

Priority Assessment for Remediation of Heavy Metals Closed/Abandoned Mine Areas Using Pollution Indexes

Hee Joung Kim^{1*} · Jae-E. Yang² · Byung-Kil Park³,
Sung-Ho Kong³ · Jai -Young Lee⁴ and Sang Ho Jun¹

¹ Department of Environmental Science, Kangwon National University

² Division of Environmental & Biological Engineering, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

³ Department of Chemical Engineering, Hanyang University

⁴ Department of Environmental Eng., University of Seoul

Abstract

Several metalliferous and coal mines, including Seojin and Okdong located at the Kangwon province, were abandoned or closed since 1989 due to the mining industry promotion policy and thus disposed an enormous amount of mining wastes without a proper treatment facilities, resulting in water and soil pollution in the downstream areas. However, no quantitative assessment was made on soil and water pollution by the transport of mining wastes such as acid mine drainage, mine tailing, and rocky waste. In this research, total and fractional concentrations of heavy metals in mining wastes were analyzed and accordingly the degree of water and soil pollutions in the stream area were quantitatively assessed employing the several pollution indices.

Concentrations of Ni, Cd, and Pb in soils near the abandoned coal mine areas were 1,246.0, 25.0 and 1,093.0 mg/kg, respectively, and these concentrations were higher than those in soils near the closed metalliferous mine areas. Also Cu concentrations in soils near the tailing dams were about 1967 mg/kg, which is considered as very polluted level.

Results demonstrated that soil at the abandoned mine areas were highly contaminated by AMD, tailing, and effluents of the mining wastes. Therefore, a prompt countermeasure on the mining waste treatment and remediation of the contaminated water and soil should be made to the abandoned or closed metalliferous and coal mines located at the abandoned mine area.

1. 서론

국내의 경우는 1995년 토양환경오염방지법이 제정되기 전에는 휴·폐광산 주변의 오염 조사 조차 거의 이루어지지 않은채 대부분의 휴·폐광산이 그대로 방치되어 왔다. 또한 이루어진 조사들도 대부분 광산 주변 하천 수질에 제한되는 등 오염정도를 파악하는 초기 단계에 지나지 않았다. 다만 최근에 오염된 토양 및 산성광산배수에 대한 선진국들의 처리 기술이 소개되면서 이에 대한 연구들이 진행중이거나 단편적으로 현장에 일부 적용되고 있는데, 이 또한 효과적인 복원 기술이 미비하여 단순 복토에 의존하거나 극히 일부 광산지역을 대상으로 환경처리 시설을 설치하는데 머무르고 있다. 따라서 이러한 유독성 오염물질의 발생에서 처리에 이르는 전 과정을 효과적으로

운영·관리하는 기술이 요구되고 있다.

농경지 토양 및 하천 퇴적토 내에 존재하는 중금속들은 분해가 거의 일어나지 않아 자연적으로 정화가 어려울 뿐만 아니라 독성이 강하여 생물체에 과다한 축적을 가져와 심각한 장애를 일으킬 수 있다. 토양이 비취발성이며 생물학적으로 난분해성인 중금속들로 오염되어 있는 경우, 이들을 제거하는데 적합한 정화기술로서 현장에서 널리 쓰이는 방법은 오염토양 굴착/매립법, 고형화 방법, 전기 영동법, 객토 복토법, 식물 경작법, 토양 세척법 등이 있다[9, 18].

따라서 본 연구에서는 휴·폐광산 지역인 동명, 세우, 서진, 거도, 구광재댐, 신광재댐, 옥동탄광의 하천수와 갭내수, 주변 하상 퇴적물, 토양을 대상으로 오염 정도를 객관적으로 평가할 수 있는 평가 방법 제시와 또한 이들 지역 복원을 위해 폐 석회를 이용한 고형화/안정법을 실험실에서 적용하여 복원 가능성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

연구지역의 토양 시료는 수계를 따라 계획한 횡단시료채취선에서 오거를 이용하여 0~10cm 깊이의 토양을 채취하였다. 채취한 시료의 대표성을 유지하기 위하여 각각의 시료는 지역의 특성에 따라 1~2m 간격의 격자모양으로 9개의 부시료를 선택하여 하나의 혼합시료를 만들었다. Table 1.과 Fig. 2.은 채취 시료명과 채취 지점 등을 나타낸 것이다.

