'Metal-related industries in industrial complexes and factory areas' 159.1. The average of soil pollution indices (SPI) were grade 2 except for 'Metal-related industries in areas of waste treatment and recycling businesses' which was grade 3. Using the principal component analysis (PCA) and the factor analysis, it was extracted that the factor 1, which is Zn, Pb and Cu, and the factor 2, Cd, As and Ni. As a result of the cluster analysis for the factors extracted from the factor analysis, the areas concerned about soil contamination were classified into two groups at a relative distance 5, and the areas which were 'Metal-related industries in areas of waste treatment and recycling businesses' and 'Areas of storage and use for ores and scrap metals' were found to be more concerned about soil contamination by heavy metals than other areas.

Key words: soil contamination, principal component analysis, factor analysis, cluster analysis

요약: 2010년부터 2021년까지 경기도 토양오염실태조사 내 토양오염 우려지역의 토양오염물질 중 중금속 결과값을 통계분석하여 그 지역에 주요한 영향을 미치는 중금속의 종류와 중금속 오염도가 높은 지역을 확인하였다. 토양오염점수(SPS)의 평균값은 '폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 업종 지역'이 210.5, '원광석·고철 등의 보관·사용지역'은 189.5, '산업단지 및 공장지역 중 금속 관련 업종 지역'은 159.1 순으로 높게 나타났으며 토양오염지수(SPI)의 평균은 3등급인 '폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 지역'을 제외하고 모두 2등급이었다. 주성분분석 및 요인분석을 통하여 제1요인은 Zn, Pb, Cu, 제2요인은 Cd, As, Ni로 나타났다. 요인분석 결과로부터 추출된 제1요인과 제2요인에 대한 군집분석 결과, 토양오염 우려지역은 상대적 거리 5 이하에서 두 그룹으로 분류되었으며, '폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 업종 지역'과 '원광석·고철 등의 보관·사용지역'이 다른 지역보다 중금속에 의한 토양오염이 우려되는 지역으로 볼 수 있었다.

주제어: 토양오염, 주성분분석, 요인분석, 군집분석

1. 서론

토양은 인간을 포함한 다양한 생물의 생활 터전으로 식량 생산을 위한 경작지뿐만 아니라 각종 오염물질을 최종 분해하여 생태계의 순환을 유지하는 중요한 역할을 하는 환경매체이다. 그러나 산업 활동과 도시화 등 인간의 활동에 의한 여러 가지 오염물질의 생성으로 인하여 환경오염 문제가 발생되어 자연 생태계가 정화 능력을 상실하면서 환경 중에 오염물질이 축적되고 있다. 환경오염 중 토양오염은 토양 내 특정한 중금속 및 화학물질 등이 고농도로 존재하여 사람의 건강이나 생태계에 악영향을 주는 상태이며 오염물질이 토양에 흡수될 경우 물이나 공기와 같은 이동성이 없으므로 토양에 장기간 잔류하는 상태가 된다¹⁾. 또한 다른 환경오염보다 쉽게 눈에 띄지 않는 잠재성과 오염의 시작으로부터 문제가 발생하기까지의 시간차가 있으므로 대기나 수질오염보다 오염을 정화하는 것에 더 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 사전에 오염을 방지하는 것이 중요하다²⁾.

특히 토양오염물질 중 중금속은 휘발되거나 자연정화 등으로 처리되기 어렵기 때문에 토양에 축적되는 특징이 있으며 산업 활동, 광산 활동, 폐기물 발생, 교통량 증가 등의 영향으로 인위적으로 토양에 유입되는 경우가 많다³⁾. 연구대상 지역인 경기도의 경우 2022년 기준 산업단지가 192개로 경상남도 206개에 이어 전국에서 두 번째로 많으며 지정면적 250,609천 m²로 가장 넓다⁴⁾. 또한 폐기물 발생량은 2020년 기준으로 3,959만 톤이며 전국 발생량 중 20.3%를 차지하여 전국에서 가장 많은 양의 폐기물이 발생되고 있다⁵⁾. 따라서 경기도는 토양오염에 영향을 주는 오염물질이 발생할 가능성이 크기 때문에 토양오염에 대한 방지 및 관리가 필요하다.

