

토양오염지표에 의한 국내 토양의 중금속과 비소 오염도 및 향후 전망

박용하*, 윤정호**, 이승희**, 김강석*

* 한국환경기술개발원

** 경기대학교 환경공학과

Quality of Korean Soil and It's Prospection Influenced with Heavy Metals and Arsenic Analyzed with Soil Pollution Indices

Yong-Ha Park*, Jeong-Ho Yoon**, Seung-Whee Rhee**, and Kang-Seok Kim*

* *Korea Environment Technology and Research Institute*

** *Department of Environmental Eng., Kyong-Gi University*

ABSTRACT

Soil quality of most of Soil Network area was estimated healthy by employing Soil Pollution Indices (Soil Pollution Score and Soil Pollution Class). However, 1.5~3.7% of the total Soil Network area was determined Soil Pollution Class (SPC) 4 which may need cleanup process due to slight or heavy pollution with arsenics and heavy metals. Numbers of the SPC 4 sites were 9, 47, 19, 17, and 17 in 1987, 1989, 1991, 1993, and 1994, respectively. During 1987 and 1994, all of SPC 4 sites were identified agricultural land except one in 1994. Soil Pollution Scores (SPSs) was determined high around smelters, metalliferous mines, and industrial sites among the 16 major soil pollution sources of the Soil Network. Also, most area of SPC 4 sites were densely populated in these area of the Soil Network. SPSs of Incheon and Taegu were high among the other major cities and provinces in Korea. Numbers of SPC 4 were high in the province of Kangwon, Kyongbuk, Kyongnam amongst.

Cumulative numbers of SPC 4 multiplied by a weighting value 0.3 during 1987 and 1994 of the Soil Network were regressed to develop a model equation for prospecting the soil quality. The model equation was $Y = 1.16 + 0.23x$, where as Y is the number of Class 4 and x is the year. Resulting the area of SPC 4 were 4.8%, 6.0%, 6.6% of the Soil Network in the year of 2001, 2006, 2011, respectively. Based on this results, the area of SPC 4 would increase 5, 7, and 10 times comparing the area polluted with heavy metals in 1987.

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

요 약 문

토양오염지표(토양오염점수 및 토양오염등급)에 의하면 1987년부터 1994년까지 토양측정망 지역의 토양은 대부분이 건전한 상태를 유지하고 있다. 그러나 토양측정망 지역의 1.5~3.7% 정도는 토양오염이 우려되거나 대책이 필요한 토양4등급으로 분류되므로 이 지역의 복원이 필요한 것으로 추정되고 있다. 토양측정망 측정지점의 토양4등급은 1994년 1개소를 제외하고는 1987년에 9개소, 1989년 47개소, 1991년 19개소, 1993년 17개소, 1994년 16개소가 농경지이다. 토양측정망 측정지점을 16종류의 오염경로로 분류하면, 금속제련소, 금속광산, 공단하류의 인근지역에서 토양오염점수가 높게 나타나고 있으며, 또한 대부분의 토양4등급 지역이 이들 지역에 밀집되어 있다. 지역별로는 인천광역시, 대구광역시에서 가장 높은 토양오염점수가 나타나고 있으며, 강원, 경북, 경남지역에 토양4등급 개소가 가장 많이 나타나고 있다.

1987년-1994년 기간중에 산출된 토양측정망 토양4등급의 연차적인 누적개소에 가중치 0.3(30%)을 곱한 수치를 이용하여 모델식을 개발하고 향후 토양질을 예측하였다. 개발된 모델식은 $Y = 1.16 + 0.23x$ 로 Y는 토양4등급이고 x는 연도이다. 모델식에 의하면, 토양측정망의 토양4등급에 해당하는 면적은 2001년 4.8%, 2006년 6.0%, 2011년 6.6%로 증가할 것으로 나타나고 있다. 이를 토대로 할 때, 우리나라 국토의 면적중에서 토양4등급 면적의 증가는 1987년의 오염면적에 대비하여 1994년에 5배, 2001년에 7배, 2011년에 10배에 이를 것으로 예측된다.

주제어 : 토양, 중금속, 오염, 토양오염지표, 현황 및 전망

1. 서론

산업발전에 따라 대량으로 배출되는 오염물질은 일부 토양에 허용한계 이상으로 누적되어 토양의 기능을 상실케 하고 있다. 이에 따라, 국가에서는 1980년대에 도입된 토양보전개념을 정책에 도입하여 1991년 환경부 「토양관리과」가 「토양보전과」로 명칭을 변경하였다. 특히, 토양환경보전을 위한 국민의 여론에 부응하여 1995년 1월에는 「토양환경보전법」이 입법되었다.^{1,2)}

국가의 정책방향을 결정할 수 있는 기본자료는 우리나라 토양질의 정확한 진단 및 향후 발생할 수 있는 토양오염의 예측을 통하여 구축될 수 있다. 이러한 토양질의 상태를 파악하기 위하여 국가에서 1987년 이후 토양측정망을 운용하고 있다. 이는 환경정책기본법 제15조(환경오염의 조사)에 법적 근거를 두고 있으며, 토양측정망은 “전국 토양에 대한 토양酸度(pH) 및 중금속 함유량 실태를 조사하여 연도별 토양오염도 변화추이를 관찰하고, 토양오염방지대책 수립시 기초자료로 활용함으로써 토양오염을 사전에 예방하기 위한”을 목적으로 하고 있다.³⁾ 토양측정망

