

중금속 및 비소오염 토양질 평가를 위한 토양오염지표의 고안과 응용 가능성

박용하

한국환경기술개발원

Designing and Applicability of Soil Pollution Indices for Estimating Quality of Soil Polluted with Heavy Metals and Arsenic

Yong-Ha Park

Korea Environment Technology and Research Institute

ABSTRACT

Soil pollution indices (SPI) were designed for estimating quality of soil polluted with arsenic and heavy metals. Applying the quality reference value of soil based on its multifunctional purpose was a key step. For considering multifunctions of soil, soil was classified into 4 groups-agricultural land, residential area, recreational area, factorial site. Then, each concentration of arsenic and each of five heavy metals (Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) in soils grouped was transformed to a mathematical value based on the soil quality reference value which may stand for ecological impact. Soil pollution score (SPS) was the addition of the 6 values transformed, and the range of the SPS was divided into 4 Soil Pollution Classes (SPC). The SPC 1, 2, 3, and 4 were SPS <100, SPS 100-200, SPS >200-300, and SPS >300, respectively.

SPS and SPC were evaluated with the results of the data from employing the Soil Network of 1994. Based on the soil quality reference values, SPS and SPC of the Soil Network's data were transformed and classified, respectively. Then, SPS and SPC were compared with arsenic and the 5 heavy metal contents of their reference values resulted from the Soil Network's. From this method, soil quality of most of the Soil Network area was estimated to be healthy. However, ca. 3.0~4.0% of the Soil Network area was determined in a range of slightly and heavily polluted. As the mean value of SPS of the Soil Network's was 66.2 which indicates most of soil evaluated was healthy. When the SPSs of the data were divided into 4 groups of SPC, Class 1 (Good quality of soil), Class 2 (Need to be checked area 1), Class 3 (Need to be checked area 2) and Class 4 (Polluted area) were 87.0, 9.4, 2.4, 1.2%, respectively. Using SPI were comparable to those of heavy metal contents in soils, and would be comprehensive to determine the status of soil quality. Methodology of the developing SPI would be applicable to the other soil pollutants such as organic and inorganics than arsenic and 5 heavy metals used here.

Key word : Soil, Metalliferous, Pollution, Score, Indices

요 약 문

중금속으로 오염된 토양질을 평가할 수 있는 토양오염지표(SPI, Soil Pollution Indices)를 고안하였다. 토양오염지표는 토양을 농경지, 주거지, 공원 여가지, 공장 산업지역으로 분류하고, 토양의 이용 용도별 토양오염기준을 이용하여 토양의 다기능성을 고려하였다. 토양의 이용 용도별로 토양중 5종류의 중금속 및 비소의 농도가 생태계에 미치는 영향을 나타내는 수리적 수치를 가산한 토양오염점수(SPS, Soil Pollution Score)를 산출하였다. 토양의 이용 용도별로 산출된 토양오염점수에 따라 토양을 4등급의 토양오염등급(SPC, Soil Pollution Class)으로 구분하였다. 1등급은 점수 <100, 2등급은 점수 100-200, 3등급은 점수 >200-300, 4등급은 점수 >300으로 설정하였다.

토양오염점수와 토양등급의 실용화 가능성을 打診하기 위하여 1994년 토양측정망의 운영결과로 도출된 5종류의 중금속 및 비소 농도를 이용하여 토양중의 중금속 농도를 토양오염점수, 토양등급으로 환산하였다. 토양측정망 측정지역의 비소 및 중금속 농도를 토양오염기준과 비교할 때, 대상지역의 토양환경은 대부분이 건전한 상태로 판단되나, 토양측정망 측정지점의 약 3.0~4.0%는 토양오염이 우려되거나 오염된 지역으로 판단된다. 토양측정망 측정지역의 평균 토양오염점수는 66.2로 토양측정망 대부분이 지역이 건전한 상태를 유지하는 것으로 나타났다. 토양오염점수를 4등급으로 분류하였을 때, 전체 측정지역에서 1등급(토양질 건전지역) 87.0%, 2등급(토양질 검증지역1) 9.4%, 3등급(토양질 검증지역2) 2.4%, 4등급(토양질의 오염우려지역) 1.2%로 산출되었다. 토양오염지표로 고안된 토양오염점수와 토양오염등급은 오염물질에 의한 토양의 오염상태를 종합적으로 판단할 수 있는 방법으로 평가되며, 토양오염지표를 개발한 방법은 5종류의 중금속 및 비소를 포함하여 유 무기 오염물질에 의한 토양오염의 판단에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