환경부에서는 매년 토양오염실태조사 등을 통하여 토양오염에 대해서 조사하고 있으나 이에 대한 단순 결과값으로만 자료를 활용하고 있어 토양오염 방지 및 관리에 조사자료를 적극적으로 활용하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서

는 경기도 토양오염실태조사 내 토양오염 우려지역의 토양오염물질 중 중금속 결과값을 통계 분석 및 평가를 통하여 토양오염 우려지역에 영향을 미칠 수 있는 중금속의 종류와 중금속 오염도가 높을 가능성이 있는 토양오염 우려지역을 확인함으로써 선제적 토양오염 관리를 위한 참고자료로 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상

환경부에서 매년 시행되고 있는 토양오염실태조사 결과⁶⁾ 중 2010년부터 2021년까지 12년간의 누적된 결과를 활용하였다. 결과값은 토양지하수정보시스템(Soil groundwater information system, SGIS)의 자료⁶⁾를 이용하였다. 토양오염 실태조사 대상지역은 오염원에 의하여 영향을 받고 있거나 영향을 받을 가능성이 있는 지역을 16개 종류로 나누어 각 오염원 지역에 대한 토양오염도를 조사하고 있다. Kim 등²⁾의 연구에서는 이들 16개 종류의 오염원 지역 중 ‘산업단지 및 공장지역’, ‘교통관련시설지역’, ‘폐기물처리 및 재활용 관련 지역’, ‘원광석·고철 등의 보관·사용지역’이 토양오염 중점관리가 필요한 지역으로 분석하고 있다. 따라서 본 연구에서도 위의 중점관리 지역을 연구대상 지역으로 선정하였다. 2021년 기준 전체 23개 토양오염실태조사 분석항목 중 주요 오염물질인 중금속 8개 항목(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺, Zn, Ni)을 분석 대상으로 하였다. 업종에 따른 토양 내 중금속 오염의 차이를 알아보기 위하여 ‘산업단지 및 공장지역’과 ‘폐기물처리 및 재활용 관련 지역’을 경기데이터드림사이트⁷⁾에서 ‘업종별 사업체 현황(2022)’, ‘폐기물처리업체 현황 자료(2022)’를 이용하여 금속과 관련된 공정이나 제품을 제조하는 ‘금속 관련 업종 지역’과 비교적 금속과 관련이 적은 ‘기타 업종 지역’으로 구분하였다. 그리고 ‘교통관련시설지역’은 이 지역의 대표적인 업종인 ‘주유소 관련 지역’과 ‘기타 업종 지

역'으로 나눠서 분석하였다. 또한 '원광석·고철 등의 보관·사용지역'은 '금속 관련 업종 지역'으로 분류하였다.

2.2. 토양오염지수

토양오염물질 중 중금속 농도로 토양의 상태를 종합적으로 평가하는 토양오염지수(Soil pollution index, SPI)를 사용하여 토양오염 정도를 파악하였다. 중금속 농도를 이용하여 토양오염점수(Soil pollution score, SPS)를 산출하고 토양오염도를 평가하였다. 토양오염점수는 다음의 식으로 계산된다⁸⁾.

$$SPS = \sum_i \frac{C_i}{TV_i} \times 100$$

i: Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr⁶⁺, Zn, Ni

C_i: Heavy metal concentration

TV_i: Standards of soil pollution for heavy metals

토양오염점수는 중금속 농도를 각 중금속의 1지역 토양오염 우려기준으로 나눈 값으로 계산하며 이를 4등급으로 나누어 분류한다. 토양오염점수가 100점 미만이면 토양상태가 양호한 지역이며 100점 이상부터는 토양오염이 존재하는 지역으로 볼 수 있다. 토양오염점수에 따른 토양오염지수와 토양오염정도에 대한 설명은 Table 1과 같다⁹⁾.

