

부산 신평 · 장림지방산업단지 인근 학교운동장 토양중금속 특성연구

조갑제[†] · 지화성 · 김성림 · 빈재훈 · 박호국
폐기물분석과

Characteristics of Heavy Metals in Soil Collected from School Playgrounds around the Sinpyeong-Jangnim Local Industrial Complex, Busan

Gab-Je Cho[†], Hwa-Seong Ji, Seong-Lim Kim, Jae-Hun Bin, Ho-Kuk Park
Industrial waste analysis division

Abstract

This study was performed to examine the distribution characteristics and concentration of heavy metals in soil collected from school playgrounds around the Sinpyeong-Jangnim Local Industrial Complex, Busan and to investigate their relationship with major pollution sources. Both topsoil and subsoil samples from nine school playgrounds around the Sinpyeong-Jangnim Local Industrial Complex were collected to analyze pH, organic matter contents, and soil heavy metals

The results were as follows ; Analysis of heavy metals found that concentration of Zn at the subsoil of S8 exceeded the preliminary standard in accordance with the Soil Environment Conservation Act. But concentrations of all heavy metals in the soils collected from the other sites were lower than the standard. There was no significant difference in heavy metal distribution between topsoil and subsoil. According to a cluster analysis, the sites studied were divided into S1~S5 and S6~S9. Cd, As, Hg, Pb, and Zn were higher at S6~S9 and Cr was higher at S1~S5.

Results obtained from the source assessment of trace elements using enrichment factor showed Cd, Pb, Zn, Cu and Fe were influenced by urban anthropogenic sources. And the correlation analysis revealed significant correlations between Cd, Zn and Hg, between Pb and As, and between Cr-Ni and Ni at topsoil, and between Cd, Zn and Pb, and between As and Hg at subsoil. This indicates that the area studied was being influenced mainly by various metallic industries, and also compositively by fuel burning, waste incineration, petrochemical manufacture and various other sources of emission including cars.

SPS in the area studied was below 100 and SPC was first grade, but SPC at specific site was found to be the second grade, requiring continuous monitoring

Key Words : Soil heavy metal, Cluster analysis, Enrichment factor, Correlation analysis, SPS, SPC

서 론

산업화 및 도시화가 진행되면서 생산 활동에서 비롯된 인위적인 오염물질들은 다양한 형태로 생성되어 배출되고 있으며 물이나 공기 등의 매체를 통해 환경을 광범위하게 오염시키고 있다. 특히, 토양오염은 수질이나 대기오염과 달리 오염에 완만하게 노출되고 장기간에 걸쳐 축적되기 때문에 초기에는 그 심각성을 감지하기 힘들고 오염의 규

모가 확인되었을 때에는 이미 치리나 복원이 힘든 경우가 많다³⁾.

토양오염의 원인 물질중에서 중금속은 토양에서의 이동이 적고 축적성이 높기 때문에 장기간 잔류하면서 환경에 악영향을 미치는 물질로서 현재 우리나라는 토양환경보전법에 의해 Cd 등 8개의 중금속 항목이 토양오염물질로 지정되어있다.

중금속이 토양환경으로 유입되는 원인은 다양하다. 높은

[†] Corresponding author. E-mail: chogj64@korea.kr
Tel: +82-51-757-6937, Fax: +82-51-757-2879

함량의 중금속을 함유한 천연광물의 풍화로 인해 자연적으로 유입되는 경우가 있고, 산업 활동, 광산 활동, 토목 및 건설 활동, 교통량 증가 등 산업화와 도시화에 따라 인위적으로 유입되는 경우가 있다⁴⁾. 특히 각종 산업시설이 집중되어있는 산업단지는 타지역에 비해 산업시설에서 배출되는 오염물질뿐만 아니라 원료나 제품 등을 수송하기 위해 운행하는 자동차에서 배출되는 오염물질 등에 의해서 토양이 오염될 가능성이 높다.

공단지역 및 각종 산업장과 자동차 통행량이 많은 지역의 토양에서 중금속 함량이 높다는 연구·분석결과는 이미 많이 보고되었다. 관련 연구에서 대구·울산지역의 토양오염은 공단지역 토양이 중금속 함량이 가장 높았으며³⁷⁾, 울산지역은 비철금속공단지역의 토양 중금속 농도가 가장 높고 그 다음으로 기계공단지역 및 교통밀집지역 순이었다²⁷⁾. 또한 환경부에서는 전국의 1500여개 지점에 대하여 용도지역별로 토양측정망을 운영하고 있으며 매년 토양오염물질을 분석하여 모니터링하고 있다. 2007년 조사결과에서는 공장용지와 도로지역에서 Cd 등 토양중금속 7개 항목이 전국평균보다 높은 결과를 나타내었다¹⁰⁾.

최근에는 산업화와 도시화가 동시에 진행되면서 산업단지 주변으로 인구유입이 증가하여 주거지역이 형성되고 학교, 놀이터, 공원시설 등의 기반시설이 설치되면서 산업단지 인근 주민들의 생활은 환경오염으로부터 더욱더 노출되고 있는 실정이다.

그 중 학교는 청소년들이 하루의 가장 많은 시간을 보내는 생활공간이며 특히 학교 운동장은 청소년들의 신체적 활동이 많이 이루어지는 곳일 뿐만 아니라 최근에는 지역사회 체육시설로 개방되어 지역주민들의 이용도 증가하는 추세이다. 또한 학교 운동장 토양은 현대의 도심에서 토양과 쉽게 접촉할 수 있는 많지 않은 장소중 하나로서 만약 유해 중금속과 같은 오염물질이 학교 운동장 토양에 축적된다면 청소년을 비롯한 지역주민들은 토양오염에 직접적으로 노출될 가능성이 크므로 타지역에 비해 산업단지주변 학교운동장 토양의 중금속 오염특성에 대한 연구가 필요하다.

환경부에서 운영하는 전국토양측정망에 의해 전국의 253개 학교용지에 대하여 매년 토양오염물질을 분석하고 있지만 이것은 전국을 대표하는 지점으로서 주변 오염원에 의한 구체적인 영향을 파악하기에는 부족한 실정이다. 이에 학교 환경의 전반적인 오염특성에 대한 연구가 일부 지역을 대상으로 수행되었는데 변희욱 등(1996)은 서울시 영등포구와 구로구에 소재한 중학교 운동장의 토양과 옥외분진의 중금속 오염에 대한 연구를⁵⁾, 박관수(2003)는 초등학교 운동장의 지역별 토양 성분을 비교 분석하였다⁶⁾.

반면에 부산지역 학교 운동장 토양오염에 대한 연구는 전국토양측정망에 의해 부산지역의 10개 학교운동장에 대

하여 매년 모니터링 되고 있을 뿐이다. 이것은 부산지역 학교 운동장 토양의 전반적인 오염수준을 나타내는 정도이므로 정작 산업단지와 같은 대규모 오염원이 존재하는 경우 그 주변의 학교 운동장 토양이 어떠한 영향을 받고 있는지에 대한 연구결과는 전무한 실정이다. 따라서 학교운동장은 지하시설물이 없고 부지내에 뚜렷한 오염원이 없기 때문에 학교운동장 토양에 대한 인위적인 중금속 오염의 원인은 대부분 주변 오염원에 의한 것이므로 부산 시내 대규모 산업단지 주변의 학교운동장 토양에 대한 중금속 오염정도를 파악하고자 하였다.

부산 신평·장림 지방산업단지는 1984년에 총면적 885,248m²으로 조성된 부산의 대표적인 산업단지로서 2006년말 기준으로 금속, 피혁, 석유화학 등 156개 업체가 입주하여 가동 중이며 공단 남서쪽에 위치한 피혁단지·도금단지를 비롯하여 주위에 크고 작은 산업시설들이 난립해 있다.

따라서 본 연구에서는 1)신평·장림 지방산업단지 주변 9개 학교 운동장의 토양 중금속을 분석하여 그 농도수준과 깊이별, 지점별 분포특성을 평가하고, 2)토양 중금속의 거동에 영향을 미치는 물리화학적 특성과 중금속과의 관계를 살펴보고, 3)농축계수(Enrichment factor)를 이용하여 토양 중금속에 대한 발생원 평가와 중금속간의 상관성을 검토하여 토양중금속과 주변 배출원과의 관계를 파악하고, 4)마지막으로 토양오염지수(SPS)를 산출하여 토양오염정도를 등급화하여 종합적인 토양오염정도를 평가하고자 하였다.

실험방법

연구대상지역

본 연구대상지역은 부산광역시 사하구 소재 신평·장림 지방산업단지 주변 반경 2km 이내에 위치한 학교들로 하였으며 초등학교 4개소, 중학교 3개소, 고등학교 2개소 등 총 9개소(S1~S9)를 선정하여 2007년 2월~3월에 시료를 채취하였다. 그리고 대조지역으로는 사하구와 지리적으로 떨어져 있고 주변에 공단지역이 위치하지 않는 학교 2개소(D1, D2)를 선정하여 2007년 9월에 시료를 채취하였다. 시료채취 지점은 Fig. 1에 나타내었다

시료채취방법

시료는 해당 학교의 운동장 면적을 고려하여 한 학교에서 3개~7개 위치를 선정하고 표토(0~15cm)와 심토(30cm)로 구분하여 채취하였으며 분석한 결과의 평균값을 그 학교의 측정값으로 사용하였다. 각 학교에서 채취한 분석용 시료의 수는 Table 1에 나타내었다.

