

## 폐광산지역 경작지 토양의 중금속 존재형태와 토양오염평가

김휘중\*, 양재의<sup>1</sup>, 전상호\*

강원대학교 자연과학대학 환경과학과\*; 자원생물환경학부<sup>1)</sup>  
e-mail : hjkim60@cc.kangwon.ac.kr

### Abstract

Objectives of this research were to fractionate heavy metals in soil samples in the upper Okdong River basin and to assess the potential pollution index of each metal fraction. Soil samples were collected from cultivated land soils and analyzed for physical and chemical properties. pH of cultivated soils ranged from 5.2 to 7.6. Contents of total keldal nitrogen and loss on ignition were in the ranges of 0.6 ~2.5%, and 1.9~12.9%, respectively. Heavy metals in the cultivated land soils were higher in the abandoned closed coal mine near field soils than those in the paddy soils. Total concentrations of metals in the cultivated land soils were in the orders of Zn > Pb > Ni > Cu > Cd, exceed the corrective action level of the Soil Environment Conservation Law and higher than the naturals were abundance levels reported from uncontaminated cultivated land soils. Mobile fractions of metals were relatively small compared to the total concentrations. Soil Pollution Assesment Index(SPAI) values of each fraction of metals were leveled from Non polluted to Moderately polluted based on total concentrations. SPAI values of mobil fractions were lower than those of immobile fractions. Results on metal fractions and SPAI values of the cultivated land soils indicate that field soils samples were contaminated with heavy metals and had potential to cause a detrimental effects on plants. A prompt countermeasure to prevent field soils in the abandoned closed coal mine near fields are urgently needed.

Keywords : Cultivated land soil, Paddy soil, Field soil, Metal fraction, Soil Pollution Assesment Index.

### 1. 서 론

80년대 후반부터 급속히 쇠퇴하기 시작한 광업은 현재 강원도 동남부지역에 많은 폐 탄광과 휴·폐광된 금속광산을 산출하였다. 이러한 휴·폐광산은 주변 환경에 미치는 영향력이 크기 때문에 현재 정부에서도 광산 폐기물에 의한 토양 및 하천 오염의 영향 평가를 실시하고 있다. 그러나 일반적으로 처리되지 않은 광미나 광재, 퇴적물, 침출수, 유출수 등의 광산활동에 의한 폐기물에 함유된 유해 중금속의 농도는 우리나라의 토양환경보존법이나 수질환경보존법의 기준보다 높은 것으로 보고되고 있으며<sup>1)</sup>, 광산폐기물에 의한 농경지의 오염 가능성은 광산폐기물에 함유된 중금속들의 분포와 주변 환경에 따른 중금속의 용출 및 거동에 관한 지식이 없으면 적절한 접근이 불가능하다.<sup>2,3)</sup>

중금속의 존재형태와 용출 특성의 구명에 관한 연구는 광산활동에 의한 광산폐기물의 거동

에 적용이 가능하고 특히 광미를 매립 또는 광재담에 의해 격리하였을 경우 하천으로의 이동, 지하수로의 유출, 지역 토양의 오염 가능성을 예측하는데 중요한 정보를 제공할 것으로 판단된다.<sup>4,5,6)</sup> 우리나라의 동남 단에서 북서 내륙 방향으로 분포하고 있는 금속광산이나 석탄광산지역의 생산광물 중 함유되어 있는 각종 유해 중금속이 주변지역의 농경지 등을 오염시킬 수 있는 잠재적인 오염원이 될 수 있다. 따라서 폐 탄광과 휴·폐 금속광산 및 광재담에 대한 토양오염 가능성에 대한 우선 순위 산정이 필요하며 이에 따라 오염지역에 대한 환경 복원우선순위를 결정할 수 있다.