Table 1. Soil pollution index (SPI) and summary of pollution degrees based on soil pollution score (SPS)

Soil Pollution Index	Soil Pollution Score	Pollution degree
1	SPS<100	good soil condition
2	100≤SPS<200	concerned about soil contamination
3	200≤SPS<300	concerned about soil contamination
4	300≤SPS	considered as contaminated soil

2.3. 통계분석 방법

통계분석은 SPSS Statistics (ver. 29.0)를 이용하였으며, 상관관계 분석, 주성분분석(principal component analysis, PCA), 요인분석 및 군집분석을 시행하였다. 상관관계는 Kolmogorov-Smirnov test로 정규성을 확인한 결과 각각의 항목이 정규성 가정을 만족하지 않았으므로 비모수적 상관분석인 스피어만 순위상관계수(Spearman's rank correlation coefficient)를 구하였다.

2.3.1. 주성분분석 및 요인분석

주성분분석은 다변량 분석 기법으로 차원을 축소하면서 다수의 서로 상관관계가 있는 변수들을 소수의 의미 있고 서로 독립적인 주성분으로 변화시켜서^{10,11)} 중요한 주성분으로 전체 변동(variance)의 대부분을 설명하는 방법이다^{11,12)}. 주성분의 수는 고유값(eigenvalue)이 1.0 이상인 값으로 정하였다. 고유값이 1.0 이하이면 1개의 요인이 변수 1개의 분산을 설명할 수 없기 때문에 제외하고 요인을 추출하였다.

요인분석은 변수들 사이의 연관성을 바탕으로 공통된 요인을 추출하여 전체 자료를 설명할 수 있는 변수의 수를 줄이는 방법이다¹³⁾. 요인에 대한 해석을 쉽게 하기 위해서는 요인축을 회전하는 방법을 사용한다. 본 연구에서는 요인축이 직교하도록 하는 직교회전방법 중 Varimax 회전방법을 사용하여 요인 적재값(factor loading)이 가장 높은 변수의 수를 최소화하였다.

2.3.2. 군집분석

군집분석은 집단에 대한 사전정보 없이 관측값들의 거리나 유사성을 바탕으로 자료를 군집으로 나누는 다변량 분석법이다¹³⁾. 군집을 나누는 방법은 계층적 방법으로 상향식 구조인 계층구조(dendrogram)를 사용하였으며 군집 대상 간의 거리 측정은 모든 변수 차이를 제공하여 합산하는 유클리디안 제곱거리(Squared Euclidean distance) 방법을 이용하였다. 군집화 방법은 공

간상의 거리에 기초한 다양한 방법 중 오차의 제곱합을 최소로 하여 정보 손실량을 최소가 되도록 하는 워드법(Ward's method)으로 분석하였다¹⁰⁾.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양오염물질 농도 및 상관관계 분석

경기도 내 토양오염실태조사 결과 중 2010년부터 2021년까지 12년간의 중금속 농도 평균값을 Table 2에 나타냈다. 전체 23개 분석항목 중 중금속 8개 항목에 대하여 정리하였는데 결과값에서 표준화 점수(z-score)의 절대값이 3보다 큰 값을 이상치로 하여 제거한 후 계산하였다. 중금속 농도는 8개 항목 중 Cd, As와 불검출인 Cr⁶⁺을 제외하고 '폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 지역'에서 가장 높은 값을 나타냈다. Cd는 '원광석·고철 등의 보관·사용지역'이 가장 높았고 As는 '교통관련시설지역 중 주유소'에서 가장 높았다.