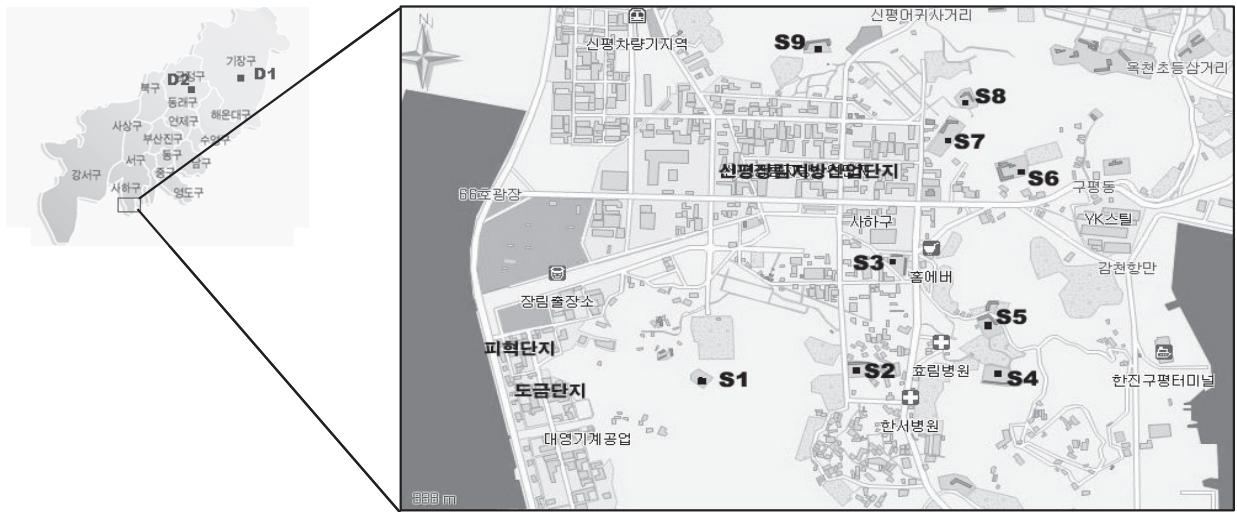


Fig. 1. Location of the sampling sites

Table 1. Sampling sites and number in Figure 1

No.	District	Students (person)	Playground Area(m2)	No. of sampling points	
				topsoil	subsoil
S1	Jangnim 1-dong, Saha-gu	540	2,666	3	3
S2	Jangnim 2-dong, Saha-gu	1,255	7,560	5	5
S3	Jangnim 2-dong, Saha-gu	1,300	3,250	4	4
S4	Jangnim 2-dong, Saha-gu	850	2,240	3	3
S5	Jangnim 2-dong, Saha-gu	1,007	6,718	5	5
S6	Sinpyeong 2-dong, Saha-gu	970	11,920	7	7
S7	Sinpyeong 2-dong, Saha-gu	1,040	6,228	4	4
S8	Sinpyeong 1-dong, Saha-gu	602	4,720	4	4
S9	Sinpyeong 1-dong, Saha-gu	759	6,881	5	5
D1	Gijang-eup, Gijang-gun	1,238	14,749	1	-
D2	Cheongnyong-dong, Geumjeong-gu	1,191	5,329	1	-
total				42	40

각각의 시료채취는 토양오염공정시험방법에 의해 토양 표면의 이물질을 제거한 후에 토양시료채취기 또는 모종삽으로 중심이 되는 한 지점과 주변 4방위의 5~10m거리에 있는 네 지점을 선정하여 약100g씩 채취해서 혼합한 시료를 1개의 분석용 시료로 하였다²⁾.

분석항목 및 분석방법

토양 pH

토양pH는 토양오염공정시험방법에 의해 분석용 시료 5g을 정밀하게 취하여 50mL 비이커에 넣고 25mL 증류수를 가하여 때때로 저어주면서 1시간 방치한후 pH meter(Orion SA720)를 이용하여 측정하였다.

유기물 함량

토양내 유기물 함량 분석방법은 현재 국내 토양오염공

정시험법에는 명시되어있지 않지만, 강열감량(또는 작열감량, L.O.I : Loss On Ignition), H₂O₂산화, 습식연소 등을 이용한 여러 측정방법들이 사용되고 있다. 본 연구에서는 여러 방법중 가장 간단한 강열감량법(연소 손실)을 통해 유기물의 함량을 측정하였다.

강열감량은 전기로의 가열온도와 가열시간에 따라 차이가 생겨 가열온도가 450℃이상이 되면 점토수의 손실이 일어나서 정확한 측정이 어렵다. 그래서 본 실험에서는 Ball(1964)이 제안한 방법에 따라 실시하였다. 10mesh 토양시료 10g을 사기도가니에 넣고 105℃에서 건조시킨 후 이 시료를 다시 24시간 동안 전기로에서 약375℃로 가열한 후, 테시케이터에서 냉각시킨 후 감량을 측정하였다. 강열감량법에 의한 유기물 함량(%)은 건조기에서 건조시켜 측정된 무게와 전기로에서 가열 후 냉각해서 측정된 무게를 아래의 식에 대입하여 계산하였다⁷⁾.

$$O.M(\%) \text{ by } L.O.I = \frac{(Mass \text{ of oven-dried soil}) - (Mass \text{ of ignited soil})}{(Mass \text{ of oven-dried soil})} \times 100$$

O.M : Organic Matter Contents(%)

토양 중금속

토양오염공정시험방법

토양환경보전법에서 토양오염물질로 지정하고 있는 중금속 8개항목(Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr, Zn, Ni)을 분석하였다.

Hg를 제외한 7개 항목의 중금속 분석을 위하여 채취지점에서 채취한 토양시료를 일정한 두께로 하여 직사광선이 닿지 않고 통풍이 잘되는 곳에서 풍건시킨 다음 눈금간격 2mm의 표준체로 체걸음한 시료를 균일하게 혼합하여 분석용 시료로 사용하였다.

Cd, Cu, Pb과 Cr은 분석용 시료 10g을 정밀하게 취하여 100mL 삼각플라스크에 넣고 0.1N HCl 50mL를 넣은 뒤에 항온수평진탕기(100회/분, 진폭10cm)를 사용하여 30℃를 유지하면서 1시간 동안 진탕한 다음 5B여과지로 여과한 여액을 원자흡광분광광도계(AAS, Varian spectraAA220)로 측정하였다.

As는 분석용 시료 10g을 정밀하게 취하여 100mL 삼각플라스크에 넣고 1N HCl 50mL를 넣은 뒤에 항온수평진탕기(100회/분, 진폭10cm)를 사용하여 30℃를 유지하면서 30분 동안 진탕한 다음 5B여과지로 여과한 여액을 원자흡광분광광도계(AAS, Perkin-Elmer 5100PC)로 측정하였다.

Zn과 Ni은 분석용 시료를 다시 눈금간격 0.15mm 표준체로 체걸음한 시료 3g을 0.001g까지 정밀하게 취하여 250mL 반응용기에 넣고 HCl 21mL와 HNO₃ 7mL를 가하여 상온에서 2시간 이상 정지시킨후 온도를 서서히 올려 유기물을 분해시킨 다음 5B여과지로 여과한 여액을 100mL로 맞추어 원자흡광분광광도계(AAS, Varian spectraAA220)로 측정하였다.^{1,2)}

Hg는 채취지점에서 채취한 토양에서 돌, 나무 등 협잡물을 제거한 후 분석용 시료로 하였으며 수은환원기법을 사용하는 수은분석기(NIC SP-3D)를 이용하여 측정하였다.

염산-질산 추출법

농축계수(Enrichment factor)를 산출하기 위하여 총12개의 원소(Zn, Ni, Cu, Cd, Pb, Cr, Ca, K, Na, Mg, Al, Fe)에 대한 전함량 분석을 하였다.

토양시료를 실온에서 풍건한 후 눈금간격 0.1mm의 표준체를 이용하여 체걸음한 시료를 분석용 시료로 하였으며, 분석용 시료 1.0 g을 정밀하게 취한후 2:2:2 HCl-HNO₃-H₂O의 혼합용액(HCl과 HNO₃은 유해금속측정용, H₂O는 크로마토그래피용) 6 mL를 넣고, 초음파추

출기(Ultrasonic Extractor : CEM, star system6, USA)로 95℃에서 2시간 동안 추출하였다. 추출한 용액을 방냉하고 여과한 여액을 정확히 25 mL가 되도록 맞추어^{8,9)} 유도결합플라즈마방출분광광도계(ICP Optical Emission Spectrometer: Varian, 720-ES)로 분석하였다.

결과 및 고찰

토양 중금속 농도

본 연구대상지역과 대조지역의 토양시료에 대한 중금속 농도를 표토와 심토로 구분하여 Table 2에 나타내었다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 각 학교별 표토와 심토 각각 3개~7개의 시료를 채취하여 분석한 결과의 평균값이며, 9개 지점에 대한 분석항목별 지점별 농도를 토양오염우려기준과 비교하여 Fig. 2에 나타내었다.

모든 지점의 표토에서는 토양오염우려기준을 초과하는 중금속 항목이 없었으나 심토에서는 S8지점에서 Zn농도가 315.675mg/kg으로 토양오염우려기준(가지역, 300mg/kg)을 초과하는 것으로 나타났으며, S7지점의 심토에서도 Zn농도가 280.900mg/kg으로 높게 나타났다.

그 외에 다른 중금속 항목은 모든 지점에서 토양오염우려기준 이하였으나 Cd이 S8지점 표토에서 0.733mg/kg, Pb이 S7지점 심토에서 23.000mg/kg으로 타지점에 비해 상대적으로 높게 나타났다. Cr은 토양오염우려기준이 없으므로 Cr⁶⁺의 기준(가지역, 4.0mg/kg)과 비교하였고 그 결과 모든 지점에서 낮은 수준이었으며 Cu, As, Hg, Ni 항목도 모든 지점에서 토양오염우려기준보다 매우 낮은 수준으로 나타났다.

연구대상지점의 중금속 평균농도와 대조지점의 평균농도를 비교하여 Fig. 2에 함께 나타내었는데 지점이나 항목별로 서로 다르게 나타났다. Cu, Pb, As항목은 대조지역과 비슷하거나 다소 낮게 나타났고, Cd, Hg, Cr, Zn, Ni은 지점에 따라 차이는 있으나 대체적으로 대조지역보다 높은 농도를 나타내었다.