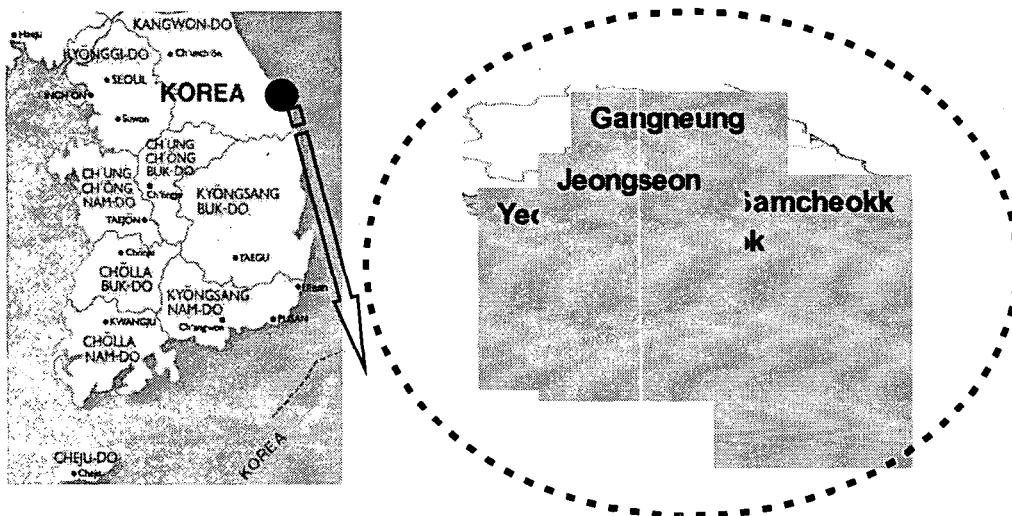


Fig. 1. A map showing the location of study area

2.1. 토양의 시료 처리 및 분석

각각의 채취 지점에서 채취한 토양 시료를 각각 폴리에틸렌제 vat 위에 균일한 두께로 하여 통풍이 잘 되는 곳에서 음건 시켰다. 음건 시킨 시료는 나무망치로 분쇄하여 2mm 표준체(8 mesh)를 통과시킨 후 다시 63 μ m인 비금속 채(nylon bolting cloth sieve)로 체질한 후 각각의 시료를 균등량 취하여 사분법에 의해 균일하게 혼합하여 분석용 시료로 사용하였다.

2.2 분석 방법

토양 분석은 토양오염공정시험법[16]에 준하는 방법을 사용하였고, 토양오염공정시험법에 그 기준이 없는 경우에는 농촌진흥청 토양 화학 분석법과 외국의 분석 사례를 따랐다. Table 1은 분석 항목별 사용 기기와 제조 회사를 나타낸 것이다.

① 중금속(Cd, Cu, Pb, Zn) 분석

전 처리한 시료 용액을 ICP(Perkin Elmer XL3100)로 측정하였다.

② 입도분석

입도분석은 체 분석(sieving)과 침강 분석(pipette method)을 병행하여 실시하였다. 64 μ m 이상의 입경을 갖는 입자는 체 분석을 하고 64 μ m 이하의 입경을 갖는 입자는 침강 분석을 실시하였다. 토양의 토성(Texture)은 미국 농무부 법에 따라 분류하였고, 입도 분석은 Shepard, 평균 입도(mean)는 Folk와 Ward의 분류 방법을 따랐다.

③ 유기물 함량

시료를 110 $^{\circ}$ C에서 건조시킨 후 2mm sieve를 통과한 시료 0.5g을 취하여 550 $^{\circ}$ C에서 2시간 가열한 후 가열하기 전과의 무게차를 유기물 함량으로 하였다

④ pH 및 양이온치환용량(Cation Exchange Capacity : CEC)

시료 5g에 증류수 25ml를 가해 1:5의 비율로 하여 pH와 전기전도도를 측정하였다. pH는 Orion pH meter를 사용하였다.

양이온치환용량은 시료 5g을 Column에 충전시킨 후 1M NaOAc(pH 7.0) 용액으로 통과시켜 토양을 Na⁺로 포화시킨 후 과잉의 Na⁺를 80% ethanol로 세척한 후 다시 NH₄OAc(pH 7.0)로 Na⁺를 치환 침출시켜 침출된 Na⁺를 원자흡광분광분석기(AAS)로 Na⁺를 측정하였다.

⑤ 중금속의 존재형태

중금속의 존재형태는 Tessier 등[68]의 방법에 따라 Adsorbed form, Carbonate form, Reducible form, Organic form, Residual form을 분석하였고 이들의 합을 총량으로 하였다. Fig. 2는 중금속 존재형태에 대한 흐름도를 요약하여 보여주고 있다.

Adsorbed form은 미립자 표면에 흡착된 중금속으로 중금속이 점토 등의 표면에 전기적으로 흡착된 것으로 그 결합력이 약하여 입자의 교란이나 pH 변화에 의해 쉽게 탈착, 이동될 수 있는 부분이다. Carbonate form은 탄산염의 형태로 존재하는 중금속으로 수층에서 pH가 낮아지면 쉽게 용출되는 부분이다. Reducible form은 금속 산화물과 공침된 중금속으로 점토 표면에 철이나 망간 산화물과 공침되어 있는 부분으로 혐기성 상태로 될 때 용출이 일어날 가능성이 크다. Organic form은 유기물에 흡착된 중금속 또는 유기물 분해에 의해 유화물로 존재하는 중금속으로 호기성 상태에서 유기물의 분해시 용출이 일어날 가능성이 크다. Residual form은 광물의 결정 구조속에 존재하는 중금속으로 자연적 환경에서는 그 용출이 되지 않으나 풍화 및 분해(Decomposition)등에 의해서 용출될 가능성이 있다. 중금속 농도 측정은 ICP(Perkin Elmer XL 3100)을 이용하였으며 측정 원소는 Cu, Pb, Zn, Ni, Cd 등 이었다.