의 운영결과에 따른 토양오염도가 매년 보고되고 있으나, 1987년 이후 축적된 자료를 종합·분석한 결과가 없어 전국에 걸쳐 토양오염의 진행정도를 파악하기 어렵다. 또한, 현재 5종류의 중금속 및 비소 농도 별로 제시되고 있는 토양오염도를 이용하여 향후 국토의 토양오염 발생지역과 진행정도를 예측하기 어렵다. 이에 따라, 본 연구는 토양측정망의 운영에서 도출된 결과를 이용하여 국내에서 토양오염이 진행되고 있는 상태를 연차적으로 분석하고, 토양오염지표⁴⁾를 이용하여, 토양오염현황을 파악하고, 향후 국내 토양오염의 진행정도를 예측하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

토양측정망. 토양측정망은 1987년부터 운용되고 있다. 1995년에 운용된 토양측정망은 1987년 이후 오염물질이 토양을 오염시킬 수 있는 16종류의 오염경로별로 측정지역의 수를 증가·조정하여 1991년에 정착된 체계이다. 1991년도 이후의 토양측정망은 측정지역을 16종류의 토양오염경로로 분류하고 있다.

토양측정망은 동일 측정지역의 토양시료를 격년제로 분석하는 체계로 1991년 이후 총 522 측정지역을 대상으로 운용되고 있다. 토양측정망의 측정지역수는 1987년에 119개소 (595개소의 측정지점), 1988년에 250개소 (1250개소의 측정지점), 1989년과 1990년에 254개소 (1270개소의 측정지점)이다. 1991년 이후 1994년까지의 측정지역수는 매년 261개소이며 각 측정지역은 5개소의 측정지점으로 구분되어 매년 1305개소에서 조사가 이루어지고 있다 (261측정지역/년 × 5개 측정지점/측정지역 = 1305 측정지점/년). 1개소 측정지점의 면적은 1필지를 대상으로 하고 있다.³⁾

측정지점에서 채취한 토양시료에서의 조사항목은 1987년에는 토양산도(pH) 및 As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn 이었으나 1988년 이후부터는 토양산도 및 As, Cd, Cu, Pb, Hg, Zn로 측정항목을 변경하였다. 토양시료는 지방환경청에서 채취하며 시료의 채취기간은 매년 3-5월중에 실시하며, 토양시료의 분석기간은 매년 4-8월에 토양오염시험공정방법³⁾에 의하여 실행된다.

1987년부터 1989년까지의 토양측정망의 측정현황은 환경부 보고서⁵⁾에 제시되어 있다. 1990년 토양측정망의 측정현황은 환경부의 내부자료이며, 1991년부터 1994년 기간중의 측정현황은 환경부에 전산화되어 있다. 그러나, 토양측정망의 1988년도와 1990년도 측정지점의 오염물질 분석자료는 보관되어 있지 않은 상태이다.

토양오염지표. 박용하⁴⁾에 의하여 개발된 토양오염지표를 사용하였다. 토양오염지표의 개발에 사용된 토양오염기준은 네덜란드, 영국, 독일, 유럽연합, 캐나다, 호주 뉴질랜드, 일본에서 사용하고 있는 토양오염판단기준의 자료를 근거로 설정한 것으로 우리나라의 토양환경보전법 시행규칙에 제시되고 있는 토양오염우려기준과 토양오염대책기준과는 다르다.

토양질의 예측방법. 토양오염지표로 개발된 토양오염등급을 토대로 중금속으로 오염되고 있는 우리나라의 토양질을 예측하였다. 토양측정망 토양4등급의 누적개소에 30%를 기준으로 향후 토양질의 상태를 분석하였다. 30%는 1987년부터 1994년 기간의 토양측정망 토양4등급 자료분석 결과에 따라 산출된 가중치로, 토

양4등급의 연간 누적개소에 30%(토양4등급의 연간 누적×0.3)를 연도별 토양4등급개소로 하고 이들 수치를 통계처리 (Linear Regression)하였다.

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)를 이용하여 입력자료를 분석하였다.

3. 결과

토양측정망 측정지역의 분석. 토양의 다기능성에 따른 토양의 상태를 분석하기 위하여 토양측정망의 측정지점을 지적법 시행령 제6조의 규정에 의한 지목별 토지구분을 이용하여 농경지역, 주거지역, 공원·여가지역, 공장·산업지역으로 분류하였다.⁶⁾ 이와 같은 토양의 이용 용도별 구분에 의하면 토양측정망 측정지점이 대부분이 농경지로, 그 비율은 1987년 99.2%, 1989년 89%, 1991년 90.8%, 1992년 86.2%, 1993년 90.7%, 1994년 86.2%이었다.

토양측정망의 측정지역 및 측정지점의 위치를 시도별로 분류하면 1994년도 경기도에서 41개소의 측정지역 (205개소 측정지점)으로 가장 많으며, 경북 (40/200개소; 측정지역/측정지점), 경남 (37/185개소; 측정지역/측정지점)의 순서이며 제주도에 3개소의 측정지역 (15개소 측정지점)으로 가장 적게 나타나고 있다.

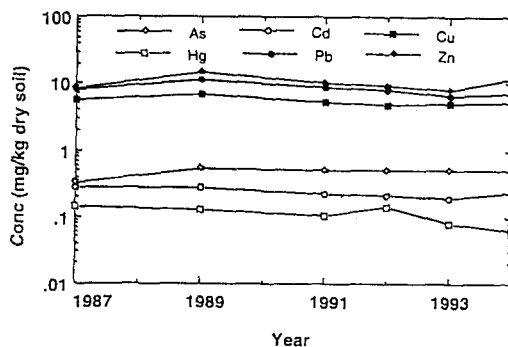


Fig. 1. Variation of mean values of As, Cd, Cu, Hg, Pb and Zn in soil of Soil Network area during 1987-1994.