이러한 복원우선 순위를 결정하기 위해서는 휴·폐금속광산 및 탄광, 폐재처리장 인근지역에 중금속이 유출되어 환경에 존재하는 중금속이 인체 및 환경에 어느 정도의 유해한 영향을 미치는가를 판단할 수 있어야 한다. 이러한 오염평가를 하기 위한 기준이 중금속에 의한 오염판단이 기준이라 할 수 있다. 휴·폐광된 광산지역의 오염원을 제거할 수 있는 기술적인 접근방법이 이루어지기 위하여 휴·폐광된 광산지역을 대상으로 중금속에 의한 오염판단기준이 설정되어야 하고, 휴·폐광된 광산지역의 복원우선순위를 결정하여야 한다.

중금속에 의한 오염판단기준의 설정은 휴·폐금속광산 및 탄광, 폐재처리장에서 배출되는 중금속이 인근 토양 및 하천으로 유출되므로 광산지역의 오염현황의 판단은 토양(농경지 및 비농경지), 인근하천 및 갭내 수와 침출수, 식물체에서의 중금속에 의한 오염정도를 기준으로 설정되어야 한다<sup>1)</sup>. 그러나, 우리나라와 외국에서의 광산지역에서 배출되는 중금속에 의한 오염판단기준의 설정이 명확하게 제시된 바 없다.

본 연구는 옥동천 지역을 대상으로 폐탄광 및 휴·폐광된 금속광산에서 발생된 광폐재와 산성광산배수에 의한 주변지역 농경지 토양에 함유된 중금속(Pb, Cd, Zn, Cu, Ni)의 존재형태의 특성을 구명하여 이동 가능성과 중금속 존재형태에 따른 오염판단기준 설정하여 사후관리대책이나 복원대책을 위한 기초적 자료를 제공하려고 한다.

### 조사지점 및 시료채취

본 연구에 사용된 시료는 강원도 영월군 상동읍을 관통하여 흐르는 옥동천 주변지역의 농경지 토양을 채취한 것이다. 조사지역의 농경지 토양 시료는 옥동천 상류지역의 폐탄광이 산재해 있는 지역과 상동광업소 주변지역 및 광재담지역의 농경지, 중류의 구광재담과 신광재담 지역의 농경지 및 하류의 산성광산배수의 영향을 받았을 것으로 예상되는 옥동 폐탄광 지역의 농경지를 대상으로 하여 표층, 0~15cm의 지점에서 시료를 채취하였다. Table1은 채취시료명과 채취지점 등을 나타낸 것이다.

Table 1. Sample ID of cultivated land and sampling locations.

Sample I.D.	soil sampling locations	site characteristics
F-1	Myungjin abandoned mine	Field soil
F-2	Sejin abandoned mine	Field soil
F-3	Sangdong mine	Field soil
F-4	Sangdong	Field soil
F-5	New tailing dam	Field soil
F-6	New tailing dam	Field soil
F-7	Old tailing dam	Field soil
F-8	Old tailing dam	Field soil
F-9	Kasan	Field soil
F-10	Kasan	Paddy rice soil
F-11	Nokjun	Field soil
F-12	Nokjun	Paddy rice soil
F-13	Yarouo	Field soil
F-14	Yarouo	Paddy rice soil
F-15	Limestone mine	Field soil
F-16	Okdong abandoned mine	Field soil
F-17	Okdong abandoned mine	Paddy rice soil

### 시료의 분석방법

토양의 토성(texture)은 미국 농무부법에 따라 분류 방법을 따랐다. 유기물 함량은 강열감량법을 사용하여 측정하였으며, 총 유기 탄소 함량은 Gaudette 등<sup>8)</sup>의 방법에 따라 분석하였다. 토양 유기물의 부식화도는 Kjeldahl법으로 측정한 총질소와 강열감량법으로 측정한 유기물의 비를 이용하여 결정하였으며, 총질소와 유기물의 비가 20이하일 경우는 Oligohumic, 20~25일 경우는 Mesohumic, 25 이상일 때는 Polyhumic으로 구분하였다.<sup>9)</sup> 토양 내 중금속의 존재형태는 Tessier 등<sup>6)</sup>의 방법에 따라 adsorbed form, carbonate form, reducible form, organic form, residual form로 분류하여 추출하였으며, 중금속의 농도는 ICP (Perkin Elmer XL 3100, USA)를 이용하여 측정하였다. 조사 지역의 중금속 존재형태에 따른 오염판단기준은 런던시의 오염판단기준을 토대로 하여 Non polluted, Weakly polluted, Moderately polluted, Heavily polluted로 분류하여 평가하였다.

