

경남 고성 구리광산 지역의 중금속 오염특성

정철현¹ · 박현주² · 정일현² · 나춘기^{2*}

¹대한광업진흥공사 개발사업팀, ²목포대학교 환경공학과

Pollution Property of Heavy Metal in Goseong Cu Mine Area, Kyungsangnam-do, Korea

Chul Hyun Jung¹, Hyun Ju Park², Il Hyun Chung² and Choon Ki Na^{2*}

¹Domestic Mineral Development Team, Korea Resources Corporation

²Department of Environmental Engineering, Mokpo National University

In order to evaluate the degree and extent of heavy metal pollution and the environmental impacts of abandoned Cu mines in Goseong-gun, soils and paddies were collected from the mine area and have been analysed for heavy metal contents. The heavy metal contents were much higher in mountain soils than in paddy soils. Total content of heavy metals decreased in order of Cu>Zn>Pb>As>Cr>Cd in mountain soils whereas Zn>Pb>Cu>Cr>As>Cd in paddy soils. The extractable amount of heavy metals by 0.1/1N HCl decreased in order of Cu>Pb>Zn>As>Cd>Cr in mountain soils whereas Pb>Cu>Zn>As>Cd>Cr in paddy soils. Although the extraction ratios were highly various depending on the sampling site, their average values were in order of Cd(16%)>Pb(10%)>Cu(9%)>As(4.5%)>Zn-Cr(≤2.5%). The soils investigated were enriched in heavy metals relative to the averages of earth crust as in order of As≥Cd>Pb>Zn>Cu>Cr. Pollution index calculated from total or extractable heavy metals of soils indicated that the heavy metal pollution was restricted to mountain soils around abandoned Cu mines, especially the Samsan I mine. The metal contents of brown rice showed no significantly contaminated level as follows; As nd~0.87 mg/kg, Cd 0.02~0.34 mg/kg, Cu 1.01~6.25 mg/kg, Mn 13.4~43.2 mg/kg, Pb 0.09~2.83 mg/kg, and Zn 16.5~79.1 mg/kg. From the extraction and dispersion properties of heavy metal with the soil pH (4.5~7.8), it can be deduced the conclusion that the heavy metal pollution is spreading in the study area mainly by the detrital migration of waste ore and gangue minerals rather than the dissolution and circulation of heavy metal.

Key words : Goseong Cu mine, Soil, Brown rice, Heavy metal, EF, PI

고성군에 위치한 폐구리광산의 중금속 오염범위와 정도 및 환경위해성을 평가하기 위하여 광산지역으로부터 토양과 벼를 채취하여 중금속 함량을 분석하였다. 중금속 함량은 논토양에 비해 산토양에서 훨씬 높았다. 중금속 전함량은 산토양에서 Cu>Zn>Pb>As>Cr>Cd, 논토양에서 Zn>Pb>Cu>Cr>As>Cd 순으로 감소하였으며, 0.1/1N HCl에 의한 중금속 용출량은 산토양에서 Cu>Pb>Zn>As>Cd>Cr, 논토양에서 Pb>Cu>Zn>As>Cd>Cr 순으로 나타났다. 중금속 용출비는 시료채취지점에 따라 매우 다양하였지만 평균적으로는 Cd(16%)>Pb(10%)>Cu(9%)>As(4.5%)>Zn-Cr(≤2.5%)의 순이었다. 조사대상 토양들은 지각평균값에 비해 중금속이 부화되어 있으며 그 순서는 As≥Cd>Pb>Zn>Cu>Cr 이었다. 토양의 중금속 전함량 또는 용출량으로부터 계산한 오염지수는 중금속 오염이 폐구리광산 특히 삼산제일광산 주변의 산토양에 국한되어 있음을 나타내었다. 현미 중의 중금속함량은 As nd~0.87 mg/kg, Cd 0.02~0.34 mg/kg, Cu 1.01~6.25 mg/kg, Mn 13.4~43.2 mg/kg, Pb 0.09~2.83 mg/kg 및 Zn 16.5~79.1 mg/kg으로 심각하게 오염된 수준은 아니었다. 토양 pH와 함께 중금속의 용출 및 분포특성들은 이 지역 중금속 오염의 대부분이 중금속의 용해·순환보다는 폐광석과 맥석광물의 쇄설성 이동에 의해 진행되고 있음을 시사하였다.

주요어 : 고성구리광산, 토양, 현미, 중금속, 부화지수, 오염지수

*Corresponding author: nack@mokpo.ac.kr

1. 서 론

토양을 오염시키는 물질들은 다양하나 이들 중 가장 심각한 오염원은 우리나라 전국에 산재되어 있는 휴·폐광산이다(Kim, 2005; Ahn *et al.*, 1999). 이 광산들은 적절한 환경보호조치 없이 방치된 상태로 광미, 폐석, 광산폐수 등에 의해 주변 환경을 오염시키고 있다. 금속광산의 폐석은 유해한 중금속을 다량 함유하고 있으며, 주변환경을 강하게 산성화시켜 환경 중에 유해 금속원소의 농도를 증가시킨다. 또한 대부분 광산의 하부지역에는 농경지가 발달되어 있어 각종 농작물에 대한 피해는 물론 지역주민의 환경위생적 측면에서도 많은 위해를 끼치고 있을 것으로 예상되어 이에 대한 적절한 조치가 요구되고 있다.

현재 국내에는 1,000개소 이상의 폐금속 광산과 함께 수많은 크고 작은 광미 적치장이 완전 복구되지 않은 상태로 방치되어 있는 것으로 알려져 있다. 또한 산업화의 촉진과 개발지역의 확대로 생활공간이 광산지역과 근접되어 생태계 환경과 건강에 미치는 영향에 대한 불안감이 가중되고 있다(Lee *et al.*, 2004). 최근 토양 및 수환경에서의 중금속 오염에 관한 일반인들의 인식이 매우 높아짐에 따라 이들 휴·폐광산에 방치된 광미, 폐광석 및 갭내폐수로부터 발생하는 중금속 오염물질이 주변수계 및 하부 농경지에 미치는 환경적 영향에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Ahn *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 2004).

경남 고성군 삼산면 일대는 다수의 구리광산이 산재되어 있다. 현재는 모두 폐광되어 수많은 폐석과 광미가 그대로 방치되어 있을 뿐만 아니라 이들 폐광산 주변과 하류지역에 농경지와 주거지가 위치하고 있어 광해의 위험성이 매우 높은 지역으로 그에 대한 적절한 관리 및 복원이 요구되고 있다. 특히 경남 고성군 삼산면 병산리의 경우, 2004년 6월에 광산 주변에 거주하는 주민들이 카드뮴 중독으로 인한 '이타이이타이병'의 발병 가능성이 있다는 언론 보도가 있었다. 그 후, 인근 주민들의 카드뮴 중독에 의한 '이타이이타이병'의 심 증세와 관련하여 정부와 환경단체 등에 의해 역학 조사와 함께 폐광산 주변 토양과 농산물의 중금속 오염에 대한 조사가 진행되고 있다(Korea Ministry of Environment, 2004; Korea Ministry of Agriculture *et al.*, 2006). 또한 2005년부터 삼산제일광산의 광미 적치장에 대한 광해방지사업이 시행되고 있다.

일반적으로 광미와 폐광석으로 기인한 오염물질은 하류방향으로 점진적으로 오염을 확산시키는 특성을 가

지고 있다(Na *et al.*, 1997). 폐금속 광산을 효율적이고 경제적으로 복원 및 처리하고 인근 주민들의 건강과 농산물의 오염을 방지하기 위해서는 무엇보다도 오염원소, 오염정도, 확산범위 및 위해성 평가 등에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 고성군 삼산면 병산리 일대의 폐광산 주변토양과 농경지 토양에 대한 중금속 오염실태를 조사하였으며, 이를 지각 및 우리나라 토양의 평균 중금속 함량과 비교하여 중금속 오염정도 및 범위를 평가하였다. 또한 토양에 함유된 중금속 함량과 경작되는 벼의 농축량을 조사하기 위하여 토양 채취지점과 동일한 지점에서 자라는 벼의 중금속 함량을 측정하였다. 이상의 결과를 바탕으로 폐구리광산에 의한 주변 환경의 중금속 오염정도와 범위, 중금속별 위해성 등을 평가, 제시함으로써 폐광산 복원을 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 지질 및 광산개요

경상남도 고성군 삼산면 병산리에 소재하는 삼산광산은 경상남도 남부 연안의 중앙부 최남단에 자리 잡고 있으며, 총면적은 35.51 km²이다. 광산의 등록 광종은 금, 은, 구리, 연 및 아연으로 주로 구리를 생산하였다. 광산 주변의 지질(Fig. 1a)은 안산암질암과 퇴적암류로 구성되어 있으며 석영반암, 분암 등이 발달되어 있다(KORES, 1984; Choi *et al.*, 1994). 안산암질암은 회록색 내지 회백색을 띠고 있으며 구성광물은 사장석, 각섬석이 주를 이루고, 부성분 광물로는 소량의 석영, 녹염석 및 황철석 등이 산출되고 있다(Choi *et al.*, 1994).

