한국지하수토양환경학회지 Vol. 8, No. 4, pp. 53~63, 2003 ≪原著≫

폐광산지역 경작지 토양의 중금속 존재형태와 토양오염평가

김휘중[1]* · 양재의[2] · 이재영[3] · 최상일[4] · 전상호[1]

[1]강원대학교 자연과학대학 환경과학과, [2]강원대학교 생물환경학부
[3]서울시립대학교 환경공학부, [4]광운대학교 환경공학과

Fraction and Soil Pollution Assesment Index of heavy metals in cultivated land soils near the abandoned mine

Hee Joung Kim[1]* · Jae E Yang[2] · Jai-Young Lee[3] · Sang-Il Choi[1] · Sang Ho Jun[1]

[1]Department of Environmental Science, Kangwon National University
[2]Division of Environmental & Biological Engineering, Kangwon National University, Chunchon, Korea
[3]Department of Environmental Eng., University of Seoul
[4]Department of Environmental Eng., Kwangwoon University

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 the cultivated land soils and analyzed for physical and chemical properties. pH of cultivated soils ranged from 5.2 to 7.6. Contents of total kelhaldal 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.

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

요 약 문

연구의 목적은 옥동천 유역 토양의 중금속의 존재형태와 존재형태에 따른 중금속의 오염지수를 산정하는데 있다. 토양채취는 경작지 토양을 대상으로 하였고 토양은 물리적 특성과 이화학적 특성을 분석하였다. 그 결과 경작지 토양의 pH는 5.2에서 7.6을, 총질소 함량과 loss on ignition은 각각 0.6~2.5%, 1.9~12.9%를 나타냈다. 경작지 토양의 중금속 농도는 폐광된 탄광지역의 논토양에서 높게 나타났으며, 총 중금속의 농도는 Zn > Pb > Ni > Cu > Cd 순으로 나타났다. 이러한 결과는 토양환경기준치와 비오염 경작지 토양의 중금속 농도 보다 높게 나타나는 경향을 보였으며, 총 중금속 중 일 부분이 이동 가능성이 있는 부분으로 나타났다. 토양오염 평가지수(SPAI)는 조사지 토양에서 Non polluted와 Moderately polluted를 나타냈으며, 이러한 결과는 비 이동성 형태보다는 이동성 형태의 값이 낮게 나타났다. 경작지 토양에서 중금속 존재형태와 SPAI 값은 중금속에 의한 오염과 식물체에 미치는 잠재적인 유해한 결과를 얻을수 있다. 따라서 결과에서 보여진 폐탄광지역의 토양을 복원하기 위해서 신속한 대책이 필요하다.

주제어 : 경작지 토양, 논토양, 밭토양, 중금속 존재형태, 토양오염평가지수

*Corresponding author : hjkim60@kangwon.ac.kr
원고접수일 : 2003. 10. 29 게재승인일 : 2003. 11. 03
질의 및 토의 : 2004. 3. 30 까지

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[1], 광산폐기물에 의한 농경지의 오염 가능성은 광산폐기물에 함유된 중금속들의 분포와 주변 환경에 따른 중금속의 용출 및 거동에 관한 지식이 없으면 적절한 접근이 불가능하다[2,3].

최근에 직면하고 있는 문제 중의 하나는 광산활동에 의해 발생된 광폐재들에 의한 것으로 광산폐수, 광산폐기물 등 여러 종류의 오염 물질이 지하수, 강, 토양을 포함한 자연 생태계에 유입되면서 유해물질의 양이 자정능력을 범위를 넘으면서 발생되는 환경문제이다[4]. 이렇게 주변지역의 환경에 영향을 미치는 오염의 주원인은 광산 활동에 의해 발생되는 유해 중금속과 같은 오염물질과 휴 · 폐광이 된 후 광미 폐재장, 폐갱도, 폐석 등에서 발생되는 침출수와 용출되는 유해 중금속 등이며, 이러한 유해 중금속은 토양 및 수계로 이동하여 하천, 토양 및 농경지를 오염시키고 있다[5].

중금속의 존재형태와 용출 특성의 구명에 관한 연구는 광산활동에 의한 광산폐기물의 거동에 적용이 가능하고 특히 광미를 매립 또는 광재댐에 의해 격리하였을 경우 하천으로의 이동, 지하수로의 유출, 지역 토양의 오염 가능성을 예측하는데 중요한 정보를 제공할 것으로 판단된다[6]. 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 광재댐에 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 갱내 수와 침출수, 식물체에서의 중금속에 의한 오염정도를 기준으로 설정되어야 한다[1]. 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.

2. 재료 및 방법

2.1 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 광재댐지역의 농경지, 중류의 구광재댐과 신광재댐 지역의 농경지 및 하류의 산성광산배수의 영향을 받았을 것으로 예상되는 옥동 폐탄광 지역의 농경지를 대상으로 하여 표층, 0~15 cm의 지점에서 시료를 채취하였다. 채취한 시료는 대표성을 유지하기 위하여 광재댐의 표층 단면을 1~2 m 간격의 9개 지역으로 분리하여 각각의 토심에서 시료를 채취한 후 혼합하여 사용하였다. Table 1과 Fig. 1은 채취시료명과 채취지점 등을 나타낸 것이다.