주제어 : 토양, 중금속, 오염, 토양오염점수, 토양오염지표

1. 서론

토양은 서식하는 인간, 동 식물, 미생물의 터전이며, 인간에게 식량, 물, 휴식공간을 제공하는 귀중한 자원의 보고이다. 이러한 토양은 오염물질을 분해 또는 완충시키는 역할을 함으로써 환경오염원을 스스로 정화할 수 있는 기능이 있다. 그러나, 1970년대 이후 급진적인 산업발전에 따라 배출되는 오염물질은 토양의 허용한계 이상으로 누적되어 토양의 기능을 상실케 하며 토양의 구조를 파괴하고 있다.

우리나라의 토양질은 산업시설, 광산, 유류저장시설, 유해물질저장시설, 폐기물매립지 등의 토양오염을 유발할 수 있는 시설을 중심으로 산발적으로 조사 및 파악되어 왔다.^{1,2,3,4,5)} 그러나, 토양중 오염물질의 농도에 따른 기준으로 1995년 현재 비소 및 중금속 2종류(Cd, Cu)만이 논(畓)토양에 한정되어 있으며, 오염

물질에 의한 토양상태를 종합적으로 판단할 수 있는 방법의不在로 오염물질의 분석수치에 대하여 전문성이 없는 사람들이 이를 정확하게 이해하기 어려운 단점이 있었다. 이에 따라, 토양상태에 관한 객관성이 일반대중에게 쉽게 전달되기 어렵고, 토양오염의 관리에 대한 정책결정이 종합적으로 이루어지지 못하였다. 이러한 관점에서 본 연구는 토양오염에 대한 전문성이 없는 일반대중이 토양의 질(오염상태)을 쉽게 인식할 수 있으며, 정책결정자가 토양의 오염상태를 판단할 수 있는 종합적인 토양오염지표를 개발하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

토양측정망의 측정지점별 중금속 농도. 1994년에 운용된 토양측정망의 측정지점별로 분석된 비소 및

5종류 중금속(Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) 농도를 이용하였다. 토양측정망은 환경정책기본법 제15조(환경오염의 조사)에 법적 근거를 두고 환경부에서 전국 토양에 대한 토양酸度(pH) 및 중금속 함유량 실태를 조사하여 연도별 토양오염도 변화추이를 관찰하고, 토양오염방지대책 수립시 기초자료로 활용함으로써 토양오염을 사전에 예방하기 위함을 목적으로 하여 1987년부터 운용되고 있다. 1994년에 운용된 토양측정망은 1987년 이후 측정지역 수를 오염원으로부터 배출되는 오염물질이 토양을 오염시킬 수 있는 오염경로별로 측정지역의 수를 증가 조정하여 1991년에 정착된 체계이다.⁶⁾

토양측정망은 동일 측정지역의 토양시료를 격년제로 분석하는 체계로 1991년 이후 전국의 토양오염경로를 16 종류로 구분하고, 총 522지역을 대상으로 운용되고 있다. 토양측정망의 측정지역수는 1987년에 119개(595개소의 측정지점), 1988년에 250개(1250개소의 측정지점), 1989년과 1990년에 254개(1270개소의 측정지점)이었다. 1991년 이후 1994년까지 매년 261개소이었으며 각 측정지역은 5개소의 측정지점으로 구분되어 매년 1305개에서 토양시료를 채취하여 조사하고 있다 (261측정지역/년 x 5개 측정지점/측정지역 = 1305 측정지점/년).⁶⁾