토양중 오염물질 농도. 1987년 이후 토양측정망에서 측정된 5종류 중금속 및 비소의 토양중 농도의 연도별 변화를 (Fig. 1)로 나타낼 수 있다. 이들 6종 중금속 농도의 각각 기율기에서는 변화가 없었다 ($p = 0.05$). 이 결과에 의하면 토양중에 있는 이들 중금속 물질의 평균농도 변화는 감지할 수 없었다.

토양오염기준⁴⁾을 초과하는 측정지점의 수는 1987년 총 595개소 중에 47개소, 1989년 총 1,270개소 중에 104개소, 1991년 총 1305개소 중에 30개소, 1992년 총 1301개소 중에 63개소, 1993년 총 1295개소 중에 34개소, 1994년 총 1305개소 중에 53개소이었다. 측정지점의 수의 변화추세를 나타내는 통계적 유의성은 없었다 ($p = 0.05$) (Table 1).

토양측정망 측정지점의 이용·용도별 토양오염점수 및 토양오염등급. 측정지점의 이용·용도별 토양오염점수는 1987년-1994년 기간중 전국토에서 100점 이하로 나타났다. 이 기간중에 연도별 토양오염점수는 전반적으로 토양오염점수가 낮아지고 있는 경향을 나타내고 있으나 (regression의 기율기, -0.247 ; $r^2 =$

0.427), 중금속 평균농도에 의한 연도별 변화를 나타내는 회귀선(regression line) 기율기의 통계적인 유의성($p = 0.05$)은 없었다. 1993년까지 농경지에서 채취한 토양시료의 토양오염점수는 주거지역과 공원 여가선용지역보다 높았으나, 1994년부터 주거지역의 토양오염점수가 가장 높게 나타나고 있다 (Table 2).

분류한 토양오염등급에 의하면 1987년 이후 1994년까지 전체 토양측정지점에서 토양1등급이 차지하는 비율이 점차로 증가하고 있으며, 반면에 토양 2, 3, 4등급이 차지하는 비율은 점차로 점차 감소하고 있다. 토양오염등급중에서 토양오염이 우려되는 토양4등급은 1987년부터 1993년까지는 모두 농경지에 해당하였으며, 1994년에는 1개소를 제외한 15개소가 농경지이었다. 건전한 토양으로 평가할 수 있는 토양1등급이 전체 토양측정망의 측정지점에서 차지하는 비율은 1987년 79.0%에서, 1989년 73.7%, 1991년 84.3%, 1992년 78.8%, 1993년 89.9%, 1994년 87.0%로 나타났다. 토양오염이 우려되거나 오염된 지역으로 평가할 수 있는 토양4등급은 1987년 1.5%에서, 1989년 3.7%, 1991년 1.7%, 1992년 1.5%, 1993년 1.3%, 1994년 1.2%로 나타났다 (Table 3).

Table 1. Number of polluted sites on soil network area during 1987-1994.

		Year ¹					
		1987	1989	1991	1992	1993	1994
Total	Number ²	47/595	104/1270	30/1305	63/1301	34/1295	53/1305
	% ³	7.8	8.1	2.3	4.8	2.6	4.0
As	Number	0	0	6	0	4	0
	%	0	0	0.51	0	0.34	0
Cd	Number	0	23	4	19	9	22
	%	0	2.04	0.34	1.69	0.77	1.96
Cu	Number	0	8	8	1	13	6
	%	0	0.71	0.86	0.09	1.11	0.53
Hg	Number	47	53	7	32	8	10
	%	7.97	4.69	0.59	2.85	0.68	0.89
Pb	Number	0	9	4	4	0	4
	%	0	0.8	0.34	0.35	0	0.36
Zn	Number	0	11	1	7	0	9
	%	0	0.97	0.08	0.62	0	0.88

¹ Number of polluted sites of Soil Network. Raw data of 1988 and 1990 were not available.

² Number of sampling location/Number of sampling sites.

³ Number of sampling sites x 100/Total Number of sampling sites.

Table 2. Mean of Soil pollution scores¹ of sampling sites on Soil Network area during 1987-1994.

	Year ²					
	1987	1989	1991	1992	1993	1994
Mean	77.454	93.755	74.496	79.821	63.034	66.221
	±2.637	±2.414	±1.527	±1.953	±1.425	±1.999
Agricultural area	77.762	97.436	78.053	85.353	66.159	66.626
	±2.644	±2.642	±1.637	±2.186	±1.526	±2.229
Residential area	-	55.370	48.039	53.970	38.590	77.778
	-	±3.399	±2.929	±4.458	±3.558	±7.153
Recreational area	41.121	42.265	30.690	38.272	26.269	52.421
	±2.445	±3.190	±1.333	±2.500	±2.265	±4.134
Factorial site	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-

¹ Mean of soil pollution score ± standard error. There was no sample site on factorial sites.

² Number of polluted sites of Soil Network. Raw data of 1988 and 1990 were not available.

Table 3. Number of Soil pollution class 4 on Soil Network area during 1987 to 1994.