2.2 조사지역의 지질학적 특성

강원도 영월군에 상동읍 구래리부터 대하리에 이르는 옥동천은 태백산맥의 영향으로 계곡이 비교적 깊고 여러 수계가 합쳐져서 옥동천을 형성한다. 이 지역은 석탄기 암석, 대석회암, 변성암 및 화강암류로 구성되어 있으며, 대부분이 밭 경작지로 형성된 상류지역은 석탄광 폐수 및 매석광물들이 하천으로 유입됨으로써 농경 수에 지대한 영향을 미치고 있다 또한 상동광산과 거도광산에서 나오

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

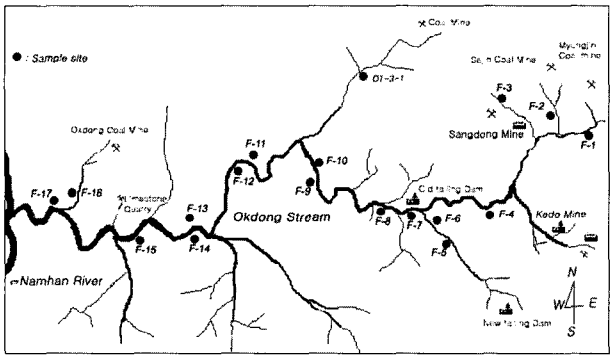

Fig. 1. Location of the cultivated land sampling sites in the study area.

는 광산배수도 옥동천으로 유입되며, 중류에 유치한 신광재댐과 구광재댐의 침출수와 광재댐에 쌓아둔 광미 및 하류의 석탄폐석 적치장들은 홍수기 때 강우에 의해 하천으로 유입되어 수질오염을 가중시키고 있으며, 특히 광미댐의 표층 토양의 경우 겨울과 봄에 발생되는 바람에 의해 미세한 분진이 주변 농경지 표토에 쌓이기도 하여 오염가능성을 더해주고 있다.

Table 2. The pollution division level of various heavy metals (unit: mg/kg dry soil)

	Pollution division			
	Non polluted	Weakly polluted	Moderately polluted	Heavily polluted
Cd	1	3	10	50
Cu	100	200	500	2500
Pb	200	500	1000	5000
Ni	20	50	200	1000
Zn	250	500	1000	5000

Interdepartmental Committee on the Redevelopment of Committee. Land (ICRCL) (1987).

2.3 시료의 분석 및 평가 방법

광미의 중금속 분획화를 수행하기 위해 시료를 40°C에서 건조시켜 망눈의 크기 63 μm인 비금속 체(nylon bolting cloth sieve)로 체질 하여 분석에 사용하였다. 입도 분석은 체 분석(sieving)과 침강 분석(pipette method)을 병행하여 실시하였다[7]. 64 μm 이상의 입경을 갖는 입자는 체로 걸러 내어 체 분석을 하고 그 이하는 침강 분석을 실시하였다. 토양의 토성(texture)은 미국 농무부법에 따라 분류하였고, 입도 분석은 Shepard[8], 평균 입도는 Folk[9]의 분류 방법을 따랐다. 2 mm체를 통과한 광미 토양의 유기물 함량은 강열감량법을 사용하여 측정하였으며, 총 유기 탄소 함량은 Gaudette 등[10]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[11]. 토양 내 중금속의 존재형태는 Tessier 등[6]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(Table 2).

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

오염도지수 평가 산정 계산은 다음과 같다.

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

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

Heavy metal fraction concentration : 분석된 원소의 존재형태별 함량

Pollution Division Tolerable level: 각 원소의 오염 분류에 따른 토양 내 tolerance level

Number of heavy metal : 분석된 원소의 수

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

3. 결과 및 고찰

3.1 농경지의 이화학적 특성

Table 3은 채취한 광미 시료의 이화학적 특성을 나타낸 것이다. 농경지의 pH는 5.2~7.6으로 녹전교 지역의 밭 토양에서 5.2로 우리나라의 주요 토양인 안용통, 안미통, 백구통, 반천통, 안덕통, 차항통, 천곡통, 이원통, 장원통 등의 4.8~5.4와 비슷한 범위를 이 가지고 있는 약 산성을 나타내었고, 상동읍 지역의 밭 토양에서 7.6으로 약 알카리성에 해당되는 값을 나타냈다.

양이온치환용량은 7.4~12.4 cmol(+)/kg으로 나타났으며, 총 질소의 함량은 0.6~2.5%로 폐탄광 지역의 밭 토양인 정점 F-1에서 2.5%로 가장 높은 값을 나타냈으며 상동광업소 지역의 밭 토양인 정점 F-3에서 가장 낮은 값을 나타냈다.