토양오염물질 간의 상관성을 알아보기 위하여 중금속 8개 항목에 대하여 상관관계를 분석한 결과는 Table 3과 같다. 중금속 항목은 양의 상관관계를 보였으며, 그중 Cu는 Pb와 상관관계수 0.411, Zn과 0.545, Ni과 0.575로 비교적 높은 양의 상관관계를 보였다. 그리고 Pb는 As와 0.400, Zn과 0.612로 상대적으로 높은 양의 상관성을 보였다.

3.2. 토양오염지수를 이용한 토양오염도 평가

중점관리가 필요한 4개 지역에 대하여 중금속 결과값을 이용하여 토양오염점수(SPS)를 계산하였다. Table 4에 지역에 따른 토양오염점수와 토양오염지수(SPI)의 평균값을 나타냈다. 토양오염점수는 전 지역의 평균값 152.8 보다 높은 지역은 '폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 업종 지역'이 210.5, '원광석·고철 등의 보관·사용지역'이 189.5, '산업단지 및 공장지역

중 금속 관련 업종 지역'이 159.1로 나타났다. 또한 전 지역 평균값보다 낮은 지역은 금속 관련 업종이 아닌 지역이므로 금속 관련 업종이 토양 중 중금속 농도에 영향을 줄 수 있다는 점을 확인하였다. 또한 토양오염지수는 3등급인 '폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 업종 지역'을 제외하고 모두 2등급이었다.

3.3. 통계분석 결과

3.3.1. 주성분분석 및 요인분석

중금속 8개 항목에 대하여 주성분분석 및 요인분석을 시행하였다. 8개 요인에 대한 고유값(eigenvalue)과 토양오염에 미치는 기여율은 Table 5에 나타내었다. 고유값이 1.0 이상인 값을 갖는 주성분 축을 고려하여 2개의 요인을 추출하였다. 제1요인, 제2요인은 고유값이 각각 2.238, 1.209로 1.0 이상의 고유값으로 나타났다. 두 번째 주성분까지 토양오염에 대하여 43.1%를 설명하고 있으며, 제1요인은 25.1%, 제2요인은 18.0%를 기여하고 있다. 주성분분석을 활용하여 요인을 추출한 후 요인분석을 수행한 결과는 Table 6과 같다. 제1요인은 Zn, Pb, Cu, 제2요인은 Cd, As, Ni로 하였다. 제1요인, 제2요인의 항목은 2016년부터 2020년까지 5개년 동안 조사한 전국 토양오염실태조사 결과¹⁴⁾에서 토양오염 우려기준 초과항목이며, 제1요인 중 Zn은 86건으로 가장 많은 건수가 초과한 항목이고 Pb는 47건으로 두 번째로 초과 건수가 많은 항목이었다. 그리고 Cu는 35건으로 중금속 중 세 번째로 초과 건수가 많았다. 제2요인인 Cd, As, Ni는 각각 22건, 10건, 4건이 초과된 항목이었다. 또한 제1요인의 항목은 Table 3의 결과와 같이 상관관계가 비교적 높은 값을 가진 항목이 같은 요인으로 묶인 것을 확인하였다.

Table 2. The average concentrations of heavy metals in the areas concerned about soil contamination
(Unit: mg/kg)