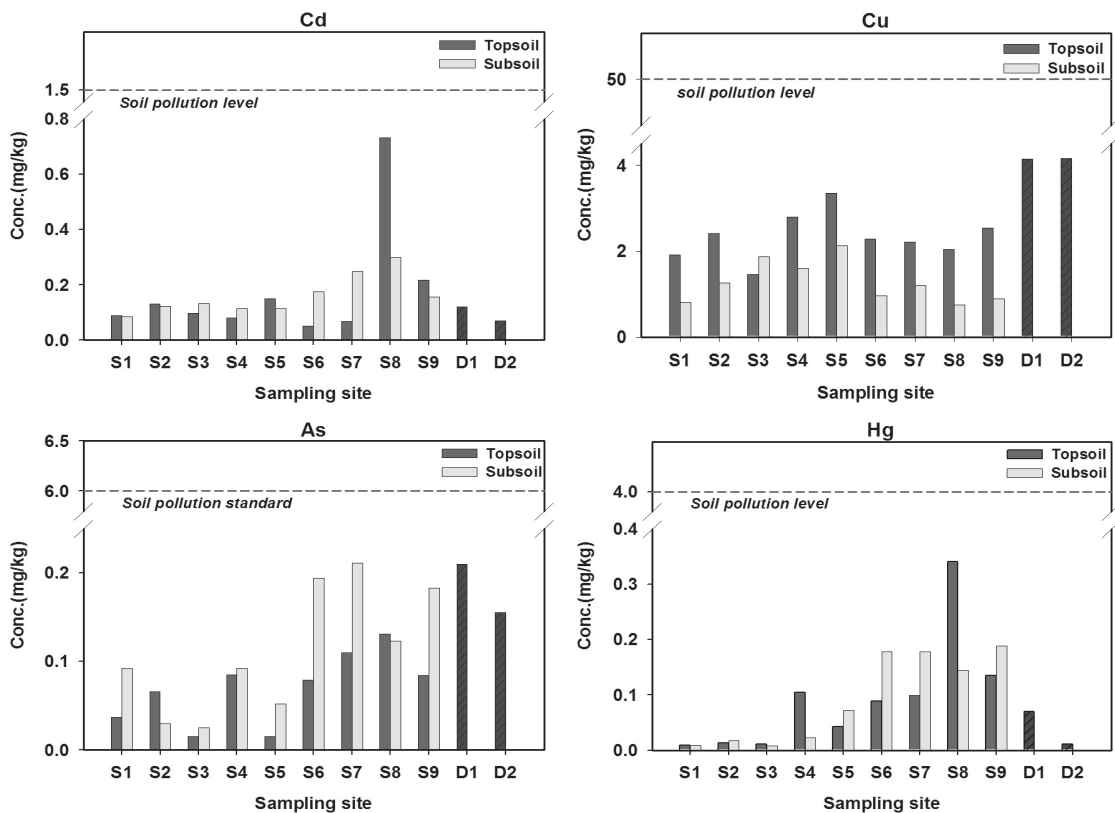
본 연구의 대조지역은 주변에 공장이나 산업단지가 없는 곳으로 선정하여 상대적으로 산업시설 등에 의한 토양오염 노출이 덜할 것으로 판단되었으나 대조지역 주변에 산업시설외의 다른 오염원에 대한 고려가 없었고 학교주변의 도로를 통행하는 자동차 등과 같은 공통적인 오염요인에 영향을 받을 개연성이 큰 것으로 판단되었다.

Table 2. The concentration of heavy metals in soil collected from school playgrounds (mg/kg)

Sampling site	Heavy metals							
	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr	Zn	Ni
S1 topsoil	0.090	1.909	0.037	0.009	2.572	0.913	45.500	3.489
(n=6) subsoil	0.086	0.802	0.092	0.009	1.890	0.525	47.083	2.689
S2 topsoil	0.132	2.405	0.066	0.013	2.888	1.112	55.583	4.433
(n=10) subsoil	0.123	1.256	0.030	0.017	2.664	0.600	65.510	5.253
S3 topsoil	0.098	1.458	0.015	0.011	2.163	0.608	59.300	3.558
(n=8) subsoil	0.134	1.875	0.025	0.008	1.793	0.721	65.404	3.775
S4 topsoil	0.081	2.792	0.085	0.105	3.343	0.777	39.000	3.567
(n=6) subsoil	0.115	1.605	0.092	0.023	1.885	0.343	62.006	5.989
S5 topsoil	0.150	3.345	0.015	0.043	2.981	0.609	46.433	4.793
(n=10) subsoil	0.114	2.129	0.052	0.072	5.666	0.219	95.970	3.147
S6 topsoil	0.052	2.286	0.079	0.089	2.816	0.056	20.436	1.886
(n=14) subsoil	0.176	0.967	0.194	0.178	1.581	0.009	33.526	2.271
S7 topsoil	0.069	2.214	0.110	0.099	4.888	0.009	44.092	1.225
(n=8) subsoil	0.250	1.198	0.211	0.178	23.000	0.010	280.900	4.433
S8 topsoil	0.733	2.045	0.131	0.341	5.100	0.005	121.942	3.008
(n=8) subsoil	0.300	0.748	0.123	0.145	7.138	0.004	315.675	1.075
S9 topsoil	0.125	1.639	0.186	0.302	3.880	0.002	30.370	2.607
(n=10) subsoil	0.156	0.897	0.183	0.189	2.820	0.006	52.813	3.193
Avg topsoil	0.180	2.332	0.069	0.094	3.397	0.487	54.074	3.206
(S1~S9) subsoil	0.162	1.275	0.111	0.091	5.382	0.271	113.210	3.536
D1 topsoil	0.120	4.150	0.210	0.070	9.200	0.000	77.733	8.667
D2 topsoil	0.070	4.165	0.155	0.011	10.500	0.000	42.200	2.867
Avg.(D1~D2)	0.095	4.158	0.183	0.041	9.850	0.000	59.967	5.767

* S : School playground soil in this studied area

D : School playground soil in control area



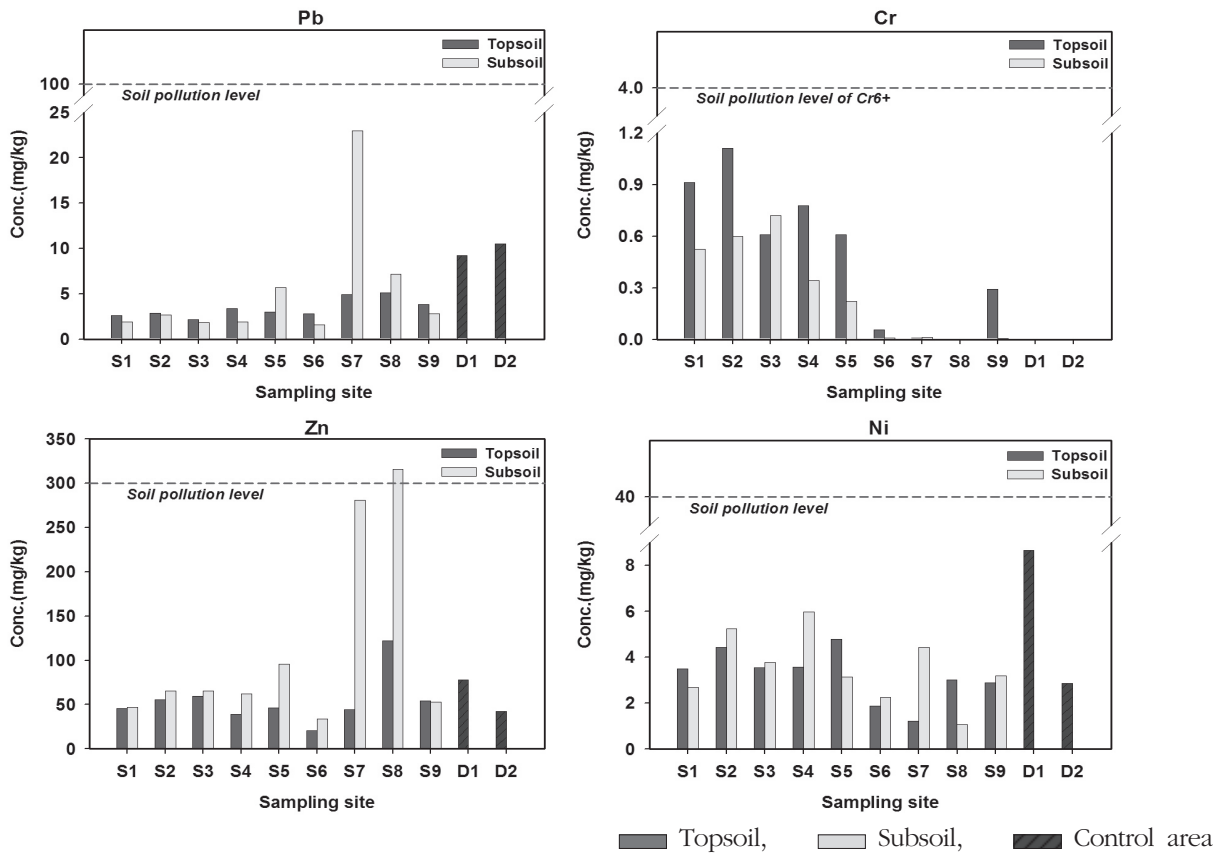


Fig. 2. The concentration of heavy metals in soil collected from school playgrounds

토양pH 및 유기물함량

본 연구에서는 토양 중금속에 영향을 미치는 물리화학적 인자들 중에서 토양pH와 유기물함량을 측정하였으며 그 결과는 Table 3에 나타내었다.

토양pH의 평균은 표토8.5, 심토8.6으로 약알칼리성을 나타내었으므로 토양내 중금속의 이동성은 크지 않은 것으로 추정할 수 있었고 대조군의 평균pH도 9.0으로 알칼리성을 나타내어 본 연구대상지역과 큰 차이가 없었다.

변희옥 등(1996)은 서울시 영등포구, 구로구 중학교의 운동장 토양pH가 7.3~10.5사이의 약알칼리성을 나타낸다고 보고하였으며⁵⁾, 박관수(2003)는 경남지역 초등학교 운동장의 토양성분 분석결과 토양pH가 8.5로 약알칼리성으로 나타난다고 한바 있다⁶⁾. 또한 2007년도 토양측정망조사결과에서는 전국의 토양pH 평균이 6.7인 반면에 전국 학교용지 토양pH의 평균은 7.5로 15개 용도지역 중에서 학교용지의 토양pH가 가장 높게 나타났다¹⁰⁾.

이것은 일반적으로 학교운동장을 시공할 때 최종 표층 작업 후에 초기 토사 안정과 보습효과로 먼지발생을 억제

하기 위하여 소금(NaCl)을 3~5mm 골고루 살포하게 되는 데¹¹⁾, 이때의 NaCl 영향으로 학교 운동장 토양이 일반적으로 약알칼리성의 특성을 가지는 것으로 추정할 수 있었다.

유기물함량은 표토 0.6~2.3%, 심토 1.6~2.8%로서 표토보다 심토에 더 많이 분포하였다. 일반적인 토양단면(Soil profile)의 특성에서는 표토층에 더 많은 유기물이 존재한다³⁾. 하지만 본 연구에서는 심토의 시료채취가 깊이 30cm에서만 이루어졌기 때문에 전형적인 토양단면(Soil profile)의 특성이 충분히 나타나지 못한 것으로 추정되며 또한 운동장 토양의 표층은 배수가 잘되는 사질토양으로 조성되어¹¹⁾ 유기물의 흡착능이 떨어지기 때문인 것으로 판단되었다.