양이온 치환용량이 낮은 일부지역의 경작지토양은 우리나라 토양의 양이온 치환용량보다도 적어 비료를 어느 정도 많이 시용 하여도 과비현상이 적을 것으로 사료된다. 또한 이런 토양의 경우 토양에 비료를 시용 하면 토양의 염기 치환용량 만큼 토양입자에 흡착되고 나머지는 토양용액에 녹아 있다가 작물에 바로 흡수 이용되거나 혹은 물과 함께 용탈되어 유실되게 되어 2차 오염을 발생하기 쉬울 것으로 사료된다. 이러한 경우 광재댐에서 발생된 중금속 함량이 높은 미세분진이 경작지 토양으로 이동되면 완충능력이 적어 유해도가 높은 중금속은 토양에서 흡착에 의한 유해물질 완충효과를 효과적으로 나타낼 수 없어, 강우나 주변환경변화를 통해 오염된 토양표면으로부터 용출되는 중금속이 수로나 지반을 통해 유출되어 수 생태계에 영향을 줄 가능성이 클 것으로 사료된다.

Ignition loss의 함량은 1.9~12.9%로 가산교 지역의 밭 토양인 정점 F-9에서 가장 높은 값을 나타냈으며, 옥동광산 지역의 밭 토양인 정점 F-16에서 가장 낮은 함유량으로 나타났으며, 총 질소의 함량은 0.6~2.5%로 폐탄광 지역의 밭 토양인 정점 F-1에서 2.5%로 가장 높은 값을 나타냈으며 상동광업소 지역의 밭 토양인 정점 F-3에서 가장 낮은 값으로 나타났다.

부식화도는 1.2~14.4로 나타내어 경작지 토양이 가지고 있는 특성인 비료나 퇴비의 살포로 이해 생기는 풍부한 질

Table 3. 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.

소 함량에 의해 발생되는 현상으로 사료된다. Oligohumic 상태인 경작지 토양은 중금속이 유기물과 결합된 부분의 존재형태비가 높다면 유기물이 분해되면서 다른 형태나 또는 식물이 이용성이 좋은 이온 형태로 이동 가능성이 클 것으로 예상되어 식물체에 영향을 줄 것으로 사료된다.

전 지역의 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.

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

현재 시행되고 있는 경작지 토양의 분석 방법은 중금속의 총 함량만을 측정하게 되어 있다. 이러한 분석방법은 경작지 토양에 분포하고 있는 중금속의 이동 형태나 용출 가능성에 대한 예측이 어려운 실정이다. 따라서 경작지 토양내의 중금속의 존재형태를 분석하여 얻어진 자료가 더욱 유용한 토양오염의 정보를 얻을 수 있다고 보고하고 있다[14,15].

중금속이 민감한 환경변화에서 bioavailability와 토양중 이동성에 가장 영향을 미칠 수 있는 형태는 adsorbed fraction이다. 그러나 경작지 토양 내에서 경작조건변화에 의해 토양이 혐기성 형태나 혹은 유기물 분해에 의한 수소이온 농도 증가에 의한 pH 감소와 같은 다양한 환경변화가 나타날 수 있다, 따라서 경작지 토양의 중금속의 존재형태 중 carbonate나 reducible fraction이 수용태나 치환태로 변화될 가능성이 높다[6].

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

Cu 총량은 154.7 mg/kg~455.8 mg/kg로, Pb 총량은 143.8 mg/kg~573.1 mg/kg, Ni 총량은 168.3 mg/kg~ 501.3 mg/kg, Zn 총량은 149.8 mg/kg~1334.6 mg/kg의 분포를 나타내 대부분이 옥동 폐탄광 하류에 위치한 밭 토양에서 가장 높은 농도를 나타냈으며, 옥동천 중류로 비교적 오염원에서 원거리에 위치한 녹전교 지역 밭 토양에서 가장 낮은 값으로 나타났다.

각 중금속의 존재형태별 농도도 상동광업소 지역으로 광산활동에 의해 발생된 오염물질의 영향을 받을 것으로 예상되는 주변지역의 밭 토양에서 가장 높은 값을 나타내었고, 비교적 오염원에서 멀리 위치한 논 토양에서 가장 낮은 값을 나타냈다.

위에 나타난 결과를 평균 토양 중 Cd, Cu, Pb, Ni, Zn 함량인 0.35 mg/kg[15], 30.0 mg/kg[15], 3.0~189.0 mg/kg[16], 3.0~189.0 mg/kg[16], 50.0 mg/kg(Bowen, 1979)[15], 400.0 mg/kg(범위 60.0~2000.0 mg/kg)[15]과 비교하면 대부분의 중금속에서 adsorbed, carbonate와 reducible fraction이 일부 지역을 제외한 전 지역에서 20배에서 많게는 50배까지 매우 높은 함량을 나타냈으며, Kloke[17]가 제시한 토양에서의 Tolerance level이 adsorbed 및 carbonate, reducible fraction이 일부지역과 residual fraction은 전지역의 농경지 토양에서 약 1배~6배정도 상회하는 값을 나타냈고, 존재