광산은 안산암질암내에 발달한 열극을 충진한 합동 석영맥으로서 광맥은 N10°W~N10°E와 N35°~70°W 주향과 70°SW~80°NE의 경사를 보여주고 있다(Kim *et al.*, 2004). 특히 삼산제일광산의 갭도 아래에는 다량의 폐광석이 적치되어 있고 그 하부에 광미 적치장이 있다. 광미 적치장에 적치된 광미의 양은 약 28만 톤으로 추정되며, 이는 주변 환경에 대한 가장 중요한 중금속 오염원이 되고 있다(Lee *et al.*, 2004; Yeon *et al.*, 2005).

지맥은 동북에서 서남으로, 지세는 서북이 높고 동남이 낮은 편이며 높은 산은 없지만 비교적 경사가 가파르다. 산과 산의 골짜기(충적층)는 모두 농경지로 조성되어 있으며 주로 벼농사를 하고 있다. 농경지 양쪽에 발달되어있는 수계는 상류에 조성된 저수지와 연결

되어 있으며 대부분 인공적 제방을 갖춘 농수로로 개발되어있어, 폐광산의 침식물이 농경지로 직접 유입되는 것을 방지하는 역할을 하고 있다(Fig. 1b).

3. 시료채취 및 실험방법

광산지역 토양의 전체적인 중금속 분포양상을 파악하기 위하여 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 연구지역의 최북단부터 최남단까지 직선거리 약 3km에 이르는 지

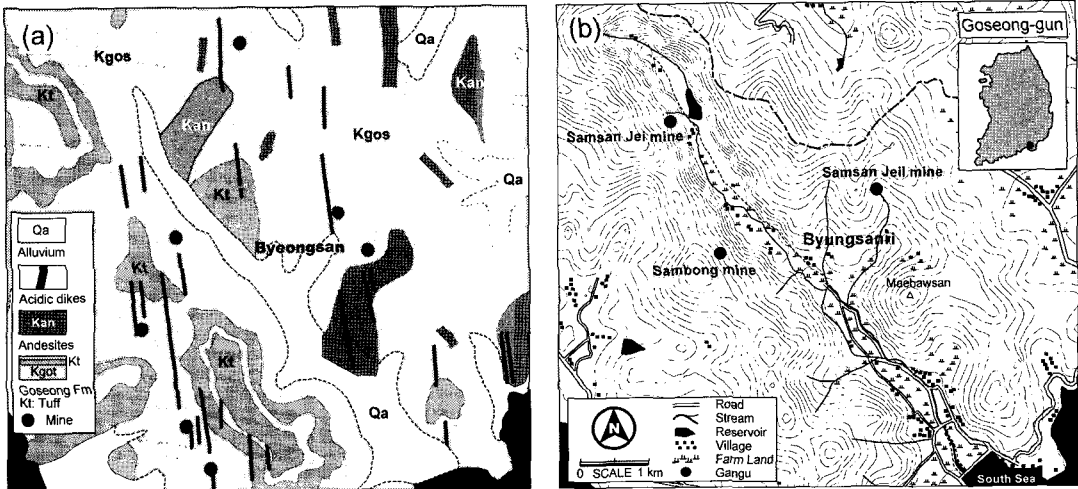


Fig. 1. Geological and topographical maps of Goseong Cu mine area in Kyungsangnam-do, Korea.

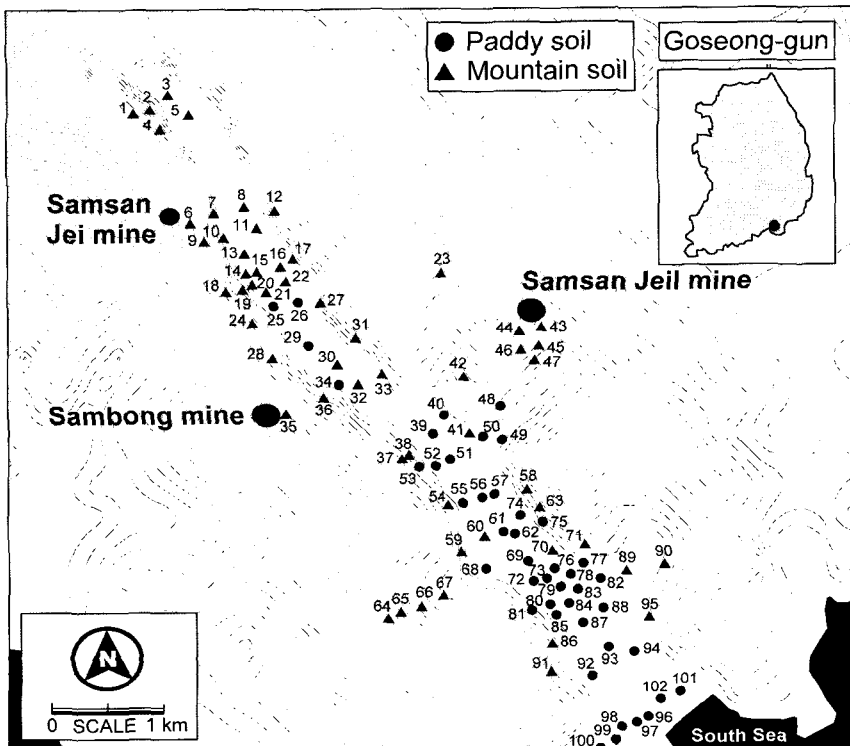


Fig. 2. Sample locations in the study area.

역에서 57개의 산토양과 45개의 논토양을 채취하였다. 토양시료의 채취는 지표하 10~20cm의 토양을 대상으로 각 채취점을 대표할 수 있도록 1m² 정도의 면적에서 소량씩 채취하여 혼합한 것을 하나의 채취점 시료로 하였다. 채취된 토양은 실험실에서 약 1주간 자연건조 시키고 전기건조기(100±5°C)를 이용하여 완전 건조 시킨 후 체분리를 통해 10 mesh 이하만을 분석용 시료로 이용하였다. 10 mesh 이하의 토양시료는 사분법에 의해 그 일부를 분취하여 pH 측정에 사용하였으며, 나머지는 100 mesh 이하로 분쇄하여 화학분석용 시료로 사용하였다. 연구지역에서 경작하는 벼의 중금속 함유량을 조사하기 위하여 논토양과 동일한 채취점에서 벼를 채취하였다. 벼는 건조하지 않은 상태에서 수작업으로 도정한 다음 증류수로 수회 세척하고 건조기를 이용하여 60°C에서 12시간 이상 건조하였다. 건조된 도정 벼(이하 현미)는 아게이트 유발을 이용하여 100 mesh 이하로 분쇄하였다.

토양시료는 혼합산(HNO₃+HF+HClO₄)에 의한 완전용해법과 0.1N과 1N HCl 용액을 이용하는 토양오염공정시험법에 따라 전처리하였다. 또한 토양 중에 함유되어 있는 중금속 원소들의 존재형태별 함량을 측정하기 위하여 일부 토양시료들을 대상으로 Tessier *et al.*(1979)이 제시한 연속추출법을 실시하였다.

현미시료는 식품공전 중금속 시험법 중 건식회화법을 이용하여 전처리하였다(KFDA, 2006). 건조된 현미시료(≤100 mesh) 5~20 g을 도가니에 취해 전기로를 이용하여 550°C에서 2시간 정도 회화하였다. 회화가 끝난 시료는 소량의 증류수로 적신 후 염산 2~4 ml를 가하고 열판상에서 건조한 다음 적정량의 0.5 N 질산을 가하여 2시간 가온하였다. 불용물이 있는 시료는 0.45 μm 여과지로 여과한 다음 일정량으로 희석하여

분석용액으로 사용하였다.

이상과 같은 방법으로 전처리한 분석용액 중의 중금속 함량은 대한광업진흥공사와 목포대학교의 ICP-AES 및 ICP-MS를 이용하여 As, Cu, Cd, Pb, Zn, Cr, Mn, Fe 등을 정량분석 하였다. 각 시료 중의 중금속 함량은 건조중량을 기준으로 환산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 토양중의 중금속

고성구리광산 주변 토양의 중금속 오염범위를 전반적으로 파악하기 위하여 삼산광산을 중심으로 채취된 57개의 산토양과 45개의 논토양을 대상으로 각각의 중금속 전함량과 토양오염공정시험법에 따른 중금속 용출량을 조사하였다.