	Year ¹						Accumulated
	1987	1989	1991	1992	1993	1994	
Number ²	9/595	47/1270	22/1305	19/1301	17/1295	16/1305	130/1305
% ³	1.5	3.7	1.7	1.5	1.3	1.2	9.9
Irrigating area	1	1	0	4	0	0	6
Fruit and vegetable producing area	1	0	0	0	0	0	1
Pollution suspected area	0	0	1	0	0	0	1
Near Factorial site	4	1	0	1	0	0	6
Riverside area	3	0	0	0	0	0	3
Special-use-land area	0	0	0	0	0	1	1
Loadside area	-	1	0	0	0	0	1
Smelting area	-	13	9	0	8	0	30
General wasteland area	-	2	0	0	0	2	4
Special wasteland area	-	0	0	0	0	0	0
Metalliferous mine area	-	27	12	14	9	13	75
Sewer treatment area	-	2	0	0	0	0	2
Resident health inspection area	-	0	0	0	0	0	0
Recreational and park area	-	0	0	0	0	0	0
Playground area	-	0	0	0	0	0	0
Golfcourse area	-	-	0	0	0	0	0

¹ Raw data of 1988 and 1990 were not available.
² Number of sampling location/Number of sampling sites.
³ Number of sampling sites x 100/Total Number of sampling sites.

토양측정망 측정지점의 오염경로별 토양오염점수 및 토양오염등급. 토양오염등급에 의한 결과는 토양오염점수에 의하여 나타나는 결과와 유사한 추이를 보이고 있다. 토양4등급의 누적개소는 금속광산지역에서 75개소, 금속제련소지역에서 30개소로 가장 많으며 공단하류지역에서 6개소, 하천고수분지에서 3개소, 분뇨처리장지역에서 2개소, 과채류 주생산지, 오염우심하천지역, 특수사용용지, 도로변지역에서 각 1개소의 측정지점으로 나타났다 (Table 3).

토양오염점수는 1987년-1994년 기간중에 금속제련소, 금속광산지역, 특정폐기물매립지역과 분뇨처리장 인근지역에서 높게 나타나고 있으며 그 외 지역의 토양오염점수는 100점 부근 또는 그 이하로 나타나고 있다. 특히, 금속제련소와 금속광산지역의 토양오염점수가 가장 높았으며 특정폐기물 매립지역과 분뇨처리장 인근지역의 토양은 1989년에 일시적으로 토양오염점수가 증가하였다가 이후 감소되고 있다 (Table 4).

토양측정망 측정지점의 지역별 토양오염점수 및 토양오염등급. 토양오염점수는 1987년-1994년간 지역별로 뚜렷한 증감을 나타내고 있다. 대구광역시의 토양오염점수는 1987년에 178.8로 지역별로 가장 높았으나 점차 감소하는 추세를 나타내고 있다. 이와 비슷한 추세를 보이고 있는 지역이 경북으로 1987년 토양오염점수가 140.1로 대구광역시 다음으로 높았으나 점차 감소하고 있다. 인천광역시는 1987년 토양오염점수가 83.6에서 년도별로 증가하는 추세에 있으며 1992년 135.5점, 1994년에는 지역별로 가장 높은 점수인 197.7을 나타내고 있다. 서울특별시의 토양오염점수는 1987년 58.1에서 연차적으로 조금씩 증가하는 경향으로 1994년 토양오염점수가 109.4를 나타내고 있다 (Table 5).

토양질의 향후 전망. 토양측정망의 토양4등급의 누적개소에 30% (토양4등급의 연간 누적×0.3)를 기준으로 한 현황을 1987년-1994년 기간동안 통계처리 (선형회귀분석: Linear Regression)하였을 때, 통계적 유의

Table 4. Soil pollution score¹ of Soil Network area based on functional location of soil sampling sites around the soil pollution sources during 1987-1994.

	Year ²					
	1987	1989	1991	1992	1993	1994
Mean	77.454 ±2.637	93.757 ±2.414	74.496 ±1.527	79.821 ±1.953	63.034 ±1.425	66.221 ±1.994
Irrigating area	67.026 ±3.262	71.556 ±2.953	58.258 ±1.475	76.694 ±5.408	46.972 ±0.934	48.582 ±1.986
Fruit and vegetable producing area	74.666 ±9.765	71.993 ±6.227	73.816 ±3.542	57.501 ±4.754	50.008 ±2.214	52.161 ±6.570
Pollution suspected area	69.855 ±3.687	64.007 ±2.054	75.686 ±4.062	69.577 ±3.669	66.438 ±3.751	68.490 ±4.818
Near Factorial site	104.918 ±9.726	95.485 ±5.707	61.022 ±2.112	76.455 ±6.171	58.706 ±2.417	44.678 ±2.924
Riverside area	88.616 ±7.600	76.682 ±3.772	68.335 ±3.679	64.002 ±2.911	57.801 ±2.155	53.213 ±2.507
Special-use-land area	62.651 ±6.576	67.266 ±4.820	50.900 ±2.154	74.321 ±4.899	46.703 ±1.818	62.772 ±6.858
Loadside area	-	79.839 ±5.623	67.811 ±1.889	71.832 ±2.864	54.400 ±1.802	60.424 ±3.381
Smelting area	-	287.910 ±28.613	206.464 ±18.055	178.760 ±8.619	198.753 ±15.797	103.354 ±7.128
General wasteland area	-	73.524 ±4.009	63.425 ±1.566	64.678 ±2.274	56.374 ±1.563	61.726 ±3.589
Special wasteland area	-	126.802 ±9.471	71.164 ±6.646	71.476 ±5.151	54.865 ±3.609	76.981 ±9.718
Metalliferous mine area	-	189.828 ±11.092	142.202 ±8.112	168.058 ±12.275	117.866 ±8.851	143.809 ±15.859
Sewer treatment area	-	113.712 ±17.088	89.808 ±7.171	68.012 ±3.749	72.815 ±3.911	61.668 ±4.542
Resident health inspection area	-	79.908 ±3.405	61.525 ±3.312	72.673 ±3.990	44.166 ±3.140	62.301 ±5.786
Recreational and park area	-	39.006 ±3.627	34.463 ±1.689	36.445 ±3.407	31.973 ±2.374	60.591 ±7.586
Playground area	-	32.212 ±2.622	35.913 ±3.373	32.712 ±2.685	30.196 ±3.158	36.963 ±3.792
Golfcourse area	-	-	27.586 ±1.875	34.061 ±4.097	20.385 ±1.788	36.714 ±4.122

¹ Mean of soil pollution score ± standard error. There was no sample site on factorial sites.² Number of polluted sites of Soil Network. Raw data of 1988 and 1990 were not available.