토양오염평가지수는 중금속의 존재형태별 분석된 자료를 각 step마다 분석치를 Interdepartmental Committee on the Redevelopment of Committee Land(ICRCL). 1987; Kelly<sup>12)</sup>와 Hobson<sup>13)</sup>의 논문에서 나타낸 오염판단기준의 수치로 나눈 후 분석된 원소인 Cd, Cu, Pb, Ni, Zn의 합을 원소의 수로 나눈 값을 토양오염평가지수(Soil Pollution Assessment Index)로 결정하였다.

오염도지수 평가 산정 계산은 다음과 같다.

$$S. P. A. I. = \frac{\sum \frac{\sum \text{Heavy metal fraction concentration in soil}}{\text{Pollution Division Tolerable level}}}{\text{Number of heavy metal}}$$

S. P. A. I. : Soil Pollution Assessment Index

Heavy metal fraction concentration : 분석된 원소의 존재형태별 함량

Pollution Division Tolerable level: 각 원소의 오염분류에 따른 토양 내 tolerance level

Number of heavy metal : 분석된 원소의 수

위 식에 의해 계산된 토양오염판단기준 산정은 각 중금속의 오염판단기준에 해당하는 허용한계치에 대한 비를 평균한 것이므로 조사지역의 농도가 기준치보다 크면 토양이 중금속에 의해 오염이 된 것으로 평가할 수 있다.

## 2. 본론

Table 2는 채취한 광미 시료의 이화학적 특성을 나타낸 것이다. 농경지의 pH는 5.2 ~ 7.6으로 녹전교 지역의 밭 토양에서 5.2로 우리나라의 주요 토양인 안용토, 천곡토, 이원토, 장원토 등의 4.8~5.4와 비슷한 범위를 이 가지고 있는 약 산성을 나타내었고, 상동읍 지역의 밭 토양에서 7.6으로 약 알칼리성에 해당되는 값을 나타냈다.

양이온치환용량은 7.4 ~ 12.4 cmol(+)/kg으로 나타났으며, 총 질소의 함량은 0.6 ~ 2.5%로 나타났으며, Ignition loss의 함량은 1.9 ~ 12.9%, 부식화도는 1.2~14.4로 나타났다.

입도는 대부분이 Sand와 silt의 함량이 높은 loam sandy loam으로 모래, 미사, 점토의 함량이 각각 8.0~90.9%, 4.8~91.1%, 3.3~39.0%로 나타났다.

Table 2. Physical and chemical properties of the experimental cultivated land soils.