연구지역의 산토양과 논토양의 As와 중금속 전함량을 분석하여 그 범위와 평균을 Table 1에 나타내었다. 산토양의 중금속 전함량은 Cd nd~22.4 mg/kg, Cr 17.2~78.7 mg/kg, Cu 10~11,468 mg/kg, Pb 10~2,075 mg/kg, Zn 51~1,844 mg/kg으로 매우 넓은 범위를 보였으며, 평균값 기준 Cu>Zn>Pb>Cr>Cd 순으로 높았다. 논토양의 중금속 전함량은 Cd 0.6~8.8 mg/kg, Cr 17.6~118.8 mg/kg, Pb 21~203 mg/kg, Zn 104~224 mg/kg으로 산토양에 비해 훨씬 낮은 수준을 보였으며, 평균값 기준 Zn>Pb>Cu>Cr>Cd 순으로 높게 함유된 특성을 보여 산토양과 다른 중금속 부화특성을 나타냈다. As의 전함량 역시 산토양의 경우 nd~607 mg/kg(52.3±109 mg/kg)으로 논토양 1.0~107 mg/kg(17.7±15.9 mg/kg)에 비해 평균 3배 이상 높은 값을 보였다. 연구지역 토양 중의 중금속 전함량은 Bowen(1979)이 제시한 토양평균값에 비해 논토양

Table 1. Total heavy metals in mountain and paddy soils (mg/kg).

		Pb	Zn	Cu	Cd	Cr	As
Mountain Soil	min	10.22	51.23	10.00	0.00	17.20	0.00
	max	2075.49	1843.76	11467.65	22.37	78.71	606.60
	mean	205.00	229.54	598.33	3.06	37.64	52.28
	stdev	412.56	238.15	1797.53	4.26	11.33	109.65
Paddy Soil	min	20.90	103.82	26.48	0.60	17.56	1.00
	max	202.91	223.80	213.21	8.78	118.82	107.12
	mean	72.37	172.28	64.42	2.10	37.71	17.74
	stdev	27.50	27.10	36.33	1.65	18.10	15.93
Tolerable value*		100	300	100	3	100	20
Normal value**		35	90	30	0.35	-	6

* Klocke(1979), ** Bowen(1979)

과 산토양 모두 높은 값을 보였다. 또한 Kloke(1979)가 제시한 토양의 중금속 허용농도와 비교했을 때 논토양의 경우 모든 중금속이 허용농도 이하였으나, 산토양의 경우 Zn을 제외한 모든 중금속이 허용농도 이상이었다. 연구지역 광산들의 주요 광종인 Cu와 각 원소들의 상관성은 전체 토양에서는 Cd(0.756)>Pb(0.746)>Zn(0.613)>As(0.493)>Cr(0.05)의 순으로 낮아졌다(Fig. 3). 산토양에서의 Cu와 각 원소의 상관성은 Cd(0.791)>Pb(0.746)>Zn(0.605)>As(0.475)>Cr(0.094)의 순이었으나 논토양의 경우 Cu와 상관성은 Cd(0.528)>As(0.446)>Pb(0.358)>Cr(0.011)>Zn(0.050)순으로 나타났다.

토양오염공정시험법에 의해 측정된 산토양과 논토양의 중금속 용출량을 토양 pH와 함께 Table 2에 나타내었다. 연구지역 산토양의 pH는 4.1~7.4의 범위와 5.34 ± 0.75 의 평균과 표준편차를 보였으며, 논토양의 pH는 4.9~7.4의 범위와 5.73 ± 0.65 의 평균과 표준편차를 보여 산토양이 논토양에 비해 약간 더 산성화되어있는 경향을 나타냈다. 이는 환경부의 2005년 토양 측정망(Korea Ministry of Environment, 2005)에서 측정된 우리나라 금속광산지역의 토양 평균 pH 6.09와 전국 논토양 평균 pH 6.12에 비해 낮은 값으로 연구지역의 토양이 약간 더 산성화되어 있음을 알 수 있었다.

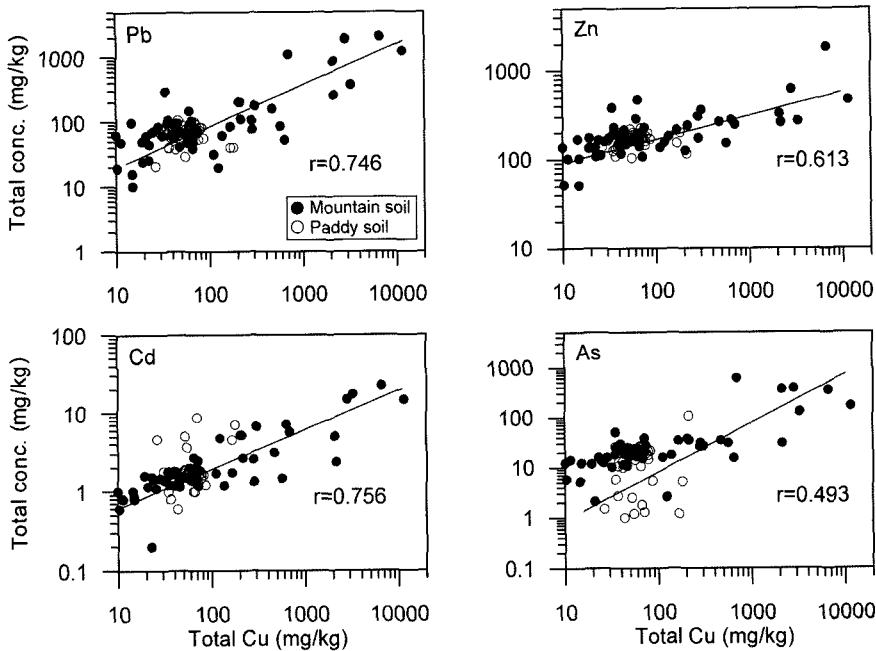


Fig. 3. Correlation between total Cu and the other heavy metals in the soil of Goseong Cu mine area.

Table 2. Soil pH and 0.1N/1N HCl extractable heavy metal concentration from mountain and paddy soils (mg/kg).

		pH	Pb	Zn	Cu	Cd	Cr	As
Mountain soil	min	4.05	1.14	0.20	0.33	0.10	0.00	0.00
	max	7.36	176	273	1463	3.37	0.66	12.89
	mean	5.34	15.45	10.99	74.0	0.33	0.01	0.61
	stdev	0.75	36.57	48.58	294	0.58	0.12	2.41
Paddy soil	min	4.90	1.91	1.20	1.81	0.11	0.00	0.03
	max	7.35	11.92	10.32	18.20	0.45	0.11	4.43
	mean	5.73	6.32	3.49	6.09	0.26	0.00	0.48
	stdev	0.65	2.30	1.76	3.54	0.07	0.02	0.65
mean of paddy soil*		6.12	6.37	78.17	4.22	0.09	0.00	0.23
mean of mine area*		6.09	9.78	112.5	13.78	0.23	0.03	1.62

*Korea Ministry of Environment(2005)

0.1 N HCl에 의한 토양 중의 Cu 용출량은 0.33~1,463 mg/kg으로 매우 넓은 범위를 보였으며, 산토양의 경우 74 ± 294 mg/kg, 논토양의 경우 6.09 ± 3.54 mg/kg의 평균과 표준편차를 나타냈다. 이는 환경부의 토양측정망에서 측정된 우리나라 논토양의 Cu 평균값 4.22 mg/kg 보다 높은 값이며, 산토양의 경우 우리나라 금속광산 지역 평균 13.78 mg/kg 보다 5배 이상 높은 값이다(Korea Ministry of Environment, 2005). 논토양의 경우 Cu에 대한 우리나라 토양오염우려 기준인 50 mg/kg을 초과한 지점은 없었으나, 산토양의 경우 삼산제일광산과 제이광산 주변 하부토양 8개 지점에서 토양오염우려기준을 초과하는 값이 검출되었다. 0.1N HCl에 의한 토양 중의 Pb 용출량은 1.14~176 mg/kg으로, 산토양이 15.45 ± 36.6 mg/kg, 논토양이 6.32 ± 2.3 mg/kg의 평균과 표준편차를 보였다. 논토양의 Pb 평균값은 우리나라 논토양의 평균값 6.37 mg/kg과 비슷한 수준이었으나 산토양의 평균값은 금속광산지역 평균값인 9.78 mg/kg 보다 높은 수준을 보였다. 그러나 우리나라 토양오염우려기준인 100 mg/kg 보다는 훨씬 낮은 값으로 조사지역에서 Pb 오염을 우려할 수준은 아니었다. 0.1N HCl에 의한 Cd 용출량은 0.1~3.37 mg/kg의 범위를 보였으며 산토양은 0.33 ± 0.58 mg/kg, 논토양은 0.26 ± 0.07 mg/kg의 평균과 표준편차를 각각