토양의 이용 용도별 구분. 토양의 다기능성에 따라 토양의 이용 용도에 근거한 토양오염지표를 개발하기 위하여 토양측정망의 측정지점을 농경지역, 주거지역, 공원 여가지역, 공장 산업지역으로 분류하였다. 토지이용 용도별 구분은 지적법 시행령 제6조의 규정에 의한 지목별 토지구분을 이용하였다. 지적법에서의 전, 답, 과수원, 목장용지, 임야는 농경지역으로, 대지(주거용), 학교용지는 주거지역으로, 공원, 체육용지, 유원지, 사적지, 종교용지는 공원 여가선용지역으로, 공장용지, 잡종지는 공장 산업지역으로 분류하였다. 지적법에서 제시되는 기타지목은 대상지역 및 시설의 특성 등을 고려하여 개별적으로 판단하였다. 이와 같은 토양의 이용 용도별 구분에 의하면 전체 토양측정망의 측정지점중 86.2%가 농경지, 6.1%가 주거지역, 7.7%가 공원 여가선용지역으로 분류되었다. 공장 산업지역에 해당하는 토양측정망의 측정지점은

없었다.

토양오염점수의 산출 및 토양의 등급화. 토양중의 6개 중금속 농도에 의한 토양질의 상태를 종합적으로 판단할 수 있는 토양오염지표를 개발하기 위하여 측정지점의 토양오염점수(Soil Pollution Score: SPC)를 산출하였다. 토양오염점수의 산출방법으로 각 중금속 별로 100/토양오염기준 (Table 1)을 곱하고, 6종류 중금속 점수를 합산하여 측정지점별 토양오염점수를 다음과 같이 산출하였다.

$$Soil\ Pollution\ Score = \sum_i \frac{Conc_i}{TV_i} \cdot 100 \dots \dots \dots (1)$$

i : As, Cd, Cu, Hg, Pb, and Zn

TV_i : Target value *i* : a reference value indicating the soil quality of agricultural area, residential area, recreational area, and factorial sites. Soil may need to be depolluted above the reference value.

Conc_i : Concentration of As, Cu, Cd, Hg, Pb, and Zn in soil.

Table 1. Soil pollution reference value¹(unit; mg/kg dry soil) used for designing the soil pollution indices

Contaminants	Agricultural area	Residential area	Recreational area	Factorial site
As	6	12	12	15
Cd	1.5	2	2	8
Cu	50	40	40	200
Hg	0.4	0.8	0.8	4
Pb	100	200	200	400
Zn	130	110	110	200

¹ The soil pollution reference values of As and 5 heavy metals(Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) are designated from the national or regional soil pollution reference values of Great Britain, European Union, Canada, Australia/New Zealand, and Japan. The values are concentration of the metalliferous contaminants in soil. The concentration of the contaminants in soil may cause a detrimental effect on growth of animals, plants, and/or human beings.

오염물질의 오염판단기준은 네덜란드, 영국, 독일, 유럽연합, 캐나다, 호주/뉴질랜드, 일본의 토양오염판단기준 자료를 근거로 하여 설정한 As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn의 토양중 농도를 이용하였다.^{7,8,9,10,11)} 이는 토양환경보전법의 시행규칙 제19조와 제21조에 제시되어 있는 토양오염우려기준과 토양오염대책기준과는 다른 것이다. 각국의 토양오염판단기준에 따르면 Table 1에 제시한 농도이상으로 오염물질이 토양에 축적될 경우 사람 및 동식물의 생장에 피해를 입힐 우려가 있는 오염물질의 농도이다.

토양오염점수를 이용한 토양질을 판단하기 위하여 토양을 토양오염점수에 따라 토양을 등급화(Soil Pollution Class: SPC) 하였다. 토양오염점수가 300점 이상은 4등급, 300-200점 사이는 3등급, 200-100점 사이는 2등급, 100점 미만은 1등급으로 분류하였다 (Table 2).

Table 2. Soil pollution class(SPC)¹ based on the soil pollution score(SPS)

Total soil pollution score	Soil pollution class
> 300	4
300 - > 200	3
200 - 100	2
< 100	1

¹ Area of the SPC 4 indicates that the area of soil is polluted area. Whereas, the soil quality of the SPC 2 and 3 area need to be reevaluated due to its possible soil pollution, and the SPC 1 indicates the healthy area of soil.

자료의 전산처리 및 분석방법. 환경부에서 입수한 토양측정망의 전산자료는 IBM PC에 Excel (Version 4.0)을 이용하여 입력하고, 입력된 자료는 DataBase Fox Pro (Version 2.0)을 이용하여 입력자료를 분석하였다.