⑥ 시료 분석에 대한 분석 보장 및 관리 방법(QA/QC)

본 시험에서는 QA/QC를 위해 5% 이상의 시료에 대해 Duplicate Analysis와 Spike Recovery, Blank Test, STD Recovery Test를 통해 정확도와 정밀도를 검증하였다. 분석을 위한 전처리는 토양오염공정시험법에 준하는 방법으로 하였으며 모든 시료에 대한 분석 정도 관리(A analytical Quality Control)는 미국 EPA에서 제시한 수준으로 실시하였다.

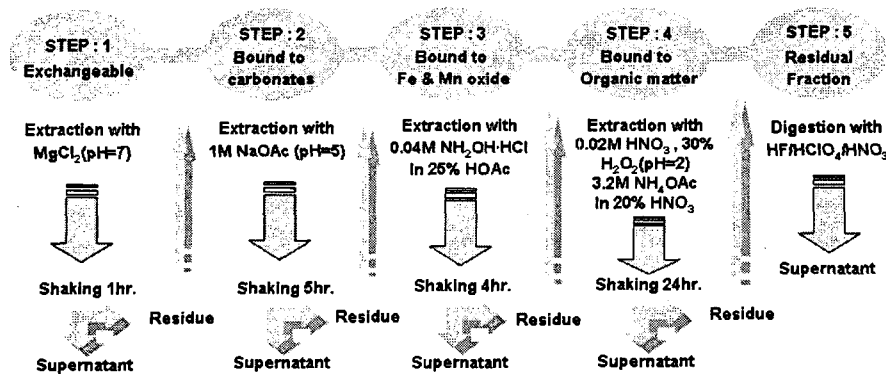


Fig. 2. Fractionation scheme of sequential extraction sediment and soil samples.

2.3 광산활동에 의한 오염도 평가

토양 중금속 연속 추출법을 사용하여 토양 내 존재하는 중금속의 화학종에 대한 자료를 적용 토양 상태에 관한 객관성을 높이고 토양오염관리에 대한 정책결정을 종합적으로 판단할 수 있는 단계적 오염도평가(Sequential Extraction Dangerous Index : S.E.D.I.)를 제시하였다.

단계적 오염도 평가는 중금속의 존재형태별 분석된 자료를 각 Step마다의 분석치를 오염지수 계산에 도입한 기준 값인 Kloke[50]가 계산을 통하여 FAO/WHO에서 지정하는 음식물중의 중금속의 허용 한계치를 넘지 않은 토양의 인접값과 토양내의 중금속의 함량을 분석하고자 하는 중금속의 자연 배경 값을 이용하여 단계별 오염수치를 합하여 원소의 값을 구한 후 다시 분석된 원소인 Cd, Cu, Pb, Ni, Zn의 합을 원소수로 나눈 값으로 오염지수를 결정하였다.

오염도지수 평가 산정 계산은 식 (1)과 같다.

$$S.E.D.I. = \frac{\sum \frac{\text{Heavy metal fraction concentration in soil}}{\text{Tolerable level}}}{\text{Number heavy metal}} \quad (1)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 이화학적 특성

양이온치환용량은 작물의 생육에 필요한 유효 영양성분의 보유량을 평가할 수 있으며 양이온치환용량이 크면 비옥한 토양임을 알 수 있다.

우리나라 토양의 양이온치환용량은 토양통에 따라 다르지만 약 3.4~20.1 me/100mg을 나타낸다.

Table 2는 연구 지역 토양의 이화학적 특성을 나타내고 있다.

토양의 pH는 폐탄광의 폐석이 산재해 있는 정점 SJ(서진탄광)에서 3.6으로 강산성을 나타내고 있어 주변에 식물이 거의 자라지 않고 있었으며 토양 복원을 위한 나무 식재도 효과를 나타내지 못하고 고사한 상태를 보여주고 있다.

금, 은 광산에서 발생된 광미와 폐재의 토양 pH 3.8~6.7로 산성을 나타냈으며 그 외의 광미와 폐재에서는 약 알칼리성에 해당되는 값을 나타냈다. 그 밖의 토양에서는 3.6~8.0으로 대부분의 토양에서 약 산성에 비슷한 값을 나타냈으나 폐석회를 도포한 구광재댐의 표토에서 8.0으로 약 알칼리성으로 나타냈으며, 양이온치환용량은 1.3~16.4 cmol(+)/kg으로서 우리나라 일반 농경지 토양 평균 9.2cmol(+)/kg[58]보다 대부분의 산토양이 광미나 탄광 폐석, 광재보다 높게 나타났다.

토양 내 총 질소의 함량은 0.2~2.4%로 서진 폐탄광, 옥동광산 폐재에서 2.4%로 가장 높은

값을 나타냈으며 신광재댐의 1차 포집조 토양과 동명광산(D-3)에서 0.2%로 가장 낮은 값을 나타냈다. 이러한 총 질소의 함량은 1993년 환경부(0.08%)와 서울특별시(0.2%)에서 제안한 퇴적물 준설기준과 비교하면 전 지역에서 기준을 초과하는 값으로 나타났다. 또한 1973년 Federal Water Quality Administration(0.2%)에서 퇴적물 규제치와 비교해 볼 때 전 지역에서 오염된 퇴적물보다도 높게 나타났다.