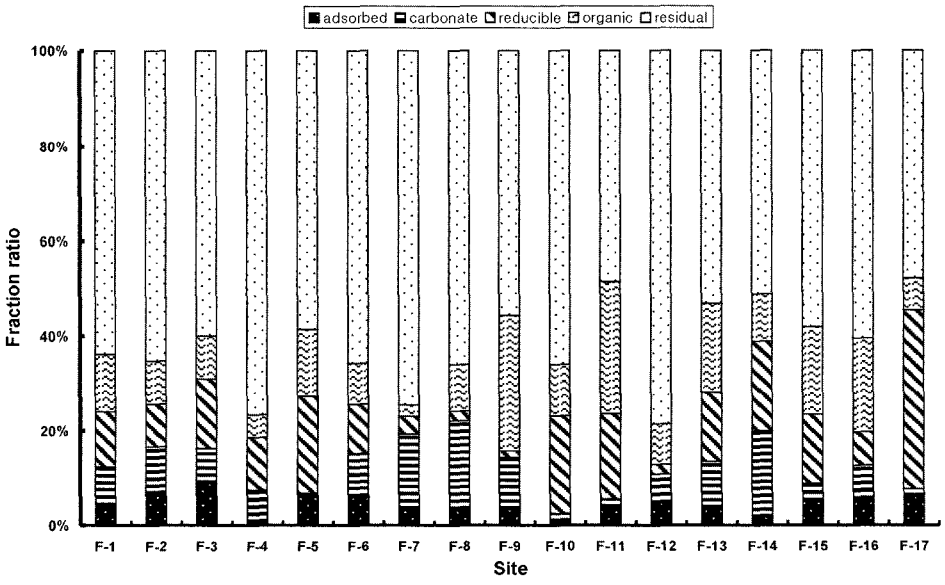

Fig. 2. Fractional composition of cadmium (Cd) in the cultivated land soils.

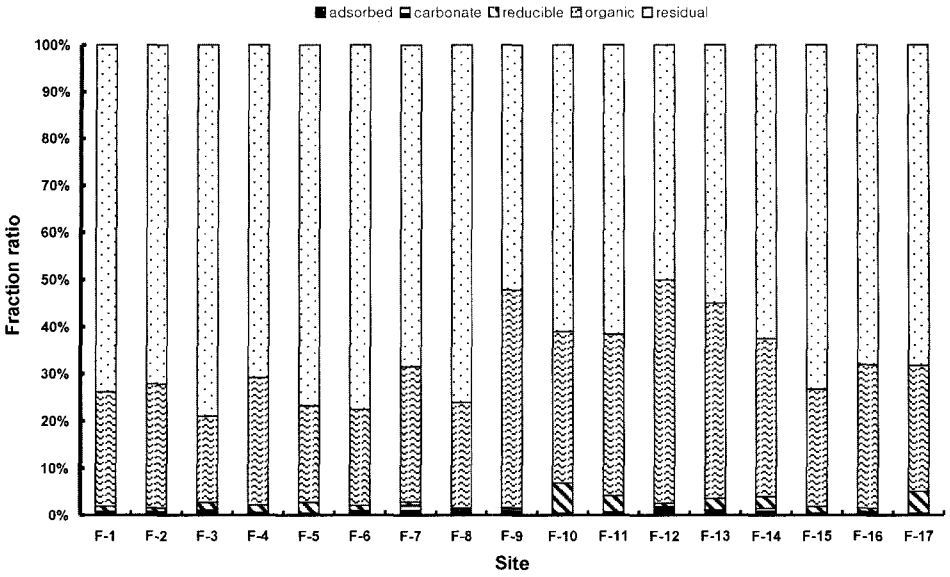

Fig. 3. Fractional composition of copper (Cu) in the cultivated land soils.

형태의 특성상 residual fraction을 제외한 존재형태 중 organic fraction이 가장 높은 농도를 나타냈으나, 논 경지 토양에서는 reducible fraction이 가장 높은 부분비율을 차지하였다.

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, 옥동천 상류지역에 위치한 상동읍내의 밭 토양인 정점 F-4에서 가장 이동성이 낮게 나타났다(Fig. 2). 위에 나타난 결과는 일반적인 토양에서는 토양 공극내의 산소가 토양미생물의 활동에 의해 혐기적 상태를 보이기는 어려운 점을 들어 토양내 산소는 입자와 입자간의 공극에 포함된 산소에 의해 호기성 상태를 유지할 것으로 예상되나 경작지 토양의 경우 비료의 투입과 논 경지의 경우 경작의 특성상 토양표면이 물에 의해 대기층과 나누어지며 혐기적 상황을 만들게 되어 환원 상태를 유지하게 되어 실제 철이나 망간의 산화물과 결합된 형태의 중금속이 환원상태로 되면서 결합된 카드뮴이 용출되어 labile한 부분에 포함시켰다. 또한 유기물과 결합된 카드뮴의 경우 부식화 정도에 따라 이동 가능성이 있을 것으로 사료되어 경작지 토양의 경우 대부분의 유기물은 분해될 것으로 미루어 유기물과 결합된 카드뮴이 육상 생태계나 식물체로 흡수가 될 것으로 예상되어 이동 가능성 부분에서 포함시켰다.