Site		Number of points	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁶⁺	Zn	Ni
Industrial complexes and factory areas	Total	1422	0.59 ¹⁾ (0.97)	34.5 (66.2)	5.24 (7.30)	N.D. ²⁾	31.8 (37.1)	N.D.	131.0 (169.2)	30.4 (52.3)
	Metal-related	306	0.82 (1.25)	43.2 (97.9)	5.12 (9.06)	N.D.	32.6 (44.7)	N.D.	125.8 (146.2)	29.6 (43.8)
	Others	1116	0.52 (0.86)	31.9 (53.2)	5.27 (6.71)	N.D.	31.5 (34.6)	N.D.	132.5 (175.5)	30.7 (54.6)
Areas of transportation facilities	Total	2723	0.69 (1.01)	31.9 (37.6)	5.12 (6.72)	N.D.	27.8 (28.3)	N.D.	115.8 (121.7)	30.2 (29.4)
	Gas station	1602	0.69 (0.97)	30.9 (45.0)	5.86 (6.65)	N.D.	27.8 (28.3)	N.D.	114.2 (120.9)	28.3 (27.7)
	Others	1121	0.70 (1.04)	32.8 (29.4)	4.46 (6.72)	0.05 (0.11)	27.8 (28.2)	N.D.	117.2 (122.4)	31.9 (30.8)
Areas of waste treatment and recycling businesses	Total	732	0.59 (0.93)	39.8 (59.4)	4.45 (6.29)	0.06 (0.16)	36.0 (46.4)	N.D.	146.2 (200.4)	28.9 (27.1)
	Metal-related	49	0.49 (0.71)	52.2 (124.9)	5.84 (6.57)	0.07 (0.19)	60.2 (63.7)	N.D.	212.5 (482.6)	39.6 (41.4)
	Others	683	0.60 (0.94)	38.9 (51.7)	4.35 (6.26)	0.06 (0.15)	34.3 (44.5)	N.D.	141.5 (163.0)	28.1 (25.6)
Areas of storage and use for ores and scrap metals		667	0.85 (1.12)	47.7 (99.0)	4.77 (7.10)	0.05 (0.12)	43.9 (70.9)	N.D.	181.7 (299.9)	35.4 (42.2)
Total		5544	0.67 (1.00)	36.0 (61.3)	5.00 (6.88)	N.D.	32.4 (42.2)	N.D.	134.1 (183.2)	30.8 (38.9)
Min			0	0	0	0	0	0	0	0
Max			7.33	1354.7	127.42	1.59	737.6	1.4	3352.7	1106.3

¹⁾ mean (standard deviation)

²⁾ not detected

Table 3. Summary of non-parametric correlation coefficients (Spearman's rank correlation coefficient) of heavy metals

	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁶⁺	Zn	Ni
Cd	1.000	0.215*	0.320*	0.346*	0.330*	0.015	0.250*	0.125*
Cu		1.000	0.274*	0.165*	0.411*	0.099*	0.545*	0.575*
As			1.000	0.131*	0.400*	0.067*	0.215*	0.143*
Hg				1.000	0.179*	0.020	0.150*	0.028
Pb					1.000	0.068*	0.612*	0.172*
Cr ⁶⁺						1.000	0.089*	0.058*
Zn							1.000	0.350*
Ni								1.000

* $p < 0.01$ (2-tailed)

Table 4. The average of soil pollution scores (SPS) and soil pollution indices (SPI) of the sites

Site		SPS	SPI
Industrial complexes and factory areas	Total	149.9 ¹⁾ (129.3)	2
	Metal-related	159.1 (142.9)	2
	Others	147.2 (125.0)	2
Areas of transportation facilities	Total	141.2 (88.5)	2
	Gas station	141.8 (86.7)	2
	Others	140.7 (90.2)	2
Areas of waste treatment and recycling businesses	Total	155.5 (130.5)	2
	Metal-related	210.5 (236.8)	3
	Others	151.5 (118.5)	2
Areas of storage and use for ores and scrap metals		189.5 (176.9)	2
Mean		152.8 (124.2)	2
Min		0	
Max		1645.2	

¹⁾ mean (standard deviation)