나타냈다. 이는 우리나라 논토양 및 금속광산지역의 평균 Cd 함량 0.23 mg/kg 및 1.62 mg/kg과 비슷하거나 낮은 값이다. 또한 우리나라 토양오염우려기준인 1.5 mg/kg을 초과한 지점은 삼산제이광산 하부 한 지점뿐이었다. 연구지역은 2004년 6월 인근 주민에 대한 ‘이타이타이병’의 발병 가능성이 제기될 정도로 Cd 오염에 대한 우려가 매우 높았다. 그러나 조사지역 토양에서 검출된 Cd 용출량은 이 지역의 Cd 오염이 타 지역에 비해 심각한 수준이 아님을 나타내고 있다. 1N HCl에 의한 As 용출량은 산토양에서 $nd \sim 12.89$ mg/kg (0.61 ± 2.41 mg/kg)의 범위를, 논토양에서 0.03~4.43 mg/kg (0.48 ± 0.65 mg/kg)의 범위를 보였다. 연구지역 토양의 1N HCl 가용성 As 평균값은 우리나라 산토양 평균값 0.23 mg/kg보다는 높았으나 금속광산지역 평균값 1.62 mg/kg 보다는 낮았다. 또한 As의 토양오염우려기준인 6 mg/kg을 초과하는 지점은 산토양 한지점뿐이었다. 0.1N HCl에 의한 Cr 용출량은 $nd \sim 0.66$ mg/kg의 범위를 보였으며 산토양에서는 0.01 ± 0.12 mg/kg, 논토양에서는 0.002 ± 0.02 mg/kg으로 대부분의 채취지점에서 검출한계 이하로 분석되었다. 한편 1N HCl 가용성 Zn 함량의 경우 농도범위가 0.2~273 mg/kg으로 넓었으나 그 변동폭의 대부분을 산토양이 차지하여 10.99 ± 48.6 mg/kg, 논토양은 3.49 ± 1.76 mg/kg

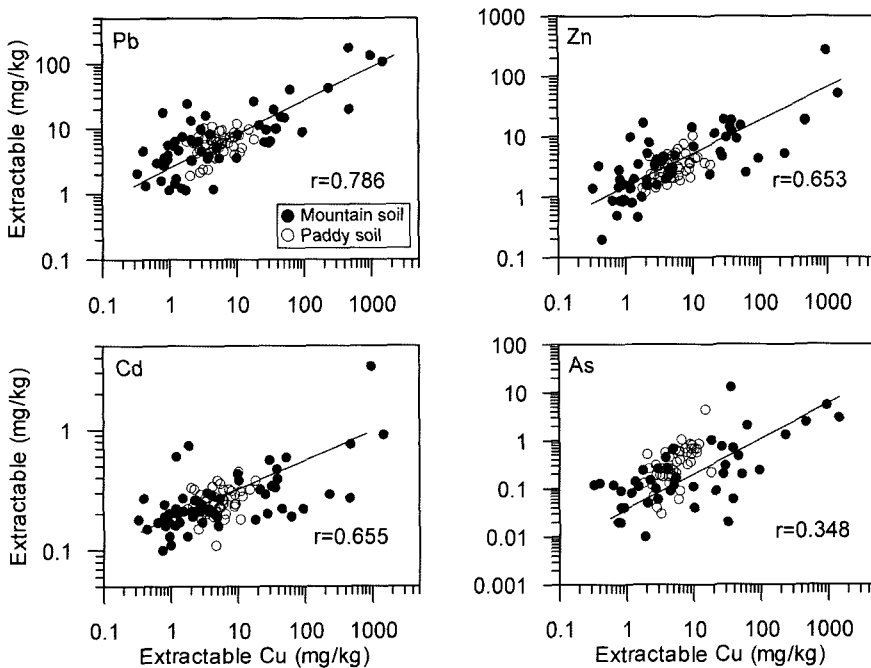


Fig. 4. Correlation between extractable Cu and the other heavy metals from the soil of Goseong Cu mine area.

의 평균과 표준편차를 각각 나타냈다. Cu와 각 중금속 용출량간 상관성(Fig. 4)은 산토양의 경우 Pb가 0.780으로 가장 높았고 Cd 0.655, Zn 0.653, As 0.360의 순으로 낮아졌으나, 논토양의 경우 As가 0.533으로 가장 높았고 Cd, Pb 및 Zn은 0.326~0.368로 거의 비슷한 수준을 보여, 토양에 따라 다르게 나타났다.

중금속 전환량에 대한 0.1/1N HCl 가용성 중금속의 용출비율은 토양의 채취지점에 따라 편차가 컸으나 평균값 기준으로 Cd이 16%로 가장 높았고 Pb 10%, Cu 9%, As 4.5%, Zn과 Cr은 2.5% 이하의 순으로 낮아졌다. 산토양과 논토양간 용출비율 차이는 대부분의 중금속에서 1% 내외로 큰 차이가 없었지만 As의 경우 산토양에서는 1%만이 용출되는데 반해 논토양에서는 8%가 용출되어 유의한 차이를 보였다.

4.2. 토양 중금속의 존재형태

토양내에 함유되어 있는 각 중금속의 존재형태에 대한 정보를 얻기 위하여 토양의 Cu 함량 전체범위를 반영할 수 있도록 논토양과 산토양을 각각 6개 지점씩을 선택한 다음 연속추출법을 적용하였다. Fig. 5는 토양내의 Cu 전환량과 각 추출단계에서 추출된 Cu 함량 및 백분율을 나타낸 것으로 비록 정비례적이지는 않지만 대체로 Cu 전환량이 증가할수록 논토양의 경우 잔류형태(5단계)의 비율이, 산토양의 경우 오히려 잔류형태의 비율이 감소하면서 Fe-Mn 산화물 형태(3단계)의 추출비율이 각각 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 차이는 비록 논토양과 산토양의 Cu 전환량 차이가 매우 커 직접 비교하기 어렵지만 토양에 따라 Cu 공급원이 서로 다름을 시사한다. 즉, 산토양에서의 Cu 부화는 폐광석으로부터 산화물 형태의 Cu가 혼입되어 부화되는 반면 논토양에서의 Cu는 산화물 형태의 폐구리광석의 혼입 보다는 규산염광물과 같이 화학적 내구성이 강한 형태의 Cu 공급원에 의해서 부화되었음을 추론할 수 있다. 각 중금속의 단계별 평균 추출물을 산토양과 논토양으로 나누어 Fig. 6에 비교하여 나타내었다. 각 중금속별 비잔류 형태(가용태) 비율은 Fig. 6에 나타난 순서와 같이 Cu>Pb>Zn>As>Cr>Cd 순으로 낮아졌으며, 그 평균값은 각각 약 55%, 46%, 40%, 23%, 18%, 7% 정도였다. 비잔류 형태의 비율이 높은 Cu, Pb 및 Zn은 공통적으로 다른 중금속 원소에 비해 Fe-Mn 산화물태의 비율이 높아지는 특성을 보였다. 토양별로 비교하면 Cu와 Zn은 산토양에서, As는 논토양에서 상대적으로 높은 가용태 비율을 나타내었으나 Pb, Cu 및 Cd은 토양별 차이를 보

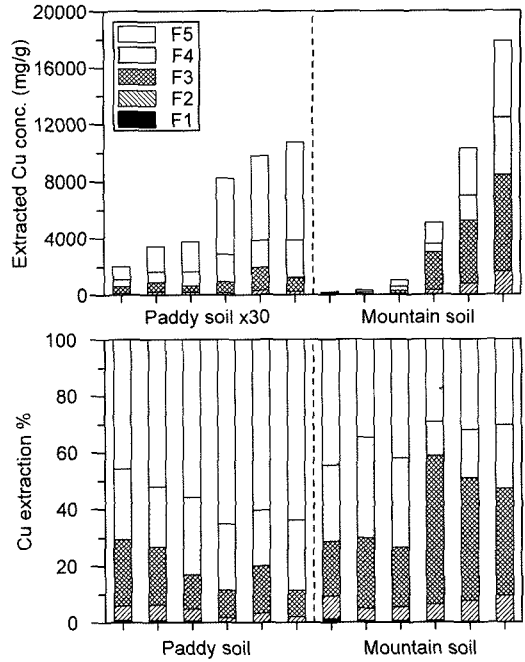


Fig. 5. Each fraction of Cu in mountain and paddy soils of Geseong Cu mine area by sequential extraction analyses.

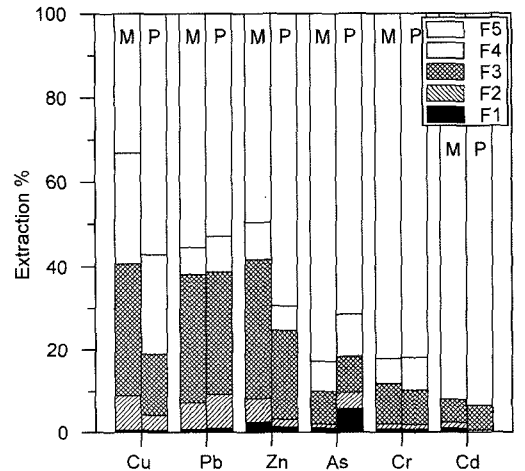


Fig. 6. Average each fraction % of heavy metals in mountain(M) and paddy(P) soils of Geseong Cu mine area by sequential extraction analyses.

