통계적 기법을 이용한 휴폐광산의 중금속 위해성 평가

도 현 승* · 김 성 덕* · 이 승 주**
*청주대학교 토목환경공학과 · **청주대학교 바이오정보통계학과

Risk Assessment for Heavy Metal Pollutants of Abandoned Mines Using Statistical Techniques

Hyon-Seung Dho* · Sung Duk Kim* · Seung-Joo Lee**
*Department of Civil & Environmental Engineering, Cheongju University
**Department of Bioinformatics & Statistics, Cheongju University

Abstract

The risk assessment for heavy metal pollutions were analyzed by using statistical techniques including correlation and cluster analyses. The contamination data in this investigation obtained were from the Chungcheongnam-do abandoned mines. The descriptive statistical analysis showed that the values of Pb and Zn were relatively higher than other heavy metal values. The detection of heavy metals by distance from abandoned mines within 1,000m were mostly As, Cd, Pb, and Zn. It was noted, especially, that Zn was even detected at 4,000m. The results of coefficient correlation showed that Zn to Cd was the highest values. The cluster and dendogram analyses were generated. The results showed the two clear groups by heavy metal characteristics.

Keywords : Correlation Analysis, Cluster Analysis, Abandoned Mines, Heavy Metal Pollutants

1. 서 론

휴·폐광산으로 발생하는 환경문제들 중에서 가장 심각한 문제는 오랫동안 처리되지 않은 채 방치된 광산폐석, 선광 및 제련시설물, 광미 등이다[3]. 휴·폐광산 중 금속광산이 비금속 광산보다 하천 및 토양 오염의 주요한 요인이 되고 있다. 그 이유는 많은 금속광산들이 황화광물로 이루어져 있으며 풍화작용으로 인해 산화가 되기 쉽기 때문이다. 산화된 황화광물은 토양의 pH를 낮추며, 황화광물에 함유된 중금속은 다양한 형태로 존재하며 pH와 농도에 따라 외부로 쉽게 용출된다. 이때 박테리아는 중금속의 용출을 촉진한다.

광산배수는 폐갱도 또는 광산폐기물 적치장에서 유출되는 갱내수 및 침출수 등을 말한다. 광산배수는 pH 4이하의 산성수가 대부분이며 중금속의 성분과 함량이 매우 높아 주변 환경을 심각하게 오염시킨다. 특히 광산주변의 토양과 하천수계와 합쳐지면서 오염물질의 확산 등 주변 환경에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

따라서 집중강우나 강풍에 의해 용출된 중금속이 분산되어 농경지와 주변수계, 지하수와 토양 등을 오염시키는 주요 원인이 되고 있다. 또한, 주변 경작지에서 재배되는 농작물을 오염시켜 지역주민들의 보건위생에 심각한 영향을 미치는 등 사회 문제가 되고 있다. 광산폐기물과 이로 인해 발생되는 광산배수에는 구리(Cu), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As) 등의 유해 중금속 등이 다량 함유 되어 있다.

중금속은 자연적으로 분해되는 시간이 상당히 길기 때문에 중금속에 오염된 농작물을 섭취하게 되면 중금속의 생물 농축으로 체내에 집적하게 되어 불치의 병이 발생하게 된다.

† 교신저자 : 김성덕, 충북 청주시 상당구 내덕동 36 청주대학교 토목환경공학과
M·P:010-4235-9264, E-mail:sungduk@cju.ac.kr
2009년 7월 20일 접수; 2009년 8월 28일 수정본 접수; 2009년 9월 3일 게재확정

광산폐기물로 인한 중금속의 유해성 문제를 저감시키기 위해서는 오염토양을 주변수계로부터 근원적으로 차단하여 광산배수 발생을 감소시키는 방법과 이미 발생된 광산배수를 물리적, 화학적, 생물학적으로 처리하는 정화법 등이 있다. 휴·폐광산의 중금속 오염 특성은 중금속의 결합형태, 외부적 요인에 따른 중금속 성상의 변화, 금속이온의 용해도와 pH 등에 따라 달라진다고 보고 되었다[7]. 이들 중금속은 이온화되어 주변 하천의 하류에 있는 농경지로 유입되고 지하수를 오염시켜 체계적인 오염 저감 대책[5]이 요구되고 있다. <표 1>은 주요 중금속의 인체에 미치는 위해성을 나타낸다[1].