Table 5. Soil pollution score¹ of Soil Network area based on regional location of soil sampling sites during 1987-1994.

	Year ²					
	1987	1989	1991	1992	1993	1994
Mean	77.454 ±2.637	93.757 ±2.414	74.496 ±1.527	79.821 ±1.953	63.034 ±1.425	66.221 ±1.994
Seoul	58.076 ±6.972	73.844 ±4.552	88.106 ±10.136	75.328 ±7.431	78.020 ±6.888	109.373 ±13.339
Pusan	49.820 ±1.831	62.436 ±4.249	65.309 ±2.892	30.364 ±2.599	42.062 ±3.103	71.248 ±7.207
Taegu	178.827 ±21.441	128.723 ±15.126	67.135 ±7.195	94.577 ±6.791	52.244 ±4.079	59.061 ±6.831
Inchon	83.644 ±12.393	110.934 ±4.828	95.033 ±8.481	135.483 ±10.871	101.252 ±16.714	197.703 ±17.463
Kwnagchu	47.183 ±3.608	69.288 ±6.324	53.851 ±4.496	36.806 ±2.811	58.387 ±4.100	46.369 ±4.141
Taechon	49.224 ±1.845	39.990 ±3.838	58.071 ±6.124	52.868 ±5.888	65.802 ±6.721	30.723 ±5.603
Kyongki	66.077 ±3.004	68.656 ±2.518	69.485 ±2.701	102.115 ±3.749	64.306 ±3.149	98.806 ±7.819
Kangwon	100.094 ±6.091	78.979 ±8.224	89.739 ±7.664	95.659 ±10.593	63.563 ±5.494	74.808 ±10.961
Chungbuk	46.506 ±1.913	66.197 ±6.860	63.167 ±5.699	69.730 ±5.944	55.519 ±3.611	38.351 ±2.619
Chungnam	54.507 ±2.443	93.499 ±8.090	87.687 ±7.544	83.349 ±5.060	86.328 ±6.070	41.219 ±2.690
Cheonbuk	41.328 ±2.336	86.492 ±4.368	60.420 ±4.463	64.868 ±2.368	55.018 ±3.332	65.641 ±3.481
Cheonnam	55.397 ±7.159	88.635 ±13.248	64.508 ±3.457	81.718 ±11.906	65.028 ±5.109	76.634 ±8.224
Kyongbuk	140.146 ±9.792	121.962 ±6.410	79.415 ±4.367	90.127 ±5.754	52.241 ±2.192	45.283 ±2.660
Kyongnam	65.406 ±3.746	136.132 ±9.127	82.703 ±2.607	58.434 ±2.522	68.510 ±5.828	73.029 ±3.311
Cheju	29.679 ±8.944	48.574 ±7.864	19.351 ±4.550	48.738 ±4.699	43.804 ±4.868	40.382 ±4.048

¹ Mean of soil pollution score ± standard error. There was no sample site on factorial sites.

² Number of pollted sites of Soil Network. Raw data of 1988 and 1990 were not available.

성이 있는 모델을 얻을 수 있었다($Y = 1.16 + 0.23x$
 $r^2 = 0.84$; Y=토양4등급 현황, %; x=년도) (Fig. 2).

토양4등급의 연간 누적개소에 30%를 기준으로 하
 여 향후 토양질의 상태를 예측할 때, 토양측정망

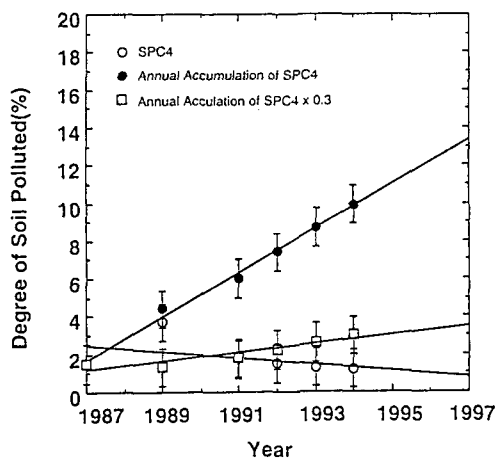


Fig. 2. Linear regression of the numbers of soil pollution class 4, the cumulative numbers of soil class 4 every year, and the numbers of soil pollution class 4 multiplied by 0.3 during 1987-1994. I Indicates standard error.

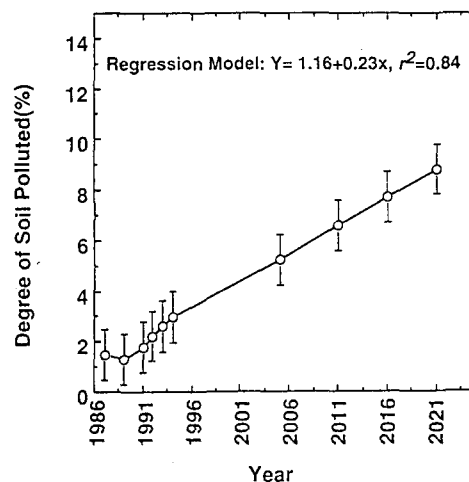


Fig. 3. Prospecction of the number of soil pollution class 4 on the Soil Network area. I Indicates standard error.