이지 않았다. 특히 Cu의 경우 산토양에서는 Fe-Mn 산화물태(31.7%)>유기물-황화물태(26%)로 Fe-Mn 산화물태가 우세한 반면 논토양에서는 유기물-황화물태(24%)>Fe-Mn 산화물태(14.8%)로 환원형태의 비율이 상대적으로 우세한 특성을 보여 서로 다른 Cu 공급원 또는 분산메커니즘을 가지고 있음을 시사하였다. 또한

환경변화에 따라 쉽게 이동할 수 있는 교환태와 탄산염태의 존재비율은 산토양(9%)과 논토양(4%) 모두 비교적 낮게 나타났으나, 다량의 Cu를 함유하고 있는 산토양 일부지점의 경우 이들 존재형태의 추출농도가 384~1,674 mg/kg으로 토양오염대책기준(125 mg/kg)을 초과하는 수준이었다. Pb의 경우 교환태와 탄산염태의 존재비율이 산토양(7%)과 논토양(9%) 모두에서 낮게 나타났으나 전함량이 매우 높은 산토양에서는 토양오염우려기준(100 mg/kg)에 근접한 수준의 추출농도를 나타내었다. Cd의 경우 전반적으로 잔류태가 90% 이상으로 Cu나 Pb에 비해 이동 가능성이 상대적으로 낮았으나 역시 Cd 전함량이 높은 산토양에서 그 추출농도가 토양오염우려기준(1.5 mg/kg)을 초과하는 수준을 나타내었다. As의 존재형태는 산토양(잔류태≥82%)에 비해 논토양(잔류태≥73%)에서 높은 이동성을 나타냈으나 전함량 수준이 낮아 우려할 정도의 추출함량을 보이지 않았다. 다만 As 전함량이 높은 산토양의 경우 비록 교환태와 탄산염태의 존재비율이 낮을지라도 그 추출농도가 토양오염우려기준(5 mg/kg)과 비슷하거나 초과하는 수준으로 높았다.

이상의 결과를 종합하면 Cd, As 및 Cr은 비교적 강하게 결합되어 있는 잔류형태가 주를 이루는 반면에 Cu, Zn 및 Pb는 상대적으로 환경변화에 따라 이동 가능한 형태가 많았다. 또한 교환태와 탄산염태의 중금속 존재비율이 낮을지라도 전함량이 높은 폐광산 주변 토양의 경우 그 추출농도가 토양오염우려기준을 초과하고 있어, 이에 대한 적절한 대책이 요구되었다.

4.3. 토양 오염도 평가

4.3.1. 오염지수(Pollution Index, PI)

여러 가지의 중금속과 비소를 복합적으로 고려하여 종합적인 중금속 오염도 평가를 위해 오염지수(PI)를 이용하였다. 오염지수가 1.0 이상이면 평균적으로 토양 중의 중금속 함량이 허용 한계치 이상임을 나타낼 뿐만 아니라 인위적 또는 자연적인 요인에 의해 오염되었음을 의미한다. 오염지수는 식 (1)을 이용하여 산출하였다.

$$PI = \frac{\sum(C_i/L_i)}{n}, \quad i=1 \text{ to } n \quad (1)$$

여기서 C_i 는 중금속 i 의 토양내 함량, L_i 는 중금속 i 의 토양오염기준치, n 은 오염지수 산출에 이용한 중금속 개수이다. 원전용해법에 의한 중금속 전함량의 오염지

수는 Kloke(1979)가 제시한 토양오염 허용한계치 (tolerable level)인 Cu 100, Pb 100, Cd 3, Cr 100, As 20, Zn 300 mg/kg을 Li로, 토양오염공정시험법에 의한 0.1N/1N HCl 가용성 중금속 함량의 오염지수는 우리나라 토양오염우려기준치(Korea Ministry of Environment, 2004)인 Cu 50, Pb 100, Cd 1.5, As 6 mg/kg을 Li로 이용하여 산출하였다.

Kloke의 허용한계치를 기준으로 산출한 중금속 전함량의 오염지수는 산토양이 0.2~23.7, 논토양이 0.33~2.0의 범위로 나타났다. 산토양의 오염지수 평균값은 산술평균 2.13, 기하평균 0.89로 나타났으며, 오염도 기준인 1.0을 초과하는 지점은 총 57개 지점 중 17개 지점으로 약 30% 정도였다. 특히 삼봉광산과 삼산제일광산 주변 토양인 MS 35와 MS 43 및 MS 45 지점에서 오염지수 10 이상의 높은 오염도를 보였다. 산토양의 오염지수를 가중시킨 주요 원소는 As, Cu 및 Pb로 각각의 허용한계치를 초과하는 지점은 전체 토양의 47%, 33% 및 28%에 달하였다. 한편 논토양의 오염지수 평균값은 산술평균 0.65, 기하평균 0.62로, 오염도 기준인 1.0을 초과하는 지점은 총 45개 지점 중 2개 지점에 불과하였다.

0.1N/1N HCl 가용성 중금속 함량에 대해 토양오염우려기준으로 산출한 오염지수는 산토양의 경우 0.02~5.27 범위로 산술평균 0.33, 기하평균 0.09로 평균오염도가 낮았으나 폐광산 하부 4개 지점에서 오염지수가 1.0을 초과하였다. 이에 반해 논토양의 오염지수는 0.02~0.23의 범위로 그 오염정도가 토양오염우려기준에 훨씬 미치지 못하였다.

Fig. 7은 중금속 전함량 및 용출량을 바탕으로 산출한 오염지수값이 1 이상을 나타내는 토양범위를 보여 주고 있다. 전함량 측면에서의 토양오염허용한계치를 초과하는 토양은 삼산제일광산, 삼봉광산, 삼산제일광산을 중심으로 폭넓게 분포되어 있는 반면, 용출량 측면에서의 우리나라 토양오염 우려기준치를 초과하는 토양은 삼산제일광산 주변과 삼산제일광산과 삼봉광산, 삼봉광산과 삼산제일광산 사이에 국부적으로 분포되어 있는 경향을 보였다.

4.3.2. 부화지수(Enrichment factor, EF)

부화지수는 토양과 퇴적물의 구성광물 중에서 점토 광물의 구성비율을 고려하여 중금속의 함량을 보정하는 방법이다(Zollar *et al.*, 1974). 점토광물의 비표면적은 다른 규산염광물에 비해 상대적으로 넓고, 영구적인 음전하를 띠고 있어 중금속과 미량원소 등과 같은

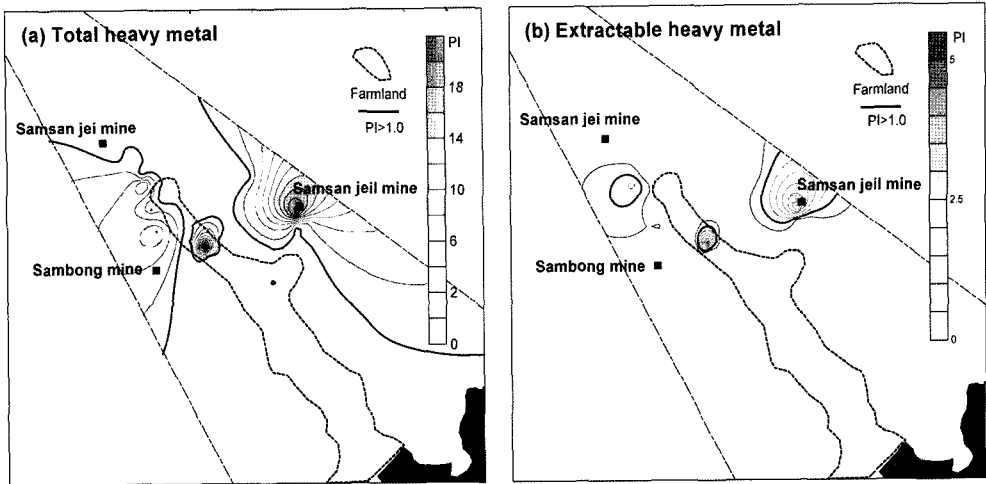


Fig. 7. Distribution of pollution index calculated from (a) total and (b) 0.1/1.0N HCl-extractable heavy metals in soils of Goseong Cu mine area.

Table 3. Calculated enrichment factor for total heavy metal in soils.