다음은 토양pH와 유기물함량이 중금속 농도에 미치는 상관성을 파악하기 위하여 SPSS(Statistical Package for Social Sciences)¹²⁾를 사용하여 상관분석을 실시하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 3. The pH and organic matter contents in soil collected from school playgrounds

Site	Soil pH		Organic matter contents(%)	
	topsoil	subsoil	topsoil	subsoil
S1	8.3	7.9	1.1	1.9
S2	9.2	9.0	2.3	1.9
S3	9.2	9.3	2.2	2.1
S4	9.1	9.3	0.8	1.6
S5	8.9	9.0	1.3	2.0
S6	8.3	8.5	1.1	1.8
S7	8.2	8.0	0.6	2.8
S8	7.2	7.9	1.2	1.9
S9	8.6	8.7	0.9	1.8
Avg.(S1~S9)	8.5	8.6	1.3	2.0
D1	9.1	-	0.8	-
D2	8.8	-	1.1	-
Avg.(D1~D2)	9.0	-	1.0	-

Table 4. The correlation coefficient among soil pH, organic matter contents and heavy metals in soil collected from school playgrounds

Topsoil	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr	Zn	Ni
pH	-.731 *	.207	-.683 *	-.816 **	-.733 *	.721 *	-.579 *	.524
O.M	-.017	-.317	-.503	-.379	-.558	.533	.171	.583
Subsoil	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr	Zn	Ni
pH	-.572	.759 *	-.567	-.471	-.478	.484	-.589	.612
O.M	.433	.079	.296	.284	.904 **	-.153	.586	.059

*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

표토에서는 Cr을 제외한 Cd, As, Hg, Pb, Zn은 pH와 부의 상관관계가 높게 나타나서 토양pH가 낮을수록 대부분 중금속의 활동성 및 이동성이 커져서 중금속 용출이 많아지는 토양의 일반적인 특성과 일치하였다. 반면에 심토에서는 pH와 Cu만 정의 상관관계를 나타내었고 나머지 중금속과는 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

유기물 함량과 중금속들 사이에서는 대부분 상관성이 낮았으며 심토에서의 Pb만이 유기물함량과 상관성이 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 토양내의 중금속은 유기물함량과 상관성이 크다고 알려져 있지만¹³⁾ 본 연구에서는 앞에서 기술한바와 같이 학교운동장 토양이 사질토양으로 유기물 함량이 전반적으로 작기 때문에 중금속의 흡착능이 떨어져서 유기물함량과 중금속 사이에 의미있는 상관성이 나타나지 않은 것으로 판단되었다.

토양 중금속 분포

전국 학교용지 토양 중금속 분포에 의한 비교

본 연구대상지점의 토양 중금속 분포결과와 전국의 학교용지 토양중금속 분포결과를 비교하여 Figure 3에 나타

내었다. 분석항목중 Cr은 비교대상이 없으므로 생략하였다.

비교대상은 2007년 토양측정망에 지정된 전국 253개 학교용지의 토양 중금속 분석결과이며 지점은 각 지역을 대표하며 용도지역 구분 없이 전국에 골고루 분포하였다¹⁰⁾. 다만, 전국 각 지점의 위치가 오염지역인지 아니면 비오염지역인지 구분이 되지 않고 지역에 따라 시료채취일시, 시료채취 및 분석자, 실험실 그리고 분석기기가 다르므로 본 연구결과와 절대적인 비교대상이 될 수는 없지만 본 연구대상지역의 전반적인 토양 중금속 분포 수준을 파악하기 위하여 비교대상으로 하였다.

그 결과 Cd과 Hg은 타지역에 비하여 높은 농도수준을 나타내었고 반면에 Cu와 Ni은 전반적으로 낮은 농도분포를 나타내었다. Pb과 Zn은 전반적으로 비슷한 수준이었으나 심토에서는 타지역에 비해 높은 농도분포를 나타내었다. As는 서울, 경기지역을 제외하면 전국적으로 비슷한 수준이었다. 따라서 본 연구대상 지역은 지점별로 차이는 있지만 비교대상이 없는 Cr을 제외하고는 Cd, Hg, Pb, Zn이 타지역에 비해 비교적 높은 농도수준을 나타내었다.

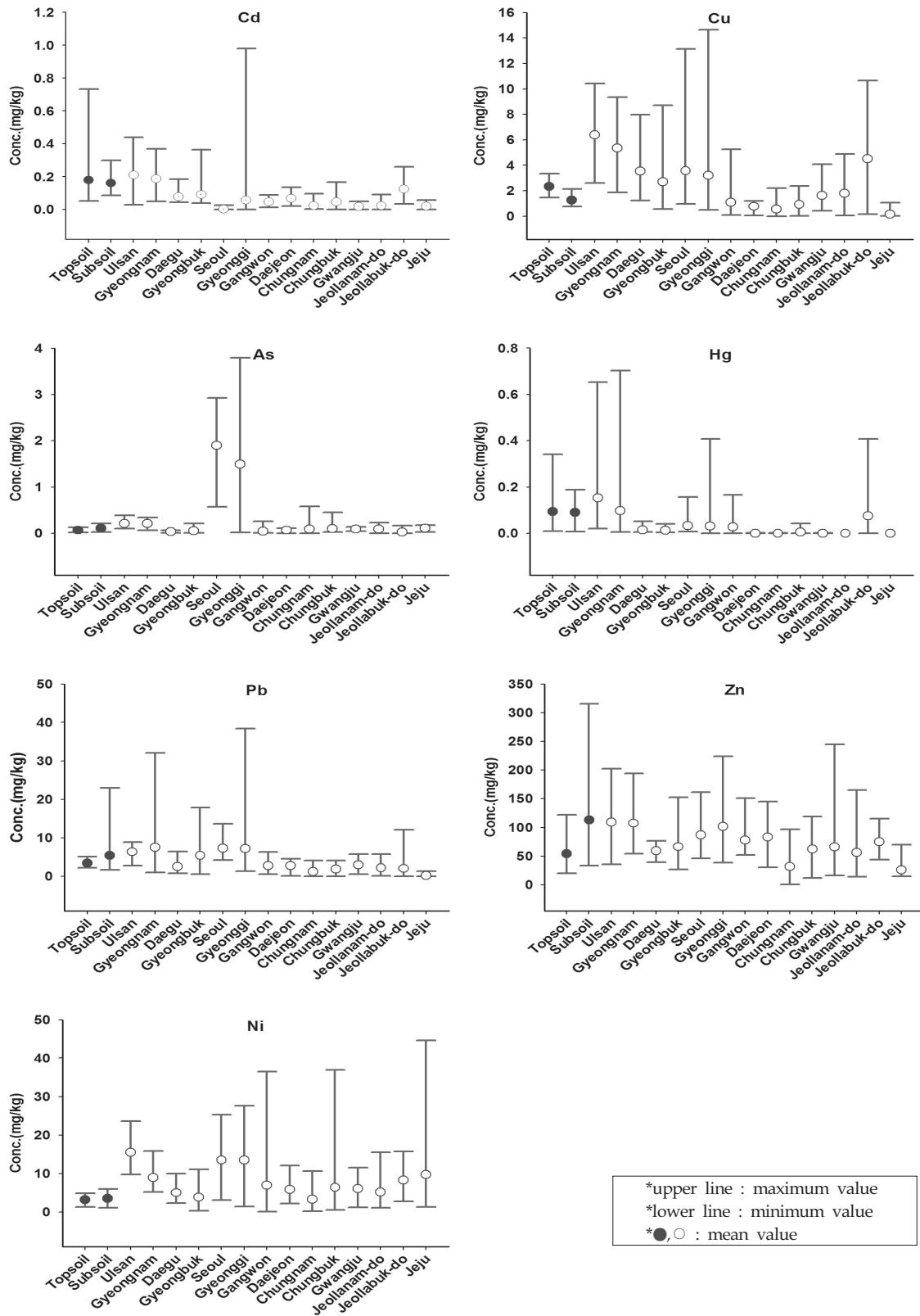


Fig. 3. The comparison of heavy metals distribution of school playgrounds in this areastudied and in the whole country

표토와 심토의 중금속 분포특성

본 연구대상지역의 9개 지점에 대하여 깊이에 따른 중금속의 분포를 Fig. 4에 나타내었으며 일부항목과 항목별 최대값을 제외하고는 전반적으로 표토와 심토에서 비슷한 농도분포를 보였다.

또한 본 연구대상지역의 표토와 심토의 중금속 평균농도를 비교하기 위하여 SPSS를 사용한 T검정(T-test)결과 95%유의수준에서 Cu와 Cr은 표토에서 중금속 농도가 더 높은 것으로 나타났으며 As는 심토에서의 농도가 더 높은 것으로 나타났다. 그 외에 Cd, Hg, Pb, Zn, Ni은 표토와 심토에서 평균농도의 차이가 없는 것으로 나타났다.

토양내 중금속의 수직 이동성은 표토의 중금속 농도, 토양pH, 유기물 및 점토함량 등에 영향을 받는데 토양pH가 증가할수록 중금속이 점토광물이나 유기물에 흡착이 잘되어 이동성이 감소한다^{14,15)}. 하지만 본 연구에서는 앞서 기술한바와 같이 심토의 시료채취가 깊이30cm에서만 이루어졌기 때문에 학교 운동장 토양내 중금속의 수직이동성을

명확히 해석하기는 어려웠으며, 토양pH가 약알칼리성으로 중금속의 이동성이 낮아 표토에서의 농도가 더 높을 것으로 예측되었지만 표토의 중금속농도 자체가 낮고 마사토(磨砂土)라는 학교 운동장 특성상 유기물 함량 역시 낮아서 표토에서 중금속이 잘 흡착되지 않기 때문에 표토와 심토 사이에 의미있는 분포차이가 나타나지 않는 것으로 판단되었다.