1305개소의 측정지점중에서 토양4등급은 2001년에는 4.8%, 2006년에는 6.0%, 2011년에 6.6%로 증가될 전망이다. 이에 해당하는 토양측정망 토양4등급의 면적으로 1987년 약 0.8ha에서 점차 증가하여 1994년 약 3.9ha가 토양4등급에 해당한다. 토양측정망의 총 면적중 이에 해당하는 면적으로서 2001년에는 6.2ha, 2006년에 약 7.7ha, 2011년에 약 8.5ha가 토양4등급에 해당하여 토양오염이 우려되거나 오염토양의 처리대책이 필요한 지역의 면적이라 예측할 수 있다. 이 결과를 토대로 할 때, 전체 국토의 면적중 토양4등급의 면적은 1987년에 대비하여 1994년에 5배, 2001년에 7배, 2005년 9배, 2011년에는 10배 정도로 증가할 것으로 예측된다 (Fig. 3).

4. 고찰

토양측정망 측정지역의 중금속 오염. 토양측정망 측정지점의 이용 용도별로 중금속 오염도를 분석한 결과에 의하면 대부분의 토양측정망 측정지역이 건전한 토양의 상태를 유지하고 있다고 할 수 있다. 토양측정망 측정지점의 토양오염기준을 초과하는 지

점의 수는 1989년 8.1%로 가장 높게 나타나고 있으나 (Table 2), 이 지역의 토양에 함유되어 있는 중금속이 동 식물의 생육 및 사람의 건강에 치명적이라는 것은 아니다. 중금속의 토양오염기준을 초과하고 있는 지점에서는 토양상태를 정밀하게 조사해야 할 것이며, 이들 지역 중에서 토양보전법 시행규칙 제 21조에 명시하고 있는 토양오염대책기준을 초과하는 지역에 대해서는 향후 오염된 토양의 복원이 필요할 것이다.

1987년-1994년 기간중에 100점 이하로 나타나고 있는 토양측정망 측정지점의 토양오염점수와 토양 4등급이 동 기간중에 1.2-3.7%로 나타나고 있는 것은 우리나라의 토양이 건전한 상태를 유지하고 있다는 것을 제시하고 있다 (Table 2, 3). Table 3에 제시된 토양 4등급이 1개소를 제외하고는 농경지로 분류되며, 농경지가 토양의 이용 용도별에서 일반적으로 높게 나타나는 것은 오염원으로부터 배출되는 오염물질이 인근하천으로 배출되고 하천의 물을 지속적으로 농경지에灌溉함으로써 농경지에 오염물질이 누적되어 나타나는 현상으로 추정할 수 있다. 특히, Cd의 평균농도는 농경지 토양에서 주거지와 공원 여가지

토양보다 2배 이상으로 높게 나타나고 있다.⁴⁾ 농경지 토양중 이들의 평균농도는 현재까지 우려할 정도는 아닐 것이나 Cd, Cu, Pb, Zn의 중금속이 다른 이용도별 토양보다 농경지 토양에 지속적으로 많이 축적되는 것을 고려하면, 이에 대한 정부의 정책배려가 필요한 시기라 할 수 있다.

1994년도에 주거지에서 토양오염점수가 높게 나타나고 있다. 1987년 이후 1993년까지 토양오염점수는 48.0-55.4를 나타내고 있었으나 1994년 토양오염점수가 77.8로 증가된 것은 다음 두가지 가능성으로 추정할 수 있다. 첫째는 1993년 이후 주거지역에서의 중금속 농도가 실제로 큰 폭으로 증가한 경우일 것이다. 둘째는 이 지역에서 채취한 토양시료가 이전의 방법과 동일하지 않거나, 채취한 토양 시료의 분석과정이 이전의 분석방법과 동일하지 않은 방법에 의하여 나타날 수 있는 가능성이다. 현재로서는 향후 2-3년간 축적되는 자료를 토대로 1994년도에 주거지에서 산출된 토양오염점수를 정확하게 분석하고, 주거지역에서의 토양오염점수가 이와 같은 방향으로 진행된다면 이에 대한 정책방향이 제시되고 효율적인 방법으로 주거지역에서의 토양오염방지대책이 추진되어야 할 것이다.

토양측정망 측정지역의 설치용도에 따른 16종류의 오염경로별 토양측정점수가 금속제련소, 금속광산지역, 특정폐기물 매립지역에서 1987년 이후 다른 지역에서보다 지속적으로 높게 나타나고 있으며 토양4등급의 대부분 위치가 이들에 영향을 받는 지역에 주로 분포되어 있는 것은 이들 시설에 의한 토양오염이 지속적으로 진행되고 있음을 보여주고 있다 (Table 3, 4). 김홍제 등⁶⁾에 의하면 서울시내의 산업시설 인근지역에 중금속이 축적되고 있으며, 윤성윤⁷⁾에 의하면 경상남도 주요공단지역 토양의 중금속 함량이 오염되지 않은 토양에서보다 높게 나타나고 있다. 또한, 일본 환경청 자료⁸⁾에 의하면 일본 118개소의 지방공공단체를 대상으로 토양상태를 분석할 결과, 총 177건의 토양오염사례가 보고되었으며 이중 75건은 토양 외의 주변환경에 직접적으로 영향을 미치고 있음을 보고하고 있다. 이러한 결과를 종합적으로 분석할 때, 일본의 산업구조와 유사한 우리나라의

금속제련소, 금속광산지역, 공단하류지역, 특정폐기물매립지역 등의 산업시설 인근지역에서 토양오염이 진행되고 있는 것을 추정할 수 있다. 이에 따른 우리나라 정부의 실질적인 토양오염 방지대책이 필요한 시기라 할 수 있다.