		Pb	Zn	Cu	Cr	Cd	As
mountain Soil	min	1.44	2.36	0.34	0.13	0.00	0.00
	max	65.45	51.04	110.72	2.01	64.91	270.00
	mean	11.42	7.14	7.10	0.52	18.08	21.64
	stdev	13.49	6.63	17.37	0.26	11.71	37.39
Paddy Soil	min	1.07	2.05	0.37	0.21	10.58	0.38
	max	10.52	12.94	3.06	1.50	38.50	41.67
	mean	6.71	6.10	1.55	0.51	16.53	12.19
	stdev	2.17	1.86	0.61	0.20	5.73	7.78
Earth crust*		15	40	55	100	0.15	2

*Average crustal abundance data from Matsui and Okazaki(1993)

양이온을 흡착하는 능력이 매우 뛰어난 광물이다. 즉, 토양과 퇴적물층의 점토광물의 구성비율이 증가하면 중금속의 함량이 상대적으로 많아지게 된다. 그러므로 중금속 오염을 평가할 때, 일반적으로 이들 점토광물의 상대적인 비율로 나누어 중금속 함량을 보정하여 오염 정도를 판단한다. 그러나 점토광물의 구성비율을 직접적으로 구하는 방법이 없으므로, 간접적으로 점토광물을 대표할 수 있는 보존성 원소로 Al 혹은 Fe의 함량으로 나누어 보정을 하는 것이 일반적이다.

연구지역 토양의 중금속 부화지수(EF)는 완전용해법과 토양오염공정시험법에 의해 얻어진 중금속 함량과 Fe 함량을 이용하여 식 (2)에 의해 산출하였다.

$$EF = \frac{(C_i/Fe)_s}{(C_i/Fe)_M} \quad (2)$$

여기서 $(C_i/Fe)_s$ 는 각 시료의 중금속 함량과 Fe 함량의

비율이며, $(C_i/Fe)_M$ 은 토양의 중금속 평균함량과 Fe 평균함량의 비율이다. 토양의 평균값은 지역에 따라 매우 다양하기 때문에 본 연구에서는 완전용해법에 의한 중금속 총함량에 대해서는 Matsui and Okazaki(1993)에 의해 제시된 지각 중의 중금속 평균함량을, 토양오염공정시험법에 의한 중금속 용출함량에 대해서는 우리나라 토양의 중금속 평균함량(Korea Ministry of Environment, 2005)을 각각 사용하였다.

지각평균 대비 연구지역 토양의 중금속 부화지수를 Table 3에 정리하였다. 산토양의 중금속 부화지수는 $As > Cd > Pb > Zn \geq Cu > Cr$ 순으로, Cr을 제외한 모든 원소의 평균값이 1 이상이었다. 이는 조사지역내 산토양의 중금속 함량이 지각평균에 비해 부화되어 있음을 의미한다. 산토양에서 가장 부화지수가 높은 원소는 As로 평균 21.64, 최대 270에 달하였다. Cd의 부화지수는 평균 18.08과 0~64.91의 범위를 보였으며 SS 7

지점을 제외하고 모두 4 이상이었다. Pb의 부화지수는 1.44~65.45로 평균 11.42 였으며, Zn은 2.36~51.04의 범위와 7.14의 평균값을 보였다. Cu의 부화지수는 평균 7.1과 0.34~110의 범위를 보였으며 8지점에서 평균값을 초과하였고 MS 35 지점에서 110으로 가장 높았다. 산토양 중 가장 낮은 부화지수를 나타낸 Cr은 0.13~2.01의 범위와 0.52의 평균값을 보였다.

한편 논토양의 중금속 부화지수는 Cd>As>Pb>Zn>Cu>Cr 순으로 나타났으며 산토양에 비해 낮은 값을 보였다. 논토양에서는 가장 높은 부화지수를 보이는 Cd은 평균 18.08로 산토양에 비해 낮았으나 그 범위가 10.58~38.50으로 모든 토양이 10 이상으로 높았다. Pb의 부화지수는 6.17의 평균과 1.07~10.51의 범위를, As는 평균 12.19와 0.38~41.7의 범위를 보였다. Cu의 부화지수는 0.37~3.06으로 산토양에 비해 매우 낮은 부화지수를 보였다. Zn의 부화지수는 2.05~12.94의 범위와 평균 6.1로 산토양과 비슷한 값을 나타냈다. 논토양에서 부화지수가 가장 낮은 원소는 산토양과 마찬가지로 Cr이었으며 그 범위와 평균값도 0.21~1.5와 0.51로 산토양과 거의 중복되었다.

토양오염공정시험법을 적용하여 추출한 연구지역 토양의 중금속 함량을 우리나라 토양의 평균함량과 대비

시켜 부화지수를 산출하고 그 결과를 Table 4에 정리하였다. Pb의 부화지수는 산토양에서 1.12~81.6의 범위와 9.37의 평균을, 논토양에서 1.26~7.46의 범위와 4.04의 평균을 보여 산토양이 논토양보다 2배 이상 높은 부화지수를 나타냈다. Cu의 경우 산토양에서는 1.18~1195의 범위와 69.8의 평균 부화지수를 보였으며, 논토양에서는 2.29~17.09 범위 및 6.32의 평균 부화지수를 나타내 산토양이 논토양보다 11배 높았다. Cd의 부화지수는 산토양과 논토양의 평균 0.79와 0.07로 모두 1 이하로 나타났다. As의 부화지수는 산토양의 경우 0~633의 범위와 18.65의 평균을 보였으며, 논토양에서 0.56~69.72의 범위와 10.99의 평균을 나타냈다. 즉, 논토양에서는 As의 부화지수가, 산토양에서는 Cu의 부화지수가 가장 높게 나타나 토양에 따라 서로 다른 특징을 보였다.

4.4. 벼(현미)의 중금속

4.4.1. 벼의 중금속 함량

광산 주변 논토양과 동일지점에서 채취된 벼(현미)의 중금속 함량을 Table 5에 나타내었다. 현재 우리나라 농산물 중금속 기준 중 쌀에 대한 중금속 기준은 Cd(0.2 mg/kg)에 대한 기준만 설정되어 있는 실정이다

Table 4. Calculated enrichment factor for 0.1 and 1.0N HCl extractable heavy metal from soils.

		Pb	Zn	Cu	Cd	As
mountain Soil	min	1.12	0.03	1.18	0.00	0.00
	max	81.64	13.30	1195.87	38.99	633.12
	mean	9.37	0.66	69.82	0.79	18.65
	stdev	13.76	1.77	215.48	5.17	83.83
Paddy Soil	min	1.26	0.05	2.29	0.00	0.56
	max	7.46	0.45	17.09	3.37	69.72
	mean	4.04	0.19	6.32	0.07	10.99
	stdev	1.38	0.10	3.35	0.50	11.02
Korea soil*		6.16	77.32	3.77	0.08	0.17

*Average extractable concentration data from Korea Ministry of Environment(2005)

Table 5. Heavy metal concentrations in the brown rice from Goseong Cu mine area.

		Pb	Zn	Cu	Mn	Cd	As	Cr
Goseong	min	0.017	16.50	1.01	13.37	0.020	0.000	0.039
	max	0.109	79.12	6.25	43.15	0.339	0.870	2.899
	mean	0.059	24.36	3.39	30.33	0.094	0.130	0.640
average ^a		0.12	6.59	0.92	4.59	0.019	0.09	-
average ^b		0.064	-	2.408	-	0.019	0.142	-
Gubong mine ^c		0.01	0.18	0.14	-	0.24	0.005	-
Kyungbuk, Daegu ^d		0.067	19.44	3.71	19.61	0.33	0.098	0.17

^aKim et al.(2000), ^bKorea Ministry of Environment (2004)

^cAhn et al.(1999), ^dKim et al. (2004)

(Korea Ministry of Agriculture *et al.*, 2006). 이에 따라 연구지역 벼의 중금속 함량은 농림부의 전국 유통 쌀의 중금속 함량(Kim *et al.*, 2000) 및 일본 등 외국에서 조사된 곡류의 중금속 함량과 비교하였다.

조사지역에서 채취한 벼(현미)의 Cd 함량은 0.02~0.339 mg/kg이었다. 그 평균값은 0.094 mg/kg으로 일본(Pharmaceutical Society of Japan, 1995)에서 보고된 곡류 중 Cd 함량 0.09 mg/kg과 비슷한 수준이나, 영국(Bucke *et al.*, 1983)에서 보고된 곡류 중 Cd 함량 0.02~0.03 mg/kg 및 우리나라 전국 유통 쌀의 Cd 평균 함량 0.03 mg/kg보다는 높은 수준을 보였다. 조사지점(n=45) 중 3개 지점(B 62, B 78 및 B 79)에서 채취한 벼에서 우리나라 쌀의 기준인 0.2 mg/kg을 초과하는 Cd이 검출되었으나 현미를 기준으로 설정되어 있는 일본의 기준값 0.4 mg/kg을 초과하지는 않았다. As 함량은 nd~0.87 mg/kg의 범위와 0.13 mg/kg의 평균을 보였다. 이는 우리나라에서 유통되는 쌀의 평균 As 함량인 0.137 mg/kg(Korea Ministry of Environment, 2004)과 일본에서 조사된 곡류의 As 함량 0.1 mg/kg과 비슷한 수준이다. 그러나 B 72 지점의 벼에서 As 평균 함량보다 6배 이상 높은 0.87 mg/kg을 보였으며 B 34와 B 56 및 B 77 지점의 벼에서도 평균에 비해 높은 값의 As 함량을 보였다. Pb 함량은 0.093~2.827 mg/kg의 범위를 보였으며 평균값은 0.450 mg/kg으로 전국 유통 0.064 mg/kg 및 대구·경북 및 동일 폐광산 지역 쌀의 Pb 함량 0.067 mg/kg 및 0.057 mg/kg에 비해서는 높은 수준이었으나, 일본 현미의 Pb 함량 0.22~

0.46 mg/kg과 비슷한 수준이었다.