	pH (1:5)	CEC	TKN	Loss on Ignition	I.G./N	Humic level	Sand	Silt	Clay	Soil texture
		cmol(+)/kg		---- % ----			---- % ----			
F-1	6.6	7.6	2.5	5.9	2.4	oligohumic	40.1	22.3	37.7	Clay lom
F-2	6.2	10.0	1.0	4.0	4.2	oligohumic	37.1	43.9	19.1	Loam
F-3	5.8	11.2	0.6	8.7	14.4	oligohumic	29.3	44.6	26.1	Loam
F-4	7.6	10.8	1.4	6.9	4.8	oligohumic	17.0	71.8	11.1	Silty loam
F-5	5.5	12.4	2.4	9.3	3.8	oligohumic	5.6	91.1	3.3	Silt
F-6	5.7	9.4	2.1	3.2	1.5	oligohumic	53.9	23.8	22.3	Sandy loam
F-7	6.1	7.6	1.4	2.8	2.0	oligohumic	63.9	26.2	9.9	Sandy loam
F-8	5.7	9.1	1.4	4.0	2.8	oligohumic	48.5	33.1	18.5	Loam
F-9	6.0	9.8	1.4	12.9	9.2	oligohumic	90.9	4.8	4.3	Sand
F-10	5.6	11.6	1.4	3.8	2.7	oligohumic	51.2	37.3	11.5	Loam
F-11	5.2	10.7	1.5	4.6	3.0	oligohumic	67.5	19.1	13.4	Sandy loam
F-12	5.4	8.4	1.4	5.3	3.6	oligohumic	65.2	19.2	15.6	Sandy loam
F-13	5.5	7.4	2.1	5.9	2.8	oligohumic	58.4	24.4	17.2	Sandy loam
F-14	5.3	11.2	1.4	5.8	4.0	oligohumic	54.6	23.6	21.8	Sandy clay loam
F-15	6.4	10.3	1.6	2.6	1.6	oligohumic	46.7	46.3	7.1	Loam
F-16	6.1	9.1	1.6	1.9	1.2	oligohumic	82.5	8.2	9.3	Loamy sand
F-17	5.4	11.5	2.4	12.4	5.2	oligohumic	8.0	53.1	39.0	Silty clay loam

CEC ; Cation exchange capacity

TOC ; Total organic carbon

TKN ; Total Kjeldahl nitrogen

### 농경지 중금속의 존재형태(fractionation) 및 이동성(mobilization)

연구지역인 경작지 토양의 Cd 총량은 가산교 지역의 논 토양인 정점 F-10에서 22.3mg/kg으로 가장 높은 농도를 나타냈으며, 녹전교 지역 밭 토양인 정점 F-11에서 10.2mg/kg으로 가장 낮은 값으로 나타났다.

Cu 총량은 154.7mg/kg~455.8mg/kg로, Pb 총량은 143.8mg/kg ~ 573.1mg/kg, Ni 총량은 168.3mg/kg ~ 501.3mg/kg, Zn 총량은 149.8mg/kg ~ 1334.6mg/kg의 분포를 나타냈다.

농경지 토양에 함유된 카드뮴은 주변환경이나 생태계로 이동될 수 있는 labile한 부분이 12.2%~43.0%로 가산교 지역 논 토양인 정점 F-9에서 이동성이 가장 높은 것으로 나타났으며, 구리는 19.3%~49.3%로 나타났다(Fig. 1, 2).

Fig 3은 erosion이나 주변의 물리 및 화학적 변화에 의해 육상 생태계나 강우로 인해 수계로 이동 가능성이 있는 납의 존재형태를 부분 비율로 나타낸 것이다.

니켈의 이동성은 농경지 전지역이 Humic level이 oligohumic 상태로 나타나, 토양내 유기물의 분해로 인하여 수소이온 농도 상승과 유기물과 결합된 니켈이 유기물 분해 시 지속적인 용출이 발생할 것으로 사료되어 이에 영향을 받을 것으로 예상되는 adsorbed fraction, carbonate fraction, reducible fraction 및 organic fraction이 부분적으로 용출될 것으로 예상된다 (Fig. 4).

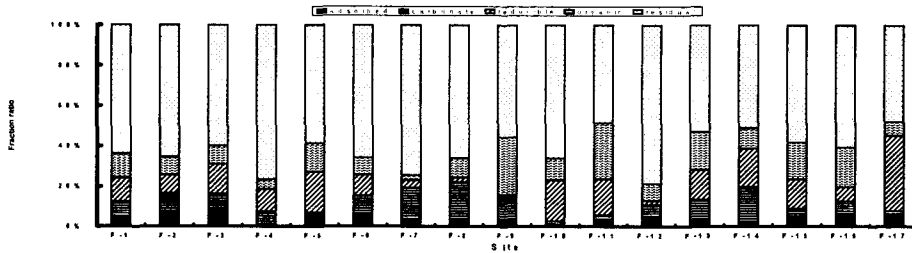


Fig. 1. Fractional composition of cadmium (Cd) in the cultivated land soils.