강열감량의 함량은 1.3~15.5%로 폐탄광이 밀집해 있는 정점 SJ-1에서 가장 높은 값을 나타냈으며, 구광재댐의 소류지인 정점 OT-2에서 가장 낮은 값을 나타냈다. 강열감량 함량은 1993년 환경부(7.0%)와 서울특별시(10.0%)에서 제안한 퇴적물 준설기준과 비교해 보면 대부분 지역에서 이러한 기준을 초과하는 것으로 나타났다.

토양의 입도 분석은 체분석(sieving)과 침강분석(pipette method)을 병행하여 실시하였다. 64 μ m 이상의 입경을 갖는 입자는 체분석을 하고 64 μ m 이하의 입경을 갖는 입자는 침강분석을 실시하였다. 퇴적물의 조직분류는 Shepard[65]의 분류 방법에 의하였으며 그 결과는 Table 2에 나타났다.

Table 2. Chemical characteristic of soil in study areas.

Site	pH (1:5)	CEC cmol(+)/kg	TKN (%)	Loss on Ignition(%)	Soil Texture
D-1	5.3	1.3	1.2	5.9	sandy loam
D-2	6.3	2.9	2.3	8.7	silty loam
D-3	4.3	2.3	0.2	15.3	silty loam
D-4	5.9	2.9	1.4	13.2	silty loam
S-1	5.4	10.5	1.5	13.5	clay loam
S-2	6.7	2.1	1.4	6.8	silty loam
S-3	3.8	13.5	1.6	8.3	clay loam
S-4	4.8	11.2	1.3	7.2	silty loam
SJ-1	3.6	8.2	0.3	15.5	silty clay
SJ-2	6.8	5.3	1.2	10.7	sandy loam
SJ-3	6.7	2.5	2.4	8.4	sandy silt
SJ-4	7.6	5.7	1	4.5	sandy silt
KD-1	8	6.4	0.5	8.1	sandy silt
KD-2	3.9	8.1	1.1	10.2	clay loam
KD-3	7.1	6.3	1.5	8.2	silty clay loam
KD-4	7.1	6.1	1.4	7.8	silty clay
NT-1	8	6.7	0.3	7.2	silty clay loam
NT-2	5.6	16.4	2.1	7.5	silty clay
NT-3	5.8	6.3	0.2	7.7	sandy clay loam
NT-4	7.2	3.2	0.3	7.6	loam
OT-1	5.8	5.9	1.6	14	sandy silt
OT-2	8	6.9	0.2	1.3	sandy silt
OT-3	7.4	8.7	2.4	6	silty loam
OT-4	7.7	3.2	2.2	5.3	sandy loam
OK-1	7	8.4	2	5.7	loam
OK-2	5.1	7.6	2.4	5.9	loam
OK-3	7.4	3.4	2.1	5.2	sand
OK-4	7.7	8.6	2.1	6.2	sandy silt

동명광산과 세우광산 지역의 입도는 대부분이 Sand와 clay의 함량이 높은 sandy loam과 clay loam으로 나타났으며, 신광재댐, 구광재댐 지역 및 거도광산 지역의 정점 토양들은 대부분이 sandy silt 및 loam, silty loam으로 나타났다.

이러한 결과는 상류지역의 입자 크기 대부분이 silt와 clay로 종류보다 미세한 입자구조를 가지고 있어 오염물질의 농도와 64 μ m이하 입자사이에 밀접한 상관관계를 가지고 있는 것으로 미루어 입자 크기에 의한 상류지역의 토양에서 오염물질 농도가 높을 것으로 사료되며, 또한 재부유 가능성이 큰 크기로 구성되어 있어 유속에 의해 오염물질이 하류로 이동할 가능성이 클

것으로 사료된다.

토양에 함유된 오염물질의 농도는 토양 오염 현상 외에도 입도나 유기물 함량에 의해 결정되는 경우가 많은 것으로 알려져 있어, 조사 지역의 오염물질 중 중금속 농도와 존재형태의 중요한 인자로 적용될 것으로 사료된다.

3.2 중금속의 존재형태

우리나라의 현행 토양오염공정시험방법은 0.1M HCl 용액으로 추출하여 분석하기 때문에 추출된 중금속의 총 함량만을 측정하게 된다. 이러한 분석 방법은 토양이나 폐기물중에 함유된 중금속의 어떤 형태가 용출지를 알 수 없는 실정이며 중금속의 존재형태를 분석하는 것이 더욱 유용한 토양오염 정보를 얻을 수 있다고 보고하고 있다.

토양 내의 중금속의 존재형태를 분석한 결과는 다음과 같다.

연구 지역인 토양에 함유되어 있는 카드미움 총량은 구 광재담의 표층 토양에서 28.6 mg/kg으로 가장 높은 농도를 나타냈으며, 세우광산 상류지역인 정점 S-1에서 1.9 mg/kg으로 가장 낮은 값으로 나타났다.

오염되지 않은 비교 토양(Reference)은 8.0 mg/kg을 나타내어 세우광산 상류지역을 제외한 전 토양이 비교 토양 농도보다 높은 값을 나타냈다.