벼의 Cu 함량은 3.39 mg/kg 평균 및 1.01~6.25 mg/kg의 범위를 나타내 전국 유통 Cu 평균 함량 2.4 mg/kg 보다 높았다. 그러나 대구·경북 폐광산 지역 쌀의 Cu 함량 3.7 mg/kg과 비슷한 수준이며 동일 폐광산 지역 쌀의 Cu 평균함량 6.9 mg/kg 보다는 낮은 함량이다(Kim *et al.*, 2004). Zn 함량은 평균 24.4 mg/kg으로 전국 유통 9.4 mg/kg 및 일본 곡류의 Zn 함량 9 mg/kg에 비해서는 높은 수준이었으나, 대구·경북 및 동일 폐광산 지역 쌀의 Zn 함량 19.4 mg/kg 및 25 mg/kg과 비슷한 수준이었다. 벼의 Mn 평균함량은 30 mg/kg으로 우리나라에서 유통 중인 쌀의 Mn 함량 9.5 mg/kg에 비해서는 물론 대구·경북 폐광산 지역 쌀의 Mn 함량 20 mg/kg 보다도 높은 수준이었다. 그러나 쌀에 대한 이들 금속성분의 기준이 설정되어 있지 않으며 Cu, Zn, Mn 등은 우리 체내에서 없어서는 안될 필수 무기질 성분으로 과잉섭취에 의한 위해성을 평가하기는 어렵다.

4.4.2. 토양과 벼의 중금속간 상관성

벼와 서식 농토양의 중금속 함량간의 상관성을 알아보기 위하여 벼(현미)중의 중금속 함량에 대한 농토양 중의 중금속 전함량과 용출량을 도시해 본 결과, Fig. 8에 나타낸 바와 같이 양자간의 상관성이 매우 낮음을 알 수 있다. 이처럼 토양과 서식식물의 중금속 함량이 서로 낮은 상관성을 보이는 것은 식물이 이용 가능한 형태로 존재하는 중금속 함량이 토양의 중금속 함량뿐

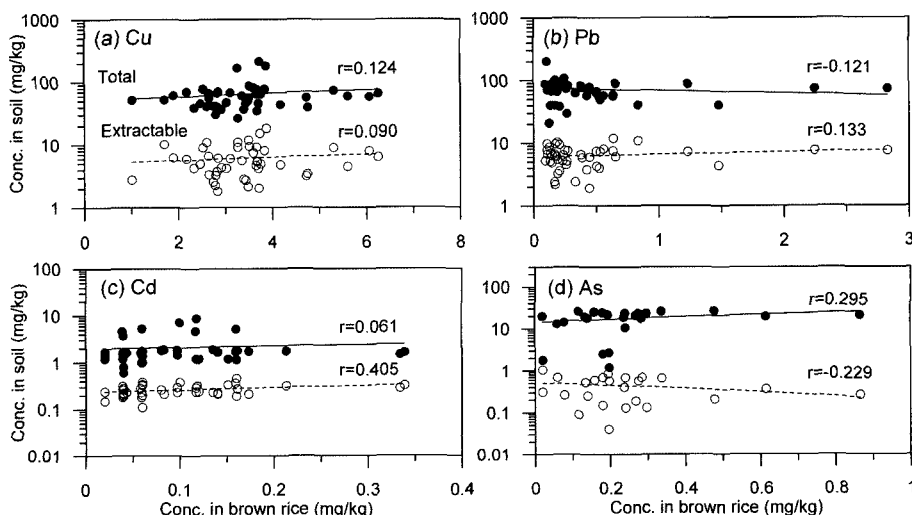


Fig. 8. Correlation of heavy metals between brown rice and its growing soil of Goseong Cu mine area.

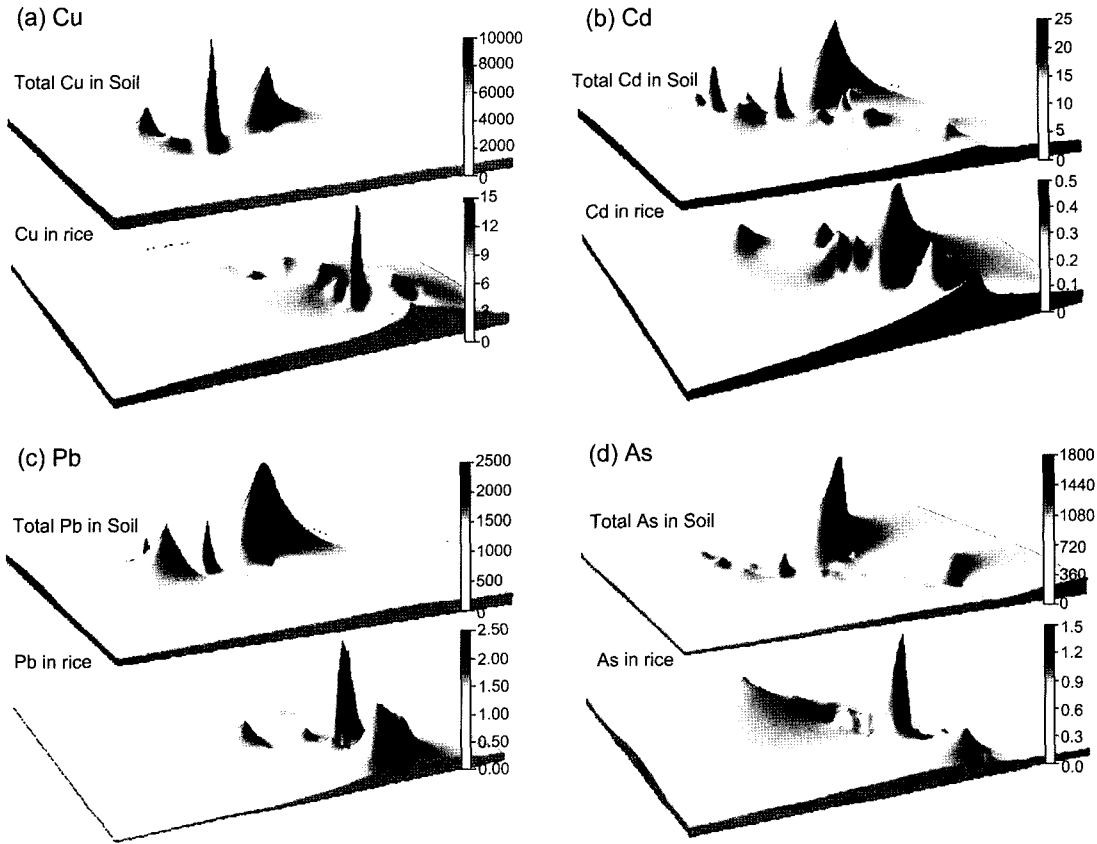


Fig. 9. Trend surface distributions of total Cu, Cd, Pb and As in soil and brown rice collected from Goseong Cu mine area.

만 아니라 식물생육 기간 중 토양의 환경조건에 따라 달라지기 때문으로 생각된다. 특히 논작물이라는 벼의 생육환경과 산화환경에서 이동성이 좋은 Cu, Cd, Zn 과 환원환경에서 이동성이 좋은 Mn이 벼내에서 서로 부의 상관성을 갖는 사실을 고려할 때 침수와 비침수에 따른 논토양의 산화환원조건 차이가 논토양내 중금속 이동성과 벼의 중금속 흡수를 지배하는 요인으로 작용했음을 알 수 있다. Iwata *et al.*(1980)은 벼의 Cd 흡수억제 대책으로 물관리가 필요하며, 특히 벼는 주로 이삭이 형성된 후에 Cd의 대부분을 흡수하기 때문에 이 시기에 논의 물관리 상태에 따라 생산되는 벼의 Cd 함량이 크게 달라진다고 주장하였다. 또 다른 요인으로는 중금속 원소들의 분산과 농축메커니즘의 차이를 들 수 있다. Fig. 9는 논토양과 벼의 중금속 함량 분포특성을 나타낸 것으로 토양은 대부분 폐광산 주변에서 중금속 부화대가 형성되는 반면 벼는 폐광산 주변보다는 오히려 하류지역에서 중금속 부화대가 형성되는 특성을 보여주고 있다. 이러한 특성은 토양과

식물간의 중금속 농축 메커니즘을 고려할 때 광산 주변 토양의 중금속 부화대가 주로 폐광석의 쇄설성 이동에 의해 형성되었으며, 이들 부화대로부터 일부 중금속이 용해되어 자연수 순환과 함께 하류지역으로 용존상의 중금속이 확산되고 있음을 시사한다.