<표 1> 주요 중금속의 인체에 미치는 위해성

원소	인체에 미치는 위해성
As	신경장해, 발암성 피부발진, 신장, 간장의 퇴행성질환, 권태, 사망
Cd	구역질, 설사, 근육경련, 흥분, 시각장해, 신장손상, 골연화증(이따이이따이병)
Cu	구토, 간괴사, 위장장애, 요독증, 경련, 혈변, 피부궤양, 간경변
Ni	피부염, 빈혈, 간장 및 신장장애, 암
Pb	우울, 불안, 두통, 기억상실, 경련, 간질
Hg	신경장해, 경련, 창백, 불안, 마비, 시야협착증세, 호흡곤란, 만성기침, 체중감소, 허약, 혈중 요산과다
Cr^{6+}	간 및 신장장애, 호흡장애, 구토, 설사
CN^-	경련, 호흡곤란, 청각장애, 발암성

환경부에서는 토양오염이 우려되는 폐금속 광산 을 선정하여 1997~2004년까지 총 135개소에 대한 개황조사 및 정밀조사를 실시하였다[4]. 그러나 오염 물질의 화학적 분석결과를 토대로 오염정도는 파악되었으나 오염 결과에 대한 분석과 이를 기본으로 하는 대책에 대한 보완이 필요하다. 따라서 본 연구는 이 보고서를 바탕으로 조사된 충남지역 휴·폐광산의 토양시료 분석 데이터와 유입하천과의 이격거리, 주민의 토지이용 현황 등의 자료를 이용하여 휴·폐광산에 대한 중금속 위해성 평가를 하고자 한다.

토양오염 자료에 대한 통계 분석 방법으로 일변량 분석은 기술통계 분석, 정규성 검정 및 분산분석을 실시하였으며, 다변량 분석은 중금속 성분간의 상관분석(correlation analysis)과 군집분석(cluster analysis)을 실시하였다[6]. 이 결과를 바탕으로 충남지역의 휴·폐광금속광산에 대한 오염도를 정확히 평가하여 오염원에 따른 원인 분석, 오염범위 산출, 오염방지 및 복원방안 수립에 대한 기초 자료를 제공 하고자 한다.

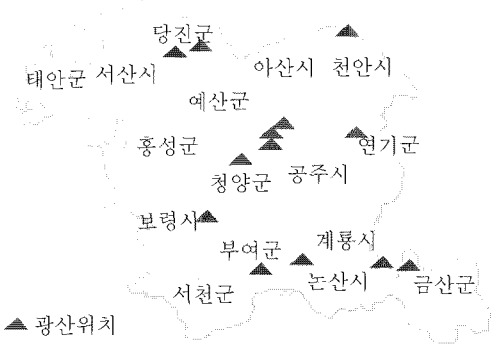
2. 연구 방법

2.1 연구 영역

본 연구는 충청남도(공주시, 논산시, 서산시, 천안시, 금산군, 당진군, 보령군, 부여군, 연기군, 청양군)의 10개 지방자치단체에 산재되어 있는 23개의 폐금속 광산 중에서 오염이 심하여 환경부에서 정밀조사를 실시한 14개 광산을 대상영역으로 선정하였다. 충청남도 휴·폐광산의 토양 오염 데이터는 각 광산별로 38~54개 시료를 표토 및 심토에서 채취하였으며, 총 조사지점은 622 지점이다. 이중 표토가 채취된 곳은 483 지점이고, 심토가 채취된 곳은 139 지점이다. 직접적으로 중금속이 유출될 확률이 높고, 빠른 시간에 생태계에 영향을 줄 수 있기 때문에 표토의 채취 지점을 심토의 약 4배수로 하였다. <그림 1>은 충청남도 지역의 휴·폐광산 위치도를 나타낸다.

휴폐광산의 토양 오염 영향도를 평가하기 위해서 표층 및 심층 토양에 포함된 pH, CN^-, As 및 중금속 7종(Cu, Cd, Hg, Pb, Ni, $Cr6^+$, Zn)의 오염도를 일변량 분석을 통해서 비교 검토하였다. 기술통계량으로는 샘플 시료의 중심 위치를 나타내는 측도인 평균과 평균을 중심으로 샘플 시료들이 산포되어 있는 정도를 나타내는 측도로는 분산, 표준편차와 변동계수 등이 있다.

기초 통계 분석, 정규성 검정 및 비모수적 분산 분석을 실시하여 시료 채취 지점에 따른 중금속 오염정도 즉, 표층과 심층에서의 중금속 오염정도와 토지이용 현황에 따른 중금속 오염정도를 평가하였으며, 광산으로부터의 이격거리에 따른 중금속 오염 농도 변이에 대한 분석을 실시하였다. 다음으로 토양 시료에 있는 변수(중금속 원소)들 사이의 상호 관련성을 분석하기 위해 상관분석을 하였으며, 마지막으로 중금속 원소들에 대하여 군집분석을 하였다.