다음은 표토와 심토간의 각 중금속 농도의 상관성을 알아보기 위하여 SPSS를 사용하여 상관분석을 실시하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다. Cd, Pb, Cr, Zn항목은 각각 표토와 심토에서 정의 상관관계를 나타내었으며 이 항목들은 앞서 Fig. 2와 Fig. 3에서 대조지역과 타지역에 비해 높은 농도수준을 보인 중금속으로 나타난바 있다. 즉, 오염정도가 큰 Cd, Pb, Cr, Zn항목들이 표토와 심토사이의 상관성이 높고 표토에서의 중금속 농도가 높으면 심토에서의 농도가 높은 것으로 나타났다. 그 외의 항목은 표토와 심토에서 의미있는 상관관계가 나타나지 않았다.

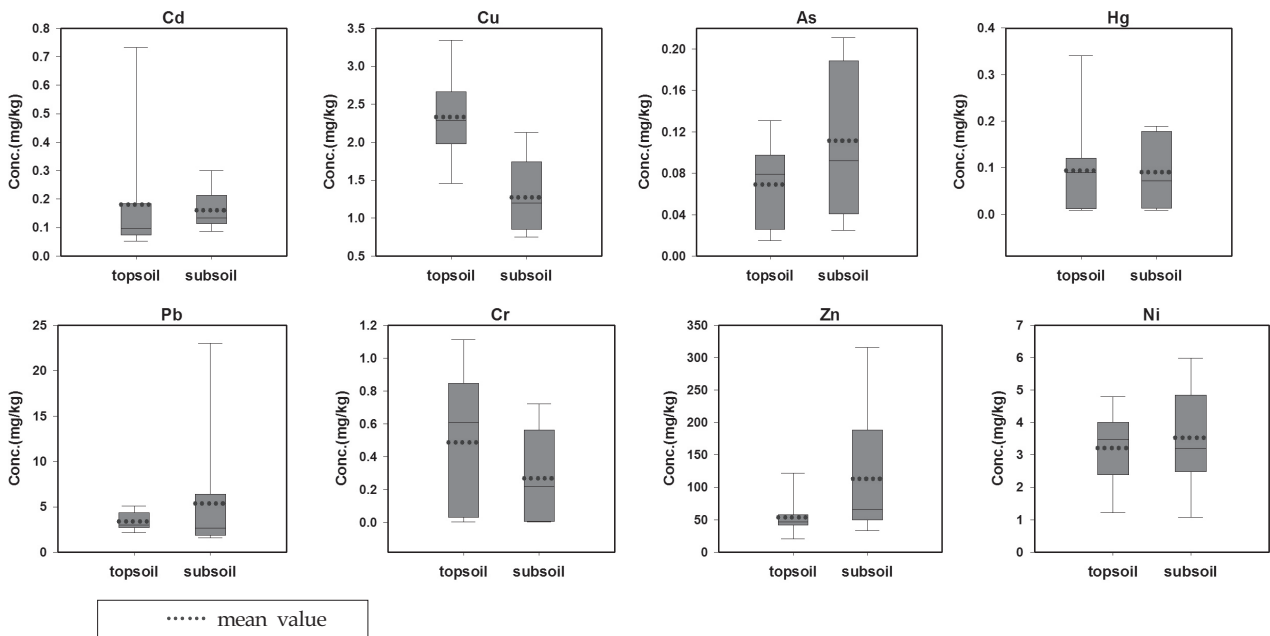


Fig. 4. The comparison of heavy metal distribution in the topsoil and subsoil

Table 5. The correlation coefficient between heavy metal concentration in the topsoil and subsoil

	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr	Zn	Ni
Correlation coefficient	.680 *	.371	.661	.561	.698 *	.841 **	.667 *	.198

* ; Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

** ; Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

군집분석에 의한 지점별 분포특성

본 연구대상지역의 지점별 분포특성을 알아보기 위하여 모든 지점의 표토와 심토의 중금속 농도자료를 이용하여 SPSS(Statistical Package for Social Sciences)에 의한 군집분석(Cluster analysis)을 실시하였다. 군집분석은 토양 중금속 분포 특성이 서로 유사한 지점을 유형별로 분류하기 위하여 각 지점의 다양한 농도특성의 유사성을 바탕으로 다수의 지점을 동질적인 지점으로 군집화 하고 동일 군집내에 속해있는 지점들의 특성을 파악할 수 있게 한다¹²⁾.

이번 연구에서는 군집형성에 있어서 일반적으로 사용하

고 정보의 손실량이 최소가 되도록 하는 Ward's method를 사용하였다^{16,17)}. 이 방법은 대상 자료들의 유사성을 거리(distance)로 환산하기 위하여 유클리디안 제곱거리(Squared euclidean distance)를 적용하며 거리가 가까울수록 유사성이 높다. 그 결과는 수형도(Tree dendrogram)로 작성하여 지점을 유형화한다.

군집분석결과를 Fig. 5에 나타내었으며 9개의 지점은 크게 I군집(S1~S5지점)과 II군집(S6~S9지점)으로 나누어졌다. 두 지역의 구체적인 중금속 분포특성을 알아보기 위하여 각 지점에 따라 유사한 분포패턴을 보이는 중금속 항목별로 표토와 심토로 나누어 Fig. 7에 나타내었다.

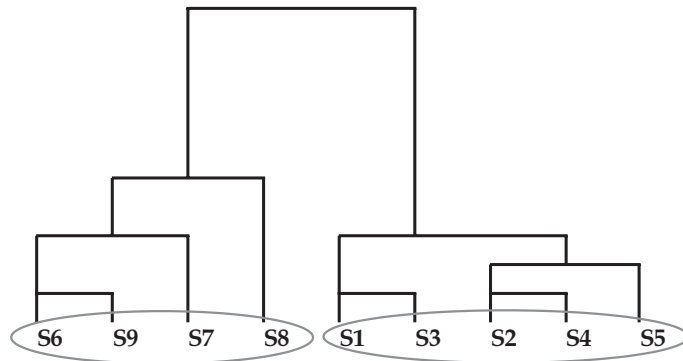


Fig. 5. The dendrogram by cluster analysis

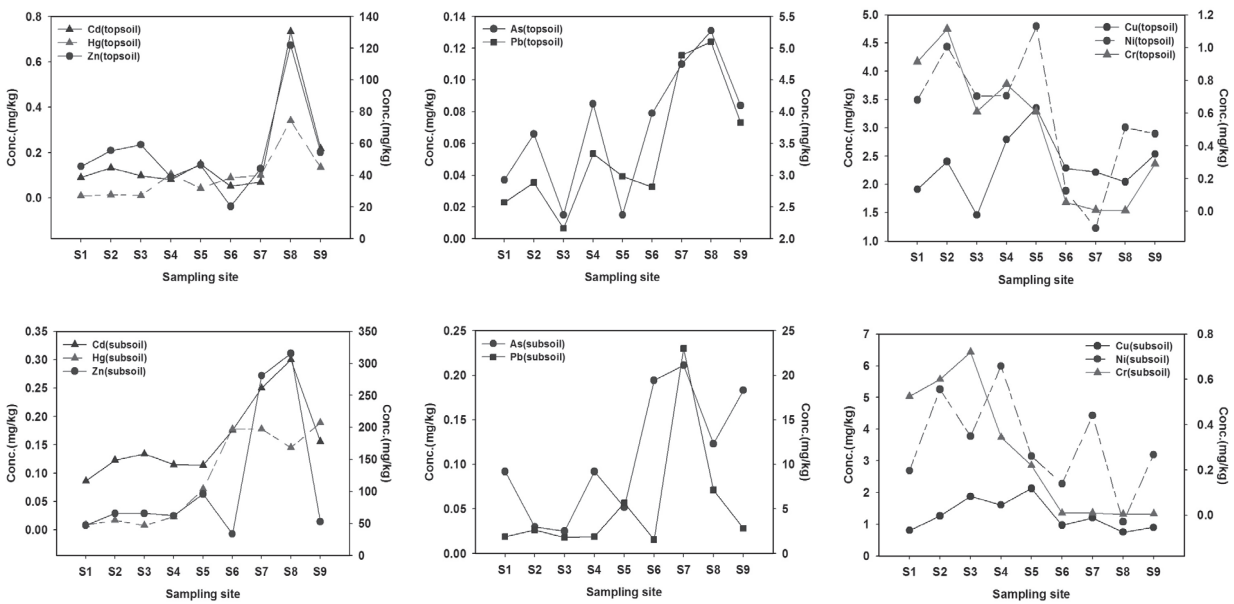


Fig. 7. The pattern of heavy metal concentration at each sampling site

그 결과 전반적으로 I군집이 II군집보다 중금속 농도가 낮은 것을 알 수 있었으며 중금속 항목별로 보면 I군집에서는 Cr이 다소 높은 농도를 나타내었으며 II군집에서는 Cd, As, Hg, Pb, Zn의 농도가 I군집보다 더 높게 나타났다. 반면에 Cu와 Ni은 지점별 큰 특징이 없었다. 이렇게 두 지역의 중금속 분포패턴이 다른 것은 대상지점에 대하여 주변의 중금속 배출원들이 서로 다른 영향을 미치기 때문인 것으로 사료되었다.

이렇게 나누어진 지점을 Fig. 6에 나타내었으며 I군집은 신평·장림 지방산업단지의 남쪽에, II군집은 북동쪽으로 공단지역과 더 가까운 곳에 위치하였다. 또한 두 지역에 대하여 신평·장림 지방산업단지를 비롯한 그 주변 산업시설에 의해 배출되는 중금속이 지역적으로 영향을 미칠 수 있는 가능성과 그 차이점을 파악하기 위하여 사하구 장림1동에 위치한 부산보건환경연구원 대기측정소의 풍향, 풍속 자료를 바탕으로 2006년 1월에서 12월까지 대기측정소 지점에서의 주풍향을 Fig. 6에 풍배도로 함께 나타내었다.

그 결과 남서에서 북서계열의 바람이 우세하게 나타났으며 본 연구대상지역의 모든 지점에서 신평·장림 지방산업단지의 배출원의 영향을 받을 가능성이 큰 것으로 판단되었으며, 특히, I군집은 신평·장림 지방산업단지의 남서쪽에 위치하고 있는 장림피혁단지 및 도금단지와 지리적으로 근접해 있고 풍배도에 의한 주풍향으로 볼때 피혁단지와 도금단지 배출원의 영향을 받을 개연성이 큰 것으로 추정할 수 있었다.