농경지 토양에 함유된 구리 중 주변환경이나 생태계로 이동될 수 있는 labile한 부분은 19.3%~49.3%로 나타났다(Fig. 3).

옥동천 중류의 녹전교 지역은 탄광 및 금속광산활동 지역에서 멀리 떨어져 있으나 하천수를 이용하여 경작활동을 하였을 것으로 예상되는 논 토양인 정점 F-12에서 이동성이 가장 높을 것으로 나타났다. 따라서 이 지역에서 생산되는 농작물도 구리의 농도가 높을 것으로 사료되며, 약 84.9 mg/kg 정도의 구리가 주변 생태계로 이동될 것으로 사료된다.

납의 경우 존재형태의 특성상 residual fraction을 제외한 존재형태 중 organic fraction 이 가장 높은 농도로 나타났으나 옥동천 상류의 폐탄광의 광산배수가 유입되는 지류와 상동광업소의 광산배수가 유입되는 지역 및 석회광업소의 배출수가 유입되는 지역의 밭 토양 및 비교적 오염이 덜된 것으로 예상되는 녹전교 지역의 논 토양에서 철산화물 및 망간 산화물과 결합된 납의 농도가 높게 나타나 밭 토양의 경우는 산성광산배수가 유입되는 하천수가 농업용수로 사용되어 나타난 결과로 사료되며, 논 토양의 경우 밭 토양과는 다른 작부체계에서 나타난 결과로 사료된다.

납의 이동성은 농경지 전지역이 Humic level이 oligohumic 상태로 나타나, 토양내 유기물의 분해로 인하여 수소이온 농도 상승과 유기물과 결합된 납이 유기물 분해 시 계속적인 용출이 발생될 것으로 사료되어 이에 영향을 받을 것으로 예상되는 adsorbed fraction, carbonate fraction, reducible fraction 및 organic fraction이 부분적으로 용출될 것으로 예상된다. 특히 이 부분은 총량의 3.7%~36.5%를 차지하여 17.4 mg/kg~87.8 mg/kg의 납이 경작지 토양에서 erosion이나 경작활동에 의해서 주변 생

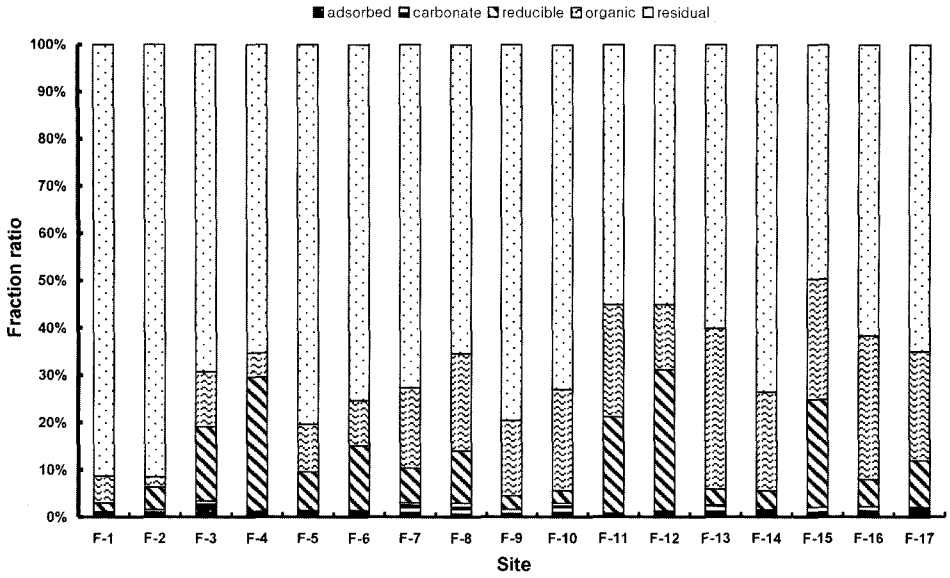

Fig. 4. Fractional composition of lead (Pb) in the cultivated land soils.

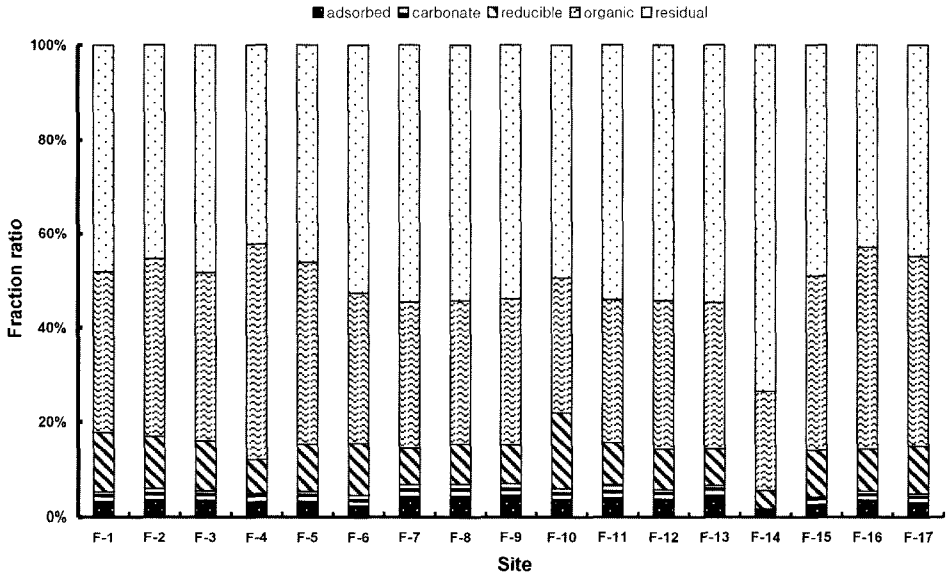

Fig. 5. Fractional composition of nickel (Ni) in the cultivated land soils.