구리 총량은 53.0~2135.6 mg/kg으로 서진 탄광의 폐재가 산재해 있는 정점 SJ-3에서 가장 높은 농도를 나타냈으며, 동명광산 상류 정점 D-1에서 53.0 mg/kg으로 가장 낮은 값을 나타냈다.

오염되지 않은 비교 토양(Reference)은 215.8 mg/kg을 나타내어 동명광산 상류지역을 제외한 전 토양이 비교 토양 농도보다 높은 값을 나타냈다.

전 지역 토양에 함유된 납의 존재형태는 adsorbed fraction 0.4~85.6 mg/kg으로 다른 중금속과는 달리 폐탄광의 폐재가 산재해 있는 토양보다는 금은 광산의 폐재가 산재한 지역인 동명광산 토양에서 가장 높은 값을 나타냈으며, 구광재담 상류에 위치한 산 토양인 OT-1에서 가장 낮은 값을 나타냈다.

폐탄광 지역의 토양과 금, 은 광산지역인 동명 및 세우광산에서 폐재가 집중된 토양의 농도는 비교 토양의 농도인 0.7 mg/kg보다 대부분의 지역에서 높게 나타나 인위적 오염에 의해 토양오염이 발생한 것으로 사료된다.

토양에 함유된 아연의 존재형태는 adsorbed fraction 0.6~55.9 mg/kg, carbonate fraction은 0.5~1,524.3 mg/kg, reducible fraction은 3.8~2,475.3 mg/kg, organic fraction은 12.0~2,008.1 mg/kg, residual fraction은 114.1~3,114.1 mg/kg으로 나타났다(Fig. 3). 토양의 존재형태 특성상 residual fraction을 제외한 존재형태 중 organic fraction이 높은 농도를 나타내고 있으나 폐 탄광이 산재해 있는 서진 폐탄광 지역의 토양에서 철 산화물 및 망간 산화물과 결합한 형태를 나타내는 reducible fraction이 높은 비율을 차지하여 혐기적 상태에서 육상 및 수생 생태계로 이동이 있을 것으로 사료된다(Fig. 3).

자연환경 내에서 산출되는 아연은 2가의 양이온으로 이동성이 좋고 쉽게 용해되며, 토양의 아연은 토양의 수소이온의 농도가 감소할수록 점토 광물 및 유기물질에 강하게 흡착된다. 아연의 용해도 및 아연의 흡수 가능성은 Ca과 음의 상관관계에 있는 것으로 알려져 있는데, 칼슘이 농도가 높은 석회암지대의 경우 칼슘과 아연 비의 증가로 식물에 흡수되는 아연의 농도는 감소된다.

토양에 포함된 아연의 총 농도 중 이동성이 클 것으로 사료되는 adsorbed fraction과 carbonate fraction의 합인 labile한 부분은 0.2~17.9%로 서진 폐탄광의 폐재가 산재해 있는 토양인 SJ-4에서 이동성이 가장 높게 나타났으며, 동명광산과 세우광산 상류지역에서 이동성이 가장 낮은 결과를 보였다. 이동할 수 있는 총량으로 살펴보면 폐재가 포함된 서진 폐탄광 토양에서 1,580.2 mg/kg으로 가장 높은 이동량을 나타냈다(Fig. 3).