<그림 2> 충청남도 지역의 휴·폐광산 위치도

3. 분석결과 및 고찰

3.1 중금속의 토양오염 자료에 대한 일변량 분석

충청남도 휴·폐광산 부근의 토양 깊이에 따른 토양오염 농도의 기술 통계량과 정규성 검정 결과를 <표 2>에 나타냈고, <표 4>에는 토양 이용 현황에 따른 토양오염 농도의 기술 통계량과 정규성 검정 결과를 나타냈다. <표 3>은 두 가지 토양 깊이에 따른 중금속 오염 농도의 모평균에 대한 이표본 Wilcoxon 검정 결과이고, <표 5>는 토양 이용 현황에 따른 중금속 오염농도의 모평균에 대한 차이를 검정하는 Kruskal-Wallis 검정 결과를 나타낸다. 또한, 광산으로부터의 이격거리에 따른 중금속 오염농도 변이를 분석하여 <그림 2>에 나타냈다.

기술 통계량은 평균, 표준편차, 변동계수, 최대값 및 최소값 등이며[8], 각각의 통계 분석은 토양 깊이(표토 및 심토)와 토양 이용 현황(산림, 논, 밭)에 따른 분석을 하였다.

표토와 심토의 기술 통계량 계산 결과를 보면, 납(Pb)과 아연(Zn)의 평균값이 다른 원소들에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 이는 조사지역의 표토와 심토를 포함한 토양이 전반적으로 납(Pb)과 아연(Zn)에 의해 오염되었음을 알 수 있다. <표 2>의 Shapiro-Wilk의 정규성 검정 결과 모든 중금속 원소들의 p-값이 0.05보다 작으므로 중금속 원소들의 오염 농도 분포들은 유의수준 5%하에서 정규분포를 따른다고 할 수 없다.

<표 3>은 두 가지 토양 깊이에 따른 중금속 오염 농도의 모평균에 대한 이표본 Wilcoxon 검정 결과를 나타낸다. 이표본 순위합 검정 결과에서 표토와 심토에 대한 중금속 원소들의 오염 농도 모평균간에 차이가 있는지를 검정한 결과 유의수준 5%하에서 니켈(Ni)과 납(Pb)은 표토와 심토간에 오염농도의 차이가 있으며, 나머지 원소들은 차이가 없는 것으로 나타났다. 납(Pb)인 경우심토가 표토에 비하여 조금 더 오염되었다는 것을 의미한다.

<표 2> 토양 깊이에 따른 중금속에 대한 기술통계량 및 정규성 검정

변수	토양	단위	표본수	평균	표준편차	변동계수(CV)	최소값	최대값	S-W 검정
pH	표토	-	483	5.8794	0.5456	9.2781	4.2100	8.0700	0.0001
	심토		139	5.9903	0.6087	10.1616	4.5000	7.6900	0.0742
	계		622	5.9042	0.5617	9.6137	4.2100	8.0700	0.0001
As	표토	mg/kg	483	19.1319	221.4673	1157.5800	0	4510.7700	0.0001
	심토		139	25.0118	140.7032	562.5469	0	1025.1300	0.0001
	계		622	20.4460	206.0940	1007.9900	0	4510.7700	0.0001
Cd	표토	mg/kg	483	0.8405	4.1150	489.6119	0.0250	74.0370	0.0001
	심토		139	1.0572	3.8580	364.9220	0.0600	40.2250	0.0001
	계		622	0.8889	4.0570	456.4009	0.0250	74.0370	0.0001
Cu	표토	mg/kg	483	9.7663	19.7852	202.5864	0.2410	230.9800	0.0001
	심토		139	11.4792	20.0386	174.5650	0.6850	191.4950	0.0001
	계		622	10.1491	19.8388	195.4735	0.2410	230.9800	0.0001
Ni	표토	mg/kg	483	21.0601	10.0880	47.9011	2.2100	79.3100	0.0001
	심토		139	23.4023	12.5070	53.4438	1.7100	107.2200	0.0001
	계		622	21.5836	10.7100	49.6212	1.7100	107.2200	0.0001
Pb	표토	mg/kg	483	71.5642	597.2478	834.5619	1.5400	9531.9800	0.0001
	심토		139	95.7333	671.8099	701.7514	1.6500	7797.5000	0.0001
	계		622	76.9654	614.2145	798.0403	1.5400	9531.9800	0.0001
Zn	표토	mg/kg	483	183.5745	393.9598	214.6048	33.9300	5742.9900	0.0001
	심토		139	247.6845	601.9522	243.0318	41.2000	5782.4900	0.0001
	계		622	197.9014	449.1106	226.9366	33.9300	5782.4900	0.0001
Hg	표토	mg/kg	483	0.0030	0.0187	633.8245	0	0.2600	0.0001
	심토		139	0.0033	0.0152	463.0847	0	0.1100	0.0001
	계		622	0.0030	0.0180	593.9323	0	0.2600	0.0001
Cr^{6+}	표토	mg/kg	483	0.0022	0.0134	621.3734	0	0.1600	0.0001
	심토		139	0.0047	0.0222	470.8263	0	0.1700	0.0001
	계			0.0027	0.0160	579.6217	0	0.1700	0.0001
CN^-	표토	mg/kg	483	0.0005	0.0067	1292.4500	0	0.1000	0.0001
	심토		139	0.0033	0.0176	531.3956	0	0.1200	0.0001
	계			0.0011	0.0102	896.8956	0	0.1200	0.0001