5. 결 론

경남 고성군 삼산면 일대의 폐구리 광산 주변에 방치된 폐광석 및 광미에 의한 중금속 오염특성 및 위해성을 평가하기 위하여 토양과 벼의 중금속 함량과 분포특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 토양의 중금속 전함량은 산토양이 $Cu > Zn > Pb > As > Cr > Cd$, 논토양이 $Zn > Pb > Cu > Cr > As > Cd$ 의 순으로 높은 값을 보여 서로 다른 부화특성을 나타내었다. Kloke가 제시한 중금속 허용한계치를 바탕으로 산출한 오염지수는 논토양의 경우 0.65 ± 0.38 로 전체

의 4%가, 산토양의 경우 2.13 ± 4.45 로 전체의 30%가 1을 초과하는 수준을 나타내었다.

2) 공해공정시험법에 의한 토양의 중금속 용출량은 산토양이 $Cu > Pb > Zn > As > Cd > Cr$, 논토양이 $Pb > Cu > Zn > As > Cd > Cr$ 의 순으로 높은 값을 나타내었으며, 전함량에 대한 용출비율은 토양의 채취지점에 따라 편차가 컸으나 평균적으로 Cd이 16%로 가장 높았고 Pb 10%, Cu 9%, As 4.5%, Zn과 Cr은 2.5% 이하의 순으로 낮아졌다. 우리나라 토양오염우려기준치를 바탕으로 산출한 오염지수는 산토양 0.33 ± 1.20 , 논토양 0.07 ± 0.04 로 4개 지점의 산토양을 제외하고는 모두 1 미만의 수준이었다.

3) 중금속별 가용태 분율은 $Cu(55%) > Pb(46%) > Zn(40%) > As(23%) > Cr(18%) > Cd(7%)$ 순이었으며, Cu와 Zn은 산토양에서, As는 논토양에서 상대적으로 높은 가용태 분율을 나타내었으나 Pb, Cu 및 Cd은 토양별 차이를 보이지 않았다. 가용태의 분율이 높은 Cu, Pb 및 Zn은 공통적으로 Fe-Mn 산화물태가 차지하는 비율이 높아지는 특성을 보였다.

4) 조사지역에서 산출되는 현미 중의 중금속 함량은 $As \text{ nd} \sim 0.87(0.13 \pm 0.18) \text{ mg/kg}$, $Cd \text{ nd} \sim 0.02 \sim 0.34 (0.09 \pm 0.07) \text{ mg/kg}$, $Cu \text{ nd} \sim 1.01 \sim 6.25(3.39 \pm 1.05) \text{ mg/kg}$, $Mn \text{ nd} \sim 13.4 \sim 43.2(30.33 \pm 6.85) \text{ mg/kg}$, $Pb \text{ nd} \sim 0.09 \sim 2.83(0.45 \pm 0.54) \text{ mg/kg}$, $Zn \text{ nd} \sim 16.5 \sim 79.1(24.36 \pm 9.06) \text{ mg/kg}$ 으로 우리나라에서 유통되는 쌀의 평균함량에 비해서는 높았으나 Mn을 제외하고는 모두 우리나라 폐광산 지역 및 일본의 평균함량과 비슷하거나 낮은 수준이었다. 이타이타이병의 발병원인 물질인 Cd의 함량은 모두 일본의 기준(현미 $< 0.4 \text{ mg/kg}$)을 만족하였으나 전체 45개 시료 중 3개 시료에서 우리나라 기준인 0.2 mg/kg 을 초과하였다.

5) 약산성 내지 중성의 토양 pH는 중금속 용출 및 분산특성과 함께 경남 고성군 삼산면 일대의 폐구리광산에 의한 중금속 오염이 대부분 폐광산 주변에 방치된 폐광석의 침식·풍화산물 및 광미의 쇄설성 이동에 의해 진행되고 있음을 시사하였다.

참고문헌

- Ahn Joo Sung, Chon Hyo Taek, Son Ah Jeong, Kim Kyoung Woong (1999) Arsenic and Heavy Metal Contamination and Their Uptake by Rice Crops around the Kubong Au - Ag mine, Korea. J. of KSGE, v. 36, p. 159-169.
- Bowen, H.J.M. (1979) Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press, London.
- Bucke, D., Norton, M.G. and Rolfe, M.S. (1983) Field assessment of effects of dumping wastes at sea. Ministry of Agriculture(Technical Report), v. 29, p. 29.
- Choi Sang Hoon, So Chil Sup, Kweon Soon Hag, Choi Kwang Jun (1994) The Geochemistry of Copper-bearing Hydrothermal Vein Deposits in Goseong Mining District (Samsan Area), Gyeongsang Basin, Korea. Econ. Environ. Geol., v. 27. p. 147-160.
- Iwata, S., Mitsuwa, T. Inoue, O. and Yang, J.X. (1980) Soil Chemistry. Kagugai Publishing Co., Tokyo, Japan, p. 243-267.
- Kim Joung Dae (2005) Assessment of Pollution Level and Contamination Status on Mine Tailings and Soil in the Vicinity of Disused Metal Mines in Kangwon Province. J. of KSEE, v. 27, p. 388-397.
- Kim Mee Hye, Chang Moon Ik, Chung So Yong, Sho You Sub, and Hong Moo Ki (2000) Trace metal Contents in Cereals, Pulses and Potatoes and Their Safety Evaluations. J. Korean Soc. Food Sci. Nutr., v. 29, p. 364-368.
- Kim Seung Hwan, Jang Moon Ik, Moon Gui Im, Oh Hyun Sook, An Kyung A, Cho Min Jung, Kang Se Mi, Kim Jung A, Yoo Soon Young and Lee Kye Yoong (2004) Studies on Heavy Metal Contamination of Agricultural Products, Soils, and Irrigation waters in Abandoned mins of Daegu · Kyungpook province. The Annual Report of KFDA, v. 8-1, p. 388-397.
- Kloke, A. (1979) Content of arsenic, cadmium, chromium, fluorine, lead, mercury, and nickel in plants grown of contaminated soil. paper presented soil, proceedings of the United Antion-ECE symposium.
- Korea Food & Drug Administration (2006) Food Code, p. 62-72.
- Korea Ministry of Agriculture & Forestry, Korea Ministry of Environment, Korea Ministry of Commerce, Industry and Energy, Korea Food & Drug Administration (2006) The Results of Research on the Actual Condition of Pollution Level in Agricultural Products from the Plain and Abandoned Metal Mine Areas to establish the Heavy Metal Pollution Index and Promotion of Its Countermeasure. p. 1-10.
- Korea Ministry of Environment (2004) The Survey Results of Pollution Level for Agricultural Products in Abandoned Mine area, Goseong-gun, Kyungnam Province. p. 1-8.
- Korea Ministry of Environment (2005) The Soil Monitoring Network and Its Results of Investigation on Actual Condition. p. 3-10.
- Korea Resources Corporation (1984) The Survey Report for Deposits of Samsan Mine.
- Lee Pyeong Koo, Kang Min Ju, Choi Sang Hoon, Shin Seong Cheon (2004) Chemical peciation and Potential Mobility of Heavy Metals in Tailings and Contaminated Soils. Econ. Environ. Geol., v. 37, p. 87-98.
- Matsui, K. and Okazaki, S. (1993) Environmental Soil Science. Asakurasyouten Press, Tokyo, Japan, p. 135.
- Na Choon Ki, Lee Mu Seong, Chung Jae-II (1997) Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils Around the Downstream Area of Abandoned Metal Mine and Efficiency of Reversed Soil Method as Its Remediation. Econ. Environ. Geol., v. 30, p. 123-135.
- Pharmaceutical Society of Japan (1995) Standard Methods

- of Analysis for Hygienic Chemists-With Commentary.
Kumwon Press, Tokyo, Japan.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979),
Sequential extraction procedure for the speciation of
particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, v. 51,
p. 844-851.
- Yeon Kyu Hun, Lee Pyeong Koo, Youm Seung Jun, Choi
Sang Hoon (2005) Contamination and Mobility of

- Toxic Trace Elements in Tailings of Samsanjeil Mine.
Econ. Environ. Geol., v. 38, p. 451-462.
- Zollar, W.H., E.S. Gladney, G.E. Gordon and J.H. Bors
(1974) Emissions of traceelements form coal fired
power plants. *Trace substances in environmental
health*, v. 8, p. 167-172.

2007년 5월 14일 원고접수, 2007년 8월 1일 게재승인.