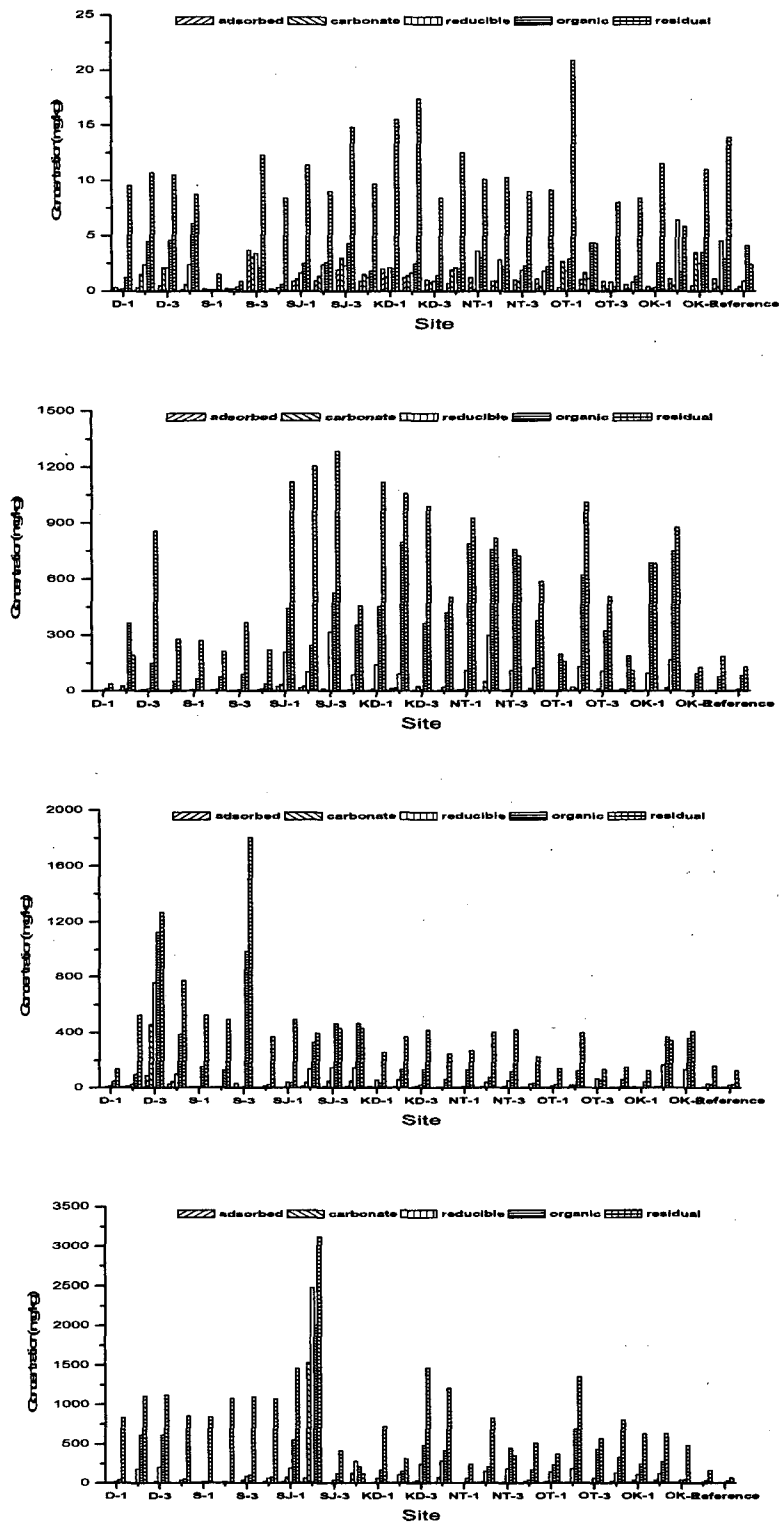


Fig. 3 Fractional composition of cadmium, copper, lead zinc in soil.

4. 중금속 오염도 평가

4. 1 토양 중 오염지수(Pollution Index)를 이용한 오염도 평가

조사 지역 토양의 Cd, Cu, Pb, Ni, Zn의 존재형태별 중금속 총농도를 허용한계 값으로 나누어

각 원소의 오염지수를 산출 각 원소의 오염지수를 합하여 평균값을 오염도로 산정하였다. 오염도 평가는 Kloke[50]가 산정한 허용한계 기준치(Tolerance levels in soil)를 이용하였으며, 토양에 포함된 중금속(Cd, Cu, Pb, Ni, Zn) 총 농도에 대한 오염평가 지수는 Fig. 4에 두었다.

각 중금속의 오염지수는 아연 0.7~30.6, 구리 0.5~21.4, 납 1.7~36.9, 니켈 3.0~9.7, 카드뮴 0.6~9.5을 나타냈다(Fig.). 총량에 대한 각 중금속의 오염지수는 Cu > Pb > Cd > Zn > Ni 순으로 나타났으며, 서진 폐탄광의 폐재가 산재해 있는 지역 토양인 SJ-2에서 가장 높은 값을 나타냈다(Fig. 4).

연구 결과 연구 지역의 토양오염은 구리에 의해 주변 지역의 하천 수계의 생태계 및 육상생태계에 가장 큰 영향을 받을 것으로 사료되며 분석한 중금속들의 존재형태에 따른 단계별 오염평가 지수도 비교 토양보다 높게 나타났다. 따라서 광산활동에 따라 발생된 폐기물에 의해 산업화된 주변 지역의 인위적 오염이 가중된 것으로 사료되며 지속적인 관리와 복원 작업이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

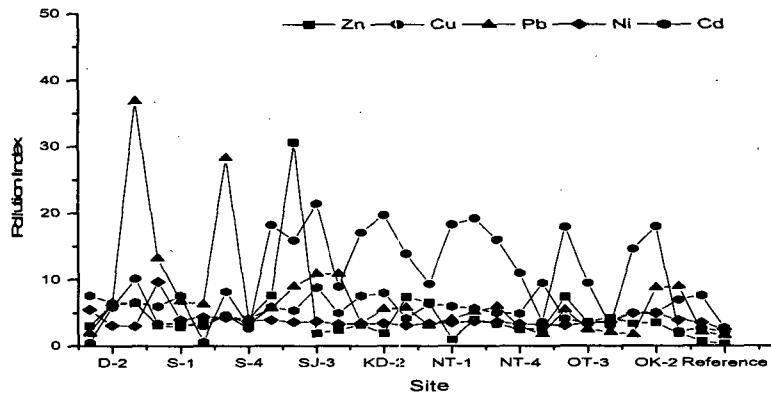


Fig. 4. Pollution index for soil quality evaluation in study area.

4. 2. 단계적 오염도평가(Sequential Extraction Dangerous Index : S.E.D.I.).

단계적 오염평가지수에서 제외된 부분은 reducible fraction으로 이 형태는 금속 산화물과 공침된 형태로 토양 환경이 혐기성 상태로 될 때 용출이 일어날 수 있는 가능성이 크나 연구지역이나 대부분의 토양환경에서는 혐기적 형태가 발생되기 어려울 것으로 사료되어 오염평가에는 제외시켰다.

organic fraction은 유기물이나 bacteria에 흡착된 부분 혹은 유기물 분해(부식질)에 의해 유화물로 존재하는 형태로 광물성분의 residual fraction과 같이 자연적인 환경에서는 거의 불용출성으로 사료되어 오염 평가 기준에서 제외시켰다.