산포의 변화정도를 나타내는 변동계수를 이용하여 중금속 원소들의 상대적 변동을 측정하였다. 표토의 변동계수는 비소(As)>납(Pb)>수은(Hg)>크롬(Cr6+)>카드뮴(Cd)>아연(Zn)>구리(Cu)>니켈(Ni) 순으로 나타났으며, 그 범위의 차이는 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 이는 조사 지역의 토양 오염이 동질적이지 않다는 것을 의미한다. 심토의 변동계수는 납(Pb)>비소(As)>크롬(Cr6+)>수은(Hg)>카드뮴(Cd)>아연(Zn)>구리(Cu)>니켈(Ni) 순이었다. 납(Pb)과 비소(As)는 평균값에 비하여 산포가 크게 나타났으며, 심토이기 때문에 두 원소는 지하수에도 영향을 미칠 것으로 예상된다.

<표 4>는 토양 이용 현황에 따른 기술 통계량 및 정규성 검정 결과를 나타낸다. 산림 토양의 경우 납(Pb)과 아연(Zn)의 평균값이 다른 원소들에 비해 매우 크게 나타났다. 반면에 논 토양과 밭 토양은 아연(Zn)의 평균값이 제일 크게 나타났고, 그 외 니켈(Ni)과 납(Pb)의 평균값이 크게 나타났다.

<표 3> 이표본 순위합 검정

변수	토양	표본수	Wilcoxon	Z	p-값
pH	표토 심토	483 139	47406.00	2.1999	0.0278
As	표토 심토	483 139	43075.00	-0.1207	0.9039
Cd	표토 심토	483 139	46258.50	1.5852	0.1129
Cu	표토 심토	483 139	46420.50	1.6720	0.0950
Ni	표토 심토	483 139	47924.00	2.4773	0.0132
Pb	표토 심토	483 139	47121.50	2.0475	0.0406
Zn	표토 심토	483 139	46162.00	1.5335	0.1251
Hg	표토 심토	483 139	44158.50	1.4082	0.1591
Cr^{6+}	표토 심토	483 139	44295.50	1.5393	0.1237
CN^-	표토 심토	483 139	44299.00	2.7444	0.0061

<표 4> 토양 이용 현황에 따른 중금속에 대한 기술통계량 및 정규성 검정

변수	이용현황	단위	표본수	평균	표준편차	변동계수(CV)	최소값	최대값	S-W 검정
pH	산림	-	196	5.7620	0.5663	9.8285	4.2100	7.7800	0.0001
	논		103	6.2311	0.6615	10.6169	4.5000	8.0700	0.9236
	밭		323	5.8862	0.4784	8.1266	4.2100	7.3700	0.0001
As	산림	mg/kg	196	63.0711	364.1088	577.2992	0	4510.7700	0.0001
	논		103	1.6406	4.2518	259.1616	0	33.4950	0.0001
	밭		323	0.5773	2.9249	506.6274	0	46.2940	0.0001
Cd	산림	mg/kg	196	1.8189	7.0329	386.6506	0.0340	74.0370	0.0001
	논		103	0.4112	0.4137	100.5936	0.0250	2.0480	0.0001
	밭		323	0.4769	0.9821	205.9394	0.0430	8.3860	0.0001
Cu	산림	mg/kg	196	12.9802	33.2067	255.8270	0.4260	230.9800	0.0001
	논		103	7.8890	6.9152	87.6553	0.2410	53.9110	0.0001
	밭		323	9.1519	8.2829	90.5053	1.2160	77.4930	0.0001
Ni	산림	mg/kg	196	24.4518	11.9470	48.8594	5.1800	70.9000	0.0001
	논		103	21.0900	8.2771	39.2465	1.7100	47.6900	0.0916
	밭		323	20.0005	10.2703	51.3501	2.2100	107.2200	0.0001
Pb	산림	mg/kg	196	203.3810	1081.4700	531.7450	1.5400	9531.9800	0.0001
	논		103	15.3535	40.5446	264.0738	1.7000	363.2900	0.0001
	밭		323	19.9021	67.5348	339.3354	1.7700	1067.3600	0.0001
Zn	산림	mg/kg	196	297.0675	749.8152	252.4057	47.4300	5782.4900	0.0001
	논		103	150.4378	65.3361	43.4306	60.1300	402.0000	0.0001
	밭		323	152.8617	196.0190	128.2330	33.9300	1889.8200	0.0001
Hg	산림	mg/kg	196	0.0054	0.0211	388.6962	0	0.1100	0.0001
	논		103	0	0	-	0	0	-
	밭		323	0.0025	0.0186	734.3637	0	0.2600	0.0001
Cr^{6+}	산림	mg/kg	196	0.0033	0.0171	523.0592	0	0.1600	0.0001
	논		103	0	0	-	0	0	-
	밭		323	0.0033	0.0174	531.7616	0	0.1700	0.0001
CN^-	산림	mg/kg	196	0.0032	0.0169	534.9523	0	0.1200	0.0001
	논		103	0	0	-	0	0	-
	밭		323	0.0003	0.0050	1797.2200	0	0.0900	0.0001