태계로 이동 가능성 있을 것으로 사료된다(Fig. 4).

니켈은 다른 중금속과는 달리 석회광업소의 배출수가 유입되는 지역의 밭 토양에서 carbonate fraction과 residual fraction이 높은 값으로 나타났다. 이러한 현상은 석회광산의 특징인 높은 석회성분의 영향으로 사료된다.

니켈의 이동성은 농경지 전지역이 Humic level이 oligohumic 상태로 나타나, 토양내 유기물의 분해로 인하여 수소이온 농도 상승과 유기물과 결합된 니켈이 유기물 분해 시 계속적인 용출이 발생될 것으로 사료되어 이에 영향을 받을 것으로 예상되는 adsorbed fraction, carbonate fraction, reducible fraction 및 organic fraction 이 부분적으로 용출될 것으로 예상된다. 특히 이 부분은 총량의 34.7%~50.6%를 차지하여 37.7 mg/kg~231.2 mg/kg 의 니켈이 경작지 토양에서 erosion이나 경작활동에 의해서 주변 생태계로 이동 가능성 있을 것으로 사료된다 (Fig. 5).

아연은 존재형태의 특성상 residual fraction을 제외하고 organic fraction 이 가장 높은 농도로 나타났으며, 일부지

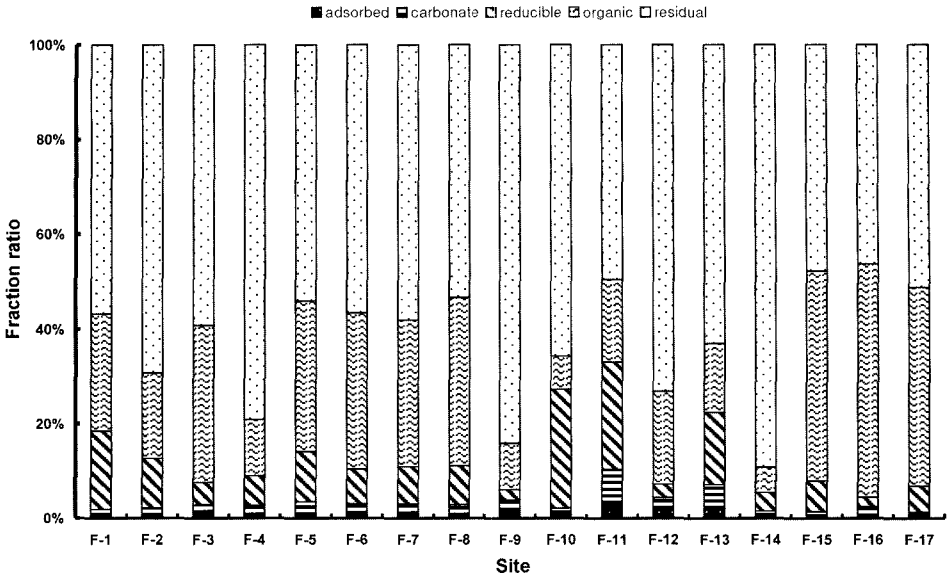

Fig. 6. Fractional composition of zinc (Zn) in the cultivated land soils.

역의 논 토양에서는 organic fraction 보다는 redcible fraction이 높은 값을 보였다. 특히 폐탄광의 산성광산배수가 유입되는 지역의 밭 토양에서는 다른 지역과는 달리 organic fraction과 reducible fraction 비율이 상당히 낮은 값을 나타내 경작 활동 시 주변 하천을 이용하여 농경수로 사용되었을 것으로 예상된다.

아연의 이동성은 농경지 전지역이 Humic level이 oligohumic 상태로 나타나, 토양내 유기물의 분해로 인하여 수소이온 농도 상승과 유기물과 결합된 니켈이 유기물 분해 시 계속적인 용출이 발생될 것으로 사료되어 이에 영향을 받을 것으로 예상되는 adsorbed fraction, carbonate fraction, reducible fraction 및 organic fraction이 부분적으로 용출 될 것으로 사료된다. 특히 이 부분은 총량의 7.0%~51.7%를 차지하여 22.8 mg/kg~610.5 mg/kg의 아연이 경작지 토양에서 erosion이나 경작활동에 의해서 주변 생태계로 이동 가능성 있을 것으로 사료된다(Fig. 6).