3.3.2. 군집분석

요인분석 결과에서 추출된 제1요인인 Zn, Pb, Cu와 제2요인인 Cd, As, Ni에 대하여 군집분석을 시행하였다. 군집분석 결과는 Fig. 1에 나타냈으며, Fig. 1 (a)와 (b)는 각각 제1요인과 제2요인에 대한 군집분석 결과로 지역 간의 관계를 거리로 도식화한 것이다. 제1요인과 제2요인은 상대적 거리 5 이하에서 모두 두 그룹으로 분류되었다. 1그룹은 ‘산업단지 및 공장지역 중 금속 관련 업종 지역(Industry_Metal)’과 ‘기타 업종 지역(Industry_Others)’, ‘교통관련시설 중 주유소 관련 지역(Transportation_Gas_station)’과 ‘기타 업종 지역(Transportation_Others)’, ‘폐기물 처리 및 재활용 관련 지역 중 기타 업종 지역(Waste_Others)’으로 분류되었고 2그룹은 ‘폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 업종 지역(Waste_Metal)’과 ‘원광석·고철 등의 보관·사용지역(Ores and scrap metals)’으로 분류되었다. Table 2의 토양오염 우려지역에 따른 중금속 농도 평균값과 Table 4의 토양오염점수(SPS)로 보아 중금속에 의해 더 오염된 지역은 2그룹으로 볼 수 있다. 그리고 ‘폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 업종 지역’은 중금속을 포함한 폐기물이 강우나 바람에 의하여 분산되어 주변 농경지 등의 토양을 오염시킨다는 연구 결과¹⁵⁻¹⁷⁾와 같이 폐기물 내 중금속 함량이 높을 것으로 예상되는 금속 관련 업종 지역에서 중금속의 농도가 높게 나온 것으로 볼 수 있다.

Table 5. Initial eigenvalues and selected factor loadings after Varimax rotation

Component	Initial eigenvalues			Rotation sums of squared loadings		
	Total	% of variance	Cumulative %	Total	% of variance	Cumulative %
1	2.238	27.979	27.979	2.008	25.103	25.103
2	1.209	15.109	43.088	1.439	17.985	43.088
3	0.999	12.493	55.581			
4	0.942	11.769	67.350			
5	0.863	10.782	78.132			
6	0.709	8.859	86.991			
7	0.616	7.703	94.694			
8	0.424	5.306	100.000			

Table 6. Rotated component matrix by factor analysis

Variable	Component	
	1	2
Zn	0.836	0.051
Pb	0.757	0.151
Cu	0.686	0.055
Hg	0.431	0.346
Cr ⁶⁺	0.188	-0.153
Ni	0.161	0.474
Cd	0.111	0.771
As	-0.072	0.670

그리고 ‘원광석·고철 등의 보관·사용지역’의 경우, 원광석의 취급 및 운반 과정에서 비산으로 인하여 토양에서 중금속 오염이 발생한다는 점이 연구된 것^{18,19)}과 같이 원광석으로 인하여 토양 내 중금속 오염에 영향을 줄 수 있다. 또한 경기도토양보전계획²⁰⁾의 ‘11년~15년 경기도 토양오염실태조사 분석 결과 종합’에서 ‘원광석·고철 등의 보관·사용지역’과 ‘폐기물처리 및 재활용 관련 지역’이 중금속 오염으로 우려되는 지역으로 분석한 결과와 군집분석의 결과가 유사하였다. 따라서 ‘폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 업종 지역’과 ‘원광석·고철 등의 보관·사용지역’이 중금속 오염에 영향을 받을 가능성이 크므로 이에 대한 토양오염 방지 및 관리가 필요하다.