이는 아연(Zn)이 논 및 밭 토양에 광범위하게 포함되어 있고, 농경 지역에서 경작된 농작물이 아연(Zn)에 잠재적으로 노출될 위험이 있음을 나타낸다. 또한 산림 토양의 표토와 심토는 주로 납(Pb)과 아연(Zn)에 의해 오염되어 있음을 알 수 있다.

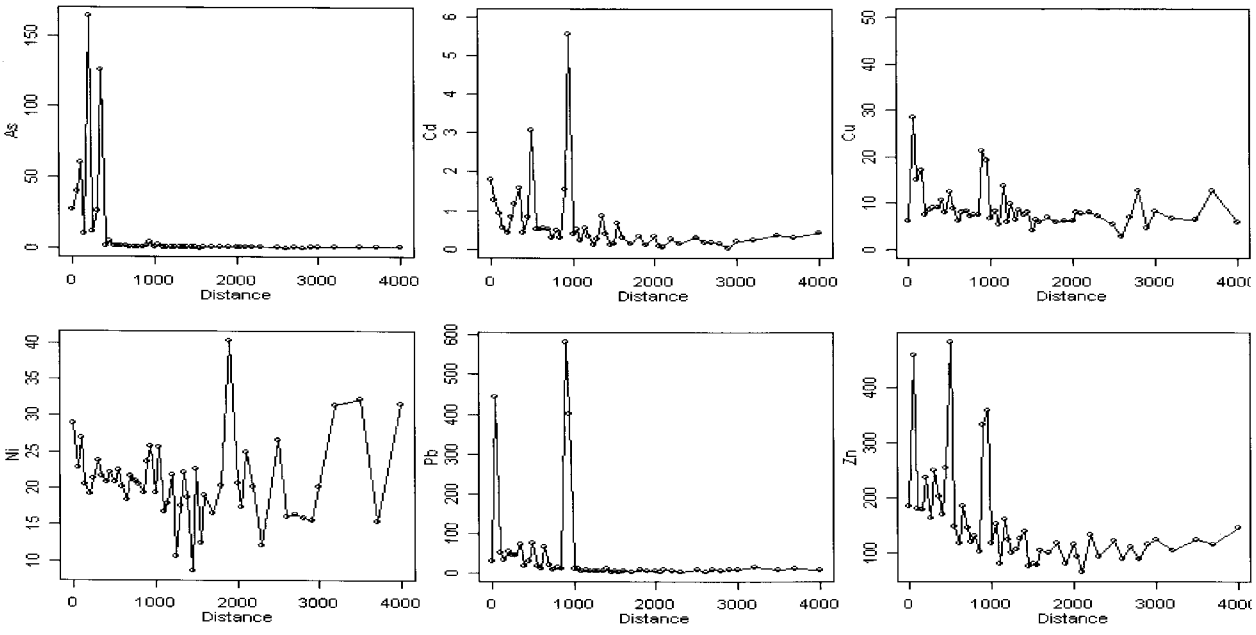
<표 5>는 토지이용 현황에 따라 중금속 오염 농도를 원소별로 Kruskal-Wallis 검정한 결과를 나타낸다.

중금속 원소들 중 크롬(Cr6+)을 제외한 나머지 중금속 원소들의 오염 농도의 모평균간에는 유의수준 5% 하에서 차이가 있는 것으로 나타났다. 특히 납(Pb)의 경우 산림토양이 논과 밭 토양에 비해 약 10배 이상 더 많이 오염되었다고 할 수 있다.