**토양 중금속의 배출원 특성
토양 중 미량원소성분에 의한 발생원 평가**

생산시설이 밀집한 공단지역에서 배출되는 오염물질의 일부는 토양 중에 축적할 것으로 추정되나, 정확한 배출원을 직접 측정하여 조사하기에는 막대한 시간과 비용의 문제가 있으며, 간접방법인 모델링에 의한 분석이나 물질수지법(mass balance), 배출계수법(emission factor), 공학적계산 등에도 한계가 있다. 특히 개방된 공간과 넓은 면적의 운동장을 대상으로 토양오염원인을 밝히기는 쉽지 않다.

따라서 연구대상지점의 학교운동장 토양에 함유된 원소 조성과 지각물질의 원소조성을 비교하여 발생원이 자연적 영향 혹은 인위적 영향인지를 판단하기 위하여 Rahn(18)이 제안한 농축계수(E.F, Enrichment Factor)를 이용하여 발생원 평가를 하였다.

여기서 지각물질의 원소조성은 Taylor와 McLennan¹⁹⁾이 제시한 지각성분표를 이용하였으며,

지각물질 중 비교적 균일하고 다량으로 함유되어 있는 Al을 기준원소로 선정하였다.

$$\text{농축계수(E.F)} = \frac{\text{측정된 원소성분의 농도} / \text{측정된 Al의 농도}}{\text{지각원소성분의 농도} / \text{지각원소 Al의 농도}}$$

농축계수가 1에 가까운 값일수록 그 원소의 기원은 지표원소와 동일함을 의미하여 농축계수가 10 이하인 값이면 지각물질의 조성변화 등에 의한 자연적인 발생원의 영향으로 간주하고, 10 이상의 값이면 인간의 활동에 기인한 인위적인 발생원의 영향으로 간주하였다^{20,21)}.

분석용 시료를 염산-질산 추출법으로 실험하여 위의 식으로부터 구한 농축계수는 Table 6에 나타냈으며, 조사한 토양의 표토와 심토를 구분하였다.

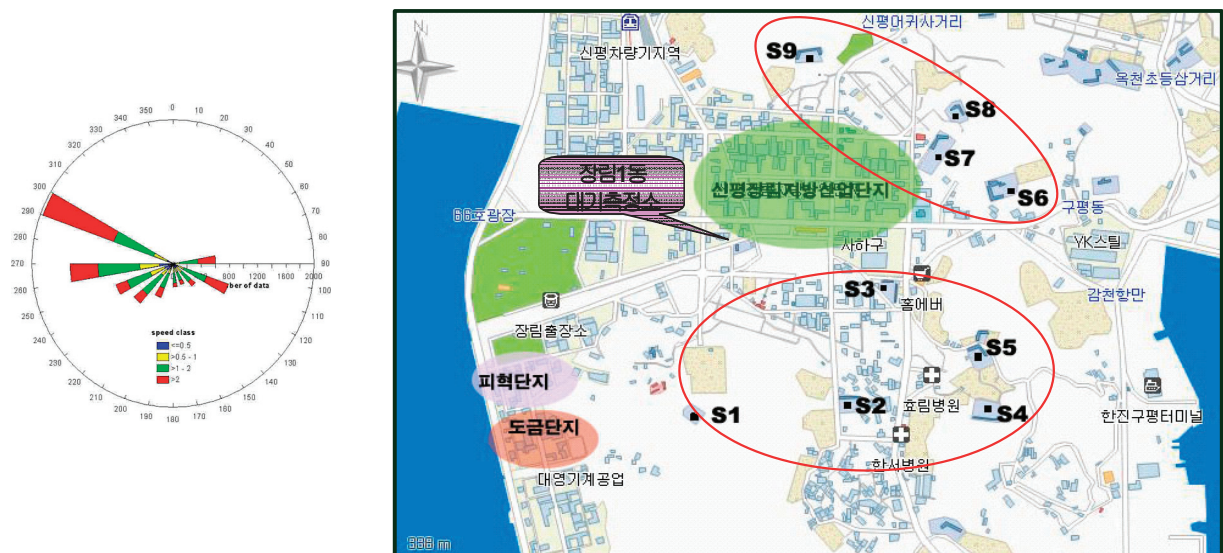


Fig. 6. The classification of sampling sites by cluster analysis and wind rose at Jangnim 1-dong

Table 6. Enrichment factor of trace elements in soil collected from school playgrounds

Sampling site		trace elements											
		Zn	Ni	Cu	Cd	Pb	Cr	Ca	K	Na	Mg	Fe	Al
S1 (n=6)	topsoil	30.5	9.5	11.7	442.4	26.1	8.5	3.7	0.5	0.6	5.1	25.9	1.0
	subsoil	19.1	4.4	5.3	373.1	24.9	2.5	2.4	0.6	0.6	5.0	21.3	1.0
S2 (n=10)	topsoil	22.0	8.6	8.9	411.6	19.0	7.9	10.2	1.0	2.2	5.0	24.6	1.0
	subsoil	15.0	4.3	4.4	325.3	19.5	2.8	3.4	0.7	1.3	5.0	19.1	1.0
S3 (n=8)	topsoil	14.2	3.6	5.2	293.6	19.1	1.9	5.9	0.8	1.0	5.0	21.9	1.0
	subsoil	15.6	3.8	5.4	273.8	18.5	2.7	6.1	0.9	0.5	5.0	17.8	1.0
S4 (n=6)	topsoil	24.3	6.5	11.4	346.4	21.9	5.6	4.4	0.6	1.0	5.0	19.7	1.0
	subsoil	20.4	4.6	7.6	327.8	19.9	2.7	2.2	0.9	1.6	5.0	19.0	1.0
S5 (n=10)	topsoil	42.9	12.5	22.2	499.3	36.6	11.8	26.4	0.6	5.4	5.0	25.6	1.0
	subsoil	31.8	4.9	12.0	358.3	38.1	3.3	5.1	0.8	2.1	5.0	17.3	1.0
S6 (n=14)	topsoil	22.2	6.0	14.1	418.4	25.2	3.8	4.0	0.9	4.7	5.0	24.1	1.0
	subsoil	20.0	4.4	8.1	385.8	28.9	2.3	2.0	1.3	1.7	5.0	21.4	1.0
S7 (n=8)	topsoil	47.7	11.3	24.8	619.9	85.7	11.0	4.9	0.7	0.3	5.0	33.5	1.0
	subsoil	63.3	7.5	17.4	594.3	61.9	5.4	5.3	0.5	0.1	5.0	18.9	1.0
S8 (n=8)	topsoil	110.4	6.8	31.6	1237.8	145.7	5.8	2.4	1.0	3.1	5.0	24.9	1.0
	subsoil	182.8	5.6	45.8	1506.4	293.8	2.8	7.3	0.9	1.7	5.0	23.0	1.0
S9 (n=10)	topsoil	25.8	7.5	10.9	465.6	29.4	6.5	11.8	0.6	1.2	5.0	25.3	1.0
	subsoil	24.6	5.7	8.0	483.5	30.1	2.8	5.5	0.7	1.1	4.9	19.6	1.0
Avg.	topsoil	37.8	8.0	15.6	526.1	45.4	7.0	8.2	0.7	2.2	5.0	25.1	1.0
	subsoil	43.6	5.0	12.7	514.3	59.5	3.0	4.4	0.8	1.2	5.0	19.7	1.0

본 연구대상지점에서 Ni, Cr, K, Na, Mg은 농축계수가 일부시료를 제외하고는 평균 10이하인 값으로 산출되어 암석의 풍화 등과 같은 자연적인 발생원의 영향을 받는 것으로 추정되었으나, Cd, Pb, Zn, Cu, Fe은 농축계수가 10 이상인 값으로 인위적인 발생원의 영향을 많이 받는 중금속인 것으로 추정할 수 있었다.

미량원소의 항목별 농축계수를 Fig. 8에 나타내었으며 Cd의 농축계수가 표토에서 평균 526.1 심토에서는 평균 514.3으로 가장 높은 값을 보였으며, 다음으로는 Pb > Zn > Fe > Cu 순이었다. 가장 높은 값을 보인 Cd의 경우 송희봉 등(2007)이 연구한 대구지역 학교운동장 토양 표토에서의 Cd의 평균농축계수인 42.3보다 약12배 높은 결과이다²¹⁾.

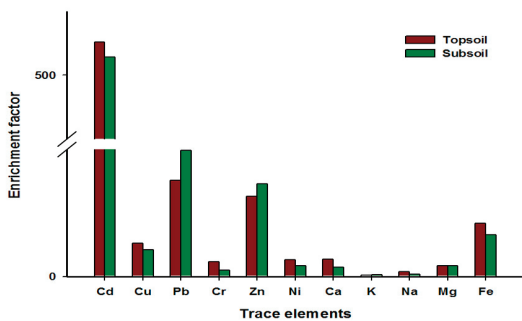


Fig. 8. Enrichment factor of trace elements in the topsoil and subsoil

지점별 농축계수는 Figure 9에 나타내었으며 S8지점의 Cd, Pb, Zn, Cu의 농축계수가 타지점에 비해 높게 나타나서 오염원의 영향을 가장 많이 받는 지점인 것으로 나타났다.

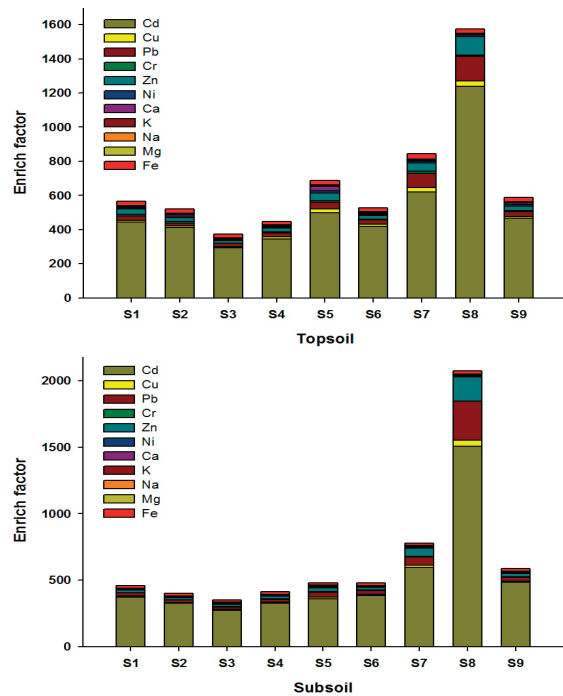


Fig. 9. Enrichment factor of trace elements at each sampling site

통계분석에 의한 토양중금속의 배출원 특성

인위적인 활동에 의해 기인하는 토양 중금속들은 각 항목들 간의 상관성을 조사함으로써 오염물질의 배출원에 대한 정보를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구대상지역에서 검출된 중금속에 대한 배출원을 파악하고 지역적인 배출특성을 추정하기 위하여 SPSS를 사용하여 상관분석(Correlation analysis)을 하였고 그 결과를 Table 7에 나타내었다.