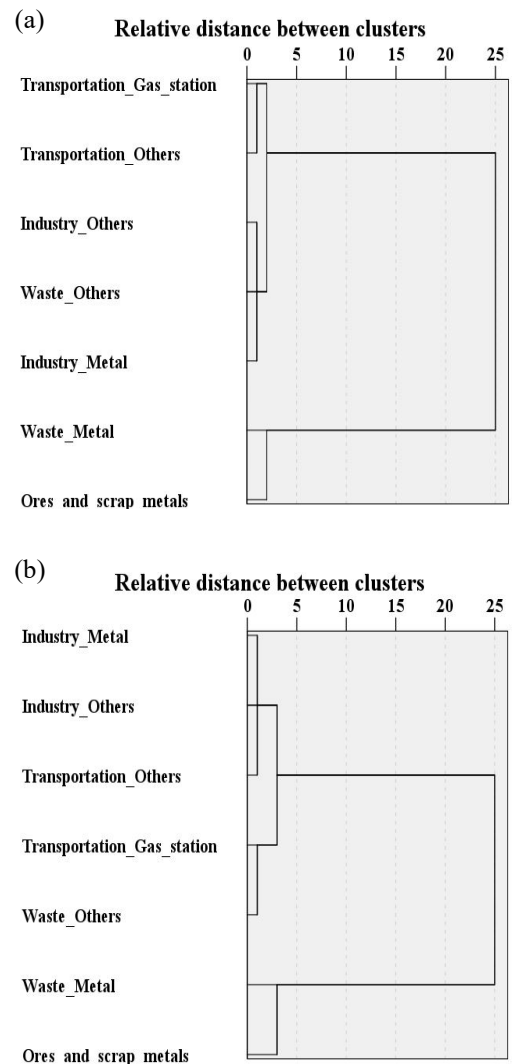


Fig. 1. Dendrogram for the sites resulted from cluster analysis by factor 1 (a) and factor 2 (b).

4. 결 론

경기도 내 토양오염 우려지역의 중금속 농도 결과값에 대하여 통계분석하여 토양오염에 주요한 영향을 미치는 중금속의 종류와 중금속 오염에 영향을 많이 받는 지역을 알아보고자 하였다. 분석방법은 토양오염도 평가, 주성분분석, 요인분석 및 군집분석이며 2010년부터 2021년까지의 토양오염실태조사 결과를 이용하였다.

토양오염지수(SPI)를 이용한 토양오염도 평가에서 토양오염점수(SPS)의 전 지역 평균값 152.8보다 높은 지역은 '폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 업종 지역'이 210.5, '원광석·고철 등의 보관·사용지역'은 189.5, '산업단지 및 공장지역 중 금속 관련 업종 지역'은 159.1이었으며, 전 지역 평균값보다 낮은 지역은 금속 관련 업종이 아닌 지역으로 나타났다. 따라서 금속 관련 업종이 토양 중 중금속 농도에 영향을 줄 수 있다는 점을 확인하였다. 또한 토양오염지수의 평균값은 3등급인 '폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 업종 지역'을 제외하고 모두 2등급이었다.

주성분분석 및 요인분석 결과, 제1요인, 제2요인은 토양오염에 대하여 43.1%를 설명하고 있으며, 제1요인은 25.1%, 제2요인은 18.0%를 기여하고 있다. 고유값이 1.0 이상인 값을 주성분으로 하여 요인분석을 수행한 결과 제1요인은 Zn, Pb, Cu, 제2요인은 Cd, As, Ni로 나타났다.

요인분석으로 추출된 제1요인과 제2요인에 대한 군집분석 결과, 상대적 거리 5 이하에서 모두 두 그룹으로 분류되었으며, 같은 그룹으로 묶인 '폐기물처리 및 재활용 관련 지역 중 금속 관련 업종 지역'과 '원광석·고철 등의 보관·사용 지역'이 중금속 농도 평균값과 토양오염점수로 보아 중금속에 의해 더 오염된 지역이라고 할 수 있었다. 따라서 위의 두 지역은 다른 지역보다 토양 내 중금속 오염이 우려되는 것으로 나타났다으므로 이에 대한 관리가 필요하다.