변동계수를 이용하여 토지 이용 현황에 따른 중금속 원소들의 상대적 변동을 측정하였다. 산림 토양은 비소(As), 납(Pb) 순으로 변동계수가 높게 나타났으며, 토양 깊이에 따른 분석과는 달리 구리(Cu), 니켈(Ni)을 제외한 모든 원소에서 변동계수가 높게 나타났다. 크롬(Cr6+), 카드뮴(Cd), 수은(Hg), 구리(Cu)와 니켈(Ni)은 평균값에 비해 변동계수가 상당히 높게 나타났으며, 검출정도를 감안할 때 카드뮴(Cd)과 구리(Cu)의 분포가 평균값을 중심으로 넓게 산포되어 있다는 것을 알 수 있다. 논 토양은 모든 원소에서 평균값에 비해 변동계수가 높게 나타났으며, 비소(As), 납(Pb), 카드뮴(Cd) 순으로 변동계수가 높게 나타났다. 밭 토양은 수은(Hg), 크롬(Cr6+), 비소(As)의 순으로 변동계수가 높게 나타났다.

<표 5> Kruskal-Wallis 검정

변수	이용현황	표본수	χ^2	자유도	p-값
pH	산림 논 밭	196 103 323	49.4093	2	0.0001
As	산림 논 밭	196 103 323	8.2144	2	0.0165
Cd	산림 논 밭	196 103 323	12.3653	2	0.0021
Cu	산림 논 밭	196 103 323	63.4593	2	0.0001
Ni	산림 논 밭	196 103 323	23.0926	2	0.0001
Pb	산림 논 밭	196 103 323	23.3789	2	0.0001
Zn	산림 논 밭	196 103 323	15.9623	2	0.0003
Hg	산림 논 밭	196 103 323	13.7821	2	0.0010
Cr^{6+}	산림 논 밭	196 103 323	5.3801	2	0.0679
CN^-	산림 논 밭	196 103 323	11.8190	2	0.0027



<그림 2> 이격거리에 따른 중금속 오염 농도 변이

토양 이용 현황에 따른 분석결과 산림, 논, 밭 토양에서 전체적으로 중금속의 오염범위가 넓게 퍼져있음을 알 수 있다.

토양의 깊이와 농작물의 종류에 따라 중금속의 농축은 차이가 날 수 있지만, FAO/ WHO에서 제시한[2] 중금속의 1일 잠정 섭취 허용량의 범위를 초과할 개연성이 있기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다.

<그림 2>은 휴·폐광산으로부터 이격거리에 따른 중금속 오염농도의 변이를 나타낸 결과이다. 비소(As)는 500m 이내에서 대부분 검출되었고, 카드뮴(Cd)은 1,000m 이내에서 대부분 검출되었다. 납(Pb)과 Zn(아연)도 광산으로부터 1,000m 이내에서 많은 양이 검출되었으며, 특히 아연(Zn)은 광산으로부터 4,000m 떨어진 곳에서도 100ppm 이상이 검출되는 것을 알 수 있다. 이처럼 오염도가 높은 납(Pb), 아연(Zn), 비소(As)가 광산에서 1,000m이상 떨어진 곳에서도 검출되었다는 것은 휴·폐광산에 의한 위해성이 확대되어진다는 것을 의미하며, 단순하게 이격거리가 멀어질수록 중금속의 오염수준이 낮아지지 않음을 알 수 있다.

3.2 중금속의 토양오염 자료에 대한 상관분석

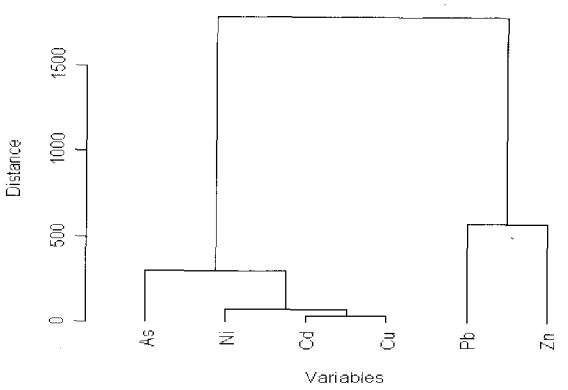
충청남도 휴·폐광산 주변 토양에 존재하는 중금속 원소들 사이의 상호 관련성을 조사하기 위하여 상관분석을 수행하였다. <표 6>은 토양 오염에 영향을 주는 중금속 원소들의 상관 행렬을 나타낸다. 상관행렬에서 '*' 표시는 5% 유의수준에서 유의한 상관관계를 나타내고, '**' 표시는 1% 유의수준에서 유의한 상관관계를 나타낸다.