표토에서는 Cd-Zn-Hg, Pb-As-Hg, Cr-Ni의 상관성이 높은 것으로 나타났으며, 심토에서는 Cd-Zn-Pb, As-Hg의 상관성이 높게 나타났다. 상관분석결과 상관성이 높은 중금속들은 서로 공통적이고 상관성 있는 오염원에 의해 배출된다고 추정할 수 있다. 발생원 평가와 상관분석결과에 의해 학교 운동장 토양에 영향을 미치는 배출원을 추정하기 위하여 대규모 산업단지를 중심으로 각종 배출원에 대한 중금속 배출특성에 대하여 검토해보았다. 대규모의 공단지역이 밀집해 있는 울산지역에서는 금속산업 활동과 관련해서 Cu, Pb, Zn, Cr, Ni등이 많이 검출된다는 연구결과가 있었다. 그 중에서도 비철금속의 제련, 가공 및 합금과정 등으로 인해 Cd, Pb, Zn이 많이 검출되고,

Cr과 Ni도 일부 검출된 것으로 보고되었다^{19,34)}. 또한 철의 제강공정에서 발생하는 제강분진에는 Fe뿐만 아니라 Cd, Pb, Zn, Cu등의 중금속 함량이 높은 것으로 알려져 있다^{22,23)}. 금속의 도금공정에서는 Cr이 도금원액에서 크롬미스트형태로 대기중에 배출된다고 하였으며²⁴⁾ 또한 Cr은 피혁공정에서도 가죽의 두께를 조절하는 공정에 사용되고 있다고 하였다^{25,26)}.

따라서 발생원 평가에서 인위적인 배출원에 의한 중금속인 것으로 나타난 Cd, Pb, Zn, Cu 등의 중금속들과 상관분석결과 서로 상관성이 큰 것으로 나타난 중금속들은 금속산업에서 주로 배출되는 물질임을 알 수 있었다.

특히, 신평·장림 지방산업단지내 입주업체수와 사하구 신평동, 장림동 지역 전체 제조업체수 현황을 Table 8에 나타내었는데 가장 높은 비율을 차지하는 업종이 1차 금속, 조립금속 등의 금속산업으로 나타났다. 신평동, 장림동 전체지역의 금속산업은 총387개소로 전체의 약24%를 차지하고 그 중에서 신평·장림 지방산업단지내 입주업체 총 156개소 중에는 금속산업이 50개소로 약32%를 차지하고 있다. 따라서 본 연구대상지역의 토양중금속은 배출원중에서 특히 금속산업으로 인한 영향이 큰 것으로 사료되었다.

Table 7. The correlation coefficient among heavy metals in soil collected from school playgrounds

Topsoil	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr	Zn	Ni
Cd	1							
Cu	-.111	1						
As	.531	-.040	1					
Hg	.887 **	-.015	.792 *	1				
Pb	.625	.090	.865 **	.809 **	1			
Cr	-.391	.107	-.605	-.661	-.668 *	1		
Zn	.945 **	-.268	.403	.747 *	.547	-.226	1	
Ni	.037	.355	-.614	-.315	-.505	.777 *	.137	1
Subsoil	Cd	Cu	As	Hg	Pb	Cr	Zn	Ni
Cd	1							
Cu	-.426	1						
As	.548	-.587	1					
Hg	-.691 *	-.464	.897 **	1				
Pb	.613 *	-.055	.493	.466	1			
Cr	-.664	.410	-.848 **	-.932 **	-.445	1		
Zn	.890 **	-.239	.321	.429	.762 *	-.480	1	
Ni	-.447	.457	-.274	-.445	.071	.429	-.295	1

* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).
 ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Table 8. The types of manufacture in the Sinpyeong-Jangnim Local Industrial Complex and Sinpyeong dong-Jangnim dong area

	Sinpyeong-Jangnim Local Industrial Complex, Busan*	Sinpyeong dong, Jangnim dong**
Manufacture of food products and beverages	13	227
Manufacture of textiles, Tanning and dressing of leather	28	200
Sawmilling and planing of wood, Manufacture of pulp, paper and paper products	14	131
Manufacture of refined petroleum products, Manufacture of chemicals and chemical products	14	39
Manufacture of rubber and plastic products, Manufacture of nonmetallic mineral products	6	127
Manufacture of basic metals	2	52
Manufacture of fabricated metal products	48	335
Manufacture of other machinery and equipment	-	274
Manufacture of electrical and electronic machinery	13	98
Manufacture of Motor Vehicles or other transport equipment	6	20
etc.	12	91
total	156	1,594

* <http://www.sjbu.com>, ** <http://www.saha.go.kr>

그 외에도 연료 연소나 쓰레기 소각시설에 의해 As, Pb, Hg, Zn, Ni이 배출되고 그 주변 토양에 영향을 미칠 수 있다고 하였으며^{27,28)}, 석유화학공단지역이나 화학제품제조시설 주변토양에서는 As, Hg, Cr, Ni등이 검출된다고 하였다^{27,29)}. 따라서 본 연구대상지역은 금속산업 뿐만 아니라 연료의 연소나 석유화학제품 제조 등 다양한 배출원에 의해 복합적인 영향을 받고 있는 것으로 판단되었다.

또한 많은 선행연구에서 교통밀집지역 토양에서는 유엔 휘발유를 사용했던 1993년 이전과 그 이후의 대기 강하분진에 의하여 Pb이 축적되었는데 이동성이 거의 없으므로 현재의 토양에 Pb이 많이 검출되고 있으며^{30,31,32)}, 현재에도 자동차 윤활유, 타이어 및 부품 등의 마모로 인해 자동차 운행에 따라 Cd, Cu, Zn이 많이 배출된다고 하였다^{33,34)}. 따라서 본 연구대상지역은 공단지역으로서 연료나 제품의 수송을 위해 자동차 통행이 많은 지역이므로 토양에서 검출된 Cd, Pb, Zn, Cu항목은 자동차의 통행으로 인한 공통적인 영향도 받고 있는 것으로 추정할 수 있었다.

토양오염지표에 의한 오염도 평가

각각의 중금속 원소들은 환경과 인체에 미치는 영향이 서로 다르기 때문에 여러 가지 중금속에 대한 종합적인 오염양상을 나타내기가 어렵다. 따라서 토양 중금속 농도에 의한 토양의 상태를 종합적으로 판단하기 위하여 토양오염

지표를 이용하였다. 박용하 등(1997)³⁵⁾의 방법을 현재 토양오염우려기준을 고려하여 변형한 다음식에 의해 토양오염점수(Soil Pollution Score : SPS)를 계산하고 그 점수에 따라 토양오염정도를 등급화(Soil Pollution Class : SPC)하여 토양오염정도를 판단하였다.

$$SPS = \sum \frac{Conc.i}{P.S.i} \times 100$$

i : Cd, Cu, As, Hg, Pb, Cr6+, Zn, Ni

Conc.i : 각 중금속의 분석 농도

P.S.i : 각 중금속의 토양오염우려기준

토양오염등급은 토양오염점수에 의하여 4등급으로 등급화 하는 것이 일반화되어있으며 박용하 등(1997)³⁵⁾이 제시한 토양오염등급을 Table 9에 나타내었다.

Table 9. Soil pollution class(SPC) based on the soil pollution score(SPS)

Soil pollution score(SPS)	Soil pollution class(SPC)
> 300	4
300 ~ 200	3
200 ~ 100	2
< 100	1

즉, 토양오염점수가 300점보다 크면 4등급, 300~200점이면 3등급, 200~100점이면 2등급, 100점 미만은 1등급으로 분류하게 하였다. 토양오염 4등급은 토양의 오염정도가 심하여 대책마련이 요구되는 지역이며, 2등급과 3등급은 토양오염이 우려되는 지역으로 지속적인 오염의 추이에 대한 관심이 요구되며, 1등급은 토양상태가 양호한 지역으로 볼 수 있다³⁶⁾.

본 연구에서는 가지역의 토양오염우려기준을 적용하여 토양오염점수(SPS)를 산출하였으며 각 지점별 토양오염점수와 그에 따른 토양오염등급은 Table 10에 나타내었다. 그 결과 대부분 지점이 표토와 심토 모두 점수가 100미만으로 1등급으로 나타났으나 S7지점이 심토의 점수가 154.7로서 2등급으로 나타났고 S8지점이 표토 116.9, 심토 142.2로 모두 2등급으로 나타났다.

Table 10. Soil pollution class(SPC) and soil pollution score(SPS) in this area studied

Site	SPS		SPC	
	topsoil	subsoil	topsoil	subsoil
S1	37.1	33.4	1st	1st
S2	47.5	49.3	1st	1st
S3	40.8	46.3	1st	1st
S4	40.3	50.5	1st	1st
S5	48.5	60.0	1st	1st
S6	25.9	39.8	1st	1st
S7	36.0	154.7	1st	2nd
S8	116.9	142.2	2nd	2nd
S9	42.9	48.4	1st	1st
Avg.	48.4	69.4	1st	1st

결 론

부산 신평·장림 지방산업단지 주변 9개 학교의 운동장 토양에 대한 중금속 농도수준과 분포특성을 파악하고 주요 배출원과의 상관성을 알아보고자 토양pH, 유기물함량, 그리고 중금속을 분석하였다.

중금속 분석결과 표토는 토양오염우려기준(가지역 300)을 초과하는 지점이 없었으나 심토는 S8지점에서 Zn이 315.675mg/kg으로 기준을 다소 초과하였다. 그 외의 중금속 농도는 모든 지점에서 토양오염우려기준보다 낮았으나 S7지점에서 Pb과 Zn이, S8지점에서 Cd이 상대적으로 높은 농도를 나타내었다.

토양pH는 표토와 심토 모두 약알칼리성으로 중금속의 수직이동성은 낮은 것으로 판단되었으나 유기물 함량이 표토에 비해서 심토에 더 많은 것으로 나타나 중금속 흡착능이 더 높은 것으로 판단되었다. 그러나 표토와 심토간의

중금속 평균농도는 일부지점에서 나타난 최대농도를 제외하면 Cd, Hg, Pb, Zn, Ni 항목은 의미 있는 차이가 없었다. 여기에는 조사학교 운동장 토양의 대부분이 배수성과 통기성이 우수하고, 생성입자 각이 부드러운 마사토를 사용하여 유기물 함량 차이가 적었던 것이 그 원인으로 사료되었다. 반면에 Cu와 Cr은 표토에서, As는 심토에서 평균 농도가 더 높은 것으로 나타났다.