이러한 현상에 의해 발생하는 오염정도 중 중금속에 대해 오염도를 평가하여 복원에 우선 처리 산정을 위해 존재형태의 단계적 오염도를 평가하였다.

토양에 포함된 중금속(Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) 존재형태별 농도에 의해 산정된 이동가능성이 있는 adsorbed fraction, carbonate fraction과 부분적으로 reducible fraction의 합한 농도에 대한 오염평가 지수는 Fig. 5에 두었다.

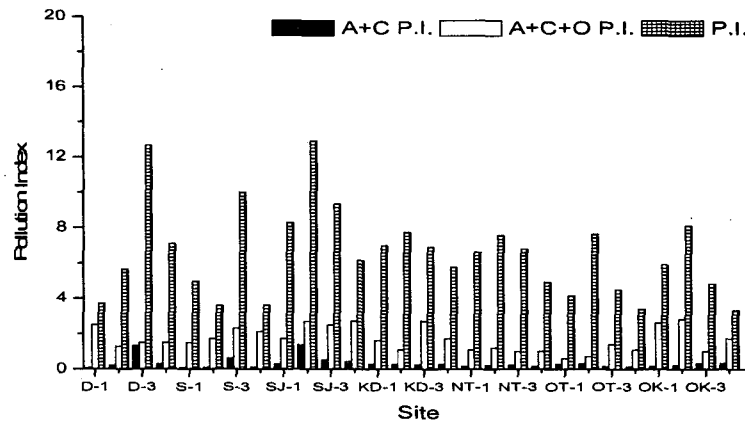


Fig. 5. Dangerous index for soil quality evaluation in study area.

4. 3. Labile(adsorbed + carbonate fraction)한 형태의 오염지수

연구 지역에서 발생하는 산성광산배수와 지하수 및 지역 특성상 환경적 영향을 제일 많이 받을 것으로 예측되는 adsorbed fraction과 carbonate fraction의 합인 labile한 상태의 존재형태별로 분석된 단계적 오염도 평가지수의 합은 카드미움이 가장 높은 오염지수를 나타냈다.

Labile한 상태의 존재형태별로 분석된 단계별 각 중금속의 오염평가지수는 $Cd > Ni > Zn > Cu > Pb$ 의 순으로 나타났다.

연구지역의 폐탄광지역 및 광미역의 토양은 풍화에 의한 물리적 영향이나 주변지역에서 발생되고 있는 산성광산배수가 표층수 및 지하수로 유입되어 토양에 영향을 주게 되면 adsorbed fraction과 carbonate fraction의 합인 labile한 오염평가지수가 가장 높은 카드미움에 의하여 주변지역이 생태계에 영향이 클 것으로 사료된다(fig. 6).

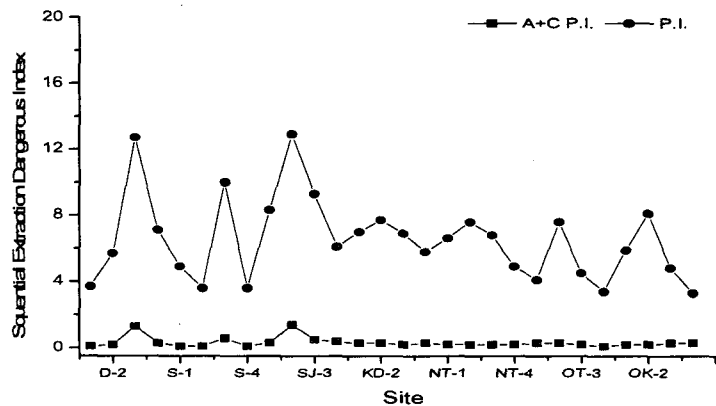


Fig. 6 Sequential extraction dangerous index in study area.

4. 4. P. I.와 S. E. D. I.의 비교 분석

존재형태에서 분석된 중금속의 함량마다 허용한계기준치를 나눈 것의 합을 분석원소 수로 나눈 값은 단계적 오염지수의 합에 분석 원소 수를 나눈 것에 비해 환경적 영향을 받을 것으로 예상되는 존재형태의 각 부분의 오염지수를 나타낸 수치보다 상대적으로 용출되거나 다른 계로의 이동으로 인한 생태계에 오염물질의 축적 혹은 치명적 유해를 주게 될 것으로 사료되는 농도보다 높게 평가되고 있다. 이러한 평가 이상의 수치는 오염된 지역을 화학적 방법에 의해 복원 방법인

토양의 불용화인 토양의 환원화 촉진(Eh의 저하)이나 토양의 pH 상승(precipitation) 또는 인산염 등의 생성촉진 등과 흡착화에 이용하는 점토광물재료의 이용 혹은 토양개량재료의 이용과 토양내 포함된 중금속의 용탈 방법인 토양세정에 의한 제거(washing)와 생물학적 방법인 중금속을 선택적으로 흡수하는 식물의 이용(Phytoremediation)과 농업 토목학적 방법인 반전심경(깊이 발갈이를 해서 땅을 뒤집는 것), 객토(오염된 논 흙위에 새로운 흙으로 덮는 것), 배토(오염된 논흙을 파서 버리는 것), 배토, 객토 등과 같은 방법에 적절히 복원 방안을 제시하기 어렵거나 지나친 높은 오염수치 제시로 인하여 발생하는 경제적 문제나 환경적 문제가 필요 이상으로 나타나게 될 것으로 사료된다.