3. 결과

토양측정망 지역의 토양중 오염물질 농도. 토양측정망에서 측정된 오염물질의 평균농도는 As 0.50mg/

Table 3. Concentration of metalliferous pollutants in soil of the Soil Network area (conc. units; mg/kg)¹

		pH	As	Cd	Cu	Hg	Pb	Zn
Total	Mean(1,305) ²	5.8	0.50	0.23	5.24	0.06	7.23	11.29
	max. ³	-	3.59	9.7	86.67	0.93	246.9	277.6
	SE ⁴	0.02	0.02	0.02	0.20	0.00	0.32	0.57
Agricultural area	Mean(1,125)	5.8	0.52	0.25	5.24	0.07	7.46	12.31
	max.	-	3.59	9.7	86.67	0.93	246.9	277.6
	SE	0.00	0.02	0.02	0.23	0.00	0.36	0.66
Residential Area	Mean(80)	6.1	0.15	0.13	4.62	0.03	6.43	5.70
	max.	-	1.96	0.42	42.12	0.34	70.27	17.67
	SE	0.1	0.04	0.01	0.63	0.01	0.89	0.44
Recreational area	Mean(100)	5.6	0.53	0.14	3.64	0.07	5.20	8.05
	max.	-	2.16	0.90	25.71	0.29	24.07	45.30
	SE	0.1	0.06	0.02	0.34	0.01	0.40	0.90

¹ Data of the Soil Network of 1994. There was no factorial site classified in the Soil Network of 1994.

² () indicates the number of soil samples analyzed.

³ the maximum value resulted from quantity analysis of pollutants in soil samples.

⁴ standard error.

kg, Cd 0.23mg/kg, Cu 5.24mg/kg, Hg 0.06mg/kg, Pb 7.23mg/kg, Zn 11.59mg/kg이었으며, 평균 pH는 5.8이었다 (Table 3). 토양의 이용 용도별로는 As와 Hg를 제외한 다른 중금속의 평균농도가 농경지에서 주거지와 공원 여가지의 평균농도보다 높게 나타났다. Table 1에서 제시한 토양오염기준을 초과하는 측정지점의 수는 53개 지점으로 총 측정지점 1305개소의 4.0%에 해당하였다. 토양오염기준을 초과하는 측정지점의 수는 Cd 22개소, Cu 6개소, Hg 10개소, Pb 4개소, Zn 9개소로 나타났다.

토양측정망의 지역의 토양오염점수 및 토양오염등급. 수식(1)의 토양오염점수 산출방법에 의한 토양오염점수는 전국 평균 66.2점이었다. 토양의 이용 용도별로 주거지에서 토양오염점수가 77.8로 가장 높았다. 농경지에서의 토양오염점수는 66.6, 공원 여가지에서는 52.4점으로 나타났다. 토양의 이용 용도별로의 최대 토양오염점수는 농경지 920.2, 주거지 307.7, 공원 여가지 225.8이었다 (Table 4).

Table 4. Soil pollution score¹ of the Soil Network area

	Mean (1,305)	Residential area (80)	Recreational area (100)	Factorial site (0)
Mean	66.221	66.626	77.778	52.421
max. ²	920.204	920.204	307.723	225.792
SE ³	1.999	2.229	7.153	4.134

¹ Data of the Soil Network of 1994. There was no factorial site classified in the Soil Network of 1994. () indicates the number of soil samples analyzed.

² the maximum value resulted from quantity analysis of pollutants in soil samples.

³ standard error.

수식(1)에 의하여 산출된 토양오염점수를 Table 2에 제시한 토양오염등급별로 구분하였을 때, 토양측정망의 총 1305개소 측정지점중에서 1135개소인 87.0%가 1등급, 123개소인 9.4%가 2등급, 31개소인 2.4%가 3등급, 16개소인 1.2%가 4등급에 해당하였다. 4등급에 해당하는 토양측정지점 16개소의 토양 이용 용도별 분류는 농경지이었다 (Table 5).