본 연구에서 토양 중금속 분포 특성이 서로 유사한 지점끼리 두 지역으로 나누어 군집분석을 한 결과 I군집(S1~S5지점)은 신평·장림지방산업단지의 남쪽, II군집(S6~S9지점)은 공단과 지리적으로 가까운 북서쪽에 위치하였다. 전반적으로 II군집이 I군집 보다 중금속 농도가 높게 검출되었으며, 특히 II군집에서는 Cd, As, Hg, Pb, Zn이 높은 농도를 보였다. 반면 I군집은 Cr을 제외한 조사항목 대부분이 낮은 농도로 검출되었다. 이는 I군집 남서쪽에 위치한 도금단지 및 피혁단지에서 배출된 오염물질의 영향을 추정할 수 있는 결과였다.

검출된 토양 중금속의 발생원이 자연적 영향 혹은 인위적 영향인지를 판단하기 위하여 농축계수를 이용한 발생원 평가를 하였으며, 그 결과 농축계수 10이하로 자연적 영향을 많이 받는 원소는 Ni, Ca, K, Na, Mg으로 나왔으며 Cd, Pb, Zn, Cu, Fe은 농축계수가 10이상인 값으로 본 연구대상지역에서 인위적인 발생원의 영향을 많이 받는 중금속인 것으로 추정할 수 있었다.

또한 서로 상관성있는 배출원 특성을 알아보기 위해 상관분석을 실시하였으며 그 결과 표토에서는 Cd-Zn-Hg, Pb-As-Hg, Cr-Ni의 상관성이 높은 것으로 나타났으며, 심토에서는 Cd-Zn-Pb, As-Hg의 상관성이 높게 나타났다. 따라서 본 연구대상지역은 전체적으로 비철금속공정, 제강, 도금 등의 공정을 포함하는 금속산업의 영향을 주로 받는 것으로 사료되며, 그의 연료의 연소, 쓰레기 소각시설 그리고 석유화학제품 제조 등의 다양한 배출원과 자동차 운행에 의해 배출되는 중금속에 의해 복합적인 영향을 받고 있는 것으로 판단되었다.

마지막으로 본 연구대상지역의 토양오염지표에 의한 오염도 평가(SPC)는 토양상태가 양호한 1등급에서 오염대책을 필요로 하는 4등급까지의 단계별 평가결과에서 대부분 1등급 수준 이었으나 일부지점에서는 2등급이 나타나기도 하여 해당지점에 대한 지속적인 모니터링이 요구되었다. 또한 가지역의 토양오염우려기준을 적용하여 토양오염점수(SPS)를 산출한 결과 각 지점별 토양오염점수에 따른 토양오염등급은 대부분 지점이 표토와 심토 모두 점수가 100미만으로 1등급으로 나타났으나 S7지점이 심토의 점수가 154.7로서 2등급으로 나타났고 S8지점도 표토 116.9, 심토 142.2로 모두 2등급으로 나타났다.

본 연구결과 학교운동장 토양에 미치는 인위적 오염물

질의 이동경로는 대기질과 밀접한 관계를 추정할 수 있어 공단지역 배출원은 오염물질 총량 관리가 있어야 할 것으로 판단되었으며, 특히 토양오염은 장기간 축적되는 특성을 가지므로 신평·장림산업단지뿐만 아니라 광역적인 범위에서 다양한 중금속 배출원과 오염경로를 조사하고 대상지점을 확대하면 본 연구대상지역의 토양중금속 분포특성 및 영향범위를 보다 정확하게 파악할 필요성이 있는 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 환경부, 토양환경보전법
2. 환경부, 토양오염공정시험방법
3. 한국지하수토양환경학회, 토양환경공학, 향문사, 2001.
4. 안영희, 김인수, 김은경, 김무훈, 토양환경의 오염과 정화, 구미서관, 2003.
5. H. O .Byun, K .H. Kim, and H. T. Chon, "Heavy Metal Contamination of the Playground Soils and Dusts in the Middle Schools of the Youngdungpo-ku and Kuro-ku area, Seoul", J. Korean Earth Science Society, 17(2), 192~204, 1996.
6. P. S. Park, "Analysis of Comparative on the Regional Soil Ingredients of Grounds in Elementary School", Thesis, Ginju National University of Education, 2003.
7. Ball. D. F., "Loss-on-Ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soil", J. Soil Sci., V(15), 84~92, 1964.
8. 송희봉, 이은영, 도화석, 정철수, 신동찬, 이명숙, 백운경, 전성숙, 신원식, "대구지역 도로면지에 함유된 미량원소성분과 오염원 평가," 대한환경공학회지, 29(7), 793~800, 2007
9. Ordonez, A., Loreda, J., De Miguel, E., and Charlesworth, S., "Distribution of heavy metals in street dust and soils of an industrial city in Northern Spain," Arch. Environ. Contam. Toxicol., 44, 160~170, 2003
10. 환경부, 2007년도 토양측정망 및 실태조사결과, 2008.
11. N. G. Pyo, "A Study on the Drainage Effect of Infiltration Water for the School Playground ", Thesis, Hanbat National University, 2005
12. 남기성, SPSS를 이용한 통계분석, Freedom Academy Pub. co., 250~381, 2006
13. de Matos. A. T., Fontes. M. P. F., da Costa. L. M. and Martinez, M. A., Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils, Environmental pollution III, 429~435, 2000.
14. Andreu. V. and Gimeno-Garcia. E., Evolution of heavy metals in marsh areas under rice farming, Environmental Pollution 104, 271~282, 1999
15. Sterckeman. T., Douay. F., Proix. N., and fourrier. H., Vertical distribution of Cd, Pb, and Zn in soils near smelters in the north of France, Environmental Pollution 107, 377~389, 2000.
16. J. Y. Koo, M. J. Yu, S. G. Kim, and M. H. Shim, "Estimation of Long-term Water Demand by Principal Component and Cluster Analysis and Practical Application", J. of KSEE, 27(8), 870~876, 2005.
17. J. H. Kim et al., "Multi-variate Statistical Analysis for Evaluation of Water Quality Properties in Korean Rural Watershed", Korean Journal of Environmental Agriculture, 26(1), 17~24, 2007.
18. Rahn, K. A., "Sources of trace elements in aerosols—an approach to clean air," Ph. D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, pp. 325, 1971
19. Taylor, S. R. and McLennan, S. M., "The Continental Crust : Its Composition and Evolution," Blackwell Sci., Cambridge, Mass, pp. 46.47, 1985
20. Watson, J. G., "Transections receptor models in air resources management," An international specialty conference, San Francisco, California, pp. 491, 1988
21. H. B. Song, "Trace Elements Analysis and Source Assessment of School Dust in Daegu, Korea", J. of KSEE, 29(12), 1390~1399, 2007
22. Y. H. Lee, J. H. Lee, "The behaviors of Zinc, Lead and Chlorine in the Pyrometallurgical Process for Electric Arc Furnace Steel Dust", J. of the korean Inst. of Met. & Matec., 35(9), 1997.
23. S. H. Lee et al., "Environmental Leachability of Electric Arc Furnace Dust for Applying as Hazardous Material Treatment", J. of KSEE,

- 28(3), 2006.
24. D. U. Park et al., "Evaluation on the Efficiencies of Local Exhaust Systems and Airborne Concentrations of Total Chromium, Hexa-valent Chromium and Nickel in Some Electroplating Plants", Korean Ind. Hyg. Assoc. J., 3(1), 68~77, 1993.
 25. W. J. Kim, J. Y. Ko, and J. S. Heo, "Manufactures of Agricultural grade Gelatin from Cr Tanned Leather Wastes", J.of KOWREC, 9(3), 108~114, 2001.
 26. B. J. Lim, N. U. Lim, and H. J. Lim, "A Study on the Extraction of Collagen and Separation of Chrome Ion from Leather Waste", J. of KOWREC, 6(1), 43~52, 1998.
 27. J. G. Kim, "A Study on the Concentration Distribution of Heavy Metals in Soils on Industrial Areas of Ulsan", Thesis, University of Ulsan, 2004.
 28. J. O. Kim et al, "The Characteristics of Heavy Metals in Dust from Air Pollutants Emission Facilities", J. of KSEE, 61~62, 1999.
 29. B. K. Lee and I. H. Koh, "Analysis on Heavy Metal Contamination in Soils of the Ulsan Area", J. of KSEE, 25(11), 1436~1447, 2003.
 30. C. D. Lee, Y. J. Lee, and N. Y. Cho, "Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soil on the Playground for Children in I area", Kor. J. Env. Hlth. Soc., 27(3), 57~62, 2001.
 31. K. R. Kim et al, "Investigation of Soil Contamination of Some Major Roadsides in Seoul II. Major Roadsides in Gangdong-, Gwangjin-, Nowon-, Seodaemun-, and Seongdong-gu", J. Korean Soc. Agric. Chem. Biotechnol, 45(2), 92~96, 2002.
 32. Y. G. Woo, "A Study on the Heavy Metal Contents of Soils in Teagu City", J. Korean Society of Environmental Administration, 8(1), 35~40, 2002.
 33. J. H. Lee and B. Y. Min, "Distribution and Characteristics of Heavy Metals in the Fallout Dust Deposits at the Middle and High Schools of Some Cities in South Korea", Kor. J. Env. Hlth., 29(3), 21~7, 2003.
 34. G. H .Kim and D. S. Kim, "Physicochemical Characteristics of Soils in Relationships with Their Heavy Metal Contents-Measurements from Eight Different Regional Types in the Seoul City Area", J. of the korean Society for Environmental Analysis, 4(2), 99~107, 2001.
 35. 박용하, 토양질 측정자료의 관리체계 구축방안, 한국환경정책평가연구원, 147, 1997.
 36. E. A. Kim, "An Evaluation of the Soil Contamination Degree Using the Soil Pollution Scores in Kyonggi Province", Thesis, Kyonggi University, 1997.
 37. T. G. Lee, "Heavy Metal Concentrations in Soils of the Daegu and Ulsan Area", Journal of the Environmental Science, 14(6), 605~611, 2005.