아연의 이동 가능성이 제일 높게 나타난 지역은 옥동 폐탄광의 산성광산배수가 유입되는 지역의 밭 토양에서 가장 높게 나타났으며, 옥동천 중·하류에 위치한 와룡교 지역의 논 토양에서 가장 낮게 나타나 아연에 의한 재배작물이나 주변 생태계에 미치는 영향은 산성광산배수를 농업용수로 이용하는 옥동탄광 지역의 밭 토양이 제일 클 것으로 사료된다.

(2) 중금속 존재형태에 따른 오염판단기준 설정.

연구지역 폐탄광과 휴·폐금속광산 및 광재댐에 대한 토양오염에 대해 휴 · 폐금속광산 및 탄광, 폐재처리장(광재댐)에 대한 오염 가능성에 대한 우선 순위 산정이 필요하며 이에 따라 자연생태계 복구우선순위를 결정할 수 있다.

이러한 복구우선 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 복구우선순위를 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 갱내수와 침출수, 식물체에서의 중금속에 의한 오염정도를 기준으로 설정되어야 한다[1]. 그러나, 우리나라와 외국에서의 광산지역에서 배출되는 중금속에 의한 오염판단기준의 설정이 명확하게 제시된 바 없다.

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

토양오염평가지수는 중금속의 존재형태별 분석된 자료

를 각 step마다 분석치를 Interdepartmental Committee on the Redevelopment of Committee Land(ICRCL)[12,13]에서 나타낸 오염판단기준의 수치로 나눈 후 분석된 원소인 Cd, Cu, Pb, Ni, Zn의 합을 원소의 수로 나눈 값을 토양오염평가지수(Soil Pollution Assesment Index)로 결정하였으며, 토양오염 분류는 Non polluted, Weakly polluted, Moderately polluted, Heavily polluted로 나누었다.

Non polluted는 인위적 산업활동에 의해 오염되지 않은 토양으로 자연 함유량 범위에 포함된 농도 로 인간의 건강에는 영향을 미치지 않는 중금속의 농도를 말한다[18].

Weakly polluted는 오염된 토양으로 인정되나 오염의 정도는 약한 상태로 영국의 런던시의 오염토양분류기준 1에 해당되는 범위를 나타낸다[12,13].

Moderately polluted는 토양이 산업이나 경작 등과 같은 인위적 활동에 의해 상당히 오염되어 있는 상태를 의미하며 런던시의 오염토양분류기준 2에 해당되는 범위이며, Heavily polluted는 산업활동과 같은 인간의 활동에 의해 토양이 비정상적으로 심하게 오염된 상태로 최악의 토양오염상태로 오염토양분류기준 3~4에 해당되는 범위이다[12,13].

이렇게 분류된 토양오염판단기준을 경작 방법이나 토양 주변 환경에 따라 존재형태에 의해 분석된 중금속의 농도를 오염토양분류기준에 의해 기준을 설정하였다.

존재형태에 따른 총량에 대한 중금속 토양오염판단기준은 전지역에서 non polluted와 weakly polluted 범위를 전부 초과하였으며, moderately polluted는 상동광업소 지역과 광재댐 지역의 농경지인 정점 F-5, F-7과 석회광산 지역의 밭 토양인 정점 F-15와 옥동 폐탄광 지역으로 그 지역에서 발생된 폐재와 산성광산배수의 영향을 받았을 것으로 예상되는 밭 토양과 논 토양인 정점 F-15, F-16, F-17에서 초과하는 값으로 나타났다.

Heavily polluted를 상회하거나 기준에 해당하는 지역은 전 정점에서 나타나지 않았다.

경작지 토양이 풍화과정과 농작물의 재배나 경윤에 의한 환경 영향을 제일 많이 받을 것으로 예측되는 adsorbed fraction과 carbonate fraction의 합인 labile한 상태 토양오염판단기준은 구광재댐 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.

경작지 토양이 경작활동 및 환경 변화에 의해 혐기적 조건의 형태를 유지하게 될 때 예상되는 labile한 형태의 토양오염판단기준은 옥동천 상류에 위치한 폐탄광지역의 밭 토양인 정점 F-1과 옥동천 중·하류지역으로 비교적 탄광이나 금속광산의 영향이 적을 것으로 예상되는 가산교 지역의 밭 토양인 정점 F-9와 녹전교 지역의 밭과 논 토양인 정점 F-11 및 F-12, 와룡교 지역의 밭 토양인 정점 F-13을 제외한 전지역에서 non polluted 범위를 초과하였으며, weakly polluted 및 moderately polluted, heavily polluted는 옥동천 주변지역의 농경지에서 토양오염판단기준을 상회하거나 기준 점에 해당되는 지역이 전 정점에서 나타나지 않았다.