Table 5. The number of soil pollution class(SPC)¹ of the Soil Network 1994

	Total	SPC 1	SPC 2	SPC 3	SPC 4
Total	1,305	1,135	123	31	16
%	100	87.0	9.4	2.4	1.2

¹ Area of the SPC 4 indicates the area of soil polluted. Whereas, the soil quality of the SPC 2 and 3 area need to be reevaluated due to its possible soil pollution, and the SPC 1 indicates healthy area.

4. 고찰

토양오염지표는 토양오염의 판단기준을 반영하여 고안하였다. 토양오염의 판단기준이란 어떠한 상태의 토양을 오염된 토양이라 해야 하는가?에 대한 근본적인 해답이라 할 수 있다. 이는 토양에 오염물질이 축적되어 있어 인간의 건강 및 동식물에 유해하다고 판단되어 토양의 이용 용도를 변경하거나 오염물질을

처리하여야 할 오염물질의 농도를 토양의 다기능성에 따른 토양의 이용 용도별로 분류한 것이다.^{7,9)}

우리나라의 토양오염판단기준은 1995년을 기준으로 할 때, 비소 및 중금속 2종류(Cu, Cd)에 대하여 논(畓)토양을 대상으로 수질환경보전법에 설정되어 있다. 우리나라는 1995년 1월에 토양환경보전법이 제정되고, 연차적으로 1996년 1월에는 동법의 시행령과 시행규칙이 제정됨에 따라, 11종류에 대한 토양오염 우려기준 및 토양오염대책기준이 토양환경보전법의 시행규칙 제19조 및 제21조에 설정되었으나 본 연구가 진행중인 1995년에는 6개 중금속 물질에 대한 토양오염판단기준이 토양의 이용 용도별로 설정되어 있지 않았다. 이에 따라, 네덜란드, 영국, 유럽연합, 캐나다, 호주 뉴질랜드, 일본에서 사용되고 있는 토양오염판단기준을 근거로 하여 Table 1에 제시하고 있는 토양오염기준을 설정하였다. 이에 따라, 우리나라의 토양환경보전법에서 제시하고 있는 토양오염우려기준 또는 토양오염대책기준에 相應하기 위한 토양오염점수를 산출하기 위해서는 향후 이에 적합한 수정작업이 필요하다.

토양오염점수를 Table 1에 제시한 비소 및 5종류의 오염물질에 대한 토양오염기준을 토대로 산출한 것은 토양중 1개 이상의 물질에 의하여 토양의 상태가 달리 판단될 수 있는 것을 고려한 것이다. 특히, 토양측정망의 운영결과에 의한 비소 및 5종류의 중금속 분석자료 중에서 어느 1종류가 측정지역의 토양오염도 대표값을 나타내는 것으로 추정하기는 어렵다. 또한, 토양에는 1종류 이상의 오염물질이 축적되어 자연생태계에 영향을 나타낸다. 이에 따라, 분석자료가 제시된 모든 오염물질의 영향을 수렴하여 객관적으로 이를 비교할 수 있는 토양오염지표의 개발이 타당할 것이다.

비소 및 중금속 5종류의 토양중 농도를 수렴하기 위해서는 오염물질별 농도를 가능한 동일한 조건에서 비교할 수 있는 체계가 있어야 한다. 오염물질에 의한 영향을 가능한 동일하게 평가할 수 있는 기준으로 오염물질별 토양의 이용 용도에 따른 토양오염기준을 이용하였다. 수식(1)에 제시하고 있는 토양오염점수의 산출방법은 토양의 오염물질 농도를 오염물

질별로 동등하게 비교할 수 있는 수치로 환산하고 이들 수치를 가산함으로써 그 토양의 상태를 종합적으로 판단할 수 있는 간단한 방법이라 할 수 있다.