<표 6>의 표본 상관계수는 Zn-Cd(0.786), Zn-Cu (0.558), Cu-Cd (0.517), Pb-Cu (0.510), Pb-Cd (0.494), Zn-Pb (0.443) 순으로 양의 상관관계를 나타냈다. 아연(Zn)은 카드뮴(Cd), 구리(Cu)와 납(Pb)은 구리(Cu), 카드뮴(Cd)과 구리(Cu)는 아연(Zn), 납(Pb)과 높은 양의 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 납(Pb), 아연(Zn), 카드뮴(Cd) 등은 서로 상관관계가 있으며, 이 중금속 원소들은 동시에 검출될 가능성이 높다고 할 수 있다. 한편 pH는 다른 원소에 비해 카드뮴(Cd) 및 아연(Zn)과 양의 상관관계를 나타내어 두 원소의 거동이 비슷함을 알 수 있다. 본 연구지역에서 pH를 포함한 토양의 중금속 성상 및 함량에 영향을 미치는 요인들을 심도 있게 연구할 필요가 있다.

3.3 중금속의 토양오염 자료에 대한 군집분석

군집분석은 어떤 개체나 대상들을 밀접한 상사성 또는 거리에 의하여 유사한 특징을 지닌 개체들을 몇 개의 군집으로 집단화하고 형성된 군집의 특성을 파악하여 군집들 사이의 관계를 분석하는 다변량 기법이다.

본 연구에서는 충청남도 휴·폐광산에 존재하는 중금속 원소(또는 광산)들에 대한 유사성 또는 거리에 의하여 군집분석을 수행하였다. 군집분석 방법은 계보적 군집방법, 연결방법은 Ward의 방법[9]을 사용하였으며 비상사성인 거리의 측도로는 유클리드 거리를 사용하였다.



<그림 3> 중금속 원소들에 대하여 Ward의 방법으로 수행된 나무구조그림

<표 6> 토양 오염에 영향을 주는 중금속 원소들의 상관 행렬

	pH	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Cr^{6+}
pH	1.000								
As	0.089*	1.000							
Cd	0.247**	0.099*	1.000						
Cu	0.199**	0.034	0.517**	1.000					
Ni	0.094*	0.092*	0.315**	0.285**	1.000				
Pb	0.102*	0.057	0.494**	0.510**	0.337**	1.000			
Zn	0.268**	0.023	0.786**	0.558**	0.330**	0.443**	1.000		
Hg	0.129**	0.182**	0.078	0.096*	0.134**	0.076	0.196**	1.000	
Cr^{6+}	0.034	0.035	0.033	0.292**	-0.016	0.081*	0.120**	0.044	1.000

<그림 3>는 중금속 원소별로 분석된 결과를 나무구조그림(Dendrogram)으로 도식화한 것이다. 본 연구에서는 As-(Ni-Cd-Cu) 등의 군집 1, Pb- Zn의 군집 2로 명확하게 나누었다. 첫 번째 군집의 카드뮴(Cd)과 구리(Cu)는 연관성이 상당히 있으며, 이는 상관분석의 결과와도 일치한다. 두 번째 군집에 속하는 납(Pb)과 아연(Zn)은 오염 농도가 높고, 서로 상관관계가 유의하다.

4. 결 론

본 연구는 충청남도 지역 14개 휴·폐광산의 토양 오염을 정밀 조사한 데이터를 이용하여 통계분석을 실시하였다. 표층 및 심층에 따른 중금속 오염정도, 토양의 이용현황에 따른 중금속 오염정도 및 광산으로부터의 이격거리에 따른 중금속 오염 변이에 대한 특성을 조사하였다.

토양 깊이에 따른 통계 분석에서는 표층과 심층 모두에서 납(Pb)과 아연(Zn)이 다른 원소들에 비해 오염도의 평균값이 상대적으로 높았으며, 변동계수 값은 표층에서 비소(As)와 납(Pb) 순으로 높았고, 심층에서 납(Pb)과 비소(As) 순으로 높았다.

토양 이용 현황에 따른 분석에서는 산림 토양에서 납(Pb)과 아연(Zn)이 다른 원소들에 비하여 오염도가 높았으며, 논 토양과 밭 토양에서는 납(Pb)이 높았다.

변동계수 값은 산림 토양에서 비소(As), 논 토양에서는 비소(As)와 납(Pb), 밭 토양에서는 크롬(Cr6+)이 높았다. 토양 깊이와 토양 이용 현황과는 상관없이 납(Pb)과 아연(Zn)의 평균 오염농도가 높았으며, 오염 범위도 광범위하게 분포하고 있음을 알 수 있다.