토양의 총 농도에 대한 Pollution Index(P.I.)는 Sequential Extraction Dangerous Index(S.E.D.I.)과 분산(r^2)은 0.8637(A+C)를 나타냈으며 S.E.D.I.의 adsorbed 와 carbonate의 합과 adsorbed, carbonate, reducible fraction 합이 분산은 0.9289을 나타내 S.E.D.I. 간의 상관성이 높게 나타났다(Fig. 6).

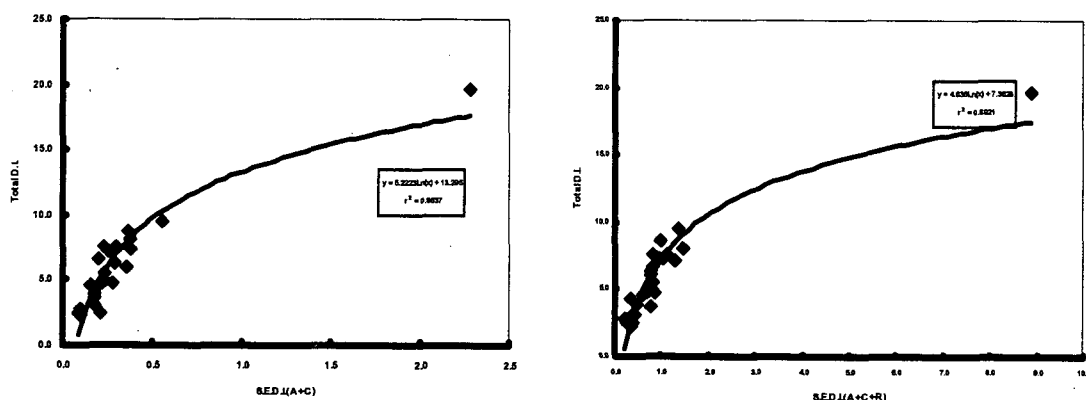


Fig. 6. Correlation between total pollution index and S.E.D.I.(Sequential Extraction Dangerous Index : A+C) in soils of study area.

5. 결론

강원도 지역 휴·폐 광산지역에서 발생된 오염물질인 광미와 갭내수, 하천수, 퇴적물, 토양에 대한 오염 현황을 파악하고 토의한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 오염된 토양의 총 농도 평가는 오염된 지역 복원 방안을 제시하기 어렵고 지나친 높은 오염 수치 제시로 인하여 발생하는 경제적 문제나 환경적 문제가 필요 이상으로 나타나게 될 것으로 예상된다. 따라서 S. D. I.(Soil Dangerous Index) 사용이 토양 오염 평가에 합리적일 것으로 판단된다.

2. 석탄 폐석 및 광미 주변 토양에서 카드미움 경우 이동성이 큰 Adsorbed와 Carbonate fraction 비율이 10 ~20% 내외로 나타나 주변 환경의 변화에 의해 쉽게 하천이나 주변 토양으로 이동 될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

[1] 고일원, 이상우, 김주용, 김경웅, 이진수, 전효택, 정명채, 국내 금은 광산 주변 비소 및 중금속의 오염 가능성과 복원 순위, 한국지구시스템공학회지, 40, p. 367~378(2003).

- [2] 농촌진흥청, 토양화학분석법(1988).
- [3] 이진국, 최육진, 이재영, 달성 폐광산 하류천의 중금속 오염에 관한 지화학적연구, 경북대학교 환경과학연구소 논문집, 3; 13~36(1989).
- [4] 이진수, 전효택, 김경웅, 김주용, 폐금속광 지역에서의 특성 중금속에 대해 위해성 평가, 한국지구시스템공학회지, 40, p. 264~273(2003).
- [5] 정영욱외 27명, 폐금속광산 환경오염평가 및 정화 기술 연구, 한국지질자원연구원 연구보고서, KR-01(연차)-07, 198p(2001).
- [6] 토양오염공정시험방법, 환경부(1996).
- [7] Canadian Council of Ministers of the Environment, Protocol for the Derivation of Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, Report CCME EPC-98E., pp 48(1995).
- [8] Chakrabarti, C.L., Y. Lu., D.C. Gregoire., M.H., Back and W.H. Schroeder, Kinetic studies of metal speciation using Chelexcation exchange resin: Application to cadmium, copper and lead speciation in the river water and snow, *Environ. Sci. Technol.*, 28: 1957~1967(1994).
- [9] Chon, H.T., Jung, M.C., Dispersion of Toxic Elements in the Area Covered with Uranium-Bearing Black Shales in Korea, *J. Korean Inst. Mining Geol.*, 24, No. 3, p. 245~260(1991).
- [10] Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bission, M., Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals, *Anal. Chem.*, 51, 884~851(1979).