제시한 토양오염점수의 산출방법은 다음과 같은 두 가지 문제점을 예측할 수 있다. 첫째, 토양중 비소 및 5종류 중금속(Cd, Cu, Hg, Pb, Zn) 이외의 오염물질은 제외되어 있다. 토양오염점수에 의한 토양질의 판단은 토양중 비소 및 5종류의 중금속 함량에 의하여 이루어진 것으로 이들 이외의 합성유기농약, 유기 및 무기독성물질의 토양중 함량을 무시한 편중된 영향을 나타낼 수 있다. 그러나 현재 비소 및 중금속 5종류를 제외한 다른 유해물질에 대해서는 자료가 미흡하여 이들 물질에 대한 영향을 토양오염점수에 고려할 수 없었다. 둘째, 토양오염점수는 토양중의 중금속 농도를 토양오염기준에 의하여 산출하고 가산함으로써 그 토양이 갖는 오염도를 수치로 환산하였으나 토양오염도가 이와 같이 산출한 수치를 가산함으로써 나타낼 수 있는가에 대한 문제점이다. 중금속에 의한 인체 및 동 식물의 생육은 중금속이 복합적으로 섞여 있을 때 달리 나타날 수 있다.¹⁰⁾ 즉, 단순한 수치의 가산은 생육에 나타날 수 있는 상승효과를 무시하고 있다. 그러나 현재로서는 이에 대한 자료가不在하여 이러한 효과에 대한 가중치를 제시할 수 없는 단점이 있다. 향후, 이에 대한 연구가 진행됨으로써 오염물질별로 가중치를 둘 수 있는 토양오염점수의 산출방법이 제시되어야 할 것이다.

토양중 오염물질 농도는 토양의 이용 용도에 따라 산발적으로 제시되어 있다.^{1),2),3),4),5)} 그러나, 우리나라 전국의 토양을 대상으로 이를 농경지, 주거지, 공원 여가지로 분류하여 제시된 자료는 보고된 바 없다. 이에 따라, Table 3에서 제시한 토양중의 중금속 농도는 우리나라 전국 토양에 함유되어 있는 중금속 농도를 토양의 이용 용도별로 제시하는데 상당한 의미가 있다고 할 수 있다. 토양측정망 측정지역의 위치가 16종류의 토양오염 경로별로 설치되어 있으므로 채취한 토양시료의 중금속 농도는 오염원의 영향을 받을 수 있다. 즉, 토양측정망 측정지역의 토양시료의 오염물질 농도는 우리나라 전지역을 대상으로 측정된 오염물질의 평균값보다는 높을 것이다. 그럼에도 불구하고

고, 토양의 이용 용도별로 제시한 중금속 농도는 다른 연구에서 제시한 중금속 농도와 유사한 값을 나타내고 있다. 유홍일 등³⁾에 의한 전국 논(畝) 토양의 중금속 자연함유량으로, As 0.56ppm, Cd 0.135ppm, Cu 4.00ppm, Hg 0.09ppm, Pb 5.38ppm, Zn 4.36ppm을 제시하고 있으며 이들이 제시한 중금속 농도는 Table 3의 농경지 토양에서 제시한 중금속 농도와 부분적으로 근사한 차이가 있으나 유사한 중금속의 농도범위라 할 수 있다.

농경지의 As와 Hg를 제외한 다른 중금속 농도가 주거지와 공원·여가지보다 비교적 높게 나타나고 있는 것은 다른 이용·용도의 토양보다도 농경지 토양에 지속적으로 중금속이 축적되고 있는 것으로 추정할 수 있다. 특히, Cd의 평균농도는 농경지 토양에서 주거지와 공원 여가지 토양보다 2배 이상으로 높게 나타나고 있다. Table 1에서 제시하고 있는 Cd의 토양오염기준에는 미치지 못하고 있으나, Cd, Cu, Pb, Zn의 중금속이 다른 이용 용도별 토양보다 농경지 토양에 지속적으로 많이 축적되는 것을 고려할 때, 이에 대한 정부의 정책배려가 필요한 시기라 할 수 있다.

토양오염점수를 4등급으로 분류하고 토양1등급의 토양오염점수를 <100점으로 설정한 것은 토양오염점수에서 토양의 이용 용도별 평균점수가 50에서 70점 사이에 분포되어 있는 것을 토대로 한 것이다. 우리나라의 평균 토양오염점수인 66.2는 비소 및 5종류의 중금속에서 제시되는 점수를 합산한 것이므로 각 오염물질별 평균오염점수는 약 11점 정도라 할 수 있다. 즉, 토양오염점수가 <100점(토양 1등급) 이라는 것은 토양에 존재하는 비소 및 5종류의 중금속 농도가 어떠한 경우에도 Table 1에 제시한 토양오염기준을 초과할 수 없는 경우로 건전한 토양환경을 유지하고 있는 상태라 할 수 있다. 비소 및 5종류의 중금속 중에서 5종류의 중금속 농도가 우리나라의 평균을 나타내고 한 종류의 중금속 농도가 토양오염기준에 인접할 경우 토양오염점수는 100-200점 정도를 나타내게 될 것이다. 이를 토양 2등급으로 분류하였다. 토양 2등급은 토양의 상태에 대한 검증이 필요한 지역으로 비소 및 5종류의 중금속 중에서 1종류의 오염물질 농도가 토양오염기준에 인접한 경우를 포함하고 있으나,