휴·폐광산에서부터 이격거리에 따른 중금속 오염 농도 변이의 결과를 보면, 1,000m 이내에서 비소(As), 카드뮴(Cd), 납(Pb)과 아연(Zn)이 많이 검출되었고, 특히 아연(Zn)은 4,000m 떨어진 곳에서도 검출되었다. 따라서 이에 대한 관리와 처리가 시행되어야 한다.

중금속 인자들의 상관성을 조사하기 위하여 상관분석 결과 Zn-Cd가 가장 큰 양의 상관관계를 나타냈다. 군집분석 결과, 중금속 원소들은 2개의 군집을 형성하였다.

충남지역 휴·폐금속광산의 중금속 위해성을 통계적 기법을 이용하여 평가한 결과, 중금속 오염지역에 대해 보다 장기적이고 적극적인 복원방안의 수립이 요구된다. 복원대책은 객토 등 소극적인 처리보다 토양세척, 고형화/안정화, 광미의 재활용 등의 보다 체계적이고 기술집약적인 종합 방안을 수립해야 한다.

5. 참 고 문 헌

[1] 문범수, "식품위생학", 신명출판사, (1998).

[2] 신익종, 고광용, 이규승, "휴,폐광산 인근 농경지 토양의 중금속 이온과 작물체와의 상관 관계", 창립 20주년 심포지엄, 한국환경농학회, (2001) : 122-123.

[3] 전관수, 이철희, 원양수, 정진옥, 박병삼, 신덕구, "폐광산 주변 토양 및 하천의 중금속 함량", 한국환경과학회지, 8-2(1999) : 197-204.

[4] 환경부, "폐금속광산 토양오염실태일제조사(충남권역)", (2005).

[5] Hudson Edwards, K.A., Macklin, M.G., Jamieson, H.E., Brewer, P.A., Coulthard, J.J., Howard, A.J., and Turmer, J.N., "The impact of failings dam spills and clean up operations on sediment and water quality in river systems, Applied Geochem., Vol. 28-2(2003) : 221-239.

[6] Johnson, R.A. and Wichern D. W., "Applied Multivariate Analysis", 5th ed.(2002), Prentice -Hall.

[7] Palo, Alto, "Chemical fractionation of trace metals in contaminated soils", J. Environ. Qual. Vol. 26(1984) : 259-264.

[8] Tahri, M, Benyaich, F., Bounakhla, M, Bilal, E., Gruffat, J.J., Moutte, J. and Garcia, D., "Multivariate analysis of heavy metal contents in soils, sediments and water in the region of meknes(central Morocco)", Environmental Monitoring and Assessment, 102(2005) : 405-417.

[9] Ward, Jr., J.H., "Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function", Journal of the American Statistical Association, 58(1963) : 236-244.

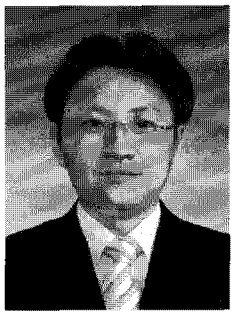
저 자 소 개

도 현 승

청주대학교에서 학사, Univ. of Minnesota의 Civil Eng. Dept.에서 MS와 Ph.D.를 취득하였고, 현재는 청주대학교 토목환경공학과 교수로 재직 중이다.

주소: 충북 청주시 상당구 내덕2동 청주대학교 이공대학 토목환경공학과

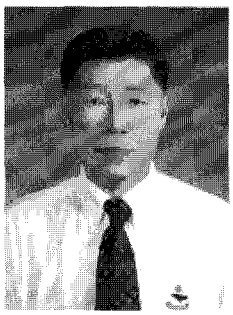
김 성 덕



중앙대학교 토목공학과에서 학사, 석사, 박사학위를 취득하였고, 한국해양연구원 연구원 및 중앙대학교 대학원 및 학부의 시간강사를 거쳐 현재는 청주대학교 토목환경공학과 전임강사로 재직 중이다. 관심분야로는 하천, 해안 건설 분야의 수리학적 모델링 및 안전성 검토 등이다.

주소: 충청북도 청주시 상당구 내덕동 청주대학교 이공대학 토목환경공학과

이 승 주



청주대학교에서 학사 학위를 취득하였고, 동국대학교 통계학과에서 석사, 박사학위를 취득하였으며, 관심분야는 베이지안 통계학, 데이터마이닝 등이며 현재는 청주대학교 바이오정보통계학과 교수로 재직 중이다.

주소: 충북 청주시 상당구 내덕동 36 청주대학교 이공대학 바이오정보통계학과