중금속에 의한 우리나라의 토양환경은 인천광역시와 대구광역시 등의 대도시가 다른 시도보다 열악하다고 할 수 있다 (Table 5). 시도에 따라 토양오염점수의 차이를 보이고 있으나 대도시에서 중금속에 의한 토양환경이 열악한 것은 대도시에 밀집되어 있는 산업시설⁹⁾에서 배출되는 중금속에 의한 것으로 추정할 수 있다. 특히, 인천광역시의 토양오염점수가 1987년 83.6에서 1994년 197.7로 상승하고 있음을 주시할 필요가 있다. 이 지역은 토양오염점수의 급진적인 상승원인에 대한 세부적인 분석이 가장 필요한 지역이라 할 수 있으며, 시급히 중금속 배출원을 파악하여 토양질을 관리해야 할 지역이라 할 수 있다.

중금속에 의한 토양오염을 유발할 수 있는 시설 및 지역은 강원, 경북, 경남, 경기, 충남, 전남지역에 많이 존재한다. 토양4등급의 누적개소가 강원, 경북, 경남지역에서 20개소 이상, 경기, 충남, 전남지역에 10-20개소로 나타나고 있으며(지역별 토양4등급 자료 미제시), 이 지역에서 중금속을 배출하는 오염원이 다른 지역보다 많이 존재하는 것을 제시하고 있다. 그러나 이들 지역에서 배출되는 중금속은 일부지역에 국한되므로 전반적인 토양오염점수는 인천광역시의 토양오염점수보다는 낮게 나타나고 있다고 할 수 있다 (Table 5).

토양질의 전망 및 예측. 1987년 이후 1994년까지의 토양측정망 운영에서 도출된 토양오염점수와 토양오염등급의 현황을 토대로 향후 비소 및 5종류 중금속에 의한 토양오염을 예측함이 타당하나 토양오염점수와 토양오염등급을 직접 이용한 토양오염추세를 판단하기 어렵다. 연도별로 토양오염점수의 추세를 분석하면 전반적으로 토양오염점수가 1987년에서 1994년 기간중에 낮아지고 있는 경향을 나타내고 있다 ($r^2 = 0.427$). 그러나, 연도별 변화를 나타내는 회귀선 기술기의 통계적인 유의성이 없으므로 Table 2에 제시된 전국평균 토양오염점수를 토대로 중금속

에 의한 우리나라 토양의 변화추세를 판단할 수 없다.

동 기간중에 토양등급에 의한 우리나라의 토양오염도 추세에서는 건전한 토양으로 평가할 수 있는 토양1등급이 점차로 증가하고 있다. 반면에, 토양오염이 우려되거나 오염된 지역으로 평가할 수 있는 토양4등급은 점차로 감소하고 있는 추세를 나타내고 있다. 그러나 이러한 토양오염등급의 결과를 직접적으로 이용하여 우리나라의 중금속에 의한 토양질의 예측은 적합하지 않다고 판단된다.

토양중에 존재하는 중금속은 자정작용에 의하여 짧은기간에 정화되지 않는다. 특히 금속광산 또는 산업시설에서 배출되는 중금속은 지속적으로 누적되어 이러한 시설의 인근지역에서 중금속 농도 및 중금속에 영향을 받는 지역의 면적은 점차적으로 증가하게 되어있다. 즉, 토양측정망의 측정지점에서 분석된 토양시료의 중금속 농도 및 영향을 받는 지역의 면적은 연차적으로 증가해야 할 것이다. 그러나 토양측정망의 결과에 따른 토양4등급의 수는 연차적으로 감소하고 있어 이와는 상반된 방향을 나타내고 있다. 이들 수치를 직접적으로 이용하는 것은 자연에서 발생하는 중금속의 토양축적현상으로 해석할 수 없으며, 이와는 달리 토양4등급의 연차적인 수치는 증가되어야 한다.

중금속에 의한 우리나라의 토양질을 추정하기 위해서는 토양4등급으로 제시된 수치에 적합한 가중치를 곱하여 나타난 수치를 이용해야 한다. 토양측정망에서 나타날 수 있는 토양4등급이 매년 누적된다면 1987년 9개소, 1989년 56개소, 1991년 78개소, 1992년 97개소, 1993년 104개소, 1994년에 130개소의 토양4등급이 나타날 것이다 (Table 3). 물론, 토양측정망의 측정지점이 지속적으로 토양4등급으로 인정되는 지역의 개소 수는 누적될 수 없다. 또한, 토양측정망에서 중금속 농도가 높게 나타난 일부 지역의 오염토양 정화사업이 실행되었으므로 이러한 사업이 효과적으로 수행된 지역의 중금속 농도는 토양오염판단 기준치 이하로 나타날 수 있다. 이에 따라, 실질적으로 나타나는 토양4등급의 수치는 토양4등급이 연차적으로 누적된 수치보다는 낮게 나타날 것이

다.