토양환경이 비교적 건전한 상태를 유지하는 경우라 할 수 있다.

오염물질 농도의 여러가지 조합에 의하여 토양오염점수가 >200-300점(토양 3등급)을 나타낼 수 있다. 비소 및 5종류 중금속 중에서 1종류의 오염물질 농도만이 Table 1에서 제시한 토양오염기준의 2배에 인접할 경우 또는 2종류의 중금속 농도가 Table 1의 토양오염기준에 인접할 경우는 토양오염점수가 >200-300점 정도를 나타내게 될 것이다. 또한, 6종류의 오염물질 농도의 조합에 의하여 >200-300점의 토양오염점수를 나타낼 수도 있다. 즉, 토양3등급은 1종류 이상의 오염물질이 Table 1의 토양오염기준을 초과할 수 있으나 항상 이러한 조건에 의해서 토양3등급으로 나타나는 것은 아니다. 이에 따라, 토양3등급은 토양2등급보다는 중금속에 의한 토양오염상태가 심화된 지역이며, 토양중 중금속 농도의 변화추이를 지속적으로 주시해야 하며, 토양의 상태에 대한 면밀한 검증이 필요한 지역이라 평가할 수 있다.

토양4등급은 토양오염점수가 >300점으로 최소한 1개 이상의 중금속 농도가 Table 1에 제시한 토양오염기준을 초과해야 한다. 물론, 비소 및 5종류 중금속 농도의 조합에 의하여 토양오염점수가 >300 이상을 나타낼 수 있으나 현실적으로 나타날 수 있는 가능성이 대단히 적다고 할 수 있다. 또한, 이러한 경우가 현실적으로 나타날 경우 더욱 필요한 평가방법이라 할 수 있다. 혼합된 6종류 오염물질에 의하여 생태계에 나타날 수 있는 복합적 영향을 고려할 때, 이에 따른 환경위해성을 가산하여 나타낼 수 있기 때문이다. 토양4등급은 토양오염이 우려되는 지역으로 토양상태에 대한 지속적인 관찰이 필요하며, 중금속의 농도가 토양환경보전법의 시행규칙 제21조에 제시되고 있는 토양오염대책기준을 초과하는 경우에는 오염된 토양의 복원이 필요한 지역이라 할 수 있다.

1994년을 기준으로 할 때, 토양오염점수와 토양등급에 따른 토양측정망 대상지역의 전반적인 토양상태를 분석하면 우리나라 대부분의 토양은 건전한 상태를 유지하고 있는 것으로 판단할 수 있다. 토양측정망 전체면적의 약 1.2%에 해당하는 토양4등급의 경우는 토양상태에 대한 지속적인 분석이 필요하고 토

양환경보전법의 시행규칙 제21조12)에 제시되고 있는 토양오염대책기준을 초과하는 지역에 대해서는 오염물질을 처리해야 할 것이다.

본 연구에서 개발한 토양오염지표는 토양에 축적된 비소 및 5종류 중금속의 농도에 따라 토양오염점수와 토양등급으로 분류한 것이다. 개발한 토양오염지표는 제시한 비소 및 5종류의 중금속 외의 다른 중금속 및 유기 무기화합독성물질에 대해서는 자료의 미흡으로 인하여 토양질을 분석하는 요인으로 사용하지 않았다. 이에 따라, 1994년을 기준으로 한 토양측정망 지역의 토양질의 진단은 6종류의 중금속 이외의 토양오염물질외의 합성유기농약, 유기 및 무기독성물질의 토양중 함량에 대해서는 편중된 영향을 나타낼 수 있다. 향후, 제시한 토양오염지표를 개발한 방법을 발전시켜 토양오염물질에 대한 토양오염상태를 객관적이고 종합적으로 판단할 수 있는 보강된 토양오염지표를 마련해야 할 것이다. 또한, 우리나라 전국의 토양오염상태를 파악하기 위해서는 토양측정망의 측정지점들 전국에 걸쳐 지역별, 토지이용별, 오염원별에 의하여 체계적으로 구성하고, 토양오염물질을 중금속 및 유기 및 무기화합물질 등으로 다변화시키고, 이로부터 수집된 자료에 의하여 정확한 토양상태를 진단해야 할 것이 향후 과제로 남아있다.