5. 감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 시·도 보건환경연구원 국고보조 사업의 일환으로 진행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Ha, D. Y., Moon, S. H., and Lee, Y. J. (2004), Effect of pH, humic acid and metal concentration on adsorption of Pb, Hg, and Cd in the soil, *J Korea Soc Waste Manag.*, **21**(6), pp. 535-544.
2. Kim, J. -Y., Bae, Y. -S., Park, J. -H., Son, Y. -G., and Oh, J. -K. (2019), Mapping soil contamination using QGIS, *J Environ Health Sci.*, **45**(5), pp. 487-496.
3. Jeong, T. -U., Cho, E. -J., Jeong, J. -E., Ji, H. -S., Lee, K. -S., Yoo, P. -J., Kim, G. -G., Choi, J. -Y., Park, J. -H., Kim, S. -H., Heo, J. -S., and Seo, D. -C. (2015), Soil contamination of heavy metals in national industrial complexes, Korea, *Korean J of Environ Agric.*, **34**(2), pp. 69-76.
4. 한국산업단지공단 (2022), 전국산업단지현황 통계 통계표(22.3분기).
5. 환경부, 한국환경공단 (2021), 전국 폐기물 발생 및 처리 현황(2020년도).
6. Ministry of Environment (2010 - 2021), Soil contamination survey.
7. Gyeonggi data dream, <http://data.gg.go.kr>
8. Kwag, J. -S., Cho, G. -J., Jeong, M. -E., Ju, K. -Y., Song, B. -J., and Ryou D. -C. (2019), Contamination indices and heavy metal concentrations in urban garden soil of Busan metropolis, *Korean J. Soil Sci. Fert.*, **52**(4), pp. 502-512.
9. Kong, H. -j., Wi, W., Kim, S. -h., Park, O. -h., Jang, G. -s., J, H. -y., Bae. S. -j., Jeong, S. -k., and Cho, Y. -g. (2018), Distribution

- Characteristics of soil contaminants in Hanam industrial complex, Gwangju by land use, *J. Soil Groundwater Environ.*, **23**(2), pp. 30-39.
10. Koo, J. -Y., Yu, M. -J., Kim, S. -G., Shim, M. -H., and Koizumi, A. (2005), Estimation of long-term water demand by principal component and cluster analysis and practical application, *J. of KSEE*, **27**(8), pp. 870-876.
 11. Sena, M. M., Frighetto, R. T. S., Valarini, P. J., Tokeshi, H., and Poppi, R. J. (2002), Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study, *Soil & Tillage Research*, **67**(2), pp. 171-181.
 12. Ko, K. -S., Kim, Y., Koh, D. -C., Lee, K. -S., Lee, S. -G., Kang, C. -H., Seong, H. -J., and Park, W. -B. (2005), Hydrogeochemical characterization of groundwater in Jeju island using principal component analysis and geostatistics, *Econ. Environ. Geol.*, **38**(4), pp. 435-450.
 13. Jung, S., Lee, D., Hwang, K., Lee, K., Choi, K., Im, S., Lee, Y., Lee, J., and Lim, B. (2012), Evaluation of pollutant characteristics in Yeongsan river using multivariate analysis, *Korean J. Limnol.*, **45**(4), pp. 368-377.
 14. 환경부, 국립환경과학원 (2016 - 2020), 토양측정망 및 토양오염실태조사 결과.
 15. Jung, M. C., Ahn, J. S., and Chon, H. -T. (2001), Environmental contamination and sequential extraction of trace elements from mine wastes around various metalliferous mines in Korea, *Geosystem Engineering*, **4**(2), pp. 50-60.
 16. Jung, M. C., Jung, M. Y., and Choi, Y. W. (2004), Environmental assessment of heavy metals around abandoned metalliferous mine in Korea, *Econ. Environ. Geol.*, **37**(1), pp. 21-33.
 17. Lee, P. K., Kang, M. J., Choi, S. H., and Shin, S. C. (2004), Chemical speciation and potential mobility of heavy metals in tailings and contaminated soils, *Econ. Environ. Geol.*, **37**(1), pp. 87-98.
 18. Han, H. -J., Ko, M. -S., Ko, J. I., and Lee, J. -U. (2020), Study on soil extraction methods for contamination assessment of heavy metals in soil, *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, **57**(5), pp. 471-482.
 19. 환경부 (2006), 온산국가산업단지 일부 토양, 중금속으로 오염, 환경부 보도자료.
 20. 김영석, 정승우, 고석오, 허정현, 배정환, 안경현, 장석주 (2017), 경기도 토양보전계획 2017 ~ 2026 요약보고서, 경기도.