토양4등급이 나타날 수 있는 수치로 토양4등급의 연간 누적개소에 30% (토양4등급의 연간 누적 \times 0.3)를 기준으로 하여 향후 토양질의 상태를 예측하였다. 토양측정망의 격년간 측정지점의 농도비교에 의하면 토양4등급중의 약 50-60% 정도가 동일한 측정지점에서 토양시료를 채취하고 동일한 방법에 의하여 분석된 것으로 추정된다. 즉, 40-50%의 토양4등급으로 분류된 측정지점이 지속적으로 누락되고 있는 것으로 판단할 수 있다. 일부 중금속 농도가 높았던 지역의 오염토양 정화사업을 감안하더라도 이와 같은 자료의 비지속성은 측정지점에서 채취한 토양시료가 이전의 방법과 동일하지 않거나, 채취한 토양시료의 분석과정이 이전의 분석방법과 동일하지 않음에 따라 나타날 수 있다. 이에 따라 토양4등급의 연간누적개소에 일부지역의 토양정화사업에 의한 토양정화효과를 10-20%로 추정하고 나머지 30% 정도는 지속적으로 존재한다는 가정을 토대로 토양4등급의 연간 누적개소에 30%를 기준으로 하여 향후 토양질의 상태를 예측한 것이다.

토양측정망의 운용결과 및 향후 2011년까지 추정된 토양4등급의 면적은 우리나라 국토에 비교하면 넓지 않은 면적이라 할 수 있다. 그러나 제시한 면적은 토양측정망이 설정된 지역 중에 해당하는 면적으로써 이를 국토의 크기로 비례하면 우리나라 전국토에서 차지하는 토양4등급의 면적은 확대될 것이다. 토양측정망 측정지역이 16종류의 오염원을 중심으로 한 토양오염경로별로 설치되어 있으므로, 토양측정망에서 산출된 토양4등급의 면적과 국토의 면적중 토양4등급이 차지하는 지역을 산술적인 면적비로 산출하는 것은 타당성이 없다. 그럼에도 불구하고, 본 연구에서 제시한 토양오염의 향후 전망치는 우리나라의 토양이 어느 정도로 오염이 진행될 것인가를 나타낼 수 있는 의미를 제시하고 있다고 할 수 있다.

중금속으로 오염된 토양은 대기, 수계와는 달리 지속적으로 남아있다. 중금속은 자연적으로 분해되는 기간이 상당히 길기 때문에, 중금속으로 오염된 토양은 자연적으로 거의 정화되지 않는다. 특히, 오염된 토양을 정화하기 위해서는 단위면적당 토양처리비

용으로 \$150-1,500/yard³ 정도가 산출된다⁹⁾. 또한, 오염된 토양에 인접하고 있는 지하수 및 지표수로 오염물질이 확산되므로 토양오염에 의한 피해는 더욱 확산된다. 토양오염을 방지하기 위해서는 토양오염현황에 대한 정확한 판단과 예측이 필요하고, 이를 토대로 정책이 결정될 수 있다. 본 연구를 수행함에 있어 이용한 가정은 과학적인 논리 및 사실에 근거하여 이용하였으나 향후 이에 대한 세밀한 분석이 이루어져서 더욱 정확한 우리나라의 토양상태를 진단하고 예측할 수 있는 방법이 개발되어야 할 것이다.

5. 결론

1. 1987년부터 1994년기간중 시행된 토양측정망의 자료를 분석한 결과, 이 지역 대부분의 토양은 건전한 상태를 유지하고 있으나 1.5-3.7% 정도는 토양오염이 우려되거나 대책이 필요한 토양4등급으로 분류되었다.
2. 토양측정망의 16종류 오염경로별 토양오염점수는 금속제련소, 금속광산, 공단하류의 인근의 농경지역에서 높으며, 이들 지역에 토양4등급 지점이 밀집되어 있는 것으로 나타나고 있다.
3. 전국 시·도중에서 인천, 대구광역시에서 토양오염점수가 높게 나타나고 있으며, 강원, 경북, 경남 지역에 토양4등급 개소가 가장 많이 존재하고 있다.
4. 향후 토양오염의 정도를 추정하기 위하여 개발된 모델식은 $Y = 1.16 + 0.23x$ (Y는 토양4등급, x는 연

도)이다. 모델식에 의하면 토양측정망의 토양4등급에 해당하는 면적은 2001년 4.8%, 2006년 6.0%, 2011년 6.6%로 증가할 것으로 예측된다.

참고문헌

1. 환경부. 토양환경보전법 (1995).
2. 환경부. 토양환경보전법 시행령 및 시행규칙 (1996).
3. 환경부. 토양측정망운영지침. 환경부 (1994).
4. 박용하. "중금속 및 비소로 오염된 토양의 질을 평가할 수 있는 토양오염지표의 고안 및 적용가능성" 한국토양환경학회지 1(1) pp.47~54 (1996).
5. 환경부. 1994년도 토양측정망 운영결과에 따른 토양오염도 측정자료 (1995).
6. 김홍제, 김연천, 이정자, 성시경, 최한영, 이승주, 박상현. "서울시 일원의 토양 중금속오염도 조사" 서울특별시 보건환경연구소보 22. pp.168~173 (1986).
7. 윤성윤. 경상남도 주요공단내 토양의 중금속 오염도 조사연구. 동아대학교 환경문제연구소 연구보고 16(2) (1993).
8. United States EPA. Cost of Remedial Action. Notebook No.734. Office of Solid Waste Emergency Response, 1991 (1991).
9. 日本 環境廳 特輯 : 土壤 地下水 汚染 現況과 汚染 對策의 實例. 資源環境對策. 30(9). pp.3~52 (1994).