토양의 유기물의 분해로 인하여 이동성이 가중될 것으로 예상되는 labile한 형태의 토양오염판단기준은 옥동천 상류에 위치한 폐 탄광지역의 밭 토양인 정점 F-1을 제외한 전지역에서 non polluted 범위를 초과하였으며, weakly polluted는 석회광산이 개갱 중인 지역의 밭 토양인 정점 F-15와 옥동 폐탄광 지역으로 그 지역에서 발생된 폐재와 산성광산배수의 영향을 받았을 것으로 예상되는 밭 토양과 논 토양인 정점 F-15, F-16에서 초과하는 값으로 나타났다. 그러나 moderately polluted와 heavily polluted는 토양오염판단기준 이하로 나타났다. 위와 같은 결과는 존재형태에서 분석된 총량에 대한 중금속의 토양오염판단기준이 농경지 환경의 영향을 받을 것으로 예상되는 존재형태의 각 부분의 기준수치보다 상대적으로 용출 되거나 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)[19]과 농업토목학적방법인 반전심경, 객토, 배토, 배토객토 등과 같은 방법에 적절히 복원 방안을 제시하기 어렵거나 지나친 높은 토양오염판단기준 제시로 인하여 발생되는 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

Table 4. 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.

합한 농도에 대한 오염평가 지수는 Table 4에 두었다.

4. 결 론

본 연구에서는 옥동천 유역 경작지를 대상으로 주변 휴 · 폐금속광산에서 발생된 폐재에 의해 중금속에 대한 오염도를 평가하기 위해 연속추출법을 통한 경작지 토양 중 중금속의 존재형태 분석을 수행하였고, 이 결과를 이용하여 토양오염평가지수(SPAI)를 산출하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 경작지 토양의 pH는 대부분이 약산성으로 나타났으나 금속광산지역의 밭 토양에서는 지역 토양통과는 달리 알카리성으로 나타났다.

2. 구리를 제외한 중금속 대부분이 휴 · 폐 금속광산지역의 경작지보다는 산성광산배수의 유 입량이 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 정점에서non polluted 범위를 초과 하였으며, 옥동 폐탄광 및 개갱 중인 석회광산 지역에서 moderately polluted을 상회하거 나 기준 점에 해당되는 값을 나타내어 이 지역이 우선적으로 경작지 복원 방안이 이루어 져야 할 것으로 판단된다.

4. 총량에 대한 토양오염판단기준이 농경지 환경의 영향을 받을 것으로 예상되는 존재형태 의 각 부분의 기준 수치보다 높게 평가되고 있다. 따라서 경작지의 토양의 특성이나 경작 방법에 따라 토양오염판단기준 산정 방법에 차이를 두어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Park, Y.A. "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 (1996).
2. Forstner, U. and Salomon, W., Mobilization of metals from sediments, Metals and Their compound in environment, Ed. by E, Merian, pp. 379-398 (1991).
3. Jung, M.C., Heavy metal contamination of soil, plants, waters and sediments in the vicinity of metalliferous mine in Korea, Ph.D thesis, University of London, p. 455 (1995).
4. Sengupta, M. "Environmental impacts of mine drainage on streams of United States". *Env. Geol. Water Sci.*, **11**, pp. 141-152 (1993).
5. Davis, J.A. and Leckie, J.O. "Surface ionization and complexation at the oxide/water interface", *Journal of Colloid and Interface Science*, **67**, pp. 90-107 (1978).
6. Tessier, A., P.G.C. Campbell, and M. Bisson. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace

metals. *Analytical Chemistry*, **51**(7), pp. 844-851 (1979).
7. Park, Y.A. "Distribution and transportation of fine-grained sediments on the innercontinental shelf off the Kuem river estuary", *Korea, J. of Geo. Soc. of Korea*, **20**(2), pp. 154-168 (1984).
8. Shepard, F.P. "Nomenclature Based on sand-silt-clay ratios", *J. Sed. Pet.*, **24**, pp. 151-158 (1954).
9. Folk, R. L. "A Review of grain-size Parameters", *Sedimentology*, **6**, pp. 73-93 (1966)
10. Gaudette, H.E. and Flight, W.R. "Inexpensive titration of organic carbon in recent sediment", *J. Sed. Petro.*, **44**, pp. 24-253 (1974).
11. Hakanson, L. and M. Jansson, Principles of lake sedimentology. Springer -Verlag, Berlin, 316p (1983).
12. Kelly, R. T., Site investigation and material problems, in Reclamation of Contaminated Land. B2/1-B2/12. Society of Chemical Industry (1980).
13. Hobson, M., Rational site investigation. In: Contaminated Land problems and solutions. Ed. T. Cairney. Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall Press (1993).
14. Alloway, B. J., Soil processes and the behavior of metals, In "Heavy metals in soils (Alloway, B. J. (ed))" : Blackie and Son, pp. 7-28 (1990).
15. Bowen, H.J.M. Environmental chemistry of the elements, Academic press, London (1979).
16. Istvan, P. and Jones Jr. Trace elements, CRC., Lucie Press (1997).
17. Kloke, A. Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, nikel in plants grown on contaminated soil: UN-ECE Symp (1979).
18. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, Australian and New Zealand Guidelines for the Assessment and management of contaminated sites, National Health and Medical Research Council. (1992).
19. Kim, S.H. and H.T. Jun, Contamination of heavy metals in soils and stream sediments in the vicinity of the sambo Pb-Zn-Barite mine, *Econ. Environ. Geol.*, **26**, 271-226 (1993).