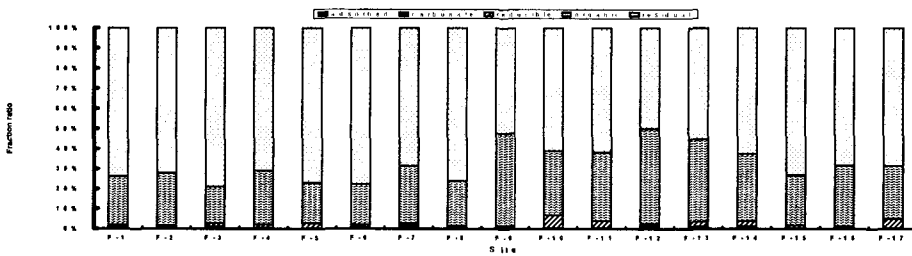


Fig. 2. Fractional composition of copper (Cu) in the cultivated land soils.

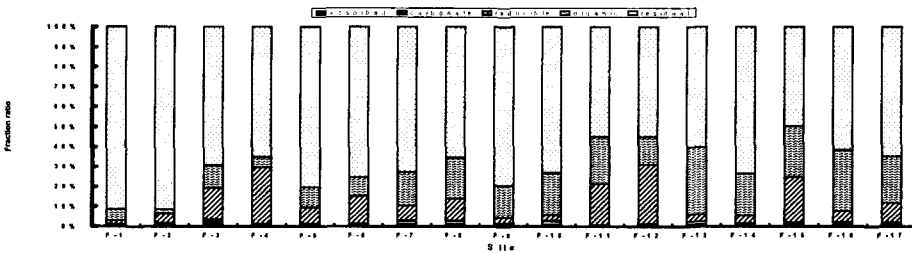


Fig. 3. Fractional composition of lead (Pb) in the cultivated land soils.

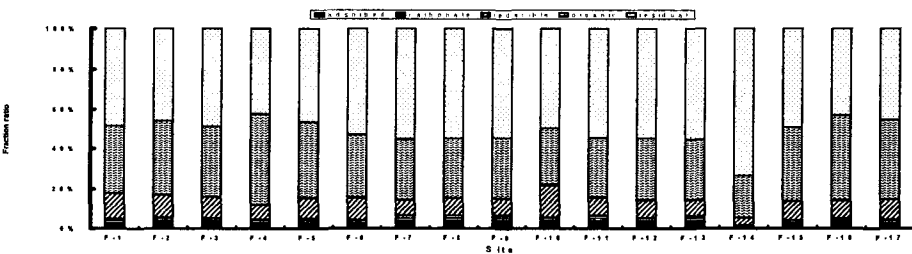


Fig. 4. Fractional composition of nickel (Ni) in the cultivated land soils.

**중금속 존재형태에 따른 오염판단기준 설정.**

본 연구에서는 영국의 런던시의 오염판단기준을 토대로 하여 Non polluted, Weakly polluted, Moderately polluted, Heavily polluted로 분류하여 평가하였다.

토양오염평가지수는 중금속의 존재형태별 분석된 자료를 각 step마다 분석치를

Interdepartmental Committee on the Redevelopment of Committee Land(ICRCL)<sup>12, 13)</sup>에서 나타난 오염판단기준의 수치로 나눈 후 분석된 원소인 Cd, Cu, Pb, Ni, Zn의 합을 원소의 수로 나눈 값을 토양오염평가지수(Soil Pollution Assessment Index)로 결정하였으며, 토양오염 분류는 Non polluted, Weakly polluted, Moderately polluted, Heavily polluted로 나누었다. 총량에 대한 중금속 토양오염판단기준은 전지역에서 non polluted와 weakly polluted 범위를 전부 초과하였으며, moderately polluted는 상동광업소 지역과 광재담 지역의 농경지인 정점 F-5, F-7과 석회광산지역의 밭 토양인 정점 F-15와 옥동 폐탄광 지역으로 그 지역에서 발생한 폐재와 산성광산배수의 영향을 받았을 것으로 예상되는 밭 토양과 논 토양인 정점 F-15, F-16, F-17에서 초과하는 값으로 나타났다.