5. 결론

1. 토양오염지표(SPI)는 오염물질에 의한 토양의 상태를 종합적으로 판단할 수 있도록 고안하였다. 오염물질별로 동등하게 비교할 수 있는 수치를 토양의 이용 용도별 토양오염판단기준을 이용하여 산출하고, 산출된 수치를 가산함으로써 토양의 상태에 대한 종합점수인 토양오염점수(SPS)로 나타냈다.
2. 토양오염점수는 4등급의 토양오염등급(SPC)으로 분류하였다. 1등급은 점수 <100, 2등급은 점수 100-200, 3등급은 >200-300, 4등급은 >300으로 설정하였다.
3. 1994년 토양측정망 자료의 분석에 의하면, 우리나라의 평균 토양오염점수는 66.2로 건전한 상태를 유지하고 있으며, 토양오염등급별로는 1등급 87%, 2등급

9.4%, 3등급 2.4%, 4등급 1.2%로 나타나고 있다. 1등급은 토양이 건전한 상태의 지역, 2등급과 3등급은 토양이 건전한 상태이나 오염이 진행되는 지역으로 향후 검증이 필요한 지역, 4등급은 토양의 오염이 우려되거나 오염된 토양의 복원이 필요한 지역이라 할 수 있다.

4. 토양오염지표로 고안된 토양오염점수와 토양오염등급은 오염물질에 의한 토양의 오염상태를 종합적으로 판단할 수 있는 방법으로 평가된다. 또한, 토양오염지표를 개발한 방법은 5종류의 중금속 및 비소를 포함하여 유 무기 오염물질에 의한 토양오염의 판단에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김성조, 백승화. 장항제련소 지역의 토양과 수도체중 Cd 및 Cu 함량의 변화. 한국환경농학회지 13. pp 131-141 (1994).
2. 박용하. 휴 폐광된 금속광산지역의 오염관리대책. 한국환경기술개발원 (1994).
3. 유홍일, 서운수, 김성환, 이민효, 유순주, 허성남, 김수연. 우리나라 논 토양 및 현미중 중금속 자연함유량에 관한 연구. 국립환경연구원 (1988).
4. 윤성윤. 경상남도 주요공단내 토양의 중금속 오염도 조사연구. 동아대학교 환경문제연구소 (1993).
5. 전효택, 김주용. 서울지역 및 장항제련소 지역의 토양과 분진중의 중금속 원소의 분산에 관한 연구 한국자원공학회지 30. pp 163-176 (1993).
6. 환경부. 토양측정망운영지침. 행정간행물 등록번호 12000-67630-66-9 (1994).
7. 임수길, 이민효, 김정규, 이창호. 토양질 기준의 설정에 관한 연구. 한국환경과학협회의회 (1994).
8. Australian and New Zealand Guidelines for the Assessment and management of contaminated sites. Australian and New Zealand Ministry of Environment Press., Australia and New Zealand (1992).
9. Buckmann, W., Dreier, G., Elefeld, R., Gerner, I., Lee, Y.-H., Mackensen, R., and Maier, H. Bodenschutz in der Europäischen Union. Technische Universität Berlin, FAGUS-Schriften, Band 5 Press., Berlin (1994).
10. Hobson, D. M. Rational site investigation. In: Contaminated Land Problems and Solutions. Ed. T. Cairney. Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall Press (1993).
11. Kelly, R. T. Site investigation and material problems. In: Reclamation of Contaminated Land. B2/1-B2/12. Society of Chemical Industry Press (1980).
12. 환경부. 토양환경보전법 시행령 및 시행규칙 (1996).