Labile한 상태 토양오염판단기준은 구광재담 지역의 밭 토양인 정점 F-7과 F-8에서 non polluted 범위를 초과했으나 weakly polluted와 moderately polluted, heavily polluted는 전 지역에서 토양오염판단기준을 상회하거나 기준 점에 해당하는 수치는 나타나지 않았다.

위와 같은 결과는 존재형태에서 분석된 총량에 대한 중금속의 토양오염판단기준이 농경지 환경의 영향을 받을 것으로 예상되는 존재형태의 각 부분의 기준수치보다 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 복원하기 위한 방안을 제시하기 어렵거나 경제적 문제나 환경 문제가 필요이상으로 나타나게 될 것으로 사료된다. 따라서 경작지의 토양의 특성이나 경작방법에 따라 토양오염판단기준 산정 방법에 차이를 두어야 할 것으로 사료된다.

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

Table 5. Pollution division level of metal fraction in cultivated land soils.

Site	Total				A+C				A+C+R				A+C+R+O			
	Pollution division level															
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
F-1	9.4	3.7	0.9	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.4	0.1	0.0	0.2	0.8	0.3	0.1	0.4
F-2	8.6	3.4	0.9	0.2	0.7	0.3	0.1	0.0	1.1	0.4	0.1	0.0	1.9	0.6	0.2	0.0
F-3	9.8	3.9	1.0	0.2	0.8	0.3	0.1	0.0	1.5	0.5	0.2	0.0	2.4	0.8	0.3	0.1
F-4	9.3	3.6	0.9	0.2	0.5	0.2	0.1	0.0	1.0	0.4	0.1	0.0	2.0	0.6	0.2	0.0
F-5	9.7	3.8	1.0	0.2	0.5	0.2	0.1	0.0	1.4	0.5	0.2	0.0	2.6	0.9	0.3	0.1
F-6	9.0	3.5	0.9	0.2	0.7	0.3	0.1	0.0	1.3	0.5	0.1	0.0	2.1	0.7	0.3	0.1
F-7	9.6	3.7	1.0	0.2	1.1	0.4	0.1	0.0	1.4	0.5	0.2	0.0	2.1	0.8	0.3	0.1
F-8	9.1	3.5	0.9	0.2	1.1	0.4	0.1	0.0	1.3	0.5	0.1	0.0	2.4	0.9	0.3	0.1
F-9	6.9	2.7	0.7	0.1	0.6	0.2	0.1	0.0	0.6	0.2	0.1	0.0	1.8	0.6	0.2	0.0
F-10	9.3	3.5	0.9	0.2	0.4	0.1	0.0	0.0	1.5	0.5	0.2	0.0	2.2	0.7	0.2	0.0
F-11	6.5	2.5	0.6	0.1	0.4	0.2	0.0	0.0	0.9	0.3	0.1	0.0	1.8	0.6	0.2	0.0
F-12	8.5	3.2	0.8	0.2	0.7	0.2	0.1	0.0	0.8	0.3	0.1	0.0	1.5	0.5	0.2	0.0
F-13	6.5	2.5	0.6	0.1	0.6	0.2	0.1	0.0	0.9	0.3	0.1	0.0	1.8	0.6	0.2	0.0
F-14	5.5	2.2	0.6	0.1	0.5	0.2	0.1	0.0	1.0	0.4	0.1	0.0	1.6	0.6	0.2	0.0
F-15	10.5	4.2	1.1	0.2	0.5	0.2	0.1	0.0	1.3	0.5	0.2	0.1	3.4	1.2	0.5	0.2
F-16	10.2	4.1	1.0	0.2	0.7	0.3	0.1	0.0	1.1	0.4	0.1	0.0	3.5	1.3	0.5	0.2
F-17	10.5	4.1	1.1	0.2	0.5	0.2	0.1	0.0	2.3	0.8	0.2	0.1	3.8	1.4	0.5	0.1

A+C ; Sum of adsorbed + carbonate  
A+C+R ; Sum of adsorbed + carbonate + reducible  
A+C+R+O ; Sum of adsorbed + carbonate + reducible + organic  
1: Non polluted, 2: Weakly polluted, 3: Moderately polluted, 4: Heavily polluted

### 3. 결론

1. 경작지 토양의 pH는 대부분이 약산성으로 나타났으나 금속광산지역의 밭 토양에서는 지역 토양통과는 달리 알칼리성으로 나타났다.
2. 구리를 제외한 중금속 대부분이 휴·폐 금속광산지역의 경작지보다는 산성광산배수의 유입량이 많은 폐탄광지역에서 높은 농도를 보였으며, 존재형태분류에 의한 이동 가능성도 높게 나타나 이 지역의 작물체 내의 중금속 함유량이 높을 것으로 판단되었다.
3. 조사지역 내 경작지의 존재형태별 오염평가기준은 전 정점에서 non polluted 범위를 초과하였으며, 옥동 폐탄광 및 개갱 중인 석회광산 지역에서 moderately polluted을 상회하거나 기준 점에 해당되는 값을 나타내어 이 지역이 우선적으로 경작지 복원 방안이 이루어져야 할 것으로 판단된다.
4. 총량에 대한 토양오염판단기준이 농경지 환경의 영향을 받을 것으로 예상되는 존재형태의 각 부분의 기준수치보다 높게 평가되고 있다. 따라서 경작지의 토양의 특성이나 경작 방법에 따라 토양오염판단기준 산정 방법에 차이를 두어야 할 것으로 판단된다.

### 4. 참고문헌

1. Park, Y.A. 1996. Designing and applicability of soil pollution indices for estimating quality of soil polluted with heavy metals and arsenic, J. of KOSES 1(1):47-54.
2. Forstner, U. and W. Salomon. 1991. Mobilization of metals from sediments, Metals and Their compound in environment, Ed. by E, Merian, p.379-398
3. Sengupta, M. 1993. Environmental impacts of mine drainage on streams of U.S., Env. Geol. Water Sic. 11:141-152
4. Davis, J.A. and Leckie, J.O. 1978. Surface ionization and complexation at the oxide/water interface, Journal of Colloid and Interface Science 67:90-107.
5. Tessier, A., P.G.C. Campbell, M. Bisson. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical chemistry, 51(7):844-851.
6. Shepard, F. P., 1954, Nomenclature Based on sand-silt-clay ratios, J. Sed. Pet. 24:
7. Folk, R. L. 1966. A Review of grain-size Parameters, Sedimentology 6:73-93
8. Gaudette, H. E. and Flight, W. R. 1974. Inexpensive titration of organic carbon in recent sediment, J. Sed. Petro. 44:24-253
9. Hakanson, L. and M. Jansson. 1983. Principles of lake sedimentology. Springer -Verlag, Berlin, 316.
10. Kelly, R. T., 1980, Site investigation and material problems, in Reclamation of Contaminated Land. B2/1-B2/12. Society of Chemical Industry.
11. Hobson, M., 1993, Rational site investigation. In: Contaminated Land problems and solutions. Ed. T. Cairney. Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall Press.
12. Istvan, P. and Jones Jr. 1997, Trace elements, CRC., Lucie Press.
13. Kloke, A. 1979. Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, nikel in plants grown on contaminated soil: UN-ECE Symp.
14. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, 1992, Australian and New Zealand Guidelines for the Assessment and management of contaminated sites, National Health and Medical Research Council.